

---

# CAPITULO 6

---

COAGULACIÓN



## CAPITULO VI

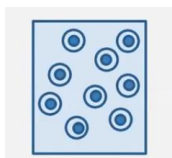
### COAGULACIÓN

#### 6.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los términos floculación y coagulación frecuentemente son usados como sinónimos, ambos significando un proceso integral de aglomeración de partículas. Entre diversas definiciones se tienen las siguientes interpretaciones:

**Coagulación:** Proceso a través del cual los coagulantes son adicionados al agua reduciendo las fuerzas que tienden a mantener separadas las partículas en suspensión. La coagulación comienza en el mismo instante en que se agregan los coagulantes al agua, dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas, entre los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

**Estabilidad de una partícula coloidal** es la capacidad de permanecer como una entidad separada en el agua, es decir en estado disperso.



**Floculación:** Aglomeración de partículas por efecto del transporte del fluido formando partículas de mayor tamaño que son sedimentadas por efecto de la gravedad.



Se llama coagulación-floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con pesos específicos superior al del agua llamadas floc. Dicho proceso se usa para:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no puede sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero y aparente.
- Eliminación de bacterias, virus y organismos patógenos susceptibles a ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros.

La comprensión del proceso de coagulación es pre-requisito esencial para el proyecto de los componentes de una unidad de mezcla rápida.

#### 6.2 MECANISMOS DE LA COAGULACIÓN. (Fuente J.A. Pérez 1997)

La remoción de impurezas del agua en plantas que emplean la coagulación química en general es realizada utilizando sales de hierro y aluminio como coagulante primario y eventualmente polímeros.

Cuatro mecanismos son citados responsables de la coagulación: coagulación por compresión de la doble capa, neutralización de cargas, barrido y puente químico. La definición del mecanismo predominante depende de factores como el pH de coagulación, dosis de coagulante y las características químicas del agua a tratar. En la elección del coagulante debe ser considerado su costo, la eficiencia en la desestabilización de las partículas presentes en el agua a tratar, su capacidad de atenuar fluctuaciones en la calidad del agua sin afectar la eficiencia de la coagulación, el volumen de lodo producido y su influencia sobre la duración en las carreras de filtración, siendo deseable que el coagulante reduzca la pérdida de carga en las unidades de filtración.

### **6.2.1 COAGULACION POR COMPRESIÓN DE LA DOBLE CAPA. MODELO FÍSICO.**

Teniendo en cuenta la estabilidad de las dispersiones coloidales como consecuencia de la doble capa eléctrica, es simple comprender la desestabilización de los coloides por medio de un coagulante.

La Figura 5.3 parte inferior, muestra las dos fuerzas que actúan sobre los coloides, las repulsivas debidas a la carga eléctrica y las atractivas de Van der Waals. La curva de atracción de Van der Waals es fija mientras que la de repulsión eléctrica puede ser disminuida por medio del aumento en la solución de iones de carga opuesta, lo que trae como consecuencia, de una parte, la compresión de la capa difusa debido a que la carga neta del coloide y su capa adherida tienen acción sobre los contraiones de la solución en una distancia menor, por el aumento de la concentración de los cationes; y de otra parte la directa absorción de los contraiones del coagulante por la superficie de los coloides, lo que neutraliza la carga, presentándose ambos efectos simultáneamente, con lo cual el potencial zeta se reduce a cero (punto isoeléctico) y se elimina la barrera de energía, y por lo tanto las partículas puede acercarse suficientemente para ser desestabilizadas por la energía atractiva de Van der Waals.

El mecanismo de compresión de la doble capa es de menor importancia relativa en la coagulación realizada en las plantas de tratamiento convencional.

### **6.2.2. COAGULACIÓN POR CAPTURA DE UN PRECIPITADO DE HIDRÓXIDO METÁLICO (BARRIDO).**

Cuando se excede el producto de solubilidad de los hidróxidos metálicos como el caso del  $\text{Al}(\text{OH})_3(\text{H}_2\text{O})_3$  en las soluciones de sales metálicas como el  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ , se produce una precipitación rápida de los hidróxidos gelatinosos que ocasionan una aglomeración de partículas por barrido, atrapando los coloides. El mecanismo de barrido es caracterizado por altas dosis de coagulante, suficientes para la formación de precipitado de hidróxidos de aluminio y hierro, cuando son utilizados estos elementos como coagulantes, siendo adecuados para plantas con unidades de decantación y flotó-filtración ya que este mecanismo posibilita la formación de flocs mayores facilitando la sedimentación o la flotación. La coagulación por barrido no excluye, sin embargo, de que simultáneamente se produzca también, en parte o en una etapa inicial coagulación por puente químico, e incluso coagulación por adsorción-neutralización. La coagulación corriente, pues, se realiza por medio de diferentes mecanismos que se superponen y complementan.

### **6.2.3 COAGULACIÓN POR NEUTRALIZACIÓN DE CARGAS**

La neutralización de cargas de coloides liofóbicos puede hacerse por:

- Cambio de la concentración de los iones que determina el potencial del coloide.
- Por la adsorción de iones que posean una carga opuesta a las de los iones determinantes del potencial y que sean capaces de remplazar a estos en la capa de Stern.

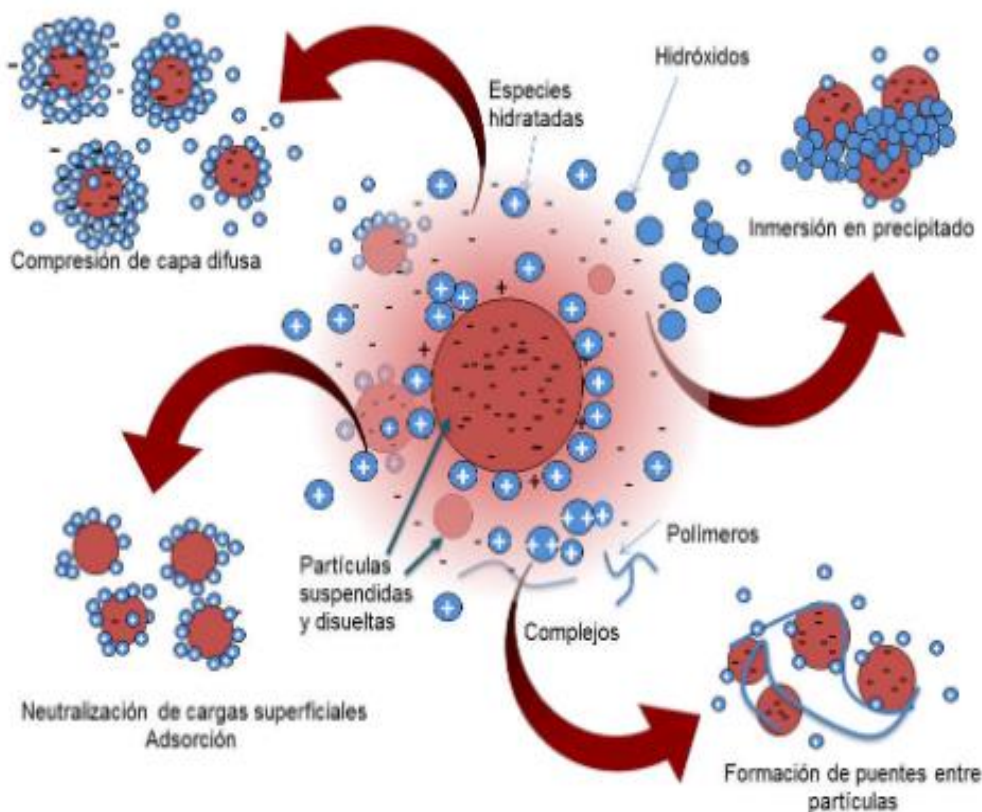
El mecanismo de neutralización de cargas es adecuado en las tecnologías de tratamiento que emplean filtración directa, una vez que en este caso no son formados flóculos grandes, mas si partículas desestabilizadas para ser retenidas en el filtro. En este mecanismo la dosis de coagulante es generalmente menor a la necesaria cuando es empleado el mecanismo de barrido.

#### 6.2.4 COAGULACIÓN POR ADSORCIÓN Y PUENTE INTERPARTICULAR.

Tal como fue mencionado, los coagulante al entrar en contacto con el agua sufren en primer lugar una reacción de hidrólisis e inmediatamente una polimerización que consiste en la formación de largas cadenas tridimensionales con extremos activos, las cuales pueden ser adsorbidas en los sitios vacantes de absorción de los coloides existentes en la suspensión, dejando los extremos extendidos en el agua, los cuales pueden adherirse a otros coloides formando puentes, y por lo tanto ocurre la desestabilización. El mecanismo del puente interparticular es observado principalmente cuando se realiza la aplicación de polímeros como auxiliares de coagulación

#### 6.3 FASES DE LA COAGULACIÓN.

Los modelos que se acaban de discutir simplifican el fenómeno para poderlo analizar, y ninguno de ellos independientemente sino más bien en conjunto, trata de dar una explicación al proceso de la coagulación.



**Figura 6.1 Mecanismos de coagulación de partículas suspendidas y disueltas**  
Fuente: elaboración basada de Arbolera, V.J Teoría, diseño y control de procesos de Clarificación del agua, Segunda ed. 1981.

Desde un punto de vista esquemático, se puede considerar que la coagulación se desarrolla en cinco fases consecutivas o simultáneas que explican reacciones físicas y químicas, de la siguiente forma:

Primera fase. Hidrólisis de los coagulantes y desestabilización de las partículas existentes en la suspensión;

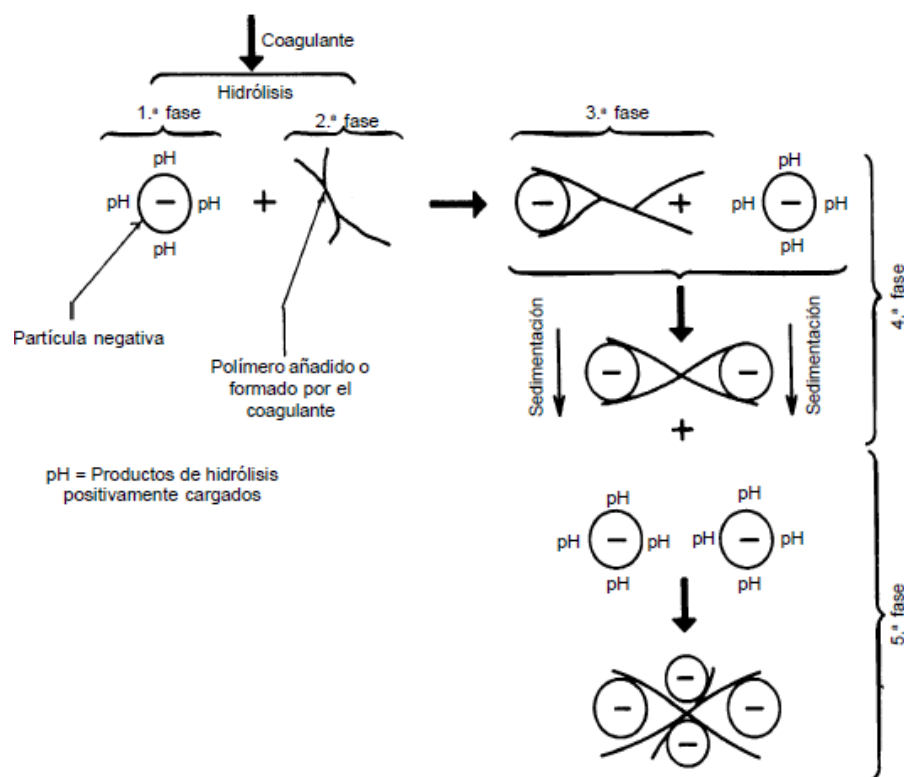
Segunda fase. Precipitación y formación de compuestos químicos que se polimerizan;

Tercera fase. Adsorción de las cadenas poliméricas en la superficie de los coloides;

Cuarta fase. Adsorción mutua entre coloides; y

Quinta fase. Acción de barrido.

La figura 6.1 presenta en forma esquemática las cinco fases descritas.



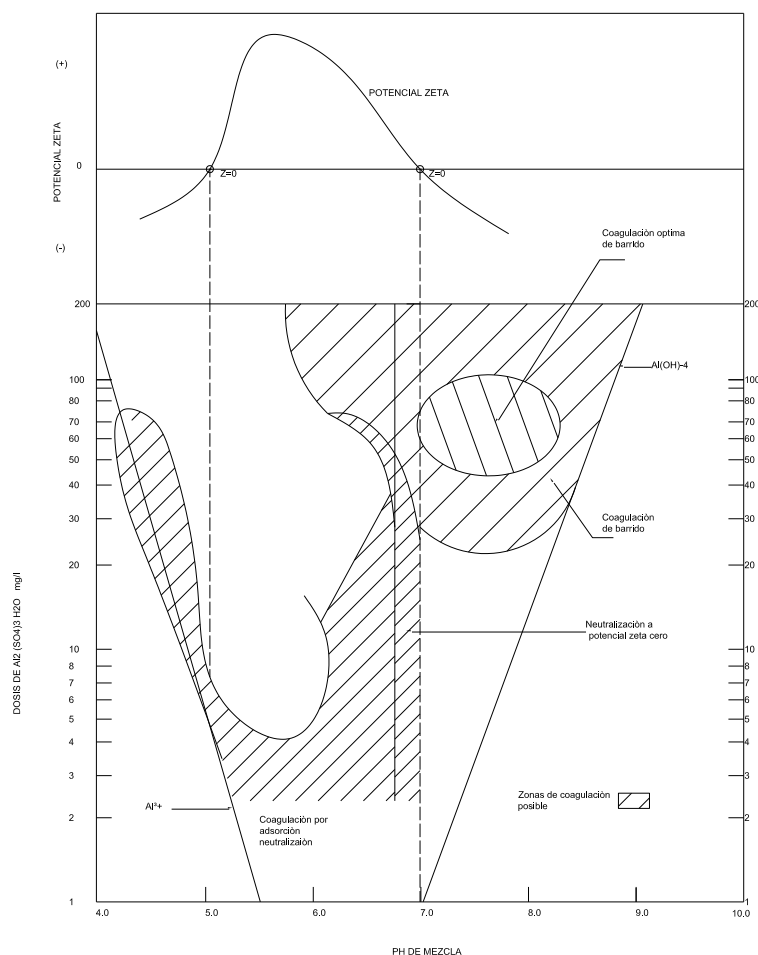
**Figura 6.1 Modelo esquemático del proceso de coagulación(Fuente Cepis/ops/pub/04.109)**

La esquematización referida es bastante simple, aclarándose que las fases pueden coexistir y en ocasiones invertirse (reestabilización); las fases uno y tres pueden ser simultáneas cuando se agregan polielectrolitos al agua, esto es coagulantes que están previamente polimerizados, en cuyo caso la desestabilización es debida a la adsorción de las cadenas agregadas con el polietelectrolito; cuando se usan coagulantes metálicos la desestabilización y la polimerización pueden ocurrir como fenómenos separados, no necesariamente consecutivos. Todas las reacciones dependen de la alcalinidad, el pH y la temperatura del agua.

#### 6.4 DIAGRAMAS DE COAGULACIÓN - TURBIEDAD

Para poder conocer que tipo de coagulación se produce, suelen utilizarse los diagramas de coagulación. Amirtharajah los describe de la siguiente manera “Los diagramas de coagulación son herramientas útiles para predecir las condiciones químicas que gobiernan el proceso: Dichos diagramas se usan para determinar la dosis de coagulante en función de los pH y se desarrollan a partir de los diagramas de estabilidad termodinámica para la fase sólida de hidróxido de aluminio”

La figura 6.2 muestra la interacción entre coloides, el hidróxido de aluminio y el potencial Z resultante debido a esta interacción para distintas dosis de sulfato de aluminio a distintos pH. La forma de estas zonas varía de acuerdo con la calidad de agua.

