

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN POLÍMERO COAGULANTE CATIONICO
VRS. SULFATO DE ALUMINIO EN LA CLARIFICACIÓN DE AGUA EN UNA
PLANTA DE ELABORACIÓN DE BEBIDAS CARBONATADAS**

CLAUDIA FABIOLA GRIJALVA DE CUIDAD REAL

Asesorado por Ing. Jorge Fernando Sierra López

Guatemala, febrero de 2004

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN POLÍMERO COAGULANTE CATIONICO
VRS. SULFATO DE ALUMINIO EN LA CLARIFICACIÓN DE AGUA EN UNA
PLANTA DE ELABORACIÓN DE BEBIDAS CARBONATADAS
TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Presentado a Junta Directiva de la Facultad de Ingeniería
Por

CLAUDIA FABIOLA GRIJALVA DE CUIDAD REAL

Asesorada por Ing. Jorge Fernando Sierra López

Al conferírsele el título de:

INGENIERA QUÍMICO

Guatemala, febrero de 2004

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ANÁLISIS COMPARATIVO DE UN POLÍMERO COAGULANTE CATIONICO VRS. SULFATO DE ALUMINIO EN LA CLARIFICACIÓN DE AGUA EN UNA PLANTA DE ELABORACIÓN DE BEBIDAS CARBONATADAS

tema que fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química,
con fecha 2 de abril de 2001

CLAUDIA FABIOLA GRIJALVA DE CIUDAD REAL

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO: Ing. Sidney Alexander Samuels Milson
VOCAL I: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL II: Lic. Amaham Sánchez Alvarez
VOCAL III: Ing. Julio David Galicia Celada
VOCAL IV: Br. Kenneth Issur Estrada Ruiz
VOCAL V: Br. Elisa Yazminda Vides Leiva
SECRETARIO: Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO: Ing. Herbert René Miranda Barrios
EXAMINADOR: Ing. Eduardo Calderón
EXAMINADOR: Dr. Rodolfo Francisco Espinosa Smith
EXAMINADOR: Ing. Julio Rivera Palacios
SECRETARIA: Inga. Gilda Marina Castellanos Baiza de Illescas

DEDICATORIA

A Dios, base de mi vida.

A Guatemala, inspiración de superación.

A mis queridos padres, Josefina Sandoval de Grijalva y Ricardo Adolfo Grijalva, a quienes admiro y quiero con todo mi corazón.

A mi esposo, Ivan Ciudad Real, con mucho amor por su apoyo incondicional.

A mi hija, Valerie Ciudad Real, expresión de amor en mi vida.

A mis hermanos, Ana Lucía, Saraí y Richard, a quienes agradezco su confianza y cariño.

A toda mi familia, a mis abuelitas, a mi suegra, a mis tíos, primos, cuñados y a todos los que comparten conmigo mi vida.

A mis amigos de siempre.

A mi familia que ya no está entre nosotros, muy especialmente al Negrito y a mi tío Salva, quienes siempre me apoyaron.

AGRADECIMIENTOS

Al colegio Ave María

Al colegio La Asunción

A la Universidad de San Carlos de Guatemala

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	IV
LISTA DE SÍMBOLOS	VI
GLOSARIO	VIII
RESUMEN	XI
INTRODUCCIÓN	XIII
1. MARCO TEÓRICO	1
1.1. La electrocinética y el comportamiento de los coloides	1
2. OPERACIONES UNITARIAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS	
2.1. Coagulación	3
2.2. Floculación	4
3. TEORÍAS DE LA COAGULACIÓN Y LA FLOCULACIÓN	5
3.1. Teoría de la doble capa o compresión doble	5
3.2. Teoría del balance de repulsión y atracción	8
3.3. Teoría de la formación de puentes	10
3.4. Teoría de atrape del coloide	11
4. FACTORES QUE AFECTAN LA COAGULACIÓN Y LA FLOCULACIÓN	12
4.1. Descripción de los factores que afectan la coagulación y la floculación	12
5. PRODUCTOS QUÍMICOS COAGULANTES Y FLOCULANTES	14
5.1. Sulfato de aluminio	14
5.1.1. Cómo trabaja el sulfato de aluminio	15
5.1.2. Impurezas contenidas en el sulfato de aluminio	16
5.1.3. Medidas de seguridad al utilizar sulfato de aluminio	17

5.2.	Aluminato de sodio	19
5.3.	Sulfato ferroso	20
5.4.	Polímeros	21
5.4.1.	Caracterización de los polímeros como coagulantes	21
5.4.2.	Clasificación de los polímeros	23
5.4.2.1.	Clasificación de los polímeros coagulantes por su carga eléctrica	24
5.4.2.2.	Clasificación de los polímeros por su peso molecular	25
5.4.2.3.	Clasificación de los polímeros por su estructura molecular	26
5.4.2.4.	Clasificación de los polímeros por el tipo de empaque y alimentación	26
5.4.3.	Problemas con la alimentación de los polímeros	28
5.4.4.	Interferencias con la acción de los polímeros	30
5.4.5.	Modelo de conexión entre las partículas coloidales y los polímeros coagulantes	32
5.4.6.	Medidas de seguridad al utilizar un polímero coagulante	35
6.	PRUEBAS DE LABORATORIO UTILIZADAS PARA SELECCIONAR EL MEJOR COAGULANTE	37
6.1.	Pruebas de laboratorio utilizadas para seleccionar el mejor coagulante	37
7.	ESTÁNDARES DE AGUA DE PROCESO EN UNA EMBOTELLADORA DE BEBIDAS CARBONATADAS	39
7.1.	Estándares típicos del agua de proceso utilizados en una embotelladora de bebidas carbonatadas	39
8.	ABLANDAMIENTO DEL AGUA UTILIZANDO CAL	42
8.1.	Ablandamiento del agua por precipitación utilizando cal	42

9. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO	47
10. COMPARACIÓN TEÓRICA DEL SULFATO DE ALUMINIO Y DE LOS POLÍMEROS COAGULANTES CATIONICOS	51
11. RESULTADOS	54
12. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	57
CONCLUSIONES	63
RECOMENDACIONES	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
BIBLIOGRAFÍA	69
APÉNDICE	70
ANEXO	83

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Dos maneras de visualizar la doble capa	7
2	Modelo de conexión	34
3	Clarificador por contacto de lodo	49
4	Alcalinidad f del agua tratada utilizando sulfato de aluminio	71
5	Alcalinidad f del agua tratada utilizando polímero Aquafloc	72
6	Alcalinidad m del agua tratada utilizando sulfato de aluminio	73
7	Alcalinidad m del agua tratada utilizando polímero Aquafloc	74
8	pH del agua tratada utilizando sulfato de aluminio	75
9	pH del agua tratada utilizando polímero Aquafloc	76
10	Dureza total del agua tratada utilizando sulfato de aluminio	77
11	Dureza total del agua tratada utilizando polímero Aquafloc	78
12	Lodos formados utilizando sulfato de aluminio	79
13	Lodos formados utilizando polímero Aquafloc	80
14	Turbidez total del agua tratada utilizando sulfato de aluminio	81
15	Turbidez del agua tratada utilizando polímero Aquafloc	82
16	Componentes del alimentador de polímeros	83

TABLAS

I	Clasificación de los polímeros por su peso molecular	25
II	Impurezas y efectos negativos en las bebidas carbonatadas	41
III	Relaciones de alcalinidad	46
IV	Consumos y costos	54
V	Datos fisicoquímicos al utilizar el polímero Aquafloc	55
VI	Datos fisicoquímicos al utilizar el sulfato de aluminio	56

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
pH	Logaritmo negativo de la concentración de ion hidrógeno en una solución. Se utiliza para definir la acidez o alcalinidad de la solución.
cps	Centipoises, unidad de medida utilizada para expresar viscosidad.
mg/L	Miligramos contenidos en un litro de solución.
ppm	Partes por millón, expresión utilizada para los miligramos por litro en una solución.
NTU	Unidades nefalométricas, escala utilizada para la medición de turbidez.
f	Alcalinidad f.
m	Alcalinidad m.
Kg/m³	Kilogramo por metro cúbico.
ml/L	Mililitros por litro.

GLOSARIO

Ablandamiento	Término utilizado para definir la reducción de los niveles de calcio y magnesio en el tratamiento de aguas.
Aglomeración	Unión de partículas como consecuencia del choque entre ellas, el diámetro medio resultante es, por lo mismo, mayor al que tenían inicialmente.
Alcalinidad	Capacidad para neutralizar un ácido. Usualmente, es un término genérico utilizado para describir el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos presentes en una solución.
Alcalinidad f	<p>Es un término tradicionalmente utilizado para definir la cantidad de ácido medida al titular una muestra hasta un pH de 8.3, que es el punto de viraje de algunos indicadores como, por ejemplo, la fenolftaleína. Determina la concentración de iones hidróxilo.</p> <p>El resultado se presenta como el contenido de CaCO_3 por volumen.</p>

Alcalinidad m	También es llamada alcalinidad total y determina la concentración de hidróxidos, carbonatos y bicarbonados. Las proporciones de cada uno de éstos pueden encontrarse a través de las relaciones entre la alcalinidad f y la m. El resultado se presenta como el contenido de CaCO ₃ por volumen.
Anión	Ion cargado negativamente.
Aquafloc	Nombre comercial de una marca registrada existente en el mercado para un polímero coagulante catiónico.
Catión	Ion cargado positivamente.
Clarificación	Es el principal objetivo de la sedimentación. Consiste en obtener agua más clara, a través de separar los sólidos suspendidos.
Coloide	Partícula muy pequeña, típicamente entre 0.1-0.001 micras de diámetro, suspendida en solución o dispersa en un gas.
pH	El pH es una medida de la concentración del ion hidrógeno, específicamente, el logaritmo negativo de esta concentración. El pH es medido en una escala de 0 a 14. Un pH menor a 7 es ácido y un pH mayor a 7 es alcalino. Un pH de 7 es neutro e indica el equilibrio entre el ion hidrógeno y el ion hidroxilo.

Polielectrolitos	Son grandes moléculas orgánicas solubles en agua, formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en una cadena larga, que incorporan en su estructura sitios para intercambio iónico, lo que dá moléculas con una carga iónica.
Polímero	Compuesto químico formado por unidades primarias más pequeñas llamadas monómeros, que se repiten en la estructura.
Sedimentación	Es la eliminación de sólidos suspendidos en el agua por asentamiento gravitacional.
Turbidez	Material orgánico y/o inorgánico suspendido en el agua que causa una apariencia nublada y que no puede ser precipitado de manera rápida debido al pequeño tamaño de las partículas.

RESUMEN

Con este estudio se pretende determinar cuál sistema de coagulación utilizado en el tratamiento de agua en una planta de elaboración de bebidas carbonatadas es más efectivo. Se comparan ventajas y desventajas, para establecer si es mejor el que consiste en utilizar sulfato de aluminio como coagulante o el que utiliza un polímero coagulante catiónico llamado Aquafloc.

Para lograr lo anterior se evaluó el comportamiento real de dichos productos coagulantes por un período de siete días continuos para cada uno de ellos, en el sistema en mención. Se estudiaron los parámetros fisicoquímicos más importantes que deben mantenerse dentro de las especificaciones del agua que se utiliza para la elaboración de bebidas carbonatadas, estos son: alcalinidad f, alcalinidad m, pH, dureza total, formación de lodos, turbidez y evaluación sensorial. Además, se realizó una evaluación económica de ambas alternativas y se analizó la facilidad de manejo y seguridad para los operadores.

Al analizar los datos obtenidos se determinó que, tanto al utilizar el sulfato de aluminio, como al utilizar el polímero coagulante Aquafloc, se obtuvieron resultados de los parámetros fisicoquímicos y sensoriales dentro de las especificaciones requeridas. Una ventaja la mostró el Aquafloc, y fue en la formación de lodos, ya que produce lodos menos voluminosos, y por lo tanto, de más fácil disposición final.

