

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO Y  
ACONDICIONAMIENTO DE AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE VAPOR**

**JAZMIN JULIETH CALA CALA  
FERNANDO AYALA CARDENAS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2005**

**DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO Y  
ACONDICIONAMIENTO DE AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE VAPOR**

**JAZMIN JULIETH CALA CALA  
FERNANDO AYALA CARDENAS**

**Trabajo de grado para optar al título  
de Ingeniero Químico**

**Director**

**Crisóstomo Barajas Ferreira**

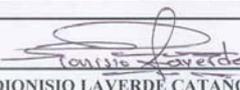
**Co-director**

**Jorge Enrique Forero**

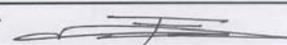
**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2005**

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE <b>JAZMÍN JULIETH CALA CALA</b>		CÓDIGO <b>1993554</b>
TÍTULO DEL PROYECTO <b>"DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE VAPOR"</b>		
CODIGO	FACULTAD <b>INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS</b>	CARRERA <b>INGENIERÍA QUÍMICA</b>
CALIFICACIÓN <b>CUATRO TRES (4.3)</b>		
DIRECTOR DEL PROYECTO		
NOMBRE <b>CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA</b>		FIRMA 
CALIFICADORES		
F N  <b>JORGE ENRIQUE PULIDO FLOREZ</b>	F N  <b>DIONISIO LAVERDE CATANO</b>	FECHA A M D <b>05   06   20</b>

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE <b>JAZMÍN JULIETH CALA CALA</b>		CÓDIGO <b>1993554</b>
TÍTULO DEL PROYECTO <b>"DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE VAPOR"</b>		
CODIGO	FACULTAD <b>INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS</b>	CARRERA <b>INGENIERÍA QUÍMICA</b>
CALIFICACIÓN <b>APROBADO</b>		
DIRECTOR DEL PROYECTO		
NOMBRE <b>CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA</b>		FIRMA 
CALIFICADORES		
F N  <b>JORGE ENRIQUE PULIDO FLOREZ</b>	F N  <b>DIONISIO LAVERDE CATANO</b>	FECHA A M D <b>05   06   20</b>



UNIVERSIDAD  
INDUSTRIAL DE  
SANTANDER

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE FERNANDO AYALA CÁRDENAS		CÓDIGO 1993555			
TÍTULO DEL PROYECTO "DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE VAPOR"					
CODIGO	FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS	CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA			
CALIFICACIÓN CUATRO TRES (4.3)					
DIRECTOR DEL PROYECTO					
NOMBRE CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA		FIRMA 			
CALIFICADORES					
F N	 JORGE ENRIQUE PULIDO FLOREZ	F N	 DIONISIO LAVERDE CATAÑO	FECHA A M D 05 06 20	



UNIVERSIDAD  
INDUSTRIAL DE  
SANTANDER

NOTA DEL PROYECTO DE GRADO

NOMBRE DEL ESTUDIANTE FERNANDO AYALA CÁRDENAS		CÓDIGO 1993555			
TÍTULO DEL PROYECTO "DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE VAPOR"					
CODIGO	FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS	CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA			
CALIFICACIÓN APROBADO					
DIRECTOR DEL PROYECTO					
NOMBRE CRISÓSTOMO BARAJAS FERREIRA		FIRMA 			
CALIFICADORES					
F N	 JORGE ENRIQUE PULIDO FLOREZ	F N	 DIONISIO LAVERDE CATAÑO	FECHA A M D 05 06 20	

## TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	11
OBJETIVOS.....	12
1. ESTRUCTURA TEORICA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	13
1.1 DEFINICIONES.....	13
1.1.1 Sólidos suspendidos (SS).....	13
1.1.2 Materia orgánica.....	13
1.1.3 Sólidos disueltos (SD).....	13
1.1.4 Dureza.....	13
1.1.5 Alcalinidad.....	14
1.1.6 Sílice (SiO <sub>2</sub> ).....	14
1.1.7 Gases disueltos.....	14
1.2 PROBLEMAS EN LA CALDERA CONCERNIENTES AL AGUA DE ALIMENTACIÓN.....	15
1.2.1 Formación de incrustaciones.....	15
1.2.2 Formación de corrosión.....	15
1.2.3 Formación de espuma.....	15
1.3 FUENTES DE SUMINISTRÓ DE AGUA.....	15
1.4 TRATAMIENTO DEL AGUA PARA CALDERA.....	16
1.4.1 Tratamiento externo.....	17
1.4.1.1 Tratamiento primario.....	17
1.4.1.1.1 Coagulación.....	17
1.4.1.1.2 Floculación.....	19
1.4.1.1.3 Sedimentación.....	21
1.4.1.1.4 Filtración.....	22
1.4.1.1.5 Desinfección.....	24

1.4.1.2	Tratamiento secundario.....	25
1.4.1.2.1	Suavización.....	26
1.4.1.2.2	Desalcalinización.....	30
1.4.1.2.3	Desgasificación.....	33
1.4.1.2.4	Desmineralización.....	34
1.4.2	Tratamiento interno.....	37
1.4.2.1	Programa de coagulantes.....	38
1.4.2.2	Programa de fosfatos.....	39
1.4.2.3	Programa de fosfato coordinado.....	40
1.4.2.4	Programa de quelantes.....	42
1.4.2.5	Acondicionamiento de lodos.....	43
2.	RESULTADOS Y ANALISIS.....	45
2.1	METODOLOGIA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS.....	45
2.1.1	Tratamiento primario.....	47
2.1.2	Tratamiento secundario.....	48
2.1.3	Tratamiento interno.....	49
2.2	SOFTWARE.....	50
	CONCLUSIONES.....	52
	RECOMENDACIONES.....	53
	BIBLIOGRAFIA.....	54
	ANEXO 1. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACIÓN.....	55
	ANEXO 2. REACCIONES INVOLUCRADAS EN EL TRATAMIENTO.....	59
	ANEXO 3. TABLAS DE CONTROL.....	62

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Figura 1.</b> Clasificación de las resinas catiónicas según su grupo funcional.....	28
<b>Figura 2.</b> Diagrama de flujo del tratamiento del efluente de las resinas de intercambio ciclo hidrógeno.....	32
<b>Figura 3.</b> Clasificación de las resinas aniónicas de acuerdo a su grupo funcional y su utilidad.....	35
<b>Figura 4.</b> Metodología para la selección del tratamiento adecuado para el agua para la producción de vapor.....	46
<b>Figura 5.</b> Programas aplicables en el tratamiento interno de acuerdo a la presión de trabajo de la caldera.....	50
<b>Figura 6.</b> Pantalla inicial del programa que implementa la metodología propuesta en este trabajo.....	53
<b>Figura 7.</b> Pantalla secundaria del programa que implementa la metodología propuesta en este trabajo.....	53
<b>Figura 8.</b> Pantalla en la cual se ingresan los valores de los parámetros significativos del sistema y el software se encarga de establecer las etapas del tratamiento.....	54

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
<b>Tabla 1.</b> Limites óptimos para las condiciones del agua de alimentación de calderas según la presión que esta trabaje.....	16
<b>Tabla 2.</b> Planilla para anotar el valor de cada uno de los parámetros y el valor recomendado.....	47
<b>Tabla 3.</b> Ventajas y desventajas de los programas de tratamiento interno.....	51

## RESUMEN

**TITULO:** DISEÑO DE UNA METODOLOGÍA PARA EL TRATAMIENTO Y ACONDICIONAMIENTO DE AGUA EN LA PRODUCCIÓN DE VAPOR<sup>1</sup>

**AUTORES:** JAZMIN JULIETH CALA CALA  
FERNANDO AYALA CARDENAS<sup>2</sup>

**PALABRAS CLAVES:** Metodología, tratamiento, agua, caldera, vapor.

En este trabajo se hizo una amplia recopilación bibliográfica a fin de conocer los parámetros adecuados bajo los cuales debe estar en funcionamiento una caldera para la producción de vapor en la industria, con base en esta investigación, se construyó un marco teórico que encierra los conceptos más importantes que cualquier persona que este interesada en aprender sobre estos procesos debe conocer. De la misma forma se seleccionaron siete parámetros representativos de las etapas del tratamiento, siendo ellos: sólidos suspendidos (SS), sólidos disueltos (SD), dureza, alcalinidad, materia orgánica, sílice y gases disueltos, teniendo en cuenta su importancia se diseñó una metodología para el tratamiento de agua para la generación de vapor, de tal forma que esta fuera secuencial y le guiara al lector paso a paso según las condiciones que caracterizan a su sistema. La metodología fue llevada a un software desarrollado en Visual Basic, para que la persona interesada en el tema tenga a la mano una herramienta de fácil uso y muy didáctica que le indique cual es el orden correcto en el tratamiento del agua.

---

<sup>1</sup> Trabajo de Grado

<sup>2</sup> Facultad de ingenierías fisicoquímicas. Escuela de ingeniería química. Director: Ramiro Martínez Rey.

## ABSTRACT

**TITLE:** DESIGN OF A METHODOLOGY FOR THE TREATMENT AND WATER PREPARATION IN THE STEAM PRODUCTION<sup>3</sup>

**AUTHORS:** JAZMIN JULIETH CALA CALA  
FERNANDO AYALA CARDENAS<sup>4</sup>

**KEY WORDS:** Methodology, treatment, water, boiler, steam.

In this work an ample bibliografica compilation was made in order know the parameters adapted under which it must be in operation a boiler for the steam production in the industry, with base in this investigation, we are constructed a theoretical frame that locks up the important concepts but that any person who this interesting in learning on these processes must know. Of the same form seven representative parameters of the stages of the treatment were selected, being they: suspended solids (SS), dissolved solids (SD), hardness, alkalinity, organic matter, dissolved silica and gases, considering its importance design a methodology for the water treatment for the generation of steam, such form that this outside sequential one and guided to him step by step the reader according to the conditions that characterize to their system. The methodology was taken to a software developed in Visual Basic, so that any person interested in the subject has at the hand a tool of easy very didactic use and that she indicates to him as it is the correct order in the treatment of the water.

---

<sup>3</sup> Work of degree

<sup>4</sup> Faculty of physicochemical engineerings. School of chemical engineering. Director: Crisostomo Barajas Ferreira

## INTRODUCCIÓN

Las calderas de diversas formas y tamaños producen vapor a partir del agua, ***la calidad del vapor depende de la calidad del agua***, por lo tanto se hace necesario hacer un tratamiento adecuado. Un agua con un tratamiento inadecuado puede generar una concentración de sólidos dentro de la caldera aumentando los niveles de depósitos o incrustaciones, disminuyendo la eficiencia de la transferencia de energía e incrementa el riesgo de explosión.

Por esto, se enfatizó en la elaboración de un material que le permita al lector aprender de forma didáctica los conceptos básicos para llevar a cabo un tratamiento apropiado.

En este trabajo se plantea una metodología que sirve como guía para el tratamiento de agua para generación de vapor. Esta se sustenta en un marco teórico, que da libertad a la hora de seleccionar la ruta o etapas más adecuadas.

El objetivo inmediato de este trabajo es divulgar los conocimientos esenciales en forma clara por medio de una estructura conceptual que presenta los conceptos necesarios, de manera ordenada y secuencial, para que el lector tenga las herramientas adecuadas al momento de poner en práctica esta metodología.

En el diseño se escogieron seis parámetros o variables sensibles: sólidos suspendidos, sólidos disueltos, dureza, sílice, materia orgánica, gases (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>) y alcalinidad. Teniendo en cuenta estas variables se ubicaron las diferentes etapas del tratamiento combinando las operaciones unitarias apropiadas, logrando un proceso secuencial que permite eliminar del agua cada variable por medio de la combinación de estas etapas, garantizando que al final se llegue a un agua apta para ser empleada en la generación de vapor.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

- Diseñar una metodología para el tratamiento y acondicionamiento de agua en la producción de vapor.

### **Objetivos específicos**

- Obtener por medio de una revisión bibliográfica, las especificaciones del agua, exigidas para el correcto funcionamiento de las calderas.
- Realizar una estructura conceptual, que describa las bases fundamentales para el tratamiento del agua en la generación de vapor.
- Generar un software en el cual se implemente la metodología que se desarrollará para el tratamiento de agua de uso en caldera, que sea de fácil uso y en el cual el usuario vaya conociendo el tratamiento adecuado, paso a paso, de acuerdo a las características de su sistema.

## **1. ESTRUCTURA TEORICA Y DESARROLLO EXPERIMENTAL**

Los conceptos que fundamentan este marco teórico se enfocan en las definiciones básicas y las observaciones hechas en cada etapa, dando lugar al diseño de la metodología. A continuación se encontrará una serie de etapas que comienzan con unas definiciones y terminan con unos pasos que describen en forma progresiva la metodología expuesta en este trabajo.

### **1.1 DEFINICIONES**

Las impurezas más comunes y de mayor influencia en la generación de vapor son:

#### **1.1.1 Sólidos suspendidos (SS)**

Consiste en materia heterogénea insoluble finamente dividida, de tipo orgánico e inorgánico tales como arcillas, lodos, humus, aceites o grasas, que se encuentran suspendidas en el agua. Unidades ppm.