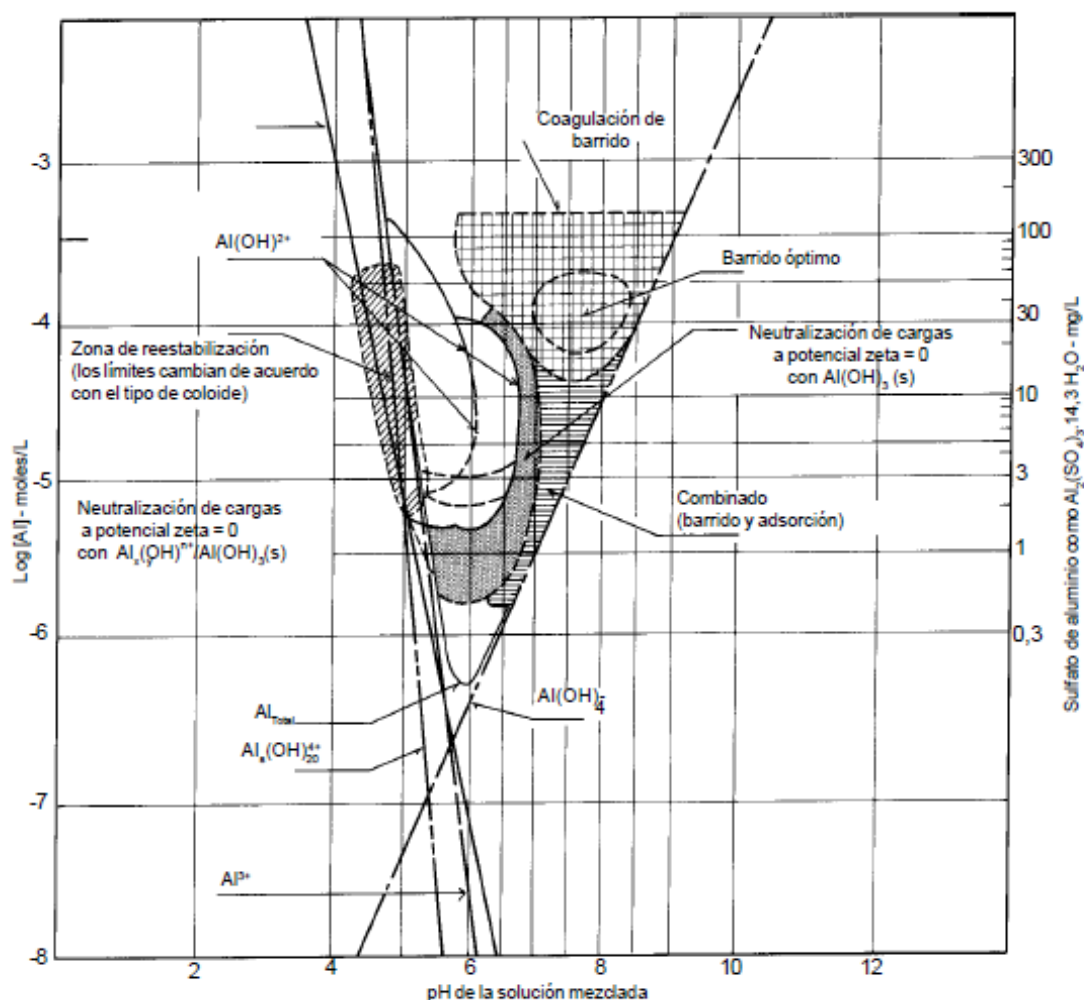


**Figura 6.2 Diagrama de coagulación con sulfato de aluminio (Fuente Arboleda Valencia 2000)**

Se puede ver que con dosis superiores a 15 mg/l de sulfato de aluminio y pH comprendidas entre 5.5 y 9.0 se consigue coagulación de Barrido con un óptimo entre 6.7 y 8.3, para dosis entre 30 y 60 mg/l. La coagulación por adsorción-neutralización, en cambio se logra con pH entre 5.0 y 7.0 y dosis de coagulantes entre 15 y 30 mg/l. A pH menores de 5.0 puede llegarse también a producir adsorción-neutralización con dosis mayores hasta de 60 mg/l. En la parte superior del diagrama se ha incluido la curva de potencial Z que muestra como a pH menor de 4.8 el potencial de las partículas se hace negativo. Por encima, tal valor se torna positivo y vuelve a pasar por  $Z=0$  a  $pH=6.8$  para regresar a ser negativo de allí para adelante. Por tanto existen dos regiones óptimas en que se puede hacer la

coagulación cerca del punto isoelectrico a  $\text{pH} = 4.8$  y a  $\text{pH} = 6.8$ . Entre estas dos regiones los coloides se reestabilizan debido al exceso de cargas positivas adsorbidas. Cabe aclarar que cada agua exhibe sus propias características y que por tanto el diagrama de la figura 6.2 debe tomarse como una guía general que de hecho puede variar según el tipo de coloides presentes y las condiciones de la fase líquida.

La distinción entre uno y otro tipo de coagulación es significativa cuando como veremos más adelante, se quiere realizar filtración directa (esto es filtración sin floculación ni sedimentación previas) en la que es indispensable utilizar en todo momento coagulación por adsorción-neutralización, evitando la coagulación por barrido, la cual tiende a producir muchos sólidos. También es de importancia en la mezcla rápida en donde la velocidad del proceso depende del tipo de coagulación.



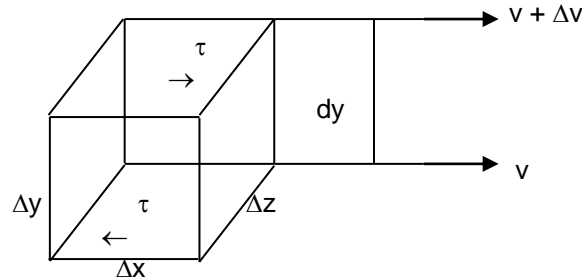
**Figura XXX** diagrama de coagulación con sulfato de aluminio para remoción de turbiedad.  
Fuente Arboleda Valencia 2000





intensidad de la mezcla es usualmente evaluado por el parámetro “gradiente de velocidad”. El gradiente de velocidad, comúnmente denotado por la letra G, puede ser fácilmente calculado por la ecuación de Camp y Stein, cuya deducción matemática es representada a continuación:

Considérese un elemento de fluido  $\Delta x \Delta y \Delta z$ , sujeto a una agitación hidráulica o mecánica en el proceso de mezcla, figura 6.3:



**Figura 6.4 Elemento del fluido**

La potencia disipada es dada por:

$$\begin{aligned} \text{Potencia} &= \text{fuerza} \times \text{velocidad}, \\ P &= \text{Esfuerzo cortante } (\tau) \times \text{área } (\Delta x \Delta z) \times \text{velocidad } (dv). \\ P &= \tau \cdot \Delta x \Delta z \Delta v \cdot (\Delta y / \Delta y) = \tau V (dv / dy) \end{aligned} \quad [6.1]$$

Siendo

$\Delta x \Delta y \Delta z = \text{volumen } V$

Entonces la ecuación [6.1] :

$$P/V = \tau \cdot (dv / dy) \quad [6.2]$$

Donde  $P/V$  es una potencia disipada por unidad de volumen.

Para un líquido Newtoniano  $\tau = \mu (dv/dy)$ , donde  $\mu$  es un coeficiente de viscosidad dinámica. Sustituyendo en [6.2] resulta:

$$\frac{P}{V} = \mu \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 \quad [6.3]$$

El gradiente de velocidad es la variación de la velocidad en la dirección normal al movimiento del fluido, esto es:

$$G = \frac{dv}{dy}$$

De donde resulta: 
$$\frac{P}{V} = \mu G^2$$

Despejando

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu \cdot V}} = \sqrt{\frac{\text{kgf. m}}{(\text{Kgf. s/m}^2) \text{m}^3}} \quad [s^{-1}] \quad [6.4]$$

La potencia  $P$  puede ser calculada en función de la pérdida de carga en dispositivos de mezcla hidráulica, sea en condiciones de flujo laminar o turbulento.

En equipos de mezcla mecánica, un análisis dimensional demuestra que la cantidad adimensional  $P/\rho \cdot w^3 \cdot L^{-5}$ , llamado numero de potencia, depende del numero de Reynolds ( $w \cdot L^2/\nu$ ) y del número de Froude ( $w^2 \cdot L/g$ ), donde  $P$  es una potencia disipada en el agua por el impulsor,  $\rho$  es la densidad del agua,  $w$  es la velocidad angular del rotor,  $\nu$  es un coeficiente de viscosidad cinemática,  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $L$  es una dimensión característica del agitador.

La relación entre el número de potencia, el número de Reynolds y el número de Froude, depende de las características geométricas del impulsor, de la cámara de mezcla y de las características del flujo.

## 6.5.2 FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO (Fuente Cepis / OPS/04.109)

### 6.5.2.1 Interacción entre las variables

La coagulación realizada en la cámara de mezcla rápida, es probablemente la fase más importante del tratamiento del agua. Una coagulación inadecuada no puede ser corregida en una practica posterior del tratamiento, perjudicando la eficiencia de todos los procesos siguientes: floculación, decantación y filtración. La optimización del proceso depende de una serie de variables que intervienen, cuya interacción aún no esta muy bien comprendida, y deben ser consideradas tanto en el proyecto como en la operación, incluyendo:

- ( 1 ) naturaleza físico-química del agua cruda.
- ( 2 ) tipo y control del sistema de aplicación del coagulante.
- ( 3 ) intensidad y tiempo de mezcla.
- ( 4 ) tipo de dispositivo de mezcla.

Letterman y colaboradores en un trabajo cuyos objetivos básicos fueron evaluar la influencia de los diversos factores que influyen en el proceso, encontraron una relación:

$$G T C^{1.46} = 5.9 \times 10^6 \quad [6.5]$$

Donde  $G$  es un gradiente de velocidad media,  $T$  es un tiempo de mezcla y  $C$  es la dosificación del sulfato de aluminio.

Generalizando se podría admitir que para las aguas naturales puede existir una relación de tipo:

$$G T C^n = k \quad [ 6.6 ]$$

Entre la intensidad de la mezcla, medida por el gradiente de velocidad  $G$ , el tiempo de mezcla y la naturaleza del agua cruda que demanda una cantidad  $C$  de coagulante. Los coeficientes  $n$  y  $k$  podrían ser determinados para cada caso en particular. Se observa en la expresión que existe una interrelación entre la intensidad de agitación, su duración y la concentración de coagulante utilizado.

### 6.5.2.2 Influencia de la naturaleza del agua cruda

Las características físico-químicas del agua cruda de mayor significado en el control del proceso, incluye la concentración de coloides (evaluada indirectamente por las determinaciones de la turbidez el color, el pH y la alcalinidad), principalmente cuando la coagulación es realizada por sales de aluminio o de hierro.

O'Melia considera cuatro tipos de situaciones que pueden ocurrir, de acuerdo con las características del agua cruda, tal como se indica en la tabla 6.1.

En las situaciones ( 3 ) y ( 4 ) predomina el mecanismo de coagulación por adsorción, en cuanto a las demás (1) y (2), donde hay baja concentración de coloides, la coagulación se realiza principalmente por el entrelazamiento de las partículas coloidales con el precipitado de hidróxido de aluminio o de hierro, predominando el mecanismo de barrido.

El pH es un factor muy importante en la coagulación. El pH óptimo para coagular el color es generalmente mas bajo ( $\text{pH} = 3.5 - 6$ ) que el que se necesita para desestabilizar aguas con turbiedad ( $6.5 - 8.5$ ). Regularmente las sales férricas son efectivas en un rango más amplio de valores de pH que las sales de aluminio.

**Tabla 6.1**  
**Clasificación del agua según su comportamiento en la coagulación**

| Tipo de agua   | Coagulación producida por  | Forma de coagulación requerida  |
|--|--|---|
| 1. Baja concentración de Coloides, baja alcalinidad  | Formación de precipitado.<br>Floc de Barrido   | Altas dosis coagulantes.<br>Adición de alcalinidad o partículas, o ambas.               |
| 2. Baja concentración de coloides, alta alcalinidad. | Formación de precipitado<br>Floc de barrido.   | Alta dosis de coagulante.<br>Adición de partículas.                                     |
| 3. Alta concentración de coloides, baja alcalinidad  | Adsorción de polímeros metálicos positivos en la superficie de los coloides ( PH 4 a 7).   | Dosis de coagulante incrementa con concentración de partículas. Adición de alcalinidad. |
| 4. Alta concentración de coloides, alta alcalinidad. | Adsorción de polímeros metálicos positivos y precipitación de hidróxidos. ( pH mayor de 7) | Dosis de coagulante incrementa con concentración de partículas.                         |

### 6.5.2.3 Influencia del sistema de aplicación del coagulante

La coagulación con sales de aluminio o de hierro sólo se realiza satisfactoriamente con un pH determinado y en presencia de alcalinidad en una cantidad mínima para las reacciones químicas. Moffet, considera que una reacción adecuada del coagulante con el agua solamente ocurrirá si:

- (1) Todos los productos químicos que alteran el pH (cal, ácidos, cloro y otros) sean aplicados a la mezcla en el punto de aplicación del sulfato de aluminio, a una distancia suficiente para asegurar una completa disolución y mezcla.
- (2) El pH del agua cruda debe ser corregido previamente de modo que después de la reacción del sulfato de aluminio, resulte el pH óptimo de coagulación.

(3) La dosificación de sulfato de aluminio debe ser efectuada a una tasa constante en la cámara de mezcla rápida, de tal modo que el mismo sea inmediato y uniformemente disperso en el agua que llega a la estación de tratamiento.

En un mezclador mecánico el coagulante se aplica debajo del eje del agitador y en un mezclador hidráulico inmediatamente antes de la formación del resalto.

Así, escogido el punto de aplicación del coagulante, todos los otros productos químicos que afectan el pH, especialmente la cal, deben ser aplicados antes del coagulante.

La secuencia de la aplicación cal→sulfato de aluminio proporciona una adecuada mezcla, la adición simultánea sin embargo independiente de cal y sulfato produce resultados tan buenos como en aquellos en los que la cal es aplicada antes del sulfato.

El sistema de dosificación debe tener medios para proporcionar un vaciado constante, siendo fácilmente regulable la solución de sulfato, evitando el uso de aparatos pulsativos o intermitentes como las bombas reguladoras de diafragmas.

Aplicar de un modo uniforme el sulfato de aluminio al agua es la principal dificultad para la realización de una coagulación eficiente y se constituye en el objeto de la cámara de mezcla. El problema radica en que las cantidades de coagulante son muy pequeñas comparadas con el volumen del agua a ser tratada. Una dosis media de sulfato de aluminio de 30 mg/l a una concentración de 10% representa dispersar un volumen de solución de apenas 300 ml, equivalente a un cubo de 7 cm de arista en un metro cúbico de agua. Con la condición de que haya suficiente turbulencia, la dispersión será mas efectiva cuanto mayor sea el volumen de la solución y mas diluida sea esta, resultando la mejor remoción de turbidez, con el coagulante mas rápido y fácilmente entrando en contacto con un mayor numero de partículas coloidales.

Soluciones muy diluidas de sulfato de aluminio pueden hidrolizarse antes de su aplicación formando productos que no son tan efectivos en la coagulación, entre tanto se pueden sugerir valores del orden de 1 a 2% como ideales para ser adoptados en el proyecto o en las operaciones de las plantas de tratamiento.

Investigaciones realizadas por Sturm, determinaron que las concentraciones bajas de coloides requieren altas dosis de coagulante para iniciar la coagulación, debido a que no hay suficientes partículas en suspensión para producir el contacto necesario para la formación de floc; se requiere entonces una gran cantidad de coagulante para que los hidróxidos metálicos que aparecen al reaccionar aquel con la alcalinidad y el agua, al descender arrastren las partículas que se encuentran a su paso ( floc de barrido). Las mayores concentraciones de coloides requieren menores dosis de coagulante ya que las mismas partículas coloidales proveen núcleos para la precipitación, mientras que en el caso anterior el hidróxido lo provee.