Económicamente, el sulfato de aluminio tiene un costo más bajo pero al utilizarlo, el agua tratada requiere una mayor cantidad de ácido para su neutralización. El Aquafloc tiene un costo más elevado, pero se requiere menor

consumo de ácido por lo que al final, ambas opciones requieren la misma inversión, tomando en cuenta las diferencias en el consumo de ácido clorhídrico utilizado en la neutralización del agua final.

En cuanto a facilidad de manejo, se determinó que el coagulante Aquafloc es el más conveniente para la utilización por parte de los operadores.

A partir del estudio y análisis realizado, se determinó que es mejor el empleo del polímero Aquafloc en el sistema de tratamiento de agua para la elaboración de bebidas gaseosas; al utilizar cal para su ablandamiento y disminución de alcalinidad m.

Por último, es importante mencionar que una de las razones más importante para no utilizar el sulfato de aluminio es que el alto contenido de aluminio en el agua para consumo humano se ha asociado con algunas enfermedades neurológicas como el síndrome de Alzheimer.

INTRODUCCIÓN

En el proceso de elaboración de bebidas carbonatadas una las materias primas más importantes es el agua que se utiliza para su formulación. Debido a que la mayoría de las bebidas carbonatadas son de naturaleza ácida, el agua que ha de utilizarse no debe tener propiedades químicas que neutralicen dicha acidez, ya que la misma es parte fundamental que proporciona los sabores característicos de las bebidas en mención.

En el caso estudiado, el agua cruda utilizada tiene un elevado grado de dureza y alcalinidad total, por lo que se lleva a cabo un tratamiento de ablandamiento con cal para disminuir dichos parámetros, mediante tanques reactores-clarificadores. La cal provoca reacciones con los compuestos de calcio y magnesio, produce compuestos insolubles, como hidróxido de magnesio y carbonato de calcio que disminuyen la dureza y alcalinidad en el agua.

Al agregar la cal al agua cruda, en el sistema continuo de ablandamiento que es de contacto con lodo, se forma un sistema coloidal con las partículas finamente divididas de la cal en suspensión. Debido a que el sistema es continuo y a que el tiempo de sedimentación natural que requieren las partículas coloidales es extremadamente alto, teóricamente 755 días para una sedimentar una distancia de 1 metro de caída libre (Ref. 1), se utiliza un coagulante que ayuda a que dicho proceso se lleve a cabo más rápidamente y a que el agua se clarifique de manera efectiva.

En el agua turbia con cal, cada partícula se encuentra estabilizada por cargas eléctricas negativas sobre su superficie, haciendo que repela las

partículas vecinas, lo cual impide el choque de las partículas y que se formen así masas mayores, llamadas flóculos, por lo que las partículas no se asientan.

Por medio de la coagulación se desestabilizan los coloides neutralizando las fuerzas que los mantienen separados. Esto se logra al añadir coagulantes químicos, sintéticos o naturales y al aplicar energía de mezclado. Las sustancias químicas de uso común son las sales de aluminio, las sales de hierro y los polímeros coagulantes.

Los coagulantes químicos cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide, y permiten que las partículas coloidales se aglomeren formando flóculos. Estos flóculos, inicialmente pequeños, crean al juntarse aglomerados mayores que son capaces de asentarse. El proceso de desestabilización es la coagulación, lo cual implica neutralización de la carga, la etapa de formación de flóculos es la floculación.

En este estudio se evaluaron las ventajas y desventajas de la utilización del sulfato de aluminio como coagulante, en comparación con la utilización de un polímero coagulante catiónico de alto peso molecular llamado Aquafloc en el tratamiento del agua que se utiliza para la elaboración de bebidas carbonatadas.

Se analizaron individualmente ambas alternativas, los beneficios y efectividad según la meta de alcanzar los parámetros requeridos, costos, condiciones de manejo y menores inconvenientes. De tal manera que, al final, se está en capacidad de concluir y recomendar objetivamente el método más conveniente para el sistema específico que se estudia.

Para comprender mejor el comportamiento de las opciones de coagulantes estudiados, se analizaron los fenómenos involucrados en la coagulación y floculación, los factores que los afectan, las opciones de coagulantes disponibles en el mercado, el proceso de ablandamiento con cal y todo esto enfocado a obtener los mejores resultados que cumplan con las especificaciones fisicoquímicas necesarias en el agua que se utilizará en la formulación de las bebidas carbonatadas.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. La electrocinética y el comportamiento de los coloides

Los coloides son partículas muy pequeñas de bajo peso que se encuentran en suspensión, con tamaños de 0.1 a 0.001 micras de diámetro. Debido a su pequeño peso, no se sedimentan de forma natural.

Las suspensiones coloidales son comúnmente acuosas. El agua, la leche, el vino y la sangre son ejemplos comunes de éstos.

Las propiedades físicas y cualidades de suspensiones están fuertemente afectadas por las propiedades de los coloides. Es posible cambiar las características de los sistemas coloidales al comprender las interacciones de un coloide individual con otro.

Por su tamaño microscópico, las fuerzas de unión en la superficie del coloide y el líquido son las que determinan el comportamiento de las suspensiones. Uno de los mayores efectos de la superficie son los fenómenos electroquinéticos. Cada coloide contiene una carga eléctrica que suele ser de naturaleza negativa. Estas cargas producen fuerzas de repulsión electrostática entre coloides vecinos, lo que ayuda a que se mantengan dispersos y en suspensión. (Ref. 2)

Para sedimentar las suspensiones coloidales se utilizan productos químicos, que por sus características interactúan directamente con los coloides, lo cual afecta su comportamiento electrocinético, y así ayuda a que el proceso de coagulación y floculación se lleven a cabo de forma más rápida y eficiente, ya que en muchas industrias es necesaria la ausencia de ellos para diferentes procesos.

En lo que respecta al agua, en la industria de bebidas carbonatadas es necesario contar con agua clarificada para la producción.

En el sistema en estudio se utilizó la dosificación de cal para el ablandamiento del agua cruda, ya que la misma tiene una alta dureza que no conviene para la elaboración de bebidas carbonatadas, por lo que se forma un sistema de partículas coloidales en suspensión, que luego debe ser tratada con coagulante para clarificarla.

2. OPERACIONES UNITARIAS EN EL TRATAMIENTO DE AGUAS

2.1. Coagulación

En términos de clarificación de agua, los términos coagulación y floculación son usualmente ambiguos y confundidos con facilidad. Por ello, en este estudio se definirán en términos de su función.

La coagulación es el proceso por medio del cual se desestabilizan las cargas eléctricas de los coloides, neutralizando las fuerzas que los mantienen separados. Los coagulantes cancelan las cargas eléctricas sobre la superficie del coloide. Esto se logra al añadir coagulantes químicos y aplicar energía de mezclado. Para complementar la acción del coagulante se requiere de la agitación y, de esta manera, destruir la estabilidad del sistema coloidal, esto hace que las partículas se aglomeren y choquen.

Las especies coloidales que comúnmente se encuentran en el agua cruda pueden incluir arcillas, sílice, hierro y otros metales, además de sólidos orgánicos. Los coloides también pueden producirse en los procesos industriales de precipitación como, por ejemplo, el ablandamiento del agua con cal, que es el método que actualmente se utiliza en el sistema estudiado.

Debido a su pequeño tamaño, los coloides siempre necesitan coagularse para poder flocular, alcanzar un mayor tamaño y una mayor velocidad de asentamiento. (Ref. 3)

2.2. Floculación

La floculación es el proceso por medio del cual se llevan a cabo uniones efectivas entre las partículas o coloides previamente desestabilizadas en su carga eléctrica, forman así, aglomerados de partículas o coloides llamados flóculos.

Puede ser que el flóculo formado por la aglomeración de varios coloides no sea lo bastante grande como para asentarse con la rapidez deseada. Un coagulante, además de ayudar con la desestabilización de las cargas eléctricas, propicia la aglomeración de partículas en una red formando puentes de una superficie a otra y enlazándolas en flóculos mayores.

Tanto la coagulación, como la floculación son estimuladas por un mezclado lento, que junta poco a poco los flóculos formados. Es importante mencionar que un mezclado demasiado intenso rompe los flóculos y raramente se vuelven a formar en su tamaño y fuerza óptimos.

El objetivo de la floculación es formar grandes aglomerados que se sedimenten y puedan ser filtrados fácilmente. (Ref. 4)

3. TEORÍAS DE LA COAGULACIÓN Y LA FLOCULACIÓN

3.1. Teoría de la doble capa o compresión doble

En los procesos de coagulación y floculación pueden estar involucradas una o varias de las siguientes teorías que explican detalladamente el comportamiento de las partículas coloidales.

La teoría de la doble capa o compresión doble se utiliza para visualizar la atmósfera iónica en la proximidad del coloide cargado negativamente y para explicar como actúan las fuerzas eléctricas de repulsión.

Esta teoría se entiende como una secuencia de etapas que ocurren alrededor de un solo coloide negativo aislado.

El coloide tiene un efecto sobre los iones positivos que se encuentran en la solución. Inicialmente, la atracción del coloide negativo hace que algunos iones positivos, llamados contra-ion, formen una rígida capa adyacente alrededor de la superficie del coloide, esta capa de contra-iones es conocida como la capa de Stern.

Otros iones positivos adicionales son todavía atraídos por el coloide negativo, pero éstos son ahora rechazados por la capa de Stern. Este equilibrio dinámico da como resultado la formación de una capa difusa de contra-iones positivos. Los contra-iones tiene una alta concentración cerca de la superficie del coloide altamente negativo, la cual disminuye gradualmente con la distancia,

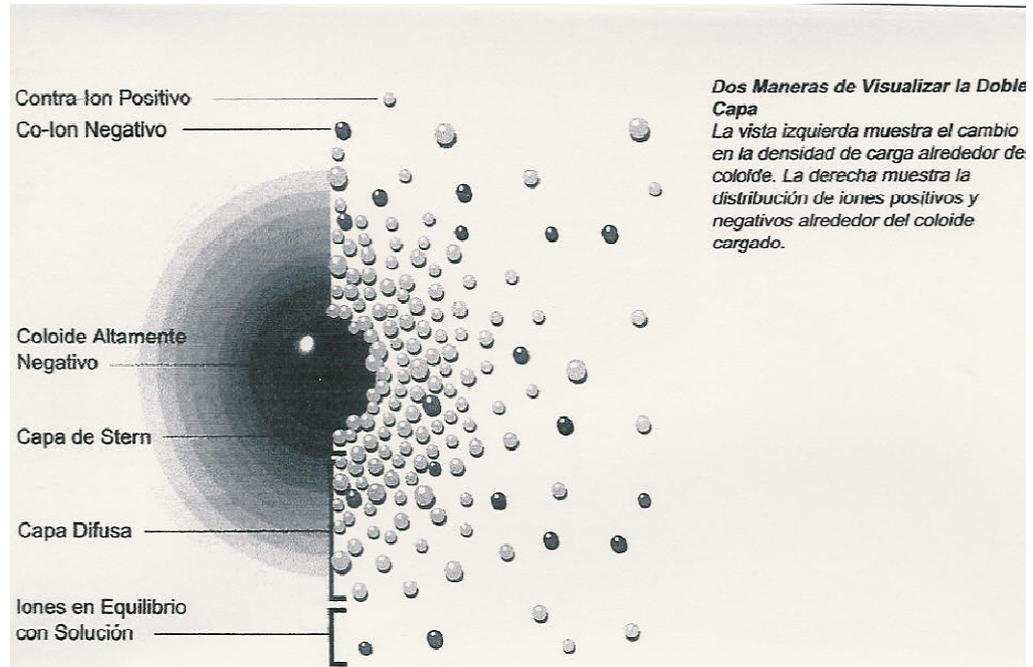
hasta que se logra un equilibrio con la concentración de los contra-iones en el seno de la disolución.

De manera similar, en la capa difusa coexisten algunos iones negativos, llamados co-iones por tener la misma carga que el coloide. Su concentración se incrementa gradualmente al alejarse del coloide, mientras que las fuerzas repulsivas del coloide son compensadas por los iones positivos, hasta alcanzar nuevamente el equilibrio. La capa difusa puede ser visualizada como una atmósfera cargada rodeando al coloide.

