

3
2oj.



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN**



**COAGULACION Y FLOCULACION PARA REHUSO Y
RECUPERACION DE PRODUCTOS PROVENIENTES
DE DESECHOS DE UNA PLANTA DE PAPEL
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA :
CARLOS ALVAREZ ANGELES

DIRECTOR DE TESIS
ING. CARMEN ARRIAGA ORIHUELA

CUAUTITLAN IZCALLI. EDO. DE MEX.

1992



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.

I N D I C E .

- 1.- INTRODUCCION.
- 2.- ANTECEDENTES.
- 3.- OBJETIVO.
- 4.- GENERALIDADES.
 - 4.1 Definiciones y conceptos.
 - 4.2 Propiedades de los coloides.
 - 4.3 Propiedades cinéticas.
 - 4.4 Propiedades ópticas.
 - 4.5 Propiedades electrocinéticas.
 - 4.6 Medición de caudal.
- 5.- COAGULANTES.
 - 5.1 Coagulantes ácidos.
 - 5.2 Coagulantes alcalinos.
 - 5.3 Coagulantes poliméricos.
 - 5.4 Sustancias que ayudan a la coagulación - floculación.
- 6.- PARAMETROS SIGNIFICATIVOS EN EL PROCESO DE COAGULACION Y FLOCULACION.
 - 6.1 Temperatura.
 - 6.2 pH.
 - 6.3 Concentración de coloides.
 - 6.4 Dosis de reactivo.
 - 6.5 Selección del tipo de prueba.
 - 6.6 Velocidades de agitación.
 - 6.7 Tamaño del floculo y velocidad de sedimentación.
- 7.- MECANISMOS DE COAGULACION Y FLOCULACION.
 - 7.1 Mecanismos de coagulación.
 - 7.2 Mecanismos de floculación.

8.- PRUEBAS EXPERIMENTALES.

8.1 Análisis del influente al tratamiento.

8.2 Normas y criterios.

8.3 Pruebas de tratabilidad.

8.4 Análisis del efluente de tratamiento.

8.5 Consideraciones económicas de los coagulantes y floculantes.

9.- CONCLUSIONES.

10.- BIBLIOGRAFIA.

I.- INTRODUCCION

EL AGUA Y SUS FUENTES DE ABASTECIMIENTO

Cielo hidrológico

El agua se mueve en un cielo continuo arriba y a través de la fase terrestre. El agua se evapora constantemente de los océanos y otras áreas abiertas, recolectándose en nubes y condensándose en gotas de lluvia o pedazos de nieve y hielo.

El agua de lluvia y otras formas de precipitación se recolectan en arroyos, ríos, lagos y corrientes subterráneas.

Las aguas superficiales están constituidas en su mayor parte por el agua de lluvia, la cual corre a través de la tierra disolviendo compuestos químicos (orgánicos e inorgánicos) del suelo con el cual se pone en contacto y levantando partículas finas que se mantienen en suspensión. El nivel de sólidos disueltos y materiales en suspensión en las aguas superficiales depende en gran medida de la velocidad de flujo de agua, la composición geológica, de las superficies en contacto y la cantidad de material orgánico que crece o se descompone en el agua o en el suelo.

La pureza de estas aguas también refleja los cambios de estación debido a las fluctuaciones en la cantidad de agua de lluvia en ciertas épocas del año.

Las aguas del subsuelo provenientes de pozos se han filtrado lentamente a través de la corteza terrestre, disolviendo algunos de los minerales con los cuales se ponen en contacto.

Las aguas subterráneas, por lo tanto, contienen grandes concentraciones de sólidos disueltos; pero debido al efecto filtrante de la arena o roca a través de las cuales pasan, están prae -

tiamente libres de material suspendido.

El agua está clasificada como un disolvente debido a que casi todo lo que pone en contacto se disolverá en ella hasta cierto grado.

Es por esta habilidad para disolver muchos materiales, que el agua nunca se encuentra en estado "puro" en la naturaleza. Los contaminantes en el agua pueden clasificarse en: gases disueltos, sólidos disueltos y sólidos suspendidos.

A continuación se enlistan las impurezas más comunes en una agua cruda, así como en el estado en que se encuentran y los problemas que puede ocasionar su presencia.

<u>IMPUREZAS</u>	<u>ESTADO</u>	<u>PROBLEMA OCASIONADO</u>
Arellas, Sedimentos, Fangos	Suspensión Coloidal	Olor y depósitos.
Olor	Gases disueltos	
Bacterias, Algas	Suspensión Coloidal	Ensuciamiento, taponeamiento, olor, color, productos de corrosión.
Aceite	Suspensión Emulsión.	Ensuciamiento
H_2S , O_2	Solución	Acidez, olor, corrosión.
$Ca (HCO_3)_2$, $CaCO_3$, $Mg (HCO_3)_2$, $MgCO_3$	Solución	Incrustación
$CaSO_4$, $MgSO_4$	Solución	Coagulos insolubles.

a).- GASES DISUELTOS.

Se puede afirmar que los gases más comunes que contiene el agua causan problemas de corrosión.

b).- SÓLIDOS DISUELTOS.

Estas sustancias químicas son importantes principalmente a su potencial para formar depósitos si su concentración excede la capacidad del agua como solvente. El incremento a sólidos totales disueltos (STD), en el agua también incrementa la posibilidad de corrosión por el incremento de la conductividad del agua.

c).- SÓLIDOS SUSPENDIDOS.

Los sólidos suspendidos o sólidos filtrables (debido a que pueden ser removidos por filtración), pueden incluir minerales no disueltos, residuos de sustancias orgánicas, arcilla, arena y microorganismos, entre otros muchos tipos.

La presencia de los sólidos suspendidos en el agua pueden causar turbidez la cual es la falta de claridad debido a que las partículas finas de sólidos suspendidos obstruyen el paso de la luz a través del agua.

La turbidez presente en el agua es ocasionada por partículas coloidales (arcillas, óxidos metálicos, hidratos, bacterias, fibras de pulpa y proteínas), que pueden desarrollar una carga eléctrica. El signo de esta carga primaria puede ser positiva o negativa, aunque la mayor parte de coloides de las aguas y aguas residuales desarrollan una carga primaria negativa.

Una dispersión coloidal (fase sólida y acuosa juntas), no tienen una carga eléctrica neta, por tanto, la carga primaria de las partículas debe equilibrarse en la solución acuosa. Como resultado existe una doble capa eléctrica en cada interfase entre un sólido y el agua. Esta doble capa consiste en la partícula cargada y un exceso equivalente de iones de carga opuesta (contra-iones) que se acumulan en el agua cerca de la superficie de la partícula.

Estos contra-iones son atraídos electrostáticamente hacia esta región interfase. Esta atracción de lugar a un gradiente de concentración, de tal modo que la agitación térmica al azar puede ocasionar que estos iones se difundan desde la superficie de la partícula hacia la masa principal de la solución en donde su concentración es menor.

Debido a la existencia de la carga primaria, existe un potencial electrostático (voltaje) entre la superficie de la partícula y la masa principal de la solución.

Cuando se acercan mutuamente dos partículas coloidales similares, sus capas difusas empiezan a interactuar: Esta interacción electrostática entre partículas de carga primaria similar produce siempre una fuerza repulsiva.

Ciertas fuerzas atractivas existen entre todos los tipos de partículas coloidales, por muy distintos que pueden ser sus naturalezas químicas. Estas fuerzas atractivas llamadas de Van der Waals su magnitud depende de la clase de átomos que componen las partículas coloidales y la densidad de las partículas. Todo lo contrario de las fuerzas repulsivas, cuya magnitud es esencialmente independiente de la composición de la fase acuosa. Estas fuerzas atractivas entre dos partículas disminuyen al aumentar la distancia de separación entre las mismas.

El empleo de un coagulante químico desestabiliza los coloides suspendidos mediante las fuerzas que los mantenían separados, las interacciones de algunas especies de coagulante con una partícula coloidal son puramente electrostáticas, la desestabilización se lleva a cabo por iones de carga opuesta a la del coloide. Con el uso de un floculante permite que las partículas coaguladas se aglomeren generalmente por la acción de puentes electrostáticos, en una red tridimensional, porosa y suelta.

En lo que respecta a las aguas residuales provenientes de la elaboración del papel, estas presentan una elevada cantidad de sólidos suspendidos que es comunmente materia orgánica (Fibra obtenida de árboles), además de sustancias químicas que se agregan para así mismo obtener la calidad deseada del papel, tales como: Sulfato de aluminio, ácido sulfurico, resina, almidón, dispersantes, colorantes, etc.

En la manufactura del papel se requiere de volúmenes altos de agua principalmente para la molienda, transporte de la pulpa, reguladores de consistencia y regaderas.

Los desechos de agua en máquinas productoras de papel - provienen principalmente de las telas (mases de formación), - regaderas, limpiadores y molinos. A este tipo de agua se le denomina " agua blanca ".

El agua es considerada como materia prima fundamental en este sector industrial por lo que un buen tratamiento permitiría su recirculación principalmente a los lugares de mayor consumo y así mismo disminuir la cantidad de agua de primer uso.

II.- ANTECEDENTES

Las aguas naturales y de desecho presentan una serie de diversas substancias tales como: materia viva, materia muerta, incolora, colorida, tóxica, inorgánica, orgánica biodegradable y no biodegradable.

Por el tamaño de las partículas se pueden clasificar en: materia disuelta, materia coloidal y materia suspendida.

Es importante señalar que no existe una sola técnica aplicable a la remoción que afecta a todos los contaminantes.

Un sistema de tratamiento es aquel que esta formado por una ó por varias operaciones ó procesos unitarios arreglados de tal modo que se obtenga el grado de tratamiento deseado para el agua residual a la que se aplique.

Los sistemas de tratamiento están agrupados en dos grandes clases:

Biológicos y Físico - Químicos, ambos a su vez pueden o no ir precedidos por un pretratamiento ó tratamiento preliminar.

Las siguientes unidades están asociados con el pretratamiento: cribas de rejilla ancha y fina, autolimpiantes ó manuales, desmenzadores y tanques desarenadores.