Las aguas con baja turbiedad pueden ser coaguladas por otra técnica que consiste en la adición de partículas de arcilla para aumentar la turbiedad antes de agregar el coagulante, con lo cual la coagulación se realiza por adsorción, y no por barrido, requiriéndose dosis mas bajas de coagulante.

#### **6.5.2.4 Influencia de la intensidad y tiempo de mezcla**

Para asegurar una coagulación homogénea, se requiere una intensa mezcla para distribuir uniformemente el coagulante a través del agua, de modo que el mismo entre en contacto con las partículas coloidales antes que la reacción se complete. De este modo será deseable que la mezcla sea lo mas rápida posible, principalmente cuando son utilizadas sales de Al ( III ) o de Fe (III), debido a que son muy rápidas las velocidades de polimerización del coagulante, como también lo es la

velocidad de absorción de las partículas. Periodos largos de mezcla son completamente innecesarios por que las reacciones se completan en menos de un segundo en la coagulación por absorción – desestabilización y de 1 a 7 seg precipitación de hidróxidos.

El grado de intensidad de mezcla es evaluado por el gradiente de velocidad. Como regla general los gradientes de velocidades en la mezcla rápida deben ser más o menos elevados, del orden de  $1000\text{ s}^{-1}$  o más en absorción o neutralización y de 400 a 800 en barrido.

Hudson recomienda un gradiente de velocidad como el mas alto posible, nunca inferior a  $1000\text{ s}^{-1}$ , y un tiempo de mezcla inferior a 1 s, preferiblemente menor que 0.5 s. (absorción- neutralización)

Cuando se utilizan polielectrolitos, no es necesaria una mezcla instantánea, por cuanto sus cadenas poliméricas de alto peso molecular ya se encuentran previamente formadas antes de su adición al agua y las velocidades de absorción son más lentas. Por otro lado tiempos de mezclas prolongados, de más de algunos segundos y gradientes de velocidad muy elevados, deben ser evitados para no tener ruptura de las cadenas poliméricas.

#### **6.5.2.5 Influencia del tipo de dispositivo de mezcla**

Es condición altamente deseable que ocurran condiciones de flujo de pistón, porque la existencia de corrientes de corto/circuito y/o detención de masas de agua por un tiempo mayor que el necesario, traerá el inconveniente de que algunas partes de agua recibirán mayores cantidades de coagulante, pudiendo causar reestabilización de los coloides, en cuanto otras partes recibirán cantidades demasiado bajas para iniciar la coagulación.

Vrale y Jordan, evaluando la eficiencia de varios tipos de mezcladores rápidos (un retromezclador y cinco diferentes mezcladores de flujo de pistón). Llegaron a la conclusión de que el retromezclador era el tipo más deficiente ya que los mezcladores de flujo de pistón presentaron los mejores resultados.

### **6.6 UNIDADES DE MEZCLA RAPIDA**

#### **6.6.1 CLASIFICACIÓN. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTALES. (Fuente Cepis / OPS/04.109)**

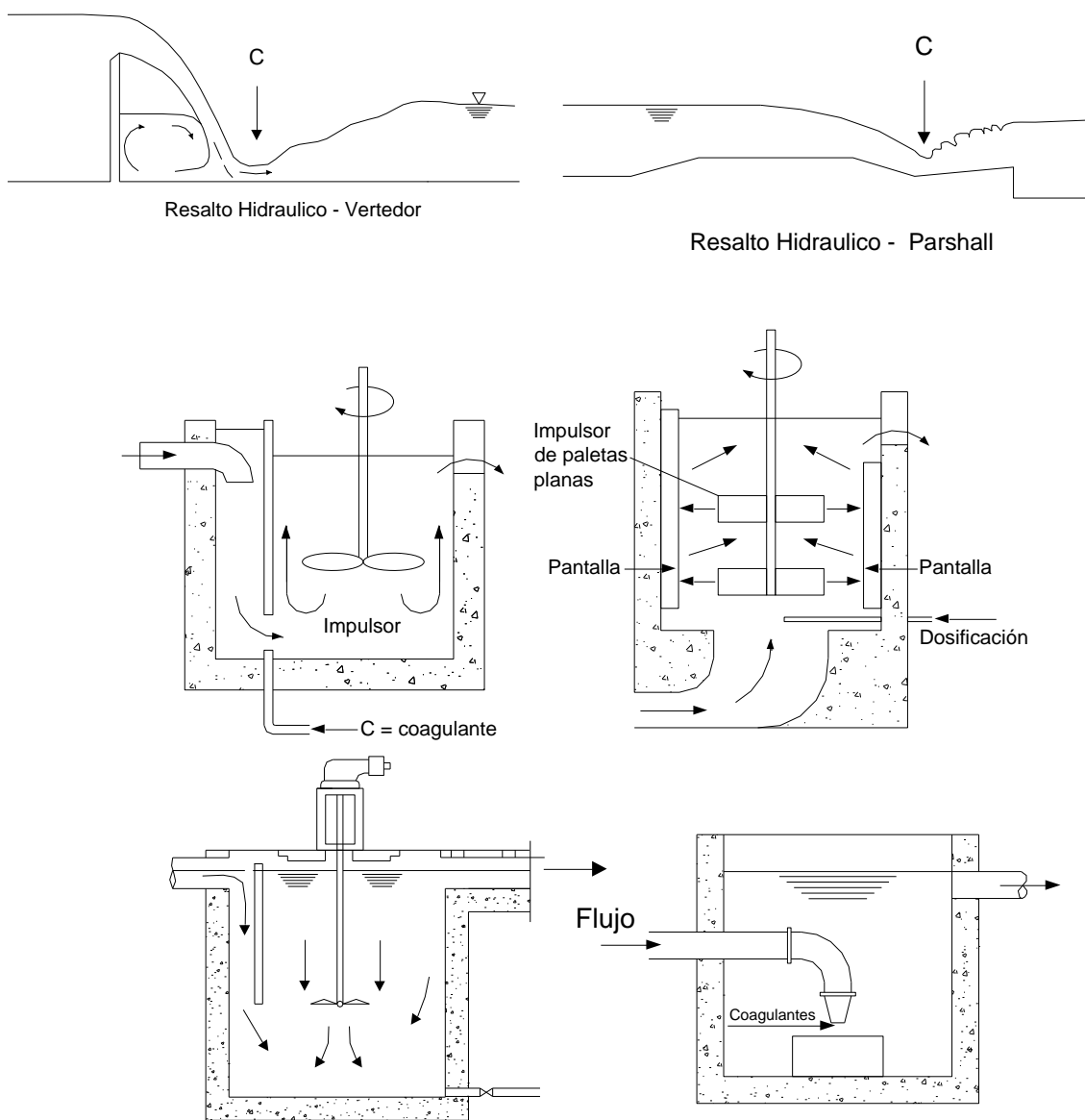
En plantas de tratamiento la mezcla rápida se puede efectuar en dos formas: Con mezcladores flujo de pistón y con retromezcladores.

En los primeros, la adición del coagulante se hace al pasar la masa de agua por un punto determinado, en el cual se produce una fuerte turbulencia inducida por un aparato hidráulico (orificio, vertedero, constricción, etc.).

En los segundos, el agua es retenida en una cámara especial por un tiempo de detención nominal  $V/Q$  de 10 a 120 segundos, en donde se aplican los coagulantes, mientras que el agua se agita con una turbina o paleta rotatoria o cualquier otro sistema para crear turbulencia( figura 6.4).

La diferencia entre ambos métodos es amplia. En los retromezcladores, el agua que entra y acaba de ser dosificada con el coagulante, se mezcla con el agua previamente retenida en la cámara y que hace algún tiempo recibió la dosis de coagulante. Esto produce una interacción entre los compuestos químicos iniciales, que se forman en la masa de agua que llega y los previamente formados en la masa del agua retenida en el tanque.

En los reactores de flujo pistón, en cambio, no parece existir este fenómeno, pues, el flujo a medida que va pasando va recibiendo su inyección de coagulante, y la intermezcla entre las masas de agua es mínima. En ambos casos la turbulencia puede crearse hidráulicamente o mecánicamente, esto es, utilizando la energía cinética que trae el agua o introduciendo en el flujo energía procedente de una fuente externa.



**Figura 6.4 Tipos de mezcladores rápidos**

Dos ejemplos comunes de mezcladores, utilizados con bastante frecuencia en la práctica, (resalto hidráulico y turbina de eje vertical) caracterizan los diversos dispositivos de mezcla rápida, que pueden ser clasificados entonces en hidráulicos y mecánicos. La figura 6.4, representan los esquemas de los tipos más representativos de mezcladores mecánicos e hidráulicos.

Históricamente los primeros dispositivos para la mezcla rápida fueron hidráulicos. Con el desarrollo de arte y técnica del tratamiento del agua, se pasó principalmente en los países mas industrializados y en nuestro medio, con el uso de elementos e instalaciones importadas a darse preferencia a mezcladores mecánicos.

En los retromezcladores la turbulencia necesaria para la mezcla proviene de una fuente externa, generalmente un motor eléctrico por lo que puede ser fácilmente controlado. Por otro lado la potencia disipada en los mezcladores hidráulicos, tiene su origen en el trabajo interno del fluido y de este modo es función de la forma geométrica del mezclador y de las características del flujo, tornándose difícilmente controlables las condiciones de mezcla por el operador.

La principal objeción que se hace a los dispositivos hidráulicos es la poca flexibilidad a las variaciones del caudal. En nuestro medio tradicionalmente se le ha dado preferencia a los dispositivos hidráulicos de mezcla rápida, tales como la canaleta Parshall y vertedores.

### 6.6.2 PARÁMETROS OPERACIONALES Y DIMENSIONAMIENTO

Las unidades de mezcla rápida deben ser dimensionadas en función del tiempo de mezcla y del gradiente de velocidad. Fijado el tiempo de mezcla, y conocido el caudal, el gradiente de velocidad es determinado indirectamente por la potencia hidráulica o mecánica.

Amirtharajah y colaboradores hallaron que la mínima eficiencia de la mezcla se consigue con rangos de gradientes entre  $800 \text{ s}^{-1}$  y  $1000 \text{ s}^{-1}$  o entre  $3000$  y  $5000 \text{ s}^{-1}$ . Estos rangos de gradiente no deben usarse. Por tanto para mezcla por coagulación de barrido podrían seleccionarse gradientes de  $400$  a  $800 \text{ s}^{-1}$ , tiempos de  $30$  a  $180$  seg, y con coagulación por adsorción desestabilización gradientes entre  $1000$  y  $3000 \text{ s}^{-1}$  y tiempos de  $1$  a  $5$  seg (los mayores tiempos para gradientes más bajos). Los polímeros requieren bajos gradientes entre  $400$  y  $800 \text{ s}^{-1}$  con tiempos de  $30$  a  $60$  seg. El Cepis recomienda en mezcladores de flujo pistón los siguientes valores para  $G$  y  $T$ :

$$1000 \leq G \leq 2000 \text{ s}^{-1} \quad T \leq 1 \text{ seg preferentemente menor que } 0.5 \text{ seg}$$

Hudson recomienda un gradiente de velocidades lo más alto posible, nunca inferior a  $1000 \text{ s}^{-1}$  en un tiempo de mezcla inferior a  $1$  segundo, preferiblemente menor que  $0,5$  segundos. Igual recomendación la efectúa el RAS

Se considera suficiente para la mezcla cualquier velocidad superior a  $1.5 \text{ m/s}$ .

Para retromezcladores, La AWWA en el manual "Water Treatment Plant Design" (Diseño de Plantas de Tratamiento de Agua) sugiere tiempos de mezcla de  $10$  a  $30$  segundos y gradientes de velocidad variables con el tiempo, sin embargo no inferiores a  $700 \text{ s}^{-1}$ , como sigue:

Tabla XX tiempo de mezcla

| T       | G                       |
|---------|-------------------------|
| 20 seg  | $1000 \text{ seg}^{-1}$ |
| 30 seg  | $900 \text{ seg}^{-1}$  |
| 40 seg  | $790 \text{ seg}^{-1}$  |
| >40 seg | $700 \text{ seg}^{-1}$  |

#### Diseño, operación y construcción de la mezcla rápida,

EL RAS considera los siguientes elementos para el diseño de la mezcla rápida: Ya sea por agitación hidráulica o mecánica, debe garantizar la dispersión rápida y homogénea de los coagulantes, auxiliares de coagulación y alcalinizantes, los cuales deben ser aplicados en dosis óptimas. Las unidades deben considerarse teniendo en cuenta como referencia los criterios de la Tabla 6.2. El responsable del proyecto deberá realizar un análisis multivariable para la escogencia del tipo de mezclador óptimo, en función de la eficiencia de remoción, tiempo de retención

hidráulica, superficie de ocupación, y costos de operación de energía y productos químicos.

**Tabla 6.2. Parámetros de Referencia de Diseño mezcla rápida**

| Tipo de mezclador | Rango de Gradiente de velocidad medio | Tiempo de mezcla |
|-------------------|---------------------------------------|------------------|
| Hidráulico        | 1000 s-1 - 2000 s-1                   | < 1 s            |
| Mecánico          | 500 s-1 - 2000 s-1                    | < 60 s           |

En el caso en que se utilice un resalto hidráulico como mezclador rápido, el criterio que se requiere cumplir será la estabilidad del resalto hidráulico indicado en el parámetro de diseño del Número de Froude, que debe estar comprendido en el intervalo de 4,5 a 9.

El operador deberá ajustar la dosis óptima de coagulantes, auxiliares de coagulación y alcalinizantes, de acuerdo con la variabilidad de las caracterizaciones de calidad de agua cruda monitoreadas. La construcción de curvas de dosificación durante el funcionamiento de la PTAP deberá utilizarse como uno de los elementos para ajustar su operación.

Las dosis óptimas de coagulantes, auxiliares de coagulación y alcalinizantes, pueden ser determinados por el ensayo de jarras, en cuyo caso los resultados obtenidos deben tomarse como una base a partir de la cual se ajusta la dosis.

Para pequeñas plantas de potabilización en lo posible no se recomienda el empleo de mezcladores mecánicos sino hidráulicos.

#### **6.7. MEZCLADORES HIDRÁULICOS (Fuente Cepis / OPS/04.109)**

Los mezcladores hidráulicos pueden emplearse cuando se dispone de suficiente cabeza o energía en el flujo de entrada. El resalto debe producirse en la garganta, por lo que el dispositivo debe diseñarse para garantizar esta condición.

La Potencia (P) disipada en cualquier dispositivo de mezcla hidráulica es igual al producto de la pérdida de carga (  $\Delta H$  ) por el caudal (Q) convertida en el peso de líquido por unidad de tiempo.

$$P = \gamma * Q * \Delta H \quad [6.7]$$

Así la potencia disipada por unidad de volumen de la ecuación [ 6.4 ] es:

$$P/V = (\gamma * Q * \Delta H) / V \quad [6.8]$$

Siendo

$$\frac{Q}{V} = \frac{1}{T}$$

Donde: T es el tiempo de mezcla.

$$\text{Resulta: } \frac{P}{V} = \frac{\gamma \Delta H}{T} \quad [6.9]$$

Sustituyendo [ 6.9 ] en la ecuación [ 6. 4], se tiene:



$$G = \sqrt{\left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \left(\frac{\Delta H}{T}\right)} \quad [6.10]$$

Donde:

$\gamma$ : es el peso específico del agua en Kg/m<sup>3</sup>

$\mu$ : es el coeficiente de viscosidad en Kg\*s/m<sup>2</sup>

$\Delta H$ : es la pérdida de carga en metros

$T$ : es el tiempo de mezcla en segundos

El factor  $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$  depende de la temperatura del agua, conforme se observa en la tabla 6.3.