Los contra-iones de la capa de Stern y de la capa difusa son los que juntos se llaman la doble capa. El espesor de esta doble capa depende del tipo y concentración de los iones de la solución.

En la figura No.1 se muestra una representación gráfica de la distribución en la doble capa.

Figura 1 Dos maneras de visualizar la doble capa



Fuente: Todo lo que necesita saber de coagulación y floculación. (Ref.5)

El coloide negativo y su atmósfera cargada positivamente producen un potencial eléctrico. Éste tiene un valor máximo en la superficie y disminuye gradualmente con la distancia, aproximándose a cero fuera de la capa difusa.

Un punto de particular interés es el potencial donde se unen la capa difusa y la de Stern. Este potencial es conocido como el potencial zeta, el cual es importante porque puede medirse. Este potencial zeta puede ser una manera efectiva de controlar el comportamiento del coloide, ya que indica cambios en el potencial de la superficie y en las fuerza de repulsión entre los coloides.

La magnitud de la carga de la partícula coloidal determina lo cerca que pueden aproximarse los coloides. El potencial zeta es una medida de esta fuerza. Por ejemplo, para coloides en fuentes de agua natural, el potencial zeta se encuentra entre -14 y -30 milivoltios; cuanto más negativo sea el número, tanto mayor será la carga de la partícula. A medida que disminuye el potencial zeta, las partículas pueden aproximarse cada vez más aumentando la posibilidad de una colisión para formar flóculos.

En un sistema convencional de clarificación, como el que está en estudio, el coagulante proporciona las cargas positivas para reducir la magnitud del potencial zeta. Así, la coagulación se presenta a un potencial zeta que aún es ligeramente negativo, de manera que, por lo general, no es necesario que la carga sea neutralizada por completo. Si en un caso se añade demasiado coagulante, la superficie de la partícula se cargará positivamente con un potencial zeta positivo, y la partícula volverá a dispersarse.

Las medidas del potencial zeta se han empleado con éxito para controlar las dosis de coagulantes en las plantas de tratamiento de agua. (Ref. 6)

3.2. Teoría del balance de repulsión y atracción

Esta teoría se basa en el equilibrio entre las fuerzas opuestas de repulsión electrostática y atracción tipo van der Waals y explica por qué algunos coloides se aglomeran, mientras que otros no lo hacen.

La repulsión electrostática es importante cuando los coloides se aproximan y la capa de partículas de carga opuesta, cercanas a la superficie, comienza a interferir. Se requiere energía para superar esta repulsión y forzar la unión entre las partículas.

La atracción de van der Waals entre los coloides es el resultado de las fuerzas entre las moléculas individuales de cada coloide. El efecto es aditivo, es decir, que una molécula del primer coloide experimenta la atracción de van der Waals de cada molécula del segundo coloide. Esto se repite para cada molécula del primer coloide y la fuerza total corresponde a la suma de todas ellas.

La teoría de balance de repulsión y atracción explica la tendencia de los coloides a aglomerarse o permanecer separados al combinar la atracción de van der Waals y la repulsión electrostática. La curva combinada es la llamada energía neta de interacción.

Según el propósito, es posible alterar el entorno del coloide para aumentar o disminuir la barrera energética. Varios métodos pueden ser utilizados para este fin como, por ejemplo, para el caso de la coagulación, al agregar compuestos que afecten directamente la carga del coloide.

Una vez reducida o eliminada la carga no existirán fuerzas repulsivas, lo que causará la formación, primero, de microfloculos, los cuales crecerán hasta llegar a ser sistemas floculados visibles que pueden ser filtrados fácilmente. (Ref. 7)

3.3. Teoría de la formación de puentes

La formación de flóculos se relaciona con la naturaleza de los coagulantes y floculantes. Tanto los coagulantes inorgánicos, como los polímeros coagulantes orgánicos tienen la capacidad de formar puentes, sin embargo, los de mayor peso molecular son más efectivos.

Después de que las partículas coloidales se han desestabilizado por la adición de coagulantes de carga opuesta, son atraídas mutuamente y empieza la formación de flóculos. Las moléculas de coagulante forman aglomerados mayores de partículas, debido a que forman puentes entre las moléculas individuales de una superficie a otra, formando, cada vez, masas mayores que pueden ser removidas de manera más fácil.

Debido a que la formación de puentes es usualmente utilizada en conjunto con la neutralización de la carga, en ocasiones se agrega una cantidad de coagulante con un rápido mezclado para cumplir la primera función, disminuir o neutralizar la carga de los coloides. A continuación, otra dosis de un floculante forma puentes entre los pequeños flóculos inicialmente formados, formando flóculos de mayor tamaño. (Ref. 8)

3.4. Teoría del atrape del coloide

La teoría del atrape del coloide involucra la adición de cierto tipo de coagulante, usualmente sales de hierro o aluminio, que precipitan como hidróxidos de metal al reaccionar. La cantidad de coagulante utilizada excede las necesidades de neutralización de la carga del coloide, por lo que además de ocurrir la neutralización de la carga, la mayoría de coloides son literalmente atrapados y arrastrados del seno del agua por las masas de hidróxidos que se precipitan.

Generalmente, los hidróxidos son de naturaleza gelatinosa, por lo que al ocurrir la coagulación y luego la floculación, los flóculos formados se precipitan y a su paso arrastran las partículas coloidales, lo cual crea flóculos de mayor tamaño, y ayuda a la precipitación. (Ref. 9)

4. FACTORES QUE AFECTAN LA COAGULACIÓN Y LA FLOCULACIÓN

4.1. Descripción de los factores que afectan la coagulación y la floculación

Los factores que afectan los procesos de coagulación y floculación varían en sus rangos según el coagulante utilizado, las características del agua que se va a tratar y las características del agua final requerida.

a) pH: para cada tipo de coagulante utilizado existe una zona de pH óptimo para la coagulación. Es recomendable controlar el pH de forma que el coagulante sea más efectivo, esto equivale al punto de menor solubilización de los flóculos que se formen. El pH óptimo no depende únicamente del coagulante, también de las características fisicoquímicas del agua que se va a tratar. (Ref. 10)

b) Temperatura: la temperatura del agua afecta la eficiencia del proceso de coagulación y floculación. El agua a temperaturas más bajas tiene menos energía cinética y más viscosidad, lo cual afecta también la velocidad de sedimentación. Por estas razones, a temperaturas más bajas en el agua hay que aumentar la cantidad de agentes químicos coagulantes requeridos para producir una calidad específica. (Ref. 11)

c) Intensidad de la agitación: la agitación es un factor importante en la coagulación y la floculación, ya que dispersa en el agua el coagulante, de tal

forma que pueda neutralizar parcialmente las cargas de los coloides y, además, promueve una mayor frecuencia en las colisiones.

Comúnmente, la agitación se da de manera rápida en una primera etapa para dispersar el coagulante y luego se tiene un período de mezclado lento que estimula la formación de flóculos. Un mezclado demasiado intenso en esta segunda etapa puede llegar a romper los flóculos, los cuales difícilmente vuelven a formarse en su tamaño y fuerza óptimos

d) Tiempo de agitación: cuánto más tiempo dure el período de agitación lenta, más oportunidad existe del crecimiento de los flóculos.

e) Cantidad de sólidos: a menor cantidad de sólidos, menor será la velocidad de floculación a causa de la baja frecuencia de colisión entre partículas. (Ref. 12)

5. PRODUCTOS QUIMICOS COAGULANTES Y FLOCULANTES

5.1. Sulfato de aluminio

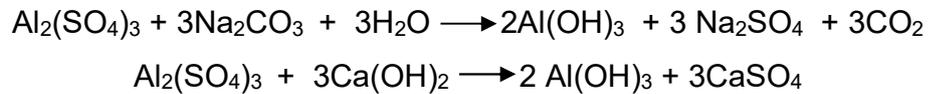
La mayoría de los coagulantes puede desarrollar la función de coagulante y floculante en forma conjunta. Su trabajo primario es la neutralización de la carga, coagulación, pero frecuentemente actúa simultáneamente en más de un coloide, formando puentes entre ellos y ayudando, de esta forma, a flocular.

El sulfato de aluminio es un compuesto químico cuya fórmula es $Al_2(SO_4)_3 \cdot nH_2O$ en donde n corresponde a la cantidad de moléculas de agua asociadas, lo cual le da estabilidad en cuanto a la ganancia o pérdida de agua bajo condiciones adversas de almacenamiento.

El sulfato de aluminio es el coagulante más ampliamente utilizado. Este material en su forma comercial está especificado en la base de un contenido de 17% de Al_2O_3 .

El sulfato de aluminio es aplicable como coagulante en un rango de pH de 5.5 a 8.0 y reacciona al agregarle alcalinidad para producir un floc de hidróxido de aluminio, tal y como se ilustra en las siguientes reacciones:





(Ref. 13)

5.1.1. Cómo trabaja el sulfato de aluminio

Cuando se añade sulfato de aluminio al agua, ocurren una serie de reacciones con el agua misma, o con iones contenidos dentro del agua. La neutralización de la carga ocurre inmediatamente después de la adición del sulfato de aluminio al agua. Los iones de aluminio son formados casi instantáneamente después de la adición al agua, que al reaccionar pasan a formar parte de una serie de hidróxidos cargados. Los hidróxido de aluminio positivamente cargados rápidamente adsorben en su superficie las partículas negativamente cargadas, neutralizándolas.

Se requiere de alcalinidad para que la reacción del sulfato de aluminio proceda con éxito. La alcalinidad es una medida del contenido de bicarbonatos, carbonatos y iones hidróxido. Si el agua no cuenta con alcalinidad suficiente, al consumirse iones hidroxilo del agua, disminuirá el pH. Si este fuera el caso, el pH se puede volver más bajo del que se necesita para que el ion aluminio (Al^{3+}) se convierta en hidróxido de aluminio, así que si la alcalinidad natural del agua es inadecuada para la dosis de sulfato de aluminio, habrá que agregar algún producto con alto contenido de alcalinidad. (Ref. 14)

5.1.2. Impurezas contenidas en el sulfato de aluminio

El sulfato de aluminio es un compuesto químico producto de la reacción entre el ácido sulfúrico y un mineral rico en aluminio, como la bauxita.

Los materiales insolubles que se producen en la digestión con el ácido sulfúrico a elevadas temperaturas, son removidas por sedimentación. La solución líquida sobrenadante es decantada y vendida en forma líquida concentrada, o bien seca en forma cristalizada. El contenido de óxido de aluminio Al_2O_3 en la forma líquida está limitada a 8% para evitar la cristalización. La forma sólida, seca o hidratada usualmente contiene un 17% expresado de Al_2O_3 .

Debido a que el sulfato de aluminio se utiliza en el tratamiento de agua potable, como el caso en estudio, éste no debe tener sustancias orgánicas o inorgánicas en cantidades capaces de producir efectos de deterioro o daño a la salud.

La presencia de impurezas en el agua tratada con químicos está muy influida por el método de manufactura y calidad de los materiales utilizados. Es por esto que debe asegurarse la compra de sulfato de aluminio comercial que cumpla con la recomendación de alguna entidad reconocida; algunas entidades recomiendan que las impurezas del sulfato de aluminio no deben ser mayores al 10%. (Ref. 15)

5.1.3. Medidas de seguridad al utilizar sulfato de aluminio

Siempre que se maneje un producto químico debe solicitarse la hoja de seguridad a la compañía proveedora, de tal forma que se conozca y se tenga disponible dicha información. Deben tomarse en cuenta las medidas protectoras necesarias para evitar accidentes.

En el caso del sulfato de aluminio, los posibles efectos adversos para la salud, si se tiene contacto directo con él son:

Ojos: el contacto con los ojos puede causar irritación severa y posibles quemaduras en los mismos.

Piel: el contacto con la piel puede causar irritación y posibles quemaduras, especialmente, si la piel se encuentra mojada o húmeda.

Ingestión: puede causar irritación severa en el aparato gastrointestinal, con náusea, vómitos y posibles quemaduras.

Inhalación: puede causar irritación del aparato respiratorio con dolor en la garganta, tos, respiración dificultosa y dilatación del edema pulmonar.