En los sistemas biológicos su característica principal es la de realizar la oxidación de la materia orgánica por medio de microorganismos vivos, por lo que es importante un abastecimiento adecuado de alimento, nutrientes, clima templado, evitando cambios violentos de temperatura, sustancias tóxicas y si el sistema

es aerobio debe contarse con el oxígeno necesario para la respiración. En este grupo podemos situar a los siguientes procesos, considerados como una buena alternativa de tratamiento:

Sistema convencional de lodos activados

Aeración prolongada

Plantas paquete

Discos biológicos rotatorios

Filtros percoladores

Lagunas de estabilización

Zanja de oxidación

Lagunas aeradas

Los sistemas fisico-químicos están basados en separaciones físicas ó en reacciones químicas específicas, los más utilizados para tratar las aguas industriales son:

Sedimentación por gravedad

Flotación

Coagulación y Floculación

Adsorción con carbón activado

Filtración

Cloración

Ozonización

Intercambio Iónico

Es muy importante seleccionar el proceso adecuado, evaluar su eficiencia en ocasiones en terminos de DBO y en otras con DQO ó GOT, puesto que estos pueden ser factores que contribuyan a seleccionar un tratamiento eficiente y económico con base en la calidad del efluente obtenido. La combinación de los procesos físico-químicos y biológicos podrá tratar aguas residuales que pueden considerarse intratables.

A continuación se presentan los tipos de contaminantes comunes y tratamientos típicos.

Operaciones unitarias, procesos y sistemas de tratamiento usados para remover los contaminantes más comunes encontrados en aguas de desecho.

Contaminante	Unidad de operación, proceso unitario o sistema de tratamiento
Sólidos suspendidos	Coagulación y floculación Filtración flotación Sedimentación Sistemas de tratamiento de suelos
Materia Orgánica biodegradable	Lodos activados Lagunas de estabilización Lagunas aeradas Filtros percoladores adsorción con carbón activado

Grasas y Aceites

Separación por gravedad
Flotación con aire disuelto
Adsorción
Filtración

Organismos Patógenos

Cloración
Hipocloración
Ozonización

Metales Pesados

Presipitación químicas
Intercambio Iónico
Sistemas de tratamiento de suelos

**Sólidos inorgánicos
disueltos**

Intercambio Iónico
Osmosis inversa
Electrodialisis

Nutrientes:

Suspensión de crecimientos

a) Nitrogeno

Desnitrificación biológica
Intercambio Iónico
Laguna con algas
Desaponificación

b) Fosforo

Remoción químico-biológica
Presipitación química
Coagulación con sal/sedimentación
Adición metal-sal
Sistemas de tratamiento de suelos

Los sistemas biológicos son notoriamente sensitivos a cambios en las condiciones ambientales. Si algún material tóxico-entra en la planta aunque sea temporalmente, la eficiencia del-tratamiento biológico decrece y su recuperación podría requerir varios días o aún semanas.

Los sistemas fisicoquímicos son requeridos como una buena alternativa en donde existan descargas intermitentes o estas -tengan grandes variaciones en la concentración de contaminantes presentes y donde no haya facilidades para que sea biológico - (clima, temperatura, area y otros), ó se requiera una alta remo-ción de fosforo, DBO, DQO ó existan altas concentraciones de me-tales, substancias tóxicas ó los residuos no sean biodegrada --bles.

Es imposible especificar un conjunto de calidades de eflu-entes aplicables a la mayoría o a todas las situaciones, pero -se acepta que un efluente de buena calidad tendrá las caracte-risticas que se muestran en la tabla (II. a).

El objetivo fundamental en el tratamiento de aguas de dese-chos es proporcionar una reducción adecuada del nivel de conta-minantes, de tal modo, permitir su descarga al medio ambiente -o su reuso.

**CALIDAD DESEADA EN EL EFLENTE DE LAS PLANTAS DE TRATA -
MIENTO DE AGUAS DE DESECHO.**

CARACTERISTICA QUIMICA O BIOLOGICA	CONCENTRACION MAXIMA DESEABLE (mg./lt.)
DEMANDA BIOQUIMICA DE OXIGENO (DBO)	10
DEMANDA QUIMICA DE OXIGENO (DQO)	60
SOLIDOS SUSPENDIDOS	10
FOSFORO	1

TABLA (II. a)

III.- OBJETIVO

- Realizár pruebas fisicoquímicas con el fin de conocer la calidad de agua cruda.
- Llevar a cabo pruebas de tratabilidad para selección de el - tratamiento adecuado, y así mismo determinar si el agua tratada cumple con las características deseadas para poder ser utilizadas como agua de proceso.
- En base a un análisis fisicoquímico del agua tratada verificar si esta entra dentro de los parámetros establecidos por SEIDE para su descarga municipal.

IV.- GENERALIDADES

4.1 DEFINICIONES Y CONCEPTOS

COAGULACION:

Se define como la desestabilización de los coloides suspendidos mediante la remoción de las fuerzas que los mantienen separados.

FLOCULACION:

Se define como el aglomeramiento de las partículas coaguladas para permitir su crecimiento generalmente por la acción de puentes electrostáticos.

Operacionalmente la coagulación se refiere a las reacciones que ocurren cuando se agrega un coagulante al agua, dando origen a la formación de productos insolubles y la floculación al proceso en el cual se aglomeran las partículas coaguladas formando un floculo suficientemente grande y pesado que puede sedimentar.

4.2 PROPIEDADES DE LOS COLOIDES

Los procesos de coagulación-floculación están basados en las propiedades de los coloides por lo que se ha considerado indispensable hacer mención de ellas.

TAMAÑO

No hay límites definidos de tamaño para las partículas coloidales pero por lo general se considera que tienen una dimensión entre 10^{-6} a 10^{-3} mm. Aproximadamente.

Los coloides, por lo tanto, tienen un tamaño intermedio entre las partículas en suspensión (figura 1); sin embargo estos límites son aproximados ya que el tamaño y la naturaleza del material son los que determinan si la partícula es coloidal.

Existen varios términos para distinguir los tipos de sistemas coloidales los más importantes son hidrofílico e hidrofóbico.

Los coloides hidrofílicos (del griego philos, querido), muestran gran atracción por el agua, mientras que los hidrofóbicos (del griego phobe, fobia), muestran menos atracción.

El calificativo hidrofóbico (fobia al agua), es impropio, ya que si una sustancia repele completamente un medio potencial de dispersión no podría siquiera ser mojado y tampoco habría dispersión.

Lo cierto es que las sustancias hidrofóbicas muestran una atracción considerablemente menor por el agua que las hidrofílicas.

Los coloides hidrofóbicos son importantes en el tratamiento del agua e incluyen sustancias como arcillas, metales, oxidos metálicos y la mayor parte de las sales. Así mismo son -

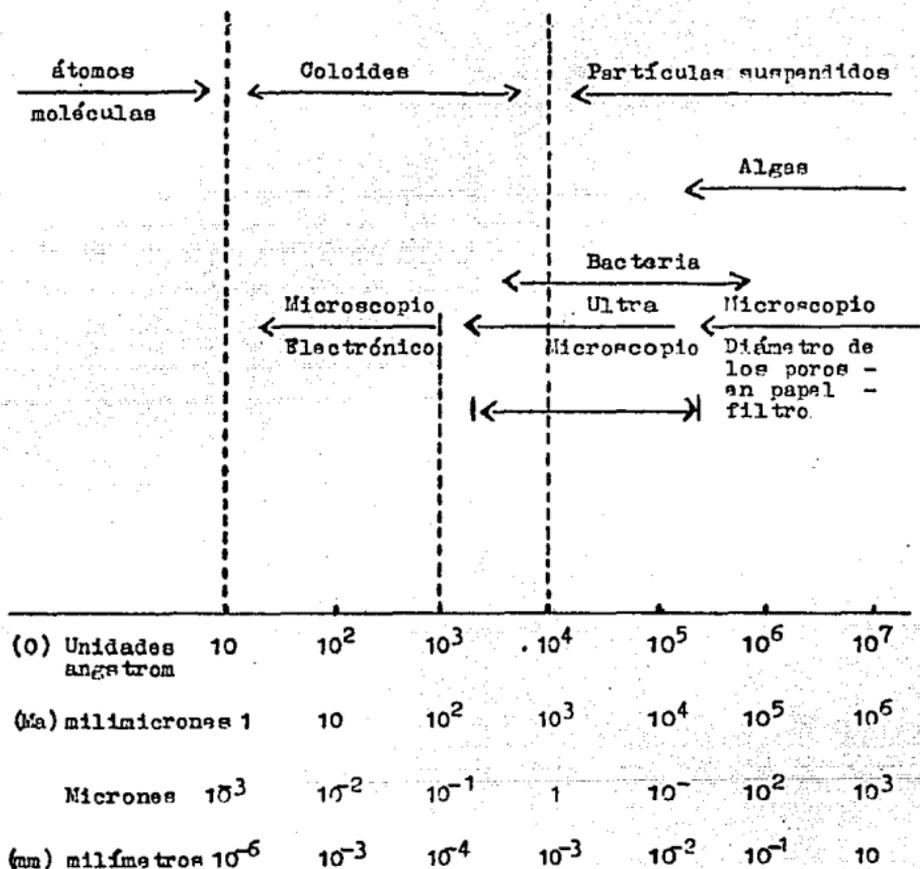


Figura 1. Tamaño de coloides

(Tecnología de Tratamiento de agua para países de Desarrollo.-
 CIPIS - Lima, Perú dic. 1977).

termodinámicamente inestables a la formación de grandes cristales no coloidales.

Los coloidales hidrofílicos comprenden soluciones verdaderas ya sea de moléculas grandes ó de agregados de moléculas pequeñas (llamadas micelas), cuyas dimensiones están dentro de los límites coloidales. Abarcan varios polímeros naturales y sintéticos y numerosas sustancias de significación biológica como proteínas, ácidos nucleicos, almidones y otras macromoléculas.

4.3 PROPIEDADES CINÉTICAS

a).- Movimiento browniano:

Consiste en el movimiento constante e irregular que realizan las partículas coloidales dentro de la fase líquida.

La teoría cinética explica este fenómeno como resultado del bombardeo desigual y casual de las partículas en suspensión por las moléculas del líquido; al elevarse la temperatura del líquido las moléculas adquieren mayor energía cinética y aumentan el movimiento Browniano.

