



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Química

**EVALUACIÓN DE DOS AGENTES ABLANDADORES DE AGUA Y SU MEZCLA PARA
AJUSTAR EL ÍNDICE DE LANGELIER EN RECIRCULACIÓN DE AGUAS DE
ENFRIAMIENTO Y ESTABILIZAR PARÁMETROS QUÍMICOS EN CALDERAS DE VAPOR**

Gerson Jonathan Martínez de la Rosa

Asesorado por el Ing. Leonidas Antonio Martínez Zúñiga

Guatemala, octubre de 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DE DOS AGENTES ABLANDADORES DE AGUA Y SU MEZCLA PARA
AJUSTAR EL ÍNDICE DE LANGELIER EN RECIRCULACIÓN DE AGUAS DE
ENFRIAMIENTO Y ESTABILIZAR PARÁMETROS QUÍMICOS EN CALDERAS DE VAPOR**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

GERSON JONATHAN MARTÍNEZ DE LA ROSA

ASESORADO POR EL ING. LEONIDAS ANTONIO MARTÍNEZ ZÚÑIGA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO QUÍMICO

GUATEMALA, OCTUBRE DE 2012

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Casta Petrona Zeceña Zeceña
EXAMINADOR	Ing. Manuel Gilberto Galván Estrada
EXAMINADOR	Ing. Renato Giovanni Ponciano Sandoval
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

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

EVALUACIÓN DE DOS AGENTES ABLANDADORES DE AGUA Y SU MEZCLA PARA AJUSTAR EL ÍNDICE DE LANGELIER EN RECIRCULACIÓN DE AGUAS DE ENFRIAMIENTO Y ESTABILIZAR PARÁMETROS EN CALDERAS DE VAPOR

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha julio de 2011



Gerson Jonathan Martínez de la Rosa

Guatemala, 23 de mayo de 2012

Ingeniero
Williams Guillermo Álvarez Mejía
Director Escuela de Ingeniería Química
Universidad de San Carlos de Guatemala

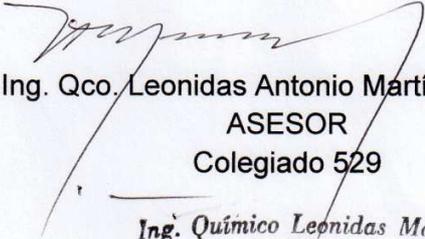
Ingeniero Álvarez:

Por este medio hago constar que he revisado y aprobado el Informe Final del Trabajo de Graduación, del estudiante GERSON JONATHAN MARTÍNEZ DE LA ROSA, con carné 2006-11401, el cual se titula: **EVALUACIÓN DE DOS AGENTES ABLANDADORES DE AGUA Y SU MEZCLA PARA AJUSTAR EL ÍNDICE DE LANGELIER EN RECIRCULACIÓN DE AGUAS DE ENFRIAMIENTO Y ESTABILIZAR PARÁMETROS QUÍMICOS EN CALDERAS DE VAPOR.**

En base a lo anterior, lo someto a su consideración a efecto de continuar con el trámite respectivo para su aprobación.

Sin otro motivo particular, me suscribo de usted,

Atentamente,



Ing. Qco. Leonidas Antonio Martínez Zúñiga
ASESOR
Colegiado 529
Ing. Químico Leonidas Martínez
COLEGIADO 529



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

Guatemala, 07 de agosto de 2012
Ref. EI.Q.TG-IF.039.2012

Ingeniero
Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Monzón:

Como consta en el Acta TG-215-2011-IF le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por el estudiante universitario: **Gerson Jonathan Martínez de la Rosa**

Identificado con número de carné: **2006-11401**

Previo a optar al título de INGENIERO QUÍMICO.

Siguiendo los procedimientos de revisión interna de la Escuela de Ingeniería Química, los Miembros de la Terna han procedido a **APROBARLO** con el siguiente título:

EVALUACIÓN DE DOS AGENTES ABLANDADORES DE AGUA Y SU MEZCLA PARA AJUSTAR EL ÍNDICE DE LANGELIER EN RECIRCULACIÓN DE AGUAS DE ENFRIAMIENTO Y ESTABILIZAR PARÁMETROS QUÍMICOS EN CALDERAS DE VAPOR

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Leonidas Martínez**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Jorge Mario Estrada Asturias
COORDINADOR DE TERNA
Tribunal de Revisión
Trabajo de Graduación



ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA

C.c.: archivo

PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
ACREDITADO POR
Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería
Período 2009 - 2012



ACAAI

Agencia Centroamericana de Acreditación de
Programas de Arquitectura y de Ingeniería



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

Ref.EIQ.TG.153.2012

El Director de la Escuela de Ingeniería Química de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del Asesor y de los Miembros del Tribunal nombrado por la Escuela de Ingeniería Química para revisar el Informe del Trabajo de Graduación del estudiante, **GERSON JONATHAN MARTÍNEZ DE LA ROSA** titulado: "**EVALUACIÓN DE DOS AGENTES ABLANDADORES DE AGUA Y SU MEZCLA PARA AJUSTAR EL ÍNDICE DE LANGELIER EN RECIRCULACIÓN DE AGUAS DE ENFRIAMIENTO Y ESTABILIZAR PARÁMETROS QUÍMICOS EN CALDERAS DE VAPOR**". Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"

Ing. Víctor Manuel Monzón Valdez
DIRECTOR
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, octubre de 2012

Cc: Archivo
VMMV/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala

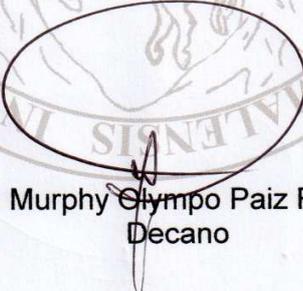


Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.502.2012

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Química, al trabajo de graduación titulado: **EVALUACIÓN DE DOS AGENTES ABLANDADORES DE AGUA Y SU MEZCLA PARA AJUSTAR EL ÍNDICE DE LANGELIER EN RECIRCULACIÓN DE AGUAS DE ENFRIAMIENTO Y ESTABILIZAR PARÁMETROS QUÍMICOS EN CALDERAS DE VAPOR**, presentado por el estudiante universitario **Gerson Jonathan Martínez de la Rosa**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, octubre de 2012



/cc

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser el creador y guiarme en todo momento.
Mis padres	Leonidas Martínez y Carolina de la Rosa de Martínez, por ser mi ejemplo, su motivación y apoyo incondicional.
Mis hermanos	Jacobo y Claudia Martínez de la Rosa, por su apoyo y consejo oportuno.
Mis sobrinos	Edgar Gordillo, Adriana y Marcela Andrade, por su presencia y cariño.
Mi abuela	Concepción García de de la Rosa, por compartir su amor y experiencias.
Mis primos	Por ser parte de mi engranaje infantil.
Mis amigos	Por su valiosa amistad y el tiempo compartido.

AGRADECIMIENTOS A:

Dios	Por proveerme sabiduría para alcanzar mis metas.
Ing. Leonidas Martínez	Por su valiosa asesoría profesional.
Licda. Msc. Carolina de la Rosa de Martínez	Por su apoyo imprescindible.
Inga. Claudia Martínez de Andrade	Por su apoyo en la etapa de experimentación a nivel industrial.
Universidad de San Carlos de Guatemala	Por ser la casa de estudios donde obtuve los conocimientos fundamentales.
Escuela de Ingeniería Química	Por brindarme la oportunidad de vencer obstáculos para mi formación.
POLCHEMICAL	Por abrirme las puertas para realizar mis prácticas y la experimentación para culminar este trabajo de graduación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XXI
OBJETIVOS/HIPÓTESIS	XXIII
INTRODUCCIÓN	XXV
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO	3
2.1. Dureza del agua	3
2.2. Clasificación del agua	3
2.3. Tratamientos de agua para generadores de vapor	4
2.3.1. Tipos de calderas	4
2.4. El tratamiento de aguas para calderas	11
2.5. Tratamiento interno antiincrustante	17
2.5.1. Origen de las incrustaciones y depósitos	17
2.5.2. Programa de carbonatos	20
2.5.3. Programas de fosfatos	21
2.5.4. Programa del fosfato coordinado	22
2.5.5. Programa solubilizante con quelantes	24
2.5.6. Parámetros químicos a estabilizar en generadores de vapor	26
2.6. Tratamiento de aguas de refrigeración	27
2.6.1. El agua como medio de refrigeración	27

2.6.2.	Tipos de instalaciones de refrigeración	28
2.6.3.	Problemas derivados del agua y su tratamiento	31
2.6.4.	Control de depósitos e incrustaciones	36
2.6.5.	Origen de los depósitos e incrustaciones	36
2.6.6.	Cómo prevenir la formación de incrustaciones	37
2.6.7.	Dispersantes	38
2.6.8.	Quelantes y secuestrantes	41
2.6.9.	Estabilizadores de depósitos e incrustaciones	42
2.6.10.	Índice de Langelier	43
2.5.2.1.	Cálculo de los factores a, b, c, d	44
3.	DISEÑO METODOLÓGICO	49
3.1.	Variables	49
3.2.	Delimitación de campo de estudio	49
3.2.1.	Industria	50
3.2.2.	Materia prima	50
3.2.3.	Procedimiento experimental	50
3.2.4.	Manejo de residuos	50
3.3.	Recursos humanos disponibles	51
3.4.	Recursos materiales disponibles	51
3.4.1.	Materia prima y reactivos	51
3.4.2.	Cristalería	51
3.4.3.	Equipo	52
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa	53
3.5.1.	Determinación de la dureza total	53
3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	54
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	55

3.7.1.	Tablas para el tripolifosfato de sodio como agente secuestrador de dureza	55
3.7.1.1.	Consumo de tripolifosfato de sodio en función de la concentración de la dureza del agua	55
3.7.1.2.	Consumo de tripolifosfato de sodio para reducir la dureza hasta cero partes por millón	55
3.7.2.	Tablas para la sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético como agente secuestrador de dureza	57
3.7.2.1.	Consumo de la sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético en función de la concentración de la dureza del agua	57
3.7.2.2.	Consumo de la sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético para reducir la dureza hasta cero partes por millón	58
3.7.3.	Tablas para las mezclas de tripolifosfato de sodio y sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético como agente secuestrador de dureza	59

3.7.3.1.	Consumo de la mezcla de tripolifosfato de sodio y sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético en función de la concentración de la dureza del agua	59
3.7.3.2.	Consumo de la mezcla de tripolifosfato de sodio y sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético para reducir la dureza hasta cero partes por millón	60
3.8.	Análisis estadístico	61
3.8.1.	Regresión lineal	61
3.8.2.	Coefficiente de correlación	63
4.	RESULTADOS	65
4.1.	Curvas de consumo de ablandadores de agua en función de la dureza del agua de alimentación	65
4.2.	Ecuaciones de consumo de ablandador de agua en función de la dureza y la cantidad de agua utilizada	66
4.3.	Curvas de costo de ablandamiento en función de la dureza del agua de alimentación	67
4.4.	Ecuaciones del costo del ablandamiento del agua en función de la dureza y la cantidad de agua utilizada mensualmente	68
4.5.	Parámetros químicos en circuitos de refrigeración	69
4.6.	Parámetros químicos en calderas de vapor	72
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS	75

CONCLUSIONES	77
RECOMENDACIONES	81
BIBLIOGRAFÍA	83
APÉNDICES	85
ANEXOS	119

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Circuito de generación y utilización del vapor	5
2.	Tipos de calderas a) sección principal de una caldera pirotubular usada a bajas presiones b) esquemas de circulación del agua, A, D y O, en calderas acuotubulares	6
3.	Sección del calderín mostrando la situación de las conexiones principales	8
4.	Control coordinado pH-fosfato del agua de caldera	23
5.	Moléculas de EDTA y NTA	25
6.	Circuitos de refrigeración a) abierto b) cerrado c) semiabierto	29
7.	Variación del porcentaje de agua de aporte en función del número de ciclos y la evaporación	35
8.	Fosfonatos	40
9.	Moléculas de EDTA y NTA	41
10.	Carta del índice de Langelier	45
11.	Recolección y ordenamiento de la información	54
12.	Consumo de ablandadores de agua para ajustar dureza a cero partes por millón	65
13.	Costo de ablandamiento en función de la dureza del agua de alimentación	67

TABLAS

I.	Clasificación del agua en función de su calidad	3
II.	Norma UNE 9-075-78. Característica del agua	13
III.	Valores guía para calderas acuotubulares	14
IV.	Parámetros químicos a estabilizar en generadores de vapor	26
V.	Indicación del signo del Índice de Langelier	46
VI.	Indicación del valor del Índice de Langelier	47
VII.	Tabla de Variables	49
VIII.	Tabla de técnica cuantitativa	53
IX.	Consumo de tripolifosfato de sodio y concentración de dureza	55
X.	Consumo de tripolifosfato de sodio y concentración de dureza	56
XI.	Consumo de sal tetrasódica del EDTA y dureza	57
XII.	Consumo de sal tetrasódica del EDTA y dureza	58
XIII.	Consumo de mezcla de tripolifosfato de sodio con sal tetrasódica del EDTA y dureza	59
XIV.	Consumo de mezcla de tripolifosfato de sodio con sal tetrasódica del EDTA y dureza	60
XV.	Parámetros químicos ajustados con tripolifosfato de sodio	69
XVI.	Parámetros químicos ajustados con sal tetrasódica del EDTA	69
XVII.	Parámetros químicos ajustados con mezcla 50% tripolifosfato de sodio y 50% sal tetrasódica EDTA	70
XVIII.	Parámetros químicos ajustados con Mezcla 75% tripolifosfato de sodio y 25% sal tetrasódica EDTA	70
XIX.	Parámetros químicos ajustados con mezcla 25% tripolifosfato de sodio y 75% sal tetrasódica EDTA	71
XX.	Parámetros estabilizados con $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$	72
XXI.	Parámetros estabilizados con Na_4EDTA	73

XXII.	Parámetros estabilizados con la mezcla 50% Na ₅ P ₃ O ₁₀ - 50% Na ₄ EDTA	73
XXIII.	Parámetros estabilizados con la mezcla 75% Na ₅ P ₃ O ₁₀ - 25% Na ₄ EDTA	74
XXIV.	Parámetros estabilizados con la mezcla 25% Na ₅ P ₃ O ₁₀ - 75% Na ₄ EDTA	74

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
cm²	Centímetro cuadrado
°C	Grados Celsius
g	Gramo
h	Hora
IL	Índice de Langelier
K	Kelvin
Kg	Kilogramo
L	Litro
mg	Miligramo
ml	Mililitro
ppm	Partes por millón
%	Porcentaje
pH	Potencial de hidrógeno
pHs	Potencial de hidrógeno de saturación
psi	<i>Pounds per square inch</i> , libras por pulgada cuadrada
TDS	Total de sólidos disueltos

GLOSARIO

Ablandamiento	Técnica utilizada para eliminar iones de calcio y magnesio del agua.
Ácido	Compuesto químico que, cuando se disuelve en agua, produce una solución con una actividad del catión hidronio mayor que el agua pura, esto es, un pH menor que 7.
Ácido nitrilotriacético (NTA)	$C_6H_9NO_6$, es un ácido carboxílico usado como agente quelante que forma compuestos de coordinación con iones metálicos (quelatos) tales como Ca^{+2} , Cu^{+2} o Fe^{+3} .
Agua de alimentación o de aporte	Agua que está destinada a ser utilizada en una caldera para producir vapor.
Aislante	Material utilizado en la industria, caracterizado por su alta resistencia térmica. Establece una barrera al paso del calor entre dos medios que naturalmente tenderían a igualarse en temperatura, impidiendo que entre o salga calor del sistema.

Alcalinidad	Capacidad para reaccionar o neutralizar iones hidronio (H^+). Es causada principalmente por los bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos presentes en solución.
Alcalinidad parcial	Suma de todos los hidróxidos y parte de los carbonatos que existen en el agua.
Alcalinidad total “m”	Suma de las tres clases de alcalinidad: alcalinidad de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos.
Antiincrustante	Sistema químico que le permite a los sólidos incrustantes permanecer en solución.
Arrastre	Ocurre cuando el vapor que sale de la caldera lleva partículas de agua en suspensión.
Base	Sustancia que en disolución acuosa aporta iones OH^- .
Biodegradable	Producto o sustancia que puede descomponerse en sus elementos químicos que lo conforman, debido a la acción de agentes biológicos bajo condiciones ambientales naturales.
Caldera acuotubular	Tipo de caldera en las que el fluido de trabajo se desplaza por el interior de tubos durante su calentamiento. Permiten altas presiones a su salida y tienen gran capacidad de generación.

Caldera de vapor	Máquina o dispositivo de ingeniería diseñado para generar vapor. Este vapor se genera a través de una transferencia de calor a presión constante, en la cual el fluido, originalmente en estado líquido, se calienta y cambia de estado.
Caldera pirotubular	Tipo de caldera en las que el fluido en estado líquido se encuentra en un recipiente atravesado por tubos, por los cuales circulan gases a alta temperatura, producto de un proceso de combustión. El agua se evapora debido al contacto con los tubos calientes.
Carbonatos	Sales del ácido carbónico o ésteres con el grupo $R - O - C(=O) - O - R'$. Las sales tienen en común el anión CO_3^{-2} y se derivan del ácido carbónico. Según el pH, están en equilibrio con el bicarbonato y el dióxido de carbono.
Ciclos de concentración	Número de veces que se concentra el agua de caldera respecto del agua de alimentación.
Conductividad	Medida de la capacidad de un material de dejar pasar la corriente eléctrica.
Copolímero	Macromolécula compuesta por dos o más unidades repetidas distintas, que se pueden unir de diferentes formas por medio de enlaces químicos.

Corrosión	Deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. Tendencia que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna.
Cuarzo	Mineral de clase 4, compuesto de dióxido de silicio, SiO_2 .
Desgasificador	Equipo que remueve O_2 disuelto del agua de alimentación a calderas ya que el oxígeno es altamente corrosivo en los circuitos de vapor.
Dispersante	Aditivo que se utiliza para lograr que un soluto tenga distribución y dispersión en un disolvente.
Dureza	Concentración de compuestos minerales de cationes polivalentes alcalinotérreos que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de magnesio y calcio.
Dureza total	Suma de la dureza temporal y la permanente que existe en una muestra de agua.

Economizador	Dispositivo mecánico de transferencia de calor que calienta un fluido hasta su punto de ebullición. Hacen uso de la entalpía en fluidos que no están lo suficientemente calientes como para ser usados en una caldera, recuperando la potencia que de otra forma se perdería, mejorando el rendimiento del ciclo de vapor.
Eutrofización	Proceso natural o antropogénico provocado por el aumento de nutrientes (nitratos y fosfatos), aumentando la cantidad de fitoplancton, lo que provoca la pérdida de transparencia del agua y aumenta la descomposición de la materia orgánica. Esto hace que disminuya la concentración de oxígeno, provocando la muerte de organismos aerobios y desprendimiento de metano y amoníaco.
Incrustación	Sedimentación de sólidos con formación de núcleos cristalinos o amorfos de sulfatos, carbonatos o silicatos de magnesio y calcio que merman la eficiencia de funcionamiento de la caldera.
Índice de Langelier	Indicación del grado de saturación del carbonato de calcio en el agua, el cual se basa en el pH, alcalinidad y dureza. Refleja el equilibrio del pH del agua con respecto al calcio y la alcalinidad y es utilizado en la estabilización del agua para controlar la corrosión y la incrustación.

Partes por millón	Unidad de medida de concentración. Se refiere a la cantidad de unidades de sustancia que hay por cada millón de conjunto. En este caso se utilizará miligramos sobre litro.
Polímero	Macromoléculas formadas por la unión de moléculas más pequeñas llamadas monómeros.
Potencial de hidrógeno	Medida de la acidez o alcalinidad de una disolución. Indica la concentración de iones hidronio presentes en determinadas sustancias.
Potencial de hidrógeno de saturación	Potencial de hidrógeno del agua cuando está saturada con carbonato de calcio.
Purga	Evacuación de agua con el propósito de reducir la concentración de sólidos disueltos.
Quelante	Sustancia que forma complejos con iones de metales pesados.
Quelato	Complejo formado por la unión de un metal y un compuesto que contiene dos o más ligandos.
Recirculación abierta	Sistema de recirculación en el cual el agua calentada en el proceso de refrigeración se enfría de nuevo mediante evaporación de una parte de la masa que cede calor latente.

Recirculación cerrada	Sistema de recirculación en el cual el agua calentada en el proceso de refrigeración se enfría por otro sistema de refrigeración.
Sal tetrasódica del EDTA	Sustancia utilizada como agente quelante que puede crear complejos con un metal que tenga una estructura de coordinación octaédrica. Coordina metales pesados de forma reversible por cuatro posiciones acetato y dos amino, lo que lo convierte en un ligando hexadentado, y el más importante de los ligandos quelatos.
Secuestrante	Agente que evita el comportamiento normal de algunos iones al formar con ellos un complejo. Reaccionan a un nivel estequiométrico más bajo que los quelantes.
Sílice	Compuesto de silicio y oxígeno, SiO_2 . Ordenado en una red tridimensional forma el cuarzo.
Sistema abierto	Sistema físico-químico que interacciona con otros agentes químicos, por lo tanto está conectado correlacionalmente con factores externos a él.
Sistema cerrado	Sistema físico-químico que no interacciona con otros agentes físicos o químicos situados fuera de él y por lo tanto no está conectado casualmente ni correlacionalmente con nada externo a él.

Solubilidad	Medida de la capacidad de disolverse una determinada sustancia en un determinado medio.
Torre de enfriamiento	Estructuras para refrigerar agua y otros medios a temperaturas muy altas. Su principal uso es el de reducir la temperatura del agua de refrigeración utilizada en la industria.
Torre de refrigeración de tiro forzado	Torre de refrigeración que utiliza la potencia de motores de ventilación para impulsar el aire a la torre.
Torre de refrigeración de tiro natural	Torre de refrigeración diseñada con grandes alturas, la cual no utiliza la potencia de motores de ventilación para impulsar aire a la torre.
Total sólidos disueltos	Medida de las sustancias orgánicas e inorgánicas, en forma molecular, ionizada o micro-granular, que contiene el agua.
Tripolifosfato de sodio	$Na_5P_3O_{10}$, Sal de sodio del ácido trifosfórico que tiene el aspecto de polvo cristalino blanco. Es inodoro y soluble en agua. Su función básica es el ablandamiento de agua.

RESUMEN

Se redujo la concentración de dureza a cero miligramos por litro utilizando tripolifosfato de sodio, sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético y tres mezclas de los dos agentes ablandadores de agua mencionados anteriormente. Se evaluó y comparó el comportamiento que tienen en el proceso de ablandamiento del agua.

La investigación y experimentación a nivel laboratorio se realizó en el laboratorio de control de calidad de la empresa POLCHEMICAL ubicada en la ciudad de Guatemala. La experimentación a nivel industrial se llevó a cabo en tres diferentes empresas de alimentos ubicadas en la ciudad de Guatemala, de enero a abril de 2012

El procedimiento consistió en tomar una muestra de agua con una concentración de ochenta miligramos por litro de dureza. A ésta se le agregó una determinada cantidad de agente ablandador de agua y se midió la dureza. Este procedimiento se repitió hasta ajustar la dureza a cero partes por millón.