Si se tiene un caso de exposición directa deben tomarse las siguientes medidas de primeros auxilios de manera inmediata:

Ojos: lavar los ojos inmediatamente con abundante agua, por lo menos, durante 15 minutos, levantar ocasionalmente la parte superior e inferior de los párpados. Pedir ayuda médica inmediatamente.

Piel: lavar la piel con abundante agua y jabón por al menos 15 minutos, mientras se remueve la ropa y zapatos contaminados. Pedir ayuda médica si la irritación se desarrolla o persiste.

Ingestión: si la víctima está consciente debe dársele 2-4 tazas de agua o leche. Pedir ayuda médica inmediatamente.

Inhalación: remover inmediatamente a la víctima expuesta a un lugar fresco y ventilado. Si no respira, darle respiración artificial. Si la respiración es dificultosa, proporcionarle oxígeno. Pedir ayuda médica inmediatamente.

Debe utilizarse el siguiente equipo de protección personal al manipular sulfato de aluminio:

Ojos: usar anteojos protectores apropiados o gafas de seguridad química.

Piel: utilizar guantes de protección apropiados para prevenir la exposición de la piel.

Vestimenta: utilizar ropa de protección apropiada para prevenir la exposición de la piel.

Respirador: se recomienda utilizar mascarilla.

Se hacen las siguientes recomendaciones de manejo y almacenaje:

Manejo:

- Debe utilizarse un área con ventilación adecuada.
- En la medida de lo posible, evitarse la generación y acumulación de

polvo de sulfato de aluminio en el área.

- Debe lavarse las manos antes de comer.
- No se debe poner en contacto con los ojos, piel o ropa.
- No ingerir.
- No inhalar.

Almacenaje:

- Debe almacenarse en contenedores bien cerrados.
- Debe almacenarse en áreas bien ventiladas, secas y frescas.
- Debe almacenarse retirado del agua. (Ref. 16)

5.2. Aluminato de sodio

El aluminato de sodio $\text{Na}_2\text{Al}_2\text{O}_4$ es en realidad óxido de aluminio estabilizado con soda cáustica. Un aluminato de sodio grado comercial contiene, aproximadamente, 55% de óxido aluminio, 35% de combinado de hidróxido de sodio y 6% de exceso de hidróxido de sodio. Este material es utilizado en aguas donde se desea que la alcalinidad sea coagulada en zonas de alto pH.

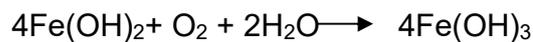
El uso del aluminato de sodio tiene ventaja sobre el sulfato de aluminio en ciertas condiciones porque no necesita la adición de alcali, ya que trabaja con altos rangos de pH.

El aluminato de sodio es utilizado en conjunto con el alumbre, particularmente para la remoción de color. Se emplea frecuentemente como coagulante en el ablandamiento con soda. Además de proveer una baja

turbidez en efluentes suavizados, asiste en una más completa precipitación del magnesio contenido. (Ref. 17)

5.3. Sulfato ferroso

El sulfato ferroso $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ es otro de los coagulantes inorgánicos altamente utilizados. Sin embargo, en algunos casos, la alcalinidad natural de muchas aguas no es suficiente para reaccionar con el sulfato de hierro para formar el deseado floc de hidróxido férrico, por lo que cal u otra fuente de alcali debe añadirse para producir este resultado. La primera reacción con cal produce hidróxido ferroso, el cual es oxidado por el oxígeno disuelto en el agua para formar hidróxido férrico. Esta oxidación ocurre únicamente con altos valores de pH y el sulfato ferroso es un buen coagulante únicamente en la zona alcalina de pH en un rango entre 8.5 y 11.0.



(Ref. 18)

Una ventaja de ambos coagulantes ferroso y férrico, en comparación con los coagulantes de aluminio, es que el flóculo producido no se redissuelve a altas alcalinidades. En todo caso, la necesidad para la coagulación a un alto pH es lo que restringe su uso, excepto en conjunto con procesos de ablandamiento con cal.

5.4. Polímeros

5.4.1. Caracterización de los polímeros como coagulantes

El desarrollo de diversos polímeros orgánicos, como coagulantes, denominados polielectrolitos, en la década de los sesenta contribuyó, espectacularmente, a la tecnología del tratamiento de aguas.

Los polielectrolitos son polímeros, es decir, grandes moléculas orgánicas formadas por bloques denominados monómeros, repetidos en una cadena larga. De ordinario, incorporan a su estructura sitios para intercambio iónico que dan a la molécula una carga iónica. Aquellas que tienen una carga positiva son catiónicas y las que tienen una carga negativa son aniónicas. Estas moléculas reaccionan con el material coloidal en el agua neutralizando la carga y/o enlazando partículas individuales para formar un precipitado visible e insoluble llamado flóculo.

El desempeño de los polímeros coagulantes puede modificarse para ajustarlos a la naturaleza de la materia coloidal que debe extraerse del agua. Estas modificaciones incluyen variaciones, tanto en el peso molecular como en la capacidad de intercambio iónico.

La mayor parte de los polímeros coagulantes o polielectrolitos son materiales orgánicos sintéticos. Éstos son procesados químicamente para mejorar su desempeño y pueden obtenerse fácilmente en el mercado.

Los polímeros orgánicos superan muchos de los problemas inherentes al uso del sulfato de aluminio o de las sales de hierro. En función de la selección de los monómeros y de los métodos de procesamiento pueden elaborarse gran diversidad de polímeros con configuraciones y pesos moleculares diferentes, lo que permite diseñar un polímero que responda a un problema específico de coagulación o de floculación, aunque rara vez esto sea práctico por razones económicas.

Una dosificación apropiada del polielectrolito puede mejorar mucho la calidad del agua, además de que reduce significativamente el volumen de lodos generados y, por lo tanto, los costos en operación.

Los polielectrolitos pueden utilizarse sustituyendo a los coagulantes inorgánicos tradicionales o, en otros casos, complementándolos. (Ref. 19)

5.4.2. Clasificación de los polímeros

Los polímeros se encuentran disponibles en variedad de formas y concentraciones diferentes. Es importante mencionar las distintas características de cada uno para poder evaluar el más adecuado para cada proceso.

Las siguientes características son usualmente utilizadas para su clasificación:

- Por carga (aniónico, catiónico, no iónico)
- Por peso molecular
- Por la estructura molecular

Es importante mencionar que en la misma familia de un tipo de polímeros puede haber una gran diferencia en peso molecular o densidad. Para cada aplicación específica un miembro de una familia puede tener la combinación adecuada, en comparación con otros. (Ref. 20)

5.4.2.1. Clasificación de los polímeros coagulantes por su carga eléctrica

Los polímeros son clasificados como no-iónicos, aniónicos o catiónicos, según sea la carga del polímero en solución.

a) Polielectrolitos no-iónicos

Son polímeros con muy baja densidad. Un típico polielectrolito no-iónico es la poliacrilamida. Estos polielectrolitos son utilizados como floculantes sólidos para formar puentes.

b) Polielectrolitos aniónicos

Los polielectrolitos aniónicos son polímeros cargados negativamente y pueden ser de una variedad de densidades. Pueden ser de muy baja carga o muy altamente negativos. Las cargas intermedias son las que ordinariamente se utilizan para formar puentes, ayudando a la floculación. Un ejemplo es la acrilamida base iónica con un alto peso molecular, la cual es muy efectiva.

c) Polielectrolitos catiónicos

Los polielectrolitos catiónicos son polímeros cargados positivamente y se encuentran comercialmente en un amplio rango de familias, densidades y pesos moleculares. La variedad disponible ofrece una gran flexibilidad de resolver

problemas específicos de coagulación y floculación, sin embargo, esto hace la selección del polímero adecuado un poco más complicada.

Los polielectrolitos catiónicos de alto peso molecular tienen una doble función: neutralizan la carga y forman puentes entre coloides.

5.4.2.2. Clasificación de los polímeros por su peso molecular

El tamaño de un polímero determina su éxito en su uso para la formación de puentes entre coloides. El tamaño se mide como peso molecular.

La distribución de los pesos moleculares de los polímeros puede variar grandemente.

Tabla I Clasificación de los polímeros de acuerdo con su peso molecular

Peso molecular	Descripción general
10,000,000 o más	Muy alto peso molecular
1,000,000 a 10,000,000	Alto peso molecular
200,000 a 1,000,000	Mediano peso molecular
100,000 a 200,000	Bajo peso molecular
50,000 a 100,000	Muy bajo peso molecular
Menos de 50,000	Muy, muy bajo peso molecular

Fuente: Todo lo que necesita saber de coagulación y floculación. (Ref.21)

5.4.2.3. Clasificación de los polímeros por su estructura molecular

Dos polielectrolitos similares con la misma composición de monómeros, peso molecular y carga, pueden ser diferentes según la forma en que los monómeros están unidos.

De igual forma, los resultados en una prueba para un tratamiento específico en el que se prueben dos polielectrolitos similares, serán diferentes, ya que tienen diferentes características por su estructura. (Ref. 22)

5.4.2.4. Clasificación de los polímeros por el tipo de empaque y alimentación

Los polielectrolitos pueden encontrarse comercialmente en forma de polvo, solución o emulsión. Cada tipo tiene sus ventajas y desventajas, incluyendo la alimentación al sistema de tratamiento. Para decidir qué sistema utilizar debe hacerse una comparación entre los ahorros y la facilidad de uso.

a) Polímeros secos

En forma de polvo, hojuelas o pelotitas. Se consideran como 100 % activos al hacer los cálculos para el diseño del proceso. La tendencia a absorber humedad del aire y a pegarse al sistema de alimentación y contenedores es su mayor desventaja.

Los polímeros secos son difíciles de humedecer y su disolución debe ser lenta. Es posible que se requiera de 15 minutos o una hora para este proceso. Su tiempo de vida es de varios años.

b) Polímeros en solución

Esta es la forma en la que se utiliza el polímero estudiado. Usualmente, son preferidos sobre los polímeros secos por su conveniencia. Una rápida mezcla es casi siempre suficiente para diluir los polímeros líquidos para la alimentación a un sistema. Los más conocidos son las poliaminas y los polidamac, son empleados principalmente para la coagulación, sobre todo, en plantas de tratamiento de agua. Su apariencia es de un líquido claro. Su viscosidad varía entre 2,000-10,000cps (similar a la miel). Se supone un contenido promedio de 10% de ingrediente activo al hacer los cálculos para el diseño del proceso. La duración típica de este tipo de polímeros es de 4 a 6 meses.

c) Polímeros de emulsión

Un producto polímero líquido, a base de aceite, de apariencia lechosa opaca. Son los de más reciente desarrollo. Es una forma conveniente de comprar polímeros de muy alto peso molecular en forma líquida. La dilución con agua bajo agitación libera las partículas de la emulsión alcanzando a disolverse. Algunas veces se requiere activadores para su preparación. La viscosidad de este tipo de polímeros varía entre 100-2,000cps (similar al aceite de motor). Se supone un contenido promedio de 40% activo al hacer los cálculos para el diseño del proceso. La duración típica de este tipo de polímeros es de 4 a 6 meses.

d) Polímeros Mannich

Un producto líquido a base de formaldehído de apariencia clara-lechosa. La viscosidad varía entre 10,000 a 50,000 cps. Se supone un contenido promedio de 5% de ingrediente activo al hacer los cálculos para el diseño del proceso. La duración típica de estos polímeros es de varias semanas. (Ref. 23)

5.4.3. Problemas con la alimentación de los polímeros

Debido a los altos pesos moleculares, los polímeros son muy efectivos en el tratamiento de aguas, sin embargo, pueden ocurrir dificultades para mezclarlo y alimentarlo al sistema de tratamiento que se encuentra en proceso.

Otros químicos coagulantes y floculantes que se utilizan en el tratamiento de agua, como el sulfato de aluminio y el cloruro de hierro son fácilmente diluidos y aplicados directamente al proceso. Sin embargo, para hacer más efectivos los polímeros, éstos deben ser previamente activados, es decir, hidratados y extendidos antes en una dilución, para luego ser introducidos al sistema.