#### **1.1.2 Materia orgánica**

Se presenta en forma de sólidos finos, humus, microorganismos, grasas y aceites, causantes de turbiedad y color. Unidades ppm.

#### **1.1.3 Sólidos disueltos (SD)**

Es la concentración total de los iones disueltos, expresada en unidades de conductividad ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) o en ppm de NaCl o de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ .

#### **1.1.4 Dureza**

Es la presencia de calcio y magnesio disueltos en el agua expresada en términos de carbonato de calcio. Sin embargo existen otros compuestos que también son

indicadores de dureza entre los cuales se encuentra el hierro, el aluminio, ácidos orgánicos y minerales. La dureza se clasifica en: dureza de carbonatos y no carbonatos, la primera se atribuye a bicarbonatados de calcio y magnesio, y la segunda a compuestos tales como sulfatos, cloruros, nitratos. La suma de las dos constituye la dureza total. Unidades ppm.

### **1.1.5 Alcalinidad**

Corresponde a la presencia de carbonatos, bicarbonatos y/o hidróxilos, expresados como carbonato de calcio. Se distinguen tres tipos de alcalinidad:

- a) **Alcalinidad “M” o total:** como su nombre lo indica se refiere a todas las sustancias alcalinas presentes en el agua. Neutraliza ácido hasta pH de 4.3.
- b) **Alcalinidad “P” o a la fenolftaleína:** debida a la presencia de carbonatos e hidróxidos. Neutraliza ácido hasta pH de 8.3.
- c) **Alcalinidad al OH:** corresponde a la fracción de OH presentes en el agua. Unidades ppm.

### **1.1.6 Sílice (SiO<sub>2</sub>)**

Esta se presenta en el agua en forma soluble o en forma suspendida. Produce incrustaciones en las calderas a altas temperaturas se evapora y forma depósitos insolubles y muy adherentes en las turbinas. Unidades ppm

### **1.1.7 Gases disueltos**

Corresponde a la presencia de gases disueltos, como el bióxido de carbono, oxígeno y amoníaco. Estos gases son la causa principal de la corrosión encontrada en calderas, turbinas, equipos y accesorios.

## **1.2 PROBLEMAS EN LA CALDERA CONCERNIENTES AL AGUA DE ALIMENTACIÓN**

### **1.2.1 Formación de incrustaciones**

Resultan de la formación de depósitos sólidos dentro de las calderas, producto de la precipitación de sales e impurezas insolubles tales como carbonatos, bicarbonatos, sílice, sólidos en suspensión entre otros, bajo las condiciones de producción de vapor, que afectan la eficiencia de transferencia pues las incrustaciones son malas conductoras de calor y a menudo son responsables de que se quemen los tubos o placas.

### **1.2.2 Formación de corrosión**

Es producto de la concentración de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  y soda cáustica en diversas zonas o superficies de la caldera. El oxígeno por ejemplo se disuelve en economizadores, calderas y líneas de condensado, el dióxido de carbono en las líneas de condensado y el hidróxido en las superficies de la caldera.

### **1.2.3 Formación de espuma**

Se debe al alto contenido de sólidos disueltos (SDT), sólidos suspendidos (SS), materia orgánica, elevadas concentraciones de NaOH, y por un inapropiado diseño de la caldera lo cual conlleva al arrastre de agua en el vapor generado.

## **1.3 FUENTES DE SUMINISTRÓ DE AGUA**

El agua como recurso natural para el tratamiento en la producción de vapor, tiene su origen en: ríos (partes altas y bajas), acuíferos subterráneos, lagos, embalses y en el abastecimiento público, de ahí que la calidad del agua sin tratar (agua bruta), varíe con el origen, cambiando su composición y haciendo necesario llevar a cabo un tratamiento acorde a los diferentes parámetros que el agua presente.

## 1.4 TRATAMIENTO DEL AGUA PARA CALDERA<sup>5</sup>

El programa de tratamiento de agua para la producción de vapor apunta a controlar siete parámetros o variables sensibles, clasificadas como: sólidos suspendidos, materia orgánica, dureza, alcalinidad, sílice, sólidos disueltos y gases. En la tabla 1 se muestra los límites óptimos para las condiciones del agua de alimentación de calderas según la presión que esta trabaje.

PRESION (psig)	S.S (ppm)	S.S (ppm)	S.D (ppm)	ALCALINIDAD			DUREZA *hf	SILICE (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	O <sub>2</sub> (ppm)	MAT ORG. (ppm SiO <sub>2</sub> )	pH	SULFITO (ppm SO <sub>3</sub> )
				TOTAL (ppm)	OH (ppm)	CO <sub>3</sub> (ppm)							
0-300	4000	15	700 - 3500	700	450	250	<1	150	<20		<10	9.5-11.5	30
301-450	3500	10	600 - 3000	600	400	200	<0.1	90	<20		<10	8	25
451-600	3000	8	500 - 2500	500	350	150	<0.05	40	<20		<10	.	20
601-750	2250	3	200 - 1000	400	275	125		30	<1	<0.02	<5	.	20
751- 900	1750	2	150 - 750	300	200	100	<0.01	20	<1		<5	9.5	15
90 -1000	1250	1	125 - 625	200	155	75		8	<1				10
1001- 1500	400	1			N.E			2.5	<1				

Tabla 1. Límites óptimos para las condiciones del agua de alimentación de calderas según la presión que esta trabaje.

Para obtener agua con las especificaciones anteriores, el agua cruda se somete a dos tipos de tratamientos: tratamiento externo (compuesto de un tratamiento primario y uno secundario), y tratamiento interno.

<sup>5</sup> KEMMER, Frank N. and MCALLION John. Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. Mexico: McGraw Hill. 1989. pp 39-5.

### **1.4.1 Tratamiento externo**

En esta etapa se busca adaptar cualquier abastecimiento de agua por medio de la combinación de las diferentes operaciones unitarias, con el fin de reducir y eliminar estas variables.

#### **1.4.1.1 Tratamiento primario**

La turbiedad y el color del agua son principalmente causados por partículas muy pequeñas, llamadas partículas coloidales. Estas permanecen en suspensión en el agua por tiempo prolongado debido a que no presentan la tendencia de aproximarse unas a otras. Para remover estas se recurre al tratamiento primario o clarificación, que es la eliminación o reducción de sólidos suspendidos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua. En términos generales la clarificación consiste en una serie de etapas: coagulación-floculación, sedimentación, filtración y desinfección; cuya finalidad es remover, o reducir a niveles aceptables la materia en suspensión presente en forma de turbiedad y color. Las aguas que contienen cantidades apreciables de sólidos suspendidos no son adecuadas para la alimentación de las calderas, dado que producen depósitos de lodos, taponamiento de las tuberías, formación de espumas e incrustaciones.

##### **1.4.1.1.1 Coagulación**

###### **Objetivo**

El objetivo principal es anular las cargas eléctricas de las partículas coloidales que se encuentran en suspensión.

###### **Definición**

La coagulación es la desestabilización de las partículas coloidales, que se produce al neutralizar las fuerzas que las mantienen separadas. Esto se logra con la adición de

un coagulante químico al agua, y con una mezcla rápida que permita la formación de microflóculos<sup>6</sup>.

### **Tipos de coagulación**

Según el mecanismo de coagulación predominante se presentan dos tipos: por adsorción y por barrido.

- a) **Coagulación por adsorción:** se presenta cuando el agua muestra alta concentración de partículas en estado coloidal; el coagulante es adicionado al agua turbia, los productos solubles de los coagulantes son absorbidos por los coloides y forman los flóculos en forma casi instantánea.
- b) **Coagulación por barrido:** este tipo de coagulación se presenta cuando el agua es clara (presenta baja turbiedad) y la cantidad de partículas coloides es pequeña; en este caso las partículas son atrapadas al producirse una sobresaturación del precipitado de los coagulantes.

### **Sustancias químicas utilizadas**

Las sustancias químicas utilizadas en la coagulación se pueden clasificar en tres categorías:

- a) **Coagulantes:** compuestos de aluminio o de hierro que generalmente pueden producir hidróxidos gelatinosos no solubles y absorber las impurezas.
- b) **Alcalinizantes:** cal viva (óxido de calcio), hidróxido de calcio, hidróxido de sodio (soda cáustica), carbonato de sodio (carbonato sódico), que pueden proporcionar la alcalinidad necesaria para la coagulación.
- c) **Coadyuvantes de la coagulación:** compuestos (arcilla, sílice activada, polielectrólitos, entre otros), que se pueden convertir en partículas más densas y hacer que los flóculos sean más firmes.

---

<sup>6</sup> ARBOLEDA, Jorge V. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. 1era Ed. España: CEPIS.1981. p.p 36.

### **Factores que influyen en la coagulación.**

Es necesario tener en cuenta los siguientes factores con la finalidad de optimizar el proceso de coagulación:

- Tipo de coagulante utilizado.
- pH.
- Turbiedad.
- Sales disueltas.
- Temperatura del agua.
- Condiciones de mezcla.
- Sistemas de aplicación de los coagulantes.
- Tipos de mezcla.

Una explicación mas detallada de cada uno de los factores arriba mostrados se puede ver en el anexo 1.

La interrelación entre cada uno de los factores anteriores, permite predecir cuáles son las cantidades y tipos de coagulantes apropiados.

#### **1.4.1.1.2 Floculación**

##### **Objetivo**

El objetivo de la floculación es proporcionar el contacto entre las partículas, propiciando un aumento de tamaño en los flóculos.

##### **Definición**

La floculación es el fenómeno por el cual las partículas desestabilizadas chocan unas contra otras aglomerándose para formar coágulos mayores. Esto se logra por medio de una mezcla lenta, que permite aumentar de tamaño y peso al floculo.

##### **Tipos de floculantes**

Los flóculos se pueden clasificar según su naturaleza en:

- a) **Floculantes minerales:** son sustancias con un alto porcentaje de sílice. Entre estas, se encuentra la sílice activada, siendo el primer floculante empleado, este tipo de floculante debe ser preparado antes de utilizarse, presenta el riesgo de la gelatinización y produce la neutralización parcial de la alcalinidad de silicato de sodio en solución
- b) **Floculantes orgánicos naturales:** son polímeros naturales extraídos de sustancias animales o vegetales, tales como proteínas, carbohidratos y polisacáridos
- c) **Floculantes orgánicos de síntesis:** son macromoléculas de una gran cadena, obtenidos por asociación de monómeros sintéticos con una masa molecular elevada, estos se clasifican según su carga en: aniónicos, catiónicos y neutros. Los aniónicos generalmente son copolímeros de la acrilamida y del ácido acrílico, los catiónicos son compuestos de copolímeros de acrilamida más un monómero catiónico y neutros o no iónicos son poliacrilamidas.

### **Parámetros de la floculación**

Los parámetros que caracterizan la floculación son los siguientes:

- Grado de agitación proporcionada: mecánica o hidráulica.
- Gradiente de velocidad (energía necesaria para producir la mezcla).
- Número de colisiones (choque entre microfloculos).
- Tiempo de retención (tiempo que permanece el agua en la unidad de floculación).
- Densidad y tamaño de los floculos.
- Volumen de lodos (los floculos formados no deben sedimentar en las unidades de floculación).

### **Observaciones**

Es importante que los procedimientos de coagulación y floculación sean utilizados correctamente, ya que la producción de un floculo pequeño o ligero, produce una decantación insuficiente que al llegar a los filtros aumenta la velocidad de

colmatación, forzando al sistema a lavados frecuentes. Por otro lado, cuando el flóculo es frágil, este se rompe en pequeñas partículas que pueden atravesar el filtro y alterar la calidad del agua producida.

#### **1.4.1.1.3 Sedimentación**

##### **Objetivo**

El objetivo de la sedimentación es remover las partículas sólidas de una suspensión.

##### **Definición**

El proceso de sedimentación en el tratamiento de agua, es la operación por la cual se remueven las partículas sólidas de una suspensión por medio de la gravedad. En algunos casos se denomina clarificación o espesamiento<sup>7</sup>.

##### **Tipos de sedimentación**

La sedimentación ocurre de manera diferente según la naturaleza de los sólidos, su concentración y su grado de floculación. Clasificándolos según el tipo de partículas se puede dividir en:

- a) **Sedimentación de partículas discretas:** se entiende por sedimentación de partículas discretas, aquella en que los sólidos no cambian de densidad, tamaño o forma al descender en el líquido y sedimentan con una velocidad de caída constante.
- b) **Sedimentación de partículas aglomerables:** es aquella en que los sólidos al descender se adhieren o aglutinan entre sí, mediante mecanismos de floculación, precipitación, arrastre o barrido, cambiando de velocidad de sedimentación, tamaño, forma y peso durante su descenso a través del líquido<sup>8</sup>.

---

<sup>7</sup> ROMERO R., Jairo A. Acupurificación: diseño de sistemas de purificación de aguas. Santa Fe de Bogotá, D.C. Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 1995. p.p. 111.