**TABLA 6.3. VALORES DE  $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$**

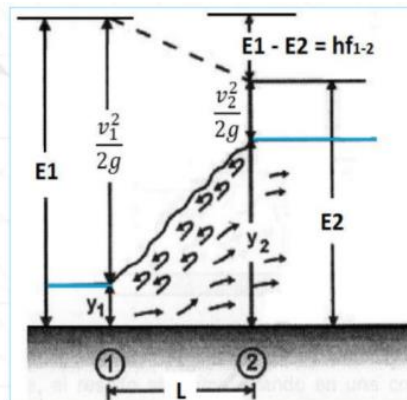
| Temperatura<br>°C | $\sqrt{\frac{\gamma}{\mu}}$ |
|-------------------|-----------------------------|
| 0                 | 2 336.94                    |
| 4                 | 2 501.56                    |
| 10                | 2 736.53                    |
| 15                | 2 920.01                    |
| 20                | 3 114.64                    |
| 25                | 3 266.96                    |

A una temperatura alrededor de 15°C el valor comúnmente tomado en proyectos, de gradiente de velocidad puede ser calculado por la formula:

$$G = 2920 \sqrt{\frac{\Delta H}{T}} \quad [6.11]$$

### 6.7.1 RESALTO HIDRÁULICO

Las condiciones de optimización de mezcla rápida recomendadas por Hudson, tales como, gradiente elevado en un mínimo tiempo de mezcla, son generalmente satisfactorias en un resalto hidráulico. Este es el que se produce en un canal rectangular en el que se pasa abruptamente de un régimen supercrítico con una altura  $h_1$  a un régimen subcrítico con una altura  $h_2$ .



- ✓ SECCIÓN 1: INICIO DEL RESALTO
- ✓ SECCIÓN 2: FINAL DEL RESALTO.
- ✓  $L$  = LONGITUD DEL RESALTO

- ✓  $Y_1$ : TIRANTE CONJUGADO MENOR
- ✓  $Y_2$ : TIRANTE CONJUGADO MAYOR

- ✓  $E_1$  = ENERGÍA AL INICIO DEL RESALTO  $\rightarrow E_1 = Y_1 + \frac{v_1^2}{2g}$

- ✓  $E_2$  = ENERGÍA AL FINAL DEL RESALTO  $\rightarrow E_2 = Y_2 + \frac{v_2^2}{2g}$

- ✓  $\Delta E$  = PÉRDIDA DE ENERGÍA
- ✓  $\Delta E = E_2 - E_1$

### Figura 6.5 resalto hidraulico

Fuente: <https://xdocs.cz/doc/05-flujo-rapidamente-variado-resalto-hidraulico-zo2312dkp58m>

Cuando ocurre un resalto las profundidades antes y después del resalto  $h_1$  y  $h_2$ , están relacionadas entre sí por:

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1+8F_1^2} - 1) \quad [6.12]$$

Donde: 
$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{(g * h_1)}} \quad [6.13]$$

Y el número de Froud corresponde a la sección 1 de la figura 6.7

El tipo de resalto desarrollado para una mezcla rápida es un resalto estable, con números de Froude en la sección 1, comprendidos entre 4,5 y 9,0 correspondientes a una disipación de energía de 3,5 a 7,0 HP por m<sup>3</sup>/s de capacidad de la estación en un tiempo de mezcla generalmente inferior a 1 seg, condiciones que cuando son satisfactorias hacen del resalto hidráulico un mezclador muy eficiente. El cálculo del gradiente se efectúa a partir de la diferencia de energía específica antes y después del salto.

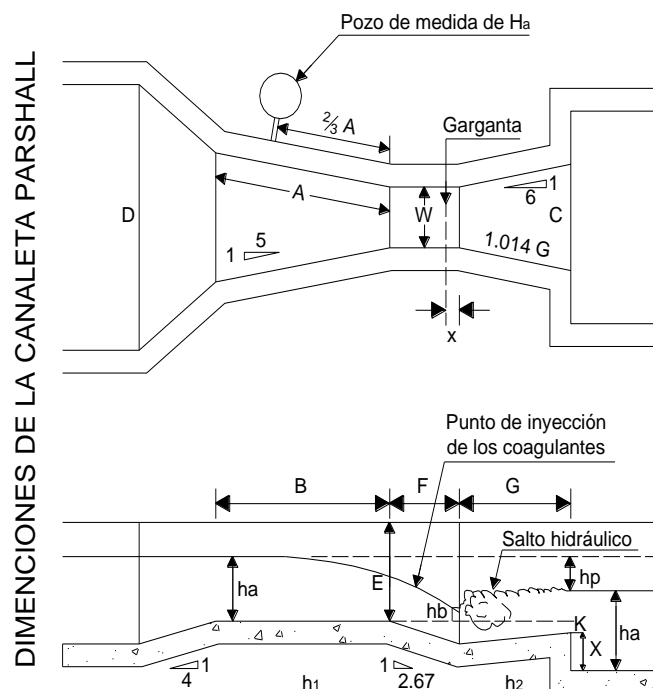
$$\Delta E = E_1 - E_2 = \frac{(y_2 - y_1)^3}{4y_1 * y_2} \quad [6.14]$$

#### 6.7.2 CANALETA PARSHALL ( Fuente Arboleda Valencia 2000)

La canaleta Parshall cumple un doble propósito en las plantas de tratamiento de agua, de servir de medidor de caudales y en la turbulencia que se genera a la salida de la misma, servir de punto de aplicación de coagulantes.

La canaleta Parshall es la forma más común de producir un resalto hidráulico (figura 6.5). Consiste en un segmento de canal con cambio rápido de pendientes y constricción en el punto llamado garganta. Al comienzo de ella el agua pasa por la profundidad crítica ( $Fr = 1$ ) y debido al cambio de pendiente (2.67:1) se acelera hasta crear un régimen supercrítico que se convierte en un salto hidráulico al encontrar la pendiente negativa de la sección G de salida en la que el régimen es subcrítico. Este salto hidráulico es el que se usa para la mezcla rápida. A fin de que pueda utilizarse con tal propósito, debe cumplir los siguientes requisitos:





**Figura 6.5 Dimensiones de la canaleta Parshall (Fuente Arboleda Valencia 2000)**

- Que no trabaje ahogada, o sea que la relación  $H_b/H_a$  no exceda los siguientes valores:

**Tabla XX Relación  $H_b/H_a$**

| Ancho de garganta      | Máxima sumergencia ( $h_b/h_a$ ) |
|------------------------|----------------------------------|
| 7.5 (3") a 22.9 (9")   | 0.6                              |
| 30.5 (1') a 244 (8')   | 0.7                              |
| 305 (10') a 1525 (50') | 0.8                              |

- Que el número de Froude esté comprendido entre 4.5 a 9.0. Debe evitarse números entre 2.5 y 4.5 que producen un resalto inestable el cual no permanece en su posición, sino que siempre esta cambiando de sitio, lo que dificulta la aplicación de coagulantes.

El análisis hidráulico teórico de la canaleta Parshall para saber si cumple con estas condiciones, esta solo parcialmente resuelto. Las ecuaciones que definen el resalto hidráulico en canales rectangulares, no se puede aplicar a este caso sin un cierto margen de error debido a que el efecto de la constricción de la garganta se suma al de los cambios de pendiente. Sin embargo, no existiendo otro procedimiento analítico podría utilizarse el siguiente sugerido por Acevedo Netto.

La tabla 6.4 nos permite determinar el ancho de la garganta dentro de los rangos de caudales máximos y mínimos, esta determinación nos sirve cuando utilizemos la canaleta Parshall como aforador y

**Tabla 6.4**  
**Determinación del ancho W de la parshall en función del caudal**

| Ancho W | Límites de caudal (l/s) |          |
|---------|-------------------------|----------|
|         | Q Mínimo                | Q Máximo |
| 1"      | 0.28                    | 5.67     |
| 2"      | 0.57                    | 14.15    |
| 3"      | 0.85                    | 28.31    |
| 6"      | 1.42                    | 110.44   |
| 9"      | 2.58                    | 252.00   |
| 12"     | 3.11                    | 455.90   |
| 18"     | 4.24                    | 696.50   |
| 24"     | 11.90                   | 937.30   |
| 36"     | 17.27                   | 1427.20  |
| 48"     | 36.81                   | 1922.70  |
| 60"     | 45.31                   | 2424.00  |
| 72"     | 73.62                   | 2931.00  |

**Tabla 6.5**  
**Dimensiones típicas de Medidores Parshall (cm) (tomada de Acevedo)**

| W   | (Cm)  | A     | B     | C     | D     | E     | F    | G     | K    | N    |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|
| 1"  | 2.5   | 36.6  | 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  | 38.1  | 15.2 | 30.5  | 2.5  | 5.7  |
| 6"  | 15.2  | 62.1  | 61.0  | 39.4  | 40.3  | 45.7  | 30.5 | 61.0  | 7.6  | 11.4 |
| 9"  | 22.9  | 88.0  | 86.4  | 38.0  | 57.5  | 61.0  | 61.0 | 45.7  | 7.6  | 22.9 |
| 1'  | 30.5  | 137.2 | 134.4 | 61.0  | 84.5  | 91.5  | 61.0 | 91.5  | 7.6  | 22.9 |
| 1½' | 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 | 152.2 | 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 |

#### Condiciones Hidráulicas de entrada

EL flujo Q se calcula con la fórmula:

$$Q = K ha^n \quad [6.15]$$

en donde K y n se determinan con la tabla No 6.6

**Tabla 6.6**  
**Valores de K y n**

| Unidades Métricas |       |       |
|-------------------|-------|-------|
| W                 | K     | n     |
| 3"                | 0.176 | 1.547 |
| 6"                | 0.381 | 1.580 |
| 9"                | 0.535 | 1.530 |
| 1'                | 0.690 | 1.522 |
| 1 ½'              | 1.054 | 1.538 |
| 2'                | 1.426 | 1.550 |
| 3'                | 2.182 | 1.566 |
| 4'                | 2.935 | 1.578 |
| 5'                | 3.728 | 1.587 |
| 6'                | 4.515 | 1.595 |
| 7'                | 5.306 | 1.601 |
| 8                 | 6.101 | 1.606 |

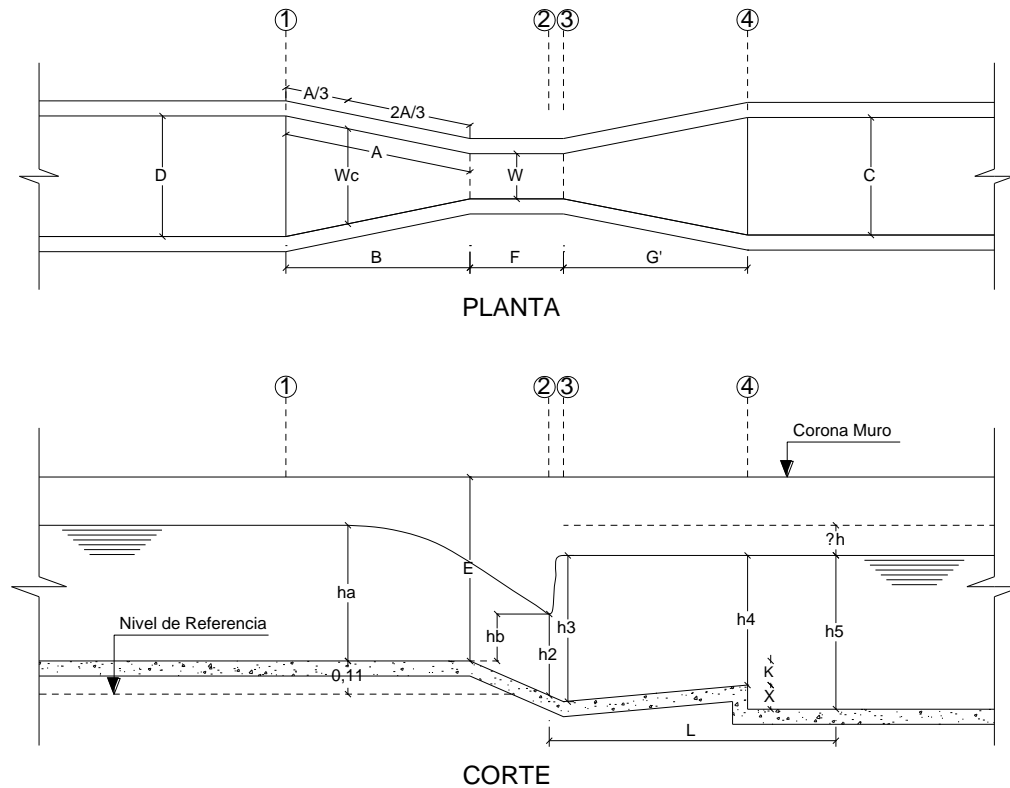
**Ejemplo de diseño: Canaleta Parshall.**

Diseñar una canaleta Parshall que sirva como aforador y para realizar la mezcla rápida. Caudal de diseño 100 l/s y temperatura mínima de 16 °C.

Como aforador debe trabajar con descarga libre, es decir, que para un ancho de garganta menor que 0.30 m, el grado de sumergencia sea menor que 0.60 m.

Como mezclador rápido debe cumplir con la anterior condición y adicionalmente el gradiente de velocidad debe estar comprendido entre 1000 y 2000 s<sup>-1</sup>.

La figura 6.6 presenta un esquema de dicha estructura.



**Figura 6.6. Esquema de la Canaleta Parshall**

La metodología seguida se basa en el cálculo de la energía en las secciones mostradas en la figura 6.6 y en la suposición de que las pérdidas por fricción dentro de la canaleta son despreciables.

Para un  $Q = 100$  l/s se tiene un ancho de garganta  $W = 6'' = 0.152$  mts. (Tabla 6.2-dimensionamiento de una canaleta Parshall típica).

Para un  $W = 6''$ , se tiene los coeficientes (tabla 6.6):

$$K = 0.381$$

$$n = 1.580$$

Ahora:

$$h_a = \left( \frac{Q}{K} \right)^{1/n} \quad [6.16]$$

$$h_a = \left( \frac{0.1}{0.381} \right)^{1/1.580} = 0.43m$$

$$W_a = \frac{2}{3}(D - W) + W \quad [6.17]$$

D = 0.403m para W = 6" (Tabla 6.5)

$$W_a = \frac{2}{3}(0.403m - 0.152m) + 0.152m \quad W_a = 0.32 \text{ m}$$

- Cálculo de  $v_a$ :

$$v_a = \frac{Q}{W_a \cdot h_a}$$

$$v_a = \frac{0.10m^3/s}{0.32m * 0.43m} \quad V_a = 0.73 \text{ m/s}$$

Calculo de la energía en la sección 1 - 1

Aplicando Bernoulli:

$$E_1 = \frac{v_a^2}{2g} + h_a + N$$

Para W = 6" Tenemos un N = 0.114m (Tabla 6.5)

$$E_1 = \frac{(0.73)^2 m^2/s^2}{2 * 9.81 m/s^2} + 0.43m + 0.114m \quad E_1 = 0.57m$$

Sección 2-2. (Inmediatamente antes del resalto).

Aplicando Bernoulli:

$$E_2 = \frac{v_2^2}{2g} + h_2$$

$$v_2 = \frac{Q}{W \cdot h_2} \quad v_2 = \frac{0.10m^3/s}{0.15m * h_2}$$

$E_2 = E_1$  (Despreciando pérdidas por fricción entre 1 y 2)

Reemplazando:

$$0.57m = \frac{(0.10)^2}{0.152^2 * h_2^2 * 2 * 9.81m/s^2} + h_2$$

$$h_2^3 - 0.57h_2^2 + 0.02206 = 0$$

Considere que el valor de  $h_2$  se obtiene de resolver una ecuación cúbica que deriva en 3 raíces; la raíz que se debe tomar como valor de  $h_2$  es la raíz media.