Con los datos obtenidos se elaboraron gráficas de dureza vs. cantidad de agente secuestrante de dureza, a partir de las cuales se determinó el modelo matemático y su correlación; dicho modelo determina la cantidad de agente secuestrante de dureza que se debe dosificar para reducir la concentración de dureza hasta cero miligramos por litro de cualquier agua de alimentación de generadores de vapor, condensadores y torres de enfriamiento.

Se procedió a calcular los modelos matemáticos que determinan el costo del ablandamiento utilizando los diferentes agentes y sus mezclas.

Al obtener los modelos matemáticos se llevó a cabo la experimentación a nivel industrial en calderas de vapor y circuitos de refrigeración.

Asimismo, se determinó cómo ajustar los parámetros en calderas de vapor, condensadores y torres de enfriamiento, para optimizar su operación y alargar su vida útil.

Los datos obtenidos poseen confiabilidad de 96%, establecida a partir de las correlaciones de las ecuaciones determinadas.

OBJETIVOS

General

Evaluar el desempeño de dos agentes ablandadores de agua y su mezcla para ajustar el índice de Langelier en recirculación de aguas de enfriamiento y estabilizar parámetros químicos en calderas de vapor.

Específicos

1. Determinar la dosificación óptima de químico en función de la calidad del agua de alimentación.
2. Determinar el costo máximo mensual del ablandamiento en función de la calidad del agua de alimentación.
3. Ajustar el índice de Langelier a un valor positivo próximo a cero, para incrementar la vida útil de condensadores y torres de enfriamiento.
4. Estabilizar los parámetros químicos en una caldera de vapor para maximizar la operación.
5. Evaluar agentes secuestradores de dureza alternativos al tripolifosfato.

HIPÓTESIS

Generadores de vapor, condensadores y torres de enfriamiento no sufren incrustación, oxidación ni corrosión al ser tratada su agua de alimentación con tripolifosfato de sodio, sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético o mezclas de ambos agentes ablandadores de agua.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo aborda el tema de las incrustaciones en equipos como generadores de vapor, condensadores y torres de enfriamiento.

La característica principal de este tipo de problema es que a causa de incrustaciones en dichos equipos, se generan pérdidas de eficiencia de hasta el 15%, lo que significa pérdidas monetarias.

Para analizar esta problemática, es necesario mencionar sus causas; una de ellas es la falta de tratamiento químico en el agua de alimentación. El tratamiento químico para la reducción de la dureza más utilizado actualmente involucra fosfatos, pero los fosfatos causan un efecto llamado eutrofización.

Debido a ello se evaluó un compuesto orgánico biodegradable que al igual que el fosfato, secuestra dureza.

El compuesto orgánico biodegradable que se evaluó fue la sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético. Y según investigaciones, se necesita una menor cantidad del compuesto orgánico biodegradable para reducir la misma cantidad de dureza que con el tripolifosfato de sodio.

La investigación de este problema se realizó por el interés de crear nuevos productos químicos para el ablandamiento de aguas que sean biodegradables; y con ello, evitar la eutrofización de aguas superficiales.

La parte experimental de la investigación consistió en tomar una muestra de agua con 80 mg/L de dureza, y reducirla con tripolifosfato de sodio, sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético y tres mezclas de ambos; hasta llegar a un valor de concentración de dureza de 0 mg/L. Con los datos obtenidos se determinó un modelo matemático, con el cual se puede dosificar la cantidad de agente secuestrante necesario para reducir cualquier concentración de dureza de una muestra de agua.

Entre los objetivos del trabajo de graduación se encuentra evitar la incrustación en la superficie de transferencia de calor en generadores de vapor, condensadores y torres de enfriamiento provocada por la dureza del agua de alimentación, lográndose a través de la evaluación de agentes secuestrantes de dureza, entre los cuales se tiene un polímero y un compuesto orgánico. Cada uno de ellos posee ventajas y desventajas y debido a ello, también se evaluaron tres soluciones compuestas por una mezcla de ambos. A partir de ello, se determinó la dosis de químico óptima en función de la calidad del agua.

1. ANTECEDENTES

En unidades generadoras de vapor y circuitos de refrigeración el agua blanda no provoca incrustaciones y ayuda a incrementar su eficiencia.

Las incrustaciones son peligrosas porque tienen una conductividad térmica inferior a la del hierro, lo cual tiene como consecuencia que el consumo de combustible y el precio del vapor aumenten. “La conductividad térmica de incrustaciones carbonatadas es de 6,3, de incrustaciones sulfatadas 2,6 y de acero 40, expresadas en calorías transmitidas por metro, metro cuadrado, hora y grado centígrado de diferencia de temperatura”¹.

Entre los trabajos de investigación más relevantes se encuentran los siguientes:

- Comportamiento del tripolifosfato en el tratamiento de agua por ablandamiento, realizado por Leonidas Martínez Zúñiga, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, en 1992. En este trabajo se investigó el comportamiento del tripolifosfato como suavizador de agua y su beneficio para fabricantes de Synders, consumidores de jabón y usuarios de calderas de vapor.

¹ GERMAIN, Louis; COLAS, Louis; ROUQUET, Jean. *Tratamiento de las aguas*. p. 21.

- Mantenimiento preventivo para calderas y circuitos de refrigeración en función del tratamiento del agua de alimentación, realizado por Alfredo Andrade López, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, Escuela de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ingeniería, en 2005. En este trabajo se investiga el tratamiento del agua de alimentación para calderas de vapor y circuitos de refrigeración y los efectos al no realizarlo.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Dureza del agua

La dureza se define como la concentración de todos los cationes metálicos no alcalinos presentes en el agua (iones de calcio, estroncio, bario y magnesio en forma de carbonatos o bicarbonatos) y se expresa en equivalentes de carbonato de calcio y constituye un parámetro muy significativo en la calidad del agua. Esta cantidad de sales afecta la capacidad de formación de espuma de detergentes en contacto con agua y representa una serie de problemas de incrustación en equipo industrial y doméstico.

2.2. Clasificación del agua

De acuerdo a la concentración de carbonatos contenidos en el agua, ésta puede clasificarse en niveles de dureza. Dicha clasificación se muestra en la tabla I.

Tabla I. **Clasificación del agua en función de su calidad**

Denominación	mg/L de CaCO ₃
Muy suaves	0 - 15
Suaves	16 - 75
Medias	76 - 150
Duras	150 - 300
Muy duras	Mayor a 300

Fuente: BOLA, Arturo. Análisis de dureza. <http://arturobola.tripod.com/dureza.htm>. Consulta: 10 de junio de 2011.

2.3. Tratamientos de agua para generadores de vapor

La calidad del agua de alimentación a la caldera repercute directamente sobre el buen funcionamiento de la misma, así como sobre la vida de muchas de las partes y piezas que forman el equipo del generador de vapor.

Para poder entender la importancia de la calidad del agua de alimentación de calderas, hay que conocer las características del agua, y las necesidades específicas que debe tener para ser usada en una caldera.

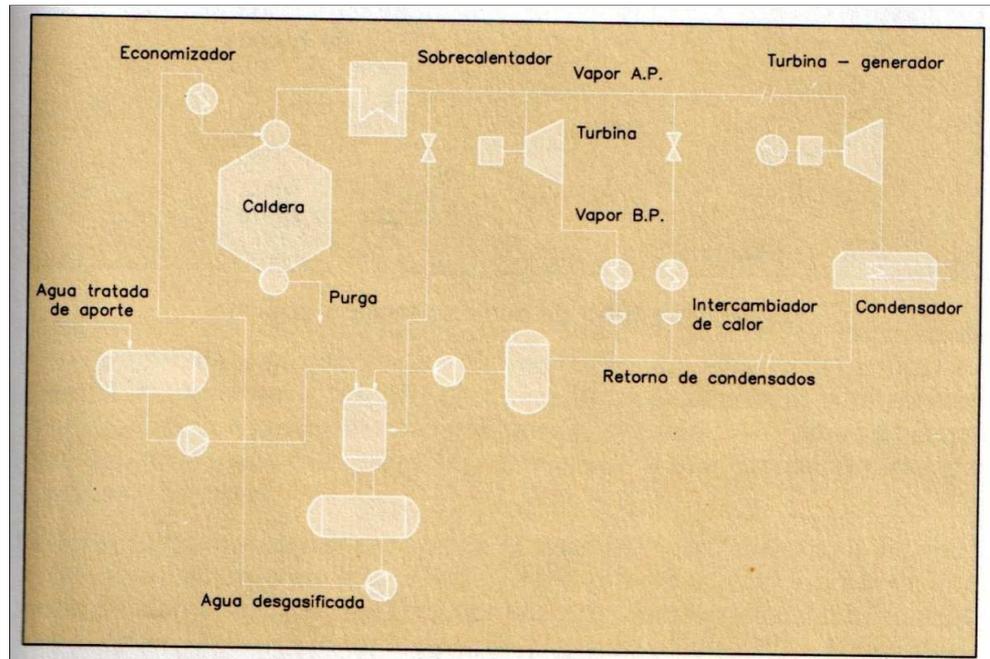
Es muy raro que el agua disponible en una industria se obtenga de una captación propia o de una distribución municipal y que tenga la calidad suficiente para ser aplicada directamente en la generación de vapor. El tratamiento de aguas para calderas es una compleja rama de la química del agua. Se debe decir, que no existe ningún procedimiento simplista ni producto químico apropiado para el tratamiento de todas las clases de aguas. Cada caso se debe considerar individualmente.

2.3.1. Tipos de calderas

La caldera es un recipiente en el cual tiene lugar una vaporización continua del agua mediante aporte de energía calorífica obtenida de un combustible fósil o nuclear. Debido al cambio de estado de agua a vapor, también se denomina generador de vapor.

El vapor es una fuente de energía de transporte relativamente fácil a distancias cortas, razón por la cual encuentra numerosas aplicaciones industriales como medio de calefacción y también como fuerza motriz (figura 1).

Figura 1. Circuito de generación y utilización del vapor



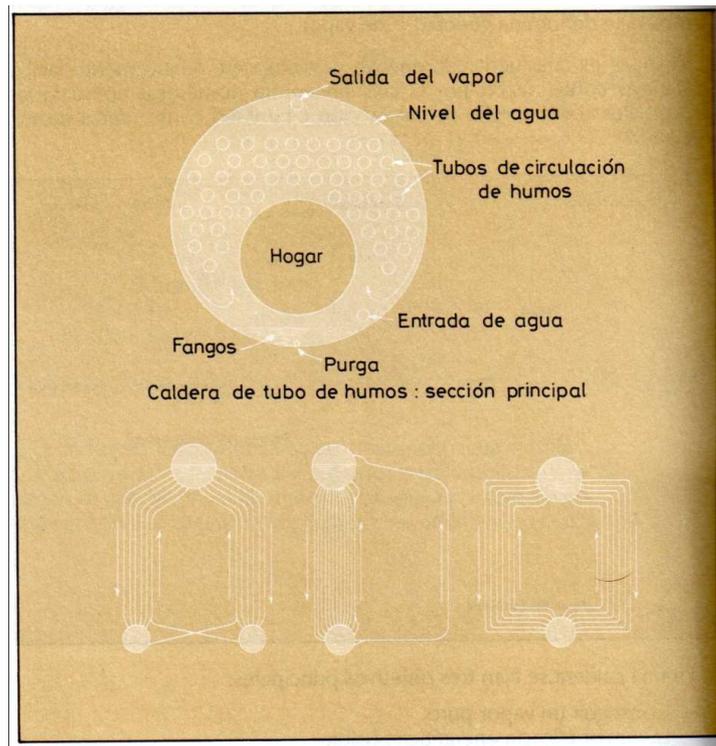
Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales*. p. 93.

En una caldera se fijan tres objetivos principales:

- Conseguir vapor puro
- La mayor eficiencia energética posible
- Una operación fiable y segura

Existen distintos tipos de calderas, atendiendo a su diseño se pueden clasificar en calderas de tubos de humo o pirotubulares y calderas acuotubulares (figura 2). Por la forma en que se lleva a cabo su construcción se puede hablar de unidades empacadas (diseñadas, construidas y probadas antes de su expedición), y unidades construidas *in situ*.

Figura 2. Tipos de calderas a) sección principal de una caldera pirotubular usada a bajas presiones b) esquemas de circulación del agua, A, D y O, en calderas acuotubulares



Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales*. p. 94.

La selección de un tipo u otro de caldera se hace teniendo en cuenta la capacidad, presión y temperatura de operación, la calidad del agua de alimentación, el combustible, su ubicación y las variaciones de carga que deberá soportar.

Las calderas pirotubulares tienen su principal aplicación en el intervalo inferior de capacidad y presión. Sus presiones máximas se sitúan, según el fabricante, entre los 10 y 15 Kg/cm² de presión, y las capacidades entre 10 y 20 Toneladas/hora.

En general son del tipo empacado, incorporando un hogar interior y varios pasos de tubos por cuyo interior circulan los gases calientes. Como la sección de paso de los gases ha de ser mucho mayor que la del agua, al aumentar su tamaño y presión de trabajo, el incremento de superficie y espesores de las paredes hacen más aconsejable pasar a una construcción acuotubular.

Las calderas acuotubulares se prestan mejor a los diseños compactos, de alta eficiencia y que debido a las altas transferencias específicas de calor tienen mayor tendencia a la corrosión y formación de incrustaciones. Hasta unas 50 – 100 Toneladas/hora de capacidad y 40 – 60 Kg/cm² de presión, se suele preferir la construcción empacada. Para tamaños superiores suelen construirse en el propio lugar de implantación.

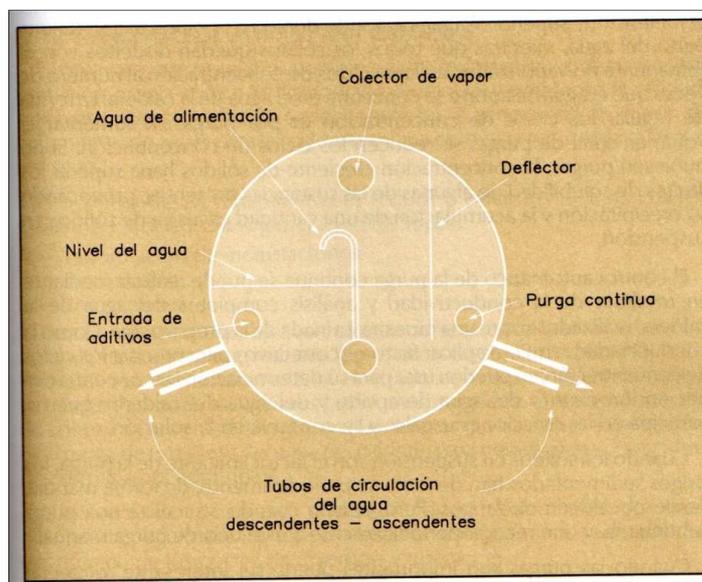
Las calderas acuotubulares tienen, en general, un doble calderín cilíndrico, superior e inferior, conectados por los tubos de conducción y vaporización del agua. Por el sentido de circulación del agua unos son descendientes y los otros ascendentes. Según la disposición de los tubos alrededor del hogar se habla de tipos "A", "O" y "D".

La circulación del agua puede ser natural o forzada. La circulación natural, debida a la diferencia de densidades del agua y del vapor, se reduce al aumentar la presión de operación, por disminuir la diferencia de densidades.

A partir de una cierta presión de operación y altura de carga que separa los dos calderines, hay que acudir a una circulación forzada mediante bombas.

En el calderín superior se separan el agua y el vapor enviado a distribución y uso. Para mejorar la separación del vapor el calderín dispone de una serie de elementos mecánicos que reducen el arrastre mecánico, aunque no pueden actuar sobre otros tipos de arrastre (volátiles, etc.). Para reducir el arrastre es importante una buena calidad del agua de aporte conjuntamente con un buen tratamiento interno, correctamente controlado. En el calderín superior se sitúan, además, la entrada de alimentación de agua, la entrada para los aditivos químicos para el control interno, y una salida para la purga continua (figura 3).

Figura 3. **Sección del calderín mostrando la situación de las conexiones principales**



Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales*.

p. 95.

La correcta situación de estas conexiones es muy importante. Los aditivos deben mezclarse bien con el agua de aporte y el agua del calderín antes de descender por los tubos de circulación y pasar a la zona de radiación, a fin de evitar la formación de incrustaciones y conseguir un buen acondicionamiento de los fangos formados.

El calderín inferior o de fangos permite la recogida de éstos y el control de los sólidos en suspensión del sistema, mediante purgas periódicas de su contenido. Pero la purga principal de los sólidos en disolución se realiza en la salida prevista en el calderín superior, o de vapor.

El agua del interior de la caldera tiene una concentración en sólidos disueltos muy superior al agua de aporte debido a la vaporización de una parte del agua, mientras que todos los sólidos quedan disueltos con el remanente no vaporizado. Se llama ciclos de concentración al número de veces que el agua de aporte se concentra en el agua de la caldera. La forma de regular los ciclos de concentración es por purga. Al aumentar el volumen total de purgas se reducen los ciclos de concentración. Si no hubiera purgas, la concentración creciente de sólidos haría superar los límites de solubilidad de algunas de las sustancias presentes, provocando su precipitación y la acumulación de una cantidad excesiva de sólidos en suspensión.

El control automático de la purga continua se puede realizar mediante un medidor de la conductividad y análisis completos del agua de la caldera, realizados sobre una muestra enfriada de la propia purga. Como la conductividad requiere aplicar factores correctivos para precisar los ciclos de concentración, se pueden usar para su determinación las concentraciones en ión cloruro del agua de aporte y del agua del calderín, que no participa en las reacciones usuales y se conserva en la solución.

Cuando los sólidos en suspensión son el factor limitante de la purga, los fangos sedimentados han de retirarse periódicamente, de forma manual, desde el calderín de fangos. Pero incluso cuando se realiza una purga continua, hay que recurrir periódicamente a este tipo de purga manual.

Cuando las purgas son importantes puede ser interesante recuperar parte del calor, en general haciendo un precalentamiento del agua de aporte. Cuando el volumen de purgas es muy grande, debido a una baja calidad del agua de aporte, conviene analizar la ventaja económica de realizar un tratamiento externo más completo del agua de alimentación.

Aparte de la caldera propiamente dicha, existen otros elementos que pueden estar integrados en el conjunto, y que forman parte del sistema de producción y uso del vapor.

Para aumentar la eficiencia térmica del sistema se utiliza el economizador, que sirve para transferir calor desde los humos de combustión al agua de alimentación, y los sobrecalentadores y recalentadores de vapor, que tienen un interés limitado a los usos del vapor de alta presión.

Las turbinas son máquinas de accionamiento rotativo que utilizan vapor a presión superior a la empleada para calefacción, muchas veces, recalentado, que cede su energía antes de ser condensado y devuelto a la alimentación de la caldera. Las pequeñas tolerancias admisibles en una turbina obligan a evitar cualquier vibración. Las incrustaciones sobre los álabes pueden provocar el desequilibrio y una vibración inadmisibles.

Los arrastres de vapor son la fuente más común de problemas en las turbinas. Si se trata de unidades a alta presión, la sílice es el componente más preocupante.

Las grandes turbinas, en general, van seguidas de un condensador de superficie. Mediante eyectores o bombas de vacío se pueden retirar los gases incondensables y el aire que se haya podido introducir, de forma que, además de reducir la contrapresión de operación de la turbina, se reduce la corrosión potencial por oxígeno.

2.4. El tratamiento de aguas para calderas

Es muy raro que el agua disponible en una industria se obtenga de una captación propia o de una distribución municipal y que tenga la calidad suficiente para ser aplicada directamente en la generación de vapor. El tratamiento de aguas para las calderas es una compleja rama de la química del agua.

El objetivo de los tratamientos es reducir y evitar los tres principales problemas asociados a la generación de vapor:

- La formación de incrustaciones
- La corrosión
- Los arrastres

Para conseguir estos objetivos, el agua de aporte suele someterse a un tratamiento externo que reduzca la presencia de contaminante a un nivel conveniente. Para contrarrestar el efecto de los contaminantes residuales se añaden, además, los aditivos químicos apropiados.

El tercer elemento de control de la calidad del agua en el ciclo de vaporización-condensación es la purga de una parte del agua del calderín para mantener las concentraciones máximas admisibles.

El método de tratamiento adecuado vendrá determinado por unas normas de seguridad, las especificaciones del fabricante y un estudio económico de los costos de inversión y operación.

La calidad del agua de alimentación y del agua interior de las calderas, está reguladas desde el punto de vista de seguridad de utilización del sistema. En España, a partir de la Norma UNE 9-075-78, de la cual se ha elaborado la tabla II. En EE.UU. la ASME publica normas consensuadas de control de la calidad del agua de alimentación y de calderas, para las calderas industriales modernas.

Tabla II. Norma UNE 9-075-78. Característica del agua

Calderas de tubos de humo				
Presión máx. kg/cm ²	P=<11	11>P=<17	P>17	
Agua de alimentación				
Aspecto visual	Transparente sin color ni sedimentos			
Dureza en °hf	=<1	=<0,6	=<0,2	
pH a 20 °C	8.5	a	9.5	
Materia orgánica mg/l		=<10		
Aceite mg/l	=<3	=<2	=<1	
Agua del interior de las calderas				
Salinidad total mg/l	=<5000	=<4000	=<3000	
Sólidos en suspensión mg/l	=<300	=<250	=<200	
Alcalinidad total mg/l	=<1000	=<800	=<600	
pH a 20 °C		9.5 a	11.5	
Fosfatos en mg/l de P ₂ O ₅	15-40	15-30	15-25	
Sílice mg/l de SiO ₂	=>200	=<150	=<100	
Calderas acuotubulares				
Agua de alimentación	Circulación natural o asistida		C. forzada	
Presión máx kg/cm ²	=<20	20<P=<20	20<P=<40	40<P=<64 P>64
Aspecto visual	Transparente sin color ni sedimentos			
Dureza en °hf	=<0.1	=<0.05	=<0.05	=<0.02 =<0.01
pH a 20 °C		8	a	9.5
Mat. orgánica mg/l	=<10	=<10	=<10	=<5 =<5
Aceite mg/l	=<1	=<1	=<0.5	=<0.5 =<0.3
Oxígeno mg/l			=<0.02	
CO ₂			no detecta	
CO ₂ combinado mg/l	=<20	=<20	=<20	=<1 =<1
Hierro mg/l	=<0.05	=<0.05	=<0.05	=<0.03 =<0.02
Cobre mg/l	=<0.01	=<0.01	=<0.01	=<0.005 =<0.005
Agua del interior de las calderas				
Presión máx kgf/cm ²	=<20	=<40	=<64	=<80 =<125
Salinidad total mg/l	=<3000	=<2000	=<1500	=<750 =<125
Sólidos en susp. mg/l	=<150	=<100	=<75	=<40 =<10
Alcalinidad total mg/l	=<600	=<400	=<300	=<150 =<30
pH a 20 °C			9.5 a	11.5
Fosfatos mg/l de P ₂ O ₅	=<25	=<10	=<10	=<3 =<3
Sílice mg/l de SiO ₂	=<140	=<50	=<10	=<4 =<1.2
La última columna aplica para P>160 excepto la sílice que debe ser =<0.3				

Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales*. p. 98.