<sup>8</sup> ARBOLEDA Jorge. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. 1era Ed. España: CEPIS.1981. p.p. 206

### **Observaciones**

La sedimentación es la preparación del agua hacia el filtro; cuanto mejor sea la decantación, más eficiente será la filtración, en consecuencia, para tener una sedimentación más eficiente, se deben tomar las siguientes precauciones:

- Correcta aplicación de coagulantes al pH óptimo (incluye la aplicación de alcalinizante, en caso de que sea necesario)
- Mezcla rápida eficaz (coagulación)
- Mezcla lenta con el fin de producir flóculos grandes y pesados (floculación)
- Limpieza rutinaria de los decantadores.

Si el suministro de agua tiene sedimentos de tamaño grande, es decir de fácil asentamiento, es aconsejable utilizar un tanque de presedimentación antes de la etapa de coagulación.

#### **1.4.1.1.4 Filtración**

##### **Objetivo**

El objetivo de la filtración es separar las partículas sólidas que no han sido removidas en las etapas anteriores.

##### **Definición**

Consiste en hacer pasar el agua a través de un medio poroso, en el cual actúan una serie de mecanismos de remoción cuya eficiencia depende de las características de la suspensión (agua más partículas) y del medio poroso.

##### **Factores que influyen en la filtración<sup>9</sup>**

La eficiencia de la remoción de las partículas coloidales en el lecho filtrante está relacionada con las siguientes características de la suspensión:

---

<sup>9</sup> De VARGAS, Ligia. Tratamiento de agua para consumo humano. 1era. Ed. Lima: CEPIS-OPS. 2004. p.p. 112-115.

- El tipo de partículas suspendidas, la cual está relacionada con el tamaño y densidad de las partículas.
- Temperatura del agua
- Concentración de partículas en el efluente.

Las características del medio filtrante es otro factor importante que influye en la filtración, entre los cuales se pueden mencionar los siguientes:

- Tipo y tamaño efectivo del medio filtrante.
- Coeficiente de uniformidad, esfericidad y peso específico de los granos del material filtrante.
- Espesor del lecho filtrante.

### **Observaciones**

- a. El filtro comienza a funcionar mal cuando las condiciones normales no son las correctas. Las causas de perturbación en el lecho filtrante pueden ser ocasionadas por los siguientes factores:
  - Dosis incorrectas de coagulantes, mala floculación y mala decantación, que hacen que el filtro reciba material gelatinoso y materia orgánica que van a obstruir el lecho filtrante.
  - Formación de bolas de lodo provenientes de material gelatinoso (organismos, hidróxido de aluminio y arena). La dosificación inadecuada y el lavado deficiente de los filtros producen la compresión del lecho filtrante y la consecuente compactación de las bolas de lodo.
  - Presencia de algas y otros microorganismos que llegan a los filtros y se reproducen en ellos.
  - El pH de floculación no es óptimo; los coágulos se cargan eléctricamente y al repelerse no floculan de manera correcta.
- b. En el control sistemático del color y turbidez del agua filtrada en cada unidad es importante saber que un aumento del color y de la turbidez en el efluente del

equipo puede significar: necesidad de lavado, filtro con grietas o desplazamiento de la arena contra las paredes.

El proceso final de filtración desempeña una labor importante puesto que provee el acabado final al tratamiento primario.

#### **1.4.1.1.5 Desinfección**

##### **Objetivo**

Eliminar las bacterias y virus patógenos presentes en el agua.

##### **Definición**

Se define como una operación unitaria en la cual se lleva a cabo la eliminación de microorganismos mediante la adición de un agente químico al agua. Por lo general el tratamiento del agua se realiza con cloro y por ello, el término desinfección comúnmente se substituye por cloración.

##### **Tipos de la cloración<sup>10</sup>**

1. **Precloración:** es la aplicación del cloro en el agua antes de cualquier otro tratamiento, la precloración se realiza con los siguientes objetivos:
  - a. Para controlar o limitar el desarrollo de microorganismos en los decantadores y filtros (es decir, para evitar la proliferación de algas y otras plantas en las paredes del decantador y del filtro, además de retardar la fermentación del lodo).
  - b. Para mejorar las condiciones de coagulación; en algunos casos, se utiliza menos coagulantes.

---

<sup>10</sup> De VARGAS, Ligia. Tratamiento de agua para consumo humano. 1era. Ed. Lima: CEPIS-OPS. 2004. p.p. 493

c. Para reducir el número de bacterias en una instalación que trata agua muy contaminada (cuando el número de bacterias asciende a 5.000 por 100 mililitros, se recomienda la precloración).

d. Reducción de la concentración del amonio libre en el agua.

Por lo general, la precloración exige dosis elevadas (una ppm o más) debido a la presencia de grandes cantidades de impurezas concentradas.

2. **Poscloración:** consiste en la aplicación de cloro en el agua después del tratamiento. Esta aplicación completa la desinfección previa y proporciona el residual que se va a mantener.

3. **Cloración adicional:** es la aplicación de cloro en el agua en uno o más puntos del sistema de distribución después de la poscloración. Se utiliza para asegurar el mantenimiento de un residual de cloro adecuado, constituyéndose en una protección adicional para evitar que las bacterias ingresen a la etapa posterior (suavización).

### **Observaciones**

La etapa de desinfección es esencial en cualquier agua cruda utilizada para la producción de vapor. Una de las fallas de los ablandadores para producir la dureza residual deseada en el agua tratada, obedece a la carencia de eliminación de contaminantes orgánicos tales como bacterias y virus (parásitos, huevos, larvas). La dosis de reactivos requeridos para las etapas de coagulación, suavización, e incluso la etapa de desmineralización, se ven afectadas de forma directa por las impurezas orgánicas, aumentando así su dosificación.

#### **1.4.1.2 Tratamiento secundario**

El tratamiento secundario como parte final del tratamiento externo consiste en una serie de etapas: suavización, filtración, desmineralización y desgasificación; cuya

finalidad es remover o reducir los parámetros presentes en forma de dureza, alcalinidad, gases, sílice y sólidos disueltos, siendo no adecuados para la alimentación de las calderas, dado que producen depósitos, incrustaciones, corrosión, formación de espuma y arrastre.

#### **1.4.1.2.1 Suavización**

##### **Objetivo**

Eliminar la dureza de calcio y magnesio presente en el agua.

##### **Definición**

La suavización consiste en la remoción de la dureza de carbonatos y bicarbonatos a través de la transferencia de iones, efectuada mediante la precipitación química y el intercambio iónico.

##### **Mecanismos de transferencia de iones**

Los mecanismos utilizados en la suavización o ablandamiento del agua son:

1. **Precipitación química:** consiste en adicionar al agua una sustancia química soluble cuyos iones reaccionan con los de la sustancia que se desea remover formando un precipitado. Tal es el caso de la remoción de hierro y de dureza carbonatada (ablandamiento), mediante la adición de cal. Ver el anexo 2. Existen dos métodos de ablandamiento por precipitación química:
  - a. **Ablandamiento con cal en frío**<sup>11</sup>: es un proceso de remoción de calcio y magnesio a una temperatura promedio menor que la temperatura de ebullición (entre 21 y 80 °C). Este proceso se logra gracias a la adición de cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y un coagulante que ayude a la precipitación. Ver el anexo 2.

---

<sup>11</sup> POWELL, Sheppard. Acondicionamientos de agua para la industria. 1era Ed. México: Limusa. 1974. p.p. 117.

- b. **Ablandamiento con cal en caliente:** este proceso difiere del anterior, en que este se lleva a cabo a una temperatura de ebullición o superior (100 °C o mayores). En este tratamiento se calienta el agua, se trata con una cantidad dada de reactivo, se asienta y se filtra. Los precipitados formados a estas temperaturas son mayores y más pesados, puesto que el agua caliente es menos viscosa, el asentamiento toma lugar más rápidamente, de manera que este proceso no necesita de coagulante.

### **Observación**

El ablandamiento en caliente es mucho más efectivo que en frío, debido a que la mayor parte de las sustancias formadoras de dureza son menos solubles en agua caliente que en agua fría, permitiendo así, al elevar la temperatura, mayor precipitación en menor tiempo y con menor cantidad de reactivo. Además, en el proceso en caliente no es necesario agregar cal en exceso para lograr la eliminación del bióxido de carbono libre en el agua cruda como ocurre en el proceso en frío, gracias a que este se desprende por calentamiento del agua antes de que se añadan los reactivos.

### **2. Intercambio iónico**

Como su nombre lo indica, este proceso consiste en un intercambio de iones entre la sustancia que se desea remover y un medio sólido insoluble a través del cual se hace pasar el flujo, en este caso, agua. Estas resinas de intercambio están constituidas por resinas sintéticas, a las cuales se les han incorporado grupos ionizables, que son los que participan en las reacciones de intercambio. La figura 1 Muestra un diagrama que clasifica las resinas catiónicas según el grupo funcional.

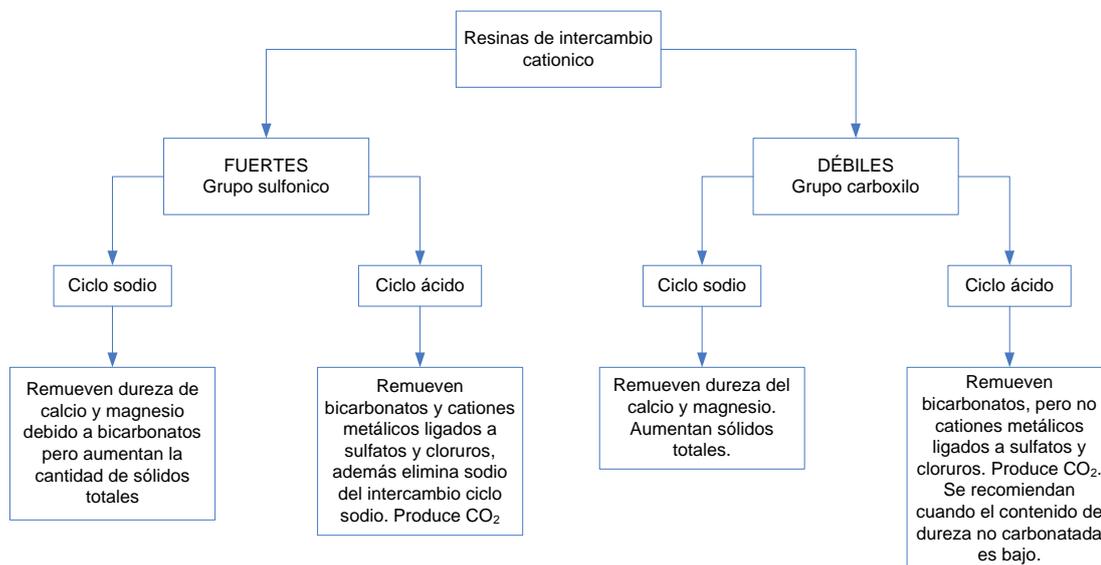


Figura 1. Clasificación de las resinas catiónicas según su grupo funcional.

Para el ablandamiento del agua se utilizan resinas de intercambio catiónico ciclo sodio (zeolitas). En este proceso se realiza un intercambio de iones de calcio y magnesio por iones de sodio, al pasar el agua a través de un lecho poroso. En el intercambio de sodio no se reduce ni alcalinidad, ni salinidad, ni sílice. Cuando la resina se satura de iones de calcio y magnesio, se regenera introduciéndola en un recipiente con una solución saturada de sal. Ver el anexo 2.

### Observaciones

El agua que se va a procesar por intercambio iónico deberá contener menos de 10 ppm de sólidos suspendidos para evitar el ensuciamiento del intercambiador, así como los problemas de operación<sup>12</sup>. Por ello se recomienda utilizar un filtro antes del intercambio. Los filtros usados en el proceso de ablandamiento cal-zeolita son filtros de presión. El medio filtrante más usado en estos tipos de proceso, es antracita; esto con el fin de evitar que las aguas fuertemente alcalinas, especialmente cuando se

<sup>12</sup> KEMMER, Frank N. and MCALLION John. Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. México: McGraw Hill. 1989. pp 39-8.

encuentran calientes, solubilizan sílice de materiales silicosos como la arena, ocasionando contaminación en las aguas para calderas. El bajo contenido de sílice en los granos de antracita hacen que este material sea apto para tal servicio.

### 3. Procesos de ablandamiento en frío y en caliente

A continuación se da una clasificación de los tratamientos usados en el ablandamiento y una descripción de su operación:

- **Suavización en frío cal-carbonato de sodio.** En este proceso es necesario agregar un exceso de cal para eliminar el bióxido de carbono libre en el agua. El exceso de cal reacciona primero con el  $\text{CO}_2$  antes de empezar el ablandamiento, formando bicarbonatos de calcio, eliminados después con la cal restante. La dureza de bicarbonato de magnesio se reduce precipitándola como hidróxido de magnesio ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ). Los sulfatos y cloruros de magnesio al reaccionar con la cal, producen las sales correspondientes de calcio aumentando la cantidad de dureza de no carbonatos, esta dureza es eliminada por medio de la adición de carbonato de sodio. Ver el anexo 2.
- **Suavización en frío cal-zeolita.** Este proceso consiste en la reducción de dureza de carbonatos por la adición de cal hidratada y usualmente coagulante, para acelerar la sedimentación del carbonato de calcio formado. El efluente se hace pasar a continuación por suavizadores de zeolita, en los que se lleva a cabo el ablandamiento completo. Se acostumbra filtrar el agua pretratada, antes de alimentar las unidades de zeolita<sup>13</sup>. Ver el anexo 2.
- **Suavización en caliente cal-carbonato de sodio.** Es un proceso continuo en el cual el agua se calienta, se trata con cantidades dadas de reactivo químico, se asienta y se filtra. Este proceso es utilizado en la eliminación de dureza, alcalinidad y sílice. Las sustancias utilizadas son cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) y soda ash ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Ver el anexo 2.