Resolviendo para  $h_2$ :

$$h_2 = 0.27 \text{ m}$$

Cálculo de  $h_b$ .

$$h_b = h_2 - N$$

$$h_b = 0.27m - 0.114m = 0.16 \text{ m}$$

Chequeo del grado de sumergencia S.

$$S = \frac{h_b}{h_a} \quad [6.18]$$

$$S = \frac{0.156}{0.43} = 0.364 < 0.60$$

El criterio principal para el diseño de la canaleta Parshall radica en que se cumpla con los parámetros de sumergencia ( $h_b/h_a$ ), en este caso la canaleta trabaja con descarga libre, por lo tanto sirve como aforador.

### Sección 3-3

Aplicando la ecuación del resalto hidráulico:

$$\frac{h_3}{h_2} = \frac{1}{2}(\sqrt{1 + 8F_2^2} - 1) \quad [6.19]$$

$$v_2 = \frac{Q}{W.h_2} \quad v_2 = \frac{0.10m^3/s}{0.152m * 0.27m} \quad v_2 = 2.44 \text{ m/s}$$

$$F_2^2 = \frac{v_2^2}{h_2 \cdot g} \quad F_2^2 = \frac{2.44^2 m^2/s^2}{0.27m * 9.81m/s^2} \quad F_2^2 = 2.24 \quad \therefore F_2 = 1.50 \text{ (Resalto inestable)}$$

Como el salto hidráulico que se presenta es inestable, ya que el Froude no oscila entre 1,7 – 2.5 0 4.5 – 9.0, se puede colocar abajo una persiana que manualmente se pueda graduar por un operario, hasta lograr la estabilidad requerida, aunque esta práctica no se recomienda porque se puede presentar rompimiento del microflóculo formado previamente en el resalto de la canaleta.



Reemplazando en 6.19:

$$h_3 = \frac{0.27}{2} (\sqrt{1 + 8 * 2.24} - 1)$$

$$h_3 = 0.452 \text{ m}$$

Sección 4-4

$$h_4 = h_3 - (N - K) \quad [6.20]$$

Por formarse el resalto muy cerca de la salida de la garganta, se puede considerar que en la sección 3 la cabeza de posición es cero.

$$h_4 = 0.452 \text{ m} - (0.114 \text{ m} - 0.076 \text{ m})$$

$$h_4 = 0.414 \text{ m}$$

Calculo del gradiente de velocidad, G. De la ecuación 6.10:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \Delta h}{\mu \cdot t_d}}$$

$$t_d = \frac{G'}{v_m}$$

$$v_m = \frac{v_3 + v_4}{2}$$

$$v_3 = \frac{Q}{W \cdot h_3} = \frac{0.10 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.152 \text{ m} * 0.452 \text{ m}} \quad v_3 = 1.454 \text{ m/s}$$

$$v_4 = \frac{Q}{C \cdot h_4} = \frac{0.10 \text{ m}^3 / \text{s}}{0.394 \text{ m} * 0.414 \text{ m}} \quad v_4 = 0.61 \text{ m/s}$$

$$v_m = \frac{1.454 \text{ m/s} + 0.61 \text{ m/s}}{2} \quad v_m = 1.03 \text{ m/s}$$

$$t_d = \frac{0.61 \text{ m}}{1.03 \text{ m/s}} = 0.59 \text{ s}$$

$$E_1 = E_4 + \Delta h$$

$$\frac{v_a^2}{2g} + h_a + N = \frac{v_4^2}{2g} + h_4 + (N - K) + \Delta h$$

$$\Delta h = 0.58m - \frac{0.60^2}{2 * 9.81} m - 0.43m - 0.11m + 0.08m \quad \Delta h = 0.10 m$$

$$G = \sqrt{\frac{998.97 kgf / m^3 * 0.10m}{1.11 * 10^{-4} kgf.s / m^2 * 0.59s}} = 1235 s^{-1}$$

Según la recomendación del rango de gradientes del RAS),  $1000 \leq G \leq 2000 s^{-1}$ , por lo tanto  $G = 1235 s^{-1}$  cumple.

Cálculo de X

$$X = h_5 - h_4 \quad [6.21]$$

$h_5 = 0.50 m$  (se fija con la estructura aguas abajo)

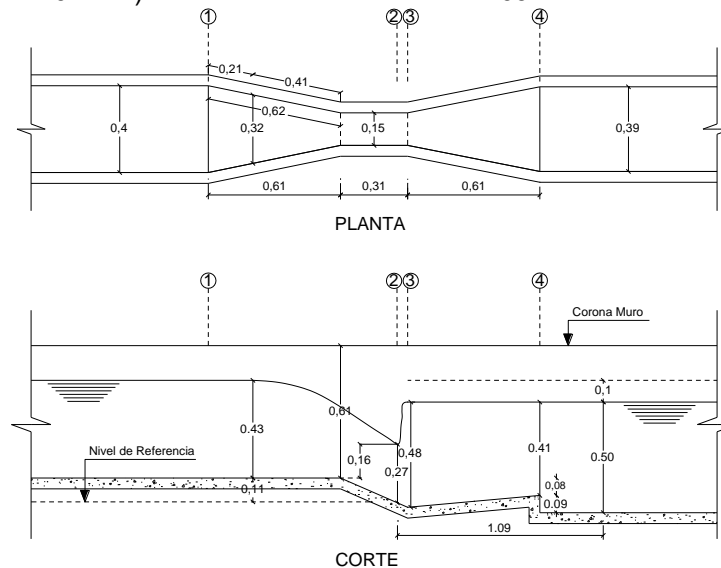
$$X = 0.50m - 0.414 m = 0.086 m$$

Se recomienda para X un factor de seguridad del 10%; por lo tanto:

$$X = 0.086 m * 1.10 \quad X = 0.09 m$$

$$\text{Longitud de desarrollo del resalto, L.; } L = 6 (h_3 - h_2) \quad [6.22]$$

$$L = 6 (0.452 m - 0.27 m) \quad L = 1.09 m$$



**FIGURA 6.7. Dimensiones de la Canaleta Parshall.**

Por lo tanto la persiana para estabilizar el resalto, se coloca a una distancia de 1.10 m del punto donde termina la garganta de la canaleta.

Dimensiones definitivas. La figura 6.7 muestra el esquema con el dimensionamiento definitivo de la canaleta Parshall, incluyendo el perfil hidráulico.

### 6.7.3 VERTEDEROS RECTANGULARES COMO MEZCLADORES RÁPIDOS (Fuente J.A Perez 1997)

La mezcla rápida es la operación que tiene como finalidad promover la dispersión del coagulante al agua. Las reacciones de hidrólisis que ocurren inmediatamente después de la adición del coagulante son casi instantáneas, siendo necesaria por este motivo una intensa agitación en el punto de aplicación del coagulante al agua, para asegurar su uniforme distribución y exposición a las partículas coloidales que deben ser desestabilizadas para una coagulación eficiente.

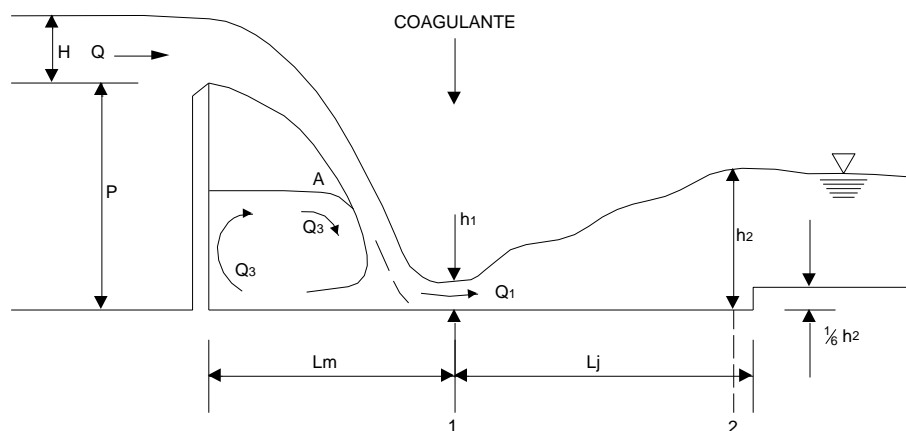
Los vertederos pueden utilizarse tanto para medir caudal como para producir mezcla rápida debido a la turbulencia del resalto hidráulico en la lámina de agua. En la figura 6.8 esta representada las formas más simples de un vertedero rectangular extendiéndose por todo lo largo del canal, por tanto son efectos de la contracción.



Figura 6.8 Mezcladores Rápidos

Fuente ACODAL

La lámina vertiente produce en el punto de impacto en la sección 1, una gran pérdida de energía, debida a la circulación de masa de agua represada sobre la estructura.



**Figura 6.8 Vertedero como mezclador rápido (Fuente ACODAL)**

Esta masa de agua produce el empuje necesario para moverse en dirección horizontal. Parte de la energía restante que queda disipada en el resalto que se forma, puede ser utilizado en la dispersión del coagulante. El punto de aplicación del coagulante deberá entre tanto, quedar sobre la sección 1 a una distancia  $L_m$  del vertedero, asegurándose así una dispersión homogénea y continua del coagulante en toda la masa de agua cruda.

Cuando la lámina de agua alcanza el fondo se divide en una corriente principal que se mueve por el frente, y una corriente secundaria que retorna contribuyendo a la masa de agua represada. Un igual volumen de agua es arrastrado por la corriente en el punto A, retornando a la corriente líquida a la misma tasa  $Q_3$ . De este modo la aplicación del coagulante a una distancia menor de  $L_m$  haría que parte de agua cruda recibiere una parte mayor de coagulante y una restante una cantidad proporcionalmente menor haciendo que las condiciones de coagulación se afecten de un punto a otro, reduciendo así su eficiencia.

Se identifica aquí un error común encontrado en muchas instalaciones que se aplica el coagulante sobre la lámina de agua del vertedero.

Por otro lado un punto de aplicación desplazándose a una distancia mayor que  $L_m$  no se aprovecharía toda la energía disponible del resalto para la mezcla. Estas consideraciones resaltan la importancia de la determinación más exacta posible de la distancia  $L_m$ .

En una primera aproximación se podría determinar el perfil inferior de la lámina vertiente de la ecuación de Scimeni.

$$L_m = 1.45 P^{0.54} H^{0.46} \quad [6.23]$$

El valor calculado por esta ecuación se debe acrecentar o prever una distancia adicional, correspondiente a la largura de la lamina vertiente en el punto de caída.

Determinaciones experimentales para vertederos de pared gruesa conducen a la ecuación:

$$L_m = 4.3 P^{0.1} h_c^{0.9}$$

Que da resultados un tanto superiores a los que de la [6.23].

El gradiente de velocidades resultante puede ser calculado en la secuencia de cálculo que se presenta a continuación:

1. calculo de alturas conjugadas de resalto  $h_1$  y  $h_2$ .

La dificultad estaría en determinar la energía perdida que queda libre o la energía restante en la sección 1. La profundidad del agua en esta sección  $h_1$ , estará relacionada con la profundidad crítica  $h_c$  de la ecuación de White.

$$\frac{h_1}{h_c} = \frac{\sqrt{2}}{1.06 + \sqrt{\frac{P}{h_c} + 1.5}} \quad [6.24]$$

con:

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} \quad [6.25]$$

y,

$$q = \frac{Q}{B} \quad [6.26]$$

Se calcula  $V_1 = q / h_1$  [6.27]

y,

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{(g * h_1)}} \quad [6.28]$$

con  $h_1$  y  $F_1$ , se calcula  $h_2$  y  $v_2$ :

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1) \quad [6.29]$$

$$v_2 = \frac{q}{h_2} \quad [6.30]$$

2. calculo de perdida de carga.

La pérdida de carga puede ser calculada por la fórmula de Belanger:

$$\Delta H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2} \quad [6.31]$$

3. Longitud del resalto.

El resalto siendo estable puede ser calculado por la fórmula de Smetana:

$$L_j = 6 (h_2 - h_{1L}) \quad [6.32]$$

4. tiempo de mezcla.

$$T = L_j / v_m \quad [6.33]$$

Con:  $V_m = \frac{V_2 + V_1}{2}$  Velocidad media en el resalto.

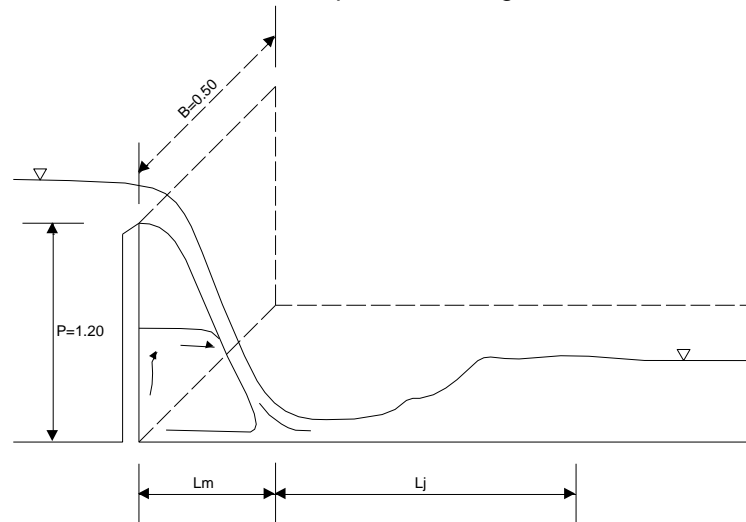
5. gradiente de velocidades.

Con los valores de  $\Delta H$ ,  $T$  y dados  $\gamma$  y  $\mu$  se calcula finalmente:

$$G = \sqrt{\left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \left(\frac{\Delta H}{T}\right)} \quad [6.34]$$

**EJEMPLO (Fuente J.A Perez 1997)**

Calcular el gradiente de velocidades y el tiempo de mezcla rápida de la estructura abajo esquematizada, para un caudal de 98 l/s. Temperatura del agua 16° C, Ancho B = 0.50 m:



**Figura 6.9 Mezclador rápido**

Solución:

a. Para las condiciones dadas:

$$Q = KLH^{(3/2)}; \quad 0.098 = 1.84 \cdot 0.5 \cdot H^{(3/2)} \quad H = 0.22 \text{ m}$$

$$\text{Caudal específico } q = \frac{Q}{B} = \frac{0.098}{0.50} = 0.20 \text{ m}^3 / \text{s} \cdot \text{ml}$$

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}, \quad h_c = \sqrt[3]{\frac{(0.20)^2}{9.81}} = 0.16 \text{ m}$$

b. cálculo de las alturas conjugadas del resalto,  $h_1$  y  $h_2$

$$\frac{h_1}{h_c} = \frac{\sqrt{2}}{1.06 + \sqrt{\frac{P}{h_c} + 1.5}}, \quad \frac{h_1}{h_c} = \frac{\sqrt{2}}{1.06 + \sqrt{\frac{1.2}{0.16} + 1.5}} = 0.35. \quad \Rightarrow h_1 = 0.0557 \text{ m}$$

$$V_1 = \frac{q}{h_1} = \frac{0.20}{0.0557} = 3.6 \text{ m/s}$$

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{(g * h_1)}} , \quad F_1 = \frac{3.6}{\sqrt{(9.81 * 0.0557)}} = 4.87$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} (\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1); \quad h_2 = \frac{0.0557}{2} (\sqrt{1 + 8(4.87)^2} - 1) = 0.357m$$

$$V_2 = \frac{q}{h_2} = \frac{0.20}{0.357} = 0.56m/s$$

c. cálculo de pérdidas de carga

$$\Delta H = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1h_2} , \quad \Delta H = \frac{(0.357 - 0.0557)^3}{4(0.0557)0.357} = 0.344m$$

d. tiempo de mezcla

Extensión del resalto.