En la tabla III se muestran algunos de estos valores utilizados orientativamente en muchos países. No obstante, en último extremo, las garantías de funcionamiento requieren cumplir las especificaciones del fabricante de la caldera.

Tabla III. **Valores guía para calderas acuatubulares**

Presión kgf/cm ²	Agua de alimentación			Agua de caldera			
	Dureza ppm CO ₃ Ca	Hierro ppm	Cobre ppm	O ₂ ppm	Conduct. microsi	Alcali pmCO ₃ Ca	SiO ₂ ppm
0-20	0.30	0.100	0.050	0.04	7000	700	150
20-30	0.30	0.050	0.025	0.04	6000	600	90
30-40	0.20	0.030	0.020	0.07	5000	500	40
40-50	0.20	0.025	0.020	0.07	4000	400	30
50-60	0.10	0.020	0.015	0.07	3000	300	20

Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales*. p. 99.

Las exigencias de calidad, por razones de seguridad, rigen en las calderas trabajando a altas presiones, pero representan unas exigencias mínimas para las calderas a baja presión.

En estos casos, el tratamiento de agua más indicado viene determinado por un análisis económico que, de forma particular, compare el coste del tratamiento con las pérdidas en purgas.

Para flujos de calor absorbido superior a $2 \times 10^5 \frac{Kcal}{m^2h}$ serán aplicables los valores de $P > 160$, cualquiera sea la presión de servicio, con excepción del SiO_2 . La alcalinidad no será en ningún caso superior al 20% de la salinidad.

En una primera aproximación y para aguas de calidad regular, el ablandamiento es válido para calderas a baja presión, del orden de 10 Kg/cm². Hasta 20 – 30 Kg/cm² puede ser suficiente una desmineralización catión-anión, y por encima una desmineralización completa con un lecho mixto de pulido final. Sin embargo, no se puede generalizar por la gran variedad de las aguas de partida y conviene realizar un estudio completo que contemple los criterios económicos propios del utilizador.

El tratamiento por intercambio iónico irá precedido de pretratamiento adecuado. Los sólidos en suspensión deben reducirse a unos 5 – 10 mg/L para evitar el ensuciamiento de las resinas. Los procesos indicados pueden ser la coagulación-floculación, la decantación y/o la filtración. Si la alcalinidad de partida es excesiva, una descarbonatación con cal la reducirá a unos 35 mg/L, y en el caso de exceso de dureza reducirá ésta en la misma medida que la alcalinidad. También quedarán reducidas la materia orgánica y, ligeramente, la sílice.

Si la materia orgánica en el agua de alimentación supera los 50 mg/L interferirá con la precipitación de la cal, a menos que se emplee una adsorción con carbón activo u oxidación química preliminar.

Si la cantidad de sólidos disueltos es inferior a 700 – 1000 mg/L se puede acudir directamente al intercambio iónico. Si es superior convendrá analizar el interés de una desalinización previa por ósmosis inversa.

El desgasificador del agua de aporte situado antes de la alimentación a la caldera sirve para eliminar los gases disueltos residuales y para aumentar la temperatura del agua de alimentación por contacto directo con vapor de baja presión. Los diseños modernos a base de bandejas o con boquillas aspersoras permiten reducir el contenido de oxígeno por debajo de 0.005 mg/L. Los desgasificadores operan a muy baja presión, como unos 0.2 Kg/cm^2 relativos, y calentando el agua hasta cerca de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ de la temperatura de saturación a dicha presión relativa.

El economizador es un intercambiador de calor, que por cada $6 \text{ }^\circ\text{C}$ aproximadamente, que consigue hacer aumentar la temperatura del agua de alimentación permite mejorar en un 1% la eficiencia del sistema. Sin embargo, teniendo en cuenta que el aumento de temperatura del agua de alimentación acelerará la tendencia a dar incrustaciones o la corrosión, conviene hacer un tratamiento más completo del agua, controlarla más cuidadosamente y verificar regularmente la operación del desgasificador.

Cuando el vapor se consume en el proceso, el aporte de agua puede ser muy importante, y además cumpliendo unas especificaciones propias, que pueden imponer la ausencia de determinados reactivos y contaminantes. Esta es una exigencia típica de la industria alimentaria.

Los sistemas cerrados de calefacción recuperan prácticamente todo el fluido como condensado, que es devuelto a la alimentación de la caldera. En tales casos las condiciones más importantes son: que no produzca incrustaciones que limiten la transferencia de calor, ni que produzca corrosión. Las pequeñas pérdidas de agua que hay que surtir permiten que el circuito trabaje con un agua de gran calidad y un tratamiento interno mínimo.

El tratamiento de condensados forma parte del tratamiento externo. Su uso, antes limitado a los circuitos de muy alta presión, está cada vez más extendido y aplicado a presiones más bajas para eliminar hierro y cobre y la contaminación por fugas antes de incorporar el agua de condensados pulida al agua de aporte.

2.5. Tratamiento interno antiincrustante

Como su nombre lo indica, este tipo de tratamiento se lleva a cabo dentro del generador de vapor.

2.5.1. Origen de las incrustaciones y depósitos

La formación de incrustaciones y el depósito de fangos se debe a:

- Contaminantes presentes en el agua de aporte
- Productos de la corrosión interna del sistema
- Contaminantes introducidos en el condensado como fugas

Las incrustaciones, las formas más sólidas y preocupantes, se producen sobre las superficies metálicas y calientes de las calderas, en el proceso de evaporación. Al evaporarse parte del agua las sustancias contaminantes se concentran en la fase líquida del film o película sobre el metal. Los componentes solubles se redisuelven fácilmente en el agua que reemplaza a la burbuja de vapor anteriormente formada, pero las sustancias insolubles tienden a precipitar sobre la superficie del metal. Este depósito disminuye la transferencia de calor y provoca un recalentamiento del metal que puede llegar a la rotura.

El problema es doble: por un lado reduce la eficiencia de la transmisión de calor, y por otro lado reclama un mayor mantenimiento del sistema o la parada por avería. La mayoría de los compuestos incrustantes tienen una solubilidad que disminuye con la temperatura, y de ahí que el problema sea más grave en las calderas que operan a altas presiones y temperaturas.

Además de las incrustaciones, se forman y depositan otros sólidos que permanecen suspendidos en la masa de agua como fangos sin adherirse a las paredes y cuya concentración se controla mediante un programa de purgas. Sus efectos son muy inferiores a los de las incrustaciones y, por este motivo, una forma de controlar las incrustaciones es provocar la formación de fangos.

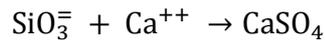
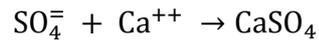
Aunque la formación de incrustaciones ha estado tradicionalmente asociada a la dureza del agua, hay otras impurezas, tales como: el hierro, cobre o sílice, cuyo papel ha sido cada vez más importante, en especial desde que el calcio y el magnesio se someten cada vez más a intensos tratamientos externos del agua de alimentación.

El bicarbonato cálcico, $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, tiene una solubilidad superior a 300 mg/L a 25 °C, pero se descompone al calentarlo en el agua de la caldera, dando carbonato cálcico, CaCO_3 , cuya solubilidad es de 14 mg/L a 25°C, según la reacción:



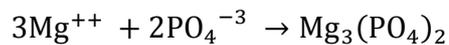
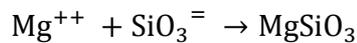
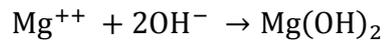
La precipitación potencial del carbonato cálcico puede determinarse mediante el índice de Langelier.

El ión calcio también puede precipitar en presencia de iones sulfato o silicato, de acuerdo con las reacciones:

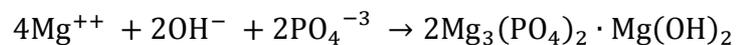


Cada uno de estos compuestos del calcio pueden precipitar, formando incrustaciones con estructura cristalina, sobre la superficie del metal.

El ión magnesio puede experimentar las siguientes reacciones con formación de precipitados:



En las calderas que utilizan un tratamiento a base de fosfatos, se puede tomar un fosfato básico de magnesio, según la reacción:



El cual es un conglomerante indeseable de los depósitos de la caldera.

Después del calcio y magnesio, la sílice es otro notable inductor de incrustaciones. En las condiciones alcalinas en que suelen operar las calderas no es normal encontrar silicato magnésico porque el magnesio presente precipita con preferencia como hidróxido.

En cambio la sílice precipita como silicato cálcico, un duro incrustante, y a veces como silicatos cálcicos básicos, también muy duros y aislantes. Otros silicatos que producen incrustaciones duras, adherentes, aislantes y de difícil limpieza, son los de hierro y aluminio.

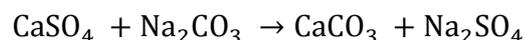
El cuarzo, SiO_2 , como tal sólo se forma cuando hay elevadas concentraciones de sílice. También es muy aislante y difícil de quitar.

Los óxidos de hierro y cobre, derivados de la corrosión interna, son la fuente más corriente de depósitos a base de metales. En las calderas a alta presión, que utilizan agua de aporte de elevada pureza, estos óxidos son la principal fuente de depósitos. Pocas veces vienen del agua de aporte, aunque no es imposible.

2.5.2. Programa de carbonatos

El tratamiento interno de las aguas para controlar la formación de incrustaciones persigue o bien mantener la dureza e impurezas en solución, o hacerlas precipitar al tiempo que se usan acondicionadores de fangos para prevenir la formación de incrustaciones.

En los años veinte, el primer tipo de tratamiento que se realizó consistía en añadir cantidades estequiométricas de carbonato sódico para precipitar las sales de dureza cálcica en forma de carbonato cálcico. El sulfato cálcico, que daría una incrustación más dura y difícil de eliminar, es algo más soluble que el carbonato y, por tanto, es este último el que precipita:

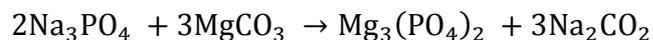
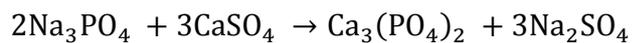


Bajo condiciones alcalinas, el magnesio y la sílice precipitan como hidróxido magnésico y silicato magnésico. Este método está aún hoy en día en uso, pero limitado a calderas de baja presión empleando aguas de aporte de elevada dureza.

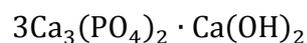
A mayores presiones es preferible que no haya altas concentraciones de fangos porque contribuyen a la formación de incrustaciones. Además, a mayores presiones y temperaturas se hace difícil mantener en el agua de la caldera la concentración suficiente de carbonato para que reaccione con toda la dureza cálcica. Con la alta temperatura el carbonato sódico se descompone liberando CO_2 que aumenta la corrosividad de los condensados.

2.5.3. Programas de fosfatos

En los años treinta se adoptaron los fosfatos para el tratamiento interno. Los fosfatos de calcio y magnesio que se forman son fácilmente dispersables y eliminados por la purga. Las dos reacciones más interesantes son:



El magnesio y la sílice se separan preferentemente como hidróxido magnésico y silicato magnésico. La principal forma en que precipita el fosfato cálcico, en aguas de suficiente alcalinidad, es como apatita,



Manteniendo en la solución acuosa un pH entre 10,5 y 11,5 y un fosfato residual de 20 a 50 mg/L, se forma un fango de fácil dispersión mediante un polímero o un dispersante orgánico natural.

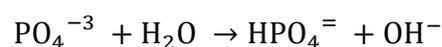
2.5.4. Programa del fosfato coordinado

En las calderas a alta presión y alta velocidad de transferencia de calor, es conveniente minimizar los sólidos presentes. También hay que evitar la alcalinidad cáustica por el potencial ataque del metal. El fosfato sódico puede ser utilizado para alcanzar la alcalinidad conveniente sin tener que utilizar sosa cáustica.

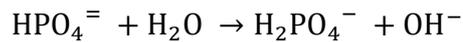
El método de control del pH del fosfato coordinado difiere del programa estándar en que el fosfato se añade para controlar el pH al mismo tiempo que reacciona con cualquier dureza cálcica en la caldera.

La especificación puede mantenerse añadiendo mezclas proporcionadas de fosfato trisódico, Na_3PO_4 , fosfato disódico, Na_2HPO_4 , metafosfato sódico, NaPO_3 , o ácido fosfórico, H_3PO_4 , pero normalmente se utilizan fosfato trisódico y fosfato disódico porque entre ambos se aseguran las condiciones correctas y se evitan las posibilidades de una adición errónea.

Los iones fosfato, PO_4^{-3} , están en equilibrio reversible con las otras formas:



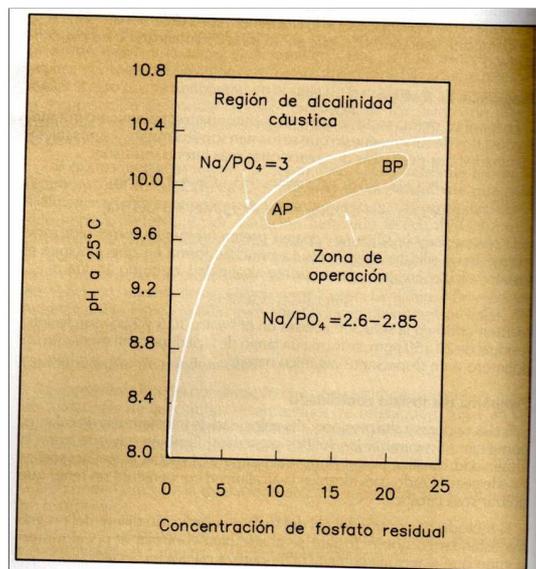
Esta reacción es completa hacia la derecha a pH por debajo de 11, la reacción de hidrólisis prosigue según:



Esta reacción está completamente desplazada a la derecha a pH entre 5 y 7 pero menos de un 0,1% a un pH de 10. Por lo tanto, el fosfato disódico ni se hidroliza ni se disocia más a los pH normales de la caldera.

La adición de más fosfato disódico tiene poco efecto sobre el pH en el intervalo de 10 a 11 (figura 4). La zona de operación idónea se sitúa por debajo de la relación $\text{Na}/\text{PO}_4 = 3$, que se consigue de forma inmediata utilizando una mezcla de Na_3PO_4 y Na_2HPO_4 .

Figura 4. **Control coordinado pH-fosfato del agua de caldera**



Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales.*

p. 104.

Para controlar correctamente un programa de fosfatos coordinado, el agua de alimentación debe ser muy pura y de calidad consistente. Se usa normalmente en calderas de presiones hasta 40 Kg/cm² y aguas de aporte que no sobrepasen los 10 mg/L de dureza.

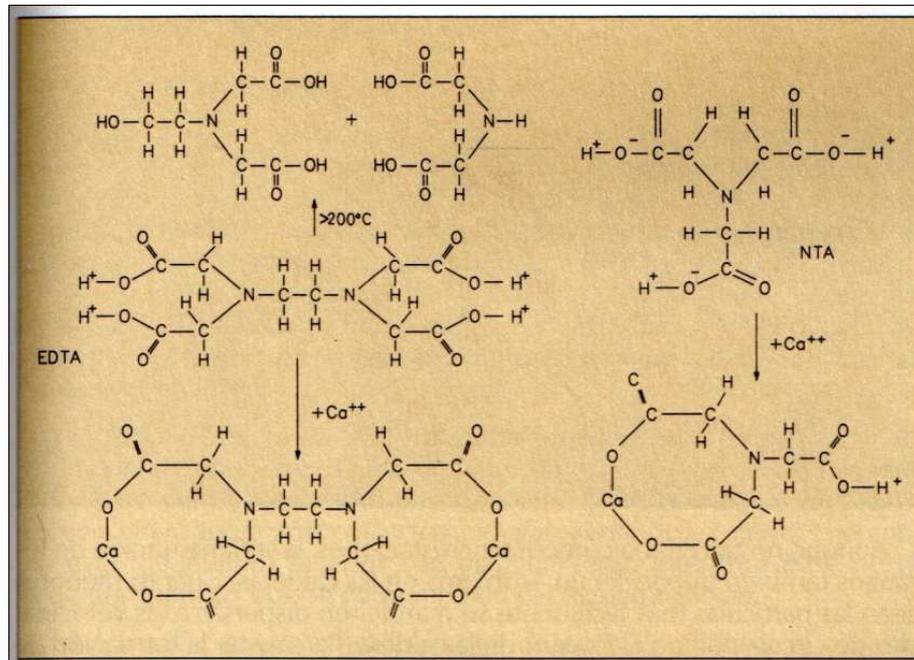
2.5.5. Programa solubilizante con quelantes

El desarrollo de calderas más compactas y el mayor empleo de condensados recuperados y devueltos a la alimentación, determinó la necesidad de disponer de mejores medios para inhibir los depósitos, evitar taponamientos de los tubos más pequeños y trabajar con niveles más altos de hierro en la alimentación. Para conseguir objetivos el siguiente paso fue el uso de quelantes.

Los quelantes son agentes químicos de bajo peso molecular, solubles en agua, que se combinan estequiométricamente con cationes divalentes y trivalentes (calcio, magnesio, hierro y cobre) para formar complejos solubles y estables de calor y mantienen las superficies de la caldera más limpias que los tratamientos de precipitación con carbonatos y fosfatos.

Los dos quelantes de utilización más común son las sales de los ácidos etilendiaminotetraacético (EDTA) y Nitrilotriacético (NTA). Ambos forman complejos estables con el calcio y magnesio. Forman moléculas cíclicas con iones calcio. El EDTA se descompone a temperatura superior a 200°C dando moléculas también quelantes. La estabilidad se alcanza mediante formación de estructuras de anillo que incluyen al ión metálico (figura 5).

Figura 5. Moléculas de EDTA y NTA



Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales*. p. 105.

La estabilidad térmica de ambos quelantes, EDTA Y NTA, depende de la temperatura, el pH del agua, la presencia de agentes oxidantes, las sales presentes, el tiempo de residencia y las puntas térmicas que puedan darse. La presión de operación no es suficiente para predecir la estabilidad del quelante. Los productos de romperse la molécula del EDTA también son quelantes pero menos que el EDTA. Aunque el NTA es estable a mayores temperaturas que el EDTA, sus productos no son quelantes. Por tanto, mientras el NTA pierde su capacidad quelante a presiones superiores a los 60 Kg/cm^2 , el EDTA puede ser utilizado efectivamente hasta los 75 Kg/cm^2 .

Cuando se mantiene un adecuado valor de quelante residual y un estricto control de la calidad del agua de alimentación, con durezas no superiores a 1,5 mg/L, se consiguen eliminar las incrustaciones y los depósitos de fangos. Las purgas pueden llevarse las capas de magnetita que protegen el hierro estructural, favoreciendo la corrosión.

2.5.6. Parámetros químicos a estabilizar en generadores de vapor

Los parámetros químicos se utilizan para definir la calidad del agua y para llevar control del proceso de su tratamiento realizando mediciones periódicamente. Los límites aceptables para calderas pirotubulares se muestran en la tabla IV.

Tabla IV. Parámetros químicos a estabilizar en generadores de vapor

Parámetro	Límites Aceptables	Unidades
pH	10,5 - 12	
Total sólidos disueltos	Máx. 3 500	mg/L
Dureza total	0	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad total "m"	700 - 800	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad hidróxidos "OH"	Máx. 500	mg/L como CaCO ₃
Fosfatos	30 - 40	mg/L como PO ₄
Sulfitos	20 - 40	mg/L como SO ₃
Cloruros	Máx. 300	mg/L como Cl
Sílice	Máx. 120	mg/L como SiO ₂
Hierro	0	mg/L como Fe ^{-1, -3}
Purgas	En función de TDS	

Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales*.
p. 98.

2.6. Tratamiento de aguas de refrigeración

Los sistemas de refrigeración por agua son esenciales en los procesos de muchas industrias. La productividad y calidad del producto pueden verse afectadas por: las incrustaciones, corrosión, ensuciamiento y la contaminación microbiológica.

Estos problemas pueden generar costes altísimos cuando causan la pérdida de transferencia de calor, fallos en el equipo y preocupaciones en materia de salud y seguridad.

La mayor parte de las aguas empleadas con fines industriales, se usan para enfriar un material o un equipo. La gran capacidad calorífica del agua y la gran disponibilidad del agua en la mayoría de las áreas industriales, han hecho del agua el medio de transferencia de calor favorito en las aplicaciones industriales y de servicios.

2.6.1. El agua como medio de refrigeración

La mayoría de instalaciones industriales utilizan agua como medio de enfriamiento. Las principales razones son su disponibilidad en la mayor parte de zonas y el calor específico elevado del agua.

Normalmente, el agua no entra en contacto directo con el material a enfriar sino que el intercambio de calor se realiza a través de una pared, en general metálica, buena conductora de calor. Esta pared es la superficie de intercambio de calor, que lo mismo que el agua y el fluido a enfriar están encerrados en un recipiente llamado intercambiador de calor.

Uno de los factores que controlan el transporte de calor son las incrustaciones que se forman sobre la superficie de intercambio y que, por ser aislantes, disminuyen la velocidad de transferencia.

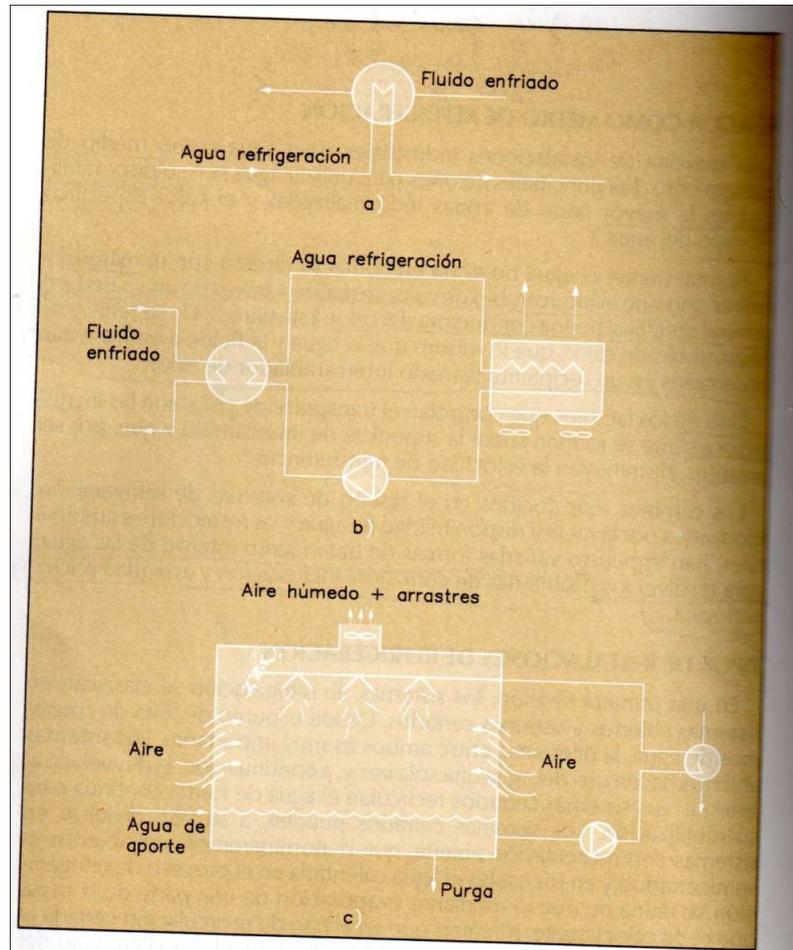
Los cambios introducidos en el diseño de sistemas de refrigeración, motivados por la menor disponibilidad de agua y las restricciones ambientales, han impuesto variadas formas de tratamiento interno de las aguas para resolver los problemas de corrosión, incrustación y actividad microbiana.

