



*Universidad Nacional  
Autónoma de México*

---

---

*Facultad de Ingeniería*

**DISEÑO FUNCIONAL DE PLANTAS  
CLARIFICADORAS MODERNAS**

**T E S I S**

*Que para obtener el Título de  
INGENIERO CIVIL*

*P r e s e n t a*

**ANTONIO RAMIREZ GONZALEZ**



*México, D.F.*

1985



Universidad Nacional  
Autónoma de México



## **UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso**

### **DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# DISEÑO FUNCIONAL DE PLANTAS CLARIFICADORAS MODERNAS

## 1.- INTRODUCCION

## 2.- CARACTERISTICAS DEL AGUA Y NORMAS DE CALIDAD

### 2.1 CARACTERISTICAS DEL AGUA

#### 2.1.1 CARACTERISTICAS FISICAS

#### 2.1.2 CARACTERISTICAS QUIMICAS

#### 2.1.3 CARACTERISTICAS BACTERIOLOGICAS

## 3.- COAGULACION

### 3.1 PRODUCTOS QUIMICOS

### 3.2 SELECCION Y DOSIFICACION DE COAGULANTES

### 3.3 MEZCLA RAPIDA

## 4.- FLOCULACION

### 4.1 MEZCLA LENTA

### 4.2 TANQUES FLOCULADORES

## 5.- SEDIMENTACION

### 5.1 SEDIMENTACION DE ALTA VELOCIDAD

### 5.2 PARAMETROS DE DISEÑO

## 6.- FILTRACION

### 6.1 FILTRACION RAPIDA

## 7.- RESUMEN Y RECOMENDACIONES

### CONCLUSIONES

### BIBLIOGRAFIA

## 1.- INTRODUCCION

El abastecimiento de agua es y ha sido una de las principales preocupaciones del ser humano a través de su historia. Desde épocas remotas, el hombre se estableció alrededor de los ríos y lagos, fundando ciudades junto a ellos para obtener un suministro regular de agua. En un principio, el único tratamiento que se le daba al agua captada de escorrentimientos superficiales antes de suministrarla a la población, consistía en hacerla pasar por lechos de arena fina a bajas velocidades (filtración lenta), esta única operación, no sólo removía las partículas responsables de la turbiedad del agua (clarificación), sino que también eliminaban buena parte de los microorganismos causantes de las enfermedades hídricas que aquejaban en esos tiempos a los centros de población. Con la necesidad de obtener mayores volúmenes de agua potable, nacieron los filtros de lechos de arena gruesa (filtración rápida) que permiten velocidades aproximadas de  $120 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{día}$ .

En la actualidad, se requiere la construcción de una serie de estructuras interconectadas entre sí para hacer llegar el vital líquido a los centros urbanos cada vez más distantes de las fuentes de abastecimiento. Un sistema de aprovisionamiento de agua potable completo está integrado por obras de captación, conducción, potabilización, regularización y distribución en este orden precisamente.

La calidad de agua cruda (agua sin tratar), depende del tipo de fuente aprovechada, superficial o subterránea. En función de la calidad del agua, ésta puede ser utilizada sin tratamiento, pero por lo general las aguas superficiales contienen impurezas que deben ser reducidas o removi-

das para obtener agua de calidad aceptable.

Debido al crecimiento de los centros de población y la necesidad de mejorar la calidad del agua, el estudio del -- proceso de clarificación cobró gran importancia. Los adelantos más significativos en aplicar un nuevo tratamiento eficaz y de mayor economía se dió hasta la década de 1950 a 1960, cuando se amplió la teoría y las formulaciones matemáticas con su aplicación práctica y directa a los nuevos diseños y más aún, a la rehabilitación de plantas en operación cuya capacidad ha sido superada por la demanda de agua. Los fenómenos que ocurren en los procesos de -- coagulación, floculación, sedimentación y filtración se estudiaron exhaustivamente, esto condujo a la introducción de modificaciones importantes en el terreno de la -- clarificación como son los medios filtrantes múltiples, -- los sedimentadores tubulares, el uso de coagulantes secundarios como los polielectrolitos, y otros. Tal vez, lo más importante ha sido que la tecnología aplicada a la -- clarificación del agua ha dejado de ser un conjunto de reglas empíricas, convirtiéndose en una ciencia multidisciplinaria.

La finalidad del presente trabajo es describir someramente las operaciones unitarias que intervienen en el proceso de clarificación y explicar los procedimientos utilizados actualmente en el diseño funcional de las unidades -- que componen una planta clarificadora moderna.

El proceso de clarificación consiste en eliminar la turbiedad y color que presentan la mayoría de las aguas de -- fuentes superficiales principalmente, produciendo una --- agua cristalina, agradable a la vista del consumidor. Esto se logra dependiendo de la calidad del agua y de las --

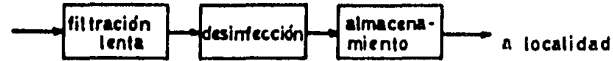
eficiencias requeridas mediante una o varias de las siguientes operaciones: coagulación, floculación, sedimentación y filtración.

La secuencia o diagrama de flujo más usual en la práctica de la clarificación, (figs. 1 y 2), consiste en añadir productos químicos que mezclados íntimamente con el agua mediante agitación rápida (coagulación), desestabilicen las partículas sólidas contenidas en ella, inmediatamente, proporcionar al líquido una mezcla lenta (floculación), para propiciar la formación de coágulos o flóculos de mayor tamaño que las partículas inicialmente contenidas en el agua y que son más fácilmente removidas mediante la acción de la gravedad, fenómeno que se realiza en tanques diseñados para reducir la velocidad de transporte del agua (sedimentación). Finalmente, se hace pasar el fluido por lechos de material poroso (filtración) que retienen las partículas pequeñas que escapan de los tanques sedimentadores.

## ESQUEMAS DE CLARIFICACION:

a) TURBIEDAD 50 UNIDADES; COLOR 30 UNIDADES

TURBIEDAD + COLOR 80 UNIDADES (aprox.)



b) TURBIEDAD + COLOR > 80 ≤ 100

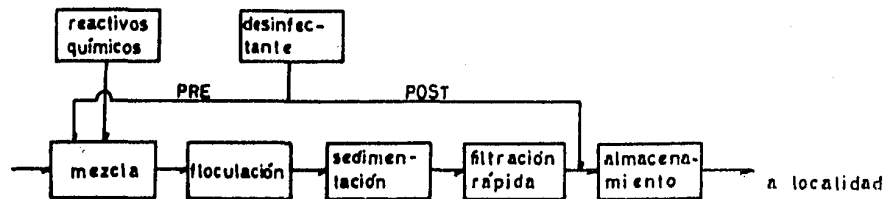
cuando la turbiedad y color son susceptibles de remoción simple



FIGURA 1

c) cuando técnica y económicamente no son prácticos los casos a) y b)

(1) PARA AGUA CON TURBIEDAD MAYOR DE 100 UNIDADES



(2) AGUAS CON TURBIEDAD ALTA (mas de 1000 unidades) O CON ALTO CONTENIDO DE COLOR

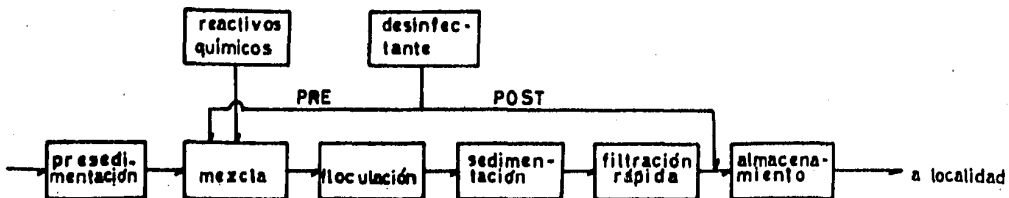


FIGURA 2



## 2.- CARACTERISTICAS DEL AGUA Y NORMAS DE CALIDAD

### 2.1 Características del agua

Se puede decir que el agua tiene por fórmula  $H_2O + X$ , donde  $H_2O$  es agua químicamente pura, que es prácticamente imposible encontrarla en la naturaleza, y X representa las impurezas. Es usual clasificar las características del agua - en físicas, químicas y bacteriológicas.

#### 2.1.1 Características Físicas

Dentro de las características físicas podemos mencionar la turbiedad, el color, el olor, el sabor y la temperatura. A continuación se hace un resumen de cada una de ellas.

##### Turbiedad

El término turbio, es aplicado a aguas que contienen materia suspendida que interfiere el paso de la luz a través de ellas o cuando la visión de la profundidad en un recipiente o depósito con agua es restringida. La turbiedad puede ser causada por una amplia variedad de materiales suspendidos. En lagos y otros aguas con relativa quietud, la turbiedad es debida principalmente a coloides o finos dispersos en ella. En ríos bajo condiciones de flujo, la turbiedad generalmente es debida a las dispersiones relativas de cuarzo; en los ríos que pasan por áreas urbanas, la turbiedad la provocan los contaminantes industriales y las aguas negras; en el campo, la materia orgánica y la tierra que -arrastran las lluvias, además de la contaminación bacteriana. Por las condiciones anteriores, vemos que la turbiedad es provocada por materia orgánica e inorgánica, la disparidad en la naturaleza del material causante de la turbiedad hace imposible establecer reglas o estandarizar

métodos para su remoción.

La unidad de turbiedad está dada por 1 mg. de Dióxido de Silicio ( $\text{Si O}_2$ ) por litro de agua; este sílice debe llenar ciertos requisitos respecto a su tamaño. El turbidímetro Jackson fue calibrado con esta unidad y es ampliamente utilizado, aunque los resultados obtenidos con este instrumento dependen mucho de la habilidad del operador. Con el desarrollo de los aparatos electrónicos ya se tiene gran precisión, (figs. 3, 4, y 5).

Cualquier turbiedad en el agua es asociada automáticamente con una posible contaminación y daño a la salud, ya que -- confiere al vital líquido un aspecto desagradable que hace desconfiar a los consumidores. La clarificación es más difícil y costosa cuando se incrementa la turbiedad. El uso de filtros lentos de arena ya no es práctico porque la turbiedad alta acorta su carrera y el efluente final tiene -- una calidad inferior; aún en los modernos filtros de medios mezclados se presenta el mismo fenómeno. La desinfección hecha por cloración y ozonación también se ve disminuida cuando aumenta la turbiedad, ya que los organismos patógenos deben estar en contacto con el desinfectante para eliminarlos y muchas veces sucede que en aguas con alta turbiedad los organismos se enconchan y se esconden en las partículas, protegiéndose del desinfectante. Por esta razón y por la necesidad estética de ausencia visual de turbiedad, las normas nacionales limitan a 5 unidades Jackson la cantidad máxima permisible en aguas potables.

### Color

Muchas aguas superficiales, particularmente las de áreas pantanosas, son extremadamente coloreadas. El material colorante del agua resulta del contacto de ésta con materia orgánica e inorgánica como hojas, ramas, raíces, madera, -

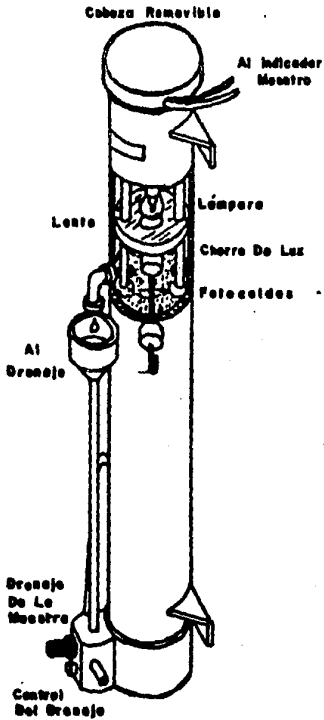


FIGURA 3  
TURBIDIMETRO

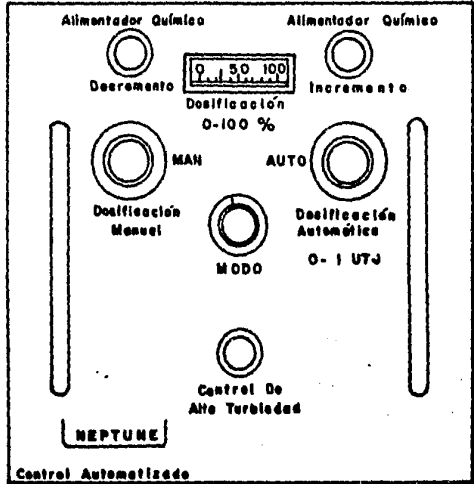


FIGURA 5  
DOSIFICACION CON TURBIDIMETRO

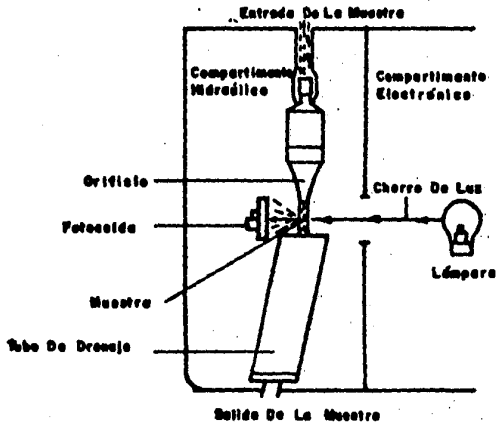


FIGURA 4  
TURBIDIMETRO

extractos vegetales, hierro, carbón y otras sustancias. - El color ocasionado por materia suspendida se conoce como color aparente y difiere del color producido por extractos vegetales u orgánicos, llamado color verdadero. En el análisis es importante diferenciar estos dos tipos de color. Las aguas superficiales pueden ser coloreadas por desechos de la industria textil y la del papel, estos colorantes industriales son difíciles de tratar y su degradación natural es lenta, persistiendo a grandes distancias del recorrido del río.

Es necesario adoptar una medida que nos indique la cantidad de color que posea el agua, muchas muestras requieren de un pretratamiento para remover la materia suspendida y determinar el color verdadero. La unidad establecida se obtiene al disolver 1 mg. de platino (generalmente se usa el cloroplatinato de potasio  $\text{Cl}_6\text{PtK}_2$ ) en un litro de agua. La determinación del color se hace por medio de comparaciones de una serie de muestras hechas con una solución de platino y el agua a determinar. También se ha desarrollado la comparación con vidrio o discos coloreados. Es importante hacer notar que el color del agua es altamente dependiente del PH, aumentando el color con el aumento del PH, por lo tanto, es importante reportar el valor del PH del agua que se analiza.

Los materiales naturales dan un cierto color al agua, tal vez no tengan sustancias tóxicas pero el consumidor no la acepta por su apariencia, las normas establecen que el agua para uso humano no exceda de 15 unidades de color. La remoción del color es un proceso caro, considerando costos de capital y de operación, la información obtenida del origen del agua cruda que se va a utilizar en la planta es de gran ayuda, pues con el color que posea el agua, se puede visualizar el tratamiento a seguir, pudiéndose pensar -

en la cantidad de productos químicos coagulantes a usar y la filtración necesaria para producir agua aceptable.

### Olor y Sabor

Los olores y sabores en el agua son debidos a una gran variedad de sustancias, siendo las principales organismos microscópicos vivos o vegetación en estado de descomposición, incluyendo semillas, bacterias, hongos y algas; también -- puede deberse a materia orgánica en estado de descomposición, desagües domésticos y deshechos industriales. La dificultad de diferenciar entre el olor y el sabor del agua, porque los dos sentidos están íntimamente ligados entre sí, hace que se utilice el sentido del olfato como medida, a pesar de la falta de precisión de este método, ya que no existe ninguna técnica analítica para su determinación.

El mal olor o sabor del agua, hace que los consumidores la rechacen y no la consuman. Las aguas con sabores y olores desagradables son particularmente inapropiadas para fines de bebida, uso doméstico, preparación de bebidas embotelladas, industria lechera, todo lo relacionado con el procesamiento de alimentos, etc. Las normas indican que el agua debe ser inodora e incolora para ser potable. Se dice que el cloro eliminará los problemas de olor, pero esto no es siempre cierto, ya que algunas sustancias al combinarse con él, producen un olor muy desagradable. Es necesario hacer un estudio cuidadoso del mal olor en el agua antes de aplicar ciegamente algún tratamiento que pueda -- agravar el problema.