---

<sup>13</sup> POWELL, Sheppard. Acondicionamientos de agua para la industria. 1era Ed. México: Limusa. 1974. p.p. 134.

- **Suavización en dos pasos cal caliente–zeolita.** El agua se calienta, se agrega la cal, luego se pasa por filtros de antracita, el efluente es llevado a unas resinas de intercambio catiónico ciclo sodico donde es eliminada la dureza de no carbonatos y la dureza residual que no ha sido reducida en la etapa anterior. Cuando la resinas se agotan se proceden a regenerar, lavar y enjuagar a la misma temperatura del agua tratada, para evitar daños por choques térmicos en las resinas.

### **Observaciones**

1. La eliminación de sílice se presenta en todos los procesos anteriores. Cualquier cantidad de dureza de magnesio que se remueva en el proceso de ablandamiento (como  $Mg(OH)_2$ ) eliminará cierta cantidad de sílice. Si esta es insuficiente, una mayor reducción puede llevarse a efecto usando cal dolomítica hidratada ( $Ca(OH)_2 + MgO$ ) y/o magnesia activada ( $MgO$ ).
2. El proceso de ablandamiento por zeolita no reduce el contenido de sulfatos, cloruros ni bicarbonatos, estos aparecen en el efluente como sales de sodio. Al efectuarse el intercambio de calcio y magnesio por sodio en la zeolita aumenta la cantidad de sólidos totales (esto gracias a que un ion de  $Ca^{++}$  o  $Mg^{++}$  es sustituido por dos de sodio  $Na_2^+$ ) siendo necesario para su eliminación de las etapas posteriores.

#### **1.4.1.2.2 Desalcalinización**

##### **Objetivo**

El objetivo de la desalcalinización es la eliminación de los bicarbonatos con el fin de evitar la descomposición en bióxido de carbono dentro de la caldera.

##### **Definición**

La desalcalinización consiste en la remoción de bicarbonatos presentes en el agua que no han sido eliminados en el ablandamiento con cal.

### **Mecanismo de intercambio iónico.**

Los mecanismos utilizados en la desalcalinización son:

- a. La precipitación química con cal (etapa de suavización).
- b. Resinas de intercambio catiónico ciclo hidrogeno. En este proceso los iones de calcio, magnesio y sodio son sustituidos por hidrogeno. Los cationes unidos a sales minerales (cloruros, sulfuros y nitratos) contenidos en el afluente son intercambiados formando sus correspondientes ácidos ( $H_2SO_4$ ,  $HCl$ ,  $HNO_3$ ). El ácido carbónico no aparece en el efluente ya que es eliminado en esta resina en forma de bióxido de carbono y agua. Estos intercambiadores son ampliamente utilizados para remover **bicarbonatos** (generadores de alcalinidad) y sólidos totales, además de ser empleados como primera etapa en un sistema de desmineralización. Cuando la resina ciclo ácido (hidrogeno) se ha agotado, aumenta la fuga de sodio y disminuye el contenido de sus respectivos ácidos en el efluente. La regeneración se efectúa con un ácido mineral. Los más usados son el sulfúrico y el clorhídrico. Ver anexo 2.

### **Tratamiento de los efluentes del intercambiador catiónico ciclo hidrogeno**

Los efluentes procedentes de intercambiador ciclo Hidrogeno contienen cantidades variables de bióxido de carbono y ácidos minerales como subproducto del ablandamiento y eliminación de bicarbonatos presentes en el agua. Estos subproductos son los causantes de la corrosión dentro de las calderas. El bióxido de carbono es eliminado en la degasificación y la acidez se neutraliza o elimina del agua con los siguientes tratamientos:

#### **1. Proceso por neutralización:**

- Con álcali, usualmente soda cáustica ( $NaOH$ ).
- Proceso de intercambio catiónico ciclo hidrogeno e intercambio catiónico ciclo sodio (corriente dividida).
- Proceso de intercambio ciclo hidrogeno combinado con agua cruda.

## 2. Proceso por eliminación

- Intercambio aniónico o desmineralización del agua.

Las rutas que se pueden llevar a cabo para tratar este tipo de efluentes se ilustran en la figura 2.

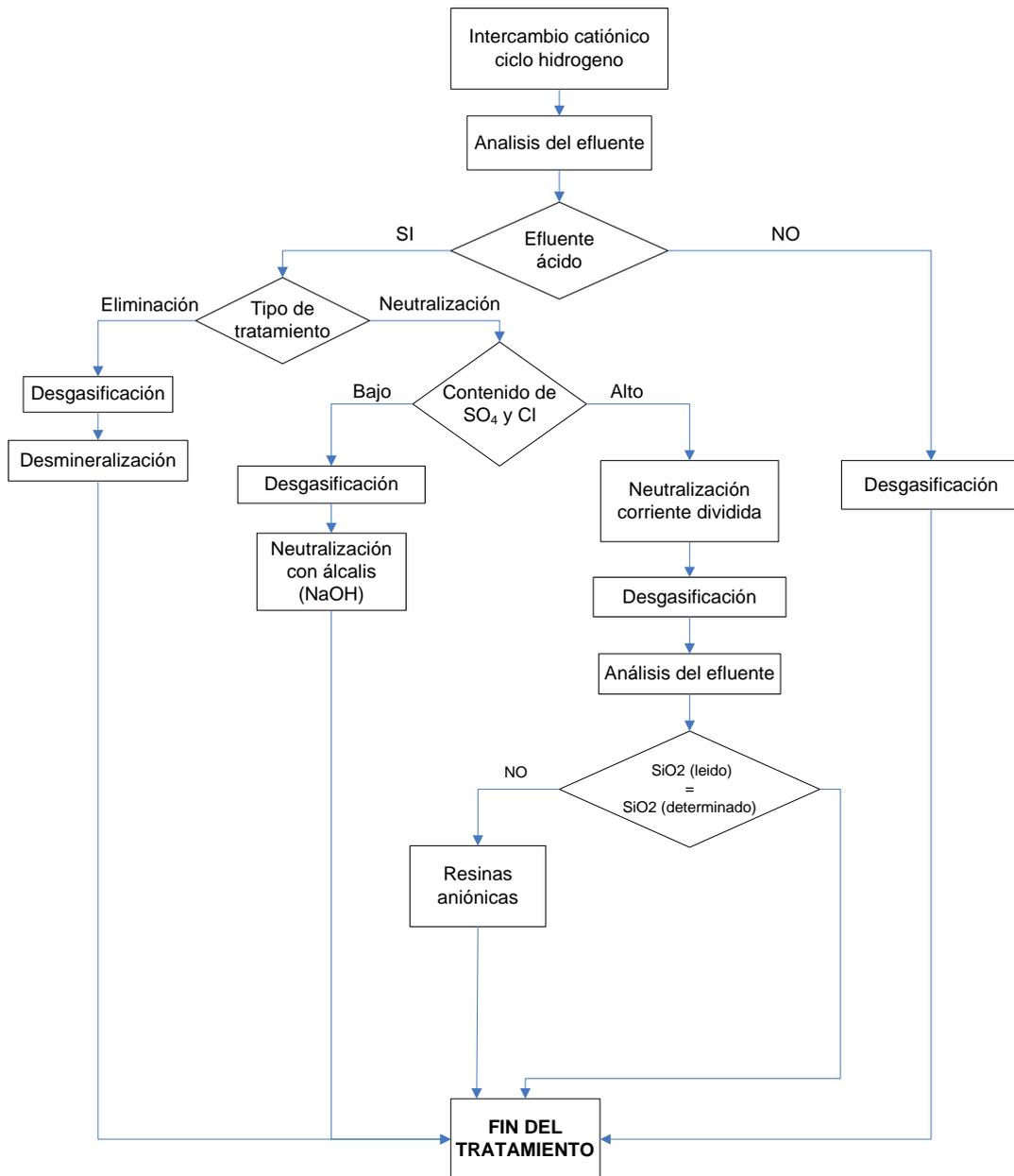


Figura 2. Diagrama de flujo del tratamiento del efluente de las resinas de intercambio ciclo hidrógeno.

### **Observación**

Por simplicidad en los anteriores procesos, solo se tomaron en cuenta los cationes de calcio, magnesio y sodio, y los aniones bicarbonatos, sulfatos y cloruros, pero hay que tener presente, que pueden estar otros cationes como hierro, manganeso y potasio, los cuales también son eliminados en el proceso catiónico ciclo hidrogeno. Así como también se encuentran otros aniones: carbonatos, hidróxidos y nitratos, entre otros. En el caso de los nitratos el subproducto es ácido nítrico, mientras que el hidróxido reacciona con hidrogeno para formar agua. Los carbonatos producen la mitad del bióxido de carbono al reaccionar con la resina de hidrogeno y los demás aniones presentes salen en el efluente en forma de ácidos. Ver anexo 2.

#### **1.4.1.2.3 Desgasificación**

##### **Objetivo**

Eliminar gases disueltos en el agua de alimentación tales como O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, entre otros, causantes de corrosión.

##### **Definición**

El proceso de desgasificación se basa en la remoción de estos gases a través de un tratamiento mecánico y un tratamiento químico.

##### **Mecanismos utilizados en la eliminación de gases**

- **Desgasificación mecánica.** Este mecanismo se fundamenta en el equilibrio liquido-vapor que presentan los gases en contacto con un líquido, el cual establece que, la solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión parcial e inversamente proporcional a la temperatura. Por lo tanto para disminuir el contenido de gases indeseables en el agua, está se somete a calentamiento. Al elevarse la temperatura (98°C) el contenido de los gases en el agua se reduce y son expulsados a la atmósfera.

### **Observaciones**

Los carbonatos y bicarbonatos cuando se encuentran combinados químicamente para formar bases, no son removidos por el calor y son removidos como CO<sub>2</sub> solamente hasta el grado en que se encuentran disociados. Además el grado de disociación depende del valor del pH del agua, la presión de vapor del agua sobre el líquido, entre otros factores. El CO<sub>2</sub> es más soluble y además presenta mayor complicación para ser removido que el O<sub>2</sub>. Este proceso se lleva a cabo que el agua ingrese a la caldera.

- **Desgasificación química.** Este tratamiento se basa en la adición de productos químicos específicos que reaccionan con el O<sub>2</sub> disuelto en el agua de alimentación, convirtiéndolo en un producto soluble e inofensivo para los equipos y accesorios de la caldera. Los químicos más comunes utilizados son: el sulfito de sodio (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>) y la hidracina (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>).

### **Observaciones**

Este mecanismo complementa la remoción llevada a cabo por la desgasificación mecánica ya que esta no remueve el O<sub>2</sub> completamente. La desgasificación química aumenta el contenido de sustancias disueltas en el agua de alimentación por tanto es susceptible a las condiciones de operación de la caldera, sobretodo en aquellas cuyas presiones de operación son altas (P>450psi). Los dos reductores de oxígeno (sulfito de sodio e hidracina) tienen sus ventajas y desventajas, por lo que deben ser tenidas en cuenta antes de usarse. La alimentación de los productos químicos se lleva a cabo en el tanque de almacenamiento del desgasificador.

#### **1.4.1.2.4 Desmineralización**

##### **Objetivo**

Remover los sólidos disueltos presentes en el agua en forma de aniones.

### Definición

Es un proceso mediante el cual se eliminan los aniones (sulfatos, cloruros, nitratos, sílice y bióxidos de carbono) presentes en forma de ácidos fuertes y ácidos débiles en el agua a tratar.

### Mecanismo de intercambio

En la figura 3 se encuentra la clasificación de las resinas aniónicas de acuerdo a su grupo funcional y su utilidad.