Cuanto más pequeñas son las partículas, se hace más evidente el movimiento Browniano.

El movimiento Browniano sólo puede explicar la estabilidad de las dispersiones coloidales más pequeñas. Para tamaños de partículas mayores, los factores más importantes son corrientes de convección térmica y velocidades bajas de sedimentación.

b).- Difusión:

Tiene relación estrecha con el movimiento Browniano. El movimiento constante de las moléculas del líquido (en nuestro caso agua), ocasiona que las partículas coloidales se ensuen — tran en movimiento Browniano constante, lo que a su vez acarrea una tendencia de las partículas coloidales a dispersarse por todas partes en el disolvente.

La difusión es la tendencia de las moléculas a emigrar de una región de alta concentración a otra de baja concentración y es un resultado directo del movimiento Browniano.

Como es de esperarse la velocidad de difusión es menor que la velocidad media de las partículas en el movimiento Browniano.

c).- Presión Osmótica:

Si un solvente (agua) y un sistema coloidal (agua más coloides), se encuentran separados por una membrana, la cual es permeable al solvente pero no a los coloides, la dilución puede — ocurrir únicamente con el movimiento del solvente hacia el sistema coloidal a través de la membrana. Esto ocurre en forma espontánea y se llama flujo osmótico. Si se aplica una presión — hidrostática apropiada de forma que el flujo osmótico se detenga, se alcanza un estado de equilibrio. La presión balanceante es propiamente la presión osmótica.

4.4 PROPIEDADES OPTICAS

Efecto de Tyndall-Faraday.

Describe el fenómeno de dispersión de la luz al pasar a —

través de una suspensión coloidal. La dispersión es directamente proporcional al tamaño de las partículas. Este efecto se utiliza en la determinación de la turbiedad por medio de un nefelómetro.

Lamentablemente esta determinación no se relaciona en ningún caso con el número de partículas de turbiedad, ni siquiera con la masa total.

Si en un líquido que presenta turbidez se hace pasar un haz de luz a través del vaso que contiene el líquido, la luz es reflejada por las partículas en suspensión, y produce un haz cónico, así mismo el líquido tomará una apariencia lechosa o nebulosa a causa de la reflexión de la luz por las partículas coloidales. La reflexión es conocida como "difracción", y sucede cuando la longitud de onda de la luz es materialmente más corta que el diámetro de la partícula reflejante. Este haz de luz se llama "cono de Tyndall", y lo exhiben todas las suspensiones coloidales.

Los contaminantes causantes de turbiedad en el agua son las partículas en suspensión tales como arcilla, planctón y otros organismos microscópicos. Los tamaños de las partículas varían desde partículas coloidales hasta partículas más grandes.

La arcilla es quizás la causa más común de turbiedad en las aguas.

Se cree que el color orgánico en el agua es de naturaleza coloidal. Algunos autores (Packman, 1964 y Shapiro, 1964), sin embargo, sugieren que se encuentra en solución verdadera.

Black y Christman demostraron que los filtros de membrana comerciales, con poros de 3.5 μm retenían 91% del color original, mientras que los poros de 10 μm retenían sólo el 13%. Esto indica que el tamaño de las partículas de color variaba entre 3.5 y 10 μm , lo que se acerca bastante al límite entre dispersión coloidal y solución verdadera.

La discrepancia de los investigadores puede deberse a que el color se forma por coloides hidrofílicos con propiedades muy distintas a los coloides hidrofóbicos causantes de la turbiedad en el agua.

Los principales constituyentes de color orgánico natural en el agua, de acuerdo con Odens (1919), son las sustancias húmicas.

Las sustancias húmicas están compuestas por moléculas cromáticas de alto peso molecular que muestran características polianiónicas en soluciones neutras ó alcalinas.

El color existente en el agua no se deriva únicamente de la descomposición de productos naturales sino también de hidróxidos metálicos, como el del hierro y, además, de compuestos orgánicos desconocidos presentes en los desechos domésticos e industriales.

4.5 PROPIEDADES ELECTROKINETICAS

Son muy importantes para comprender la estabilidad de los coloides. Al pasar una corriente directa a través de una solución coloidal, las partículas son arrastradas a los electrodos positivos o a los negativos. Esto nos indica que las partículas coloidales tienen carga eléctrica.

Por experiencia se sabe que todos los coloides tienen carga negativa y se trasladan hacia el electrodo positivo.

De las fuerzas de desestabilización las principales son: - Fuerza de Van Der Waals y Doble capa eléctrica.

La principal fuerza de la atracción entre las partículas es la de Van Der Waals, una fuerza débil de origen eléctrico; esta fuerza es siempre atractiva y decrece rápidamente con la distancia y se debe a la interacción de dipolos permanentes o incluidos en las partículas.

Las partículas coloidales tienen carga eléctrica; sin embargo, la dispersión coloidal (las fases sólida y acuosa juntas), - no tienen una carga eléctrica neta, por lo tanto, existe una doble capa eléctrica en cada interfase entre un sólido y el agua. Esta doble capa está constituida por la partícula con carga y un exceso igual de iones con carga contraria (contraiones), que se acumulan en el agua cerca de la superficie de la partícula.

4.6 MEDICION DE CAUDAL

Para el control en los procesos industriales, es necesario conocer la cantidad de material que entra y sale del proceso. - Teniendo en cuenta que siempre es posible que los materiales a transportar sea en forma de fluidos. Es de gran importancia medir la velocidad con que un fluido circula a través de una tubería u otra conducción cualquiera.

Un aparato medidor de gasto de fluidos es un dispositivo - que sirve para determinar la cantidad de fluido que circula por unidad de tiempo, expresado en: $m^3/sec.$, $kg./sec.$ etc.

Cualquiera que sea su tipo de construcción, un medidor de gasto suele estar calibrado desviando la totalidad de la corriente del fluido, en peso o volumen, durante un intervalo conocido de tiempo. Si se trata de un líquido puede llevarse a un depósito tarado o calibrado con indicaciones de volúmenes en función de las alturas de nivel. Si se trata de un gas puede conducirse a un gasómetro, formado por un depósito invertido que flota sobre el agua ó aceite contenidos en otro depósito mayor. En realidad, todos los medidores de gasto se calibran siempre de este modo, y aún los contadores utilizados para la verificación de otros aparatos tienen que contrastarse por este método.

Industrialmente se utilizan muchos tipos de medidores, a continuación se nombran algunos de ellos: medidores de area variable (rotámetro, vertedero); medidores de desplazamiento positivo (disco oscilante, pistón, gas humedo, diafragma); medidores de corriente (taza, propela); etc.

V.- COAGULANTES

Los coagulantes deben usarse previo análisis del agua a tratar; de este modo podremos adecuarlos a nuestras necesidades.

Los coagulantes pueden ser ácidos o alcalinos, los de uso comercial más coman son por ejemplo:

Sulfato de aluminio, sulfato férrico, sulfato ferroso, coperas clorinadas (casi siempre son sulfatos), alumbre de potasio o amonio, aluminio, aluminato de sodio, productos inorgánicos, coagulantes polimericos orgánicos.

Ejemplo de coagulantes ácidos:

Sulfato de aluminio	$Al_2 (SO_4)_3 \cdot 18 H_2O$
Sulfato ferrico	$Fe_2 (SO_4)_3 \cdot 9 H_2O$
Sulfato ferroso	$FeSO_4 \cdot 7 H_2O$
Coperas clorinadas	$FeSO_4 \cdot 7 H_2O (+ 1/2 Cl_2)$
Coperas de potasio	$Al_2 (SO_4)_3 K_2SO_4 \cdot 24 H_2O$
Alumbre de fierro	$K_2SO_4 \cdot Fe_2 (SO_4)_3 \cdot 24 H_2O$
Alumbre de amonio	$Al_2 (SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2 SO_4 \cdot 24H_2O$

Ejemplos de coagulantes alcalinos:

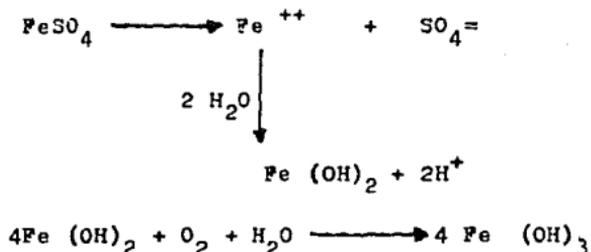
Aluminato de sodio	$NaAlO_2$
--------------------	-----------

5.1 COAGULANTES ACIDOS

Los coagulantes ácidos tienen las siguientes características:

Primero se disocian y después se hidrolizan liberando los iones hidrógeno; por eso se llaman coagulantes ácidos.

Por ejemplo:



Debido a su naturaleza ácida, estas sustancias reaccionan con la alcalinidad natural o añadida del agua para formar hidróxidos y sulfatos respectivos. Se admite generalmente que los floculos los forman los hidróxidos de hierro ó aluminio, pero en realidad son sulfatos básicos de composición compleja.

Para poder utilizar enteramente el coagulante, los iones hidrógeno hay que eliminarlos con hidróxido de sodio, cuidando que el agua no quede muy alcalina (arriba de un pH de 12), porque causaría serios problemas de corrosión en el equipo.

- b).- Malcoyte 603, polielectrolito líquido diseñado para la adsorción de sólidos en aguas de desecho.
- c).- Poliacrilamidas, la acrilamida es un sólido blanco cristalino fácilmente soluble en aguas, alcoholes y acetona, poco soluble en solventes orgánicos no polares.

Las concentraciones, temperaturas, tipo y cantidad de catalizador, determinan la estructura del polímero final.

La capacidad de un polímero para actuar como floculante - depende de su afinidad para enlazarse a la superficie de las - partículas coloidales. Los enlaces pueden ser formados entre - grupos funcionales particulares de polímeros y lugares específicos de la superficie coloidal. Algunos otros parámetros importantes que afectan al rendimiento de un determinado polímero. - son su peso molecular y el grado de ramificación.

La concentración de cationes divalentes (Ca^{+2} , Mg^{+2}) en el agua puede ejercer un gran efecto sobre la capacidad de los polielectrolitos aniónicos para agregar coloides negativos. - Black, Birkner y Morgan propusieron tres caminos mediante los cuales los iones calcio pueden afectar a los sistemas polímero aniónico-arcilla.