### Temperatura

Aunque a primera vista el efecto de la temperatura pueda pasar inadvertido, en realidad el cambio de temperatura en el agua puede tener un gran efecto y muchas veces es un --

factor crítico en el proceso de clarificación, la temperatura hace variar la densidad y viscosidad del agua. (tabla 1). Las unidades empleadas para medir la temperatura son los grados centígrados. A mayor temperatura se tiene menor solubilidad de gases y mayor actividad biológica; por tanto, el aumento de temperatura disminuirá la cantidad de oxígeno, aumentará la actividad bacteriana y puede llegar a producir condición séptica con los siguientes problemas de malos olores y sabores. Las normas de calidad indican el rango de 12°C a 25°C, como el deseable para el suministro de agua potable.

La temperatura no solo crea zonas deficientes de oxígeno y malos olores y sabores, sino que también influye en los procesos de tratamiento como la coagulación química, filtración, desinfección, etc. Por otro lado, las temperaturas altas aceleran los problemas de corrosión de tuberías.

### 2.1.2. Características Químicas

Podemos enumerar las características químicas siguientes: Potencial Hidrógeno, dureza, sólidos totales, índice de saturación, conductividad eléctrica, alcalinidad total, calcio, magnesio, cloruros, fluoruros, sulfatos, sodio, sílice, oxígeno, amoníaco, nitritos, nitratos, dióxido de carbono, fierro, manganeso, ácido sulfhídrico, compuestos fenólicos, etc. Debido a la extensión del trabajo únicamente se describirán tres de las características anteriores, las cuales están muy ligadas al proceso de clarificación.

#### Potencial Hidrógeno (PH)

El PH del agua es una forma de expresar la concentración de iones hidrógeno en ella. Los ácidos y bióxido de carbono libre bajan su valor y los carbonatos, fosfatos, silicatos y boratos aumentan el valor del PH. Para medir el PH -

Tabla 1

Densidad y viscosidad del agua

TEMPERATURA °C	Densidad $\rho$ grm/cm <sup>3</sup>	V I S C O S I D A D	
		Absoluta $\mu$ grms masa (poises)	Cigématica $\nu = \mu/\rho$ cm <sup>2</sup> /seg (stokes)
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	1.00000	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	0.01146	0.01146
16	0.99897	0.01088	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

en el agua, se construyó una escala del 0 al 14 siendo el rango ácido de cero a siete y básico de siete a catorce; - el siete será entonces un valor neutro. Las normas establecen como permisible, el rango de seis a ocho en la escala de PH; valores fuera de este rango ocasionan esfacelación del epitelio bucal. El PH es el factor más importante en los procesos del tratamiento, prevención de incrustaciones y corrosión de tuberías, cambiadores de calor, calderas, turbinas, etc. Valores altos de PH provocan incrustaciones en las tuberías y equipo; valores bajos de PH provocan corrosión.

#### Dureza

La dureza de las aguas puede ser temporal, producida por bicarbonatos y permanente, producida por sales fijas como cloruros, sulfatos, etc. La dureza total es igual a la suma de las durezas temporal y permanente. En la mayoría de los casos la dureza es debida al calcio y al magnesio. La dureza se expresa como  $\text{CaCO}_3$  en mg./lt. que es la forma de medirla. Es indeseable en el procesamiento de alimentos. Las normas de calidad indican 300 mg./lt. como cantidad máxima permisible. Es fuente principal de incrustaciones en equipos de intercambio de calor, calderas, turbinas, líneas de conducción, etc. Provoca espumas y lodos de color amarillo en equipos industriales, es factor de consumo excesivo de jabón y energéticos, indeseable en la elaboración de productos de alta calidad. Los métodos de tratamiento son el ablandamiento y la destilación.

#### Sólidos Totales

Los sólidos totales representan la suma de los sólidos disueltos y los sólidos suspendidos. Proviene de la disolución de minerales que forman los suelos y las rocas, pue--



den incluir constituyentes orgánicos y agua de cristalización. La unidad empleada en su medición son los mg/lt. Un exceso de sólidos totales produce irritación gastrointestinal. Las normas establecen 1000 mg./lt. como cantidad máxima permisible. Las altas concentraciones de sólidos disueltos perjudican al proceso de clarificación, debido a su interferencia, además causan espumación en calderas. Los sólidos suspendidos provocan taponamiento en líneas, depósitos en equipos, etc.

### 2.1.3 Características Bacteriológicas

Toda agua natural contiene microorganismos; estos provienen del suelo, del aire, de los objetos, de las personas y animales. Su mayor o menor concentración es una de las características de cada fuente de abastecimiento.

Los microorganismos en el agua pueden ser perjudiciales o benéficos según sea el caso. En ocasiones pueden producir enfermedades específicas (cólera, disentería, tifo); ser responsable de la muerte del ganado; destruyen la vida acuática, etc. En cambio, hay ocasiones en que la actividad bacteriana sirve para producir el proceso de autopurificación de la corriente y la estabilización de la materia orgánica, lo que representa un considerable beneficio sanitario. Es indispensable distinguir entre los organismos causantes de enfermedades o patógenos y los benéficos. En práctica corriente de laboratorio se han ideado pruebas a este respecto; recuento bacteriano y prueba para determinar organismos coliformes.

## 2.2 Normas de Calidad para Agua Potable

Las normas de calidad del agua para uso doméstico deben ser tales que eliminen o minimicen todos los peligros conocidos para la salud, que ciertos contenidos no afecten

la economía del usuario ni las instalaciones de los sistemas de abastecimiento a la población. Es evidente que las normas deben ser revisadas regularmente y complementadas con los nuevos conocimientos.

Las normas utilizadas mundialmente son muy variables y dependen del desarrollo económico y tecnológico de cada país en particular. Las del nuestro, están basadas en las normas para agua potable establecida por la Organización Mundial de la Salud, así como por las emitidas por la Secretaría de Salubridad y Asistencia, conjugándolas con los lineamientos técnicos requeridos por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, que se encarga de la elaboración de manuales que contienen dichas normas. Estos manuales hacen descripción detallada de todos los aspectos referentes a las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua potable, así como de la realización de la toma de muestras en las fuentes de abastecimientos y en las plantas potabilizadoras.

#### 2.2.1. Normas Físico - Químicas

La tabla 2 relaciona las características del agua con las cantidades o concentraciones deseables y permisibles para agua potable, de acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (1) y con la Secretaría de Salubridad y Asistencia (2).

#### 2.2.2. Normas Bacteriológicas

Los estudios bacteriológicos del agua sirven para identificar microorganismos de importancia para la salud pública, permitiendo con ello elegir vías adecuadas de control y destrucción de los mismos. Se han establecido como índices de contaminación a organismos del grupo coliforme ya que resulta ser la medida más sensible a la densidad bacte

TABLA 2 CARACTERISTICAS FISICO-QUIMICAS DEL AGUA

CARACTERISTICA	UNIDAD	CONCENTRACION	
		DESEABLE	PERMISIBLE
COLOUR	ESCALA PLATINO-COBALTO	5 (1)	50 (1) 20 (2)
TURBEDAD	JACKSON	5 (1)	25 (1) 10 (2)
OLOR Y SABOR	OLFATO	INODORA	INODORA
TEMPERATURA	°C	12 - 25	-
POTENCIAL MICROBEND	ESCALA PH	7 - 8.5 (1)	6.5 - 9.2 (1) 6.0 - 8.0 (2)
INDICE DE SATURACION	PH ACTUAL - PH SATURACION	-	+ 0.5 - 0.5
CONDUCTIVIDAD ELECTRICA	MICROOMHS	-	-
ALCALINIDAD TOTAL	CaCO <sub>3</sub> mg/lt	-	400 (2)
DUREZA	CaCO <sub>3</sub> mg/lt	100 (1)	500 (1) 300 (2)
CALCIO	Ca mg/lt	75 (1)	200 (1)
MAGNESIO	Mg mg/lt	30 (1)	150 (1) 125 (2)
CLORUROS	Cl mg/lt	200 (1)	250 (2) 600 (1)
FLUORUROS	(F <sup>-</sup> ) mg/lt	0.6 (1)	1.7 (1) 1.5 (2)
SULFATOS	SO <sub>4</sub> mg/lt	200 (1)	400 (1) 250 (2)
SODIO	Na mg/lt	-	-
SILICE	SiO <sub>2</sub> mg/lt	-	-
OXIGENO	O <sub>2</sub> mg/lt	-	-

TABLA 2 (CONTINUACION)

CARACTERISTICAS	UNIDAD	CONCENTRACION	
		DESEABLE	PERMISIBLE
AMONIACO	N mg/lt.	-	0.5 (1)
NITRITOS	N mg/lt.	-	0.05 (1)
NITRATOS	NO <sub>3</sub> mg/lt.	-	45 (1)
DIOXIDO DE CARBONO	CO <sub>2</sub> mg/lt.	-	-
FIERRO (Fe + Mn)	Fe mg/lt.	0.1 (1)	1.0 (1) 0.3 (2)
MANGANESO (Fe + Mn)	Mn mg/lt.	0.05 (1)	0.5 (1) 0.3 (2)
ACIDO SULFHDIRICO	H <sub>2</sub> S mg/lt.	cero	cero
COMPUESTOS FENOLICOS	Fenol mg/lt.	0.001 (1)	0.002 (1) 0.001 (2)
SOLIDOS TOTALES DISUELTOS + SUSPENDIDOS	mg/lt.	500 (1)	1500 (1) 1000 (2)
CADMIO	Cd mg/lt.	cero	0.01 (1)
CIANURO	Cn mg/lt.	cero	0.05 (1)
ARSENICO	As mg/lt.	cero	0.05 (1)
PLOMO	Pb mg/lt.	cero	0.1 (1,2)
MERCURIO	Hg mg/lt.	cero	0.001 (1)
ZINC	Zn mg/lt.	5 (1)	15 (1,2)
COBRE	Cu mg/lt.	0.05 (1)	1.5 (1) 3.0 (2)
SELENIO	Se mg/lt.	cero	0.01 (1) 0.05 (2)

riana, respecto a los enterococos. Los tipos de exámenes rutinarios son:

- 1.- Fermentación de lactosa, donde se reporta la densidad bacteriana en número más probable (NMP), por 100 ml de muestra, deben existir menos de tres bacterias como NMP para que la muestra se considere potable.
- 2.- Filtración en membranas, reportando la densidad bacteriana como colonias bacterianas por 100 ml de muestras, deben existir como máximo dos colonias bacterianas para considerar el agua como potable.

En condiciones normales de operación los muestreos deben realizarse por lo menos cuatro veces por mes. Cuando se detecte agua contaminada se deben intensificar los muestreos hasta que los riesgos sanitarios desaparezcan. El número de muestras depende del número de habitantes servidos.

### 3.- COAGULACION

La coagulación para obtener agua con menos turbiedad y color es conocida desde tiempos remotos. En el año 77 D.C. tenemos la primera mención de productos químicos como coagulantes hecha por Plinio, donde describe las propiedades del yeso de Rhodas y de la aluminita de Italia.

Ya en épocas más recientes para el año de 1894, se crea el proceso simultáneo de Coagulación - Filtración. Es interesante saber que ningún coagulante fue utilizado cuando empezaron a desarrollarse los filtros rápidos y que el uso del sulfato de aluminio no era tan popular como en la actualidad.

Para 1923 se publica una serie de artículos básicos en la teoría de la coagulación. Como el éxito de los procesos para la clarificación del agua generalmente depende de -- una buena coagulación, se han desarrollado una gran cantidad de investigaciones en los últimos años, siendo lo más relevante la aparición de los polielectrolitos como coagulantes secundarios.

Actualmente se entiende como coagulación al proceso que comprende la serie de operaciones a través de las cuales se aplican agentes químicos al agua sujeta a tratamiento, con el objeto de provocar y facilitar la separación de la materia que puede contener ésta en suspensión y en algunos casos en solución. Dichas operaciones son dosificación, mezcla rápida y floculación.

#### 3.1- Productos químicos

Los principales coagulantes utilizados actualmente se pue

den clasificar como: sales metálicas, polímeros sintéticos orgánicos (polielectrolitos), sílice activado.

#### Sales Metálicas

Las sales metálicas más utilizadas en la actualidad son - compuestos de aluminio: aluminato de sodio, sulfato aluminico potásico, sulfato de aluminio, compuestos de hierro: cloruro férrico en solución o en cristales, cloruro férrico anhidro, sulfato férrico, sulfato ferroso, y otros como el sulfato de magnesio.

La reacción química involucrada en la coagulación por medio del sulfato de aluminio o sulfato férrico es esencialmente la misma, sólo que se prefiere el sulfato de aluminio por su mayor disponibilidad en el mercado y alta manejabilidad.

El PH del agua es muy importante en el proceso de Coagulación, encontrando que el valor óptimo de éste para la remoción de coloides, varía de acuerdo con las características del agua cruda y las del coagulante utilizado, datos experimentales sitúan el rango de variación entre 5 y 6.5 unidades de PH, niveles menores que 4 unidades inhiben la reacción del sulfato férrico y niveles menores que 5 unidades la del sulfato de aluminio, por esto se debe tener una alcalinidad residual en el agua asegurando niveles mayores que 5 unidades de PH.

#### Polímeros Sintéticos Orgánicos (polielectrolitos)

Los polielectrolitos son sustancias sintéticas orgánicas, los parámetros que afectan su eficiencia son: peso molecular, grados de ramificación química, características y PH del agua cruda, concentración de cationes divalentes (Ca, Mg, etc.) y su habilidad para adherirse a las superficies

coloidales.

El uso de polímeros sintéticos orgánicos o polielectrolitos como coagulantes secundarios se está generalizando, - sobre todo en combinación con sales metálicas. Una coagulación pobre es resultado de una dosificación excesiva o insuficiente. Los polielectrolitos no son efectivos como coagulantes en aguas con poca turbiedad, en algunos casos se pueden añadir partículas coloidales al agua (como bentonita) y utilizar polielectrolitos con sales metálicas - para mejorar la coagulación. Al utilizar polielectrolitos en el tratamiento, se debe evaluar su efecto en la sa lud. La figura 6 ilustra el comportamiento del polímero.

#### Sílice Activado

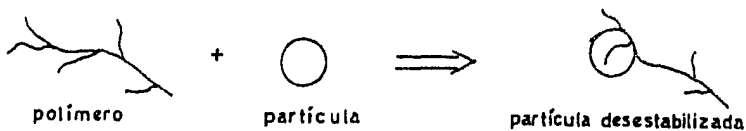
El sílice se presenta comercialmente como arcilla o bentonita, ha sido demostrado experimentalmente que afectan el comportamiento químico de los iones de las sales metálicas, por ello es necesario considerar su uso como coagulante. Algunas sales metálicas como aluminato de sodio, han sido utilizadas en la práctica, conjuntamente con sílice activado para mejorar la coagulación. Otros parámetros importantes para el sílice activado son: la concentración inicial de éste, el tiempo de reacción y su solubilidad que está en función del PH.

