

Tratamiento de agua para su utilización en calderas



Contenido

1	Introducción.....	4
2	Sólidos disueltos.....	5
2.1	Las impurezas en el agua de alimentación se concentran en la caldera	5
2.2	Ciclos de concentración	6
2.3	Dureza del agua	7
2.4	Corrosión del sistema de condensado.....	8
3	Arrastre de agua.....	9
3.1	Generalidades	9
3.2	Recuperación de calor de la purga continua	10
3.3	¿Qué tan pura debe ser el agua de alimentación?	10
3.4	Acarreo de agua en el vapor.....	10
3.4.1	Acarreo de humedad	10
3.5	Acarreo de espuma	11
3.6	Arrastre de agua	11
4	Acarreo de sólidos disueltos	12
4.1	Acarreo de sílice	12
4.1.1	Determinando el volumen acarreado	12
4.1.2	La alta conductividad indica acarreo	12
4.2	Factores que influyen en el arrastre de sólidos.....	12
5	Corrosión	14
5.1	Eliminación del oxígeno del agua de alimentación	14
5.1.1	Deaeradores.....	14
5.1.2	Control del deaerador.....	15
5.2	Remoción del oxígeno por método químico	16
5.3	Corrosión en el condensado	17
5.4	Control del CO ₂ con aminas neutralizantes	17
5.5	Control del CO ₂ con aminas que forman película.....	17
6	Tratamiento de agua	19
6.1	Agua de repuesto	19

6.2	Tratamiento interno del agua	19
6.3	Formación de depósitos	20
6.4	Incrustación	20
6.5	Problemas causados por la incrustación	21
6.5.1	Lodos	21
6.5.2	Sólidos totales en suspensión (TSD)	21
7	Purgas	22
7.1	Consecuencias por defecto de la purga	22
7.1.1	Total de sólidos disueltos (TSD) muy alto	22
7.1.2	Alta cantidad de sólidos en suspensión y lodos	22
7.1.3	Alta dureza y niveles de sales	22
7.1.4	Muy alta alcalinidad	22
7.2	Conservación de energía mediante un control adecuado de la purga	22
7.3	Purgas de fondo	23
7.4	Cálculo de la purga	23
8	Anexo	26
8.1	Potencial de hidrógeno (pH)	26
8.1.1	Generalidades	26
8.1.2	Principios	27

1 Introducción

La eficiencia con que operan las calderas de vapor, y por consiguiente el costo de operación de éstas, así como la seguridad en su operación y su durabilidad, depende en gran medida de la calidad del agua con que se alimentan. El tratamiento que se requiere dar al agua, tanto el externo como el interno, debe ser diseñado y efectuado por personal capacitado para asegurar que los efectos nocivos de los compuestos acarreados por el agua sean reducidos al mínimo.

Por lo anterior, es necesario que el personal operativo de los sistemas de generación y distribución de vapor conozca los fundamentos del comportamiento del agua al interior de los generadores de vapor y las ventajas que conlleva para sus sistemas un buen diseño y aplicación de un programa de tratamiento del agua.

El siguiente material sobre este tema ha sido tomado de las siguientes fuentes:

- a. Boiler plant and distribution system optimization manual (Harry R. Taplin, 1991)
- b. Manual Selmec de calderas (1976)
- c. Wikipedia

2 Sólidos disueltos

2.1 Las impurezas en el agua de alimentación se concentran en la caldera

Prácticamente todas las aguas de alimentación a las calderas contienen sólidos disueltos. Cuando el agua de alimentación se calienta, se evapora y sale de la caldera como vapor destilado dejando las impurezas atrás. Entre más y más agua se evapora en la caldera, se añade más líquido para reemplazarla. Como resultado de esto, la cantidad de sólidos disueltos al interior de la caldera aumenta gradualmente. En poco tiempo se acumula una gran cantidad de éstos en el agua de la caldera, provocando que no hierva ya como agua ordinaria, sino como una especie de jarabe.

Las burbujas de vapor que suben no se separan fácilmente de la superficie; en vez de esto, se forman grandes burbujas que, cuando revientan, arrastran con ellas hacia el espacio de vapor algo de la película (solución) con que se formó la burbuja. Esta condición se denomina comúnmente “acarreo”.

Además, algunos materiales que son altamente solubles a bajas temperaturas, debido a la alta temperatura en la caldera, cambian su solubilidad, se transforman en materiales con baja solubilidad y son precipitados, como es el caso del carbonato de calcio (CaCO_3), un compuesto presente en la mayoría de las aguas de alimentación para calderas. La mayor parte de esta precipitación tiene lugar donde el agua de la caldera está más caliente, es decir, donde el agua está en contacto con las zonas de mayor transferencia de calor. El material precipitado se deposita en la superficie caliente y forma incrustaciones.

Estas incrustaciones, en forma de placas, son un buen aislante del calor y reducen el grado de transferencia de calor. Conforme la incrustación crece, el vapor y el agua son cada vez menos capaces de mantener estas superficies enfriadas y comienzan a recalentarse, al grado de reducir la resistencia del metal de los tubos y causar su ruptura. Dependiendo de las circunstancias, esta falla puede presentarse en forma de ampollas o, incluso, provoca que se funda el material de los tubos.