$$L_j = 6 (h_2 - h_1) = 6 (0.344 - 0.0557) = 1.73 m$$

Velocidad media del resalto

$$V_m = \frac{V_2 + V_1}{2}; \quad V_m = \frac{3.6 + 0.56}{2} = 2.08 m/s$$

Tiempo de mezcla

$$T_m = \frac{L_m}{V_m}; \quad T_m = \frac{1.73}{2.08} = 0.83 seg$$

Longitud lamina vertiente

$$L_m = 4.3 P^{0.1} h_c^{0.9}; \quad L_m = 4.3 (1.2)^{0.1} (0.16)^{0.9} = 0.84m$$

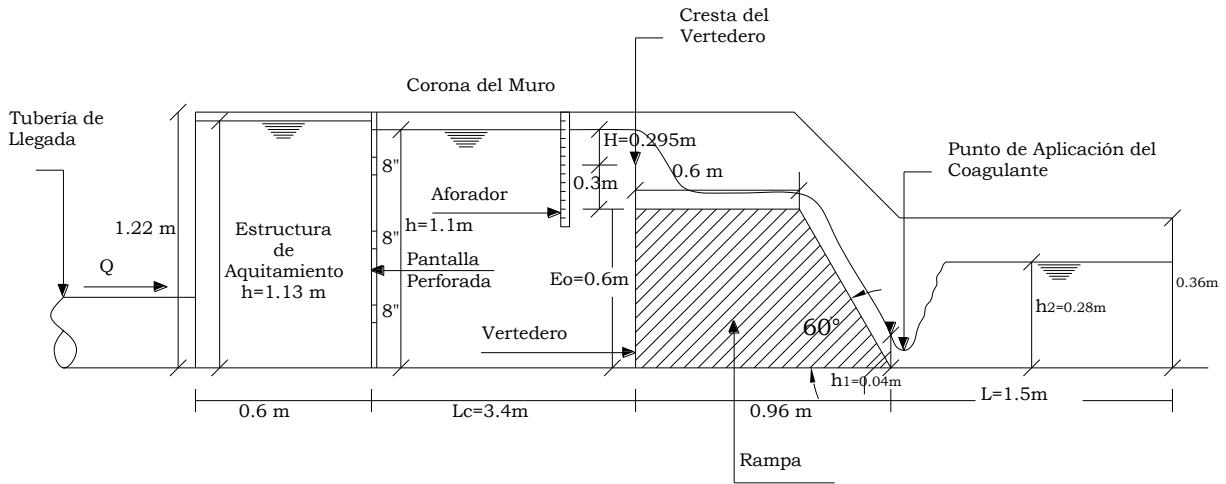
e. Calculo del gradiente de velocidades

$$A \ 16^\circ C, \ \gamma \approx 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ y } \mu = 0.000112 \text{ kg.m}^2/\text{s}$$

$$G = \sqrt{\left(\frac{\gamma}{\mu}\right) \left(\frac{\Delta H}{T}\right)} \quad G = \sqrt{\left(\frac{1000}{0.000112}\right) \left(\frac{0.344}{0.83}\right)} = 1923 \text{ S}^{-1}$$

**Ejemplo. (Fuente J.A Perez 1997)**

Diseñar un canal rectangular con vertedero rectangular con contracciones laterales y un obstáculo en forma de rampa, para realizar la mezcla rápida y aforar el afluente a la planta, y que sirva simultáneamente como estructura de aquietamiento. La temperatura mínima esperada del agua es 16°C y el caudal de 100 l/s.



**Figura 6.10 Esquema del canal con vertedero**

La figura 1 muestra un esquema del canal rectangular, con vertedero rectangular. En la sección 1,  $h_1$  y  $v_1$ . Aplicando Bernoulli:

$$E_1 = \frac{V_1^2}{2g} + h_1 \quad [6.35]$$

$$v_1 = \frac{Q}{B \cdot h_1} \quad [6.36]$$

Reemplazando 1.2 en 1.1:

$$E_1 = \left( \frac{Q}{B \cdot h_1} \right)^2 \cdot \frac{1}{2g} + h_1 \quad [6.37]$$

Transformando 4.13 se obtiene:

$$2g \cdot B^2 \cdot h_1^3 - 2E_1 \cdot g \cdot B^2 \cdot h_1^2 + Q^2 = 0 \quad [6.38]$$

Asumiendo  $B = 0.75$  m (ancho de canal) y  $E_1 = 0.60$  m ( $E_1 = E_0$ ), la ecuación 4.14 toma la siguiente forma:

$$2 \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.75^2 \text{ m}^2 \cdot h_1^3 - 2 \cdot 0.60 \text{ m} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot 0.75^2 \text{ m}^2 \cdot h_1^2 + 0.10^2 \text{ m}^6/\text{s}^2 = 0$$

Resolviendo:

$$h_1 = 0.04 \text{ m}$$

$$V_1 = \frac{Q}{B \cdot h_1} = \frac{0.1 \text{ m}^3/\text{s}}{0.75 \text{ m} \cdot 0.04} = 3.33 \text{ m/s}$$



Número de Froude:

$$F_1 = \frac{v_1}{\sqrt{g \cdot h_1}} = \frac{3.33}{\sqrt{9.81 * 0.04}} = 5.32 \quad [6.39]$$

El resalto que se forma mediante cualquier dispositivo hidráulico debe ser estable para que efectué adecuadamente la mezcla, lo cual ocurre cuando  $4.5 \leq F_1 \leq 9$ ; siempre debe efectuarse este chequeo.

En este caso  $F_1 = 5.32$  garantiza un resalto estable.

En la sección 2,  $h_2$  y  $v_2$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left( \sqrt{1 + 8Fr^2} - 1 \right) \quad [6.40]$$

$$h_2 = \frac{0.04}{2} \left( \sqrt{1 + 8 * 5.32^2} - 1 \right) = 0.28m$$

$$v_2 = \frac{Q}{B \cdot h_2} = \frac{0.10 m^3/s}{0.75m * 0.28} = 0.48 m/s$$

Longitud de desarrollo de resalto.

$$L = 6 (h_2 - h_1) \quad [6.41]$$

$$L = 6(0.28m - 0.04m) = 1.44m$$

Utilizar  $L = 1.50m$

Tiempo de mezcla.

$$T = \frac{L}{v_m} = \frac{L}{\frac{v_1 + v_2}{2}} \quad [6.42]$$

$$T = \frac{1.44m}{\frac{3.33m/s + 0.48m/s}{2}} = 0.76s$$

Según la recomendación de Hudson,  $T < 1s$ , por lo tanto  $T = 0.76 s$  cumple con el rango recomendado.

Gradiente de velocidad. De la ecuación 4.10:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \Delta h}{\mu \cdot T}}$$

$$\Delta h = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4h_1 h_2} \quad [6.43]$$

$$\Delta h = \frac{(0.28m - 0.04m)^3}{4 * 0.04m * 0.28m} = 0.31m$$

Los valores de  $\gamma$  y  $\mu$  pueden encontrarse mediante el empleo de la Tabla 8.

Reemplazando en:

$$G = \sqrt{\frac{\gamma \cdot \Delta h}{\mu \cdot T}} = \sqrt{\frac{998.97 \text{ kgf/m}^3 * 0.31m}{1.14 * 10^{-4} \text{ kgf.s/m}^2 * 0.76s}} = 1890 \text{ s}^{-1}$$

Según la recomendación del rango de gradiente del CEPIS

$1000 \leq G \leq 2000 \text{ s}^{-1}$ , por lo tanto  $G = 1890 \text{ s}^{-1}$  cumple con el rango recomendado.

Longitud del canal de aproximación.

$$L_c = 4.5 B$$

$$L_c = 4.5 * 0.75 \text{ m} = 3.38 \text{ m}$$

Utilizar  $L_c = 3.40 \text{ m}$

TABLA 6.7.

## Densidad y viscosidad del agua

| Temperatura<br>(° C) | Densidad<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | Viscosidad                 |   |
|----------------------|----------------------------------|----------------------------|---|
|                      |                                  | Absoluta $\mu$<br>(g/cm.s) | Cinemática $\nu = \mu/\rho$<br>(cm <sup>2</sup> /s) |
| 0                    | 0.99987                          | 0.01792                    | 0.01792   |
| 1                    | 0.99993                          | 0.01732                    | 0.01732   |
| 2                    | 0.99997                          | 0.01674                    | 0.01674   |
| 3                    | 0.99999                          | 0.01619                    | 0.01619   |
| 4                    | 100.000                          | 0.01568                    | 0.01568   |
| 5                    | 0.99999                          | 0.01519                    | 0.01519   |
| 6                    | 0.99997                          | 0.01473                    | 0.01473   |
| 7                    | 0.99993                          | 0.01429                    | 0.01429   |
| 8                    | 0.99988                          | 0.01387                    | 0.01387   |
| 9                    | 0.99981                          | 0.01348                    | 0.01348   |
| 10                   | 0.99973                          | 0.01310                    | 0.01310   |
| 11                   | 0.99963                          | 0.01274                    | 0.01274   |
| 12                   | 0.99952                          | 0.01239                    | 0.01240   |
| 13                   | 0.99940                          | 0.01206                    | 0.01206   |
| 14                   | 0.99927                          | 0.01175                    | 0.01176   |
| 15                   | 0.99913                          | 0.01145                    | 0.01146   |
| 16                   | 0.99897                          | 0.01116                    | 0.01117   |
| 17                   | 0.99880                          | 0.01088                    | 0.01089   |
| 18                   | 0.99862                          | 0.01060                    | 0.01061   |
| 19                   | 0.99843                          | 0.01034                    | 0.01036   |
| 20                   | 0.99823                          | 0.01009                    | 0.01010   |
| 21                   | 0.99802                          | 0.00984                    | 0.00986   |
| 22                   | 0.99780                          | 0.00961                    | 0.00963   |
| 23                   | 0.99757                          | 0.00938                    | 0.00940   |
| 24                   | 0.99733                          | 0.00916                    | 0.00919   |
| 25                   | 0.99707                          | 0.00895                    | 0.00897   |
| 26                   | 0.99681                          | 0.00875                    | 0.00877   |
| 27                   | 0.99654                          | 0.00855                    | 0.00858   |
| 28                   | 0.99626                          | 0.00836                    | 0.00839   |
| 29                   | 0.99597                          | 0.00818                    | 0.00821   |
| 30                   | 0.99568                          | 0.00800                    | 0.00804   |

El valor de la densidad  $\rho$  multiplicado por 1000, da el correspondiente al peso específico  $\gamma$ , expresado en  $\text{kgf/m}^3$ .

El valor de la viscosidad absoluta  $\mu$  expresado en  $\text{kgf.s/m}^2$ , se obtiene dividiendo por 98 el correspondiente valor que aparece en la tabla 1.

Vertedero de aforo.

Se utiliza un vertedero rectangular con contracciones laterales para aforar el caudal de entrada.

$$Q = 1.838 \left( L - \frac{2H}{10} \right) \cdot H^{1.5} \quad [6.44]$$

Donde:

$Q$  = Caudal [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

$L$  = Ancho de la cresta [ $\text{m}$ ]

$H$  = Carga sobre el vertedero [ $\text{m}$ ]

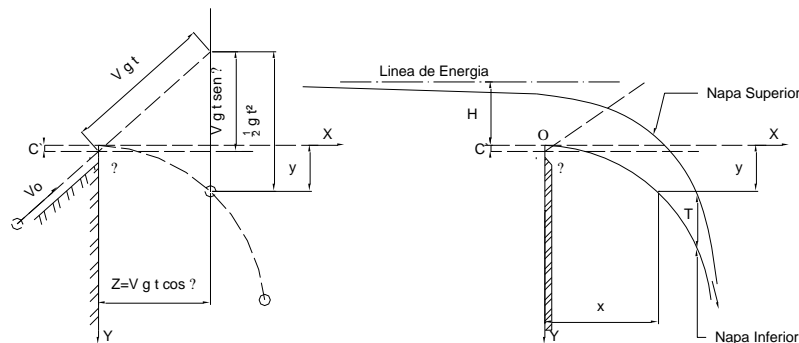
Para  $Q = 0.10 \text{ m}^3/\text{s}$ , suponiendo  $L = 0.40 \text{ m}$  se tiene que:

$H = 0.295 \text{ m} = 29.5 \text{ cm}$ .

Se debe construir una tabla o una gráfica que relacione  $Q$  con  $H$ , para facilitar el control de la operación de la planta bajo cualquier valor del caudal.

Geometría de la rampa.

La figura 6.11 muestra la trayectoria que sigue el agua a través del vertedero, la cual se asemeja a la trayectoria de un proyectil.



**Figura 6.11 Trayectoria de agua en vertedero**

La ecuación general para la napa superior es:

$$\frac{y}{H} = A \left( \frac{x}{H} \right)^2 + B \frac{x}{H} + C + D \quad [6.45]$$

Para un vertedero vertical de borde agudo en el cual la relación  $x/H$  sea mayor que 0.5. Las constantes de la ecuación 6.45 toman los siguientes valores:

$$A = -0.425 \quad B = 0.055 \quad C = 0.150 \quad D = 0.559$$

Para este caso particular:

$$y = -0.20 \text{ m (asumido)} \quad H = 0.295 \text{ m}$$

Aplicando la ecuación 4.22:

$$\frac{-0.20}{0.295} = -0.425 \left( \frac{x}{0.295} \right)^2 + 0.055 \frac{x}{0.295} + 0.150 + 0.559$$

Resolviendo para  $x$ :

$$x = 0.555 \text{ m} \approx 0.55 \text{ m}$$

$$\frac{x}{H} = \frac{0.55}{0.295} = 1.86 > 0.5$$

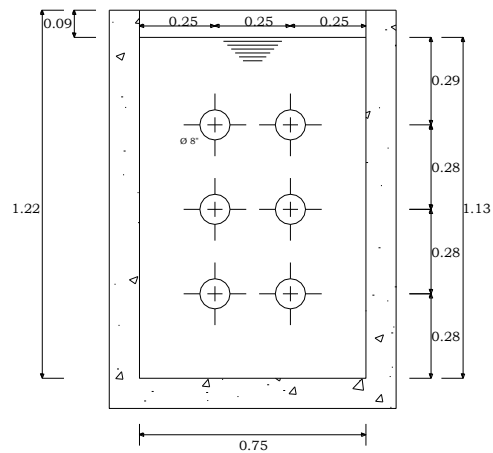
Utilizar una rampa de 0.60 m de largo en la parte superior.

#### **Cámara de aquietamiento.**

Se utiliza una cámara de aquietamiento para romper turbulencia y uniformizar el flujo a la entrada al canal de aproximación, constituida por una pantalla perforada, tal como lo muestra la figura 6.12.

Asumiendo seis orificios de 8" de diámetro (por ejemplo niples de tubería PVC  $\phi$  8" integrados en el vaciado de la pared):

$$\frac{N \cdot \pi \cdot D_0^2}{4} = \frac{Q}{v_0} \quad [6.46]$$



**Figura 6.12. Pantalla perforada**

Dónde:

N = Número de orificios

$D_o$  = Diámetro de un orificio en [m]

Q = caudal total ( $m^3/s$ )

$v_o$  = Velocidad por un orificio

$$v_o = \frac{4Q}{N \cdot \pi \cdot D_o^2} \quad [6.47]$$

$$v_o = \frac{4 * 0.10 m^3 / s}{6 \cdot \pi \cdot 0.2032^2 m^2} = 0.51 m / s$$

Pérdida de carga en la pantalla.

$$h_f = \frac{q^2}{C^2 \cdot A_o^2 \cdot 2g} \quad [6.48]$$

Dónde:

q = Caudal por un orificio [ $m^3/s$ ]

C = Coeficiente de gasto

$A_o$  = Área de un orificio [ $m^2$ ]

$$h_f = \frac{(0.10/6)^2 m^6 / s^2}{0.7^2 \cdot (0.2032^2 * \pi / 4)^2 \cdot 2 * 9.81 m / s^2} = 0.03 m$$

Dimensiones definitivas. La figura 6.9 muestra el esquema con el dimensionamiento definitivo del canal rectangular, incluyendo el perfil hidráulico.