### 3.2- Selección y dosificación de coagulantes

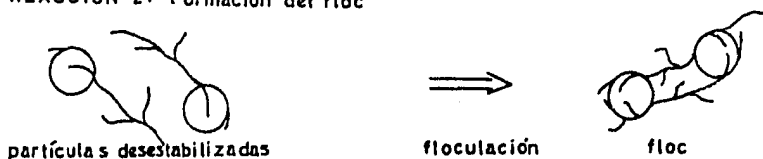
El diseño de la planta de tratamiento y la selección de - equipo, no tendrá valor si no se cuida y se realiza adecuadamente la coagulación por medio de productos químicos. Si las dosificaciones se efectúan inadecuadamente el - resultado será un agua con exceso de turbiedad. Para seleccionar el tipo de coagulante o dosificación óptima de



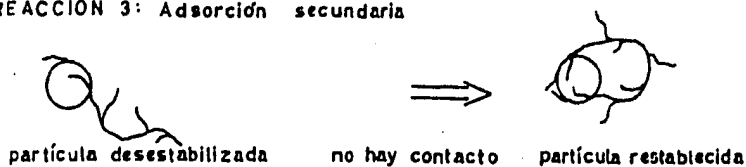
REACCION 1: Adsorción inicial con dosificación óptima



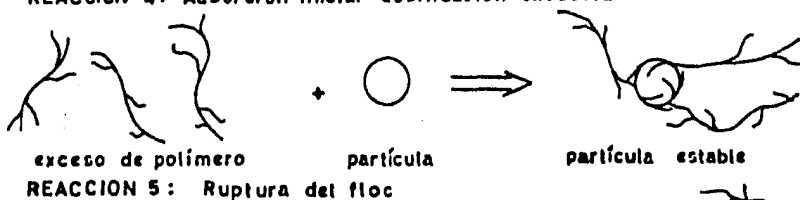
REACCION 2: Formación del floc



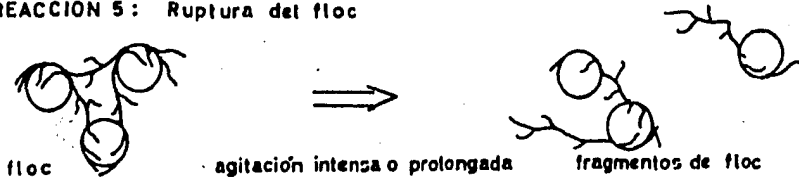
REACCION 3: Adsorción secundaria



REACCION 4: Adsorción inicial dosificación excesiva



REACCION 5: Ruptura del floc



REACCION 6: Adsorción secundaria

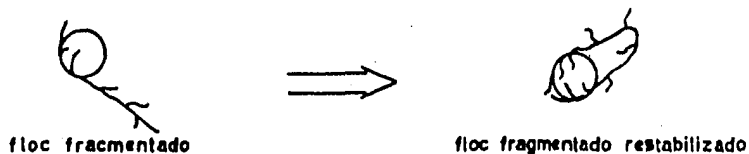


FIGURA 6 Comportamiento del Polímero

éste, deben realizarse experimentos, sobre todo la prueba de jarras que nos indica de una manera clara que tipo y cantidad de coagulante podemos utilizar. Debemos realizar un número razonable de pruebas con muestras representativas del agua cruda que va a recibir el tratamiento, es importante pensar que las pruebas deben hacerse en diferentes períodos, pues las características del agua cruda pueden cambiar con el tiempo. Por otro lado, la teoría de desestabilización de coloides no está lo suficientemente desarrollada para permitir hacer una selección teórica, por esto, el diseño y la interpretación de los experimentos de coagulación requieren de mucho cuidado, sin embargo, la teoría puede ser provechosamente usada para obtener parámetros que influyen en la efectividad de la coagulación como son: La concentración de coloides, el PH del agua, la alcalinidad de la misma, etc. Finalmente podemos resumir que el tipo y la cantidad de coagulante a utilizar dependen de las características del agua cruda.

Se recomienda que los productos químicos que se apelmacen o sean corrosivos no se almacenen a granel, pudiéndose utilizar envases como bolsas, tanques, tambores y otros. Si se tienen productos químicos a granel, su manejo se puede realizar en forma neumática (vacío o presión) o en forma mecánica (bandas, tonillos sin fin, cangilones.).

La presentación comercial de los productos químicos puede dividirse en dos grandes grupos: productos químicos en seco y productos químicos en solución.

Los dosificadores en seco pueden ser volumétricos o gravimétricos. Las unidades volumétricas introducen un volumen de material a la cámara de solución mediante un siste

ma de medición, para obtener la concentración deseada, la precisión de estas unidades es de  $\pm 3\%$  a  $\pm 5\%$  en peso de la cuota de dosificación y se recomiendan cuando no es necesario registrar o totalizar el peso real del material utilizado. Las unidades gravimétricas funcionan con una báscula o balanza que regula el peso del material que pasa y mediante un mecanismo se vierte a la cámara de solución, obteniendo un producto de concentración conocida, estas unidades son más precisas que las volumétricas pues se tiene variación en  $\pm 1\%$  en peso, por lo mismo su costo es mayor. Al diseñar estos tipos de dosificadores se debe tener como parámetro importante el ángulo de inclinación de las tolvas alimentadoras que deberá ser mayor que el ángulo de reposo del material a utilizar.

Es preferible aplicar los productos químicos en solución, pues el aplicarlos en suspensión o en polvo sin que las partículas del compuesto se hayan disuelto aún, disminuye la efectividad del proceso, desperdiciando parte de la sustancia química, por eso los productos químicos comerciales cuya presentación es en seco, pueden aplicarse como solución, realizando una mezcla previa en un tanque diseñado con ese fin.

Los productos químicos comerciales presentados en solución generalmente son más baratos, su aplicación es directa utilizándose algún sistema que puede ser por gravedad o por bombeo. Los sistemas por gravedad constan básicamente de tres partes: tanque de solución, tanque dosificador y elemento hidráulico de medida. Existen diseños integrados que conjuntan los tres elementos. Los sistemas por bombeo constan de tanques de solución y bombas dosificadoras reciprocantes, de pistón, diafragma, rotatoria o de cangilones, este sistema es más flexible y reco-

mendable ya que se logra una dosificación precisa.

La desventaja de los dosificadores en solución es su alto grado de corrosión, encontrándose valores menores que 4 - unidades de Ph. Entre los materiales resistentes a la corrusión recomendados para construir las unidades tenemos: acero inoxidable tipo (316), caucho natural o sintético, madera, plástico PVC, polyester, polietileno, resinas asfálticas, epóxicas y vidrio. Deberá saberse el poder corrosivo del producto a utilizar y los materiales que lo resisten y no tomar como receta los materiales antes mencionados. Finalmente se recomienda que cualquiera que -- sea el tipo de dosificación se deben instalar dos unidades como mínimo a fin de tener una reserva para lograr un servicio continuo a máxima demanda. La tabla 3 presenta la lista de productos químicos utilizados como coagulantes con sus nombres comerciales y características físicas y químicas.

### 3.3 Mezcla Rápida

La mezcla rápida es la operación empleada en el tratamiento de agua con el propósito esencial de alcanzar una homogeneización completa de un coagulante químico con el cuerpo de agua que será tratada. Esta se consigue mediante la aplicación de turbulencias en el flujo de agua, pudiéndose provocar de diferentes formas; salto hidráulico, retromezcladores y difusores. El criterio general de diseño que se venía utilizando no es compatible con la naturaleza y velocidad de las reacciones físicas y químicas que pueden ocurrir cuando se usan sales metálicas como coagulantes (Al o Fe).

La ineficiencia de los mezcladores rápidos pueden llevar a dos efectos nocivos: desperdicio de productos químicos

PROPIEDADES DE COAGULANTES COMERCIALES

TABLA 3

SECRETARÍA DE ACENTAMIENTOS HUIJANOS Y OBRAS PÚBLICAS  
SUBSECRETARÍA DE BIENES INMUEBLES Y OBRAS URBANAS  
DIRECCIÓN GENERAL DE CONSTRUCCIÓN DE SISTEMAS DE AGUA POTABLE Y ALCANTARILLADO  
SUBDIRECCIÓN DE PROYECTOS

PROPIEDADES DE LAS SUBSTANCIAS QUÍMICAS MÁS USADAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS

N.º DE ORDEN	USO	PRODUCTO	FORMULA QUIMICA	NOMBRE COMERCIAL	GRADO O CALIDAD COMERCIAL	MANUFACTURA	ASPECTO	MANEJO	PESO VOLUMETRICO		MATERIAL PARA SU MANEJO	DOSIFICACION Y REGULACION	% DE CONCENTRACION DE SOLUCION O SUSPENSION	
									kg/m <sup>3</sup>	Lb./pie <sup>3</sup>				
1	COAGULANTES	Alumbre sódico	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	Alumbre sódico	50% Alumbre de sodo 35% Oxido de sodo	Digestión de Bauxita con ácido	Cristales blancos como finos verdes polvo (líquido)	A mano o con grúo	900 e 900	90 e 90	Acero, hierro, hule, plásticos	En solución o en seco con vibrador de tolva	0.25 e 0.00	
2		Arcilla					Molido-polvo		480 e 1100	30 e 69				
3		Beatanato	$\text{H}_2\text{O}(\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3/3\text{MgO}) \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	Arcilla catalal Arcilla volcánica				Grano grueso o polvo		900	90	Hierro y acero		
4		Cloruro férrico (solución 30 e 45 %)	$\text{Fe Cl}_3$	Cloruro férrico líquido	37-40% $\text{Fe Cl}_3$ 12-17% Fe	Acción de cloro húmedo sobre hierro en estado por la acción del cloro sobre la solución de cloro ferrado	Líquido café-oscuro	Sifón, presión neumática o bomba centrífuga con tubería de hule				Vidrio, hule y concreto, vestidos de hule o resinas sintéticas	En solución por sifón de carga variable o bomba de desplazamiento positivo	3 e 4
5		Cloruro férrico (cristales)	$\text{Fe Cl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Cristales de cloruro férrico	50-61% $\text{Fe Cl}_3$ 20-21% Fe		Terrones amarillos cafés	Grúa		900 e 1020	90 e 94			3 e 4
6		Cloruro férrico anhídrido	$\text{Fe Cl}_3$	Cloruro férrico anhídrido	90% $\text{Fe Cl}_3$ 3-4% Fe		Polvo negro verdoso	A mano o con grúo		1300 e 1440	85 e 90			3 e 4
7		Sulfato aluminico poldico	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Al}_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Alumbre poldico	Contenido de $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 10-11%		Terrones, gránulos, polvo, cristales	Comunes Carros tanque		900 e 1000	90 e 98	Plomo, pamp revestido de hule, barro		
8		Sulfato de aluminio	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$	Alumbre	Contenido de $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 5-22%	Digestión de Bauxita con ácido sulfúrico	Polvo, gránulos o terrones color merlil	Diversos		910 e 1070 840 e 720	57 e 67 38 e 45	Seco acero, hierro Solución: barro, ferrón sintético, hule, plomo	Secco en solución	0.25 e 0.00
9		Sulfato de aluminio amoniacal	$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 24\text{H}_2\text{O}$	Alumbre de amonio Alumbre cristalino	11% $\text{Al}_2\text{O}_3$		Terrones, polvo	Diversos		1020 e 1090	84 e 88	Barro, hule, hierro, sulfuro, plomo, Duxitron		
10		Sulfato de magnesio	$\text{Mg SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Salas de Epsom		Disolución de Yeso en agua por acción de $\text{H}_2\text{SO}_4$ sobre Magnesita	Dixidos o cristales blancos	Diversos		1010	63	Concreto, acero o madera	Secco en solución	0.25 e 0.00
11		Sulfato ferrico anhídrido	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$	Sulfato ferrico anhídrido	Composición de $\text{Fe}_2\text{SO}_4$ : 70 e 90%	Acosh de $\text{Fe}_2\text{O}_3$ sulfúrico sobre $\text{Fe}_2\text{O}_3$	Gránulos como gránulos o café	Diversos		900 e 1020	90 e 70	Concreto, acero o madera	En seco en solución con un equipo especial de distribución	1 e 0.5
12		Sulfato ferrico	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$	Sulfato ferrico Ferrisol Ferritac	90 e 94% $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ 20% Fe		Gránulos o polvo color rojo	Diversos		1120 e 1150	70 e 72	Cerámico, hule, plásticos		
13		Sulfato ferrico	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Sulfato de azucar, comercial Vitril verde	50% $\text{Fe SO}_4$ 20% Fe	Superfosfato producido de hierro en estado sulfúrico para remover gangas laterales	Cristales verdosos, terrones, gránulos	Diversos		1010 e 1000	63 e 66	Concreto, madera, plomo	En solución en seco con vibrador de tolva	0.25 e 0.00

Anexo y Sustituye al V.C. 1000

Rev. de los datos de la Comisión

Rev. de los datos de la Comisión

México, D.F. Mar de 1978

V.C. 1071

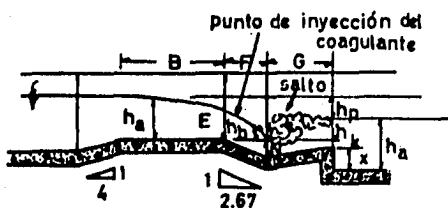
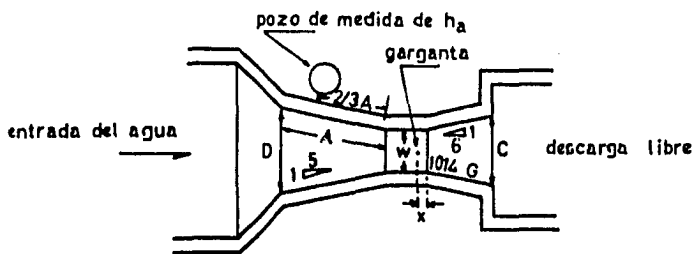
y lenta velocidad de agregación de las partículas para -- una cierta dosificación de coagulante. Para entender el problema se debe considerar: el tipo y velocidad de reacción de los productos químicos, los factores físicos y -- químicos que afectan estas velocidades, los diferentes tipos de mezclado y la forma en que la reacción de los diferentes productos de Al y Fe afectan la eficiencia de la -- colisión de partículas. Estas consideraciones son necesarias porque la reacción físico-química, no solo es extremadamente rápida sino que también es irreversible, asimismo, la velocidad y el producto de la reacción dependen en gran parte de las concentraciones locales.

### Salto Hidráulico

El canal Parshall (fig. 7), es un dispositivo sencillo -- que utiliza los principios del salto hidráulico. Además se aprovecha como sistema de aforo para el gasto de entrada a la planta. El tiempo de retención en estas unidades es de 20 a 60 segundos y el gradiente de velocidad está -- entre 1000 y 2000  $\text{seg.}^{-1}$

El diseño se facilita notablemente con las gráficas y tablas de las figuras 7 y 8, con el gasto de diseño, se obtiene el parámetro  $w$  y con él se obtienen todas las relaciones geométricas necesarias para la construcción del canal. Para garantizar una buena medición del caudal, fijamos  $h_b$  de modo que se tenga descarga libre, esto se logra cuando la sumergencia del canal (relación  $h_b/h_a$ ) es menor del 80%, esto es, de 0.8, por seguridad se utiliza 0.7, -- entonces:

$$h_b = 0.7 h_a$$



w	B	C	D	E	F	G	k	N	A
7.6	45.7	17.8	25.9	45.7	15.2	30.5	2.5	5.7	46.6
15	61.0	30.4	40.3	61	30.5	61	7.6	11.4	62.3
30	134	60.5	83.8	91.5	61	91.5	7.6	22.8	137.5
50	144	80.5	107.7	91.5	61	91.5	7.6	22.8	148
75	158	105.5	137.5	91.5	61	91.5	7.6	22.8	158
100	168	130.5	167.5	91.5	61	91.5	7.6	22.8	171
150	193	180.5	226.9	120	61	91.5	7.6	22.8	197

FIGURA 7 DIMENSIONES DE LAS CANALETAS PARSHALL (cms.)

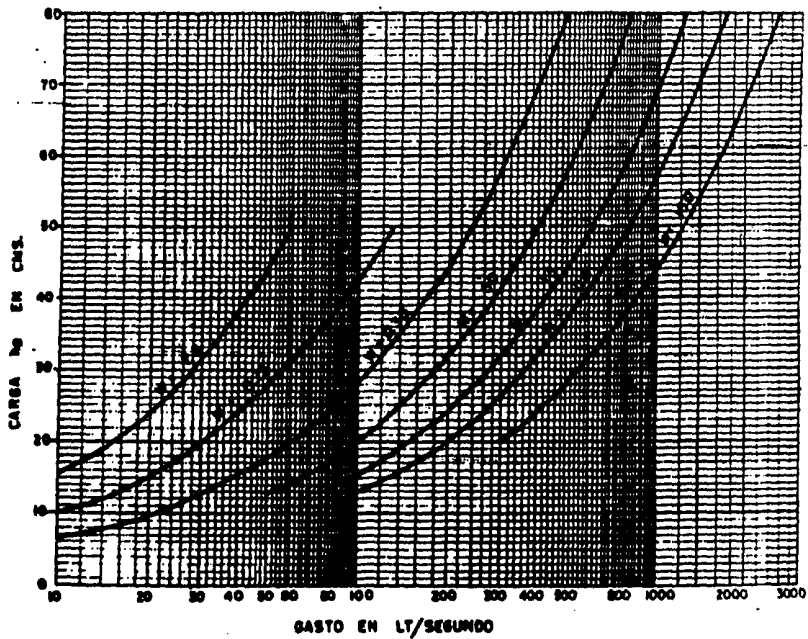


Fig. 8 Gasto dado por cañerías Parshall trabajando con descarga libre.