Cuando los polímeros hacen contacto inicial con el agua, la superficie externa de las partículas que los componen se vuelven muy pegajosas. Si las partículas no han sido apropiadamente dispersadas antes de y durante la fase del humedecimiento inicial, se formarán aglomeraciones que se conocen como ojos de pescado. Estas aglomeraciones hacen más difícil y consumen tiempo antes de que el agua penetre exitosamente e hidrate y active el polímero enrollado.

Bombear el polímero concentrado al tanque de agua y utilizar un mezclador de alta velocidad, dispersa el polímero apropiadamente y previene la formación de aglomerados o grumos. Una vez activados, de todas formas, los polímeros son muy frágiles. En su forma concentrada, los polímeros son como resortes enrollados, pero cuando las moléculas están desenrolladas y extendidas, las moléculas del polímero se convierten en muy frágiles y son susceptibles de fracturarse por un mezclado muy rápido. El mezclado de alta velocidad utilizado para mantener separadas las partículas del pegajoso polímero separadas, pueden fracturar el polímero activado y, por lo tanto, hacerlo rendir menos en la formación de flóculos que sedimenten con facilidad.

Para compensar la efectividad disminuida, los operadores de planta frecuentemente alimentan más polímero del necesario, lo cual incrementa los costos.

Una opción para evitar la fractura de las moléculas de los polímeros es utilizar un mezclado de baja velocidad. Desafortunadamente, esto requiere tanques excesivamente grandes para permitir la lenta disolución de los aglomerados que se forman inevitablemente. Además, sería necesario que el polímero en solución estuviera preparado con horas de anticipación, lo cual aumentaría los costos y la disponibilidad de equipo.

Una mejor opción es un mezclador en línea y alimentador de polímero líquido. Un sistema ideal de alimentación del polímero debe incluir un medio para introducir el polímero al agua, que no forme aglomeraciones y, además, incorporar en el diseño del sistema dos etapas de mezclado. La primera etapa debe producir alta energía para dispersar y humedecer las moléculas del polímero. La segunda etapa de baja energía de mezclado se encargará de que el mezclado de agua y polímero sea completo sin dañar las frágiles moléculas del polímero. (Ref. 24)

5.4.4. Interferencias con la acción de los polímeros

Algunos polímeros catiónicos pueden reaccionar con los iones negativos en solución, formando compuestos químicos que desvían su objetivo. Mayores dosis son requeridas entonces, para tener el mismo efecto de neutralización y formación de puentes. Esto es más apreciable en el tratamiento de aguas residuales.

Ejemplos de sustancias que interfieren con los polímeros catiónicos incluyen sulfuros, fenoles y cloruros, los cuales pueden reducir la efectividad del polímero.

Aunque los polímeros son poco sensibles al pH de la solución, éste debe ser considerado en las especificaciones, ya que algunas familias particulares funcionan, especialmente bien, en ciertos rangos de pH.

En otro aspecto, se recomienda que previo a la adición de los polímeros al agua, éstos se diluyan en agua destilada o desmineralizada, ya que normalmente se venden muy concentradas, así la dilución hará que se disperse más fácil y se distribuya más uniformemente. Utilizando una alimentación muy alta en concentración, puede significar el empleo de una mayor dosis de polímero requerido.

Con frecuencia, la mayor concentración en la alimentación del polímero, se recomienda que sea entre 0.01 y 0.05%, sin embargo, debe revisarse con el fabricante para las recomendaciones específicas del polímero que se está utilizando.

Las soluciones concentradas de polímero usualmente las venden en concentraciones entre 0.1 y 0.5%, lo cual es conveniente por el tiempo de vida, el almacenaje y la viscosidad. Al diluir esta solución concentrada en relación 1:10 con agua, se bajará la concentración a la recomendada para el nivel de alimentación. El polímero y el agua de dilución deberá mezclarse en línea con un mezclador estático o si se prepara de manera previa, ésta deberá hacerse en un período no mayor de 48 horas, para prevenir la pérdida de su efectividad. (Ref. 25)

5.4.5. Modelo de conexión entre las partículas coloidales y los polímeros coagulantes

El modelo de conexión sugiere algunas de las reacciones que ocurren entre las partículas coloidales y los polímeros coagulantes.

En su forma más simple, el modelo de conexión química propone que la molécula de un polímero se puede unir a la superficie de una partícula coloidal en uno o más puntos de adsorción, mientras que el resto de la molécula se extiende por la solución (Reacción 1). Estos segmentos extendidos pueden interactuar con puntos vacantes de adsorción de otra partícula coloidal, formando un puente químico entre las partículas (Reacción 2A).

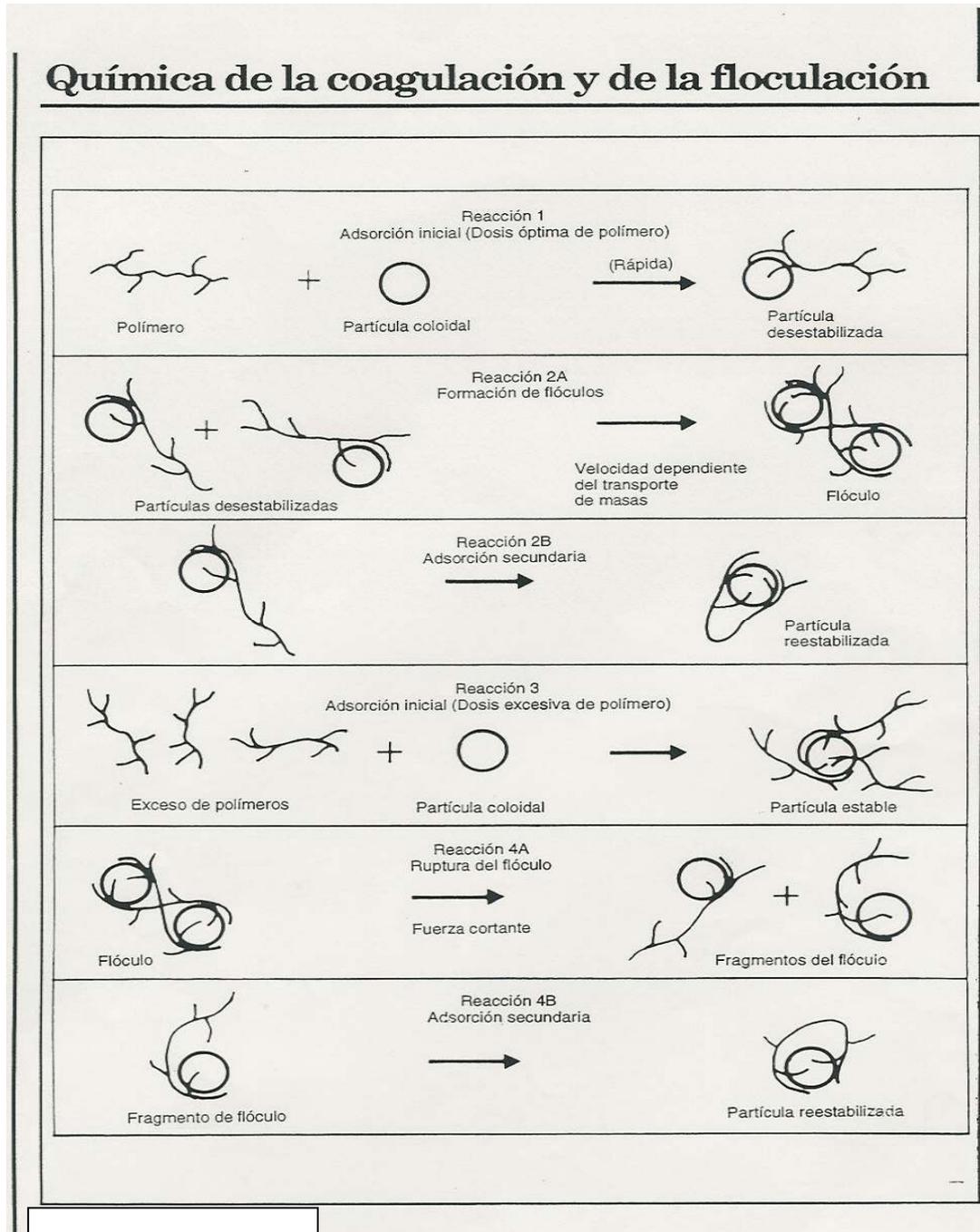
Los segmentos extendidos que no encuentran un punto adecuado de adsorción en otra partícula, pueden adsorberse eventualmente en otros puntos de la superficie original (Reacción 2B). La adsorción de segmentos del polímero sobre la superficie de una partícula puede ocurrir debido a varias interacciones diferentes, físicas y químicas, según las características del polímero y de la superficie. Cuando el polímero y la superficie tienen cargas opuestas, frecuentemente se considera la atracción electrostática como base de la interacción. No obstante, es importante reconocer que en muchos casos otras fuerzas químicas pueden superar las fuerzas electrostáticas.

Probablemente las interacciones incluyen algunas o todas las teorías mencionadas anteriormente: intercambio iónico, doble capa o compresión, balance de repulsión y atracción, formación de puentes, atrape del coloide, fuerzas de van der Waals.

Algunos aspectos importantes que se deben tomar en cuenta en el modelo de conexión son los siguientes:

- La dosis de polímero que saturan las superficies disponibles de la fase dispersa, producen un coloide reestabilizado (Reacción 2B). Puesto que no hay puntos disponibles para la formación de puentes del polímero, esta reestabilización puede ir acompañada por una inversión de la carga.
- En ciertas condiciones, una suspensión desestabilizada se puede estabilizar de nuevo con la agitación prolongada, debido a la ruptura de los enlaces entre el polímero y las superficies y a la “envoltura” de la partícula primaria. (Reacción 4A y 4B). (Ref. 26)

Figura 2 Modelo de conexión



Fuente: Nalco manual del agua (Ref. 27)

5.4.6. Medidas de seguridad al utilizar un polímero coagulante

La hoja de seguridad del Aquafloc, especifica los siguientes riesgos a la salud al tener exposición directa con el polímero:

Inhalación: si se inhala vapor se presentará irritación en todo el tracto respiratorio.

Ingestión: puede causar irritación en todo el tracto gastrointestinal.

Piel: el contacto directo con la piel causa irritación, especialmente después de un tiempo prolongado o en repetidas ocasiones.

Ojos: el contacto directo con los ojos causa irritación, especialmente después de un tiempo prolongado o en repetidas ocasiones.

Si se tiene un caso de exposición directa deben tomarse las siguientes medidas de primeros auxilios de manera inmediata:

Ojos y cara: enjuáguese inmediatamente con abundante agua por un período mínimo de 15 minutos. Si la molestia persiste consulte al médico.

Piel: enjuáguese abundantemente con agua y jabón por un período de al menos 15 minutos. Si la molestia persiste consulte al médico.

Ingestión: no provoque el vómito. Consulte inmediatamente al médico.

Debe utilizarse el siguiente equipo de protección personal al manipular el polímero coagulante catiónico Aquafloc:

Manos, brazos y cuerpo: utilice guantes de hule para prevenir la exposición de la piel. Debe utilizar su vestimenta completa de trabajo. Utilice gabacha protectora de hule si en el manejo se esparce líquido.

Sistema respiratorio: utilice mascarilla protectora si el ambiente se encuentra saturado de vapor.

Debe tenerse un lavador de ojos y ducha de emergencia cerca en el área en donde se maneja el polímero.

Se hacen las siguientes recomendaciones de manejo y almacenaje:

- Debe utilizarse un área ventilada
- Evite el contacto con la piel, ojo o ropa. No inhale los vapores. Realice su higiene personal y limpieza de las áreas de manera normal.
- Almacénese a temperatura superior a los 0°C e inferior a los 40°C.
(Ref. 28)

6. PRUEBAS DE LABORATORIO PARA SELECCIONAR EL MEJOR COAGULANTE

6.1. Pruebas de laboratorio utilizadas para seleccionar el mejor coagulante

Comúnmente, se emplean dos pruebas de laboratorio para seleccionar el mejor producto químico y aproximarse a la dosis requerida para la clarificación: 1) La prueba de la jarra y 2) La prueba del cilindro. Se emplea la prueba de la jarra cuando el contenido de sólidos suspendidos en el agua que debe clarificarse es menor que 5000 mg/L aproximadamente.