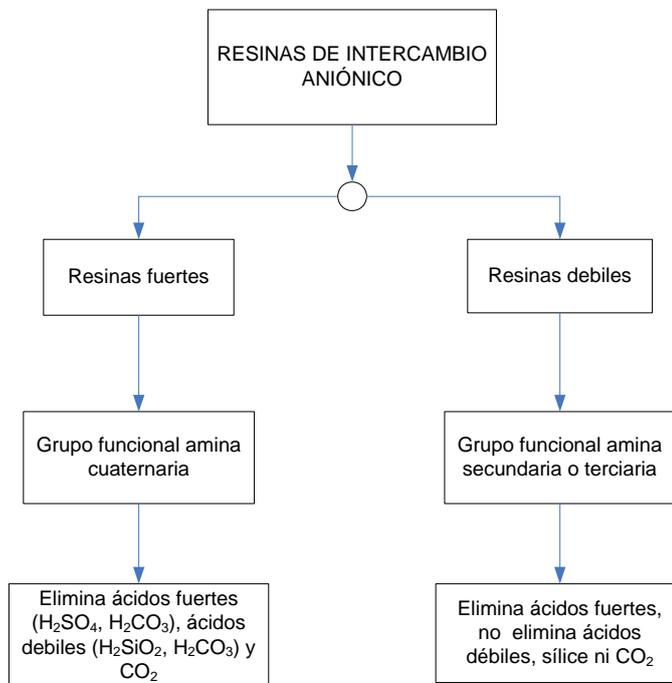


Figura 3. Clasificación de las resinas aniónicas de acuerdo a su grupo funcional y su utilidad.

Los principales intercambiadores aniónicos utilizados en el proceso de desmineralización son:

- **Intercambiadores aniónicos débiles<sup>14</sup>**: eliminan los aniones de los ácidos fuertes (HCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>NO<sub>3</sub>) y materia orgánica, no funcionan a pH superior a 6 y no eliminan ácidos débiles (ácido carbónico) ni sílice. Estas resinas

cuando se saturan pueden regenerarse con cualquier álcalis (amoníaco, soda ash, soda cáustica)

- **Intercambiadores aniónicos fuertes:** eliminan cualquier tipo de ácido ya sea fuerte o débil, operan a cualquier pH y la materia orgánica la absorben de forma irreversible perdiendo capacidad. Para su protección se usan previamente resinas aniónicas débiles. Estas resinas solo se regeneran con un álcali fuerte (soda cáustica).

### **Observación**

Las resinas aniónicas no intercambian cationes, cualquier fuga que se presente en la resina catiónica tipo ácido, saldrá en el afluente como alcalinidad.

### **Etapas del proceso de intercambio iónico<sup>15</sup>**

El proceso de intercambio iónico se divide en dos etapas:

- Ciclo del servicio o etapa del tratamiento del agua en sí.
- Ciclo de regeneración de las resinas: comprende los siguientes pasos:
  1. Contralavado; cuyo fin es fluidizar las resinas, eliminar suciedades acumuladas en ellas (flóculos, barros, entre otros), reclasificarlas y eliminar canalizaciones en el lecho.
  2. Regeneración propiamente dicha, para volver la resina a su capacidad de intercambio. La cantidad de regenerante dependerá de la calidad del agua que se quiera obtener y de la cantidad de resinas en la unidad.
  3. Enjuague; elimina la mayor parte del exceso de regenerante, a través de un flujo de agua relativamente pequeño.

---

<sup>14</sup> Fair & Geyer. Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. Editorial Limusa. 1997 p.p 76

<sup>15</sup> GIL, Antonio. Tratamiento de agua para caldera. 1era Ed. México: NALCO. 2000. p.p III.10-III.11

4. Lavado, el cual termina de eliminar el exceso de regenerante que queda de la etapa anterior, se hace con un flujo mayor que el enjuague pero durante un tiempo mas largo.

#### **1.4.2 Tratamiento interno**

Para continuar con el acondicionamiento del agua, se lleva a cabo un tratamiento interno que basa su proceso en la adición de productos químicos. Este se considera como un complemento del tratamiento externo, que depende del grado de purificación del agua y de la presión de la caldera. Con este proceso se busca controlar y prevenir la formación de incrustaciones, eliminar el uso de limpieza química, reducir los niveles de corrosión en las líneas y equipos donde se forma el condensado, y mantener limpia las superficies de transferencia de calor.

El tratamiento interno consta de cuatro programas químicos: programa de coagulación, programa de fosfatos, programa de fosfatos coordinados, y programa de quelantes. Los cuales se pueden utilizar individuales o combinados; teniendo en cuenta sus ventajas, desventajas y las condiciones de operación de la caldera. Además se debe tener en cuenta el acondicionamiento de los lodos (taninos, ligninas, entre otros.) producto del tratamiento.

Una vez establecido el programa se realiza un seguimiento que no solo consta de los sólidos precipitados, sino también de algunos factores que sí bien no son catalogados como impurezas, se presentan en el agua como aditivos químicos, como es el caso de la hidracina y de los químicos respectivos por cada programa, los cuales deben mantenerse a un nivel determinado así como del pH y la alcalinidad.

### **1.4.2.1 Programa de coagulantes**

#### **Objetivo**

El propósito fundamental de este programa es ablandar el agua dentro de la caldera induciendo la precipitación del calcio y el magnesio.

#### **Definición**

El programa de coagulantes o también llamado de carbonatos se basa en la adición de soda cáustica (NaOH) y soda ash (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) al agua de alimentación, buscando que estos productos químicos reaccionen con la dureza residual presente, ya que el aumento de la temperatura y la concentración en el agua causa la precipitación de diversos compuestos, especialmente aquellos cuya solubilidad disminuye con el incremento de la temperatura.

#### **Mecanismo**

La dureza del calcio y el magnesio precipitan como CaCO<sub>3</sub> y Mg(OH) mediante la adición de Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> y Na(OH). Las reacciones básicas del tratamiento se presentan en el anexo 2.

Se debe tener en cuenta para mantener un control sobre el programa, la relación entre el CO<sub>3</sub> y SO<sub>4</sub>, tomando como parámetros la concentración de sólidos disueltos en el agua de caldera y la alcalinidad debida a carbonatos e hidróxidos.

En la tablas 2 y 3 del anexo 3 se muestran los controles limites en el programa de coagulación aplicables a las condiciones de operación de la caldera.

Una vez formado los precipitados, estos se deben acondicionar mediante la aplicación de productos orgánicos (taninos, lagninos, entre otros) que controlen el crecimiento de cristales, formando lodos floculantes, esponjosos, no adherentes, que puedan extraerse fácilmente por desagüe (purga).

### **Observaciones de control del mecanismo y operación**

- La adición de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  para llevar a cabo el tratamiento fomenta la formación de  $\text{CO}_2$  generando corrosión en las líneas de retorno.
- El proceso de añadir continuamente impurezas y de sacarse agua pura por efecto de la vaporización, trae como consecuencia un aumento de la concentración de sólidos disueltos y en suspensión, que sobrepasa los límites de concentración en la caldera. Esto aumenta directamente la cantidad de agua que se debe sacar de la caldera para diluir estas concentraciones. Esto es lo que se conoce como purga.
- Este programa no se utiliza en calderas que operen a presiones superiores a 350 psig, es decir, se aplica a calderas de baja presión.
- El tratamiento de coagulantes se emplea en aguas de alimentación con alto nivel de pureza. Ver anexo 3.

#### **1.4.2.2 Programa de fosfatos**

##### **Objetivo**

El objetivo del programa es remover el calcio y el magnesio para evitar las incrustaciones de sulfato y silicato mediante la aplicación de fosfatos.

##### **Definición**

Se basa en la adición de fosfatos, manteniendo una concentración del ion  $\text{PO}_4^{-3}$  soluble en el agua de caldera.

##### **Mecanismo**

La adición del fosfato para llevar a cabo el ablandamiento del agua, precipita la dureza del calcio como fosfato básico de calcio ( $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$ ) o como fosfato tricalcico ( $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ) el cual a diferencia del primero es muy poco soluble, más adherente y forma un lodo menos fluido. En el anexo 2 se presentan las reacciones básicas. La adición de cualquier fosfato para llevar a cabo el ablandamiento, puede variar según la causticidad del agua de caldera, es decir según la alcalinidad cáustica que este

presente. La selección del fosfato puede variar desde ácido fosfórico hasta fosfato trisódico.

### **Observaciones del control del mecanismo y operación**

Cualquiera que sea la forma de fosfato aplicado, debe recordarse que solo el ion ortofosfato ( $\text{PO}_4^{-3}$ ) puede precipitar fosfato tricalcico. Igualmente cualquiera que sea la forma utilizada de fosfato, estos se transforman a ortofosfatos bajo las condiciones de temperatura y alcalinidad del agua de caldera. Además la adición de estos productos químicos es restringida ya que depende del producto empleado y en que lugar se adicione.

- a) Si la aplicación se hace directamente al tambor de vapor, el producto debe ser un ortofosfato, para que la precipitación del calcio sea inmediata. Contrariamente, la adición de un polifosfato podría retardar un poco la reacción.
- b) Si la aplicación se hace a la línea de agua de alimentación, el producto debe ser un polifosfato, para evitar la precipitación de calcio, que resultaría si se aplicara un ortofosfato<sup>16</sup>.

Ocurren reacciones secundarias que deben evitarse porque inducen a la formación de precipitados tales como el fosfato de magnesio,  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ , el cual forma conglomerados que aumenta la adherencia de los lodos.

En la tabla 6.3 se muestran los niveles de control límites de los parámetros a los cuales se desarrollará el programa.

#### **1.4.2.3 Programa de fosfato coordinado**

##### **Objetivo**

Remover dureza de cálcica del agua.

---

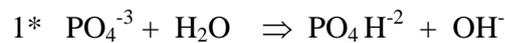
<sup>16</sup> GIL, Antonio. Tratamiento de agua para caldera. 1era Ed. México: NALCO. 2000. p.p IV.10

### **Definición**

Este programa se basa también en la adición de fosfato pero se limita a la utilización de fosfato trisódico ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ) y fosfato disódico ( $\text{NaHPO}_4$ ), con los cuales se busca controlar el pH al mismo tiempo que este reacciona con cualquier dureza cálcica en el agua.

### **Mecanismo**

Las reacciones en la que se basa el programa son:



La reacción 1\* se desplaza hacia la derecha a un pH de 10 y al aumentar el pH a 11 se desplaza hacia la derecha en un 95%, es decir cuando el pH repasa de 10 la producción de  $\text{OH}^-$  disminuye, evitando así el incremento de la alcalinidad del agua la cual causa corrosión cáustica porque el  $\text{NaOH}$  se concentra en las superficies calientes del metal. El producto de la primera reacción ( $\text{PO}_4\text{H}^{-2}$ ) no se hidroliza ni se disocia a los pH de operación de la caldera manteniendo una estabilidad. En la tabla 6.4 del anexo 3 se muestra el control coordinado pH-fosfato del agua de caldera.

### **Observaciones**

Un programa de esta naturaleza exige aguas de alimentación extremadamente puras y calidad muy consistente para poderlo controlar. Es aplicable a calderas que manejan presiones superiores 1200 psig con altas ratas de transferencia de calor y su mayor ventaja es el control o prevención de la corrosión cáustica.

#### **1.4.2.4 Programa de quelantes**

##### **Objetivo**

El objetivo es formar sustancias solubles de calcio y de magnesio, es decir en vez de precipitarlos como en los programas anteriores, este por el contrario no produce conglomerados y los mantiene disueltos en el agua de la caldera.

##### **Definición**

El programa se define como la adición de sustancias quelantes, las cuales son agentes químicos de bajo peso molecular, solubles en el agua que se combinan con cationes (Ca, Mg, Fe, Cu) para formar complejos de iguales características y estables al calor.

##### **Mecanismo**

La molécula de quelante reacciona con la dureza enlazando los iones de Ca y Mg a su estructura molecular. La reacción básica se en el anexo 2 y en el anexo 3 se muestran los controles limites de quelato residual aplicables a las condiciones de operación de la caldera, los demás parámetros son iguales al de fosfato coordinado.

##### **Observaciones**

El programa es aplicable a sistemas con agua de alimentación de dureza inferior a 2 ppm y presiones de operación por debajo de los 1500 psig. Los requerimientos de alcalinidad, STD, son los mismos que en los programas de fosfato. Se debe tener en cuenta que los quelatos no tienen acción sobre la sílice y esta debe controlarse con otro programa o reducir su contenido en tratamiento externo. En cuanto a la adición de estos agentes químicos una sobredosis es causante de corrosión ya que estos pueden arrastrar las capas de magnetita que protegen el hierro que forma parte de la estructura del material. Además aun cuando los complejos de Ca y Mg son muy estables bajo las condiciones de operación de la caldera los aniones como  $\text{SO}_4$ ,  $\text{SiO}_3$ , y  $\text{OH}^-$ , compiten con los quelatos para formar sales de Ca y Mg, por tanto la

combinación de quelatos con polímeros sintéticos se utiliza como medio corrector porque minimiza los efectos de los aniones competitivos.

#### **1.4.2.5 Acondicionamiento de lodos**

El acondicionamiento de lodos complementa el trabajo de los programas que inducen la precipitación de la dureza residual.

##### **Objetivo**

Prevenir la formación de cristales grandes, haciendo que la materia insoluble permanezca finamente dispersa en el agua, sea más fluida y pueda extraerse más fácilmente.

##### **Definición**

Los lodos corresponden comúnmente a compuestos de calcio, magnesio y sílice, entre otros, los cuales son productos de la precipitación en el interior de las calderas.

##### **Acondicionadores de lodos**

Son productos naturales o sintéticos. Dentro de los naturales existen los taninos, ligninas y almidones. Dentro de los sintéticos se encuentran los polímeros<sup>17</sup>.