### Usos y limitaciones del vertedero

Un vertedero rectangular en caída libre es siempre interesante cuando se pretende medir un caudal y realizar simultáneamente una mezcla rápida con un dispositivo de construcción bastante simple.

La pérdida de energía en la caída libre de la lámina vertedora es relativamente grande, convirtiéndose en una limitación del uso de los vertedores como mezcladores rápidos, siempre que el agua cruda es bombeada y la energía es cara. La pérdida de energía en la caída libre aumenta con la relación  $P/h_c$ , pudiendo ser mayor que 50% de la energía inicial. Esta energía es utilizada en la mezcla rápida, solo para el resalto hacia afuera, de este modo importa reducir al máximo la pérdida de caída libre, haciendo la relación  $P/h_c$ , la menor posible. Entretanto para ser utilizado el vertedor también como medidor, la relación  $P/h_c$  no debe ser inferior a 3. Los vertederos deben calcularse con caídas entre 2 y 3 veces  $h_c$  para minimizar energía.,

La energía perdida para la obtención de iguales gradientes de velocidad no es mayor en vertedor que en un dispositivo mecánico, una turbina por ejemplo es superior a otros dispositivos hidráulicos como el resalto en canales de inclinación variable o en canaleta Parshall.

En un vertedor de caída libre, las condiciones de flujo y en consecuencia el gradiente de velocidad y el tiempo de mezcla, no varían, se mantiene constante el caudal específico  $q$ . Así en el proyecto de una estación de tratamiento dividida en por ejemplo, dos etapas con igual caudal, sería suficiente prever dos canales paralelos de llegada de agua cruda.

Como en los demás dispositivos de mezcla rápida hidráulica, se puede también intentar superar su poca flexibilidad a las variaciones del caudal, haciendo variar la velocidad del canal. En la primera etapa se deja un cubrimiento de un material que pueda ser fácilmente removido, cuando fuera necesario el aumento de la capacidad de la estación. Tal profundidad es calculada por tentativas, lo que lo que torna mas fácil para el proyectista la adopción de un dispositivo mecánico por cuanto en este el gradiente de velocidad no depende de las condiciones hidráulicas del flujo, solamente del volumen de la cámara de mezcla y de la potencia aplicada al agua por el equipo.

El uso de vertedores rectangulares queda entonces, limitado a:

1. Pequeñas instalaciones, por su extrema simplicidad, fáciles de construir y de relativamente pequeñas dimensiones.
2. Instalaciones por gravedad, preferiblemente a caudal constante.

#### 6.7.4 MEZCLADORES ESTÁTICOS DE INSERCIÓN

Hay en el mercado modelos de mezcladores estáticos para insertar en tubos, desarrollados de diferentes formas en acero inoxidable o porcelana para evitar la corrosión, los cuales se colocan en un tubo de forma que se produzca una pérdida de carga alta. El gradiente de velocidad obtenido en esta unidad debe ser suficiente para lograr mezcla uniforme por lo que se utilizan gradientes superiores a  $3000 \text{ s}^{-1}$ . Se usan para mezclas instantáneas en los casos que predominen la desestabilización neutralización. Figura 6.13

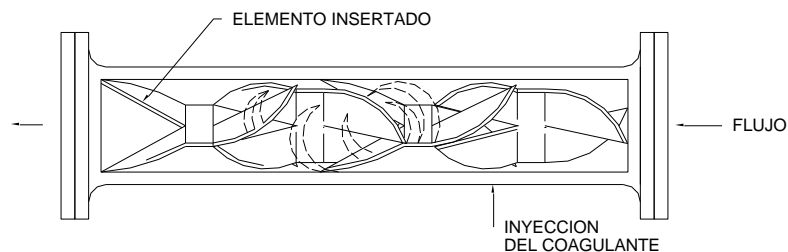
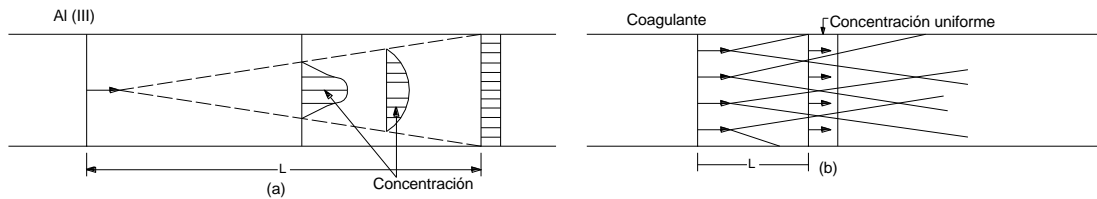


Figura 6.13 Mezclador estático de inserción en tubo

### 6.7.5 DISPERSORES

Los dispersores se basan en el hecho que cuanto mayor sea el número de puntos de aplicación en una sección dada en un canal o canalización por donde pasa el agua cruda, más rápida y uniforme será la dispersión del coagulante. Si existe un solo punto de aplicación, el coagulante se difunde de acuerdo con la velocidad del flujo formando un ángulo con la pared del conducto. La mezcla con el agua solo viene a ser completa después de una distancia  $L$ . Si en cambio se tienen varios puntos de aplicación, el fenómeno se superpone y la mezcla llega a ser uniforme a una distancia  $L$  mucho menor que en el caso anterior. Se deduce de aquí que entre más puntos de aplicación tenga más rápida es la dispersión. Figura 6.14

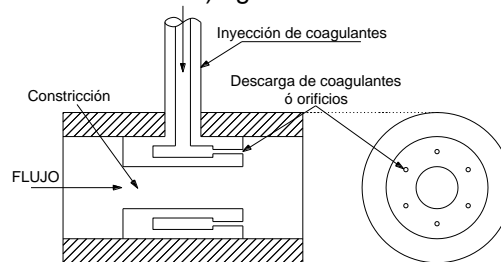


**Figura 6.14 Dispersores**

En la práctica se pueden construir mallas de tubos perforados que se introducen en el conducto afluente de entrada.

Vrae y Jordan experimentaron con un mezclador de dispersión que tiene un número determinado de orificios y alta turbulencia local producida por una constricción, como el que aparece en la figura 6.15, su eficiencia resultó ser más alta que los retomezcladores convencionales.

De estos estudios se puede concluir que un mezclador hidráulico dotado de un buen sistema de dispersión de coagulante será superado la desventaja de poca flexibilidad en términos de gradiente de velocidad que varía en función del caudal. La dispersión será facilitada con una mayor dilución posible de coagulante debido al gran número de orificios dispersores necesarios (1 orificio por pulgada cuadrada o 16 orificios por decímetro cuadrado) figura 6.15.



**Figura 6.15 Reactor de flujo pistón por inyección de coagulante en tubo**

El Ras 2000 establecía el siguiente criterio de diseño para difusores de tubo perforado:

- Espacio entre orificios menor que o igual a 0.1 m.
- Diámetro del orificio menor que o igual a 3 mm.
- Velocidad del agua a través del orificio, aproximadamente 3 m/s, en sentido perpendicular al flujo.

La dispersión será facilitada con una mayor dilución posible de coagulante, debido al gran número de orificios dispersores necesarios (1 orificio por pulg cuadrada o 16 orificios por decímetro cuadrado).



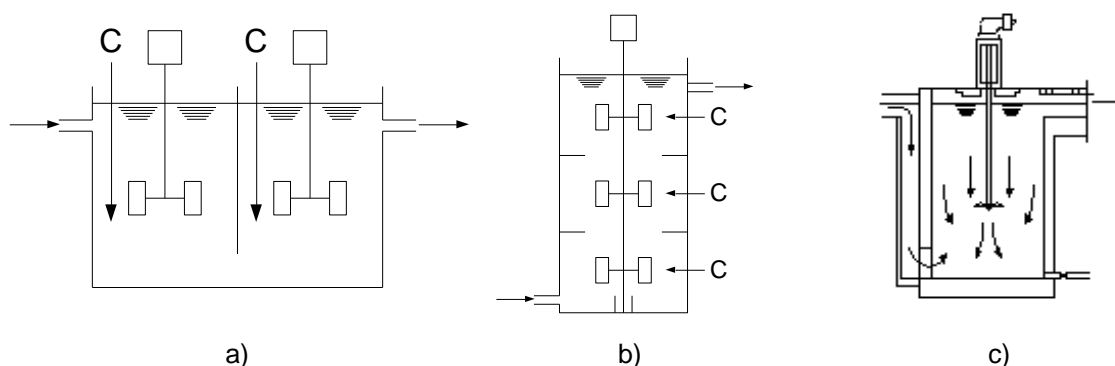
## 6.8 RETROMEZCADORES

La retromezcla se hace en tanques rectangulares o cilíndricos donde el flujo queda retenido por un tiempo  $t$ , y es agitada por sistemas hidráulicos o mecánicos con el objeto de producir turbulencia. Los coagulantes son generalmente inyectados en un solo punto, en el de mayor turbulencia.

Vrae y Jordan concluyeron que los retromezcladores producen consistentemente los peores resultados cuando se comparan con otros sistemas de mezcla. La velocidad de dispersión parece ser mucho menos alta de lo que se había creído, y el aumento de gradiente de velocidad en las paletas no parece mejorar el proceso.

### 6.8.1 DIFERENTES DISEÑOS DE RETROMEZCLADORES ( Fuente Arboleda Valencia 2000)

La figura 6.16 muestra tres tipos de retromezcladores mecánicos, proyectados para tratar de evitar cortocircuitos. En el caso a) se han dejado dos cámaras con la inyección de coagulantes al centro del eje de rotación de la primera turbina. En el caso b), se ha diseñado una cámara alta con tabiques horizontales e inyección de los coagulantes en el fondo. En el caso c) se ha diseñado una cámara con un tabique vertical de entrada y con una sola turbina. Este tipo de unidades posibilita la variación del gradiente de velocidad por medio de motorreductores. Los períodos de detención normal suelen hacerse de 10 a 60 segundos más frecuentemente de 30 – 45 segundos.



**Figura 6.16 Retromezcladores mecánicos ( Fuente Arboleda Valencia 2000)**

La retromezcla puede hacerse también por sistema hidráulico, cuando dispone de suficiente energía cinética en el flujo de entrada. La figura 6.17 presenta dos modelos.

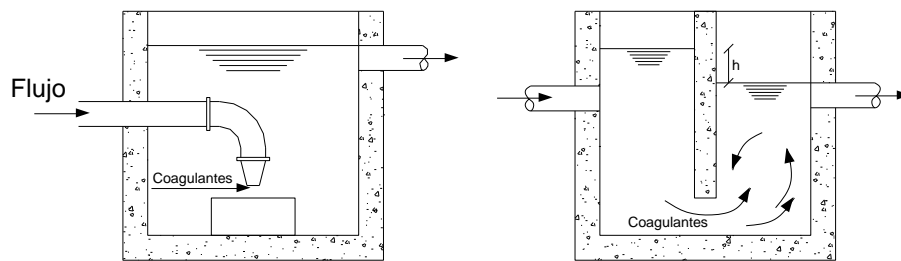
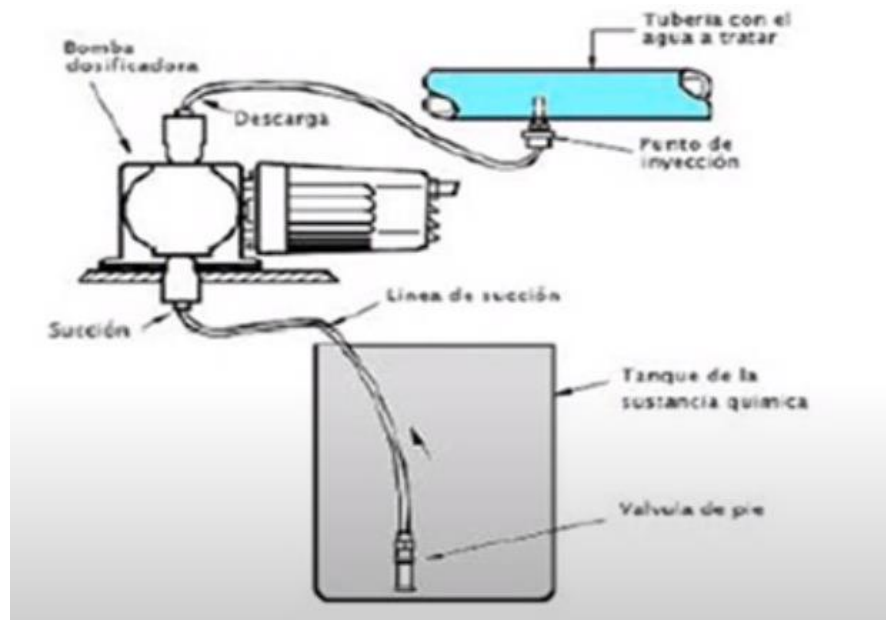


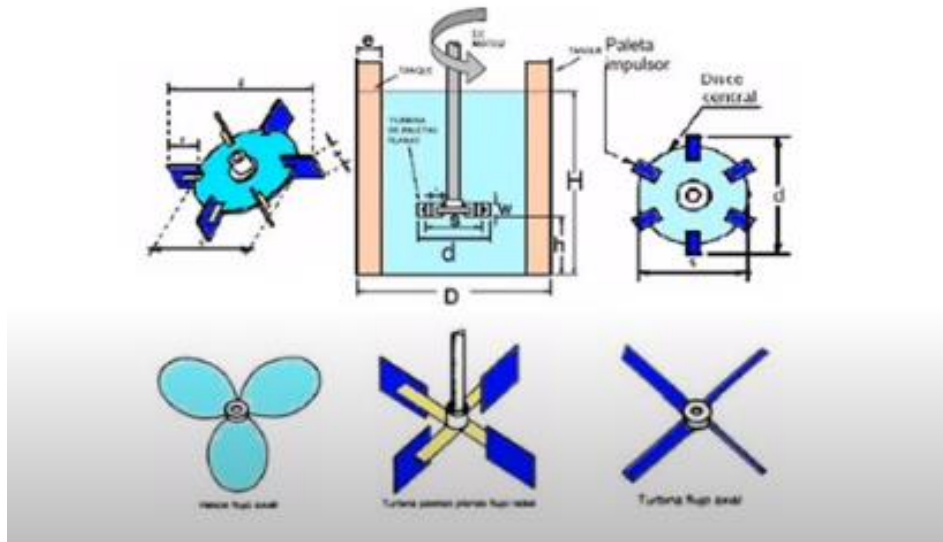
Figura 6.17 Retromezcladores hidráulicos



<https://www.youtube.com/watch?v=kjKibzviNN4>

Figura 6.15.1 Bomba dosificadora

### 6.8.2 RETROMEZCLADORES MECÁNICOS (Fuente J.A Perez 1997)



<https://www.youtube.com/watch?v=kjKibzviNN4>

**Figura 6 -18 Retromezclador mecánico**

Rushton<sup>16</sup> encontró que la potencia debida a las fuerzas de inercia y las fuerzas de viscosidades, representadas respectivamente por los números de Froude y de Reynolds, en el movimiento de un impulsor rotativo están representadas por la expresión general:

$$P = \frac{K}{g} \rho n^3 D^5 (Nr)^p (N_F)^q \quad [6.49]$$

Donde:

$N_R$ : es el número de Reynolds 
$$N_R = \frac{n\rho D^2}{\mu}$$

$N_F$ : es el número de Froude 
$$N_F = \frac{n^2 D}{g}$$

P : Potencia aplicada al agua por el impulsor (Kg\*m/s)

n : Número de rotaciones por segundo ( rps )

D : diámetro del rotor (m)

$\rho$  : Densidad del agua Kg masa / m<sup>3</sup>

$\mu$  : Viscosidad absoluta Kg\*s / m<sup>2</sup>

g : Factor de conversión de la ley de Newton ( 9.81) dimensional

El coeficiente K depende de la geometría del sistema cámara-equipos de mezcla, p y q dependen del régimen de flujo. Cuando el régimen es turbulento, que es la condición para la mezcla rápida y se evita la formación de remolinos, p = q = 0, resultando:

$$P = \frac{K}{g} \rho n^3 D^5 \quad [6.50]$$

El mayor problema para utilizar esta fórmula es la evaluación del coeficiente K, el cual varía de acuerdo con la velocidad de rotación del eje, con el tipo de agitador, con la dimensión y forma del tanque y con el número de estatores.