Se emplea la prueba del cilindro en aguas con lodo pesado en donde los sólidos suspendidos exceden los 5000 mg/L..

La prueba de la jarra simula los dos tipos de mezclado y las condiciones de asentamiento que se encuentran en la planta clarificadora. La unidad de laboratorio para efectuar esas pruebas permite que se corran simultáneamente hasta seis pruebas. El probador tiene un motor de velocidad variable que permite controlar la energía del mezclado en las jarras.

Los resultados de la clarificación son sensibles a la dosificación del producto químico coagulante, a la energía y a la duración del mezclado. Se añade el coagulante con mayor agitación para dispersarlo en el agua y promover una mayor frecuencia en las colisiones. Este período es de corta duración. Luego, sigue un

período de mezclado lento, en donde se forman flóculos hasta que son tan grandes que el esfuerzo cortante supera finalmente a las fuerzas de enlace, desintegrando el flóculo. Después de un mezclado lento durante un tiempo óptimo, el cual se encuentra después de repetidas pruebas, normalmente entre 5 y 20 minutos, se dejan asentar las jarras entre 5 a 10 minutos.

Se efectúan pruebas en jarras, colocadas una al lado de la otra, ellas contienen distintos productos químicos que se quieren evaluar, o con diferentes dosificaciones del mismo producto. Se compara entre ellas:

- La velocidad de sedimentación de los flóculos.
- La turbidez o claridad final: aún cuando ésta puede juzgarse a simple vista, la medida estándar más precisa se lleva a cabo utilizando un turbidímetro.
- Sólidos suspendidos
- Volumen del lodo producido cuando se puede medir.
- Tamaño de los flóculos formados: de forma visual el tamaño y el crecimiento de los flóculos durante las fases de agitación.
- Según la aplicación, se evalúa pH, alcalinidad, etc. (Ref. 29)

7. ESTÁNDARES DE AGUA DE PROCESO EN UNA EMBOTELLADORA DE BEBIDAS CARBONATADAS

7.1. Estándares típicos de agua de proceso utilizado en una embotelladora de bebidas carbonatadas

Al especificar las normas para el agua utilizada en la elaboración de bebidas carbonatadas, es importante mencionar que ésta no debe tener impurezas de ninguna clase que interfieran con el sabor, el color, la apariencia física y la carbonatación del producto.

Tales son:

1. El suministro de agua cruda debe ser de origen de incuestionable sanidad. Aprobado por alguna entidad competente.
2. El total de sólidos disueltos no debe exceder de 500 ppm. Además, se requiere que no tenga hierro ni azufre.
3. La alcalinidad total del agua no debe exceder 50 ppm . El calcio, el magnesio y las sales de éstos, son inconvenientes en el agua para la elaboración de las bebidas carbonatadas, porque imparten a éstas una naturaleza alcalina que neutraliza los ácidos utilizados para dar el sabor característico a las bebidas carbonatadas.

4. El agua debe estar libre de sabor, olor y materias orgánicas, además de cualquier contaminante derivado de desperdicios industriales.
5. El agua debe encontrarse libre de turbidez, sedimentos y materia suspendida.
6. El agua debe ser libre de mohos y levaduras. (Ref. 30)

En el siguiente cuadro se resumen las impurezas en el agua y los efectos que causan en las bebidas carbonatadas:

Tabla II Impurezas y efectos negativos en las bebidas carbonatadas

Naturaleza de las impurezas	Tolerancia máxima	Efecto negativo en la bebida carbonatada
Turbidez	5 NTU	Sabor desagradable y decoloración
Sabor y olor	Ninguno	Sabor y olor censurable
Levaduras	Ninguno	Sabor desagradable, sedimento y deterioro
Mohos	Ninguno	Sabor desagradable, sedimento y deterioro
Hierro o manganeso	0.1 ppm	Manchas, decoloración, sabor desagradable
Alcalinidad total	50 ppm	Neutraliza ácido en las bebidas, cambia el sabor
Sólidos totales	500 ppm	Cloruros- sabor salado Sulfatos- sabor salobre

Fuente: Manual práctico de bebidas para la industria de refrescos (Ref. 31)

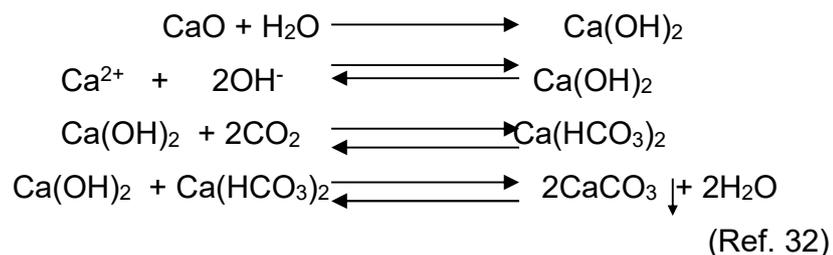
8. ABLANDAMIENTO DEL AGUA UTILIZANDO CAL

8.1. Ablandamiento del agua por precipitación utilizando cal

El propósito del ablandamiento de agua utilizando cal es reducir la dureza, además de tener una reducción de la alcalinidad total o **m**, debido a la reducción de carbonatos. Para el caso de un sistema de tratamiento para agua que será utilizada en la elaboración de bebidas carbonatadas, este proceso es especialmente importante ya que las sales de calcio, magnesio y otras, son inconvenientes porque le imparten al agua una naturaleza alcalina, que neutraliza los ácidos que se utilizan para condimentar el producto. Aunque debe mencionarse que con la adición de la cal se tendrá un aumento en la alcalinidad **f**, proporcionada por los hidróxidos, la cual al final del proceso será neutralizada con ácido clorhídrico.

La alcalinidad del agua es una medida de su capacidad ácido neutralizante. Es la suma del contenido de todas las bases titulables. La medida de dicho valor varía dependiendo del punto final de la titulación. Debido a que la mayor parte de la alcalinidad de las distintas fuentes de agua es una función primaria del contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta es tomada como un indicador de estos constituyentes, y se expresan en contenido en mg de CaCO_3/L .

Puede parecer paradójico, a primera vista, que la cal, un compuesto de calcio pueda añadirse al agua para eliminar el calcio; sin embargo, la explicación es que el radical hidroxilo es el componente reactivo de la cal que convierte CO_2 y HCO_3^- en CO_3^{2-} , precipitándose CaCO_3 , como se observa en las siguientes reacciones:



La cal hidratada también reacciona con las sales de magnesio contenidas en el agua. En esta reacción se produce hidróxido de magnesio insoluble, el cual es removido por sedimentación y filtración.



Las dos diferentes formas de precipitado que son producidas en el proceso de ablandamiento con cal, el carbonato de calcio CaCO_3 y el hidróxido de magnesio Mg(OH)_2 , tienen la diferencia de que el carbonato de calcio es en forma de cristales y el hidróxido de magnesio es gelatinoso, por lo que este último sirve como agente coagulante y floculante, y ayuda a la sedimentación.

También pueden utilizarse otros compuestos como hidróxidos: NaOH , KOH , sin embargo, de ordinario ninguno compite con el bajo costo de la cal.

Debido a que la alcalinidad de casi todas las aguas crudas, por ejemplo la que se encuentra en estudio, está en forma de bicarbonato, y puesto que de ordinario se encuentra presente el CO_2 , la precipitación del carbonato de calcio requiere la conversión de CO_2 y bicarbonato en carbonato, como se muestra en las reacciones (1),(2) y (3).

Es de mencionar que la precipitación de CaCO_3 no es una reacción tan simple como aparenta a causa de la formación de pares de iones y en virtud de las interferencias, como la estabilización del carbonato de calcio coloidal que impide su precipitación en el tiempo normal de la reacción, razón por la cual se utiliza un coagulante catiónico.

En la industria de bebidas carbonatadas, en donde la alta alcalinidad y alta dureza en el agua son objeto de rechazo, se utiliza el proceso de ablandamiento con cal, además del uso de un coagulante para bajar dichos parámetros.

El proceso de ablandamiento con cal es basado en cuatro factores esenciales:

- a) Una selección apropiada de reactivos específicos para hacer más eficiente la precipitación de las impurezas que serán removidas en forma de lodo insoluble.
- b) Una correcta proporción de los químicos reactivos específicos para tratar el agua cruda.
- c) Promover las reacciones químicas de precipitación a través de una correcta combinación del coagulante, sedimentación y contacto del lodo.

d) Filtración adecuada del agua suavizada para remover las trazas de turbidez o materia suspendida resultante del proceso.

En el tratamiento de agua utilizando cal debe ajustarse la base de cal a fin de que se mantengan ciertas relaciones entre la alcalinidad f y la total o m.

Los resultados obtenidos de la medición de la alcalinidad con fenolftaleína y la alcalinidad total o m, ofrecen un significado estequiométrico de clasificación de las tres principales formas de alcalinidad. La clasificación se divide en bicarbonato, carbonato e hidróxido y asume la ausencia de otras sales.

La siguiente tabla muestra las relaciones de las tres formas de alcalinidad:

Tabla III Relaciones de alcalinidad

Resultado de la titulación	Alcalinidad de hidróxido como CaCO_3	Alcalinidad de carbonato como CaCO_3	Concentración de bicarbonato como CaCO_3
$f = 0$	0	0	m
$f < \frac{1}{2} m$	0	2f	m-2f
$f = \frac{1}{2} m$	0	2f	0
$f > \frac{1}{2} m$	2f-m	2(m-f)	0
$f = m$	M	0	0

Fuente: Estándar métodos para el examen de agua (Ref. 33)

Donde:

f = Alcalinidad f, mide contenido de hidróxidos.

m = Alcalinidad m, mide contenido de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos

9. EQUIPOS UTILIZADOS EN LA CLARIFICACIÓN DEL AGUA EN UNA PLANTA DE TRATAMIENTO

Los sistemas clarificadores-reactores de ablandamiento utilizando cal se clasifican así:

a) Sistema intermitente o proceso de ablandamiento por batch

Los suavizadores intermitentes son operados por el método de llenado y vaciado. El sistema consiste en dos o más tanques verticales. Un tanque es empleado para proveer agua suave, mientras que el otro debe ser limpiado, llenado, tratado y sedimentado. En algunos casos, sólo un tanque es utilizado, esto es posible si la capacidad de almacenamiento es suficiente para repetir los ciclos de ablandamiento sin interrumpir el suministro de agua suave.

El sistema es operado en ciclos definidos. La mezcla de las cantidades calculadas de los químicos, como cal y coagulante, son añadidos a un tanque mezclador y luego añadidos al tanque, mientras que éste es llenado con agua cruda. El tanque lleno es agitado por un período que varía entre 15 minutos y una hora, después del cual la agitación se detiene y se permite que el agua reaccione, coagule, flocule y sedimente en un período tan largo como sea posible. El agua clarificada es descargada por una tubería que se flota en la superficie, y es descargada hacia los filtros que, usualmente, funcionan por gravedad.

Este equipo intermitente o suavizador batch se utiliza normalmente en plantas pequeñas.

Las ventajas de este sistema son su bajo costo inicial y su sencilla operación. Las desventajas son el largo período de sedimentación requerido, las operaciones manuales necesarias y el hecho de que el efluente es súper saturado con carbonato de calcio.

b) Sistema continuo de ablandamiento por sedimentación

El sistema continuo de ablandamiento por sedimentación puede tener tanques de coagulación y sedimentación muy similares. Unidades de este tipo son utilizadas frecuentemente para la ablandamiento del agua municipal para ciudades. El agua cruda es alimentada y continuamente mezclada con cal y coagulante en un mezclador rápido, el cual consiste esencialmente del agitador de tipo hélice en una cámara relativamente pequeña. El efluente de la mezcla pasa a un tanque de coagulación y floculación, utilizado para asegurar la formación apropiada de una partícula de tamaño adecuada por la acción de una suave agitación con paletas rotativas. Luego, el agua fluye a otro tanque diseñado para permitir la sedimentación efectiva del lodo por, aproximadamente, un período de una hora. Se utilizan varios tipos de sistemas colectores de lodo.