##### **Mecanismo**

Los acondicionadores modifican o distorsionan el recubrimiento de los cristales, recubriendo el núcleo, previniendo así la formación de una incrustación bien trenzada y originando cristales débiles<sup>18</sup>.

---

<sup>17</sup> GIL, Antonio. Tratamiento de agua para caldera. 1era Ed. México: NALCO. 2000. p.p IV.7

<sup>18</sup> POWELL, Sheppard. Acondicionamientos de agua para la industria. 1era Ed. México: Limusa. 1974. p.p. 306

### **Observaciones de Operación**

Como complemento de los programas se debe tener en cuenta que el uso de materiales orgánicos depende de las condiciones de presión a la que opera la caldera, es decir, en aguas de alimentación que opera a presiones por debajo de los 250 psi. Los acondicionadores son viables, de lo contrario se mantiene discreción en el uso de estos productos.

## **2. RESULTADOS Y ANALISIS**

En este capítulo se presenta la metodología desarrollada, en ella se considero un proceso secuencial en el cual se fueron eliminando las variables sensibles, definidas anteriormente, mediante la combinación de las etapas sugeridas en la revisión bibliografica.

### **2.1 METODOLOGIA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS**

Una planta de tratamiento es una secuencia de operaciones o procesos unitarios, convenientemente seleccionados con el fin de remover totalmente los contaminantes microbiológicos presentes en el agua cruda y parcialmente los físicos y químicos, hasta llevarlos a los límites aceptables estipulados por las normas.

En la figura 4, se observa el esquema de la metodología diseñada para la selección de etapas para el tratamiento de agua para caldera en la industria.

Los siguientes pasos corresponden al proceso de selección de las etapas para el tratamiento de agua en la producción de vapor:

1. Definir la presión de operación de la caldera, con el fin de establecer los límites máximos de impurezas estandarizados para el agua de alimentación. Dentro de las diversas normas que existen para las calderas se adoptaron 7 parámetros de acuerdo a su importancia. Estos límites fueron organizados en la tabla 1 teniendo en cuenta el orden de remoción a través del proceso.
2. Seleccionar la fuente de agua a tratar. La selección del origen esta dada por diversos factores: la proximidad a la planta, la calidad del agua bruta y el caudal de suministro.
3. Realizar un análisis detallado de los diferentes parámetros que permiten determinar la calidad del agua a tratar.

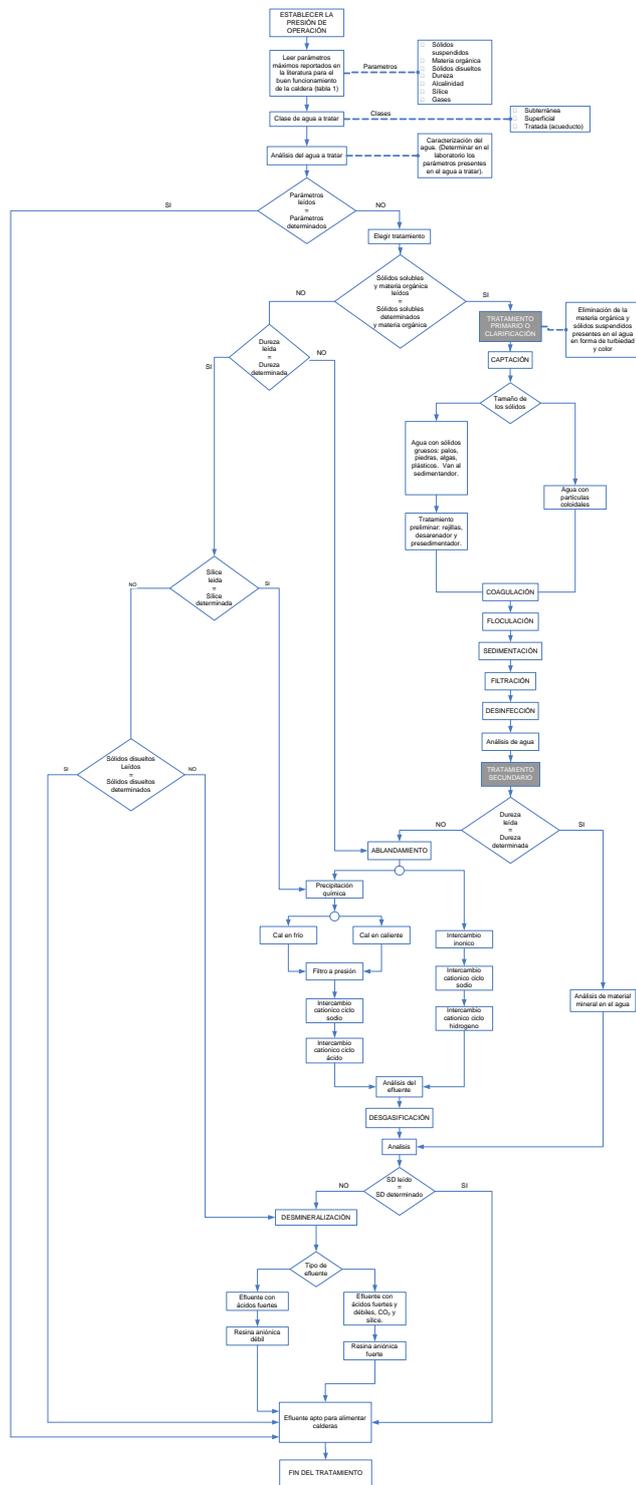


Figura 4. Metodología para la selección del tratamiento adecuado para el agua para la producción de vapor.

4. Establecer una comparación entre los parámetros del agua de caldera reportados en la literatura (Tabla 1) y los resultados obtenidos en el laboratorio para nuestra fuente de agua. Esta es una de las fases fundamentales a la hora de decidir que etapas se van a realizar. A medida que se va desarrollado la comparación entre los parámetros leídos y los determinados se prosigue a llenar la siguiente tabla:

PARAMETROS	VALOR LEIDO	VALOR DETERMINADOS	NECESIDAD
Sólidos disueltos			
Sólidos suspendidos			
Dureza			
Alcalinidad			
Sílice			
O <sub>2</sub>			
CO <sub>2</sub>			

Tabla 2. Planilla para anotar el valor de cada uno de los parámetros y el valor recomendado.

Sí el parámetro leído es menor al determinado se marca con una x la casilla correspondiente, pero si el parámetro leído es mayor o igual al determinado entonces se deja en blanco.

Con los resultados obtenido en la tabla anterior, se establecen los criterios para seleccionar si se realiza o no, algún tratamiento. Cuando las casillas de los 7 parámetros terminen en blanco, este tipo de afluyente se considera apto. Si no, se procede a elegir las etapas de acuerdo a las casillas de marcadas.

### 2.1.1 Tratamiento primario

Si el agua presenta sólidos suspendidos y materia orgánica, en forma de turbiedad y color, se lleva a cabo el tratamiento primario o clarificación, el cual consta de:

1. Un tratamiento preliminar a partir de rejillas, desarenadores y presedimentadores, los cuales se encargan de remover partículas sedimentables como: sólidos gruesos, palos, arena, piedras, plásticos, algas y demás desechos arrojados por el hombre que pueden afectar las etapas posteriores. Si el agua presenta sílice, hierro, manganeso y partículas

coloidales se emplean las etapas de coagulación-floculación, estas se encargan de aglutinar y separar las partículas minúsculas que la masa de agua trae, facilitando su precipitación. Una vez inyectado el coagulante y formados los flóculos, pasan al sedimentador donde son removidos la mayor cantidad de flóculos producto del tratamiento químico. Esta etapa es un acondicionamiento del agua para el proceso de filtración.

2. El proceso de filtración sirve para separar las impurezas que no han sido eliminadas en ninguna de las etapas anteriores, es decir, se utiliza como proceso final de pulimento en el tratamiento de aguas turbias (de 70 UNT en adelante). Sin embargo, esta etapa puede ser utilizada como único tratamiento en caso de aguas claras (menores a 25 UNT).
3. Después de haber retirado las impurezas antes mencionadas pasamos a la etapa de desinfección para asegurar que el agua llegue sin microorganismos a la etapa de tratamiento secundario.

### **2.1.2 Tratamiento secundario**

Cuando el agua presenta: sólidos disueltos, gases disueltos, sílice, dureza y alcalinidad, se procede a realizar el tratamiento secundario.

1. El efluente de la etapa de desinfección pasa a un proceso de ablandamiento en el cual se elimina la dureza presente en el agua debida a calcio y magnesio, además de eliminar una parte de sílice, hierro y manganeso presentes en el agua (la reducción de la sílice se da siempre y cuando se realice el ablandamiento por precipitación química). Este proceso se puede llevar a cabo por 3 rutas:
  - a. **Cal en frío → filtro → zeolita → resina de intercambio catiónica ciclo ácido.**
  - b. **Cal en caliente → filtro → zeolita → resina de intercambio catiónica ciclo ácido.**
  - c. **Zeolita → resina de intercambio catiónica ciclo ácido.**

2. Después del proceso de ablandamiento se trata el efluente con el fin de controlar la alcalinidad (por las rutas de eliminación o neutralización) y eliminar el CO<sub>2</sub> por medio de la desgasificación.
3. Posteriormente se hace un análisis al agua para verificar el comportamiento de la sílice, CO<sub>2</sub> y sólidos disueltos (remoción de materia mineral). Si los datos del laboratorio no se encuentran entre los límites óptimos para el buen funcionamiento de la caldera pasamos a la eliminación de estos por medio de la etapa de desmineralización.
4. En la desmineralización se eliminan los ácidos fuertes y débiles presentes en el efluente de la resina catiónica ciclo ácido. Para ello se utilizan resinas de intercambio fuerte y débil dependiendo de los resultados obtenidos en la comparación del numeral anterior.
  - Si el agua presenta alto contenido de ácidos fuertes se sitúa una resina débil antes de la fuerte.
  - Si el agua presenta alto contenido de ácidos débiles se utiliza una resina fuerte ya que la débil no elimina este tipo de ácidos.

Una vez terminada esta etapa el agua es apta para alimentar la caldera, finalizando con esto el tratamiento secundario.

### **2.1.3 Tratamiento interno**

Cuando los parámetros han sido aprobados bajo las normas establecidas, el afluente continúa directamente hacia la caldera.

La presión de operación de la caldera es el factor que determina que programa de tratamiento interno es el adecuado. A continuación se detallan los pasos a seguir según nuestra metodología en lo referente al tratamiento interno.

1. Realizar un análisis detallado al afluente proveniente del tratamiento externo con el fin determinar si se realiza o no el tratamiento interno.

2. Establecer la presión de operación de la caldera, una vez realizado esto, se examina que programa se puede desarrollar. Al escoger el programa se tienen en cuenta las ventajas y desventajas que cada uno tiene. En la figura se muestran las posibles rutas a escoger y de igual forma en la tabla se muestran las ventajas y desventajas que se obtienen de cada programa

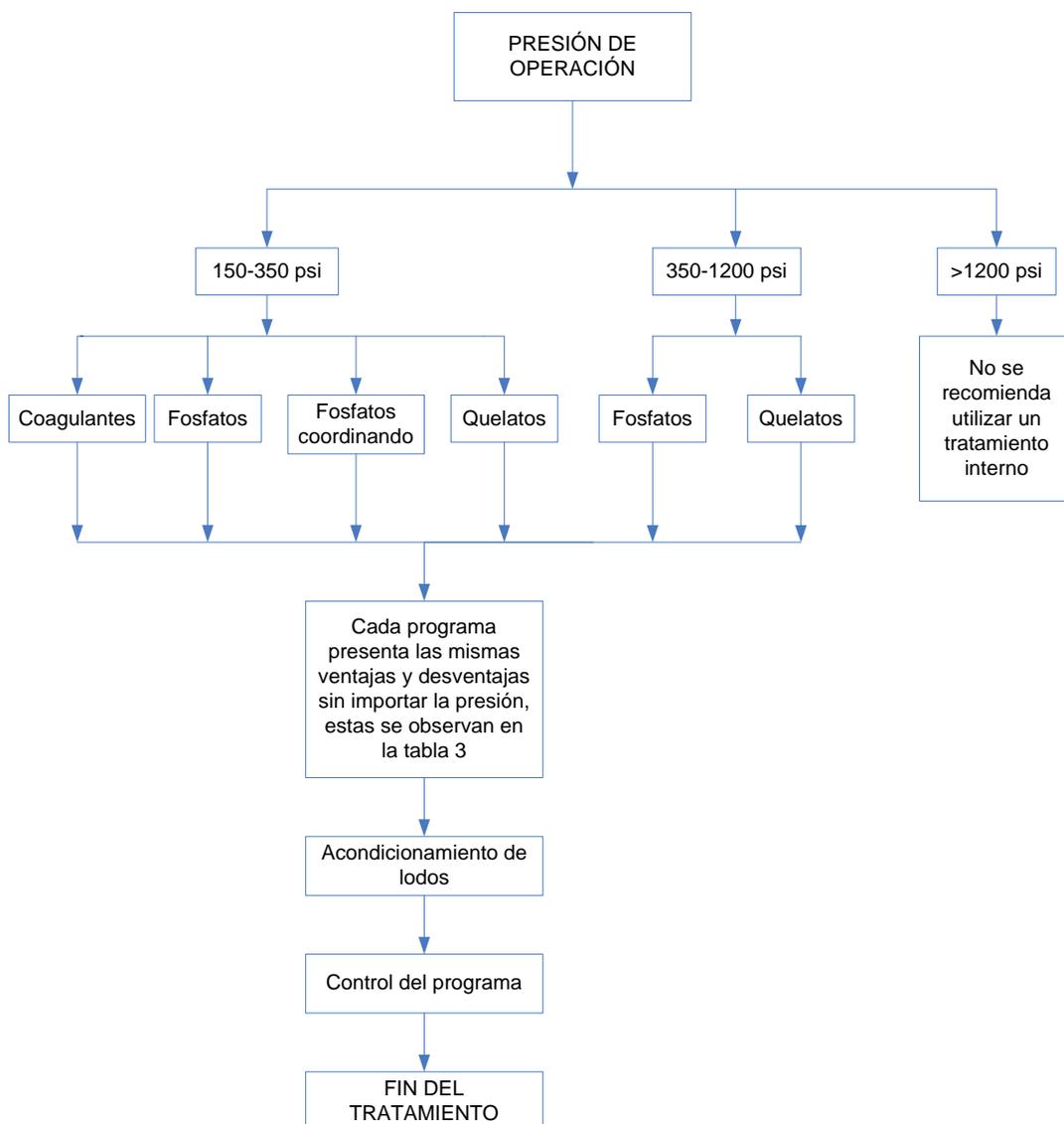


Figura 5. Programas aplicables en el tratamiento interno de acuerdo a la presión de trabajo de la caldera.