2.6.2. Tipos de instalaciones de refrigeración

En una primera división, los sistemas de refrigeración se clasifican en sistemas abiertos y sistemas cerrados. Desde el punto de vista de consumos de agua, la diferencia entre ambos es muy importante. Los sistemas abiertos hacen uso del agua una sola vez y, a continuación, la devuelven al exterior. Los sistemas cerrados recirculan el agua de forma continua para su reutilización.

Los sistemas cerrados pueden, a su vez, dividirse en sistemas con recirculación abierta, que se denominan semiabiertos (o semicerrados) y en los cuales el agua calentada en el proceso de refrigeración se enfría de nuevo mediante evaporación de una parte de la masa que cede calor latente, mientras que en el tipo de recirculación cerrada el agua es enfriada por otro sistema de refrigeración, como por ejemplo el radiador de un carro, que puede emplear también agua, otro líquido o aire (figura 6).

Figura 6. Circuitos de refrigeración a) abierto b) cerrado c) semiabierto



Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales*.
p. 118.

Las primeras instalaciones de refrigeración eran sistemas abiertos. Estos sistemas se siguen utilizando en pequeñas instalaciones, o en grandes sistemas donde el agua es abundante y no llegan a alcanzarse aumentos importantes de la temperatura del agua, como suele ser el caso de los condensadores de grandes centrales térmicas situadas al lado del mar o grandes ríos.

El sistema completamente cerrado no es más que un circuito intermedio, donde se aprovechan las particulares características del agua para absorber calor en un paso intermedio, y en los que finalmente la liberación de calor al medio receptor se hace a través de una segunda superficie de intercambio.

El sistema semiabierto típico es la torre de refrigeración, aunque existen otras alternativas para conseguir la vaporización de una parte del agua. El elevado calor latente del agua permite que por cada gramo de agua evaporada se puedan enfriar muchos gramos de agua líquida, en varios grados centígrados.

Las torres de refrigeración pueden ser de tiro natural o de tiro forzado. Las torres de tiro natural, en general, tienen alturas considerables y una forma hiperbólica que les da un óptimo tiro natural del aire y una buena estabilidad estructural.

Las torres de circulación artificial o mecánica hacen circular el aire que se llevará el agua evaporada mediante un tiro forzado o inducido. La selección de un tipo u otro de tiro depende de las condiciones particulares de la instalación. En el tiro forzado los ventiladores se encuentran en la base del equipo y fuerzan el aire contra las gotas de agua en descenso. Como el aire que impulsan es seco, los ventiladores no sufren de corrosiones o depósitos de sólidos.

En el tiro inducido los ventiladores se sitúan en la parte superior de la torre e inducen una circulación del aire más cruzada o más en contracorriente según el diseño. En contracorriente se consiguen eficiencias máximas porque el agua más fría está en contacto con la entrada de aire. En flujo cruzado el aire encuentra las resistencias menores y se reducen los consumos de potencia.

En todos los casos se emplean unos separadores de gotas que reducen las pérdidas de agua por arrastre.

2.6.3. Problemas derivados del agua y su tratamiento

Los problemas derivados del agua de refrigeración que surgen en las instalaciones son:

- Corrosión
- Incrustaciones
- Crecimiento microbiológico
- Depósito de fangos

Las características del agua y de la instalación permiten prever el tipo de tratamiento que convendrá aplicar a una instalación determinada. Sin embargo, es el seguimiento posterior de la instalación el que permitirá definir el programa más indicado por la eficiencia de los resultados y el ajuste del costo operativo.

El programa de tratamiento variará mucho según el tipo de instalación. En un sistema totalmente abierto es imposible realizar un tratamiento externo completo. Debido a los grandes caudales de agua que puede implicar, el tratamiento químico se aplicará normalmente a niveles bajos para que resulte económicamente viable sin intentar reducir al 100% la corrosión potencial del agua bruta. La prevención de la formación de incrustaciones y el crecimiento microbiológico seguirán criterios similares. Los problemas derivados de depósitos de fangos se minimizarán a base de un acondicionamiento o tratamiento dispersante, pero es fundamental diseñar correctamente el sistema hidráulico para evitar zonas de baja velocidad.

Por el contrario, un sistema completamente cerrado con pequeñas pérdidas y los pequeños aportes de agua correspondientes, hace económico y recomendable utilizar en agua de aporte de alta calidad y un tratamiento químico interno completo. Normalmente, los sistemas cerrados se emplean en circuitos de refrigeración críticos para los que es aconsejable realizar un control de calidad permanente. Con un buen acondicionamiento de las aguas los problemas de corrosión e incrustaciones son mínimos y al no haber contacto con la atmósfera es fácil evitar el crecimiento de microorganismos. En consecuencia, tampoco son de esperar problemas de depósitos. Es fundamental conseguir las menores pérdidas posibles de agua porque los problemas serán proporcionales al aporte de agua necesario.

Los sistemas semiabiertos, de los que forman parte las torres de refrigeración, constituyen el grupo más complejo y cuyo tratamiento de agua requiere un balance también más complejo entre efectividad y costo.

Cuando una parte del agua de refrigeración se evapora en la torre, la parte correspondiente de sólidos en suspensión y sólidos disueltos queda retenida en la fase acuosa. Al aumentar la concentración, progresivamente, llega un momento en que algunas de las sales disueltas alcanzan su límite de solubilidad y empezarían a depositarse. La concentración de sólidos en suspensión iría, a su vez, aumentando. El contacto del agua con el aire arrastra además los sólidos flotando en el aire, que se irían añadiendo a los propios del agua. La forma de controlar el contenido en sólidos del agua circulante es el mantenimiento de una purga controlada. En tal caso hay que hacer un aporte de agua que compense la evaporación, el arrastre de gotas de agua por el aire, especialmente en condiciones de viento y la purga.

La concentración en sólidos, se puede expresar como ciclos de concentración, que indica la relación entre las concentraciones del agua circulante y el agua de aporte. También se la denomina relación de concentraciones. Debe estar basada en un constituyente que no esté afectado por los tratamientos internos.

Por ejemplo, no puede basarse en la relación de cloruros en el agua de recirculación y el agua de aporte si se está añadiendo cloro para el control microbiológico.

Para los tratamientos químicos internos se puede emplear un índice de residencia del aditivo, que representa el tiempo que se necesitaría para que su concentración se redujese a la mitad, teniendo en cuenta las pérdidas, evaporación, purga y aporte de agua.

Los aditivos destinados a evitar la corrosión, incrustación y depósitos se suelen añadir en forma continua preferentemente, en función del agua de aporte y la relación de concentraciones. La adición de biocidas puede seguir programas irregulares; a veces con una dosis continua, mas dosis de choque periódicas, para contrarrestar la adaptación de los microorganismos a los fenómenos regulares.

El programa de tratamiento se diseña para obtener un agua de circulación con un índice de Langelier de aproximadamente +1, entre +0,5 y +1,5 en presencia de inhibidores de la precipitación, y entre 0 y 0.5 si no los hay; un índice de Ryznar de 6 a 6,5 y un pH entre 6 y 8. Se recomienda que el agua de circulación no sobrepase los 1 500 mg/L, de sólidos disueltos y sea siempre inferior a 2 500 mg/L. La conductividad debe ser inferior a 4 000 microsiemens y los sólidos en suspensión inferior a los 100 mg/L.

Estos valores determinan el máximo de ciclos de concentración del agua circulante basado en un balance de la materia disuelta en el agua de alimentación y las purgas.

En un sistema semiabierto el volumen de agua de aporte, A, es igual a la suma de las pérdidas por evaporación, E, los arrastres por el aire, V, y las purgas, P:

$$A = E + V + P$$

Las pérdidas por evaporación se pueden considerar como un 1% por cada 5.5°C de salto de temperatura en la torre, mientras que A y P pueden medirse directamente, V se obtiene por balance y tiene un valor característico del emplazamiento (del orden del 0.1% del agua circulante).

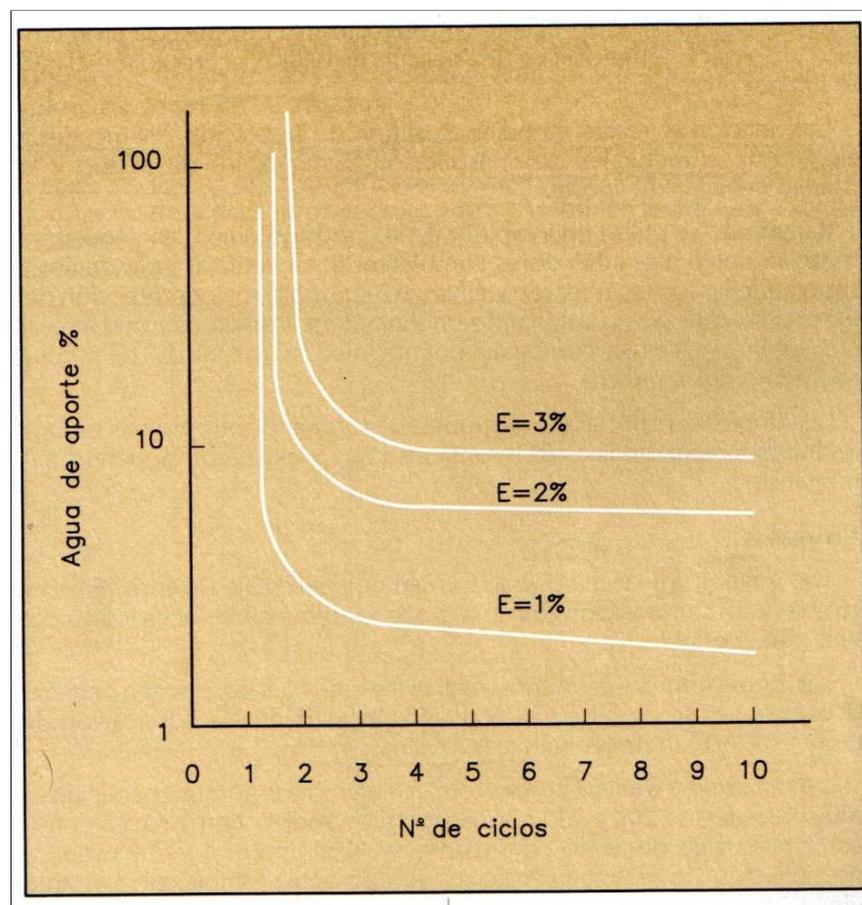
Con estos valores el valor de los ciclos de concentración, N, se obtiene a partir de:

$$N = \frac{E + V + P}{V + P} = \frac{A}{V + P}$$

Es decir, que para calcular los ciclos de concentración es suficiente medir el volumen del agua de aporte, las purgas y la temperatura del agua circulante a la entrada y a la salida de la torre. Es obvio que para un valor determinado de V, numerador y denominador disminuyen en la misma cantidad al disminuir la purga P, y el valor de N aumenta (figura 7). Como esta variación es importante a bajos ciclos de concentración pero tiende a equilibrarse a valores más altos de N, a partir de cierto punto, limitar mucho a la purga no contribuye a grandes ahorros y, en cambio, aumenta los riesgos de corrosión, incrustaciones y depósitos por concentración del agua de circulación.

Por lo tanto, valores de N de 5 a 6 parecen ser los máximos apropiados, aunque sujeto a la calidad del agua de alimentación. Valores de N entre 3 y 5 suelen ser usuales. A partir de 5-6 ciclos el porcentaje de agua de aporte es casi invariable.

Figura 7. **Variación del porcentaje de agua de aporte en función del número de ciclos y la evaporación**



Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales*.
p. 121.

2.6.4. Control de depósitos e incrustaciones

La formación de depósitos reduce la eficiencia de los sistemas de refrigeración ya que actúan como aislante para la transferencia de calor y reducen la sección de paso en los elementos de distribución. Además los diseños que no han previsto una tolerancia para tener en cuenta de la formación de depósitos en los intercambiadores de calor, puede que no consigan los valores mínimos de proceso. Los depósitos también aceleran la corrosión debida a la formación de células de oxigenación diferencial.

Un programa de control del poder incrustante de las aguas de refrigeración comporta las mediciones de la dureza, Ca, Mg, del pH, la alcalinidad y la temperatura que definen la concentración de iones carbonato y bicarbonato y la solubilidad del carbonato. También hay que controlar la concentración de sulfatos, sílice y otros contaminantes como hidrocarburos, glicoles, amoníaco, etc. Los índices de estabilidad de Langelier y Ryznar permiten determinar el comportamiento agresivo o incrustante del agua.

2.6.5. Origen de los depósitos e incrustaciones

Los depósitos pueden tener distintos orígenes. Las partículas en suspensión pueden sedimentar, y los sólidos disueltos precipitar por variación de la composición, concentración o cambio de temperatura. En las torres de refrigeración las partículas en suspensión en el aire son lavadas y arrastradas por el agua. El propio sistema de refrigeración puede tener fugas u originar depósitos, corrosión y crecimiento microbiológico.

Las sales de calcio y magnesio precipitadas son particularmente preocupantes por su densidad, adherencia y efecto aislante. El calcio y el

bicarbonato están presentes en casi todas las aguas que se puedan utilizar y la adición de calor descompone el bicarbonato a carbonato, el más común de los depósitos. Los índices de Langelier o de Ryznar son los más utilizados para evaluar la capacidad potencial de tener precipitados de carbonato cálcico.

Cuando se utilizan polifosfatos hay que controlar la posible formación de fosfato cálcico por formación de ortofosfato, cuyo producto de solubilidad con el calcio es muy bajo, y que puede originarse por excesiva dosificación de polifosfatos.

Las sales de magnesio pueden formarse por coprecipitación con las sales cálcicas. La formación de silicato magnésico puede ser especialmente problemática porque una vez formado es muy difícil de eliminar. La formación de incrustaciones de sílice pura es muy rara, pero puede ocurrir cuando las concentraciones de sílice en el agua superan los 150 – 200 mg/L.

2.6.6. Cómo prevenir la formación de incrustaciones

Los iones que pueden dar lugar a precipitados, se eliminan por ablandamiento y desmineralización del agua. Sin embargo estos procesos tienen un coste elevado y solamente se aplican en aguas de circuitos cerrados pero raramente en los circuitos de recirculación abierta.

La adición de ácido es uno de los más antiguos tratamientos aplicados para evitar la formación de incrustaciones. El ácido neutraliza la alcalinidad del agua y evita la precipitación del carbonato. El ácido sulfúrico es el más usado por su disponibilidad y precio. La solubilidad del sulfato cálcico es muy superior a la del carbonato y normalmente no precipita; sin embargo, una adición excesiva de ácido o la operación a relaciones de concentración excesivas,

pueden provocar la formación de una incrustación de sulfato cálcico. Para evitarlo se recomienda no superar el valor de 500 000 para el producto de las concentraciones de iones calcio y sulfato, expresadas en mg/L, o el valor de 1 500 para su suma.

Aunque se pueden usar otros ácidos hay que emplearlos con precauciones. El ácido clorhídrico añade iones cloruro que son muy corrosivos, y el ácido nítrico es un oxidante fuerte que puede ser causa de corrosiones. Los modernos programas de tratamiento han eliminado la adición de ácido. El pH se deja subir a 9 y se controla la incrustación mediante adición de agentes de control poliméricos.

Otra alternativa clásica es un tratamiento en paralelo de una fracción del agua circulante, hasta un 5%, mediante filtración, o incluso un ablandamiento con cal previo a la filtración con arena o antracita.

Los principales métodos de control químico se indican a continuación.

2.6.7. Dispersantes

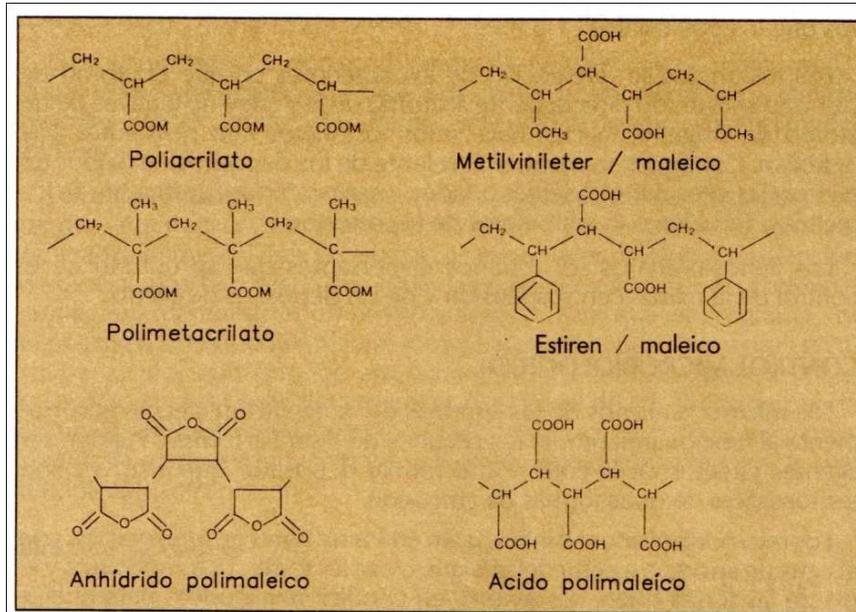
Son polímeros que pueden ser absorbidos sobre la superficie de los materiales del depósito aportando cargas eléctricas del mismo signo, en general negativas, y por tanto aumentando la capacidad de repulsión entre partículas, que permanecen en suspensión. El peso molecular de los polímeros debe ser bajo para evitar la formación de puentes de unión que contrariamente a lo pretendido harían aumentar el tamaño de la molécula. En general, serán pues polímeros aniónicos, cuyos grupos funcionales suelen ser ácidos carboxílicos o ácidos sulfónicos.

Los más antiguos agentes dispersantes eran productos orgánicos naturales o modificados. El almidón o la celulosa, modificados para incluir el grupo carboxílico, eran los más empleados. Pero el almidón y la celulosa son nutrientes para el crecimiento bacteriológico y pueden formar depósitos gomosos. El desarrollo de los polímeros sintéticos representó un importante avance al evitar estos problemas secundarios.

Ciertos polímeros también actúan como antiincrustantes al distorsionar la matriz estructural del crecimiento normal de los cristales. La inclusión del polímero evita el depósito de masas cristalinas sobre la superficie del metal.

Los poliacrilatos y los polimetacrilatos tienen poder dispersante gracias al grupo salino del ácido carboxílico, $-\text{COOH}$, unido a la matriz del polímero. Una longitud de 10 a 15 unidades repetidas es idónea para conseguir el efecto Antiincrustante y el control de la materia en suspensión (figura 8).

Figura 8. Fosfonatos



Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales*.
p. 131.

Los fosfonatos tienen un comportamiento similar al de los polifosfatos pero son más resistentes a la hidrólisis. Son mejores estabilizantes de los depósitos aunque no tan buenos inhibidores de la corrosión.

Los copolímeros del éter metilvinilmaleico y estirenilmaleico también son utilizados como antiincrustantes, de nuevo el grupo funcional corresponde al ácido carboxílico.

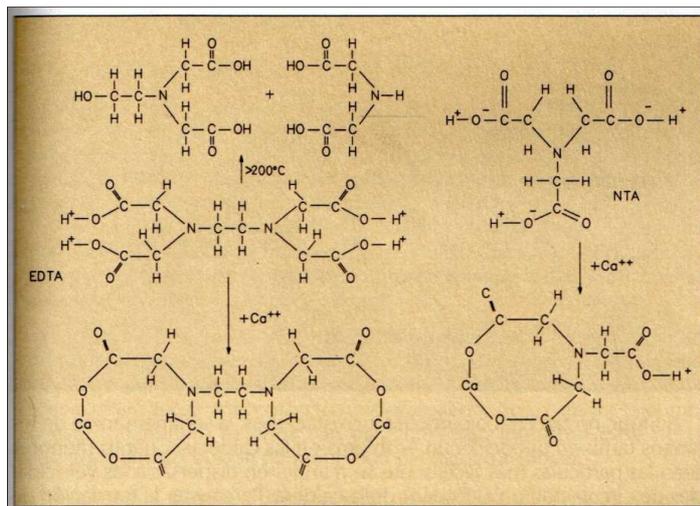
El anhídrido polimaléico es otro buen dispersante y antiincrustante. La estructura ácida se forma al entrar en contacto con el agua.

2.6.8. Quelantes y secuestrantes

Ambos son agentes que evitan el comportamiento normal de algunos iones al formar con ellos un complejo. Los quelantes reaccionan estequiométricamente mientras que los secuestrantes pueden funcionar a niveles mucho más bajos. Pueden controlar un gran número de cationes, entre ellos el calcio, el magnesio, el hierro, el manganeso y el aluminio. Pueden incluso solubilizar los depósitos y ser empleados en la limpieza del sistema excepto en los casos extremos que requieren una limpieza ácida.

Los quelantes más comunes en el tratamiento de aguas son el EDTA y el NTA (figura 9). Colaboran en el control selectivo de metales pesados, pero el requisito de niveles estequiométricos y su costo no permiten justificar su uso como agente activo principal.

Figura 9. Moléculas de EDTA y NTA



Fuente: RIGOLA, Miguel *Tratamiento de aguas industriales aguas de proceso y residuales.*

p. 105.

Los polímeros aniónicos, descritos anteriormente, suelen comportarse como secuestrantes además de su acción dispersante.

2.6.9. Estabilizadores de depósitos e incrustaciones

Los polifosfatos, ésteres de fosfato y fosfonatos, son buenos estabilizadores de depósitos. Los polifosfatos controlan la dureza estabilizando los iones calcio y magnesio y los compuestos férricos y de manganeso, pero su uso se ha ido sustituyendo por agentes más específicos. Los ésteres de fosfato actúan como antiincrustantes y secuestrantes de los óxidos metálicos, y aunque también pueden controlar la corrosión, son menos efectivos que los polifosfatos.

Los fosfonatos se diferencian de los anteriores en que el átomo de carbono está unido directamente al átomo de fósforo y no a través de un átomo de oxígeno, lo cual hace a los fosfonatos más resistentes a la hidrólisis. Consiguen un control excelente de los depósitos de óxidos de hierro y las sales duras. Además pueden actuar como secuestrantes de los metales. También son inhibidores de la corrosión.

2.6.10. Índice de Langelier

Este índice se define como la indicación del grado de saturación del carbonato de calcio en el agua, el cual se basa en el pH, la alcalinidad y la dureza; es decir que si el índice es negativo indica que el agua es corrosiva, pero si el índice de Langelier es positivo, el carbonato de calcio puede precipitar y formar escamas o incrustaciones en el recipiente o cañería de agua.