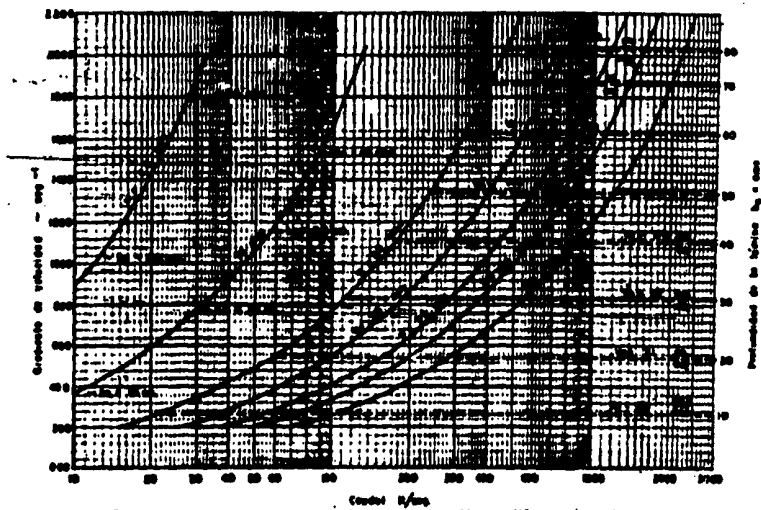


Fig. 8 Gradientes de velocidad y velocidad en las gárgolas  $V_3$  para diferentes cañerías Parshall.



## Retromezcladores

Hace algunos años el criterio de diseño se inclinaba por los retromezcladores en línea, sugiriéndose un eje rotatorio vertical como mecanismo principal del mezclador, dos o más compartimentos para la aplicación secuencial y dispersión de los productos químicos coagulantes, el tiempo de retención de 10 a 30 seg., la velocidad de mezclado variable y un equipo con la potencia capaz de alimentar los gradientes de velocidad necesarios en el proceso. El flujo sugerido y el esquema normalmente utilizado se observa en la fig. 8-A. Después de una serie de análisis experimentales, se llegó a la conclusión de que en el retromezclador las partículas tienen una cierta distribución de tiempos de retención, esto es, existen "corto-circuitos" y en ocasiones las partículas permanecen varias veces el tiempo nominal de retención dentro del retromezclador, -- con esto, se tienen deficiencias marcadas en este tipo de unidades.

## Difusores

La antítesis del retromezclador es el sistema difusor. La característica principal que distingue este sistema del retromezclador es que el tiempo de retención para todos los elementos del fluido es el mismo, por tanto en el diseño moderno de la mezcla rápida se debe considerar su aplicación.

Experimentalmente, se utilizaron los diseños de los difusores mostrados en las figs. 8-B y 8-C. Con ellos se llegó a las siguientes conclusiones:

- a).- El retromezclador es deficiente para la mezcla rápida
- b).- Los difusores son más eficientes, en ellos se debe -

Tipos representativos de agitadores mecánicos  
usados en mezcla rápida

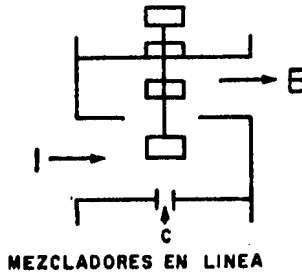
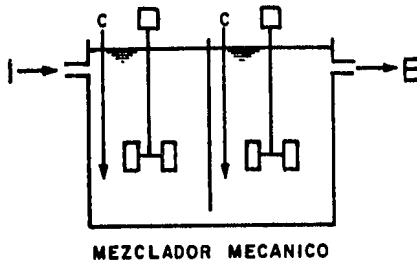
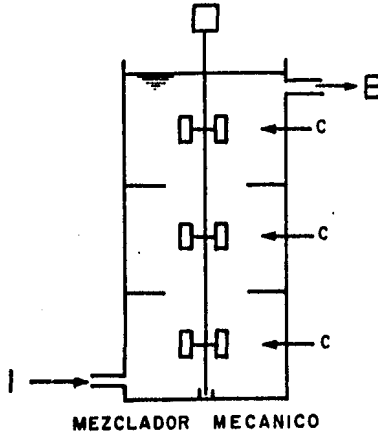


Figura 8-B

Difusores empleados en experimentación  
Unidades N<sup>o</sup> 1 y 2

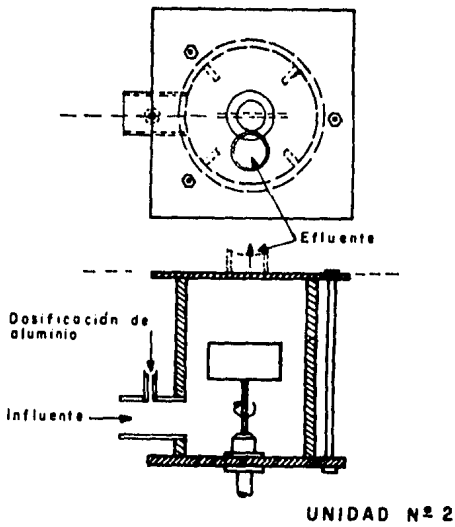
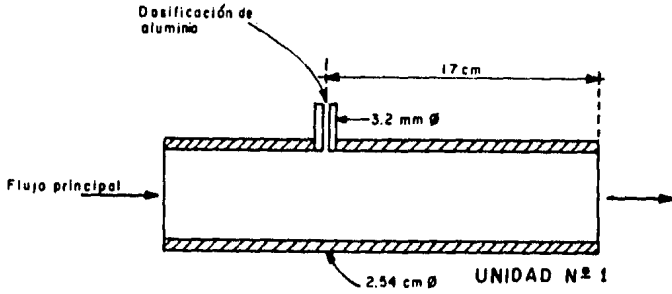
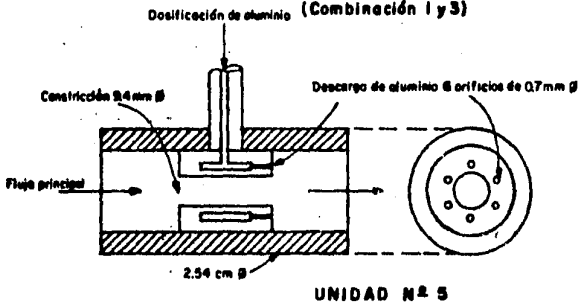
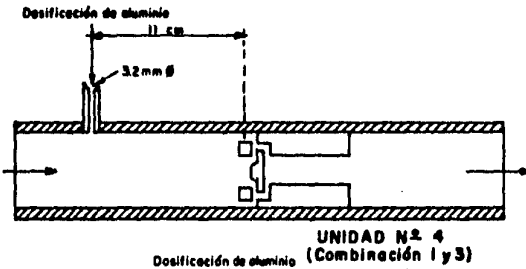
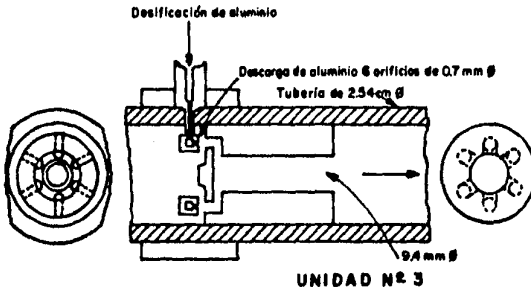


Figura 8-C

Difusores empleados en experimentación  
Unidades N<sup>o</sup> 3, 4 y 5



tomar en cuenta los puntos de aplicación y los detalles para provocar la turbulencia así como su intensidad. El punto de aplicación de los coagulantes es una consideración importante de diseño.

- c).- Es inadecuado caracterizar la eficiencia de la mezcla rápida por el porcentaje de gradiente de velocidad en términos de alcanzar la máxima velocidad de agregación para una dosificación dada.
- d).- El diseño apropiado debe darnos resultados positivos como son el decremento en la cantidad requerida de coagulante químico y el incremento en la capacidad de la unidad de floculación.

El diseño óptimo de la mezcla rápida puede diferir significativamente de acuerdo al tratamiento que se aplique al agua cruda. También es factible que la diferencia entre los resultados de la prueba de Jarras y la planta en operación se deban a la eficiencia de la mezcla rápida.

El sistema difusor se basa en el empleo de múltiples puntos de aplicación; está compuesto por una parrilla de tubos separados de 0.90 a 1.50 m. y con orificios de 1.6 a 4.8 mm., con una separación de 10 a 15 cm. centro a centro, experimentalmente se encontró que es necesario tener 16 orificios por decímetro cuadrado para lograr una alta eficiencia, el tiempo de retención de estas unidades es de 1 a 3 min., no existe pérdida de carga, el gasto de aire es de 150 lts./min./m<sup>2</sup> y se manejan tirantes óptimos de 2 a 3.50 m. y máximos hasta de 4.50 m. En algunas ocasiones se coloca una línea difusora a lo largo de la unidad. El problema principal de este sistema es el tamaño de los orificios.

#### 4.- FLOCULACION

De la floculación se tienen pocos antecedentes históricos por su asociación con el fenómeno de coagulación. Muchos autores consideran a la floculación como una parte de la coagulación por ser un proceso consecuente a ésta. Smoluchowski, en 1917, realizó la publicación de un trabajo sobre la colisión de las partículas (transporte de partículas), básico en el desarrollo posterior de la teoría de la floculación.

Actualmente se puede definir a la floculación como la operación unitaria que consiste en agitar lentamente el agua previamente mezclada con los productos químicos adicionales, durante un período prolongado para favorecer la aglomeración de la materia en suspensión o en solución en floculos bien definidos y con suficiente tamaño y peso para que se asienten fácilmente.

##### 4.1 Mezcla Lenta

Los mecanismos de la floculación son dos: floculación pericínética, la cual es el resultado del movimiento térmico aleatorio de las moléculas del fluido, es significativa solamente para partículas entre 1 y 2 micras; floculación ortocínética, la cual es inducida por gradientes de velocidad en el fluido, siendo el mecanismo predominante en el tratamiento de aguas. El conocimiento de la cinética del proceso de floculación da las bases para el diseño, el parámetro que determina la velocidad a la que ocurre la agregación define las dimensiones del tanque floculador, así como su equipo.

## 4.2 Tanques Floculadores

Los floculadores se clasifican de acuerdo a la energía que utilizan para producir la mezcla necesaria en el proceso, pueden ser mecánicos, hidráulicos o neumáticos.

### Floculadores Mecánicos con Flujo Horizontal

En 1917, Von Smoluchowski mostró que la floculación ortocinética se caracteriza por la ecuación:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{G}{6} N_1 N_2 (d_1 + d_2)^3 \dots \dots \dots (4-1)$$

donde:  $dN/dt$  = Velocidad de colisión de las partículas 1 y 2

$G$  = Gradiente de velocidad constante

$N_1$  y  $N_2$  = Densidad de las partículas 1 y 2

$d_1$  y  $d_2$  = Diámetro de las partículas 1 y 2 .

Camp y Stein presentaron una ecuación para estimar el gradiente medio de velocidad,  $G$ , en términos de la potencia,  $P$ , en un sistema:

$$G = (P/\mu V)^{1/2} \dots \dots \dots (4-2)$$

donde:  $V$  = Volúmen del sistema

$\mu$  = Viscosidad dinámica del fluido

Camp analizó varios tanques floculadores encontrando un funcionamiento satisfactorio en aquellos que tenían el parámetro adimensional,  $Gt$ , con valores en el rango de  $2 \times 10^4$  y  $2 \times 10^5$  y valores de  $G$  entre 20 y 74  $\text{seg.}^{-1}$ .

Para floculadores mecánicos, la potencia disipada,  $P$ , en el líquido, puede ser determinada por la expresión:

$$P = 1/2 C_d A \rho v^3 \dots \dots \dots (4-3)$$

donde:

- $C_o$  = Coeficiente de empuje  $\approx 1.8$  flocladores de paletas
- $V$  = Velocidad relativa de las paletas y el líquido
- $\rho$  = Densidad del líquido
- $A$  = Area de paletas

Si la paleta es de tamaño tal, que existan cambios de velocidad significantes a lo largo de su longitud, debido a la distancia desde el eje, entonces es necesario integrar la expresión, con un diferencial de área.

La ecuación derivada por Harris y Krone de la ecuación (4-1) de Smoluchowski para una serie de  $m$  tanques agitadores es:

$$\frac{N_1^o}{N_1^m} = (1 + k \phi G \frac{t}{m})^m \dots\dots (4-4)$$

donde:

- $N_1^o$  y  $N_1^m$  = Concentración de partículas primarias en el influente y efluente del reactor  $m$
- $k$  = Constante
- $\phi$  = Fracción volumétrica del floc
- $t$  = Tiempo de retención

Algunos investigadores han confirmado dos fenómenos: existe un tamaño límite del floc que varía en relación inversa al gradiente de velocidad, esto es, a menor gradiente de velocidad mayor tamaño límite. Los flocs producidos con alto gradiente de velocidad son menores en tamaño y más densos.

Argaman y Kaufman incorporaron el rompimiento de flocs con la expresión:



$$\frac{N_1^0}{N_1^m} = \frac{(1 + k_a G \frac{t}{m})^m}{\left[ 1 + k_b G^2 \frac{t}{m} \sum_{i=0}^{i=m-1} (1 + k_a G \frac{t}{m})^i \right]} \dots\dots\dots (4-5)$$

donde:

$k_a$  = Constante adimensional de agregación  
 $k_b$  = Constante de rompimiento (tiempo<sup>-1</sup>)

La erosión o rompimiento del floc ha sido observado por algunos investigadores. En la ecuación (4-5), la fracción de volúmen del floc,  $\phi$ , ha sido incluida en la constante  $k_a$ . Para turbiedad con arcilla y floc de aluminio los valores de las constantes son del orden de  $10^{-4}$  para  $k_a$  y  $10^{-7}$  para  $k_b$ .

Dos conclusiones deben ser tomadas del trabajo de Argaman y Kaufman: existe un tiempo mínimo en el cual no ocurre la floculación, siendo  $G$  constante, La compartimentalización reduce significativamente el tiempo de retención para el mismo grado de tratamiento. Esta segunda conclusión ha sido confirmada por algunos investigadores y la práctica recomendable de diseño da un mínimo de 3 floculadores en serie.

Kao y Mason, estudiaron la repulsión de partículas y llegaron a una relación aproximada para el radio de agregación  $R_t$  después de un tiempo  $t$ , como:

$$R_0^3 - R_t^3 = K G T \dots\dots\dots (4-6)$$

donde:

$R_0$  = Radio inicial de la partícula  
 $K$  = Constante que depende del campo de flujo

Un análisis de la ecuación (4-6), implica que para un valor constante de  $G$ , el tamaño del radio de agregación  $R_t$  se reduce incrementando el tiempo  $t$ .

Esta ecuación basada en consideraciones fundamentales, -- permite sostener el uso original propuesto por Camp del producto adimensional  $GT$  como el parámetro predominante de diseño.

Andreu, Villegas y Letterman en un estudio reciente (1976) encontraron que existe un valor óptimo para la floculación en un tiempo  $T$  y un gradiente de velocidad  $G$ . Sus pruebas se hicieron con floc formado con aluminio y caolinita, el periodo de floculación entre 20 y 30 min., al incrementar este periodo no se obtuvo mejor floculación. El valor óptimo de  $G$  está dado por la expresión:

$$(G^*)^{2.8} T = K \dots\dots\dots(4-7)$$

donde:

- $G^*$  = Gradiente de velocidad óptimo ( $\text{seg.}^{-1}$ )
- $T$  = Tiempo de retención (min.)
- $K$  =  $4.9 \times 10^5$ ,  $1.9 \times 10^5$ ,  $0.7 \times 10^5$  para 10, 25 y 50 mg./lt. respectivamente

Estos resultados empíricos pueden combinarse para obtener una expresión simple aproximada:

$$(G^*)^{2.8} T = \frac{44 \times 10^5}{C} \dots\dots\dots(4-8)$$

donde:

- $C$  = Concentración de aluminio en mg./lt. en el rango 0 - 50 mg./lt.

El valor óptimo de  $G$  fue definido como el gradiente de velocidad que minimiza la turbiedad residual por floculación en sedimentación. El rango óptimo de  $G$  fue entre 20

y 50 seg.<sup>-1</sup>. La expresión  $(G^*)^{2.8}$  es similar a GCT propuesta como parámetro de diseño por otros investigadores.

En un estudio de simulación Ives y Bhole, confirmaron las ideas de Camp, acerca de que la floculación con gradiente de velocidad en disminución es más eficiente que la floculación con gradiente de velocidad uniforme.