Primero: Estos iones divalentes comprimen las capas difusas que rodean a las partículas arcillosas y por tanto reducen las fuerzas repulsivas de estas partículas evitando su agregación.

Segundo: Estos iones reducen las fuerzas repulsivas que existen entre las moléculas poliméricas aniónicas y las partículas de arcilla; y por tanto, aumenta la fijación del polímero a la superficie de las partículas de arcilla.

Tercero: Las moléculas poliméricas adsorbidas tenderán a repeler a otras moléculas poliméricas adsorbidas debido a su carga similar.

Cuando se utilizan polímeros aniónicos o no iónicos, es necesario un tamaño mínimo (peso molecular), para que estas moléculas puedan salvar la barra energética potencial entre dos partículas coloidales negativas.

Este tamaño mínimo depende de factores tales como el número de grupos cargados y grado de ramificación del polímero, la carga de las partículas coloidales, y la fuerza iónica de la solución.

Los polímeros cargados positivamente (catiónicos), pueden funcionar como agentes desestabilizantes por formación de enlaces de puente, neutralización de carga, o ambos. Una consecuencia práctica de la capacidad de los polímeros catiónicos de adsorberse específicamente sobre los coloides negativos y neutralizar la carga primaria, reside en el hecho de que estos materiales no precisan ser de elevado peso molecular para producir una desestabilización efectiva.

Muchos polímeros catiónicos tienen peso molecular menor de un millón.

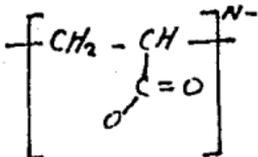
Si una unidad monomérica contiene grupos ionizables ejemplo carboxilo, amino. El polímero se llama polielectrolito. - Según el tipo de grupos ionizables de la unidad monomérica, un polielectrolito puede ser catiónico, aniónico o anfotérico - (contienen en ambos grupos positivo y negativo proteínas), los polímeros que no contienen grupos ionizables se llaman no iónicos.

1.- Polímeros no iónicos

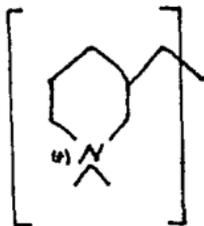


Oxido de polietileno.

2.- Polielectrolitos aniónicos.



3.- Polielectrolitos catiónicos



Polidialildimetilamonio.

5.4. SUSTANCIAS QUE AYUDAN A LA COAGULACION - FLOCULACION

Algunas sustancias se emplean como ayudas para la floculación de los coagulantes ya mencionados, favoreciendo la formación de flóculos más grandes y pesados; ayudan a eliminar color, sólidos suspendidos, materia orgánica. Los materiales que se emplean con este propósito pueden ser clasificados como:

- i). Arcillas.
- ii). Silice activada.
- iii). Polielectrolitos.

1).- Arcillas:

Algunas arcillas son muy empleadas como ayuda de la coagulación en la eliminación de color de aguas altamente coloreadas. Las aguas superficiales de bajo contenido mineral son más fácilmente coagulables cuando tienen turbidez.

Se ha demostrado que algunas arcillas son notablemente efectivas en la eliminación de color y turbidez.

El efecto de estas arcillas se describe comunmente como "acción de peso", esto es, con aguas altas en color pero con muy baja turbidez, el flóculo formado por coagulación coneta principalmente de materia orgánica, siendo por esto denacia - do liviano y no se asienta rapidamente, la adición de arcilla le da "peso", y se asienta rapidamente.

Se ha comprobado que la adición de pequeñas cantidades - de arcilla promueve la formación de flóculos que se asientan más fácilmente cuando se usan junto con coagulantes de aluminio o hierro. Estas arcillas también amplian el ámbito de pH en el cual la coagulación puede efectuarse.

Las arcillas como ayuda a la coagulación antes de emplearlas se deben obtener muestras para efectuar las pruebas necesarias, por lo que la dosificación requerida para un agua - dada debe determinarse en el laboratorio.

ii).- Silice activada:

La Silice activada está considerada como una ayuda muy efectiva de la coagulación, para la eliminación de turbidez, color, materia orgánica y otros materiales suspendidos.

La Silice activada no existe como tal, sino que tiene - que ser preparada en el sitio de uso por la acción de ciertos materiales ácidos sobre el silicato de sodio.

Esta presente en la mayoría de las aguas naturales como especie monomérica sin carga soluble (H_4SiO_4). En su estado soluble reacciona con los iones metálicos usados para la coagulación y que afecta al comportamiento químico de estos iones metálicos.

Por encima de un pH = 9, la solubilidad de la sílice aumenta. Por debajo de un pH = 9, la solubilidad es independiente del pH y es aproximadamente 2×10^{-3} M.

Para preparar una sílice activada útil, la reacción debe detenerse antes de la formación de precipitado, por medio de dilución hasta una concentración de 2×10^{-3} M. Los polímeros aniónicos de silicatos preparados de esta forma se añaden entonces al agua que deba tratarse.

El mecanismo mediante el cual la sílice activada actúa como un coagulante, ha suministrado evidencia experimental para las siguientes conclusiones:

- 1.- En condiciones adecuadas puede actuar como el único coagulante para los coloides cargados positivamente y negativamente.
- 2.- Es posible reestabilizar ambos coloides por sobredosificación con sílice activada.
- 3.- La concentración de sílice activada necesaria para desestabilizar un coloide está directamente relacionada con la concentración coloidal.

iii).- Polielectrolitos:

Este término se ha adjudicado a ciertos compuestos orgánicos de origen natural o sintéticos, que se emplean como ayuda de la coagulación, ya sea en unión de los coagulantes usuales o en ciertas aplicaciones, solos, como coagulantes.

Además estos materiales se clasifican en: catiónicos, aniónicos y no iónicos. Cabe señalar que por ningún motivo pueden emplearse en aguas que puedan posteriormente ser empleadas para beber, sino solamente en aguas de desecho ó industriales.

Como regla general, los polímeros catiónicos son diseñados para trabajar con valores bajos de pH, los aniónicos a valores altos de pH y los no iónicos sólo son influidos debilmente por el pH.

Sin embargo estos polímeros aún fuera del pH óptimo suelen ser efectivos en la floculación debido a la existencia de grupos polares en su estructura.

A diferencia de los coagulantes metálicos, los polímeros no afectan al pH, ni su desempeño es sensible al pH del agua tratada.

En el tratamiento de agua y agua residual, la desestabilización con polímeros aniónicos es más específica que cuando se utilizan sales metálicas. Los polímeros aniónicos pueden ser eficaces y económicos. Estos materiales se han usado con éxito para acondicionar (coagular) los tanques residuales antes de la filtración a vacío; su aplicación directa a la coagulación del agua negra ha resultado menos satisfactoria.

Cuando los polímeros catiónicos se usan para desestabilizar coloides negativos, la desestabilización se lleva a cabo por neutralización de carga, por enlaces de puente o por una combinación de estos dos mecanismos.

Los polímeros catiónicos de bajo peso molecular pueden actuar como coagulantes efectivos para los coloides negativos presentes en el agua y el agua residual, ya que no es necesario sobrepasar la barrera energética potencial cuando ocurre la neutralización de carga.

Los polímeros orgánicos sintéticos, catiónicos, aniónicos o no iónicos, pueden resultar ineficaces para aguas de baja turbidez; es decir, aguas con concentraciones bajas de partículas coloidales. Esto se debe probablemente a una baja velocidad de contactos entre partícula.

6.- PARAMETROS SIGNIFICATIVOS EN EL PROCESO DE COAGULACION Y FLOCULACION.

6.1 Temperatura.

La temperatura es un factor muy importante en la coagulación y formación del floculo, generalmente a temperaturas calientes se tiene una mayor eficiencia de coagulación y floculación, a temperatura menores de 20 °C disminuye la eficiencia por lo que es necesario una mayor dosificación del producto químico para lograr - que el floculo tenga el peso necesario y sedimente.

6.2 pH.

El pH es un factor muy importante en la coagulación; el pH - óptimo variará para cada tipo de agua en particular.

Para la coagulación de aguas con color se requiere de un pH- que este entre 4 y 6, en aguas con turbidez de 6.5 a 8.5 es el - adecuado.

Generalmente, las sustancias que se usan en la coagulación - son compuestos de hierro y aluminio, el pH favorable para los coagulantes de aluminio es de 5.5 a 6.8, en los coagulantes de hie - rro es de 3.5 a 5.5 y de 9.0 a 13.0 también da buenos resultados.

Los compuestos de hierro y aluminio reaccionan con la alcali - nidad natural ó añadida en el agua para formar hidróxidos y sul - tatos.

La mayoría de las partículas coloidales que forman el color y la turbidez tienen cargas eléctricas negativas, mientras que los hidróxidos mencionados tienen carga positiva, de aquí que en la - coagulación se encuentren involucrados fenómenos mecánicos y eléc - tricos.

6.3 Concentración de coloides.

No es posible cuantificar de una manera exacta la concentración de los coloides, debido a que los sólidos suspendidos pueden incluir minerales no disueltos, residuos de sustancias orgánicas, arcilla, arena y microorganismos, entre otros tipos.

6.4 Dosis de reactivo.

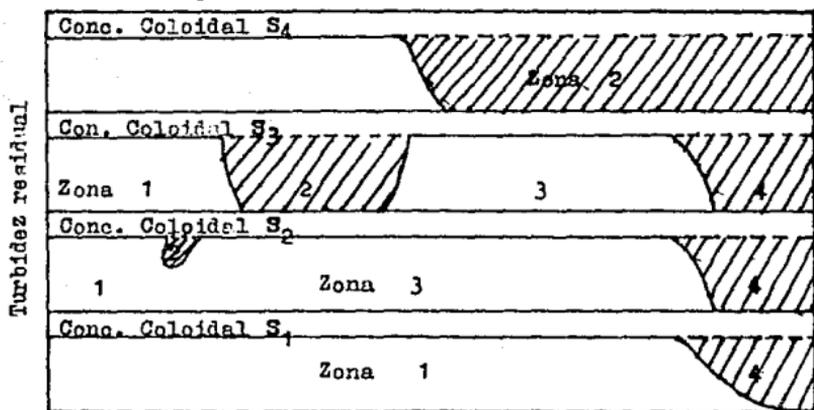
Es importante aproximarse a la dosis requerida del coagulante y/o floculante para proporcionar una buena clarificación, ya que esta es sensible a la dosificación del producto químico, a la energía y a la duración del mezclado. Se emplean dos tipos de prueba, la de jarra y cilindro, para seleccionar el mejor producto químico y así mismo la dosis requerida.