Es un índice que refleja el equilibrio del pH del agua con respecto al calcio y la alcalinidad; y es usado en la estabilización del agua para controlar tanto la corrosión como la escala de deposición. El índice de Langelier se calcula por medio de la siguiente fórmula:

$$IL = pH - pH_s$$

Donde pH es el pH medido del agua del circuito y pH_s es el pH del agua cuando está saturada con carbonato de calcio (o pH al cual se logra el equilibrio calcocarbónico del agua).

El pH_s se define como:

$$pH_s = 9.3 + a + b - c - d$$

Donde:

- a: función de los sólidos concentrados totales
- b: función de la temperatura del agua
- c: función del calcio como dureza (mg/L CaCO₃)
- d: función de la alcalinidad al naranja de metilo

2.5.2.1. Cálculo de los factores a, b, c, d

Cálculo del factor a:

$$a = \frac{\log(\text{TDS}) - 1}{10}$$

Cálculo del factor b:

$$b = -13.12 \log(T) + 34.55$$

Cálculo del factor c:

$$c = \log(C) - 0.4$$

Cálculo del factor d:

$$d = \log(A)$$

Donde:

TDS = sólidos totales disueltos (mg/l)

T = temperatura del agua en °K

C = calcio como dureza (concentración de CaCO₃ mg/l)

A = Alcalinidad (concentración de CaCO₃ mg/l)

Lo ideal para un sistema de refrigeración es estar entre 0 y +0,5. También puede calcularse por medio de la carta del índice de Langelier, la cual proporciona datos más exactos (figura 10).

Figura 10. Carta del índice de Langelier

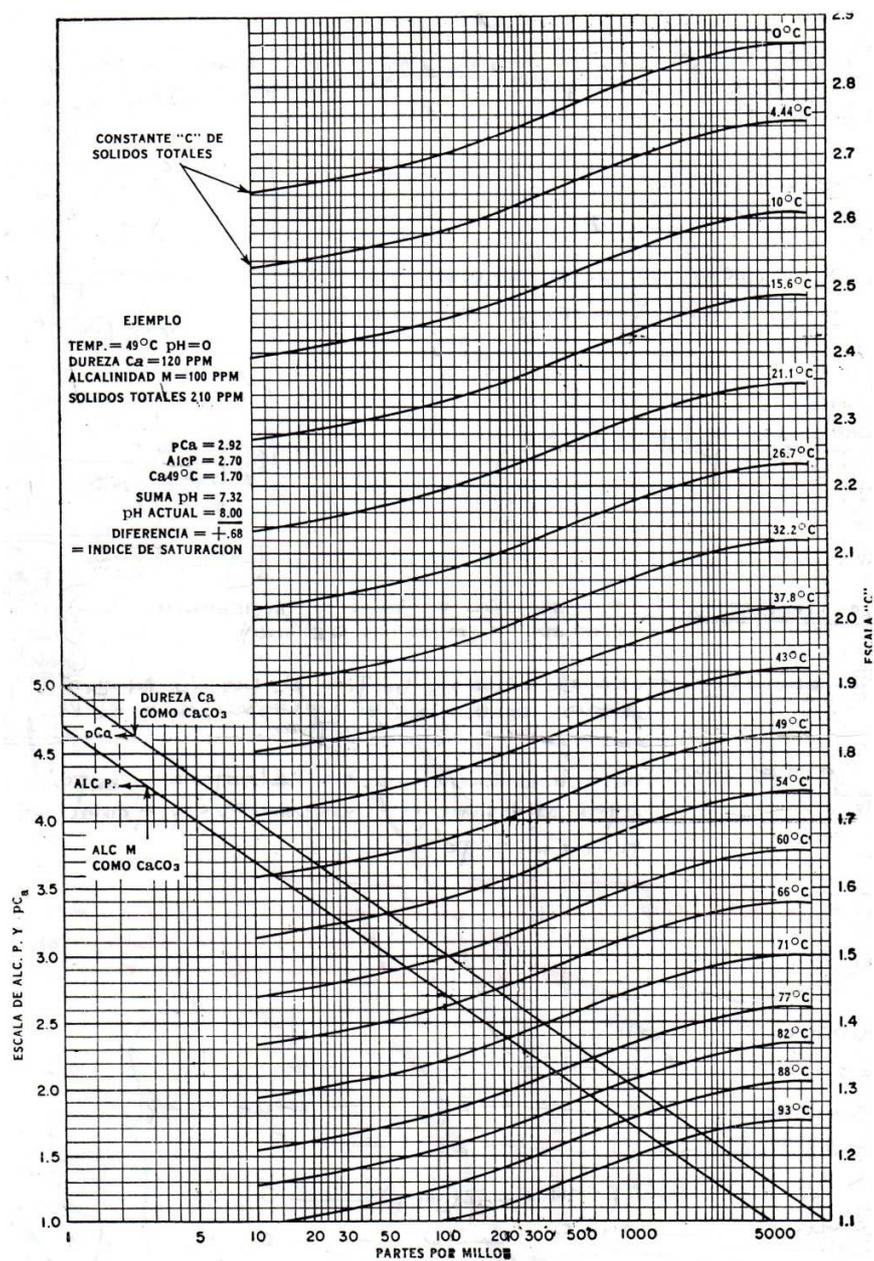


Fig. 1. Carta del índice de saturación Langelier.

Fuente: POWELL, Sheppard T. *Manual de aguas para usos industriales*. p. 331

Hay que tener en cuenta que con un aumento del TDS el agua se hace más corrosiva porque las sales disueltas en el agua, los iones negativos y positivos están divididos, entonces mientras más sal existe en el agua, más conductiva es debido a la presencia de electrones libres. En el proceso de corrosión está presente el intercambio de electrones.

Cuando la temperatura del agua aumenta, la solubilidad de Ca(OH)_2 , Mg(OH)_2 y CaCO_3 decrece. Por consiguiente estas sustancias precipitarán formando depósitos de sarro.

Tabla V. **Indicación del signo del índice de Langelier**

Índice de Langelier	Indicación
IL < 0	Agua no saturada con respecto a carbonato de calcio (CaCO_3). El agua no saturada posee la tendencia de eliminar láminas de carbonato de calcio (CaCO_3) presentes que protegen las tuberías y equipos.
IL = 0	Agua considerada neutral. No existe formación de incrustaciones ni eliminación de las mismas.
IL > 0	Agua supersaturada con respecto a carbonato de calcio (CaCO_3). Posible formación de incrustaciones.

Fuente: LENNTECH. *Langelier saturation index*.

<http://www.lenntech.es/calculadoras/langelier/langelier.htm>. Consulta: 10 de junio de 2011

Tabla VI. **Indicación del valor del índice de Langelier**

Índice de Langelier	Indicación
$-2 < IL < -0.5$	Corrosión severa
$-0.5 < IL < 0$	Corrosión leve pero sin formación de incrustaciones
$IL = 0$	Equilibrada pero posible corrosión leve
$0 < IL < 0.5$	Formación leve de incrustaciones y corrosiva
$0.5 < IL < 2$	Formación de incrustaciones pero no corrosiva.

Fuente: LENNTECH. *Langelier saturation index*.

<http://www.lenntech.es/calculadoras/langelier/langelier.htm>. Consulta: 10 de junio de 2011

3. DISEÑO METODOLÓGICO

3.1. Variables

Las variables que se monitorearon durante la fase experimental se muestran en la tabla VII.

Tabla VII. **Tabla de Variables**

Variable	Independiente	Dependiente	Controlable	No controlable	De respuesta
Concentración de Dureza [mg/L]	X		X		X
Concentración de Agente Ablandador [g/ml]		X	X		
Presión [PSI]				X	
Temperatura [°C]				X	

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación de campo de estudio

En esta sección se delimita el campo de estudio según el enfoque del trabajo de graduación y la experimentación realizada.

3.2.1. Industria

La etapa experimental a nivel laboratorio del trabajo de graduación se realizó en la empresa POLCHEMICAL, la cual se dedica a la fabricación de productos químicos para el mantenimiento de equipo como generadores de vapor y torres de enfriamiento; entre otros. Dicha empresa vende químicos y asesora a diversas industrias guatemaltecas. Y la parte experimental a nivel industrial se realizó en calderas y circuitos de refrigeración de tres empresas de alimentos ubicadas en la ciudad de Guatemala.

3.2.2. Materia prima

La materia prima se obtuvo de empresas que se dedican a importar químicos. En este caso se utilizó Distribuidora del Caribe S.A. y MERCK.

3.2.3. Procedimiento experimental

Se tomó una muestra de agua con una concentración de 81 miligramos por litro de dureza y se redujo hasta cero con los diferentes agentes ablandadores. Se graficó y se determinaron los modelos matemáticos y a partir de ellos, se estableció la cantidad de cada agente secuestrador de dureza necesaria para reducir diferentes concentraciones de dureza hasta un valor de cero.

3.2.4. Manejo de residuos

Los únicos residuos de la investigación fueron los del análisis volumétrico. Dichos residuos se neutralizaron hasta pH 7 y se desecharon por el drenaje.

3.3. Recursos humanos disponibles

Investigador: Gerson Jonathan Martínez de la Rosa

Asesor: Ing. Qco. Leonidas Antonio Martínez Zúñiga

3.4. Recursos materiales disponibles

Se realizaron las evaluaciones de cada agente con los siguientes materiales, cristalería y equipo:

3.4.1. Materia prima y reactivos

- Tripolifosfato de sodio
- Sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético
- EDTA
- Agua destilada
- Negro de ericromo T
- Clorhidrato de hidroxilamina
- Alcohol etílico
- Hidróxido de sodio

3.4.2. Cristalería

- Beackers de 200ml
- Varillas de agitación
- Tubos de ensayo
- Probetas
- Balones aforados
- Bureta

3.4.3. Equipo

- Termómetro
- Manómetro
- Balanza analítica

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

La técnica que se utilizó fue cuantitativa. El tipo de técnica se determinó según el tipo de variables que se manipularon en la investigación.

Tabla VIII. **Tabla de técnica cuantitativa**

Técnica cuantitativa	Instrumento/Método	Variable cuantitativa	
		Continua	Discreta
Titulación	Análisis volumétrico	X	
Indicador	Colorimetría		X
Volumen valorante	Bureta	X	
Volumen analito	Probeta	X	
Masa agente secuestrante de dureza	Balanza	X	
Temperatura	Termómetro	X	
Presión	Manómetro	X	

Fuente: elaboración propia.

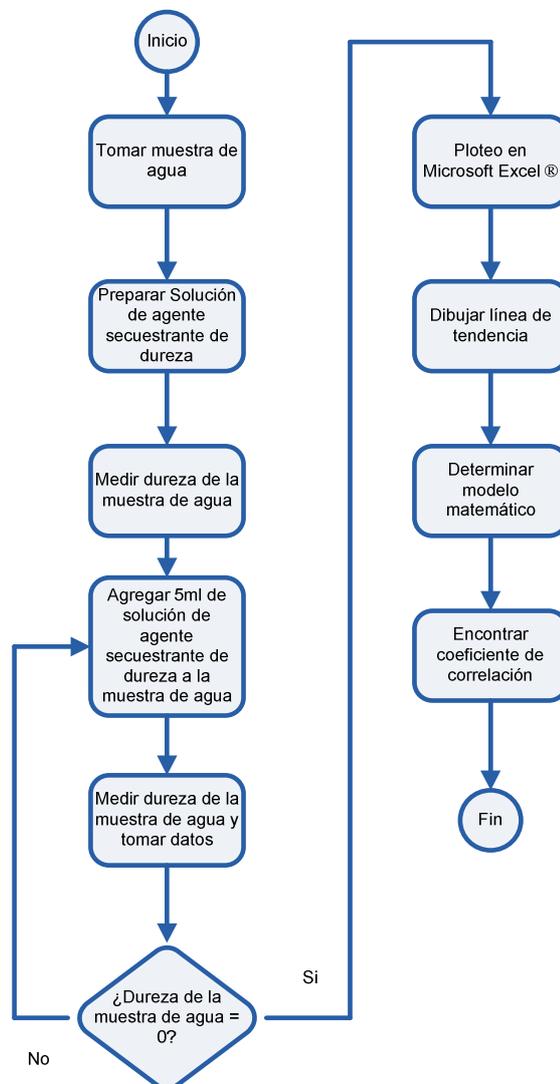
3.5.1. Determinación de la dureza total

La dureza total se determinó por el método estándar AFNOR NF T 90-003 Determinación de la dureza de aguas mediante un reactivo complejante.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

El procedimiento para la recolección y ordenamiento de la información se presenta en la figura 11.

Figura 11. Recolección y ordenamiento de la información



Fuente: elaboración propia.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

En esta sección se presenta la forma en que se procesaron los datos obtenidos, a partir de la experimentación.

3.7.1. Tablas para el tripolifosfato de sodio como agente secuestrador de dureza

Al experimentar con el tripolifosfato de sodio se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas IX y X.

3.7.1.1. Consumo de tripolifosfato de sodio en función de la concentración de la dureza del agua

Al secuestrar la dureza de la muestra de agua con el tripolifosfato de sodio se obtuvieron los datos de la tabla IX.

Tabla IX. Consumo de tripolifosfato de sodio y concentración de dureza

Dato No.	Tripolifosfato de sodio [g/ml]	Dureza [mg/L]
1	0	D ₁
2	C ₂	D ₂
3	C ₃	D ₃
4	C ₄	D ₄
5	C ₅	D ₅
6	C ₆	D ₆
7	C ₇	0

Fuente: elaboración propia.

3.7.1.2. Consumo de tripolifosfato de sodio para reducir la dureza hasta cero partes por millón

A los datos de dureza obtenidos en la tabla IX se les dio vuelta para conseguir una línea que parte de la coordenada (0,0) y así obtener la ecuación de la recta que indica la cantidad de tripolifosfato de sodio a utilizar, para secuestrar la concentración de dureza determinada.

Tabla X. Consumo de tripolifosfato de sodio y concentración de dureza

Dato No.	Tripolifosfato de sodio [g/ml]	Dureza [mg/L]
1	0	0
2	C_2	D_2
3	C_3	D_3
4	C_4	D_4
5	C_5	D_5
6	C_6	D_6
7	C_7	D_7

Fuente: elaboración propia.

3.7.2. Tablas para la sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético como agente secuestrador de dureza

Al experimentar con la sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas XI y XII.

3.7.2.1. Consumo de la sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético en función de la concentración de la dureza del agua

Al secuestrar la dureza de la muestra de agua con la sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético se obtuvieron los datos de la tabla XI.

Tabla XI. Consumo de sal tetrasódica del EDTA y dureza

Dato No.	Sal tetrasódica del EDTA [g/ml]	Dureza [mg/L]
1	0	D ₁
2	C ₂	D ₂
3	C ₃	D ₃
4	C ₄	D ₄
5	C ₅	D ₅
6	C ₆	D ₆
7	C ₇	D ₇
8	C ₈	0

Fuente: elaboración propia.

3.7.2.2. Consumo de la sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético para reducir la dureza hasta cero partes por millón

A los datos de dureza obtenidos en la tabla XI se les dio vuelta para conseguir una línea que parte de la coordenada (0,0) y así obtener la ecuación de la recta que indica la cantidad de tripolifosfato de sodio a utilizar, para secuestrar la concentración de dureza determinada.

Tabla XII. Consumo de sal tetrasódica del EDTA y dureza

Dato No.	Sal tetrasódica del EDTA [g/ml]	Dureza [mg/L]
1	0	0
2	C ₂	D ₂
3	C ₃	D ₃
4	C ₄	D ₄
5	C ₅	D ₅
6	C ₆	D ₆
7	C ₇	D ₇
8	C ₈	D ₈

Fuente: elaboración propia.

3.7.3. Tablas para las mezclas de tripolifosfato de sodio y sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético como agente secuestrador de dureza

Al experimentar con las mezclas se obtuvieron los resultados que se muestran en las tablas XIII y XIV.

3.7.3.1. Consumo de la mezcla de tripolifosfato de sodio y sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético en función de la concentración de la dureza del agua

Al secuestrar la dureza de la muestra de agua con la mezcla de ablandadores se obtuvieron los datos de la tabla XI.

Tabla XIII. Consumo de mezcla de tripolifosfato de sodio con sal tetrasódica del EDTA y dureza

Dato No.	Mezcla de tripolifosfato de sodio y sal tetrasódica del EDTA [g/ml]	Dureza [mg/L]
1	0	D ₁
2	C ₂	D ₂
3	C ₃	D ₃
4	C ₄	D ₄
5	C ₅	D ₅
6	C ₆	D ₆
7	C ₇	D ₇
8	C ₈	D ₈
...	C _{...}	D _{...}
n	C _n	0

Fuente: elaboración propia.

3.7.3.2. Consumo de la mezcla de tripolifosfato de sodio y sal tetrasódica del ácido etilendiaminotetraacético para reducir la dureza hasta cero partes por millón

A los datos de dureza obtenidos en la tabla XIII se les dio vuelta para conseguir una línea que parte de la coordenada (0,0) y así obtener la ecuación de la recta que indica la cantidad de mezcla a utilizar, para secuestrar la concentración de dureza determinada.

Tabla XIV. **Consumo de mezcla de tripolifosfato de sodio con sal tetrasódica del EDTA y dureza**

Dato No.	Mezcla de tripolifosfato de sodio y sal tetrasódica del EDTA [g/ml]	Dureza [mg/L]
1	0	0
2	C_2	D_2
3	C_3	D_3
4	C_4	D_4
5	C_5	D_5
6	C_6	D_6
7	C_7	D_7
8	C_8	D_8
...	$C_{...}$	$D_{...}$
n	C_n	D_n

Fuente: elaboración propia.

3.8. Análisis estadístico

Los datos obtenidos a partir de la experimentación se analizaron estadísticamente. El análisis se explica en esta sección.

3.8.1. Regresión lineal

La regresión lineal es un método matemático que modeliza la relación entre una variable dependiente Y , las variables independientes X_i y un término aleatorio ε . Este modelo puede ser expresado como:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_p X_p + \varepsilon$$

En donde β_0 es la intersección o término constante, las β_i ($i > 0$) son los parámetros respectivos a cada variable independiente, y p es el número de parámetros independientes a tener en cuenta en la regresión. La regresión lineal puede ser contrastada con la regresión no lineal.

El modelo lineal relaciona la variable dependiente Y con K variables explicativas X_k ($k = 1, \dots, K$), o cualquier transformación de éstas, que generan un hiperplano de parámetros β_k desconocidos:

$$Y = \sum \beta_k X_k + \varepsilon$$

Donde ε es la perturbación aleatoria que recoge todos aquellos factores de la realidad no controlables u observables y que por tanto se asocian con el azar, y es la que confiere al modelo su carácter estocástico.

En el caso más sencillo, con una sola variable explicativa, el hiperplano es una recta:

$$Y = \beta_1 + \beta_2 X_2 + \varepsilon$$

El problema de la regresión consiste en elegir unos valores determinados para los parámetros desconocidos β_k , de modo que la ecuación quede completamente especificada. Para ello se necesita un conjunto de observaciones. En una observación cualquiera i -ésima ($i= 1, \dots, I$) se registra el comportamiento simultáneo de la variable dependiente y las variables explicativas (las perturbaciones aleatorias se suponen no observables).

$$Y_i = \sum \beta_k X_{ki} + \varepsilon_i$$

Los valores escogidos como estimadores de los parámetros, $\hat{\beta}_k$, son los coeficientes de regresión, sin que se pueda garantizar que coinciden con parámetros reales del proceso generador. Por tanto, en

$$Y_i = \sum \hat{\beta}_k X_{ki} + \hat{\varepsilon}_i$$

Los valores $\hat{\varepsilon}_i$ son por su parte estimaciones de la perturbación aleatoria o errores.

3.8.2. Coeficiente de correlación

La correlación indica la fuerza y la dirección de una relación lineal entre dos variables aleatorias. Se considera que dos variables cuantitativas están correlacionadas cuando los valores de una de ellas varían sistemáticamente con respecto a los valores homónimos de la otra: si tenemos dos variables (A y B) existe correlación si al aumentar los valores de A lo hacen también los de B y viceversa. La correlación entre dos variables no implica, por sí misma, ninguna relación de causalidad.

Existen diversos coeficientes que miden el grado de correlación, adaptados a la naturaleza de los datos. El más conocido es el coeficiente de correlación de Pearson (introducido en realidad por Francis Galton), que se obtiene dividiendo la covarianza de dos variables por el producto de sus desviaciones estándar. Otros coeficientes son:

- Coeficiente de correlación de Spearman
- Correlación canónica

Ambas series de valores $X(x_1, \dots, x_n)$ e $Y(y_1, \dots, y_n)$ pueden estar consideradas como vectores en un espacio a n dimensiones. Reemplacémoslos por vectores centrados:

$$X(x_1 - \bar{x}, \dots, x_n - \bar{x}) \text{ e } Y(y_1 - \bar{y}, \dots, y_n - \bar{y}) .$$

El coseno del ángulo alfa entre estos vectores es dado por la fórmula siguiente:

$$\cos(\alpha) = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}$$

Pues $\cos(\alpha)$ es el coeficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente de correlación es el coseno entre ambos vectores centrados

Si $r = 1$, el ángulo $\alpha = 0^\circ$, ambos vectores son colineales (paralelos).

Si $r = 0$, el ángulo $\alpha = 90^\circ$, ambos vectores son ortogonales.

Si $r = -1$, el ángulo $\alpha = 180^\circ$, ambos vectores son colineales de dirección opuesta.

Más generalmente : $\alpha = \text{arcCos}(r)$.

Por supuesto, del punto vista geométrica, no hablamos de *correlación lineal*: el coeficiente de correlación tiene siempre un sentido, cualquiera que sea su valor entre -1 y 1. Nos informa de modo preciso, no tanto sobre el grado de dependencia entre las variables, que sobre su distancia angular en la hiperesfera a n dimensiones.

La Iconografía de las correlaciones es un método de análisis multidimensional que reposa en esta idea.