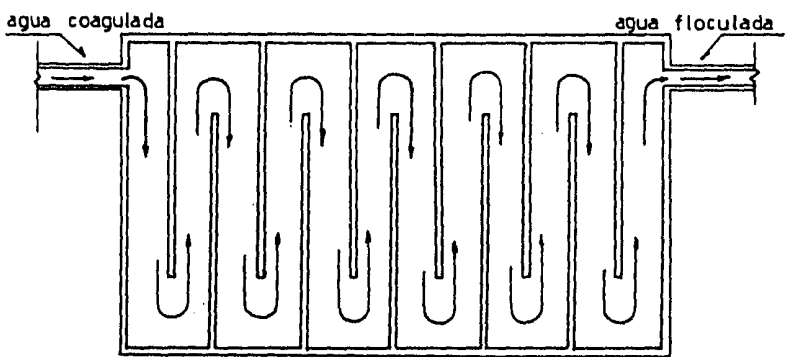
#### Floculadores Hidráulicos

Los floculadores hidráulicos pueden ser con escurrimiento horizontal, vertical o helicoidal. Los parámetros de diseño para un floculador hidráulico de mamparas con escurrimiento horizontal son, el tiempo de retención (t) entre 10 y 45 min. (de preferencia entre 15 y 20 min.), el gradiente de velocidad (G) entre 30 y 60 seg.<sup>-1</sup>, la velocidad de escurrimiento entre mamparas (vm) varía de 0.10 a 0.40 m./seg.

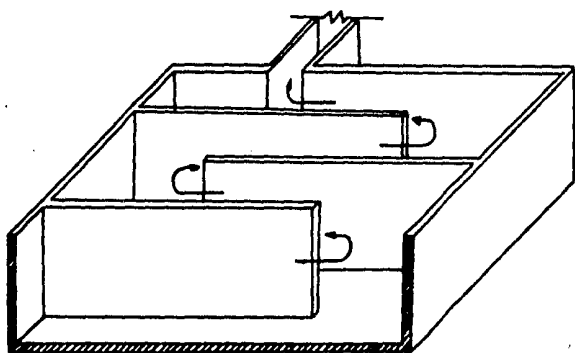
El material utilizado para las mamparas puede ser concreto, asbesto - cemento o madera, pudiendo ser fijas o móviles. Generalmente se utilizan placas de asbesto - cemento de 1.22 x 2.44 m. La fig. 9 ilustra este tipo de unidades.

#### Floculadores Neumáticos

Los floculadores neumáticos funcionan con difusión de aire por medio de tuberías con orificios. No se tienen pérdidas de carga. El tiempo de retención varía de 10 a 45 min. el gasto de aire es menor de 150 lts./min./m<sup>2</sup>. El tirante de agua de 2 a 3.5 m. el óptimo y de 4.50 m. el máximo. La velocidad del agua de 0.30 m./seg. y las características del difusor son semejantes a la de los mezcladores rápidos.



planta



croquis

FIGURA 9 FLOCULADOR HIDRAULICO DE MAMPARAS

## 5.- SEDIMENTACION

Los primeros dispositivos usados para el tratamiento de agua donde se muestran sedimentadores, se encuentran pintados en las tumbas de Amenofis II y Ramsés II, que se calcula son del año 2000 a.C. En el año 47 a.C. el transporte de agua por acueductos permitía su clarificación por sedimentación. El diseño racional de sedimentadores empieza en el año de 1888. En 1903 Hazen realiza un notable escrito para la sedimentación. En los últimos años surge el diseño de placas paralelas o módulos tubulares que revolucionan el proceso de sedimentación.

La sedimentación, previo proceso de coagulación-floculación, se define como la operación unitaria en la cual se separa del agua la materia en suspensión por asentamiento gravitacional de dicho material en forma de floculos; éstos se crean por la adición al agua de los productos químicos adecuados, lo cual se hace en las operaciones unitarias de coagulación y floculación que necesariamente debe ser previa a la sedimentación.

La separación por sedimentación gravitacional generalmente es una técnica efectiva para la remoción de sólidos suspendidos inestables o desestabilizados. El desarrollo y aplicación de sedimentadores para clarificación debe estar basada en un entendimiento del proceso y las variables que afecten su eficiencia. La sedimentación casi siempre es necesaria en las siguientes circunstancias:

- Cuando el contenido de sólidos en el agua cruda es alto.
- Cuando el coagulante requerido es considerable, por ejemplo en agua altamente coloreadas.
- Cuando se encuentra en el agua cruda grandes cantidades

des de algas

- Cuando se acostumbra ablandar el agua
- Cuando se requiere un tiempo de contacto prolongado por razones químicas o bacteriológicas.

### 5.1 Sedimentación de Alta Velocidad

En un tanque de sedimentación ideal definido por la teoría de Camp, las trayectorias de todas las partículas discretas serán líneas rectas y sus velocidades de sedimentación serán iguales, moviéndose en trayectorias paralelas (fig. 10). De esta manera, la cantidad de partículas sedimentadas dependerá del tamaño del área superficial en el fondo del tanque, Hazen señaló que duplicando el área superficial insertando una charola horizontal daría el doble de capacidad al tanque, de la misma manera, si se colocan charolas espaciadas en intervalos tan pequeños como dos centímetros es posible la sedimentación en cada una de ellas, el problema principal al aplicar esta teoría es la remoción de lodos en un espacio tan pequeño.

La teoría indica que el uso de tanques sedimentadores de alta velocidad permite que los tiempos de retención del proceso de sedimentación sean reducidos a unos cuantos minutos en contraste con los tanques sedimentadores convencionales que necesitan entre dos y seis horas.

Los sedimentadores de alta velocidad permiten cargas superficiales entre 120 y 300  $m^3/m^2/dfa$ , de 4 a 10 veces mayores que los sedimentadores ordinarios.

En cuanto a la operación permiten una mayor flexibilidad debido a sus propias características, en contraste con los sedimentadores convencionales que requieren un mayor cuidado, si se quiere obtener eficiencias comparables. El fun-

cionamiento hidráulico, por su diseño en el que incluye un flujo laminar, evita o reduce los problemas debidos al efecto del corto circuito.

En el manejo de lodos, también se logran ciertas ventajas ya que se obtienen lodos más concentrados y la zona de asentamiento y acumulación está bastante definida, lo que permite una extracción más fácil (fig. 11)

La eficiencia de los sedimentadores de alta velocidad es flexible, pues se puede ajustar tanto la separación (d), como la inclinación (●) de las celdas o placas, hasta lograr la mayor eficiencia para cada caso particular, de acuerdo a la calidad del agua por sedimentar.

El desarrollo de la teoría de sedimentadores de alta velocidad y la aplicación de ésta, ha sido realizado por diferentes investigadores; Hazen, Camp, Culp y Yao; hasta llegar a las bases teóricas del cálculo. La aplicación de la teoría ofrece un tremendo potencial para minimizar el tamaño y el costo del sedimentador.

## 5.2 Parámetros de Diseño

Para diseñar un sedimentador de alta velocidad es necesario conocer los parámetros que influyen de una manera clara en el proceso.

### Velocidad Crítica

Los sedimentadores de alta velocidad, también son conocidos como sedimentadores de alta carga superficial, ya que en ésta se basa el diseño de los mismos. La carga superficial expresada como gasto por unidad de área horizontal del tanque ( $M^3/M^2 \times dfa$ ) no es otra cosa que la velocidad crítica de caída de la partícula, la ecuación adecuada pa-

ra obtenerla incluye una constante (K), la velocidad del agua ( $V_0$ ) y la longitud relativa (L):

$$V_{sc} = K \frac{V_0}{L} \dots\dots\dots (5-1)$$

A su vez la constante K se obtiene con la longitud relativa (L), el ángulo de inclinación ( $\theta$ ) y el valor crítico ( $Sc$ ):

$$K = Sc \frac{L}{\text{Sen } \theta + L \text{Cos } \theta} \dots\dots (5-2)$$

Sustituyendo (5-2) en (5-1) y reacomodando:

$$V_{sc} = \frac{Sc V_0}{\text{Sen } \theta + L \text{Cos } \theta} \dots\dots\dots (5-3)$$

#### Longitud Relativa (L)

La longitud relativa es el resultado del cociente dado por la longitud de la placa o tubo y la distancia entre placas o diámetro del tubo.

$$L = \frac{l}{d} \dots\dots\dots (5-4)$$

donde:

$l$  = Longitud de la placa o tubo

$d$  = Distancia entre placas o diámetro del tubo.

Experimentalmente se ha encontrado que:

$$L \leq 40 \text{ y preferentemente } L \approx 20$$

#### Ángulo de Inclinación ( $\theta$ )

La teoría implicada con el ángulo de inclinación de las placas o módulos (fig. 12) no se toma en cuenta debido a que es necesario inclinar más de  $45^\circ$  las placas o módulos



para que las partículas resbalen y se puedan remover, aunque con ésto se pierda eficiencia en el proceso, generalmente en nuestro medio  $\theta = 60^\circ$ , (fig. 13),

### Remoción Fraccional

La eficiencia de un sistema de sedimentación acelerada se puede caracterizar por un parámetro S dado por la expresión:

$$S = \frac{V_{sc}}{V_0} (\sin \theta + L \cos \theta) \dots\dots\dots (5-5)$$

El valor crítico ( $Sc$ ) del parámetro S varía de acuerdo a la sección utilizada en el sistema. Para placas paralelas  $Sc=1$ , para tubo circular  $Sc = \frac{4}{3}$ , para tubos de sección cuadrada  $Sc = \frac{11}{8}$

Para placas paralelas horizontales, la eficiencia vale:

$$S = L \frac{V_{sc}}{V_0} \dots\dots\dots (5-6)$$

### Flujo Laminar

Generalmente a la entrada del sedimentador se tiene una zona de transición, en lo que el flujo uniforme cambia gradualmente a flujo laminar, la longitud relativa adicional ( $L'$ ) para tener en cuenta este fenómeno puede estimarse de la siguiente forma:

$$L' = 0.058 \frac{V_0 d}{\nu} \dots\dots\dots (5-7)$$

donde:

$\nu$  = Es la viscosidad cinemática del fluido

Puede observarse que:

$$R = \frac{V_0 d}{\nu} \dots\dots\dots (5-8)$$

# SEDIMENTACION DE ALTA VELOCIDAD Y MODULOS TUBULARES

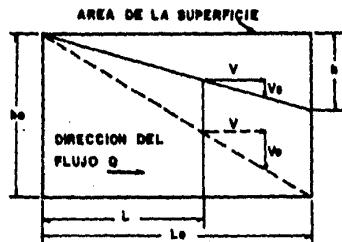


FIGURA 10

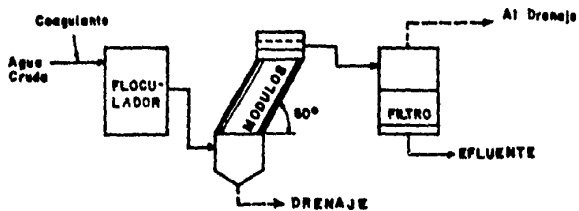
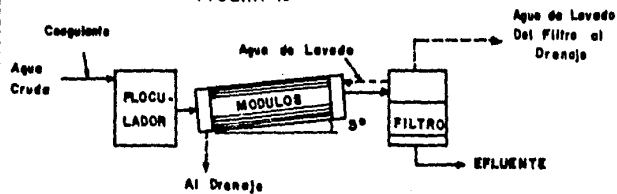


FIGURA 13

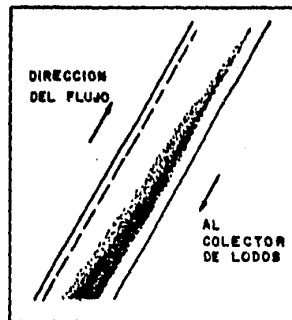


FIG. 11

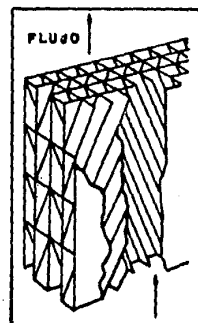


FIG. 12

donde  $R$  es el número de Reynolds y debe cumplirse que  $R \leq 250$  para tener flujo laminar,

Por tanto la longitud relativa total valdrá:

$$L_T = L + L' \dots\dots\dots (5-9)$$

para obtener el dimensionamiento del tanque sabemos que:

$$V_0 = \frac{Q}{A} \dots\dots\dots (5-10)$$

donde:

$A$  = Area horizontal del tanque

$Q$  = Gasto de diseño

Las relaciones usuales entre largo y ancho de los tanques varía desde 1:1 hasta 1:4. Las figs. 14, 15 y 16 nos muestran algunos arreglos de módulos tubulares.

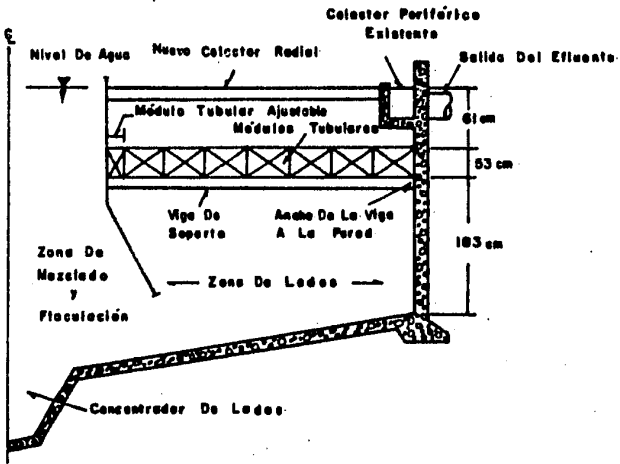


FIGURA 14  
 SEDIMENTADOR DE ALTA VELOCIDAD

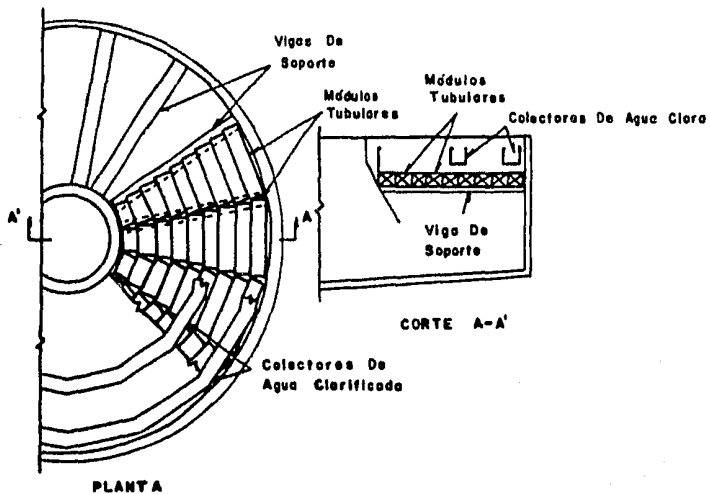


FIGURA 15  
SEDIMENTADOR CIRCULAR

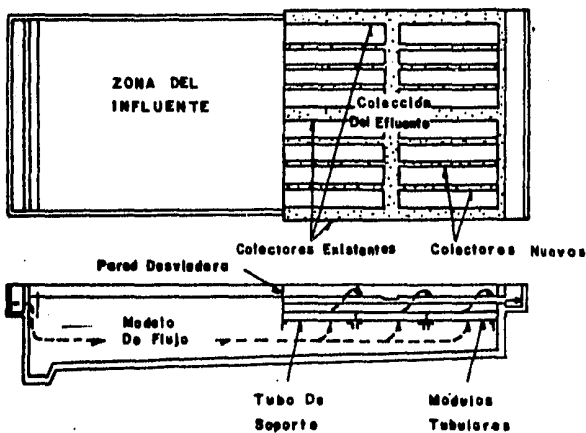


FIGURA 16 SEDIMENTADOR RECTANGULAR MODERNIZADO

## 6.- Filtración

Los primeros escritos que hablan de la filtración datan, según se calcula, del año 2000 a.C., descubiertos en antiguas inscripciones egipcias traducidas del sánscrito donde se hace mención del carbón como medio filtrante. Ateneo de Atalia, en el año 50 d.C. hace uso de la filtración sencilla, doble y triple para producir agua de gran calidad. Se generaliza el uso de piedras para filtrado en 1724, a partir de 1800 empezó el desarrollo acelerado de los filtros y se reporta la eficiencia bacteriológica de la filtración. Se construyen los primeros filtros rectangulares y de concreto ya que anteriormente se construían de madera o metal con sección circular. Se desarrolla la filtración rápida después del éxito de la coagulación-filtración.

Actualmente se entiende por filtración al proceso por medio del cual se separa del agua la materia en suspensión, pasándola a través de un material poroso.