	<b>COAGULACION</b>	<b>FOSFATOS</b>	<b>FOSFATOS C.C.</b>	<b>QUELANTES</b>
<b>VENTAJAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicable a calderas de baja presión (P&lt;250psig)</li> <li>• Agua de alimentación con alta dureza (60pp más)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicable a calderas de mayor presión (250-1200psig)</li> <li>• Programa de mayor aplicación en la industria.</li> <li>• Fácil de controlar</li> <li>• Residuo no corrosivo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reducción o eliminación de los niveles de corrosión por causticidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Producción de menor contenido de lodos</li> <li>• Menor cantidad de combustible</li> <li>• Menor frecuencia de mantenimiento</li> </ul>
<b>DESVENTAJAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor cantidad de purga que en fosfatos y quelantes.</li> <li>• Generación de CO<sub>2</sub>.</li> <li>• Formación de precipitados incrustantes</li> <li>• Requiere dispersantes adicionales</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor purga que en quelatos.</li> <li>• El aumento de la alcalinidad produce espuma y corrosión cáustica.</li> <li>• Produce sólidos en suspensión que requiere dispersantes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es sensible a cambios de pH debido a su bajo efecto buffer</li> <li>• Se requiere de agua extremadamente pura y de consistencia constante.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los residuos de quelantes en el agua son fomentadores de corrosión.</li> <li>• Alta calidad de agua de alimentación.</li> </ul>

Tabla 3. Ventajas y desventajas de los programas de tratamiento interno.

Una vez elegido el programa, se procede acondicionar los lodos generados. A excepción de los quelantes los demás si cumplen esta fase. A continuación se lleva un control del programa que se ha seleccionado, con el fin de evaluar el funcionamiento de este. En el anexo 3 se muestran los controles limites de las impurezas según la presión de operación. Luego de evaluar los resultados obtenidos con la aplicación del programa que se selecciono a través de la metodología propuesta se da por finalizado el tratamiento.

### 2.3 SOFTWARE

La metodología que se presenta en la figura 4 es muy extensa y considerando que el objetivo principal de este trabajo es proveer de una herramienta atractiva al usuario interesado en aprender sobre el tratamiento de aguas de uso en calderas, se tomo la decisión de implementarla en un software desarrollado usando Visual Basic, en el cual el usuario puede ir escogiendo a través de condicionales (si o no) la operación que debe hacerle al agua siguiendo las rutas propuestas en la metodología. En la

figura 6 y 7 se puede ver la pantalla de trabajo del software, en ella se aprecia cada etapa y las flechas en las cuales el usuario escoge que camino seguir haciendo uso del ratón.

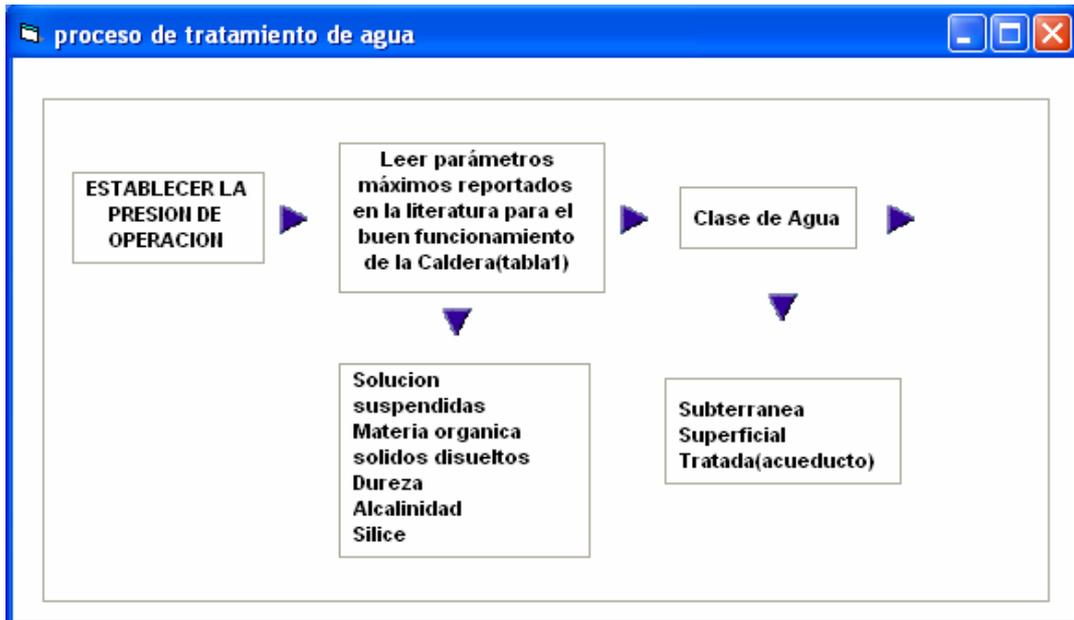


Figura 6. Pantalla inicial del programa que implementa la metodología propuesta en este trabajo.

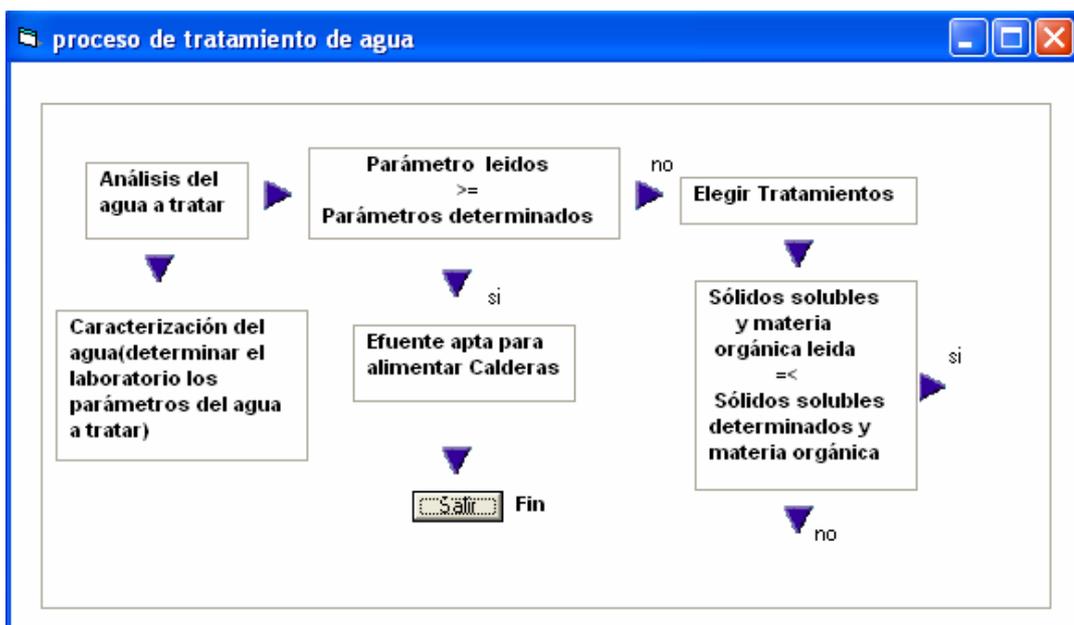


Figura 7. Pantalla secundaria del programa que implementa la metodología propuesta en este trabajo.

De la misma forma una vez el usuario ha seleccionado las etapas que debe considerar para el tratamiento de su sistema, se le presenta una nueva pantalla (Figura 8) en la cual él debe llenar las casillas correspondientes a los parámetros significativos del sistema y el software se encarga de indicarle cuales son las operaciones que debe realizar para cumplir con los limites permitidos en el agua de uso en caldera.

The screenshot shows a software interface for classifying raw water. The window title is "Clasificación de Agua Crudas". It features several input fields for different parameters, each with a corresponding range below it:

- Promedio de coliformes, más probable (NMP) por 100 ml:** Input field with range 0-20000 NMP.
- Turbiedad (UTN):** Input field with range 0-250UTN.
- Color (escala de platino cobalto):** Input field with range 0-70.
- Hierro (mg/l):** Input field with range 0-2.5(mg/l).
- Solidos Totales (mg/l):** Input field with range 0-1500(gm/l).
- Cloruro (mg/l):** Input field with range 0-600(mg/l).
- Dureza (mg/l):** Input field with range 0-250(mg/l).
- Crecimiento de Algas y plancton:** Input field with a dropdown menu set to "Insignificante".

Below the input fields, there are four buttons: "Clasificar", "Volver", "Tratamiento", and "Terminar". At the bottom of the window, there are two sections: "Tratamiento mínimo" and "Ejemplo de fuente", both of which are currently empty.

Figura 8. Pantalla en la cual se ingresan los valores de los parámetros significativos del sistema y el software se encarga de establecer las etapas del tratamiento.

## CONCLUSIONES

- Se desarrolló un software en el cual se implementó la metodología desarrollada para el tratamiento de agua de uso en caldera. Este es de fácil uso y en él, el usuario va conociendo el tratamiento adecuado para su sistema paso a paso de acuerdo a las características que se tengan.
- Se diseñó una metodología que sirve como guía en el tratamiento de aguas para la generación de vapor, convirtiéndose en una herramienta útil a la hora de adquirir o reforzar los conocimientos necesarios en el tratamiento de agua.
- Se logró estructurar de forma lógica y secuencial las diferentes etapas de la metodología respaldándose en un marco teórico, que le permiten al lector seleccionar con total libertad la ruta o etapas más adecuadas en dicho tratamiento teniendo en cuenta unas pautas conceptuales ya preestablecidas y con el apoyo del software desarrollado.

## RECOMENDACIONES

- Evaluar la metodología y el software desarrollado para el acondicionamiento de agua probando si este material sirve como herramienta para que personas interesadas en aprender adquieran los conocimientos necesarios para desarrollar el tratamiento de aguas de uso en caldera.
- Aplicar la metodología aquí propuesta en varias industrias que generen vapor en calderas, en cada una de ellas realizar el proceso que teóricamente sería el adecuado según la metodología, luego, contrastar los resultados obtenidos con el proceso que cada industria tenga, buscando identificar las principales diferencias y las razones para las mismas.

## BIBLIOGRAFIA

ARBOLEDA V., Jorge. Teoría y práctica de la purificación del agua. 2da Ed., Santa Fe de Bogotá, D.C.: Editorial McGraw Hill. 2000

ROMERO R., Jairo A. Acupurificación: diseño de sistemas de purificación de aguas. 1era Ed., Santa Fe de Bogotá, D.C.: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería. 1995

FAIR, Geyer. Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. 3era Ed., Lima: Editorial Limusa. 1997

SCHULZ, Okun. Tratamiento de aguas superficiales para países en desarrollo. 1era Ed., México: Editorial Limusa. 1998

ARBOLEDA V., Jorge. Teoría, diseño y control de los procesos de clarificación del agua. 1era Ed., España: CEPIS. 1981

POWELL, Sheppard T. Acondicionamiento de agua para la industria. 1era Ed., México: Editorial Limusa. 1974.

KEMMER, Frank N. and McALLION John. Manual del agua, su naturaleza, tratamiento y aplicaciones. México: McGraw Hill. 1989.

GOMELLA, Cyril. Tratamiento de aguas para abastecimientos públicos. 3era Ed., Barcelona: Editorial McGraw Hill. 1977.

HUNT, Jim. Filtration Media: Making de right choice-a referent guide for dealer's water conditioning & purification. 1era Ed. New York: Editorial McGraw Hill. 2001.