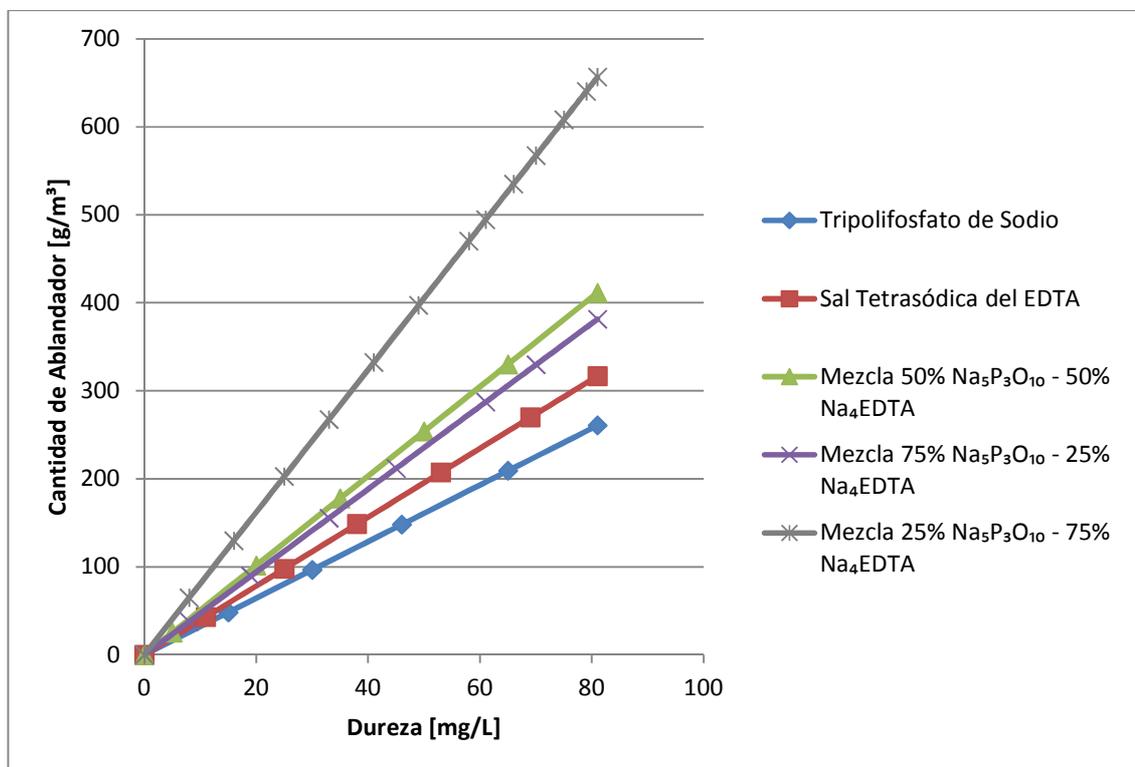
La correlación lineal se da cuando en una nube de puntos estos se encuentran o se distribuyen alrededor de una recta.

4. RESULTADOS

4.1. Curvas de consumo de ablandadores de agua en función de la dureza del agua de alimentación

En esta sección se presenta el consumo de los diferentes ablandadores de agua utilizados para reducir la dureza hasta cero miligramos por litro.

Figura 12. Consumo de ablandadores de agua para ajustar dureza a cero partes por millón



Fuente: elaboración propia, basado en tablas 20, 21, 22, 23 y 24.

4.2. Ecuaciones de consumo de ablandador de agua en función de la dureza y la cantidad de agua utilizada

Tripolifosfato de sodio

[Ecuación 1]

$$y = 3,2182 x z$$

Sal tetrasódica del EDTA

[Ecuación 2]

$$y = 3,9116 x z$$

Mezcla 50% tripolifosfato de sodio y 50% sal tetrasódica EDTA

[Ecuación 3]

$$y = 5,0775 x z$$

Mezcla 75% tripolifosfato de sodio y 25% sal tetrasódica EDTA

[Ecuación 4]

$$y = 4,7087 x z$$

Mezcla 25% tripolifosfato de sodio y 75% sal tetrasódica EDTA

[Ecuación 5]

$$y = 8,1053 x z$$

Donde:

y : cantidad de ablandador de agua [g]

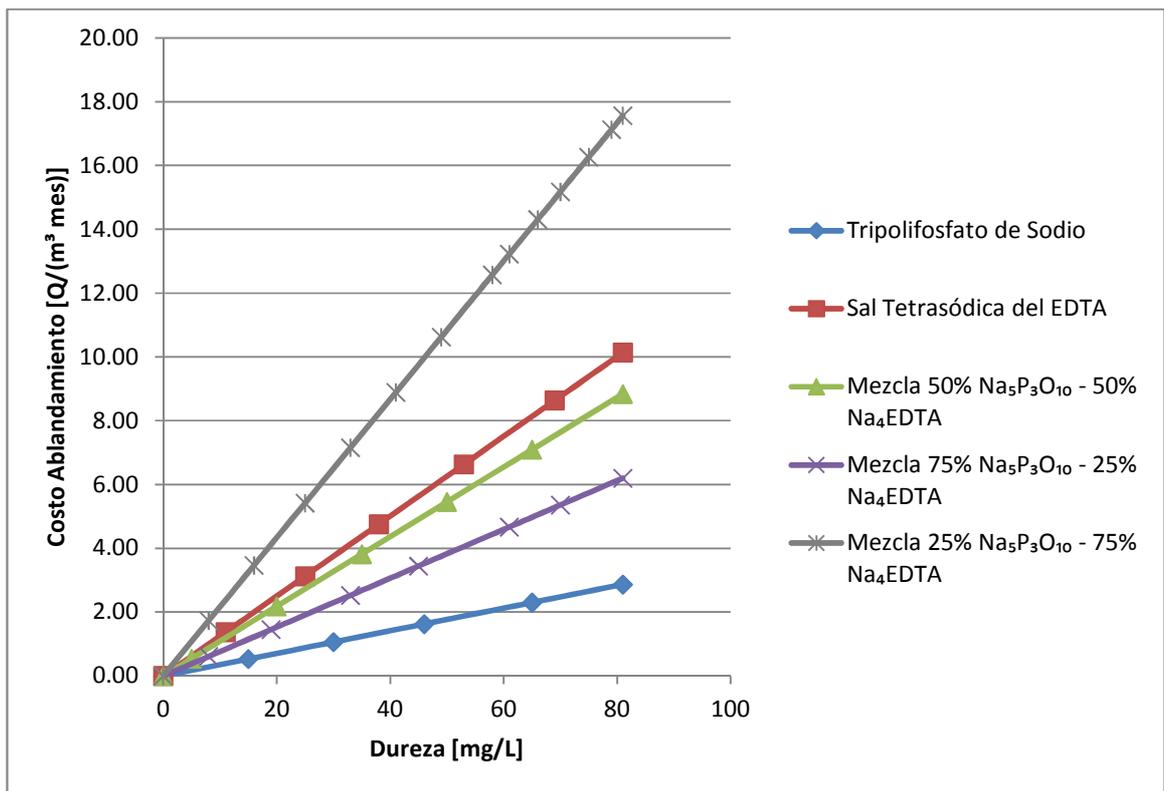
x : dureza [mg/L]

z : cantidad de agua utilizada [m³]

4.3. Curvas de costo de ablandamiento en función de la dureza del agua de alimentación

En esta sección se presenta el costo del ablandamiento utilizando los diferentes ablandadores de agua para reducir la dureza hasta cero miligramos por litro.

Figura 13. Costo de ablandamiento en función de la dureza del agua de alimentación



Fuente: elaboración propia, basado en tablas 2, 5, 8, 11 y 14.

4.4. Ecuaciones del costo del ablandamiento del agua en función de la dureza y la cantidad de agua utilizada mensualmente

Tripolifosfato de sodio

[Ecuación 6]

$$y = 0,0354 x z$$

Sal tetrasódica del EDTA

[Ecuación 7]

$$y = 0,1252 x z$$

Mezcla 50% tripolifosfato de sodio y 50% sal tetrasódica EDTA

[Ecuación 8]

$$y = 0,1092 x z$$

Mezcla 75% tripolifosfato de sodio y 25% sal tetrasódica EDTA

[Ecuación 9]

$$y = 0,0765 x z$$

Mezcla 25% tripolifosfato de sodio y 75% sal tetrasódica EDTA

[Ecuación 10]

$$y = 0,2168 x z$$

Donde:

y : costo mensual del ablandamiento [Q/mes]

x : dureza [mg/L]

z : cantidad de agua utilizada mensualmente [m³/mes]

4.5. Parámetros químicos en circuitos de refrigeración índice de Langelier

En esta sección se presentan los datos de la experimentación a nivel industrial, realizada en circuitos de refrigeración.

Tabla XV. Parámetros químicos ajustados con tripolifosfato de sodio

Parámetro	Agua de alimentación (Sin ajustar)	Agua de la torre (ajustados)	Unidades
pH	6,9	9	pH
Dureza	80	1	mg/L como CaCO ₃
Total sólidos disueltos	950	1280	mg/L
Alcalinidad total "m"	700	750	mg/L como CaCO ₃
Temperatura	25	27	°C
Índice de Langelier	0,71	0,04	

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 16 y figura 10.

Tabla XVI. Parámetros químicos ajustados con sal tetrasódica del EDTA

Parámetro	Agua de alimentación (Sin ajustar)	Agua de la torre (ajustados)	Unidades
pH	6,9	9	pH
Dureza	80	1	mg/L como CaCO ₃
Total sólidos disueltos	950	800	mg/L
Alcalinidad total "m"	700	600	mg/L como CaCO ₃
Temperatura	25	27	°C
Índice de Langelier	0,71	0	

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 17, figura 10 y ecuaciones 14 y 15.

Tabla XVII. **Parámetros químicos ajustados con mezcla 50% tripolifosfato de sodio y 50% sal tetrasódica EDTA**

Parámetro	Agua de alimentación (Sin ajustar)	Agua de la torre (ajustados)	Unidades
pH	6,9	9	pH
Dureza	80	1	mg/L como CaCO ₃
Total sólidos disueltos	950	1040	mg/L
Alcalinidad total "m"	700	675	mg/L como CaCO ₃
Temperatura	25	27	°C
Índice de Langelier	0,71	0,02	

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 18, figura 10 y ecuaciones 14 y 15.

Tabla XVIII. **Parámetros químicos ajustados con mezcla 75% tripolifosfato de sodio y 25% sal tetrasódica EDTA**

Parámetro	Agua de alimentación (Sin ajustar)	Agua de la torre (ajustados)	Unidades
pH	6,9	9	pH
Dureza	80	1	mg/L como CaCO ₃
Total sólidos disueltos	950	1160	mg/L
Alcalinidad total "m"	700	712	mg/L como CaCO ₃
Temperatura	25	27	°C
Índice de Langelier	0,71	0,03	

Fuente: elaboración propia, basada en tablas 19, figura 10 y ecuaciones 14 y 15.

Tabla XIX. **Parámetros químicos ajustados con mezcla 25% tripolifosfato de sodio y 75% sal tetrasódica EDTA**

Parámetro	Agua de alimentación (Sin ajustar)	Agua de la torre (ajustados)	Unidades
pH	6,9	9	pH
Dureza	80	1	mg/L como CaCO ₃
Total sólidos disueltos	950	920	mg/L
Alcalinidad total "m"	700	638	mg/L como CaCO ₃
Temperatura	25	27	°C
Índice de Langelier	0,71	0,01	

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 20, figura 10 y ecuaciones 14 y 15.

4.6. Parámetros químicos en calderas de vapor

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en la estabilización de los parámetros químicos dentro de las calderas de vapor.

Tabla XX. Parámetros estabilizados con $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$

Parámetro	Agua de alimentación (Sin ajustar)	Agua de caldera (Ajustados)	Límites	Unidades
pH	6,9	11	10,5 - 12	pH
Total sólidos disueltos	950	1200	Máx. 3 500	mg/L
Dureza total	80	0	0	mg/L como CaCO_3
Alcalinidad total "m"	700	790	700 - 800	mg/L como CaCO_3
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	300	350	Máx. 500	mg/L como CaCO_3
Fosfatos	0	38	30 - 40	mg/L como PO_4
Sulfitos	0	32	20 - 40	mg/L como SO_3
Cloruros	15	60	Máx. 300	mg/L como Cl
Sílice	60	60	Máx. 120	mg/L como SiO_2
Hierro	0	0	0	mg/L como Fe^{+3}
Purgas		3/día		

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 32.

Tabla XXI. **Parámetros estabilizados con Na₄EDTA**

Parámetro	Agua de Alimentación (Sin ajustar)	Agua de Caldera (Ajustados)	Límites	Unidades
pH	6,9	10,5	10,5 - 12	pH
Total sólidos disueltos	950	1150	Máx. 3 500	mg/L
Dureza total	80	0	0	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad total "m"	700	730	700 - 800	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	300	220	Máx. 500	mg/L como CaCO ₃
Fosfatos	0	31	30 - 40	mg/L como PO ₄
Sulfitos	0	28	20 - 40	mg/L como SO ₃
Cloruros	15	85	Máx. 300	mg/L como Cl
Sílice	60	39	Máx. 120	mg/L como SiO ₂
Hierro	0	0	0	mg/L como Fe ⁻¹⁻³
Purgas		3/día		

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 33.

Tabla XXII. **Parámetros estabilizados con la mezcla 50% Na₅P₃O₁₀ - 50% Na₄EDTA**

Parámetro	Agua de Alimentación (Sin ajustar)	Agua de Caldera (Ajustados)	Límites	Unidades
pH	6,9	11,5	10,5 - 12	pH
Total sólidos disueltos	950	1180	Máx. 3 500	mg/L
Dureza total	80	0	0	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad total "m"	700	590	700 - 800	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	300	310	Máx. 500	mg/L como CaCO ₃
Fosfatos	0	36	30 - 40	mg/L como PO ₄
Sulfitos	0	27	20 - 40	mg/L como SO ₃
Cloruros	15	73	Máx. 300	mg/L como Cl
Sílice	60	55	Máx. 120	mg/L como SiO ₂
Hierro	0	0	0	mg/L como Fe ⁻¹⁻³
Purgas		3/día		

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 34.

Tabla XXIII. **Parámetros estabilizados con la mezcla 75% Na₅P₃O₁₀ - 25% Na₄EDTA**

Parámetro	Agua de Alimentación (Sin ajustar)	Agua de Caldera (Ajustados)	Límites	Unidades
pH	6,9	11	10,5 - 12	pH
Total sólidos disueltos	950	1000	Máx. 3 500	mg/L
Dureza total	80	0	0	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad total "m"	700	748	700 - 800	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	300	362	Máx. 500	mg/L como CaCO ₃
Fosfatos	0	38	30 - 40	mg/L como PO ₄
Sulfitos	0	37	20 - 40	mg/L como SO ₃
Cloruros	15	83	Máx. 300	mg/L como Cl
Sílice	60	60	Máx. 120	mg/L como SiO ₂
Hierro	0	0	0	mg/L como Fe ⁻¹⁻³
Purgas		3/día		

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 35.

Tabla XXIV. **Parámetros estabilizados con la mezcla 25% Na₅P₃O₁₀ - 75% Na₄EDTA**

Parámetro	Agua de Alimentación (Sin ajustar)	Agua de Caldera (Ajustados)	Límites	Unidades
pH	6,9	10,5	10,5 - 12	pH
Total sólidos disueltos	950	1050	Máx. 3 500	mg/L
Dureza total	80	0	0	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad total "m"	700	760	700 - 800	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	300	350	Máx. 500	mg/L como CaCO ₃
Fosfatos	0	31	30 - 40	mg/L como PO ₄
Sulfitos	0	30	20 - 40	mg/L como SO ₃
Cloruros	15	75	Máx. 300	mg/L como Cl
Sílice	60	60	Máx. 120	mg/L como SiO ₂
Hierro	0	0	0	mg/L como Fe ⁻¹⁻³
Purgas		3/día		

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 36.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El tripolifosfato de sodio es el ablandador de agua más eficiente, debido a que se necesita menor cantidad para secuestrar la misma concentración de dureza que la sal tetrasódica del EDTA y las mezclas analizadas.

El tripolifosfato de sodio utiliza 3,2182 gramos por metro cúbico y partes por millón de dureza y la sal tetrasódica del EDTA 3,9116 gramos por metro cúbico y partes por millón de dureza.

La mezcla de ablandadores de agua más eficiente es la de 75% tripolifosfato de sodio y 25% de sal tetrasódica de EDTA, ya que se necesita 4,7082 gramos por metro cúbico y partes por millón de dureza. Dicha cantidad es menor a las utilizadas con las mezclas 50% tripolifosfato de sodio y 50% sal tetrasódica del EDTA; y 25% tripolifosfato de sodio y 75% sal tetrasódica del EDTA.

El ablandamiento del agua más económico se obtiene cuando se utiliza tripolifosfato de sodio, seguido por la mezcla de 75% tripolifosfato de sodio y 25% sal tetrasódica del EDTA.

El índice de Langelier con signo negativo implica existencia de corrosión y el signo positivo indica existencia de incrustación. Para evitar ambos problemas en circuitos de refrigeración se debe mantener el índice en un valor positivo cercano a cero. Para lograr dicho objetivo se debe ajustar la dureza, total de sólidos disueltos, alcalinidad total y temperatura. La dureza se reduce por medio del uso de agentes ablandadores de agua.

El total de sólidos disueltos y la alcalinidad total se reducen a través de la regulación de la purga. La temperatura es una variable que depende del diseño del equipo, trabajo del refrigerante y de la capacidad de transferencia de calor en el condensador.

Los parámetros químicos de la calidad del agua dentro de una caldera de vapor deben estar dentro de los rangos permisibles indicados en la tabla IV. Los parámetros a tomar en cuenta en calderas de vapor son el pH, total de sólidos disueltos, dureza total, alcalinidad total, alcalinidad de hidróxidos, fosfatos, sulfitos, cloruros, sílice y hierro.

Para lograr mantenerlos dentro de los límites permisibles se ajustan de la siguiente manera: el pH se aumenta con el uso de hidróxido de sodio y se reduce por medio de la purga; el total de sólidos disueltos, alcalinidad total, alcalinidad de hidróxidos, cloruros, sulfitos y fosfato se reducen por medio de la purga; la dureza total se reduce al utilizar ablandadores de agua; la sílice y el hierro se mantienen en los rangos con el uso de ablandadores de agua y manteniendo pH requerido.

CONCLUSIONES

1. Es posible evitar la incrustación en la superficie de transferencia de calor en generadores de vapor, condensadores y torres de enfriamiento secuestrando la dureza con tripolifosfato de sodio, sal tetrasódica del EDTA y mezclas de ambos, ya que en los resultados se demuestra que los valores fueron reducidos y ajustados a los rangos en donde no existe incrustación.
2. El consumo de ablandadores de agua para ajustar la dureza a cero partes por millón es directamente proporcional a la dureza inicial y a la cantidad de agua utilizada, debido a que las pendientes de las curvas de la figura 11 de la sección de resultados son positivas.
3. La dosificación óptima de ablandador de agua en función de la calidad y cantidad de agua de alimentación se determina por medio de las ecuaciones [1] a [5] de la sección de resultados, dependiendo del agente secuestrante de dureza utilizado.
4. El tripolifosfato de sodio demostró ser el ablandador de agua más eficiente, debido a que se necesita menor cantidad para neutralizar la misma cantidad de dureza que los otros ablandadores.
5. La mezcla de 75% tripolifosfato de sodio y 25% sal tetrasódica del EDTA es más eficiente que las otras dos mezclas analizadas.

6. El costo del ablandamiento de agua para ajustar la dureza a cero partes por millón es directamente proporcional a la dureza inicial y a la cantidad de agua utilizada, debido a que las pendientes de las curvas de la figura 12 de la sección de resultados son positivas.
7. El costo máximo mensual del ablandamiento del agua en función de la calidad y cantidad del agua de alimentación se determina por medio de las ecuaciones [6] a [10] de la sección de resultados, dependiendo del agente secuestrante de dureza utilizado.
8. El tripolifosfato de sodio demostró ser el ablandador de agua más económico.
9. El costo del ablandamiento del agua con la mezcla de 75% tripolifosfato de sodio y 25% sal tetrasódica del EDTA resultó ser más económica entre las tres mezclas analizadas.
10. Para ajustar el índice de Langelier a un valor positivo próximo a cero se debe reducir los sólidos disueltos y alcalinidad total por medio de la purga; y secuestrar la dureza a través del uso de agentes ablandadores de agua.
11. Para estabilizar los parámetros químicos en calderas de vapor se debe mantener los mismos dentro de los rangos que se establecen en la tabla IV.
12. Para mantener los sólidos totales disueltos, la alcalinidad total, alcalinidad de hidróxidos, los cloruros, sulfitos y el fosfato dentro del rango aceptable dentro de calderas, se debe aumentar la cantidad de purgas diarias.

13. Para mantener el pH dentro del rango aceptable dentro de calderas, se debe aumentar con hidróxido de sodio o reducir por medio de la purga.

RECOMENDACIONES

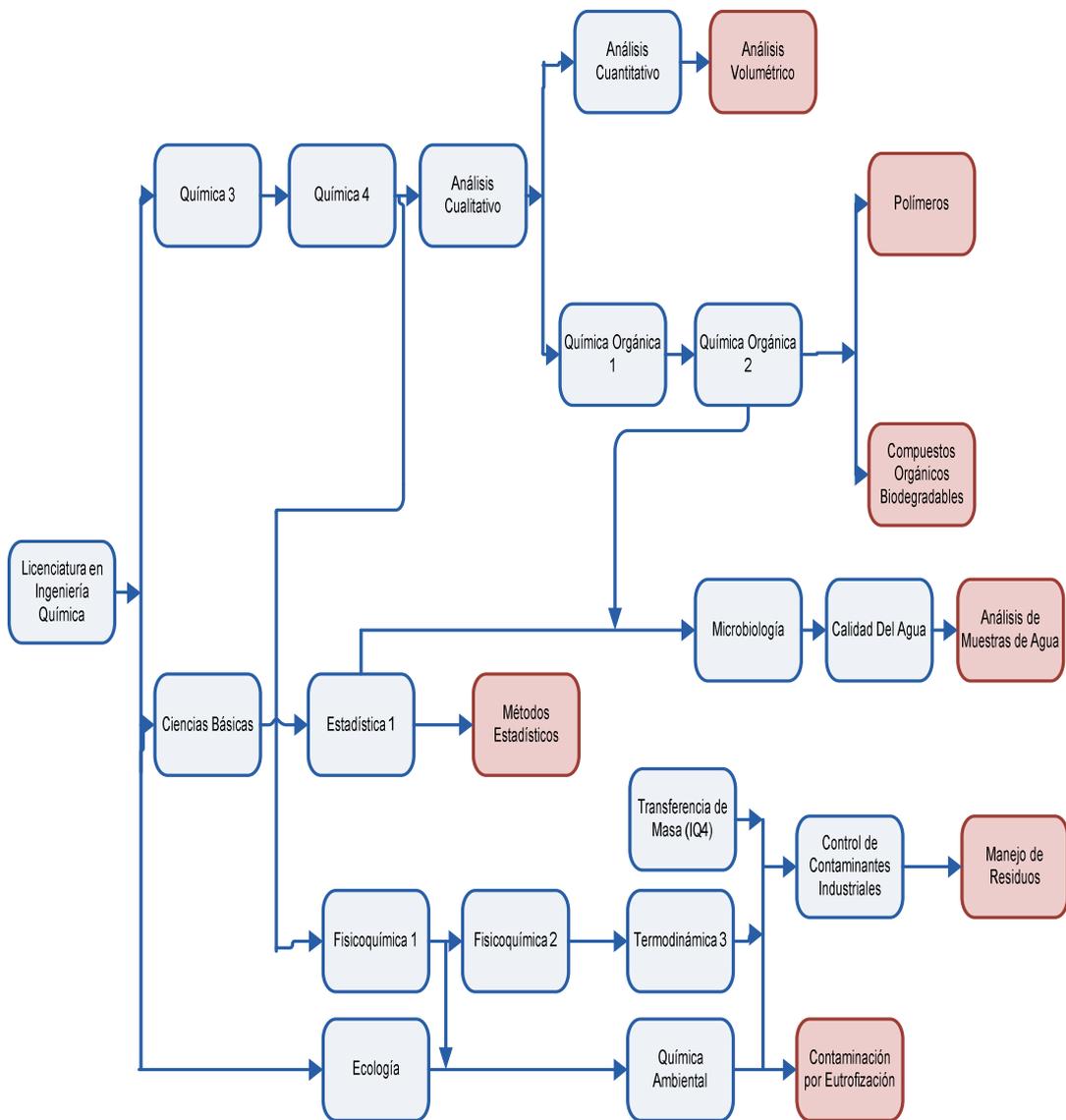
1. Dejar reposando la solución de tripolifosfato de sodio al menos por veinticuatro horas, para que se solubilice completamente.
2. Mantener en exceso el ablandador de agua utilizado en un rango de 30-40 mg/L dentro de las calderas para asegurar que la dureza se mantenga secuestrada.
3. Mantener el pH dentro del rango establecido en la tabla IV para asegurar la operación óptima del tripolifosfato de sodio.
4. Utilizar la sal tetrasódica del EDTA en calderas de presiones menores a 1 220,00 psi, debido a que si se sobrepasa dicha presión, el agente quelante se descompone.