La figura (6.a), presenta las curvas de turbidez residual en función de la dosificación de coagulante a PH # 8.0. Para aguas naturales tratadas con sales de Al (III) ó Fe (III), se presentan cuatro curvas, cada una de ellas corresponde a una concentración distinta de materia coloidal.

Zona 01 correspondió a dosificaciones bajas, se ha añadido insuficiente coagulante para llevar a cabo la desestabilización.

Zona 02 aumento de la dosificación de coagulante produce la desestabilización y permite la agregación rápida.

Zona 03 incremento de dosificación, puede reestabilizar - las dispersiones en algunos niveles de pH.



Dosificación de Coagulante .

Conc. Coloidal S₄

Conc. Coloidal S₃

Conc. Coloidal S₂

Conc. Coloidal S₁

Fig. (6.a)

Zona O4 existe un grado de sobresaturación suficiente - como para producir una precipitación rápida de una gran cantidad de hidróxido de aluminio o férrico dentro de la cual - se sumergen las partículas coloidales.

El conocimiento de las dosificaciones óptima de coagulante, pH y concentración coloidal, combinado con una comprensión de los dos modos de desestabilización que pueden producirse con las sales de Al (III) y Fe (III), puede ser útil y aún necesario en la operación de un proceso de coagulación. Podemos describir cuatro tipos de suspensiones:

1.- Concentración coloidal alta, alcalinidad baja.

Sistema más fácil ya que sólo debemos determinar un parámetro químico.

La dosificación óptima de coagulante. La desestabilización se lleva a cabo por adsorción de los polímeros hidroximetálicos positivamente cargados. Estos se producen en niveles ácidos de pH (pH 4-6 según el coagulante).

2.- Concentración coloidal alta, alcalinidad alta.

En este caso la desestabilización se alcanza de nuevo por adsorción y neutralización de carga para niveles de pH neutros y ácidos.

3.- Concentración coloidal baja, alcalinidad alta.

En este caso la coagulación se lleva a cabo fácilmente por inmersión de las partículas coloidales en un "flóculo de Barrido" con dosificación relativamente altas, de coagulante.

4.- Concentración coloidal baja, alcalinidad baja.

La coagulación en estos sistemas es la más difícil, la coagulación será ineficaz si solamente usamos sales de Al (III) y Fe (III), ya que el pH será rebajado demasiado con el fin de permitir la formación de un flóculo de Barrido y la velocidad de contactos entre partículas será posiblemente demasiado lenta para llevar a cabo una desestabilización por neutralización de carga.

6.5 Selección del tipo de prueba.

Hay dos pruebas: la de Jarra y la de Cilindro.

La prueba de Jarra se va a emplear cuando el contenido de sólidos suspendidos en la corriente que va a clarificarse (influyente), es menor de 5000 (ppm), la clarificación del agua cruda, el asentamiento de sólidos biológicos y la mayor parte de las corrientes primarias de desecho se encuentran en esta categoría. Se emplea la prueba de cilindro en corrientes de lodo pesado donde los sólidos suspendidos excedan los 5000 (ppm), los desechos del tratamiento del carbón y el lodo resultante de una clarificación primaria son ejemplos de lodos pesados.

La prueba de Jarras simula los tipos de mezclado y las condiciones de asentamiento que se encuentran en una planta clarificadora. Una unidad de laboratorio permite que se corran simultáneamente hasta seis pruebas, el probador tiene un motor de velocidad variable que permite controlar la energía de mezclado en las jarras.

En estas pruebas se colocan las jarras, una al lado de la otra; ellas contienen distintos productos químicos, o con diferentes dosis de la misma sustancia.

La prueba de cilindro está diseñada para determinar que tan rápido se asientan los sólidos, se emplea un cilindro graduado de 500 ml. Con tapón, cronómetro / equipo para dosificar las sustancias químicas que se evaluarán. La muestra de lechada se coloca en el cilindro, se añade el producto químico y se invierte cuidadosamente el cilindro, el mezclado es mucho menos intenso que en la prueba de jarra, puesto que los sólidos se encuentran en mayores niveles de concentración. A continuación el cilindro es colocado boca arriba y se observa la interfase entre el agua y el sólido asentado. Se registra el tiempo y el nivel de los sólidos.

De ordinario el objetivo fundamental es obtener una velocidad grande de asentamiento. Al efectuarse las pruebas con distintas dosis de coagulantes y floculantes, comparando las velocidades de asentamiento, pueden seleccionarse los productos químicos más efectivos.

6.6 Tiempos y velocidades de agitación.

Es necesario conocer el tiempo en el cual se ha desestabilizado la mayor parte de los coloides suspendidos, permitiendo su aglomeramiento, así mismo, la velocidad adecuada para evitar que una vez formado el coágulo o floculo no se rompa y solo tenga el peso necesario para que sedimente.

6.7 Tamaño del floculo y velocidad de sedimentación.

Se ha comprobado en la evaluación de una planta de tratamiento de agua que un floculo grande y esponjoso se sedimenta con

dificultad disminuyendo el rendimiento del sedimentador en una forma apreciable, en cambio un floculo pequeño y compacto, sedimenta con mayor facilidad. Puede lograrse un mejor rendimiento empleando polímeros, puesto que permiten incrementar el peso del floculo y por lo tanto se tendrá una mayor velocidad de sedimentación.

7.- MECANISMOS DE COAGULACION - FLOCULACION.

Es importante el uso adecuado de coagulante y floculantes, así como sus mecanismos al aplicarlos a la remoción de contaminantes en una planta de tratamiento, como se mencionó, la carga negativa que contienen las partículas coloidales, ocasionan fuerzas de repulsión que es la causa principal de la estabilidad de los coloides.

7.1 Mecanismos de coagulación.

Para efectuar la desestabilización de las dispersiones coloidales, debe utilizarse un coagulante que neutralice dichas cargas y evite el rechazo entre las partículas.

Lo más viable es utilizar un coagulante que tenga una carga contraria a la de las partículas coloidales, sin embargo, la selección de un coagulante no puede ser en base exclusivamente a esa consideración.

La desestabilización de los coloides se lleva a cabo por diferentes caminos:

- 1.- Compresión de la capa difusiva.
- 2.- Adsorción para producir la neutralización de la carga.
- 3.- Inmersión dentro de un precipitado.

Compresión de la doble capa.

Las interacciones de algunas especies de coagulantes con una partícula coloidal son puramente electrostáticas: los iones de

carga similar a la carga primaria del coluido son repelido y -
los de carga contraria son atraídos. Por experiencia se sabe
que los iones metálicos trivalentes (Al^{3+}), serán más efecti-
vos que los iones divalentes (Ca^{2+}) y estos que los monovalen-
tes (Na^+). La eficacia a la coagulación por estos iones aumen-
ta mucho con la carga; por ejemplo, las concentraciones requi-
ridas de Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} para desestabilizar un coluido car-
gado negativamente se observa que varían aproximadamente en la
proporción $1:10^{-2} : 10^{-3}$. La desestabilización por los contra-
iones se lleva a cabo por compresión de la capa difusiva que -
rodea a las partículas coloidales.

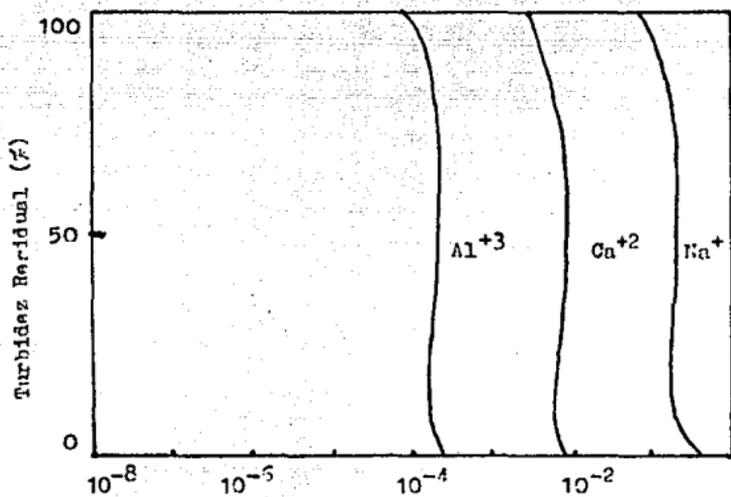
En la figura (7.a), se muestran las curvas esquemáticas -
de la turbidez residual como una función de la dosificación de
coagulante para una agua natural tratada en la que están pre-
sentes Na^+ , Ca^{2+} , Al^{3+} .

Adsorción y neutralización de la carga.

Implica una energía en una interacción electrostática -
simple, entre una partícula coloidal y un ión coagulante. La
capacidad de un coagulante para desestabilizar una suspensión
coloidal es una mezcla de interacciones coagulante - colide,
coagulante - solvente y colide - solvente.

Inmersión de un precipitado.

Quando una sal metálica tal como un óxido metálico o hi-
dróxido, se utilizan como coagulante, en concentraciones sufi-
cientemente altas para ocasionar la precipitación rápida de -



Dosificación de coagulante (moles/l).

Fig. (7. a)

un hidróxido metálico (hidróxido de aluminio, hidróxido férrico), las partículas coloidales pueden quedar inmersas dentro de estos precipitados a medida que estos se forman.

7.2 Mecanismos de floculación.

Los polielectrolitos con grandes moléculas orgánicas solubles en agua, formados por bloques denominados monómeros, - repetidos en una cadena larga, de ordinario incorporan en su estructura sitios para intercambio iónico que da a la molécula una carga iónica. Estos polímeros coagulan a las partículas suspendidas en el agua por mecanismos de neutralización, - además son fuertemente adsorbentes crean partículas que forman floculos extremadamente largos, los cuales pueden ser removidos en una vasija fácilmente sin dificultad por flotación o - sedimentación.