Se ha encontrado por experimentación en mezcladores tipo turbina, diferentes valores de K para distintos valores de Re los cuales son aplicables para tanques y turbinas similares a los de los experimentos. Para valores de  $Re > 10^5$ ,  $K = 6.3$  siempre y cuando se cumplan las siguientes relaciones geométricas mostradas en la figura 6.18

$$\begin{aligned} \frac{Dt}{D} &= 3 & B &= \frac{D}{4} & \frac{W}{D} &= 0.1 \\ 2.7 \leq \frac{H}{D} &\leq 3.9 & b &= \frac{D}{5} & 0.75 \leq \frac{h}{D} &\leq 1.3 \end{aligned}$$

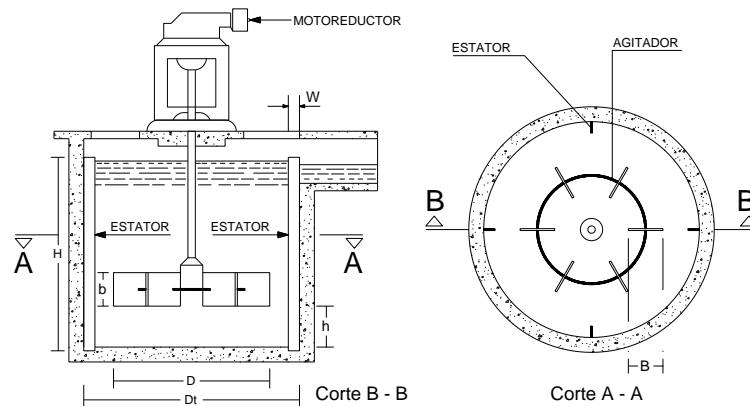
Por tanto la ecuación [ 6.49 ] queda de la siguiente forma

$$P = \frac{6.3}{g} \rho n^3 D^5 \quad [6.51]$$

y,

$$G = \sqrt{\frac{P}{\mu V}} = \sqrt{\frac{6.3 \rho n^3 D^5}{g \mu V}} \quad [6.52]$$

Donde V = volumen de la cámara de mezcla



**Figura 6.18 Esquema de un retomezclador mecánico (Fuente J.A Perez 1997)**

El gradiente de velocidad se escoge dentro de cierto rango pudiendo lograrse con una adecuada combinación de número de revoluciones, la geometría del agitador y el volumen del retomezclador.

AL usar la fórmula 6.50 se ve que para gradientes de velocidad entre 600 y 800  $s^{-1}$  se requiere potencias que van de 50 - 100 HP / $m^3$  tratado, valor muy alto que hace preferible el uso de mezcladores hidráulicos.

### Parámetros de diseño

De acuerdo al RAS 2000, especificaba los siguientes criterios de diseño:

- Tiempo de detención ( $t_d$ ) menor de 60 s.
- Gradiente medio de velocidad (G) entre 500  $s^{-1}$  y 2000  $s^{-1}$ .
- La planta debe contar por lo menos con dos unidades.

Punto de aplicación. Los productos químicos que se adicionan deben ser introducidos en la parte inferior de la turbina o de la hélice del agitador.

Pantallas. Se recomienda la ubicación de pantallas transversales a la dirección de flujo para prevenir la formación de vórtices

La AWWA sugiere tiempos de detención en la cámara de mezcla de 10 a 30 segundos y los siguientes gradientes de velocidad.

**Tabla 6.7**  
**Valores de G contra T en retromezcladores**

| T( seg) | G s <sup>-1</sup> |
|---------|-------------------|
| 20      | 1000              |
| 30      | 900               |
| 40      | 790               |
| > 40    | 700               |

Para dejar mayor flexibilidad en la operación, los motores que impulsan los agitadores deben ser de velocidad variable con relación 1:3 o 1:4 ya sea por sistema de correas o caja de velocidad.

### 6.9 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS MEZCLADORES HIDRÁULICOS Y MECÁNICOS

El gradiente de velocidad en un mezclador mecánico varía con el caudal, siendo una ventaja adicional permitir controlar el grado de agitación, variando la velocidad de rotación del impulsor. Entretanto el funcionamiento depende de una fuente de energía externa y de este modo, una falla en el sistema de alimentación o en el propio mecanismo, causa el colapso del proceso de mezcla rápida, perjudicando todo el tratamiento.

La energía desprendida por un mezclador mecánico es siempre mayor que la energía disipada en un mezclador hidráulico.

La principal objeción que se hace a los dispositivos hidráulicos es la poca flexibilidad en las variaciones del caudal. Por otro lado el costo relativamente alto y la complejidad propia de los equipos electromecánicos tornan la utilización inadecuada en los países en desarrollo. En nuestro medio, tradicionalmente se ha dado preferencia a dispositivos hidráulicos de mezcla rápida, tales como las canaletas Parshall y vertedores.

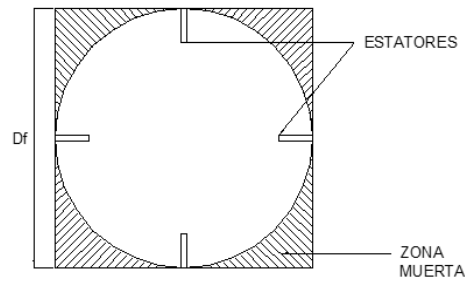
**Ejemplo. (Fuente J.A Perez 1997)** Diseñar un mezclador mecánico de turbina para un caudal de 100 l/s; la temperatura mínima esperada del agua es 16°C; el gradiente de velocidad y el tiempo de detención seleccionados, son respectivamente 1000 s<sup>-1</sup> y 20 s.

Volumen del tanque.  $V = T.Q$

$$V = 20 \text{ s} * 0.10 \text{ m}^3/\text{s} = 2.00 \text{ m}^3$$

Dimensionamiento del tanque.

A pesar de que los modelos son tanques cilíndricos, estos tienen dificultad de construcción (encofrado, figuración del refuerzo) y por eso son utilizados los tanques de planta cuadrada, provistos de cuatro estatores simétricamente dispuestos, tal como lo muestra la figura 6.19.



**Figura 6.19 Ubicación de los estatores en un tanque de planta cuadrada**

Su comportamiento no difiere significativamente del tanque cilíndrico.

Suponiendo  $Dt = 1.20$  m (ver figura 6.20)

Área de la planta.

$$A = [Dt]^2 = 1.44 \text{ m}^2$$

Profundidad del agua.

$$H = \frac{V}{A} = \frac{2.00 \text{ m}^3}{1.44 \text{ m}^2} = 1.39 \text{ m}$$

Borde libre. Se deja un borde libre de 0.11 m.

$$Bl = 0.11 \text{ m}$$

Profundidad del tanque.

$$Ht = H + Bl = 1.39 \text{ m} + 0.11 \text{ m} = 1.50 \text{ m}$$

Localización y diámetro del agitador.

Diámetro de la turbina.

$$D = \frac{Dt}{3} = \frac{1.20}{3} = 0.40 \text{ m}$$

Chequeo:  $2.7 \leq \frac{H}{D} \leq 3.9$

$$\frac{H}{D} = \frac{1.39}{0.40} = 3.48$$

Localización sobre el fondo. Se supone  $h = 0.30$  m y se chequea:

$$0.75 \leq \frac{h}{D} \leq 1.3$$

$$\frac{h}{D} = \frac{0.30}{0.40} = 0.75$$

Dimensiones de la paleta.

$$B = \frac{D}{4} = \frac{0.40 \text{ m}}{4} = 0.10 \text{ m}$$

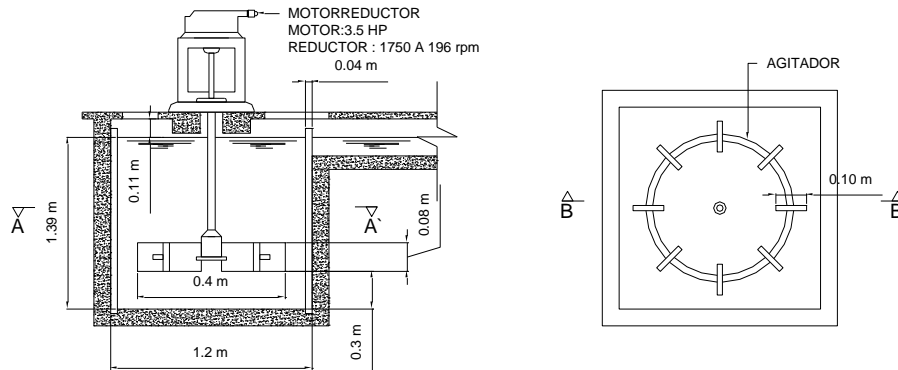
$$b = \frac{D}{5} = \frac{0.40m}{5} = 0.08m$$

Ancho del estator.

$$W = 0.10 * D = 0.10 * 0.40 m = 0.04 m$$

Dimensiones definitivas del tanque y el agitador.

La figura 6.20 presenta un esquema con las dimensiones definitivas del retro mezclador.



**Figura 6.20 Dimensiones del retromezclador**

Potencia del motor. La potencia del motor debe calcularse con base en la potencia consumida por el agua en la realización del proceso es decir, aquella requerida para producir el gradiente de velocidad seleccionado. Adicionalmente debe considerarse la pérdida de eficiencia debida, entre otras cosas, a la fricción de los distintos elementos que pueden conformar el sistema de agitación (motor, motoreductor, poleas, engranajes, chumaceras, etc.) y a la inercia en el momento del arranque. Teniendo en cuenta lo anterior, la potencia nominal debe ser dividida por un factor de seguridad cuyo valor depende de las características de fabricación de los equipos.

Potencia total consumida. De la ecuación 6.4:

$$P = \mu.G^2.V \quad [6.53]$$

$$P = 1.138 * 10^{-4} \text{ kgf.s/m}^2 * 1000^2 \text{ s}^{-2} * 2 \text{ m}^3 = 227.6 \text{ kgf.m/s}$$

$$P = 227.6 \text{ kgf.m/s} * (1/76) = 2.99 \text{ hp}$$

Potencia del motor.

Suponiendo un factor de eficiencia de 0.85:

$$P_m = \frac{2.99 \text{ hp}}{0.85} = 3.52 \text{ hp} \cong 3.50 \text{ hp}$$

Velocidad de rotación del agitador. De la ecuación 6.50:

$$P = \frac{K}{g_c} \rho n^3 D^5$$

Despejando n:

$$n = \sqrt[3]{\frac{P \cdot g_c}{K \cdot \rho \cdot D^5}} \quad [6.53]$$

Para 16°C, de la tabla 6.6 se obtiene:

$$P = 0.99897 \text{ g/cm}^3 = 998.97 \text{ kg/m}^3$$

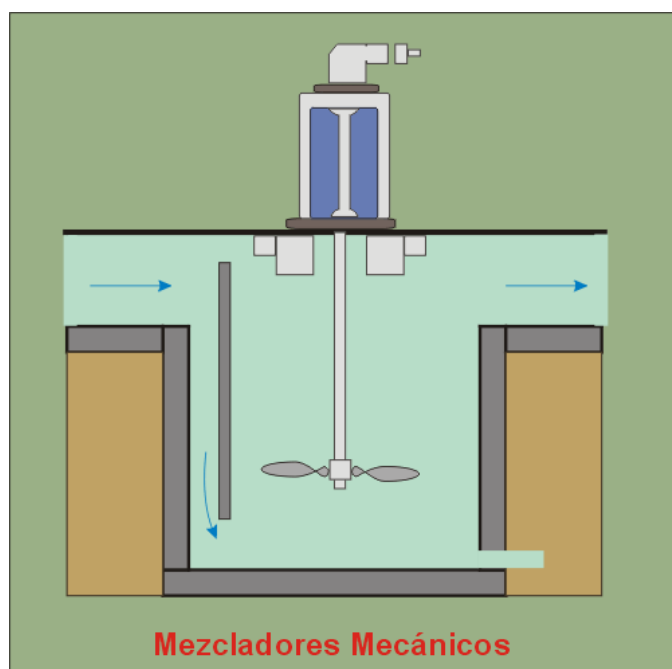
$$n = \sqrt[3]{\frac{227.6 \text{ kgf.m/s} * 9.81 \text{ kg.m/kgf.s}^2}{6.3 * 998.97 \text{ kg/m}^3 * 0.40^5 \text{ m}^5}}$$

$$n = 3.26 \text{ rps} * 60 = 195.6 \text{ rpm} \approx 196 \text{ rpm}$$

Los motores generalmente trabajan a 1750 rpm; como las revoluciones requeridas en este caso son 196 rpm, se hace necesario acoplar entre el eje del motor y el eje del agitador un motoreductor o un juego de poleas. Existen en el mercado dos tipos de motoreductores: los modelos que tienen una relación de velocidades constante, por ejemplo 7:1, es decir que reducen 1750 rpm a 250 rpm exclusivamente o aquellos modelos que por medio de cierto control pueden entregar al eje del agitador un cierto número de revoluciones cualquiera, siendo este segundo tipo mucho mas costoso.

Existe otra alternativa que consiste en acoplar un juego de poleas, una localizada en el eje del motor y otra en el eje del agitador, de unas dimensiones tales que produzcan la velocidad de rotación requerida en el eje. No obstante si se desea utilizar un motoreductor de velocidad constante, es necesario partir de la velocidad de salida del mismo, indicada en los catálogos, como un dato de diseño, y hallar la potencia del motor y el gradiente de velocidad para verificar si efectivamente se produce el valor del gradiente previamente seleccionado, situación que puede conseguirse con una adecuada geometría del agitador.





Fuente Cepis /ops/ 04 109

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Amirtharajah, A. y Mills, K. M. Rapid-mix design for mechanisms of alum coagulation. *Journal of the American Water Works Association*. Vol. 74, abril, 1982, pp. 210-216.
- (2) Letterman, May y May. Influence of rapid-mix parameters on flocculation. *Proceedings of the AWWA Seminar of Upgrading Existing Water Treatment Plants*, 1974.
- (3) Amirtharajah, A. y Trusler, S. L. Destabilization of particles by turbulent rapid mixing. *Journal of Environmental Engineering ACSE*, 1985.
- (4) Amirtharajah, A. Velocity gradients in rapid mixing. Seminario Nacional sobre Coagulación y Filtración Directa. Universidad de São Paulo, Escuela de Ingeniería de San Carlos, 1989.
- (5) Vrale y Jordan. Rapid mixing in water treatment. *Proceedings AWWA Seminar of Upgrading Existing Water Treatment Plants*, 1974.
- (6) Stengquist, R. y Kaufman, R. M. *Initial mixing in coagulation processes*. Berkeley, Universidad de California, 1972.
- (7) Pratte, B. y Baines, D. Profiles of the round turbulence jet in a cross flow. *Journal of the Hydraulic Division. Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, noviembre de 1967.
- (8) James y Oldshue. *Fluid mixing technology chemical engineering*. Nueva York, McGraw Hill, 1983.
- (9) Argaman, V. y Kaufman, W. J. Turbulence and flocculation. *Journal of the Sanitary Engineering Division, Proceedings, ACSE*, 1970.

<https://www.yumpu.com/es/document/read/13667949/tratamiento-de-agua-para-consumo-humano-plantas-de-filtracion->

<https://www.virtualpro.co/biblioteca/tratamiento-de-aguas-para-consumo-humano-plantas-de-filtracion-rapida-manual-i-teoria>