Los filtros son altamente eficientes en la remoción de materiales suspendidos y coloidales del agua. Las impurezas tratadas por filtración incluyen: turbiedad, bacterias, algas, virus, color, oxidación de hierro y manganeso, partículas radioactivas, sustancias químicas agregadas en el pretratamiento, metales pesados y muchas otras sustancias.

Debido a que la filtración es un proceso combinado de la física y la química, las variables que influyen en su eficiencia son muy numerosas. Anteriormente los avances de la filtración fueron sobre bases prácticas más que sobre teorías físicas o matemáticas. Las teorías actuales o son muy simples para poderse aplicar o muy complejas para ser útiles, en vista de su complejidad, es común considerar a la filtración como un proceso relativamente simple para di

seño y operación de plantas, suponiendo que el nivel de la filtración es alto,

Los fenómenos que se presentan en la filtración son:

- 1.- El de transporte de las partículas dentro de los poros cuyos mecanismos que los pueden realizar son: cernido, sedimentación, intercepción, difusión e impacto inercial.
- 2.- El de adherencia a los granos, cuyos mecanismos son: fuerza de Van Der Waals, fuerza electroquímica y puente químico.

Es indudable que no todos necesariamente tienen que actuar al mismo tiempo y que la contribución que haga cada uno de ellos para retener el material es variable. Por otro lado, existe una larga lista de factores que influyen en el proceso de filtración, mencionaremos las más importantes, que son: tipo del medio filtrante, velocidad de filtración, características físicas y químicas de la suspensión, influencia de la temperatura y dureza del floc.

#### Filtración con Tasa Declinante

En filtración de agua se utiliza una amplia variedad de esquemas de control, sin embargo todos caen dentro de dos categorías generales:

- 1).- Carga constante y tasa constante o Carga variable y tasa constante
- 2).- Carga constante o variable con tasa declinante

Los filtros con tasa constante y carga fija controlados en el efluente fueron usados universalmente desde 1900 hasta 1960, se derivaron de los filtros de arena patenta-

dos la década anterior a 1890, siendo probados en 1895, - logrando tasas de filtración y retrolavado de 120 y 900 -  $m^3/m^2$  x día respectivamente para filtros de arena con tamaño efectivo de 0.35 a 0.5 en su medio filtrante, en los 50 años siguientes no hubo cambios básicos en la práctica de la filtración, sin embargo se lograron avances en el pretratamiento y determinación de la calidad del agua filtrada.

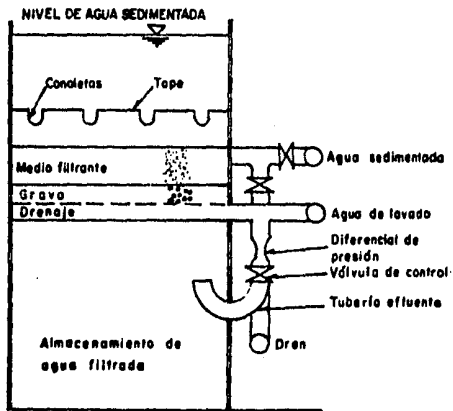
El esquema tradicional fija un diferencial, generalmente de 3 m. entre los niveles de agua aplicada y el máximo nivel en el depósito de agua filtrada. El control se da -- usualmente en el efluente del filtro por medio de un mecanismo que incluye un elemento productor de un diferencial de presión tal como un tubo Venturi, con esta presión se controla una válvula ya sea de mariposa o de diafragma. La fig. 17-A es la sección de un sistema filtrante de este tipo.

En 1949, se iniciaron ensayos en plantas operando, estos fueron sobre innovaciones de filtración: uso de filtración de alta velocidad con camas filtrantes duales de antracita de cuarzo sobre camas de arena fina y pruebas de operación con tasa declinante. Estas pruebas se realizaron hasta 1956 y se empezaron a conocer aunque no se aceptó ampliamente la adopción de estas ideas.

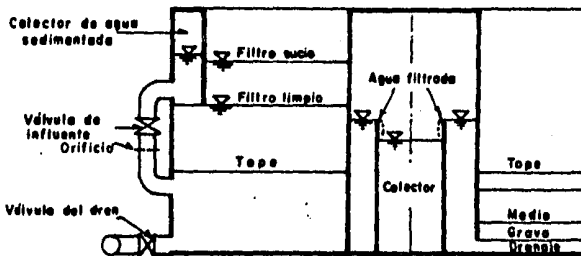
La forma del sistema de tasa declinante con efluente controlado, hace posible maximizar la conservación de carga utilizada en la filtración. La configuración del sistema es similar al arreglo tradicional de los filtros exceto que todos los filtros descargan en un colector común que funciona a presión, los niveles del efluente son --- iguales para todas las unidades. La presión en el colector común se utiliza para controlar la tasa total de producción del filtro, un incremento en la presión disminuye



Figura 17 - A



FILTRO CONVENCIONAL



FILTRO DE TASA DECLINANTE CON INFLUENTE CONTROLADO

el flujo del filtro y visceversa. Después de años de pruebas de operación con filtración de tasa declinante y efluente controlado se adoptó el sistema en plantas con grandes capacidades como  $7 \text{ m}^3/\text{seg.}$

#### Diseño de Filtros con Tasa Declinante

El diseño de filtros con tasa declinante está basado en la minimización o eliminación de la falla del filtro, lo que nos da un balance hidráulico inherente al sistema produciendo la cantidad de agua deseada.

La fig. 17-8 muestra los elementos básicos de la hidráulica en el diseño de filtros con tasa declinante. El eje vertical representa la tasa a través de una unidad de filtración y puede ser expresada como flujo total, tasa de filtración o velocidad de filtración ( $\text{m}^2/\text{seg.}$ ,  $\text{m}/\text{hr.}$ , o  $\text{cm}/\text{min.}$ ). El eje horizontal representa las unidades de carga establecidas pudiendo ser la pérdida de carga del filtro o bien la carga disponible. El método de análisis permite el diseño de unidades de tasa declinante ya sea con influente o efluente controlado.

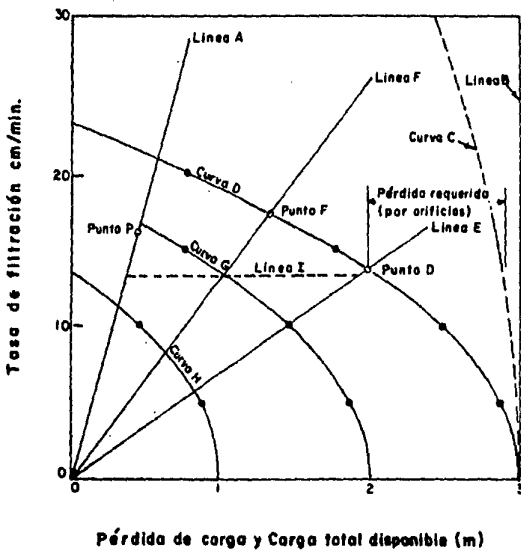
La secuencia de cálculo se da a continuación:

- 1).- Determinar la pérdida de carga a través del filtro limpio para cualquier tasa de filtración.

Normalmente esto puede hacerse por medio de pruebas con los medios filtrantes propuestos, en filtros piloto, para lograr una aproximación razonable puede realizarse el procedimiento siguiente:

A temperaturas normales ( $12^\circ\text{C}$ ) y a tasas de filtración de  $8 \text{ cm}/\text{min.}$ , la pérdida de carga a través de una capa de  $60 \text{ cm.}$  en arena de  $0.5 \text{ mm.}$  de tamaño efectivo, es cerca de  $30$

Diseño de filtros con tasa declinante (ejemplo)



cms., el flujo en el filtro sigue la ley de D'arcy y es siempre laminar, la pérdida de carga es proporcional a la tasa de filtración y al espesor de la capa, e inversamente proporcional al cuadrado del tamaño efectivo del medio filtrante y a la cuarta potencia de la porosidad. La porosidad de la arena es aproximadamente de 0.43 y la de la antracita de 0.52. Basados en estos datos, se calcula el punto P de la gráfica y se traza la línea recta A uniendo dicho punto con el origen.

Para ilustrar la secuencia de cálculo, se escogió como ejemplo un filtro de 30 cms. de arena con tamaño efectivo de 0.45 mm. y 45 cms. de antracita con tamaño efectivo de 0.9 mm. La pérdida de carga a través de estas capas, con una tasa de filtración de 16 cm/min se calcula:

$$\begin{array}{l} \text{Arena} \quad 30 \times \frac{16}{8} \times \frac{(0.5)^2}{(0.45)^2} \times \frac{(0.43)^4}{(0.43)^4} \times \frac{30}{60} = 37 \text{ cms} \\ \text{Antracita} \quad 30 \times \frac{16}{8} \times \frac{(0.5)^2}{(0.9)^2} \times \frac{(0.43)^4}{(0.52)^4} \times \frac{45}{60} = 6.5 \text{ cms} \end{array}$$

Lo que da una pérdida de carga total igual a 43.5 cm., --- aproximado a 45 cm. por lo tanto el punto P tiene por coordenadas: P(0.45, 16). La línea A representa la relación entre la tasa de filtración y la pérdida de carga a través del medio filtrante limpio.

2.- Se selecciona la carga total máxima disponible por suministrar

Convencionalmente se da de 1.5 a 2.5 m. de pérdidas de carga final para el lavado de filtros y tradicionalmente se dan 3 m. de carga total disponible, pudiendo reducirse en donde se tenga seguridad que la carrera del filtro será larga y no se requiere carga total disponible muy alta, se traza la línea vertical B en la gráfica, con el valor

seleccionado, en este caso 3 m.

En la mayoría de los casos la carga total disponible debe ser igual a la diferencia entre el nivel de agua en el colector de agua sedimentada por fuera del filtro y el nivel mínimo permisible en la cámara de agua filtrada, por fuera del filtro. No se recomiendan valores mayores de 3 m., ya que un incremento en la carga disponible no aumenta la carrera del filtro.

3.- Se calcula la pérdida de carga total por fricción del sistema de filtros propuesto, incluyendo la entrada al filtro y la salida del mismo, sistemas de drenaje y gravas.

Se dan valores típicos para un modelo común con tasa de filtración de 60 cm./min.

Entrada al filtro .....	60 cm.
Gravas del filtro .....	5 cm.
Drenaje del filtro .....	100 cm.
Tubería de salida del filtro a la cámara compensadora .....	60 cm.
Total	<u>225 cm.</u>

Se calculan las pérdidas por fricción para varias tasas de filtración seleccionadas, como se ilustra a continuación:

$$H_L = \left(\frac{30}{60}\right)^2 \times 225 = 56 \text{ cm.}$$

Así se complementa la tabla:

Velocidad cm./min.	Pérdida cm.	Pérdida Total m.
30	56	2.44
25	39	2.61
20	25	2.75
15	14	2.86
10	6	2.94
5	1	2.99

A la carga total disponible se le resta la pérdida de carga  $H_L$ , con esto se obtuvieron los valores de la tabla anterior y son los puntos que generan la curva C, esta significa las pérdidas por fricción del sistema.

4.- En un diseño por tasa declinante, el índice máximo de falla ocurre cuando la pérdida de carga a través de la cama del filtro alcanza 2/3 de la carga disponible.

Esto es, con esta condición, existe la mayor probabilidad de que ocurra la falla, la carga disponible es:

$$H_a = H + K_2 V^2 \dots\dots\dots (6-1)$$

donde:

H Es la pérdida de carga laminar a través del medio filtrante.

$K_2 V^2$  Es la suma de las pérdidas por fricción en las tuberías de entrada, salida, drenaje, etc.

De la ecuación (6-1)

$$V = \sqrt{\frac{H_a - H}{K_2}} \dots\dots\dots (6-2)$$

Y el índice de falla puede expresarse como:

$$BI = \frac{V d^3 H}{L} = \frac{d^3}{L} H \sqrt{\frac{H_a - H}{K_2}} = \frac{d^3}{L} \sqrt{\frac{H_a H^2 - H^3}{K_2}} \dots\dots\dots (6-3)$$

La primera derivada del índice de falla, representa el índice máximo de falla y es:

$$\frac{dBI}{dH} = \frac{d^3}{L} \cdot \frac{1}{2} \left( \frac{H_a H^2 - H^3}{K_2} \right)^{1/2} (H_a H - 3H^2) \dots\dots (6-4)$$

El índice máximo de falla ocurre cuando el valor de la derivada es cero, esto es:

$$2 H a H - .3H^2 = 0 \dots\dots\dots (6-5)$$

de aquí:

$$.H = .2/3.Ha \dots\dots\dots (6-6)$$

Prosiguiendo con los datos del ejemplo anterior y en base a la experiencia, se estima que el índice de falla es 8, - entonces, la máxima tasa de filtración que puede usarse -- con seguridad, se calcula con 2 m. de pérdida de carga. Para 30 cm. de arena y tamaño efectivo de 0.45 mm. se tiene:

$$8 = \frac{Vd^3H}{L} = \frac{V(0.45)^3(2)}{0.3} \dots\dots (6-7)$$

$$V = \frac{8(0.3)}{(0.45)^3(2)} = 13.2 \text{ cm./min.} \dots\dots (6-8)$$

Con esto se obtiene el punto D de la gráfica D (2,13.2).

5.- La distancia horizontal del punto D a la curva C en la gráfica, representa la pérdida adicional por fricción que debe ser estructurada en el sistema.

Esta es usualmente dada instalando una placa con orificios múltiples en la tubería. En el ejemplo seleccionado, la placa de orificios necesita introducir una pérdida de carga de 0.90 m., cuando el filtro opera con una tasa de filtración de 13.2 cm./min.

La pérdida de carga total por fricción, se calcula para -- otras tasas de filtración, sumando las pérdidas por orificios con el resto de pérdidas (ya calculados), la diferencia entre la carga total disponible y las pérdidas nos darán los puntos que generan la curva D en la gráfica.

Tasa de filtración	Pérdidas por orificios	Otras pérdidas	Total de pérdidas	Diferencia
30	---	56	---	----
25	305	39	344	0.44
20	194	25	219	0.81
15	109	14	123	1.97
10	49	6	55	2.45
5	12	1	13	2.87

Con estos valores se traza la curva D en la gráfica. La tasa máxima a la que puede operar un filtro limpio debe ser donde se intersecta la curva D con la línea A, en este caso 21 cm./min.

6.- Es recomendable que la carrera del filtro termine en las condiciones definidas por la línea trazada del origen al punto D denominada línea E.

El porcentaje que se quiera obtener se localiza sobre la curva D entre las líneas A y E, si se quiere la tasa de operación al 50%, basta con encontrar el valor intermedio entre la tasa inicial y la tasa final, en este caso, el valor encontrado es 17.1 cm./min., el cual nos define el punto F que uniéndolo al origen genera la línea F. Con esto se determina la tasa de filtración confiable de la planta en la cual se tiene la máxima carga disponible.

Si se desea operar la planta con la máxima tasa permisible por el diseño, se debe revisar la selección del medio filtrante, pudiendo aumentar el espesor de la cama de arena o bien disminuir su tamaño efectivo, esto implica el uso de antracita fina y carreras más cortas del filtro, dando buenos resultados cuando se tiene un floc fuerte.

Otra alternativa es que la planta opere con un diseño conservador como muestra la fig. 17-B, dando una capacidad hi



dráulica mayor al filtro y si es factible operar con alta velocidad en desarrollos futuros, la tasa alta puede ser aplicada simplemente revisando la restricción por orificios.

7.- La planta debe ser operable fácilmente a bajas tasas de filtración, disminuyendo la carga disponible.

Las curvas G y H son obtenidas por similitud con la curva D a uno y dos metros horizontales a la izquierda respectivamente. Cuando se opera con una carga de 2 m., se tiene una tasa de 13.2 cm./min., y operando con 1 m. de carga la tasa es de 8 cm./min., o bien la planta puede ser operada a cualquier otra tasa entre cero y el punto F, escogiendo la carga disponible apropiada.

8.- El diseño seleccionado hace físicamente imposible que se produzca una falla final en la planta, de tal forma que el índice de falla no caiga abajo de 8.

Se puede realizar un diseño más liberal si se tiene personal calificado que en los casos de floculación débil protejan el funcionamiento del lavado del filtro o bien reduciendo la carga disponible.