BIBLIOGRAFÍA

1. GAFFERT, G. *Centrales de vapor*. Maluquer, Juan (trad.); Freixa, E. (prol.). España: Reverté, 1990. 602 p. ISBN: 84-291-4830-2
2. GERMAIN, Louis; COLAS, Louis; ROUQUET, Jean. *Tratamiento de las aguas*. Fusté Munné, Carmen (trad.). Barcelona: Omega, 1982. 165 p. ISBN: 84-282-0671-6
3. MARTÍNEZ ZÚÑIGA, Leonidas. *Comportamiento del tripolifosfato en el tratamiento de agua por ablandamiento*. Guatemala: Editorial Universitaria, 1992. 27 p.
4. POWELL, Sheppard T. *Manual de aguas para usos industriales*. Ayanegui, Salvador (trad.). México: Limusa, 1992. 457 p. ISBN: 968-18-2391-5
5. PULL, E. *Calderas de vapor*. Company, M. (trad.). Barcelona: Gustavo Gili, 1977. 334 p. ISBN: 84-252-0231-0
6. RIGOLA LAPEÑA, Miguel. *Tratamiento de aguas industriales, aguas de proceso y residuales*. Barcelona: Marcombo, 1982. 157 p. ISBN: 84-267-0740-8
7. SEVERNS, W. H.; DEGLER, H. E.; MILES, J. C. *Energía mediante vapor, aire o gas*. Batlle Gayán, José (trad.). España: Reverté, 1961. 503 p.

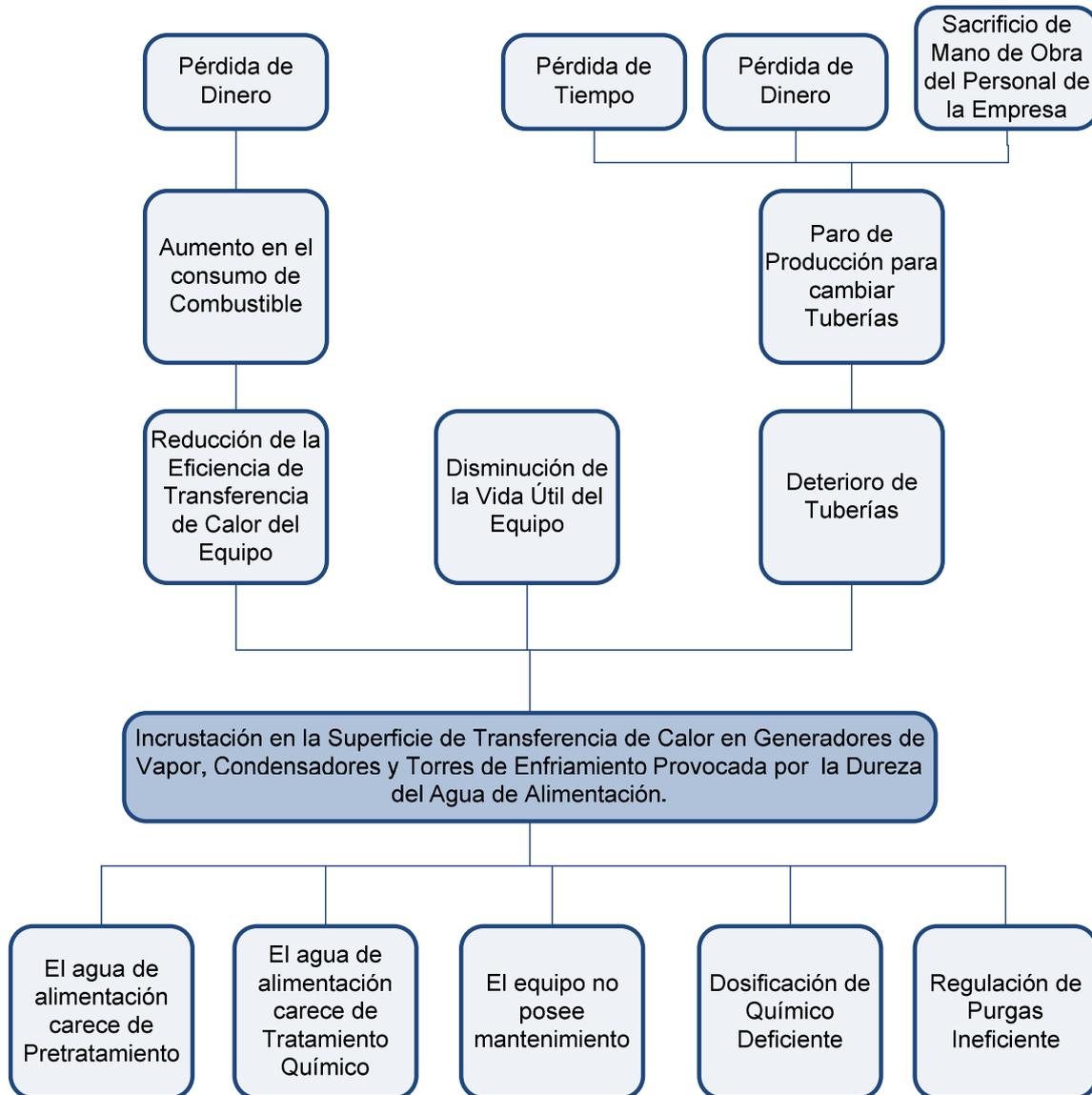
APÉNDICES

Apéndice 1. **Tabla de requisitos académicos**



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 2. Árbol de problemas



Fuente: elaboración propia.

Apéndice 3. **Instrumentos de recolección de información**

Entre los instrumentos que se utilizaron para recolectar la información se encuentran:

- Termómetro: para medir la temperatura.
- Manómetro: para medir la presión.
- Bureta: para medir la cantidad de valorante añadido en la titulación.
- Probeta: para medir el volumen de la muestra analito.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 4. **Muestra de cálculo**

Determinación de ecuaciones de consumo de ablandador de agua en función de la dureza y cantidad de agua utilizada

[Ecuación 11]

$$y = mxz$$

Donde:

y : cantidad de ablandador de agua [g]

x : dureza [mg/L]

z : cantidad de agua utilizada [m³]

m: pendiente obtenida de la grafica realizada con los datos originales $\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{ppm}} \right]$

Ejemplo: determinación de la ecuación de consumo de tripolifosfato de sodio en función de la dureza y cantidad de agua utilizada. Se utilizan datos de figura 13.

Se toma la pendiente de la ecuación obtenida y se ingresa en el modelo de la ecuación.

$$y = 3,2182 \times z$$

De la misma forma se determinaron las ecuaciones para la sal tetrasódica del EDTA y las tres mezclas analizadas; los datos se encuentran en figuras 15, 17, 19 y 21.

Continuación del apéndice 4.

Determinación de costo de ablandamiento del agua en función de la dureza y cantidad de agua utilizada mensualmente

[Ecuación 12]

$$C = \frac{k * m * x * Q}{1000}$$

Donde:

C : costo del ablandamiento mensual [Q/mes]

x : dureza [mg/L]

Q : costo del ablandador [Q/Kg]

m: pendiente obtenida de la grafica realizada con los datos originales $\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{ppm}}\right]$

k : cantidad de agua utilizada mensualmente [m^3/mes]

Ejemplo: cálculo del costo del ablandamiento para el tripolifosfato de sodio. Se utilizan datos de la tabla XLVI.

$$C = \frac{(1\text{m}^3/\text{mes}) * \left(3,2182 \frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{ppm}}\right) * (15\text{ppm}) * (11\text{Q}/\text{Kg})}{1000\text{g}/\text{Kg}}$$

$$C = 0,53 \text{ Q/mes}$$

Se calcularon los costos del ablandamiento para diferentes durezas en el agua de alimentación y de la misma forma se determinaron los costos para la sal tetrasódica del EDTA y las tres mezclas analizadas; los datos se encuentran en tablas XLVII, XLVIII, XLIX Y L.

Continuación del apéndice 4.

Determinación de ecuaciones de costo de ablandamiento del agua en función de la dureza y cantidad de agua utilizada mensualmente

[Ecuación 13]

$$y = mcxz$$

Donde:

y : costo mensual del ablandamiento [Q/mes]

x : dureza [mg/L]

z : cantidad de agua utilizada mensualmente [m³/mes]

m: pendiente obtenida de la grafica realizada con los datos originales $\left[\frac{\text{g}}{\text{m}^3 \text{ ppm}} \right]$

c : constante que involucra el costo por kilogramo de ablandador $\left[\frac{\text{Q}}{\text{g}} \right]$

Ejemplo: determinación de la ecuación de costo del ablandamiento utilizando tripolifosfato de sodio en función de la dureza y cantidad de agua utilizada. Se utilizan datos de tabla XXVI y figura 14.

Se toma la pendiente de la ecuación obtenida y se ingresa en el modelo de la ecuación.

$$y = 0,0354 x z$$

De la misma forma se determinaron las ecuaciones para la sal tetrasódica del EDTA y las tres mezclas analizadas; los datos se encuentran en tablas XXVI, XXIX, XXXII, XXXV y XXXVIII.

Continuación del apéndice 4.

Determinación del pH de saturación utilizando los diferentes ablandadores de agua y sus mezclas

[Ecuación 14]

$$pH_s = pCa + pAlc + c$$

Donde:

pH_s : pH de saturación

pCa : variable que depende de la dureza

$pAlc$: variable que depende de la alcalinidad total "m"

c : variable que depende de la temperatura y el total de sólidos disueltos

Ejemplo: determinación del pH de saturación utilizando Tripolifosfato de Sodio.

$$pH_s = 5 + 1,8 + 2,16$$

$$pH_s = 8,96$$

pCa , $pAlc$ y c se calcularon por medio de la carta del índice de Langelier, figura 10.

De la misma forma se calculó el pH de saturación utilizando la sal tetrasódica del EDTA y las mezclas analizadas; utilizando los datos de las tablas LI, LII, LIII, LIV Y LV.

Continuación del apéndice 4.

Determinación del Índice de Langelier utilizando los diferentes ablandadores de agua y sus mezclas

[Ecuación 15]

$$IL = pH - pH_s$$

Donde:

IL : Índice de Langelier

pH : Potencial de hidrógeno del agua de la torre de enfriamiento

pH_s: Potencial de hidrógeno de saturación

Ejemplo: determinación del Índice de Langelier utilizando Tripolifosfato de Sodio.

$$IL = 9 - 8,96$$

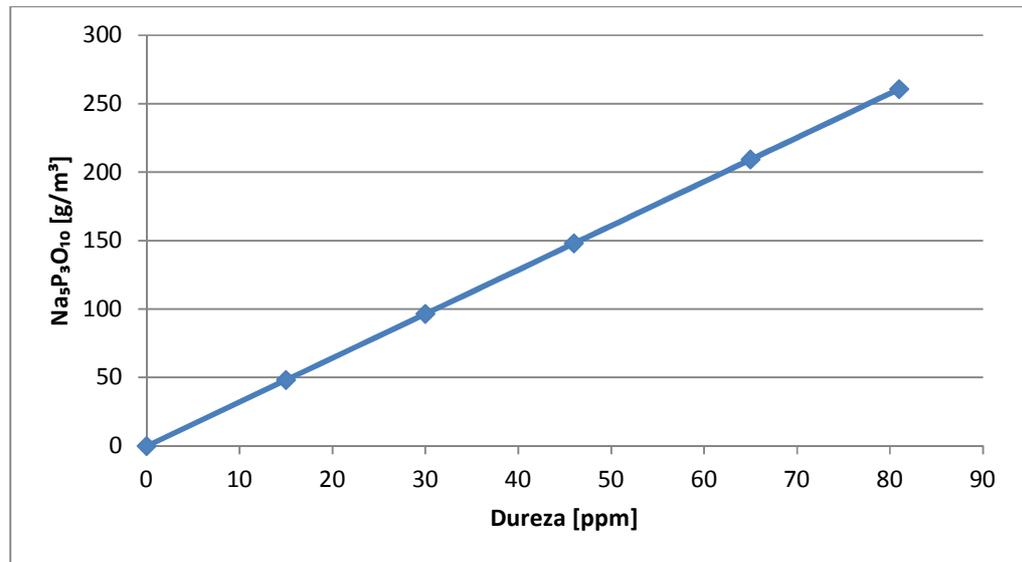
$$IL = 0,04$$

De la misma forma se calculó el Índice de Langelier utilizando la sal tetrasódica del EDTA y las mezclas analizadas; utilizando los datos de las tablas LI, LII, LIII, LIV Y LV.

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 5. Datos calculados

Figura A. **Consumo de tripolifosfato de sodio para reducir concentración de dureza a cero partes por millón**



Fuente: elaboración propia, basada en tabla 22.

Tabla 1. **Datos de la figura A**

Color	Modelo matemático	Correlación	Rango de validez [mg/L]
	$y = 3,2182x$	0,98	0 - 81

Fuente: elaboración propia, basada en figura A.

Continuación del apéndice 5.

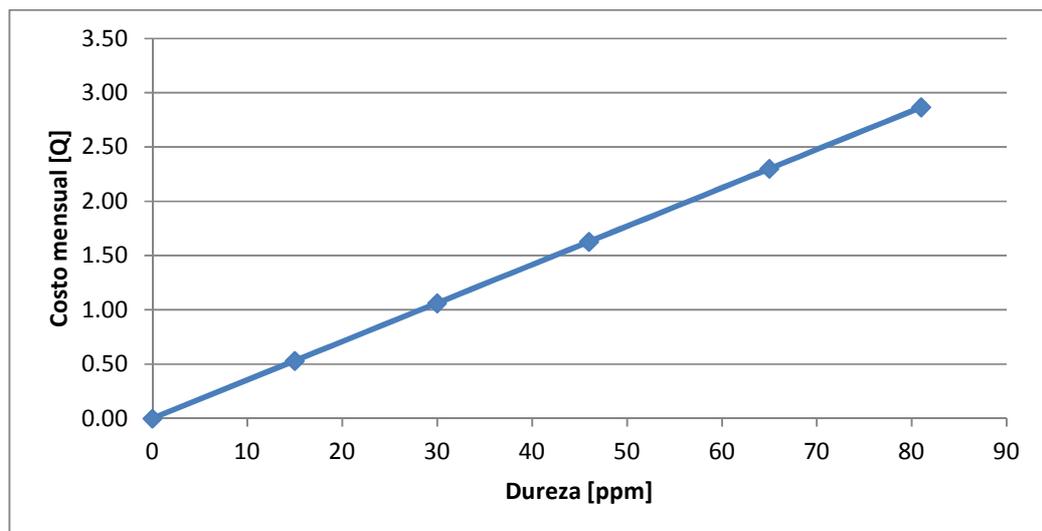
Tabla 2. **Costos del ablandamiento utilizando $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$**

Dato No.	Dureza [mg/L]	Costo [Q/Mes]
1	0	0,00
2	15	0,53
3	30	1,06
4	46	1,63
5	65	2,30
6	81	2,87

Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 12 y tabla 22.

Continuación del apéndice 5.

Figura B. **Costo del ablandamiento del agua mensual utilizando tripolifosfato de sodio**



Fuente: elaboración propia, basada en tabla 2.

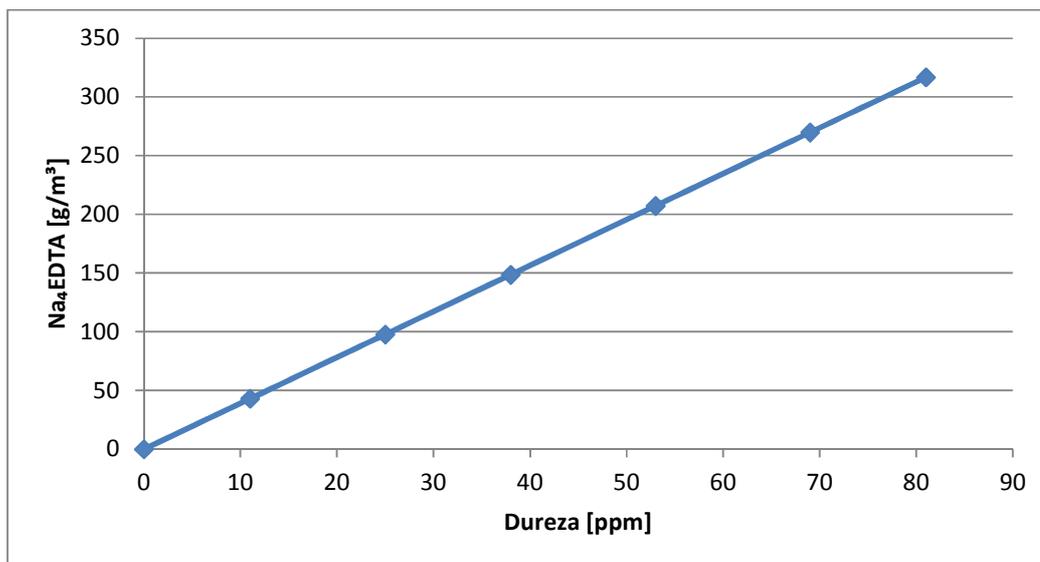
Tabla 3. **Datos de la figura B**

Color	Modelo matemático	Correlación	Rango de validez [mg/L]
	$y = 0,0354x$	0,99	0 - 81

Fuente: elaboración propia, basada en figura B.

Continuación del apéndice 5.

Figura C. **Consumo de sal tetrasódica del EDTA para reducir concentración de dureza a cero partes por millón**



Fuente: elaboración propia, basada en tabla 23.

Tabla 4. **Datos de la figura C**

Color	Modelo matemático	Correlación	Rango de validez [mg/L]
	$y = 3,9116x$	0,97	0 - 81

Fuente: elaboración propia, basada en figura C.

Continuación del apéndice 5.

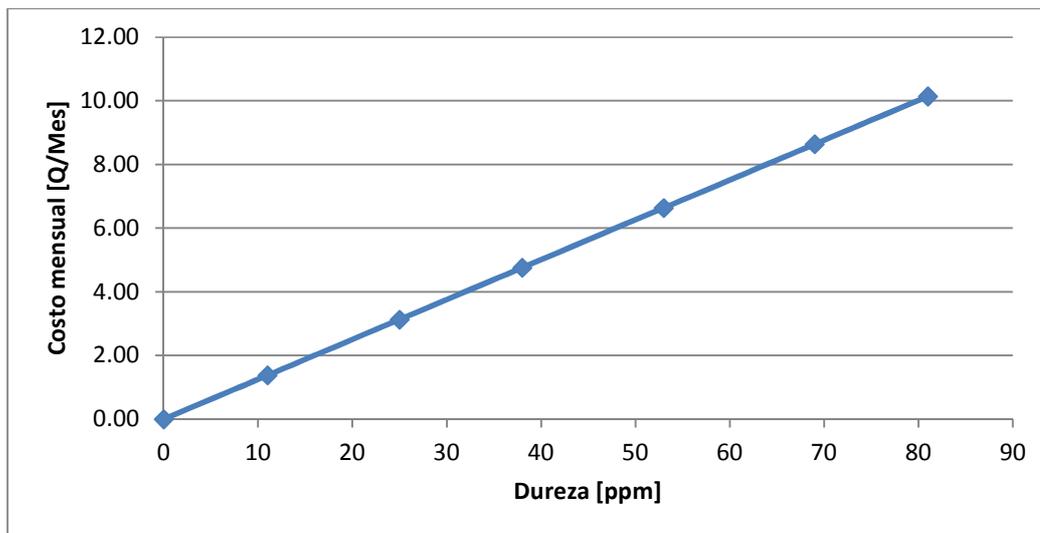
Tabla 5. **Costos del ablandamiento utilizando Na₄EDTA**

Dato No.	Dureza [mg/L]	Costo [Q/Mes]
1	0	0,00
2	11	1,38
3	25	3,13
4	38	4,76
5	53	6,63
6	69	8,64
7	81	10,14

Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 12 y tabla 23.

Continuación del apéndice 5.

Figura D. **Costo del ablandamiento del agua mensual utilizando sal tetrasódica del EDTA**



Fuente: elaboración propia, basada en tabla 5.

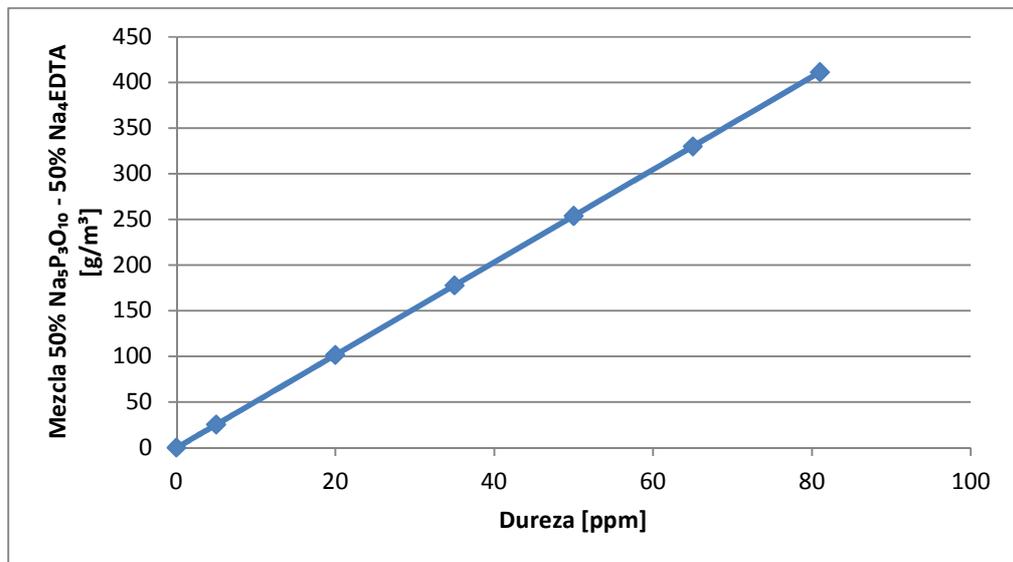
Tabla 6. **Datos de la figura D**

Color	Modelo matemático	Correlación	Rango de validez [mg/L]
	$y = 0,1252x$	0,98	0 - 81

Fuente: elaboración propia, basada en figura D.

Continuación del apéndice 5.

Figura E. **Consumo de mezcla 50% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 50% Na_4EDTA para reducir concentración de dureza a cero partes por millón**



Fuente: elaboración propia, basado en tabla 24.