Las ventajas de este sistema son que está listo para cualquier adaptación si surge algún problema, requiere un mínimo de mantenimiento y supervisión.

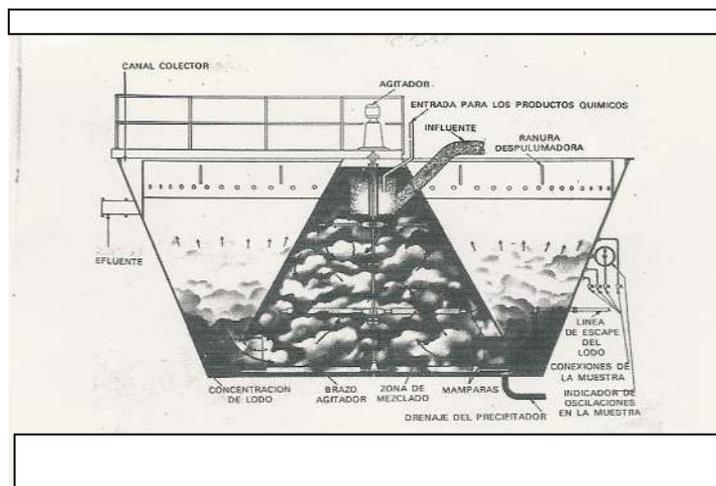
Las desventajas son que se requiere de mucho espacio, además, implica un alto costo de construcción. (Ref. 34)

c) Sistema continuo de ablandamiento por contacto de lodo

Este sistema mejora mucho los resultados de los sistemas de ablandamiento utilizando cal, es el que se emplea en el sistema estudiado.

Básicamente, estas unidades operan con el principio de cristalización de la solución supersaturada, proporcionan un medio de contacto para la correcta precipitación del lodo. El agua cruda se mezcla íntimamente con los lodos previamente precipitados con cal y coagulante. Se establece rápidamente un equilibrio. Los nuevos sólidos formados no son separados individualmente como partículas, en realidad, los depósitos frescos en el lodo, se hacen presentes por acarreo. La naturaleza de este lodo permite que se tenga una separación del agua tratada con el lodo. Una línea definida de separación existe entre la cama de lodo y el agua clarificada. El volumen completo del tanque es agitado constantemente de manera muy lenta.

Figura 3 Clarificador por contacto de lodo



Corresponde a la velocidad de asentamiento del lodo. (Cortesia de The Chemin Company.)
 Fuente: Nalco manual del agua (Ref. 35)

Los suavizadores de contacto son tan veloces en capacidad como también son los filtros que se encuentran a continuación del proceso. Las unidades están disponibles para producir de 1 a 3 galones por metro cuadrado de superficie por minuto, dependiendo del diseño. La turbidez final del agua se

encuentra entre 5 y 10 NTU previo a la filtración. Esto es mucho menos que las obtenidas por los otros dos métodos .

El tiempo máximo de retención de una hora, tiene ahorros apreciables en los costos del equipo, la construcción y el espacio de piso comparado con los otros métodos. Los requerimientos químicos son bajos. La dureza total del agua terminada es menor de la que se puede obtener con otros procesos utilizando la misma cantidad de químicos.

Cambios graduales en la velocidad permiten un punto de separación muy definido entre el lodo y el agua clarificada. La cama de lodo es mantenida con una densidad definida por una constante purga de lodo. (Ref. 36)

10. COMPARACIÓN TEÓRICA DEL SULFATO DE ALUMINIO Y DE LOS POLÍMEROS COAGULANTES CATIONICOS

10.1. Comparación teórica de ventajas y desventajas del sulfato de aluminio y de los polímeros coagulantes cationicos

Las ventajas en la utilización del sulfato de aluminio son:

- a) Bajo costo
- b) Manejo sencillo de dosificación

Las desventajas en la utilización del sulfato de aluminio son:

- a) El sulfato de aluminio es sensible al pH del agua. El pH óptimo para su acción es entre 5 y 7. Si el pH no se encuentra dentro del rango adecuado, la clarificación es pobre y puede solubilizarse el aluminio y generar problemas posteriores al usuario.
- b) Al utilizar sulfato de aluminio se producen lodos voluminosos y gelatinosos que producen problemas de disposición y manejo, lo cual puede resultar dificultoso y caro.
- c) El alto contenido de aluminio en el agua para consumo humano se ha asociado con el síndrome de Alzheimer y otras enfermedades neurológicas. (Ref. 37)

Las ventajas en la utilización de polímeros son:

- a) Con una dosificación apropiada del polímero coagulante más conveniente para el caso, puede mejorar la calidad final del agua.

- b) Se reduce el volumen de lodo generado en el proceso de tratamiento de agua.
- c) Se simplifica el manejo de los lodos y el costo de su disposición.
- d) Poco sensibles al pH del agua tratada
- e) Manejo sencillo de dosificación, ya que se encuentran disponibles en el mercado en variedad de opciones listas para utilizar sin preparación previa.
- f) Las largas cadenas que componen el polímero, ayudan a la formación de puentes, además de neutralizar la carga.
- g) Existe gran cantidad de polímeros en el mercado y, además, pueden desarrollarse para necesidades específicas.

Las desventajas en la utilización de polímeros son:

- a) Alto costo
- b) Precisión requerida para su dosificación, ya que si se agrega en exceso puede causar efectos contrarios a los deseados.
- c) Son altamente especializados. Un cambio abrupto en las condiciones o en el caudal de agua tratada puede hacerlos poco efectivos.

11. RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados obtenidos al realizar el análisis económico de los costos del agua tratada, tomando como base los consumos de los diferentes químicos:

TABLA IV Consumos y costos

Parámetro de medición	Al₂SO₄	Polímero coagulante catiónico (Aquafloc)
Consumo de coagulante en Kg/m ³ de agua producido	0.042 Kg/m ³	0.021 Kg/m ³
Consumo de HCl en Kg/m ³ de agua producido	0.093 Kg/m ³	0.084 Kg/m ³
Costo de coagulante por m ³ de agua tratada	Q 0.11/m ³	Q 0.17/m ³
Costo del HCl por m ³ de agua tratada	Q 0.62/m ³	Q 0.56/m ³
Sumatoria de precios de coagulante + HCl consumido/m ³	Q 0.73/m ³	Q 0.73/m ³
Costo del coagulante + HCl utilizado en 24 horas de producción de agua tratada	Q 31,832.79	Q 31,832.79

Estos resultados se obtuvieron tomando como base los siguientes valores:

Agua tratada producida en la planta estudiada: 1816.94 m³/ hora

Costo del Al₂SO₄: Q2.55/Kg

Costo del coagulante Aquafloc: Q8.41/Kg

Costo del HCl: Q6.70/Kg

A continuación, se muestra el resumen de los resultados estadísticos obtenidos al analizar los datos fisicoquímicos del agua tratada:

Tabla V Datos fisicoquímicos del agua al utilizar el polímero Aquafloc

Parámetro	Promedio	Desviación estándar	Máximo	Mínimo
Alcalinidad f (ppm)	3.1	1.2	4.0	0.0
Alcalinidad m (ppm)	29.7	4.5	42.0	24.0
pH	8.2	0.1	8.5	7.7
Dureza total (ppm)	59.2	3.3	72.0	50.0
Lodos ml/L	302	58	350	172
Turbidez NTU	0.63	0.34	1.44	0.11

TABLA VI Datos fisicoquímicos del agua al utilizar el sulfato de aluminio

Parámetro	Promedio	Desviación estándar	Máximo	Mínimo
Alcalinidad f (ppm)	2.5	0.9	4.0	2.0
Alcalinidad m (ppm)	32.5	4.7	40.0	24.0
pH	8.5	0.1	8.7	8.1
Dureza total (ppm)	56.8	6.0	70.0	42.0
Lodos ml/L	392	34	460	350
Turbidez NTU	0.59	0.28	1.27	0.12

12. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación se analizan los resultados obtenidos al evaluar el agua utilizando sulfato de aluminio como coagulante en un caso y un polímero coagulante catiónico en el otro caso:

a) Eficiencia de la clarificación a través de la medición de turbidez

Uno de los principales objetivos de la utilización de un coagulante en el caso estudiado es obtener agua clarificada, debido a que el agua cruda ha sido tratada con cal con el objetivo final de disminuir la dureza y la alcalinidad total, formándose así un sistema coloidal con las finas partículas de la cal en suspensión

Para determinar la efectividad de la remoción de las partículas de cal posterior al tratamiento con el coagulante, se tomaron muestras a la salida del agua clarificada, después de la filtración, obteniendo para el agua tratada con el polímero Aquafloc un promedio de 0.63 NTU con una desviación estándar de 0.34 NTU y para el caso en que el agua fue tratada con el sulfato de aluminio, un promedio de 0.58 NTU, con una desviación estándar de 0.28 NTU (Ver tablas V y VI). Ambos resultados se encuentran dentro de los parámetros de tolerancia máxima de 5 NTU requerida para el agua que ha de utilizarse en la formulación de bebidas carbonatadas.

b) Medición de los parámetros fisicoquímicos más importantes para una planta de elaboración de bebidas carbonatadas

Debido a la naturaleza ácida de las bebidas carbonatadas, los parámetros fisicoquímicos más importantes son aquellos que, por su naturaleza, pueden neutralizar dicha acidez, lo cual consecuentemente afectaría el sabor característico de dichas bebidas.

Se monitoreó durante 7 días continuos los resultados de alcalinidad **f**, alcalinidad **m**, pH, dureza total y disposición de lodos, utilizando sulfato de aluminio como coagulante y durante otro período igual de días se evaluaron los mismos parámetros utilizando el polímero coagulante catiónico.

Los resultados de la alcalinidad **f**, que se evaluaron después de la adición de ácido clorhídrico (Ver Apéndice A, las gráficas 4 y 5) muestran que al utilizar el sulfato de aluminio la dispersión de datos se mantiene en un rango entre 2 ppm y 4 ppm, con un promedio de 2.5 ppm CaCO_3 y una desviación estándar de 0.89. Los resultados de la alcalinidad **f**, al utilizar el polímero coagulante catiónico, se mantienen dentro de un rango entre 0 y 4 ppm de CaCO_3 , con un promedio de 3.1 ppm de CaCO_3 y una desviación estándar de 1.2. Estos resultados demuestran que, tanto al utilizar sulfato de aluminio, como el polímero Aquafloc, los resultados de alcalinidad **f** son convenientes en el agua que se utiliza para la elaboración de las bebidas carbonatadas. Este parámetro debe tener el valor más bajo posible para que no exista neutralización de los ácidos de las bebidas por contenido de hidróxido en el agua.

Los resultados de la alcalinidad **m** (Ver Apéndice A, las gráficas 6 y 7) muestran que al utilizar el sulfato de aluminio la dispersión de datos se mantiene en rangos muy similares entre 24 y 40 ppm, en comparación con el rango entre 20 y 42 que se obtienen al utilizar el Aquafloc. Esto corrobora que

utilizando los dos sistemas se cumple con el parámetro máximo de 50 ppm de alcalinidad m como $CaCO_3$ establecido para el agua que se emplea para la elaboración de las bebidas carbonatadas.

Los resultados de las mediciones de pH indican que cuando se utiliza sulfato de aluminio se tiene una mayor dispersión de datos y valores más altos en un rango entre 8.14 y 8.72, en comparación con los datos obtenidos con el polímero coagulante catiónico, con el que se mantiene más constante y con valores más bajos en un rango entre 7.70 y 8.50. En ambos casos, los resultados son adecuados según los parámetros establecidos para el agua que se utiliza en la elaboración de bebidas carbonatadas, el cual debe ser menor a 9.2 para que se consiga la concentración teórica mínima de calcio. Debe tomarse en cuenta que este factor puede ser alterado por el ajuste final que se hace al agua al adicionarle el ácido clorhídrico. Si el pH se encuentra en valores más altos, requerirá mayor cantidad de ácido para neutralizar el agua y bajar el pH, lo cual afecta el costo.