#### Características de los Filtros con Tasa Declinante

Para tener más claro el concepto de diseño, se comparan dos filtros, uno con tasa constante y otro con tasa declinante, funcionando bajo condiciones idénticas y diseñados con la fig. 17-B, ambos operan con la misma tasa de filtración, que para fines ilustrativos se selecciona 13 cm/min. La unidad de tasa declinante opera con una carga disponible de 2 m. por lo que su pérdida de carga inicial es de 0.47 m. y la declinación de la tasa está definida por la -

curva G, empezando en la intersección con la línea A y terminando en la intersección con la línea E. La unidad de tasa constante opera de acuerdo a la línea I (fig. 17-B).

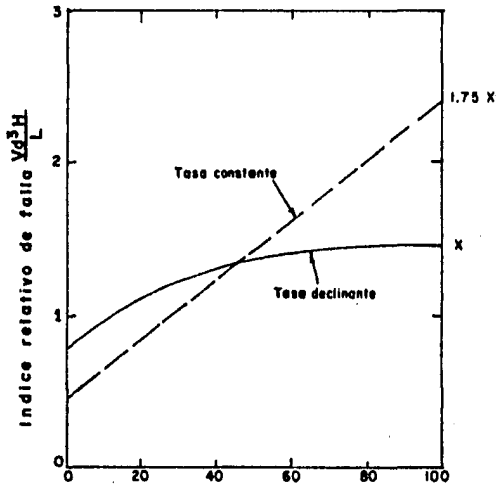
Al inicio de la carrera, ambos filtros están limpios, y al final de la misma, están igualmente obstruidos como lo determina la línea E. Al final de la carrera la pérdida de carga para la unidad de tasa constante es de 1.9 m. (cerca del punto D), mientras que para la unidad de tasa declinante es de 1.45 m. (intersección de la curva G y la línea E). La unidad de tasa declinante realiza su operación utilizando una carga disponible de 2m. La unidad de tasa constante requiere una mayor carga disponible la cual es usualmente de 2.5 m.

La línea E representa la obstrucción máxima aceptable del medio filtrante, la línea A representa la condición de limpieza y la línea F representa el 50% de obstrucción aceptable. El índice de falla ha sido calculado para cada filtro y para diferentes condiciones de taponamiento, los resultados se muestran en la fig. 17-C. Al inicio de la carrera, el filtro de tasa declinante tiene un índice de falla muy alto pero con poca probabilidad de que ésta ocurra, conforme progresa la carrera el índice aumenta muy poco, hasta llegar al 100% de obstrucción aceptable, mientras que el índice de la unidad de tasa constante tiene un comportamiento lineal iniciando la carrera con un índice menor pero al final de la misma tiene un índice de falla 1.75 veces más que el de la unidad de tasa declinante. Esta es la diferencia fundamental que explica el funcionamiento superior de las unidades de tasa declinante con respecto a las de tasa constante.

Finalmente, la fig. 17-C, nos muestra una comparación hecha, por cerca de 5 meses en una planta en operación, para

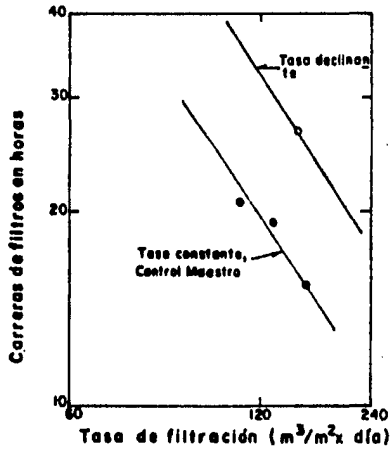
Figura 17-C

Comparación de los índices de falla para filtros con tasa constante y tasa declinante.



Grado de taponamiento aceptable, en por ciento.

Relación entre longitudes de carrera y tasas de filtración.



filtros con tasa constante equipados con control maestro - y filtros de tasa declinante.

Los datos indican que para iguales tasas de filtración las unidades de tasa declinante tuvieron carreras más largas.

### 6.1 Filtración Rápida

La filtración rápida es el proceso de clarificación en el cual se emplea como medio filtrante arena gravada estratificada y en algunos casos antracita o tierra diatomácea, y en donde la remoción mecánica de la materia en suspensión es acelerada por el previo tratamiento químico del agua.

Los filtros rápidos pueden ser estructurados con lechos de arena; antracita; duales de arena y antracita; múltiples - de arena, antracita y granate o una mezcla de más de dos - materiales (también conocidos como filtros de medios mezclados). Los que se utilizan en mayor grado son los de -- gravedad con flujo descendente, (figuras 18 y 19 ).

Para el diseño de los filtros rápidos, primero se calcula - el número de unidades (n):

$$n = 1.38\sqrt{V}$$

donde:

$$V = \text{Volúmen diario en miles de m}^3$$

Para dimensionar el área horizontal (Ah) del filtro, se utiliza la expresión:

$$Ah = \frac{Q}{v_f}$$

donde:

$Q$  = Gasto de diseño

$v_f$  = Velocidad de filtración

Generalmente,  $Ah \leq 100 \text{ m}^2$  pudiendo ser mayor si se tiene buen funcionamiento hidráulico. La velocidad de filtración es determinada en laboratorio o bien seleccionada de acuerdo a la experiencia, donde se ha visto que varía entre  $150$  y  $300 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times \text{día}$ .

La relación utilizada para determinar largo y ancho del área horizontal, puede ser; cuadrada  $1:1$  o rectangular  $1:1.2$  a  $1:1.6$ . La profundidad es variable, normalmente se utiliza de  $3.5$  a  $5 \text{ m}$ . El tirante sobre el medio filtrante alcanza de  $1$  a  $2 \text{ m}$ ., dejando un bordo libre entre  $30$  y  $50 \text{ cm}$ .

Las arenas granulares y los minerales triturados que se emplean en los filtros rápidos, difieren en tamaño, distribución de tamaños, forma, variación de forma, densidad y composición química, por eso, se selecciona por medio del cernido en tamices realizando un análisis granulométrico determinando el diámetro efectivo (E) y el coeficiente de uniformidad (Cu):

$E$  = Abertura del tamiz ideal que deja pasar el 10% acumulado en peso (mm.).

$Cu = \frac{\text{Abertura del tamiz ideal que deja pasar el 60 \% (mm.)}}{E}$

E

Las características del material en los filtros con lechos de arena estratificada son: arenas de origen cuarzoso, espesor estratificado de  $60$  a  $130 \text{ cm}$ ., normalmente de  $70 \text{ cm}$ .,  $E$  entre  $0.35$  y  $0.70 \text{ mm}$ .,  $Cu$  entre  $1.55$  a  $1.70$ , peso específico mayor de  $2.5 \text{ gr./cm}^3$ , dureza de  $7$  en la escala de ---

Mohr. De preferencia se usa arena de río en forma redondeada o esferoidal.

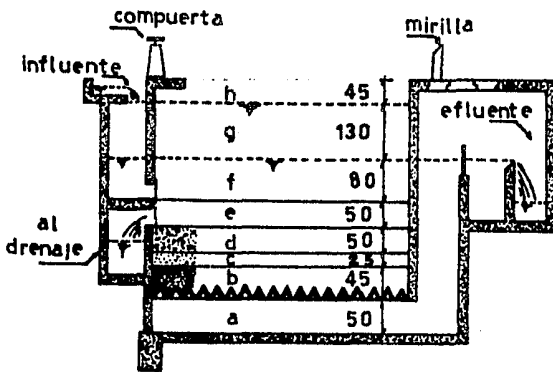
Las características de los materiales en los filtros duales de arena y antracita son: para la arena; origen cuarzo, espesor entre 15 y 30 cms., E entre 0.45 y 0.60 mm., Cu entre 1.15 y 1.70, peso específico mayor de 2.6 gr./cm<sup>3</sup>. Para la antracita; contenido de carbón libre mayor del 85%, espesor entre 50 y 60 cm., E entre 0.8 y 1.4 mm., Cu entre 1.15 y 2.00, peso específico mayor de 1.55 gr./cm<sup>3</sup>, dureza de tres en la escala de Mohr, porosidad del 50% al 55%, debe ser durable. La fig. 18 muestra un filtro dual típico, y la fig. 19 compara la permeabilidad del filtro de arena con la del filtro dual. La fig. 20 muestra la distribución de los medios filtrantes de acuerdo a la altura del filtro.

Para soportar los materiales filtrantes, es común utilizar grava colocada sobre el sistema de drenaje, evitando que la arena se escape por el desagüe y además para distribuir de manera uniforme el agua de lavado, generalmente la colocación de los estratos de grava en orden ascendente es:

Estrato	Espesor (cm.)	Diámetro (mm.)
1	15	38.1 - 19.05 (1 1/2" - 3/4")
2	10	19.0 - 12.70 (3/4" - 1/2")
3	8	12.7 - 6.35 (1/2" - 1/4")
4	7	6.35- 3.18 (1/4" - 1/8")
5	5	3.18- 1.59 (1/8" - 1/16")

Lo que da un espesor total de 45 cms. que es lo más común, aunque puede variar de 25 a 55 cms.

Los sistemas de drenaje se utilizan para colectar el agua filtrada, se pueden clasificar en: tuberías perforadas, -- falsos fondos y placas porosas. Los falsos fondos (Wheeler Leopold, etc), son de importación (fig. 21), las placas po



- |                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| a - agua filtrada | e - canaleta de lavado |
| b - grava         | f - nivel mínimo       |
| c - arena         | g - nivel máximo       |
| d - antracita     | h - bordo libre        |

FIGURA 18 Filtro dual típico (acotaciones en cm)

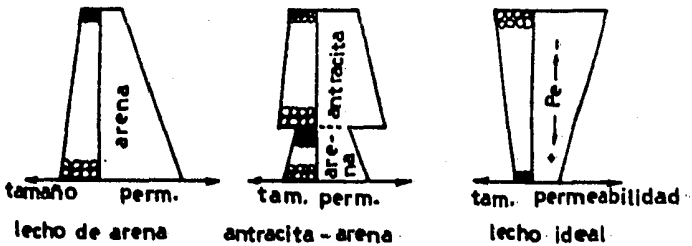


FIGURA 19 Permeabilidad en lechos filtrantes

rosas no han dado buenos resultados. El drenaje utilizado cuando se soportan los medios filtrantes con grava, generalmente es el de múltiples con laterales, siendo, además, el sistema más antiguo.

Las tablas 4 y 5, proporcionadas por Azevedo Netto facilitan notablemente el diseño.

El lavado del filtro se realiza invirtiendo el flujo de agua, expandiendo el lecho del material filtrante, y con un sistema colector se lleva el agua de lavado al drenaje. A continuación se da la velocidad de lavado según el diámetro efectivo de la arena con una expansión del lecho entre el 30% y el 50%.

Diámetro Efectivo	Velocidad (L.P.S./m <sup>2</sup> )
0.35 a 0.45	10 a 12
0.45 a 0.55	12 a 14
0.55 a 0.65	13 a 16

La tabla 6 proporciona las velocidades de lavado que provocan un 50% de expansión del lecho, relacionando el tamaño ( $P_{30}$ ) de los granos de arena y la temperatura del agua.

$$P_{30} = 1.2 P_{10}$$

donde:

$$P_{30} = \text{Tamaño 30 (análisis granulométrico)}$$

$$P_{10} = \text{Tamaño efectivo}$$

La presión en la entrada del filtro debe ser aproximada a 0.45 kg./cm<sup>2</sup>.

A medida que aumenta la temperatura del agua, sin variar el diámetro efectivo de la arena, la velocidad del lavado aumenta. El tiempo estimado de lavado es de 5 a 10 min.



PERDIDA DE CARGA PARA DIFERENTES DIAMETROS DE ORIFICIOS Y  
 ESPACIAMIENTO DE LATERALES (VELOCIDAD DE LAVADO 90 cms./min.)

TABLA 4

E	D	ESPACIAMIENTO ENTRE LATERALES (EJE A EJE)								
		20 cms.			25 cms.			30 cms.		
		A	B	C	A	B	C	A	B	C
6.2	7.5	66	0.23	2.6	53	0.28	3.8	44	0.34	6.0
9.3	15.0	33	0.46	2.1	26	0.58	3.4	30	0.75	6.0
12.5	20.0	25	0.60	1.3	20	0.75	1.8	16	0.94	2.8
15.8	25.0	--	----	---	--	----	---	--	----	---

A - No. de orificios x M<sup>2</sup>

B - Gasto por orificio L/S

c - Pérdida de carga M

D - Distancia entre orificios cm.

E - Diámetro de orificios mm.

DATOS DE DISEÑO PARA LA TUBERIA PRINCIPAL DE UN DREN PARA FILTRO

TABLA 5

AREA DE LOS FILTROS	GASTO MA- XIMO DE LA- VADO (L/S)	DIAMETRO		AREA (M <sup>2</sup> )	VELOCIDAD EN EL TUBO (M/S)
		mm.	pulg.		
2.5	38	200	8	0.031	1.21
5.0	75	250	10	0.049	1.52
7.5	113	300	12	0.071	1.60
10.0	150	350	14	0.096	1.55
15.0	225	450	18	0.159	1.41
20.0	300	500	20	0.196	1.52
25.0	375	550	22	0.238	1.58
30.0	450	600	24	0.283	1.59
35.0	525	700	28	0.385	1.43
40.0	600	800	32	0.503	1.19
45.0	675	800	32	0.503	1.34
50.0	750	800	32	0.503	1.49

RELACION ENTRE EL TAMARO  $P_{30}$  Y VELOCIDAD ASCENSIONAL DEL

AGUA DE LAVADO CON UN 50% DE EXPANSION DEL LECHO

TABLA 6

TAMARO $P_{30}$	VELOCIDAD ASCENSIONAL DEL AGUA PARA DIFERENTES TEMPERATURAS			
	0°C	(32°F)	21°C	(70°F)
mm	cm./min.	lps/m <sup>2</sup>	cm./min.	lps/m <sup>2</sup>
0.40	31.24	5.21	51.31	8.55
0.50	46.99	7.83	74.17	12.36
0.60	64.26	10.71	99.06	16.51
0.70	83.06	113.84	125.22	20.87
0.80	104.90	17.48	153.16	25.53

Cuando se realiza un lavado superficial adicional, éste puede ser fijo o rotatorio. El sistema fijo utiliza un gasto entre 2.7 y 5.4 lps./m<sup>2</sup> y el rotatorio entre 0.35 y 0.70 lps./m<sup>2</sup> y la presión para el primero es de 6 a 18 m., mientras que para el rotatorio es de 35 a 55 m. El tiempo de lavado en ambos sistemas es de 5 minutos como máximo.

El sistema de lavado debe poseer canaletas colectoras para drenar el agua (fig. 22). La separación libre entre canaletas como mínimo debe ser de 2 m., y entre el bordo de la canaleta y la pared del filtro de 1 m. La altura sobre el lecho filtrante hasta el fondo de la canaleta está dada por:

$$h_1 = \text{Expansión del lecho} + 5 \text{ cms.}$$

La pérdida de carga a través del filtro, nos da una valiosa información acerca de la cama y su operación correcta. Si la velocidad de la pérdida de carga se incrementa durante una carrera, es indicio de baja eficiencia del pretratamiento, y si es durante varias carreras de filtración, puede ser debido a la obstrucción del drenaje, de la grava o a un insuficiente lavado. La determinación de la pérdida de carga es algo muy simple, ya que involucra solamente la medida de los niveles relativos a ambos lados del filtro (influyente y efluente). Una medida simple y directa es colocar dos tubos transparentes, lado a lado, con una cinta graduada entre ellos, la diferencia entre los niveles será la pérdida de carga.

Cuando se alcance un cierto valor máximo de la pérdida de carga, se debe iniciar el lavado del filtro, también es usual dar un tiempo fijo que determine la carrera del filtro, generalmente entre 24 y 48 horas de uso.