Estos polímeros orgánicos, además de remover las partículas suspendidas, tienden a mejorar el color de el agua residual tratada y se requiere una menor dosis que utilizando - los coagulantes inorgánicos convencionales.

Durante la última década se ha producido un rápido incremento en el uso de polímeros orgánicos sintéticos como agentes desestabilizantes para el tratamiento del agua residual.

Cuando una molécula polimérica se pone en contacto con una partícula coloidal, algunos de estos grupos se adsorben en la superficie de la partícula dejando el resto de la molécula - prolongada hacia la solución, si una segunda partícula se pone en contacto con estos segmentos prolongados se forma un - complejo, partícula - polímero - partícula en el cual el polímero sirve de puente.

Un sistema que ha sido desestabilizado y agregado puede ser restablecido por agitación extendida, debido a la rotura de los enlaces polímero - superficie y posterior repliegue de los segmentos prolongados sobre la superficie de las partículas.

La figura (7.b) muestra los mecanismos de coagulación y floculación.

MECANISMOS DE COAGULACION - FLOCULACION

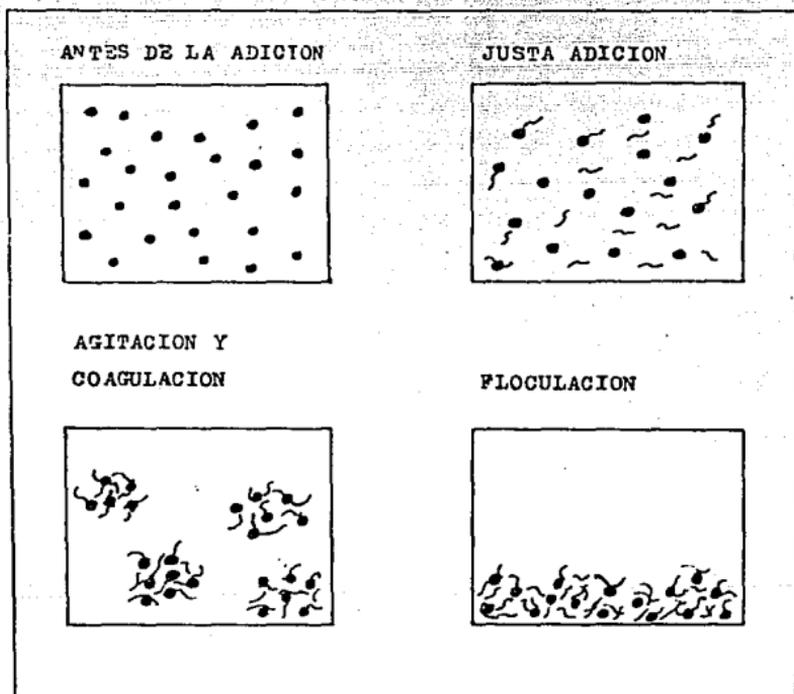


fig. (7.b)

8.- PRUEBAS EXPERIMENTALES

8.1 Analisis del influente al tratamiento

Es necesario un muestreo adecuado de un agua para poder obtener datos de sus características físicas, químicas y biológicas.

Las muestras deben ser representativas de las condiciones que existan en el punto y hora de muestreo.

El procedimiento para la obtención de los valores promedio diarios de contaminantes en las descargas de aguas residuales, se hará mediante el análisis de muestras compuestas que resultan de la mezcla de muestras instantáneas tomadas de la siguiente forma:

Horas por día que opera el proceso generador de la descarga	Intervalo entre toma de muestras instantáneas (horas)
8	3
12	3
24	4

En la tabla (8.a) se muestran los resultados de los análisis fisicoquímicos.

Cabe señalar que a este tipo de agua, se le denomina "agua blanca" y es la que drena sin importar su color de la pasta húmeda en las operaciones de pulpa y papel.

Es importante señalar que el agua rica en fibra (como la de las charolas, de las cajas de succión, de la fosa de la tela

ANALISIS FISICOQUIMICOS DE AGUA CRUDA

DETERMINACION	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
TEMPERATURA (°C)	44	44	45	45
pH	6.2	6.3	5.8	5.8
SOLIDOS SEDIMENTABLES (ml/lit)	26	32	30	37
SOLIDOS TOTALES (ppm)	4825	5100	6230	5650
SOLIDOS VOLATILES (ppm)	20	21	42	34
SOLIDOS SUSPENDIDOS (ppm)	2800	3150	4000	3875
SOLIDOS DISUELTOS (ppm)	650	800	850	850
ACIDEZ (ppm)	350	340	300	330
DBO (ppm)	750	850	820	920
DQO (ppm)	10,000	10,500	11,000	11,600
GRASAS Y ACEITES (ppm)	20	15	24	10

Tabla (8.a)

y de la fosa del cilindro de succión) se usa en la pila y para diluir la pasta antes de que pase a la caja de entrada, el agua blanca sobrante, se envía a un recuperador de fibras, donde el efluente de los recuperadores de fibra se usa como agua de reguladores de consistencia, limpiadores, molinos y el restante es mandado a la planta de tratamiento en donde requiere de un tratamiento adecuado con el fin de ser reciclada a las espumas y regaderas de la tela y fieltros para si mismo disminuir la cantidad de agua fresca.

En los resultados de los análisis físicoquímicos de agua blanca se observa una apreciable cantidad de sólidos que como se sabe en su mayoría es materia orgánica (fibra celulósica), la cual en gran parte se encuentra como sólido suspendido, por lo que el agua se encuentra muy turbia,

Entonces, es necesario aplicar el proceso de coagulación - floculación para la remoción de la mayoría de sólidos principalmente los suspendidos.

El pH de esta agua no varía mucho (5.8 a 6.2), por lo tanto es recomendable emplear el sulfato de aluminio como coagulante - dadas sus condiciones de operación, en conjunto con algún otro polímero que puede ser aniónico, dada la carga de la partícula coloidal.

8.2 Normas y criterios

Cabe señalar que para las pruebas experimentales llevadas a cabo, se empleo agua de una industria de papel que utiliza fibra celulósica reciclada.

Por lo que es necesario mencionar los siguientes conceptos.

ELABORACION DE PAPEL A PARTIR DE FIBRA CELULOSICA REICLADA:

Es el proceso en el cual se emplea más de un 60% de fibra celulósica secundaria.

FIBRA CELULOSICA SECUNDARIA:

Aquella que ha sido empleada para la fabricación de papel.

AGUAS RESIDUALES:

Las que provienen de los procesos de extracción, transformación y servicios complementarios.

CUERPOS DE AGUA:

Son aquellos que se encuentran contenidos en ríos, cuencas, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua que puedan recibir descargas de aguas residuales.

DESCARGA:

Es la acción de verter aguas residuales en algún cuerpo de agua.

Debido a que esta industria genera desechos orgánicos e inorgánicos mezclados con aguas excedentes de los procesos de producción, así como aguas de servicios, las cuales al ser descargadas a los cuerpos de agua, producen efectos adversos modificando las características fisicoquímicas y biológicas naturales de estos cuerpos, disminuyendo en consecuencia su capacidad de autodepuración. La ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente; establecen los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales provenientes de la industria elaboradora de papel a partir de fibra celulósica reciclada.

PARAMETROS	LIMITES MAXIMOS PERMISIBLES	
	Prom. diario	Prom. Instantaneo
pH	6 - 9	6 + 9
Demanda bioquímica de oxígeno (mg./l.)	200	240
Sólidos suspendidos totales (mg./l.)	200	240
Sólidos Sedimentales (mg./l.)	8	9.6
Grasas y aceites (mg./l.)	50	60

Tabla (8.b).

da, en la tabla (8.b) se establecen estos límites.

En los resultados de los análisis físicoquímicos de agua cruda, se observa que los parámetros: demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos totales y sólidos sedimentables.

Están fuera de los límites máximos permisibles establecidos por la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, por lo que este tipo de agua requiere de un tratamiento adecuado, para que asimismo, el efluente cumpla con las características establecidas por (SEDE) en el vertido de aguas residuales. Así como también pueda ser recirculada.

Además, esta agua puede ser empleada en espumas y regaderas de telas y fieltros donde el contenido de sólidos sedimentables no deben ser mayor de 5 (ml./l.) y los sólidos suspendidos menores de 50 (ppm).

8.3 Pruebas de tratabilidad.

En base a los resultados en los análisis físicoquímicos de agua cruda, se puede observar que para realizar las pruebas experimentales, lo indicado es emplear la prueba de jaras, teniendo en cuenta que los sólidos suspendidos son menores de 5000 (ppm).

Es necesario encontrar el coagulante y/o floculante más eficaces para la clarificación de agua, en la dosis óptima, por lo que es necesario el emplear un agitador múltiple de velocidad variable, en el cual se simulan las zonas que se tienen normalmente, en un clarificador que opera por contacto de sólidos.

En las jarras se puede observar primero la zona de coagulación, en segundo término la zona de floculación y por último la zona de sedimentación.

Tiempos y velocidades en la prueba

1 ^a / _n	Etapa	2 minutos	a	100 RPM.
2 ^a / _n	Etapa	5 minutos	a	50 RPM.
3 ^a / _n	Etapa	10 minutos	a	25 RPM.
4 ^a / _n	Etapa	3 minutos	a	0 RPM.

En la última etapa, en reposo, se evalúa el tiempo de sedimentación.

Los factores que se deben de evaluar desde que inicia la prueba son:

- a).- Tiempo de coagulación.
- b).- Tamaño del flóculo.
- c).- Peso del flóculo.
- d).- Tiempo de sedimentación.
- e).- Turbidez aparente.
- f).- pH.
- g).- Volumen de lodo

a).- Tiempo de coagulación:

Es el lapso necesario para que aparezcan los primeros núcleos o microflocs, que a simple vista nos indican que se ha iniciado el atramamiento de partículas suspendidas.