Tabla 7. **Datos de la figura E**

Color	Modelo matemático	Correlación	Rango de validez [mg/L]
	$y = 5,0775x$	0,96	0 – 81

Fuente: elaboración propia, basada en figura E.

Continuación del apéndice 5.

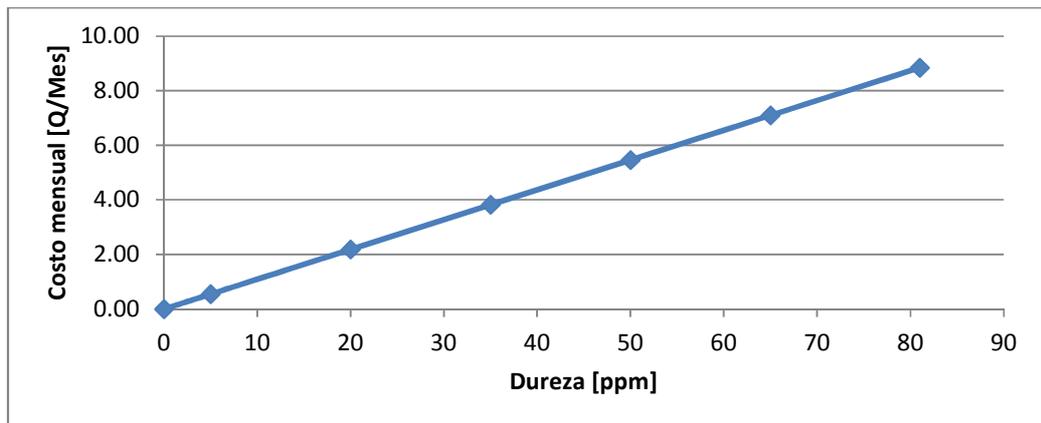
Tabla 8. **Costos del ablandamiento utilizando la mezcla 50% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 50% Na_4EDTA**

Dato No.	Dureza [mg/L]	Costo [Q/Mes]
1	0	0,00
2	5	0,55
3	20	2,18
4	35	3,82
5	50	5,46
6	65	7,10
7	81	8,84

Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 12 y tabla 24.

Continuación del apéndice 5.

Figura F. **Costo del ablandamiento del agua mensual utilizando la mezcla 50% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 50% Na_4EDTA**



Fuente: elaboración propia, basada en tabla 8.

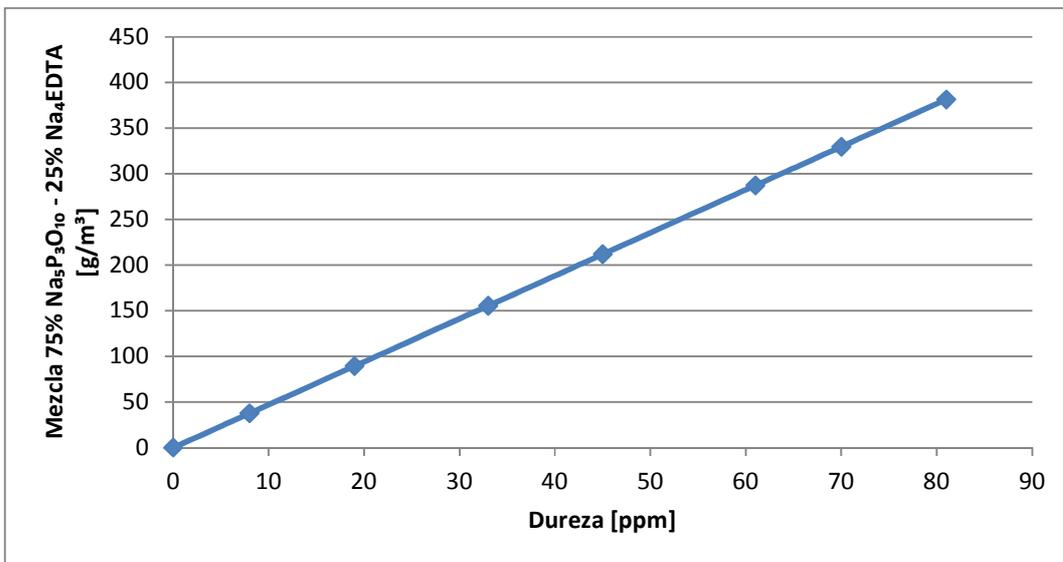
Tabla 9. **Datos de la figura F**

Color	Modelo matemático	Correlación	Rango de validez [mg/L]
	$y = 0,1092x$	0,97	0 – 81

Fuente: elaboración propia, basada en figura F.

Continuación del apéndice 5.

Figura G. **Consumo de mezcla 75% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 25% Na_4EDTA para reducir concentración de dureza a cero partes por millón**



Fuente: elaboración propia, basada en tabla 25.

Tabla 10. **Datos de la figura G**

Color	Modelo matemático	Correlación	Rango de validez [mg/L]
	$y = 4,7087x$	0,98	0 – 81

Fuente: elaboración propia, basada en figura G.

Continuación del apéndice 5.

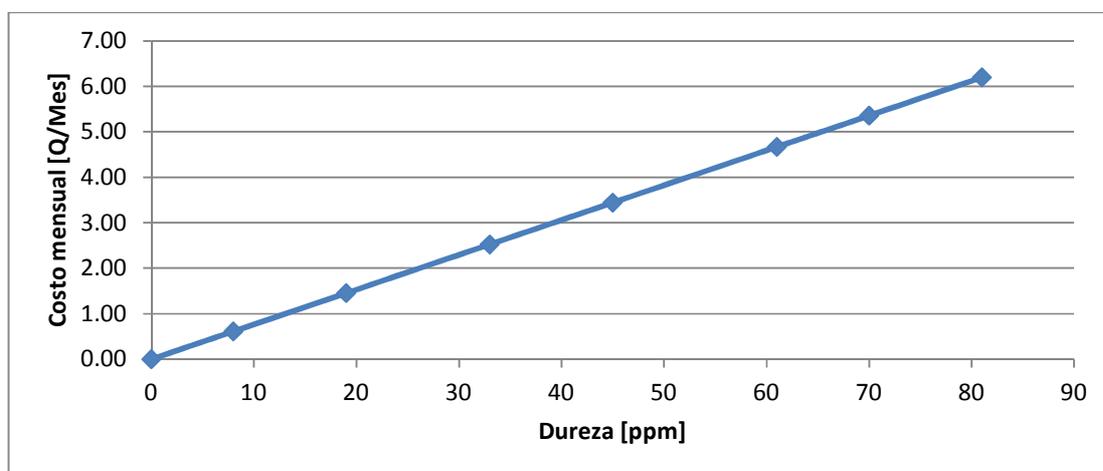
Tabla 11. **Costos del ablandamiento utilizando la mezcla 75% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$
- 25% Na_4EDTA**

Dato No.	Dureza [mg/L]	Costo [Q/Mes]
1	0	0,00
2	8	0,61
3	19	1,45
4	33	2,53
5	45	3,44
6	61	4,67
7	70	5,36
8	81	6,20

Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 12 y tabla 25.

Continuación del apéndice 5.

Figura H. **Costo del ablandamiento del agua mensual utilizando la mezcla 75% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 25% Na_4EDTA**



Fuente: elaboración propia, basada en tabla 11.

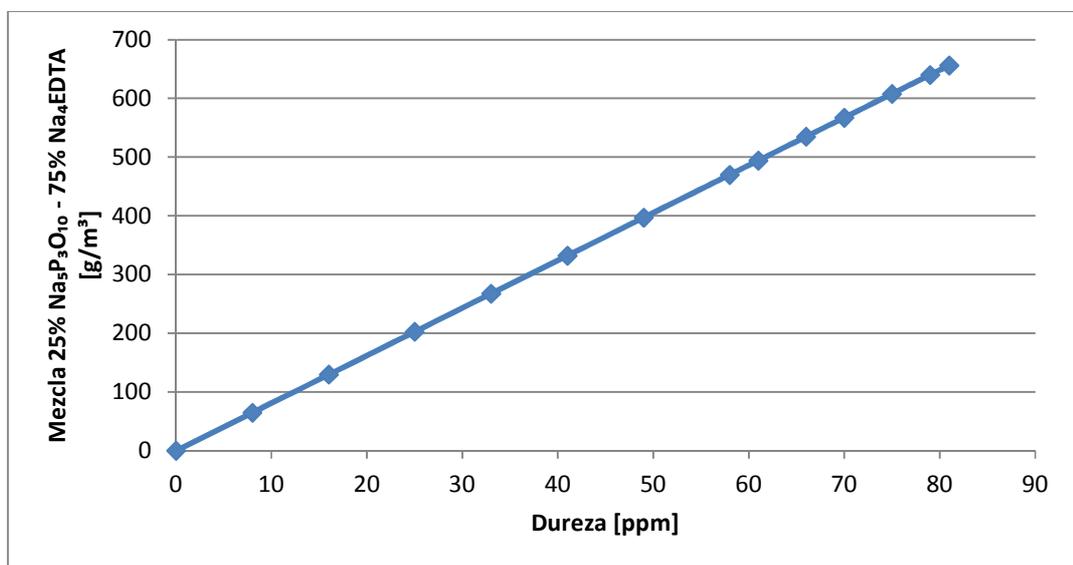
Tabla 12. **Datos de la figura H**

Color	Modelo matemático	Correlación	Rango de validez [mg/L]
	$y = 0,0765x$	0,98	0 - 81

Fuente: elaboración propia, basada en figura H.

Continuación del apéndice 5.

Figura I. **Consumo de mezcla 25% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 75% Na_4EDTA para reducir concentración de dureza a cero partes por millón**



Fuente: elaboración propia, basada en tabla 26.

Tabla 13. **Datos de la figura I**

Color	Modelo matemático	Correlación	Rango de validez [mg/L]
	$y = 8,1053x$	0,97	0 - 81

Fuente: elaboración propia, basada en figura I.

Continuación del apéndice 5.

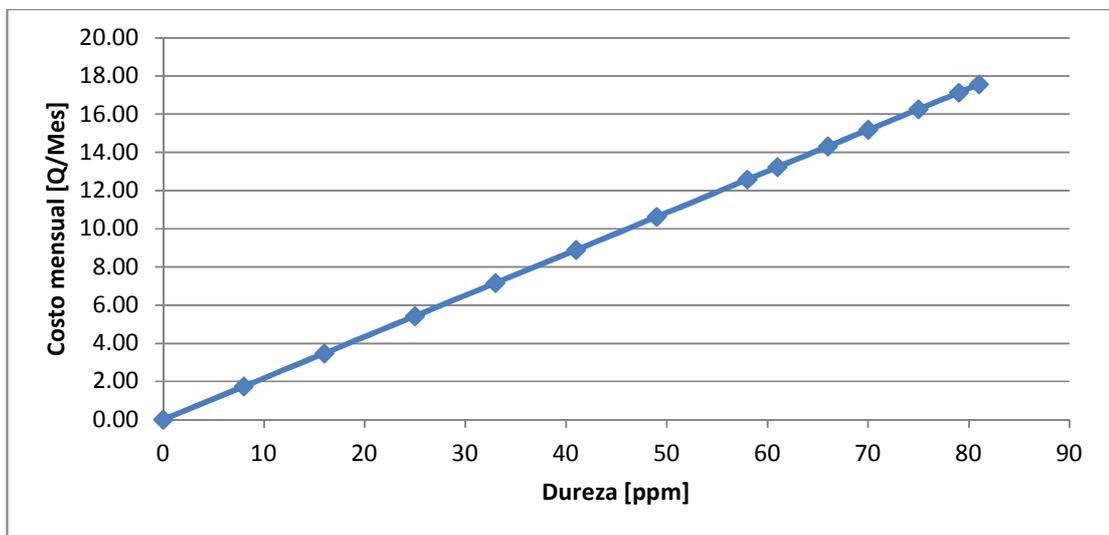
Tabla 14. **Costos del ablandamiento utilizando la mezcla 25% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$
- 75% Na_4EDTA**

Dato No.	Dureza [mg/L]	Costo [Q/Mes]
1	0	0,00
2	8	1,73
3	16	3,47
4	25	5,42
5	33	7,15
6	41	8,89
7	49	10,62
8	58	12,58
9	61	13,23
10	66	14,31
11	70	15,18
12	75	16,26
13	79	17,13
14	81	17,56

Fuente: elaboración propia, basada en ecuación 12 y tabla 26.

Continuación del apéndice 5.

Figura J. **Costo del ablandamiento del agua mensual utilizando la mezcla 25% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 75% Na_4EDTA**



Fuente: elaboración propia, basada en tabla 14.

Tabla 15. **Datos de la figura J**

Color	Modelo matemático	Correlación	Rango de validez [mg/L]
	$y = 0,2168x$	0,98	0 – 81

Fuente: elaboración propia, basada en figura J.

Continuación del apéndice 5.

Tabla 16. **Datos para el cálculo del índice de Langelier utilizando $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$**

Dureza [mg/L]	Total sólidos disueltos [mg/L]	Alcalinidad total "m" [mg/L]	Temperatura [°C]	Índice de Langelier
1	1280	750	27	0,04

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 27.

Tabla 17. **Datos para el cálculo del índice de Langelier utilizando Na_4EDTA**

Dureza [mg/L]	Total sólidos disueltos [mg/L]	Alcalinidad total "m" [mg/L]	Temperatura [°C]	Índice de Langelier
1	800	600	27	0

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 28.

Tabla 18. **Datos para el cálculo del índice de Langelier utilizando la mezcla 50% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 50% Na_4EDTA**

Dureza [mg/L]	Total sólidos disueltos [mg/L]	Alcalinidad total "m" [mg/L]	Temperatura [°C]	Índice de Langelier
1	1040	675	27	0,02

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 29.

Continuación del apéndice 5.

Tabla 19. **Datos para el cálculo del índice de Langelier utilizando la mezcla 75% Na₅P₃O₁₀ - 25% Na₄EDTA**

Dureza [mg/L]	Total sólidos disueltos [mg/L]	Alcalinidad total "m" [mg/L]	Temperatura [°C]	Índice de Langelier
1	1160	712	27	0,03

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 30.

Tabla 20. **Datos para el cálculo del índice de Langelier utilizando la mezcla 25% Na₅P₃O₁₀ - 75% Na₄EDTA**

Dureza [mg/L]	Total sólidos disueltos [mg/L]	Alcalinidad total "m" [mg/L]	Temperatura [°C]	Índice de Langelier
1	920	638	27	0,01

Fuente: elaboración propia, basada en tabla 31.

Tabla 21. **Datos para estabilizar parámetros en calderas de vapor**

Parámetro	Agua de Caldera	Límites	Unidades
pH	11	10,5 - 12	pH
Total sólidos disueltos	1200	Máx. 3 500	mg/L
Dureza total	0	0	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad total "m"	790	700 - 800	mg/L como CaCO ₃
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	350	Máx. 500	mg/L como CaCO ₃
Fosfatos	38	30 - 40	mg/L como PO ₄
Sulfitos	32	20 - 40	mg/L como SO ₃
Cloruros	60	Máx. 300	mg/L como Cl
Sílice	60	Máx. 120	mg/L como SiO ₂
Hierro	0	0	mg/L como Fe ⁻¹⁻³
Purgas	3/día		

Fuente: reporte de análisis de agua, POLCHEMICAL.

Apéndice 6. Datos originales

Tabla 22. **Tripolifosfato de Sodio**

Dato No.	Tripolifosfato de Sodio [g/m ³]	Dureza [mg/L]
1	0	81
2	50	65
3	100	50
4	150	34
5	200	19
6	250	3
7	261	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 23. **Sal tetrasódica del EDTA**

Dato No.	Sal Tetrasodica del EDTA [g/m ³]	Dureza [mg/L]
1	0	81
2	50	68
3	100	55
4	150	43
5	200	30
6	250	17
7	300	4
8	317	0

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 6.

Tabla 24. **Mezcla 50% Tripolifosfato de Sodio y 50% Sal tetrasódica del EDTA**

Dato No.	Mezcla 50%-50% [g/m ³]	Dureza [mg/L]
1	0	81
2	50	71
3	100	61
4	150	51
5	200	42
6	250	32
7	300	22
8	350	12
9	400	2
10	411	0

Fuente: elaboración propia.

Tabla 25. **Mezcla 75% Tripolifosfato de Sodio y 25% Sal tetrasódica del EDTA**

Dato No.	Mezcla 75%P-25%E [g/m ³]	Dureza [mg/L]
1	0	81
2	50	70
3	100	60
4	150	49
5	200	39
6	250	28
7	300	17
8	350	7
9	381	0

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 6.

Tabla 26. **Mezcla 25% Tripolifosfato de Sodio y 75% Sal tetrasódica del EDTA**

Dato No.	Mezcla 25%P-75%E [g/m ³]	Dureza [mg/L]
1	0	81
2	50	75
3	100	69
4	150	62
5	200	56
6	250	50
7	300	44
8	350	38
9	400	32
10	450	25
11	500	19
12	550	13
13	600	7
14	650	1
15	657	0

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 6.

Tabla 27. **Datos de torre de enfriamiento utilizando $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$**

pH	Dureza [mg/L]	Total sólidos disueltos [mg/L]	Alcalinidad total "m" [mg/L]	Temperatura [°C]
9	1	1280	750	27

Fuente: elaboración propia

Tabla 28. **Datos de torre de enfriamiento utilizando Na_4EDTA**

pH	Dureza [mg/L]	Total sólidos disueltos [mg/L]	Alcalinidad total "m" [mg/L]	Temperatura [°C]
9	1	800	600	27

Fuente: elaboración propia.

Tabla 29. **Datos de torre de enfriamiento utilizando la mezcla 50% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 50% Na_4EDTA**

pH	Dureza [mg/L]	Total sólidos disueltos [mg/L]	Alcalinidad total "m" [mg/L]	Temperatura [°C]
9	1	1040	675	27

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 6.

Tabla 30. **Datos de torre de enfriamiento utilizando la mezcla 75%
Na₅P₃O₁₀ - 25% Na₄EDTA**

pH	Dureza [mg/L]	Total sólidos disueltos [mg/L]	Alcalinidad total "m" [mg/L]	Temperatura [°C]
9	1	1160	712	27

Fuente: elaboración propia.

Tabla 31. **Datos de torre de enfriamiento utilizando la mezcla 25%
Na₅P₃O₁₀ - 75% Na₄EDTA**

pH	Dureza [mg/L]	Total sólidos disueltos [mg/L]	Alcalinidad total "m" [mg/L]	Temperatura [°C]
9	1	920	638	27

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 6.

Tabla 32. **Datos de agua de caldera utilizando $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$**

Parámetro	Agua de Caldera
pH	11
Total sólidos disueltos	1200
Dureza total	0
Alcalinidad total "m"	790
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	350
Fosfatos	38
Sulfitos	32
Cloruros	60
Sílice	60
Hierro	0
Purgas	3/día

Fuente: elaboración propia.

Tabla 33. **Datos de agua de caldera utilizando Na_4EDTA**

Parámetro	Agua de Caldera
pH	10,5
Total sólidos disueltos	1150
Dureza total	0
Alcalinidad total "m"	730
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	220
Fosfatos	31
Sulfitos	28
Cloruros	85
Sílice	39
Hierro	0
Purgas	3/día

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 6.

Tabla 34. **Datos de agua de caldera utilizando la mezcla 50% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 50% Na_4EDTA**

Parámetro	Agua de Caldera
pH	11,5
Total sólidos disueltos	1180
Dureza total	0
Alcalinidad total "m"	590
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	310
Fosfatos	36
Sulfitos	27
Cloruros	73
Sílice	55
Hierro	0
Purgas	3/día

Fuente: elaboración propia.

Tabla 35. **Datos de agua de caldera utilizando la mezcla 75% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ - 25% Na_4EDTA**

Parámetro	Agua de Caldera
pH	11
Total sólidos disueltos	1000
Dureza total	0
Alcalinidad total "m"	748
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	362
Fosfatos	38
Sulfitos	37
Cloruros	83
Sílice	60
Hierro	0
Purgas	3/día

Fuente: elaboración propia.

Continuación del apéndice 6.

Tabla 36. **Datos de agua de caldera utilizando la mezcla 25% $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ -
75% Na_4EDTA**

Parámetro	Agua de Caldera
pH	10,5
Total sólidos disueltos	1050
Dureza total	0
Alcalinidad total "m"	760
Alcalinidad de hidróxidos "OH"	350
Fosfatos	31
Sulfitos	30
Cloruros	75
Sílice	60
Hierro	0
Purgas	3/día

Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. **Ampliación de métodos y procedimientos a utilizar**

Titulación o análisis volumétrico

La valoración o titulación es un método corriente de análisis químico cuantitativo en el laboratorio, que se utiliza para determinar la concentración desconocida de un reactivo conocido. Debido a que las medidas de volumen juegan un papel fundamental en las titulaciones, se le conoce también como análisis volumétrico.

Un reactivo llamado valorante o titulador, de volumen y concentración conocida se utiliza para que reaccione con una solución del analito, de concentración desconocida. Utilizando una bureta calibrada para añadir el valorante es posible determinar la cantidad exacta que se ha consumido cuando se alcanza el punto final. El punto final es el punto en el que finaliza la valoración, y se determina mediante el uso de un indicador. Idealmente es el mismo volumen que en el punto de equivalencia esto significa que el número de moles de valorante añadido es igual al número de moles de analito.

En la valoración clásica ácido fuerte-base fuerte, el punto final de la valoración es el punto en el que el pH del reactante es exactamente 7, y a menudo la solución cambia en este momento de color de forma permanente debido a un indicador. Sin embargo, existen muchos tipos diferentes de valoraciones. Pueden usarse muchos métodos para indicar el punto final de una reacción: a menudo se usan indicadores visuales, los cuales cambian de color.

En una titulación o valoración ácido-base simple, puede usarse un indicador de pH, como la fenolftaleína, que es normalmente incolora pero adquiere color rosa cuando el pH es igual o mayor que 8,2. Otro ejemplo es el naranja de metilo, de color rojo con en medio ácido y amarillo en disoluciones básicas.

No todas las titulaciones requieren un indicador. En algunos casos, o bien los reactivos o los productos son fuertemente coloreados y pueden servir como indicador. Por ejemplo, una titulación o valoración redox que utiliza permanganato de potasio como disolución estándar (rosa/violeta) no requiere indicador porque sufre un cambio de color fácil de detectar pues queda incolora al reducirse el permanganato. Después del punto de equivalencia, hay un exceso de la disolución titulante (permanganato) y persiste un color rosado débil que no desaparece.

Debido a la naturaleza logarítmica de la curva de pH, las transiciones en el punto final son muy rápidas; y entonces, una simple gota puede cambiar el pH de modo muy significativo y provocar un cambio de color en el indicador. Hay una ligera diferencia entre el cambio de color del indicador y el punto de equivalencia de la titulación o valoración. Este error se denomina error del indicador. Por este motivo es aconsejable efectuar determinaciones en blanco con el indicador y restarle el resultado al volumen gastado en la valoración.

Fuente: MADRID, Maria Gabriela. Métodos volumétricos de análisis.

<http://www.slideshare.net/madridmgd/mtodos-volumetricos-de-analisis>. Consulta: 10 de junio de 2011.