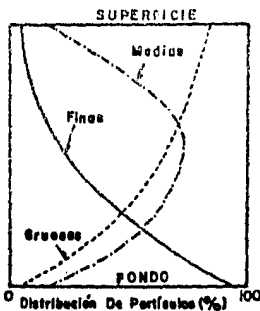


FIG. 20  
DISTRIBUCION DE PARTICULAS  
EN FILTROS MULTIPLES

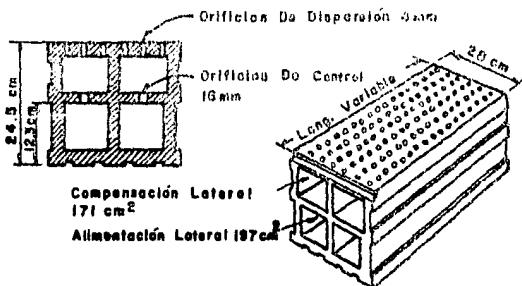


FIG. 21  
FONDO LEOPOLD

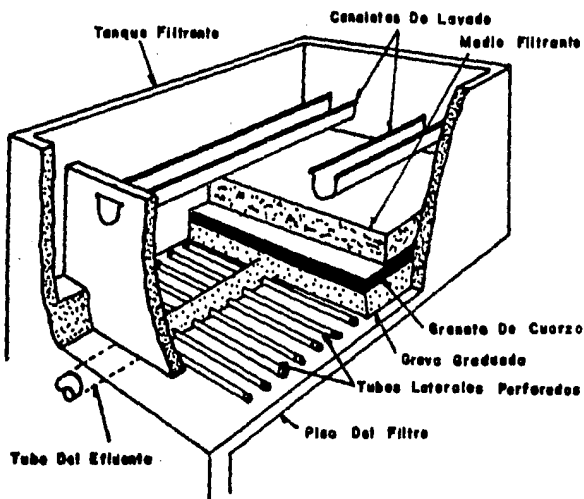


FIGURA 22  
FILTRO CON DRENAJE POR TUBOS LATERALES

Las velocidades recomendables en tuberías son: para el influente de 0.3 a 0.6 m./s . para el efluente de 0.9 a 1.8 m./s , para el lavado ascendente de 2.4 a 3.6 m./s , para el drenaje de 1.2 a 2.4 m./s y para el enjuague de -- 4 m./s como máximo.

La capacidad del depósito para agua de lavado debe ser la suficiente para limpiar dos filtros durante 10 minutos cada uno en lavado ascendente, más 5 minutos c/u en lavado superficial.

Es recomendable por su bajo costo, el lavado con flujo proveniente de otras unidades, ya que se ahorra en tuberías, tanque de almacenamiento, sistemas de bombeo, etc. Su --- principal desventaja es que los filtros deben ser más profundos (de 60 a 90 cms. más) que los normales.

El depósito para aguas filtradas debe tener capacidad para un volumen del efluente obtenido entre 6 y 24 horas.

La operación del filtro puede ser manual, semiautomática o automática, dependiendo de la economía del proyecto. En la operación manual, las válvulas se manipulan con volantes, siendo práctico hasta diámetros de 250 mm. (10"), en la operación semiautomática, las válvulas se accionan con mandos hidráulicos, neumáticos o eléctricos desde tableros o consolas. La operación automática se realiza con equipos fabricados por casas comerciales que proporcionan las especificaciones necesarias.

La galería filtrante, donde se localizan las tuberías, debe presentar buen drenaje, amplia ventilación, adecuada -- iluminación y un ancho mínimo de 5 metros.

Finalmente, las variables que se deben medir y controlar - en el proceso de filtración son, los gastos de agua filtrara

da y de lavado, la pérdida de presión, los niveles de -- agua en los filtros y en los depósitos de agua filtrada y de lavado.

La tabla 7 muestra las características de los filtros rápidos con lecho de arena y con lecho de arena y antracita, a manera de comparación.

## COMPARACION ENTRE FILTROS RAPIDOS

TABLA 7

CARACTERISTICAS	FILTRO RAPIDO CON LECHO MIXTO (ARENA Y ANTRACITA)				FILTRO RAPIDO CON LECHO DE ARENA			
	Rata o carga superficial de filtración	$M^3/M^2/día$	235.0	350.0	590.0	$M^3/M^2/día$	87.50	117.50
	$lt/seg/M^2$	2.72	4.05	6.83	$lt/seg/M^2$	1.01	1.36	2.03
Velocidad de filtración	cm/seg	0.272	0.405	0.638	cm/seg	0.101	0.136	0.203
Profundidad del lecho filtrante	30 - 45 cms. de grava 45 - 60 cms. de antracita 15 - 30 cms. de arena				30 - 45 cms. de grava 60 - 75 cms. de arena			
Drenaje	Falsos fondos o similares				Tuberías metálicas perforadas o placas porosas, falsos fondos, etc.			
Lavado	Invirtiendo el flujo con agua proveniente de un tanque elevado o una bomba. Velocidad de lavado: 0.60 a 1.0 m./min. ó 0.6 a 1.0 $m^3/m^2/min.$				Invirtiendo el flujo a presión de un tanque de lavado o una bomba. Velocidad de lavado: 0.80-1.20 mts/min. 0.80 a 1.2 $m^3/m^2/min.$			
Pérdida de carga	De 20 cms. hasta 2.70 mts.máx.				De 30 cms. hasta 2.70 mts. máx.			
Tiempo entre limpiezas	12 - 48 horas				24 - 48 - 72 horas			
Penetración del floc	Profunda				5 cms. superiores (mayor cantidad)			
Cantidad de agua usada en el lavado	1% a 3% del agua filtrada				1% a 6% del agua filtrada			
Tratamiento previo del agua	Coagulación, floculación y sedimentación				Coagulación, floculación y sedimentación			
Costo de construcción	Más bajo que el de los filtros rápidos de arena				Más bajo que el de los de los filtros lentos			
Costo de Operación	Igual al de los filtros rápidos de arena				Más alto que el de los filtros lentos			
Area ocupada por los filtros	1/2 a 1/5 de la de los filtros rápidos de arena				-----			



## 7. RESUMEN Y RECOMENDACIONES

El tratamiento para clarificación de agua es un proceso tan complejo que cada parte de él podría ser un tema sujeto a investigación. En este trabajo se hizo un resumen muy simple y concreto en la teoría y diseño de clarificadores modernos.

En primer término se trató el tema referente a las características del agua y normas de calidad, donde se hace una descripción de las características físicas, químicas y bacteriológicas de mayor importancia y que además influyen de una manera clara en el proceso de clarificación. Hay que hacer notar que existe un gran número de parámetros indicativos de las características del agua y que por su extensión no fueron tratados. Las normas de calidad para agua potable varían con los adelantos tecnológicos. La toma de muestras para obtener los resultados de laboratorio cobran gran importancia, ya que conociendo la caracterización del agua cruda y la calidad necesaria en el efluente, se puede prever el tratamiento necesario.

El proceso de clarificación completo consta de las operaciones unitarias de coagulación, floculación, sedimentación y filtración, se hizo un resumen de cada una de ellas observando los parámetros que influyen en el diseño, se tiene una gran variedad de alternativas, desde diseños simples, hasta equipos comerciales muy sofisticados.

En el capítulo referente a coagulación, se mencionan los principales productos químicos coagulantes por grupos: sales metálicas, polímeros sintéticos orgánicos y sílice activado, asimismo, se da una guía para la selección y dosificación de coagulantes, la firma comercial que elabora los productos, dará las características y ventajas de éstos.

tos, para su elección. Es importante recalcar la acción altamente corrosiva de las sustancias químicas y el especial cuidado que se debe tener en su manejo y aplicación. El uso de polielectrolitos como coagulante secundario es un hecho relevante en el diseño moderno de plantas clarificadoras. Es necesario dar una fuerte agitación al agua para optimizar la cantidad de coagulantes, esto se logra con una mezcla rápida, se piensa originalmente en un canal Parshall por su eficiencia y fácil diseño, además de servir como aforador de entrada a la planta. Los difusores han dado muy buenos resultados y técnicamente son superiores a otros sistemas, su principal ventaja es que el tiempo de retención es igual para todos los elementos del fluido, por esto, se deben tomar en cuenta para el diseño.

Una vez aplicada la coagulación, es necesario darle tiempo a las sustancias químicas de mezclarse con las partículas del agua para formar flóculos mayores, esto se logra mediante una agitación lenta del fluido, para ello, se diseña el floculador tomando en cuenta las variables que intervienen en el fenómeno, el objetivo de esta operación unitaria es formar los flóculos de manera que se asienten fácilmente y puedan ser removidos en las unidades subsiguientes del proceso, es posible manejar las variables, de tal manera que se puede jugar con el tamaño y peso específico de las partículas formadas. Los tanques floculadores pueden ser hidráulicos, mecánicos o neumáticos. Se da una guía de diseño para floculadores mecánicos con flujo horizontal, donde destaca la ecuación de Andreu, Villegas y Letterman por su aplicación práctica.

La sedimentación ha sido revolucionada con el sistema de placas paralelas o módulos tubulares, llamada sedimentación de alta velocidad, la sedimentación tradicional ha -

quedado atrás, los sedimentadores de alta velocidad permiten grandes ahorros en espacio y en costo. Su diseño involucra parámetros que fueron detallados, incluyendo las ecuaciones que los relacionan. Estos sistemas pueden ser adaptados a los sedimentadores tradicionales existentes - con solo colocar las placas paralelas o los módulos tubulares en ellos.

Normalmente la última operación unitaria del proceso de clarificación es la filtración, en ella se retienen los flóculos que escapan de las unidades anteriores. Las teorías que explican el comportamiento de los filtros son muy complejas, por lo que se trata de pensar en un diseño relativamente sencillo, aprovechando las experiencias de investigaciones, diseños y construcciones. En la actualidad se empiezan a desarrollar los filtros de tasa declinante, donde se maximiza la conservación de carga utilizada en el proceso. Se da una guía de diseño para este tipo de filtros, incluyendo un ejemplo ilustrativo, en él debe tenerse cuidado en cada uno de los pasos de la secuencia que se propone. Finalmente se hace una comparación entre filtros con tasa declinante y filtros con tasa constante.

Los filtros modernos son aquellos que poseen alta velocidad de filtración y su uso es imperativo por la gran demanda actual de agua clarificada y/o potable. Pueden ser constituidos por lechos de arena o por lechos de arena y antracita, se da una guía general de diseño tomando en cuenta aspectos teóricos y prácticos.

Es muy importante la calidad y el análisis granulométrico del material que se utiliza en la construcción del filtro. El diseño de los filtros duales cuyos lechos son de arena y antracita es común debido a su alta velocidad de filtra

ción y eficiencia.

Aunque se ha desarrollado el trabajo separando cada operación unitaria, es importante recordar que en el proceso de clarificación, todas las unidades se interrelacionan, así por ejemplo, una floculación deficiente puede afectar el funcionamiento de los filtros; una dosificación inadecuada dará como resultado un efluente de baja calidad, -- aunque el resto de operaciones unitarias trabajen con alta eficiencia; los filtros con operación deficiente demeritan el trabajo del sedimentador; etc.

Este trabajo da un panorama general del proceso de clarificación, es recomendable que si se quiere profundizar en el diseño funcional de plantas clarificadoras modernas, - se utilice como guía, siendo necesario consultar una amplia bibliografía para detallar cada una de las operaciones unitarias que intervienen en el proceso. También, es importante recalcar que la tecnología avanza y puede ser aplicable cuando esto implique economía tanto en la construcción como en la operación y mantenimiento de la planta clarificadora.

## CONCLUSIONES

El crecimiento de las poblaciones aunado al avance de la contaminación, se traduce a la necesidad de tratar grandes volúmenes de agua cuya calidad rebasa los requerimientos establecidos, esto se logra con el diseño de plantas de tratamiento con mayor capacidad apoyado en el avance tecnológico obtenido por medio de la investigación de los procesos del tratamiento.

El desarrollo del proceso de clarificación es relativamente reciente, en las últimas décadas ha existido una exhaustiva investigación en las diferentes operaciones unitarias, así tenemos avances en las técnicas e instrumental de laboratorio para realizar los análisis físico-químicos y bacteriológicos del agua que nos llevan a una mejor caracterización de la misma, adelantos en el conocimiento de los efectos en la salud de las sustancias y/o microorganismos existentes en el agua, lo que conduce a la modificación de las normas de agua potable, destaca también la aparición de nuevos coagulantes secundarios como son los polielectrolitos que han mejorado notablemente el proceso de clarificación, aumentando significativamente la eficiencia en la obtención de agua con menor turbidez.

Otras investigaciones han llevado a confirmar teóricamente algunos fenómenos que se conocían por mediciones hechas en campo o por situaciones de tipo práctico, así se observa que la teoría de mezcla rápida se confirma, después de numerosos ensayos experimentales, con la aparición de los sistemas difusores. En la mezcla lenta se confirman las hipótesis de Camp con los desarrollos matemáticos hechos por varios investigadores acerca del producto adimensional  $GT$  como parámetro predominante de dise

ño, más aun con la relación empírica de dicho producto -- con la dosificación de sulfato de aluminio hecha por Andrews, Villegas y Letterman.

La sedimentación ha sido revolucionada con el surgimiento teórico-práctico de las placas paralelas y módulos tubulares, reduciendo notablemente las dimensiones del tanque sedimentador en diseños nuevos, lo que conlleva a una gran economía en costo y ~~espacio~~ ~~en~~ en los tanques ya existentes simplemente colocando las placas o módulos tubulares en ellos.

En lo que respecta a la filtración, se han realizado infinidad de investigaciones, en su funcionamiento hidráulico, medios filtrantes, sistemas de drenaje, retrolavados, etc. se ha llegado a ecuaciones matemáticas complejas que tienen poca aplicación práctica, sin embargo, ha existido -- enorme adelanto con la aparición de los filtros rápidos -- que permiten obtener mayores volúmenes de agua con calidad aceptable.

La aparición de diseños de filtros con tasa declinante es reciente y aún no se acepta ampliamente su uso, sin embargo ha sido probada su eficiencia en grandes plantas. La ventaja de este sistema es la de aprovechar al máximo la carga disponible en el filtro y evitar la falla del mismo por esto, debe tomarse en cuenta en los diseños modernos de plantas clarificadoras.

Otro aspecto importante en la filtración es el tipo de medio filtrante utilizado.. Actualmente se ha llegado al diseño de filtros duales con arena y carbón de antracita -- que ha permitido altas velocidades de filtración y una buena calidad del efluente.

El desarrollo de los filtros con medios mezclados que --- constan de tres o más materiales filtrantes como arena, - antracita y granate de cuarzo, se ha restringido en nuestro país, debido a la dificultad de obtener el granate de cuarzo o material similar cuya característica es ser fino y de alto peso específico, por esto, el diseño se enfoca a filtros duales cuyo funcionamiento es con tasa declinante.

La tecnología, equipo e investigaciones son reducidas en nuestro país, lo que hace necesaria, en ocasiones, su importación. Actualmente se está tratando de tener la menor dependencia en este renglón, pensando en la economía de la nación.

Finalmente podemos concluir que es necesario lograr el diseño funcional de plantas clarificadoras, con las técnicas modernas que permitan tener flexibilidad en la operación y, lo más importante, que se tenga la mayor economía en costos de capital y operación con una alta eficiencia del proceso.

**BIBLIOGRAFIA**

**WATER CLARIFICATION PROCESSES**  
Practical Design and Evaluation  
Herbert E. Hudson, Jr.  
VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY

**NEW CONCEPTS IN WATER PURIFICATION**  
Gordon L. Culp Russell L. Culp  
VAN NOSTRAND REINHOLD COMPANY

**WATER TREATMENT PLANT DESIGN**  
Robert L. Sanks  
ANN ARBOR SCIENCE, 1979

**CHEMISTRY FOR SANITARY ENGINEERS**  
Perry L. Mc. Carty  
Mc.GRAW - HILL BOOK COMPANY

**HISTORIA DE LA CLARIFICACION DEL AGUA**  
Derek G. Miller  
ASOCIACION DE INVESTIGACION DEL AGUA MEDMENHAM, INGLATERRA

**NUEVOS METODOS DE TRATAMIENTO DE AGUA**  
Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria  
y Ciencias del Ambiente (CEPIS)  
ORGANIZACION MUNDIAL DE LA SALUD  
SERIE TECNICA No. 14

**TEORIA Y DISEÑO DE SEDIMENTADORES DE ALTA VELOCIDAD**  
Velasco Abundis, Fernando Pablo  
TESIS FACULTAD DE INGENIERIA, UNAM, 1983

**MANUAL DE NORMAS DE CALIDAD PARA AGUA POTABLE**  
SECRETARIA DE ASENTAMIENTOS HUMANOS Y OBRAS PUBLICAS, 1982



NORMAS TECNICAS PARA EL PROYECTO DE PLANTAS POTABILIZADORAS  
SECRETARIA DE ASENTAMIENTOS HUMANOS Y OBRAS PUBLICAS, 1979

PURIFICACION DE AGUAS Y TRATAMIENTO Y REMOCION DE AGUAS  
RESIDUALES

Gordon Maskew Fair, John Charles Geyer, Daniel Alexander  
Okun

EDITORIAL LIMUSA, 5a. Reimpresión, México, 1984