APPLEBAUM, Samuel. Demineralization by ion exchange. 2da Ed. New York and London: Academic press. 1968.

GEYER Y OKUN. Purificación de aguas y tratamiento y remoción de aguas residuales. 4ta Ed. México: Editorial Limusa. 1997.

ESKEL, Nordell. Tratamiento de agua para la industria y otros usos. 1era Ed., México: Compañía Editorial Continental. 1963.

RIGOLA LA PEÑA, Miguel. Tratamiento de aguas industriales, aguas de procesos y residuales. 2da Ed., Madrid: Editorial McGraw Hill. 1999.

## ANEXO 1

### **FACTORES QUE INFLUYEN EN LA COAGULACIÓN**

Se hacen ensayos previos (ensayos de jarras) para definir las condiciones óptimas de empleo y la naturaleza del coagulante o flóculante en cada tipo de agua.

Hay una serie de factores que afectan la coagulación y la floculación, y entre ellos se pueden citar:

#### **Influencia del pH**

El pH es una variable que depende de la naturaleza de los iones y de la alcalinidad del agua. Para cada agua existe un rango de pH óptimo en el cual la coagulación tiene lugar rápidamente. El rango de pH es función del tipo de coagulante a ser utilizado y de la naturaleza del agua a tratar. Si la coagulación se realiza fuera del rango de pH óptimo entonces se debe aumentar la cantidad del coagulante. Para sales de aluminio el rango de pH en la coagulación es de 6.5 a 8.0 y para las sales de hierro, el rango de pH óptimo es de 5.5 a 8.5 unidades.

#### **Influencia de la dosis de coagulante.**

La cantidad del coagulante a utilizar tiene influencia directa en la eficiencia de la coagulación, así:

- La cantidad de coagulante es proporcional, a la formación del micro floculo, y a la neutralización de la carga de la partícula, e inversa a la turbiedad residual. Sin embargo, la cantidad de coagulante en exceso genera un efecto directo sobre la turbiedad residual.
- La selección del coagulante y la cantidad óptima de aplicación; se determina mediante los ensayos de pruebas de jarras.

### **Influencia de las sales disueltas.**

Las sales contenidas dentro del agua ejercen las siguientes influencias sobre la coagulación y floculación:

- Modifican el rango de pH óptimo.
- Modifican el tiempo requerido para la floculación
- Modifican la cantidad residual del coagulante dentro del efluente.
- Modifican la cantidad de coagulante requerido.

### **Influencia de la turbiedad**

La turbiedad del agua superficial es debido a partículas de lodos de sílice de diámetros que varían entre 0.2 a 5  $\mu\text{m}$ . La coagulación de estas partículas es fácil de realizar cuando el pH se mantiene dentro del rango óptimo. La variación de la concentración de las partículas permite hacer las siguientes predicciones:

- La turbiedad es directamente proporcional a la cantidad de partículas en suspensión e inversa a la cantidad de coagulante adicionado.
- La cantidad de coagulante con la que se obtiene la turbiedad residual más baja en las pruebas de jarras, corresponde a la dosis óptima.

### **Influencia de la mezcla.**

El grado de agitación que se da a la masa de agua durante la adición del coagulante, determina si la coagulación es completa. Turbulencias desiguales hacen que cierta porción de agua tenga mayor concentración de coagulantes, y la otra parte tenga poco o casi nada. La agitación debe ser uniforme y turbulenta en toda la masa de agua, para asegurar que la mezcla entre el agua y el coagulante sea la mejor.

En el transcurso de la coagulación y floculación, se procede a la mezcla de productos químicos en dos etapas. En la primera etapa, la mezcla es enérgica y de corta

duración (60 segundos máximo) llamada mezcla rápida; esta mezcla tiene por objeto dispersar la totalidad de coagulante dentro del volumen de agua a tratar. La segunda etapa de floculación es favorecida por el mezclado lento que permite juntar poco a poco los flóculos. Un mezclado demasiado intenso los rompe y rara vez se vuelven a formar en su tamaño y fuerza apropiado. La floculación no solo incrementa el tamaño de las partículas del floculo, sino también afecta su naturaleza física.

### **Influencia de la Temperatura del Agua.**

La variación de la temperatura del agua afecta la energía cinética de las partículas en suspensión, y la formación de corrientes de densidad variable, por lo que la coagulación se hace más lenta.

Una disminución de la temperatura del agua en una unidad de decantación conlleva a un aumento de su viscosidad esto explica las dificultades de la sedimentación de un floculo.

### **Clasificación de los filtros**

Según su velocidad se dividen en:

#### **Filtración lenta**

Un filtro lento de arena se compone de una capa de arena a través de la cual se filtra el agua a una velocidad relativamente baja ( $4 \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{día}$ ); el filtro se limpia periódicamente raspando una capa delgada de arena sucia de la superficie a intervalos de varias semanas a meses. Los filtros lentos de arena son efectivos para remover materia orgánica y microorganismos de las aguas crudas de turbiedad relativamente baja, dando como resultado ahorros en el proceso de desinfección. Además el costo de construcción de filtros lentos de arena en los países en desarrollo es bajo, las importaciones de material y equipos son insignificantes, y se construyen, operan, y mantienen fácilmente.

### **Filtración rápida**

Un filtro rápido se compone de una capa de arena clasificada por tamaño, o en algunos casos, de una capa de medio filtrante grueso colocada sobre otra capa de arena a través de las cuales se filtra el agua a velocidades relativamente altas (120 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>/día). El filtro se limpia mediante retrolavado con agua filtrada.

Este tipo de filtración se clasifica en:

#### **a). Filtración directa**

El proceso de filtración directa somete al agua a un mezclado rápido y algunas veces con floculación, seguido inmediatamente por la filtración. La filtración directa solo es practicable para algunas aguas de baja turbiedad, pero es una opción comparativamente barata cuando es factible, particularmente para evitar el uso de coagulante costosos.

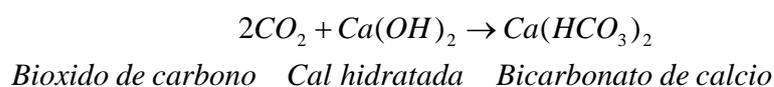
#### **b). Filtros de flujo ascendente-descendente.**

En este tipo de sistema, un filtro preliminar de flujo ascendente sustituye al arreglo convencional, mezclado, floculación y sedimentación, utilizados en plantas de filtración rápida. El filtro de flujo descendente es un filtro convencional rápido, este diseño puede resultar en costos de construcción y operacionales reducidos en plantas pequeñas de tratamiento.

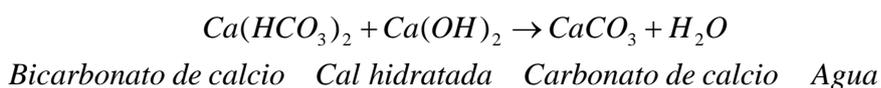
## ANEXO 2

### REACCIONES INVOLUCRADAS EN EL TRATAMIENTO

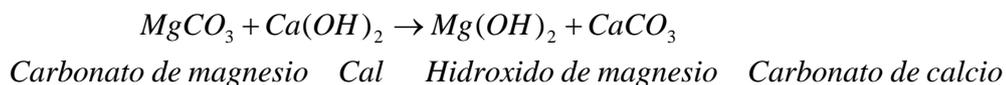
#### Remoción de bióxido de carbono



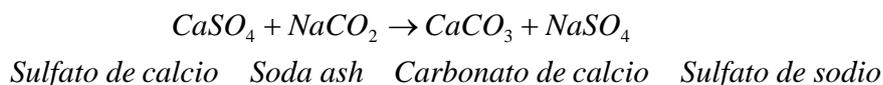
#### Reducción de dureza del carbonato de calcio mediante la cal



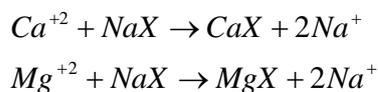
#### Reducción de dureza de magnesio con cal



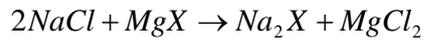
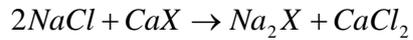
#### Reducción de dureza de no-carbonatos con carbonato de sodio comercial (soda ash)



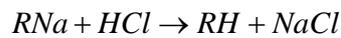
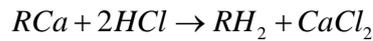
#### Ablandamiento



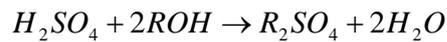
### Regeneración con salmuera



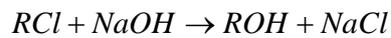
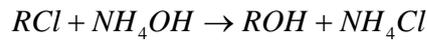
### Intercambio de hidrogeno: regeneración



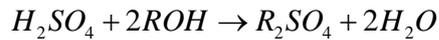
### Desmineralización: aniónica débil



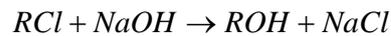
### Regeneración



### Aniónica fuerte



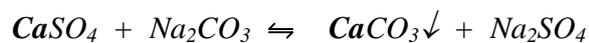
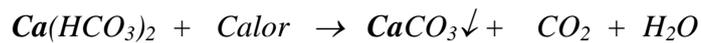
### Regeneración



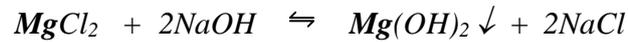
### Tratamiento interno

### Coagulación

Precipitación del calcio como  $CaCO_3$

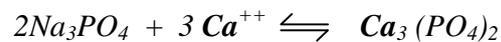


Precipitación del magnesio como Mg (OH)<sub>2</sub>

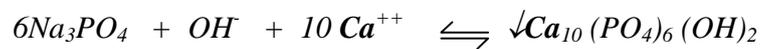


### **Fosfatos**

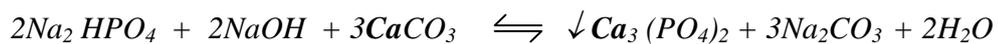
Dureza del calcio que precipita como fosfato tricalcico y fosfato básico de calcio



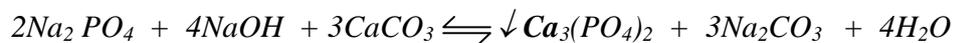
Fosfato trisódico



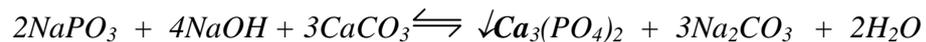
Fosfato trisódico



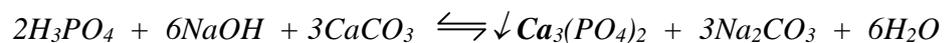
Fosfato disódico



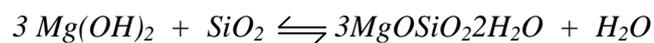
Fosfato monosódico



Meta fosfato de sodio



El magnesio precipita como Mg(OH) en presencia de sílice



### ANEXO 3

#### TABLAS DE CONTROL

Control	Presión, psig	
	150	300
Sólidos disueltos	2.500 máx.	2.000 máx.
Sólidos suspendidos	300 máx.	300 máx.
Alcalinidad P (CaCO <sub>3</sub> )	150 – 500	150 – 500
Sulfito (SO <sub>3</sub> )	30 – 60	30 – 40
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	100 máx.	50 máx.
Hierro total (Fe)	10 máx.	5 máx.
Color	trazas	trazas

Tabla 4. Se muestran los controles límites en el programa de coagulación aplicables a las condiciones de operación de la caldera.

Presión Caldera (psig)	Relación P/SiO <sub>2</sub> mínima en caldera
< 150	1.5
150 – 250	2.0
250 – 400	2.5

Tabla 5. Se muestran los controles límites en el programa de coagulación aplicables a las condiciones de operación de la caldera correspondiente con respecto a la sílice.

CONTROL (ppm)	Presión, (psig)				
	150	300	600	900	1200
Sólidos disueltos	2.500	2.000	1.500	750	500
PO <sub>4</sub> (PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> )	300 – 60	30 – 40	20 – 40	15 – 20	10 – 15
Alc. OH (CaCO <sub>3</sub> )	200 – 300	200 – 250	150 – 200	120 – 150	100 – 120
Sulfito (SO <sub>3</sub> )	30 – 60	30 – 40	20 – 30	15 – 20	10 – 15
Sílice (SiO <sub>2</sub> )	100 máx.	50 máx.	30 máx.	10 máx.	5 máx.
Hierro total (Fe)	10 máx.	5 máx.	3 máx.	2 máx.	2 máx.

Tabla 6. Que muestran los controles límites en el programa de fosfatos aplicables a las condiciones de operación de la caldera.

Presión, psi	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup> , ppm	pH
>1500	5-10	9.4-9.7
≤ 1500	15-25	9.8-10.2

Tabla 7. Que muestra el control coordinado pH-fosfato del agua de caldera.

Presión de Caldera (psi)	Quelato residual (CaCO <sub>3</sub> )
400	4 – 8 ppm
401 – 600	3 – 6 ppm
601 – 1000	3 – 5 ppm

Tabla 8. Se muestran los controles limites en el programa de quelatos aplicables a las condiciones de operación de la caldera.