Se evalúa en la primera etapa y se puede considerar como bueno si es menor o igual a un minuto.

b).- Tamaño del flóculo:

Se puede verificar en la segunda etapa y se concluye en la tercera etapa, catalogándose en grande, mediano ó fino.

c).- Peso del flóculo:

En la 3^a y 4^a etapa resulta más notorio, tomando en consideración el tiempo de sedimentación y se define como:

Pesado, ligero ó nadante.

d).- Tiempo de sedimentación:

Se lleva a cabo en la cuarta etapa, siendo el periodo necesario para que sedimenten los sólidos formados durante la prueba.

Es deseable que se deposite el 100% de los flóculos antes de los 3 minutos que dará la etapa, aunque un 85% sedimentado se puede considerar como buenos.

e).- Turbidez aparente:

Se considera como la apariencia que presenta el agua al término de la cuarta etapa y que a simple vista se puede clasificar en:

clara, turbia ó opaca

f).- pH. :

Con el uso del potenciómetro se verificará este parámetro en el agua clarificada, al final de la prueba y chequear en las pruebas que lo ameriten.

g).- Volumen de lodo:

Es el volumen de materia floculada que sedimenta y se verifica en la cuarta etapa.

Preparación de los productos químicos coagulantes y/o floculantes:

Se disuelve un gramo respectivamente de cada producto químico en un litro de agua, por lo que la concentración de cada uno de ellos es:

$$C = \frac{g.}{lt.}$$

Entonces, un mililitro del coagulante y/o floculante preparado equivale a una parte por millón.

Se toman muestras de agua cruda de un litro en las jarras, - colocadas una al lado de la otra; ellas contienen distintos productos químicos, o con diferentes dosis de la misma sustancia. Se procede a realizar las pruebas según lo indicado anteriormente, - comparandose entre ella la velocidad de asentamiento de los floculos, la claridad final o los sólidos suspendidos y el volumen del lodo producido.

A través de una serie de pruebas experimentales (pruebas de jarra), se seleccionan los productos químicos más apropiados para el tratamiento de agua de desecho de una planta de papel.

Utilizando 7.5 (ppm) de sulfato de aluminio se observa una buena desestabilización de los sólidos suspendidos y adicionando posteriormente 2.5 (ppm) de un polímero aniónico 520 de alto peso molecular, se aglomeran en su mayor parte las partículas coaguladas, formando un floculo suficientemente grande y con el peso necesario que le permite sedimentar.

Empleando los dos productos químicos anteriormente mencionados en el las pruebas experimentales, se observa una mayor aglomeración de sólidos suspendidos formando un floculo de mayor tamaño, más visible, tiempo de sedimentación más corto y el agua

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE JARRA

PRODUCTOS QUIMICOS	(ppm)	T.C. (seg)	T.F.	T.S. (seg)	P.F.	T.A	pH	LODO ml/l
SULFATO DE ALUMINIO	15	10	M	20	N	T	5.8	100
POLIM. CATIONICO	3	10	M	25	N	T	6.2	85
POLIM. ANIONICO	3	10	G	16	P	O	6.2	200
POLIM. NO IONICO	3	10	F	32	L	T	6.2	75
ALUMBRE + POLIMERO CATIONICO	7.5 2.5	10	M	16	L	O	6.0	150
ALUMBRE + POLIMERO ANIONICO	7.5 2.5	10	G	10	P	CL	6.0	320
ALUMBRE + POLIMERO NO IONICO	7.5 2.5	10	F	20	L	O	6.0	150

Donde :

T.C. = Tiempo de coagulación. T.F. = Tamaño del floculo.

T.S. = Tiempo de sedimentación. P.F. = Peso del floculo.

T.A. = Turbidez aparente.

G = Grande. M = Mediano. F = Fino. P = Pesado.

L = Ligero. N = Nadante. T = Turbia. O = Opaca.

CL = Clara.

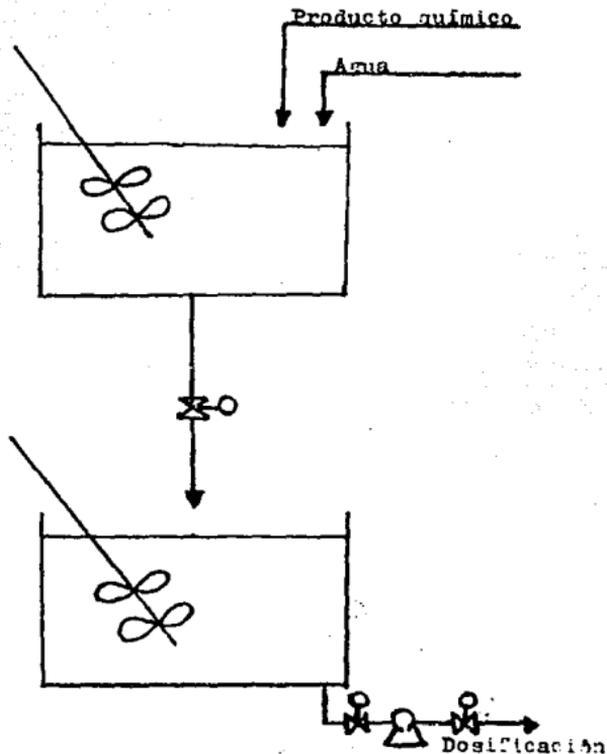
Tabla (8.e)

presenta una turbidez aparente de mayor claridad, en comparación con los demás productos químicos que se emplearon. En la tabla (8.C), se muestran los resultados de las pruebas de jarra.

Debe señalarse que el sulfato de aluminio en solución es muy corrosivo, por lo que para ser preparación se requiere de un recipiente de acero inoxidable con su respectivo agitador, accesorios en la línea de descarga de acero inoxidable o de pvc, esta coagulación se dosificará antes de que se adicione el polímero floculante, como se observó una coagulación de partículas suspendidas precedida de un floculante (polímero) aniónico se logra un mayor atrapamiento de partículas suspendidas.

De igual forma el polímero aniónico es necesario prepararlo a la concentración requerida en un tanque de acero inoxidable, utilizando una bomba de diafragma para su dosificación en el lugar requerido de preferencia como lo indica la teoría 10 metros antes de la entrada al clarificador.

La preparación de los productos químicos se ilustra en la siguiente figura



El sulfato de aluminio es agregado por gravedad al tanque de agua a tratar, posteriormente se adiciona el polímero por medio de una bomba de diafragma en la línea de alimentación al clarificador, el cual tiene un volumen de 380 m^3 , si el flujo de alimentación de agua a tratar es constante de 1000 galones/minuto, entonces, el tiempo de retención en el tanque del clarificador es de 100.5 minutos.

ESTA TESIS NO DEBE SALIR DE LA BIBLIOTECA

Es necesario mencionar que en el proceso de coagulación y floculación en la eliminación de sólidos suspendidos provenientes de agua blanca de una fábrica de papel, el tanque clarificador a utilizar debe tener un tiempo de retención óptimo de 90 minutos.- Entonces, el clarificador empleado es adecuado dadas sus características y así mismo se tenga una buena sedimentación.

En la figura (8.e). Se muestran las partes del clarificador que se emplea, en el cual el floculo se asienta de manera relativamente rápida.

El clarificador esta equipado con dispositivos para la continua separación de la materia asentada, la cual es llevada a un tanque de lodos para su posterior prensado y disposición.

Así mismo en el diagrama (8.f), se ilustra un diagrama de bloques que muestran la secuencia de el agua utilizada en cada una de las partes del proceso.

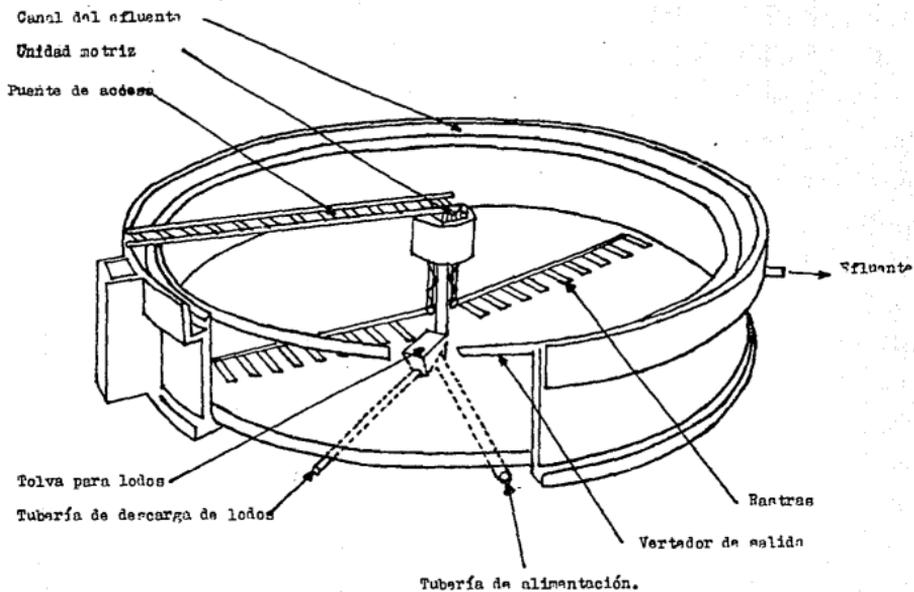
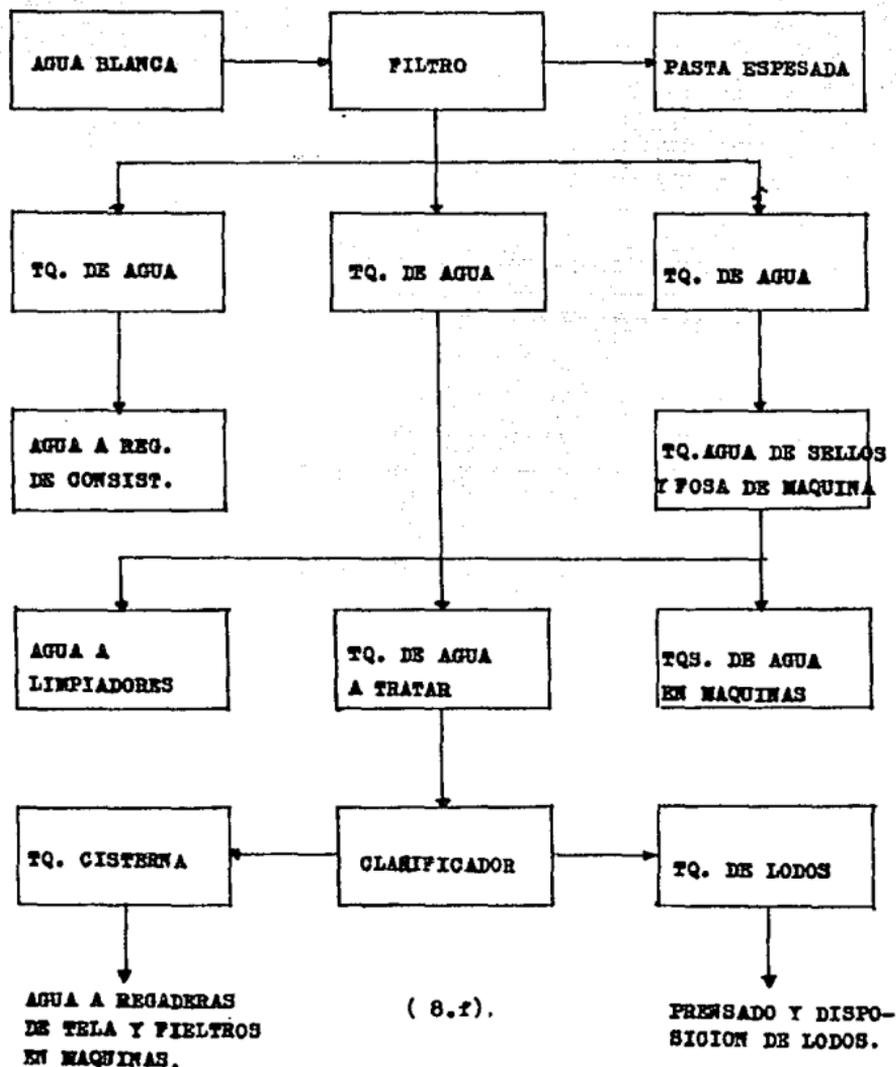