Respecto a los datos obtenidos de dureza total en el agua tratada utilizando sulfato de aluminio se mantuvo en un rango entre 70-42 ppm como $CaCO_3$ con un promedio de 56.8 ppm, en comparación con 59.2 ppm de promedio que se obtuvo al trabajar con el polímero Aquafloc, manteniéndose en un rango entre 50-72 como $CaCO_3$. Los resultados al trabajar con cualquiera de los dos sistemas son aceptables para el agua que se utilizará en la formulación de las bebidas carbonatadas que, para el sistema en mención, no debe ser mayor de 80 ppm.

En cuanto a la generación de volumen de lodos de desecho, se determina que al utilizar sulfato de aluminio se produce mayor cantidad, ya que se mantienen en un rango entre 350 y 460 ml/l, en comparación con el rango entre 172 y 350 ml/l que se obtiene al trabajar con el polímero coagulante catiónico. En este caso, sí se obtiene una ventaja significativa del polímero sobre el sulfato, ya que se tienen menores problemas de disposición y manejo de lodos. Este aspecto coincide con la teoría que indica que al utilizar sulfato de aluminio se producen lodos voluminosos y gelatinosos.

c) Evaluación sensorial

En cuanto a evaluación sensorial: sabor, olor y apariencia visual, en la corrida de los 7 días utilizando el sulfato de aluminio como coagulante, así como los datos obtenidos en los 7 días con el polímero Aquafloc, la evaluación sensorial se catalogó como normal. No se percibió diferencia entre ambos métodos.

d) Evaluación económica

Como se puede observar en los resultados obtenidos en la tabla IV de Resultados, el precio total del agua al utilizar sulfato de aluminio como coagulante, en comparación con el de emplear el polímero coagulante catiónico Aquafloc, es el mismo al considerar el precio del consumo del ácido clorhídrico requerido para neutralizar el agua.

Tal y como se muestra en la tabla tabla IV de resultados, el precio del Aquafloc es más elevado que el de utilizar sulfato de aluminio por cada metro cúbico producido de agua tratada. Sin embargo, esta diferencia de precios es

compensada al final, ya que al utilizar sulfato de aluminio se requiere mayor cantidad de ácido, mientras que con el Aquafloc se requiere menor cantidad. Lo que al final del análisis se muestra es que, independiente de cual de las 2 opciones se utilice, al final se gastará lo mismo por cada metro cúbico de agua para obtener resultados satisfactorios en los parámetros fisicoquímicos requeridos.

e) Facilidad de manejo para los operadores

Las observaciones realizadas en la planta muestran que cuando se utiliza el polímero Aquafloc como coagulante se tienen menos problema de manejo de parte de los operadores, ya que este coagulante se despacha en contenedores de 1,200 Kg. cada uno. Debido a que el Aquafloc se comercializa de manera líquida, éste es conectado directamente al sistema a través de una manguera y es alimentado a través de una bomba de diafragma.

En el caso del sulfato de aluminio, el manejo es más complejo para los operadores, ya que éste se comercializa de manera sólida, por lo que debe ser previamente disuelto en agua antes de ser alimentado al sistema, con el inconveniente de que el polvo suelto se dispersa fácilmente por toda el área.

CONCLUSIONES

1. Tanto al utilizar sulfato de aluminio, como Aquafloc en el sistema de clarificación, se cumple con valores de turbidez menores a 5 NTU, alcalinidad **f** menor a 4 ppm CaCO_3 , alcalinidad **m** menor a 50 ppm CaCO_3 y dureza total menor a 80 ppm requeridos en el agua utilizada para la formulación de bebidas carbonatadas.
2. Es más efectivo el floculante Aquafloc debido a que requiere menor cantidad de ácido clorhídrico por m^3 de agua tratada 0.084 kg/m^3 , en comparación con 0.093 Kg/m^3 que se requiere al utilizar el sulfato de aluminio para neutralizar el pH del agua en valores abajo de 9.2 unidades requeridas en la planta para la formulación de bebidas carbonatadas.
3. Tanto al utilizar sulfato de aluminio, como Aquafloc en el sistema de clarificación, se obtienen resultados sensoriales satisfactorios en el agua empleada para la formulación de bebidas carbonatadas.
4. Se genera menor volumen de lodos al utilizar Aquafloc en el sistema 302 ml/L en promedio, en comparación con los 392 ml/L promedio generado al utilizar sulfato de aluminio, lo cual ocasiona menores problemas de disposición y manejo posterior.

5. El costo final por m^3 de agua tratada al utilizar sulfato de aluminio o el polímero coagulante catiónico Aquafloc en el sistema estudiado es el mismo, aunque tenga costo unitario más alto el Aquafloc Q 0.17/ m^3 en comparación con Q 0.11/ m^3 , debido a que el sulfato de aluminio requiere mayor consumo de ácido clorhídrico 0.093 kg/m^3 , en comparación con 0.084 kg/m^3 que requiere el Aquafloc para la neutralización del agua. El costo total al utilizar cualquiera de las dos opciones es de Q31,832.79 / 24 horas de producción de agua tratada.

6. El sistema de más fácil manejo para los operadores es utilizar el Aquafloc, ya que requiere menor manipulación debido a que se compra en forma líquida y se alimenta directamente al sistema.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda el uso del Aquafloc debido a que con este coagulante se obtienen los parámetros fisicoquímicos y sensoriales requeridos para el agua que se utiliza en la elaboración de bebidas carbonatadas y, además, tiene las ventajas de que se requiere menor consumo de ácido clorhídrico para neutralizar el agua final, genera menor volumen de lodo y es de más fácil manejo para los operadores, ya que no requiere preparación previa.
2. Cuando se utilice el polímero coagulante catiónico Aquafloc, debe implementarse un sistema de acondicionamiento con dilución de agua previo a la alimentación del mismo al sistema de clarificación. Esto ayudará a mejorar la efectividad del polímero y, por lo tanto, bajará los costos por consumo. Ver diseño presentado en el Anexo de este estudio.
3. Por su propia seguridad, los operadores deben utilizar siempre el equipo de protección personal requerido para el manejo adecuado de los coagulantes analizados en este estudio.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Frank Kemmer, **Nalco Manual del agua. Su naturaleza, tratamiento y aplicaciones.** (México: Editorial McGraw-Hill. 1989), pp. 8-2, 8-4.
2. Louis Ravina, **Everything you want to Know about Coagulation & Flocculation.** (4a. Edición. Estados Unidos: Editorial Zeta-Meter, Inc, 1993), p.1.
3. Kemmer, *op. cit.*, p. 8-3.
4. *Ibid.*, p. 8-4.
5. Ravina, *op. cit.*, p. 10.
6. Ravina, *op. cit.*, p. 4.
7. Ravina, *op. cit.*, p. 5.
8. Ravina, *op. cit.*, p. 12.
9. SNF Floerger. “General information about coagulation” **For drinking water, (1): p.4.** 2000.
10. Kemmer, *op. cit.*, p. 8-5.
11. Betz laboratories, Inc. **Betz Handbook of Industrial Water Conditioning.** (6a. edición. Estados Unidos: Editorial Trevese, 1962), p.27.
12. *Loc. cit.*

13. American Water Works Association, **Aluminium sulfate liquid, ground or o lump.** (Estados Unidos: American National Standard, 1988), p. 6.
14. Ravina, *op. cit.*, p. 20.
15. American Water Works Association, *op. cit.*, p. 7.
16. Sales, Acidos y Solventes, **“Material safety data sheet del sulfato de aluminio hidratado” (1): 1-7. 2000.**
17. Betz laboratories, *op. cit.*, p. 30.
18. Betz laboratories, *op. cit.*, p. 31.
19. Kemmer, *op. cit.*, p. 8-7.
20. Ravina, *op. cit.*, p. 19.
21. Ravina, *op. cit.*, p. 14.
22. Ravina, *op. cit.*, p. 14.
23. Greg Kriebel, “Alimentación química, el problema con los polímeros”, **Revista Agua Latinoamérica (6): 22-23. 2002.**
24. *Loc. cit.*
25. Ravina, *op. cit.*, p. 16.
26. Kemmer, *op. cit.*, p. 8-14.
27. Kemmer, *op. cit.*, p. 8-15.

28. Comerssa, “**Material safety data sheet del Aquafloc**” (1): 1-4. 1997.
29. Kemmer, *op. cit.*, p. 8-11.
30. Juan Zapata Ruiz. **Manual práctico de bebidas para la industria de refrescos**. (México: Editorial Abeja, 1966), p.p. 15-18.
31. Zapata, *op. cit.*, p. 16.
32. Kemmer, *op. cit.*, p. 10-2.
33. American public health association, **Standard methods for the examination of water and wastewater**. (17a. edición. Estados Unidos: Editorial Port city press, 1989), pp. 2-38
34. Betz laboratories, *op. cit.*, p. 73.
35. Kemmer, *op. cit.*, p. 8-3.
36. Betz laboratories, *op. cit.*, p. 73.
37. Kristine S. Siefert, **Low aluminium residuals from drinking water pretreatment with Ultrion coagulants**. (Estados Unidos: Editorial Nalco Chemical, 1990), p.1
38. Greg Kriebel, “ Alimentación química, el problema con los polímeros”, **Revista Agua Latinoamérica** (6): 22. 2002.

BIBLIOGRAFÍA

BEVERAGE production and plant operation. Estados Unidos: Editorial American bottlers of carbonated beverages, 1962.

Hardengergh, W.A. **Water Supply and purification.** 3era. Edición, Estados Unidos: Editorial International textbook company, 1953.

Jacos, Morris. **Manufacture and analysis of carbonated beverages.** Estados Unidos: Editorial Chemical publishing, 1959.

Pürschel, Wolfgang. **La calidad de las aguas y su tratamiento.** España: Editorial Urmo, 1976.

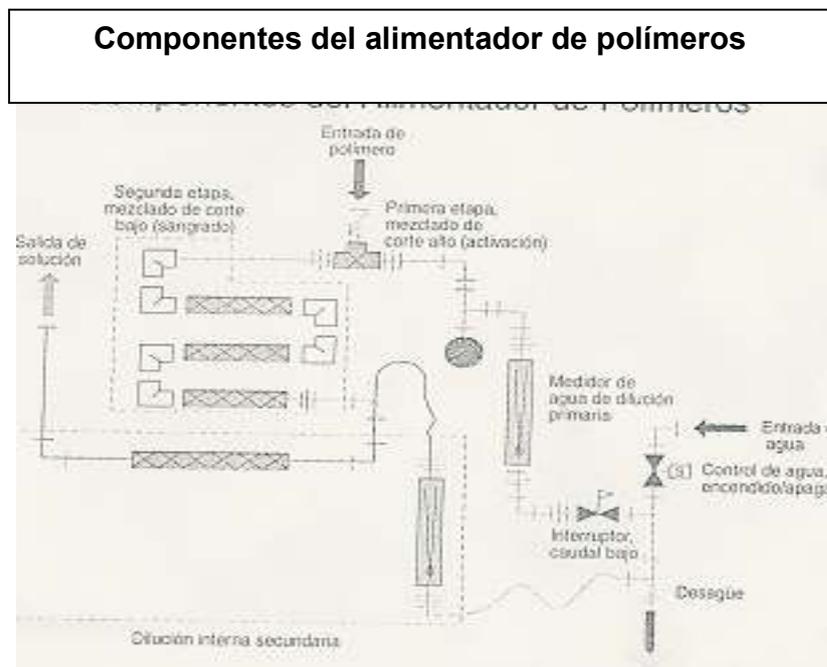
APÉNDICE

A. Gráficas de los parámetros de calidad del agua obtenidos al evaluar el sulfato de aluminio y el Aquafloc como coagulante

A continuación se presentan las gráficas de dispersión de los datos de alcalinidad **f**, alcalinidad **m**, pH, dureza total , volúmen de lodos y turbidez, obtenidos en cada una de las horas de análisis realizados durante los siete días continuos de evaluación de uso de cada uno de los coagulantes estudiados.

ANEXO

Figura 16 Componentes del alimentador de polímeros



Fuente: Revista Agua Latinoamérica (Ref. 38)