fig. (8.c).

DIAGRAMA DE BLOQUES DE
AGUA DE PROCESO.



8.4 Análisis del efluente de tratamiento.

En la tabla (8.d) se encuentran los resultados de los análisis físicoquímicos realizados a el efluente. El pH no varía, se puede considerar constante (5.8 a 6.0), en la elaboración de papel se utiliza como encolantes el sulfato de aluminio y resina, los cuales son los que se encuentran presentes en mayores proporciones que otros ingredientes químicos, esto permite mantener un pH sin mucha variación, por lo tanto el efluente es favorable para poder ser utilizado como agua de proceso. Es importante señalar que un buen encolado le da una pasta refinada que tenga un pH de 4.5 a 5.5, el agua para molienda y transporte de la pulpa debe tener un pH de 5.5 a 6.5 el cual es regulado con el sulfato de aluminio añadido.

En lo que se refiere a sólidos sedimentables y sólidos suspendidos en el efluente, estos se encuentran en cantidades mínimas, que es muy difícil que tapen las espumas en las rejaderas.

El contenido de grasas y aceites es una cantidad pequeña que no se ha incrementado, por lo regular es constante, un contenido alto ocasionaría que el papel saliera manchado.

Entonces, con lo anteriormente mencionado, el efluente clarificado es adecuado para poder ser utilizado como agua a rejaderas y espumas en telas y fieltros, como ya se indicó un buen tratamiento y control, representa muchos beneficios, especialmente en lo que se refiere a la conservación de la fibra, se puede aplicar la siguiente regla: a menor pérdida de agua, menor pérdida de fibra.

ANALISIS FISICOQUIMICOS DE AGUA TRATADA

DETERMINACION	M ₁	M ₂	M ₃	M ₄
TEMPERATURA	41	41	42	42
pH	6.0	5.9	5.8	5.8
SOLIDOS SEDIMENTABLES (ml./l.)	0.5	1.0	1.5	1.0
SOLIDOS TOTALES (ppm)	650	795	700	820
SOLIDOS VOLATILES (ppm)	8	7	6.6	7.8
SOLIDOS SUSPENDIDOS (ppm)	20	22	22	21
SOLIDOS DISUELTOS (ppm)	600	750	650	800
ACIDEZ (ppm)	300	300	280	300
DBO (ppm)	80	88	80	120
DQO (ppm)	1200	1175	1350	1400
GRASAS Y ACEITES (ppm)	10	10	12	10

Tabla (8.d)

8.5 Consideraciones económicas de los coagulantes y floculantes.

Costos de los productos químicos:

Sulfato de aluminio = \$ 500 / Kg.

Polímero catiónico = \$18,000 / Kg.

Polímero aniónico = \$20,200 / Kg.

Polímero no iónico = \$20,000 / Kg.

Entonces el costo por metro cúbico de agua a tratar con cada uno de los productos químicos es:

Sulfato de aluminio = $(15\text{g./m}^3) (\$ 500/1000\text{g.}) = \$ 7.50/\text{m}^3$

Polímero catiónico = $(3\text{g./m}^3) (\$ 18,000/1000\text{g.}) = \$54.00/\text{m}^3$

Polímero aniónico = $(3\text{g./m}^3) (\$ 20,200/1000\text{g.}) = \$60.60/\text{m}^3$

Polímero no iónico = $(3\text{g./m}^3) (\$ 20,000/1000\text{g.}) = \$60.00/\text{m}^3$

Alumbre + Polím. Catiónico = \$ 48.75/m³

Alumbre + Polím. Aniónico = \$ 54.25/m³

Alumbre + Polím. No iónico = \$ 53.75/m³

Como se puede observar el costo por metro cubico de agua tratada es economico empleando cualquiera de los productos - químicos.

CONCLUSIONS

El agua es empleada en cantidades abundantes en la fabricación de pulpa y papel, de hecho es una materia prima fundamental para este tipo de industrias, es esencial para disolver o mezclar con los diversos ingredientes de: encolado, carga y teñido; además, es el vehículo que lleva a las fibras a través de los depuradores y refinadores hacia la maquina de papel. El agua se utiliza para separar los subproductos y los desechos indeseables. Es empleada también por la industria en la generación de fuerza y para proporcionar vapor.

En la empresa de papel el agua blanca contiene principalmente impurezas orgánicas en suspensión insolubles, asentables o no asentables, si se emplea esta agua sin tratamiento alguno se deben seleccionar las etapas, ya que la cantidad y calidad de agua empleada varía para cada operación. El agua rica en fibra se encuentra en las charolas, cajas de succión, fosa de la tela y fosa de cilindro de succión, por lo que esta agua bien podría ser empleada en molienda para evitar pérdida de fibra. El sobrante de esta agua blanca junto con cualquier agua pobre en fibra, se debe de enviar a un recuperador de fibra, para que así mismo la fibra recuperada se mande a un tanque de pasta espesada y posteriormente se le de la refinación requerida con el fin de obtener la consistencia adecuada para la elaboración de la calidad deseada del papel.

Por otra parte el agua de salida del recuperador de fibra, requiere de un tratamiento adecuado que elimine principalmente la materia orgánica presente en el "agua blanca". Es necesario que el agua tratada tenga una buena turbidez aparente con una cantidad de sólidos suspendidos no mayores de 50 (ppm), y como máximo 5.0 ml/lit., de sólidos sedimentables para que el orificio de la espresas y regaderas a fieltros y telas no se tape.

Con las operaciones de coagulación - floculación y el uso adecuado de los reactivos anteriormente seleccionados en las pruebas experimentales, se obtuvo una calidad de agua aceptable que cumple con los requerimientos deseados, para que así mismo se pueda disminuir el agua de primer uso, por lo que se creó un sistema cerrado de agua, teniendo como resultado grandes ahorros de agua y fibra, así como la conservación de calor.

El agua fresca solo podrá ser empleada cuando se tenga que elevar la producción de papel, en caso de que exista un exceso de agua dentro del sistema, que puede ser debido al paro de una máquina o se disminuya la producción, el agua puede descargarse al drenaje municipal sin problema alguno ya que cumple con las reglamentaciones establecidas por la Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología en lo que se refiere al abatimiento de contaminación de corrientes.

- BIBLIOGRAFIA -

- Tecnología de tratamiento de agua para países en desarrollo.- Capítulo: "Aspectos químicos y básicos de la coagulación del agua".- J. Kirchner Cliff Dr. Asesor regional en química del agua y laboratorios. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. CEPIS.- Lima, Perú, Diciembre de 1977.
- Tratamiento de agua para la industria y otros usos. Nordell - Eskel, Director de Información Técnica The Permutit Co., Capítulo: "Sedimentación, coagulación, asentamiento y filtración". Editorial C.F.C.S.A.- 6a. Impresión, Julio 1979.
- Tratamiento de residuos líquidos, domésticos e industriales.- Capítulo: "Coagulación".- Pérez Mata Francisco Ing.- Nalco de México, S.A.- Universidad Autónoma de Nuevo León.- Oficina Sanitaria Panamericana, C.V., Monterrey, N.L., Abril 1972.
- Manual del agua; su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. - Nalco chemical Company, Frank N. Kemmer, John Mc Callion.- Editorial Mc Graw - Hill.
- Eskel Nordell. Tratamiento de Agua para la Industria y otros usos. - Traducción de la segunda Edición en Inglés.- C.F.C.S.A. México.
- American Society for testing and Materials.- Manual de Aguas para Usos Industriales. - Editorial Limusa 3ra. Edition.
- Riegel. Manual de Riegel de Química Industrial.
- C. Earl Libby. - Ciencia y Tecnología sobre Pulpa y Papel, tomo II Ed. C.F.C.S.A.
- Sheppard T. Powell. Manual de Aguas para usos Industriales. - Ed. Ciencia y Técnica.
- Upflow coagulation for process waters in the pulp and paper industry. Tappi 39a No. 11:28 A, 30 A, 32 A, 34 A, Discussion 34 A, 40 A, 42 A (November, 1989).
- Operaciones de plantas de Tratamiento Primario de Aguas Residuales. - Manual del curso C volumen II. - Dirección General de usos del Agua y Prevención de la Contaminación S.R.H. Subsecretaría de Planeación.