Uno de los objetivos de un programa de tratamiento de agua es el de mantener en solución a algunos de los sólidos responsables de la formación de incrustaciones. En otros casos, se busca convertirlos en un precipitado ligero y esponjoso que fluya hacia las zonas bajas de la caldera.

La tabla 2.1 muestra los efectos de un tratamiento inadecuado del agua de la caldera.

Efecto	Problema	Observaciones
Incrustación	Sílice	Forma un recubrimiento duro y vidrioso en las superficies internas de la caldera. Se vaporiza en las calderas de alta presión y se deposita en los álabes de las turbinas.
	Dureza	El CaSO_4 , MgSO_3 , CaCO_3 , y MgCO_3 forman incrustaciones en los tubos de la caldera.
Se reduce la transferencia de calor	Depósitos: incrustaciones y lodos.	Pérdida de eficiencia, desperdicio de combustible.
Corrosión	Oxígeno	Causa erosión en las superficies metálicas de la caldera y las tuberías de condensado.
	Dióxido de carbono	Es la causa principal del deterioro de las líneas de retorno de condensado.
	Oxígeno y Dióxido de carbono	Su combinación es más corrosiva que cuando actúan aislados
Arrastre de agua y espumado	Alta concentración en agua de caldera	Contaminación del sistema de distribución, vapor húmedo y depósitos en las tuberías, en álabes de turbina y asientos de válvulas.
Fragilidad cáustica	Alta concentración cáustica	Causa fisuras intercristalinas del metal de la caldera (tubos)
Pérdidas económicas	Reparaciones	Reparación de calderas dañadas y limpieza mecánica de calderas con incrustaciones severas
	Paros no programados	Se reduce la eficiencia y capacidad de toda la planta

Tabla 2.1 Efectos de un tratamiento inadecuado del agua de la caldera.

2.2 Ciclos de concentración

La cantidad de un material disuelto en un líquido se mide en partes por millón (ppm). A todas las impurezas disueltas en el agua se les conoce como "Total de Sólidos Disueltos" (TSD); el método moderno para conocer esta cantidad utiliza instrumentos electrónicos que miden la conductancia (lo opuesto a la resistencia) del agua de la caldera. Las lecturas se dan en "mhos" o "micromhos" y pueden

ser convertidos a su equivalente en partes por millón, con respecto a iones de sodio, simplemente multiplicando la lectura por un factor.

Una parte por millón (ppm) equivale a un kilogramo del sólido disuelto de que se trate en un millón de kilogramos de agua. Como el agua pesa un kilogramo por litro, una ppm equivale a un kilogramo en un millón de litros de agua.

Si un determinado tipo de agua tiene un total de sólidos disueltos de 500 ppm y la concentramos dos veces o dos ciclos, el nivel TSD final será 1,000 ppm. Con tres ciclos, su TSD será de 1,500 ppm; con cuatro ciclos, 2,000 ppm y así sucesivamente.

Por ejemplo: una caldera de 100 caballos puede evaporar unos 37,500 litros de agua en 24 horas de trabajo continuo. Si el agua tiene una dureza de 340 ppm, se quedarán dentro de la caldera 12.75 kilogramos de sólidos cada día.

Las pérdidas de energía por purga pueden reducirse si se mantienen los ciclos de concentración del agua de la caldera lo más cerca posible del límite recomendado. Esto puede lograrse de una mejor forma si se automatiza la purga continua de la caldera.

El control automático de la purga implica el uso de un monitoreo continuo de la conductividad para activar la válvula de control de purga. Con estos equipos se puede mantener la conductividad del agua dentro de los límites requeridos y minimizar las pérdidas de energía, en forma de agua caliente, que ocurren con el control manual.

2.3 Dureza del agua

A las aguas con alto contenido de minerales de calcio y magnesio se les conoce como “aguas duras”, probablemente del inglés “hard to wash with”, debido a que con este tipo de aguas es muy difícil lavar.

La dureza en el agua de la caldera indica la presencia de impurezas relativamente insolubles; éstas se clasifican en: (a) sólidos disueltos, (b) gases disueltos y (c) sólidos en suspensión. En el proceso de calentamiento y concentración del agua de la caldera, estas impurezas precipitan más rápidamente debido a que son menos solubles en alta temperatura.

La cantidad de dureza en el agua normal puede variar desde algunas partes por millón hasta más de 500. Como los compuestos de calcio y magnesio son relativamente insolubles en agua, tienden a precipitar fácilmente causando problemas de incrustación y depósitos. Como se mencionó arriba, el proceso de precipitación ocurre principalmente sobre las superficies calientes y se conoce como incrustación. No sólo la cantidad disponible, sino también la dureza del agua de la región (municipal, pozo, etc.) es de suma importancia al considerar la disponibilidad de agua para la generación de vapor.

2.4 Corrosión del sistema de condensado

El tipo de corrosión más común en estos sistemas es la causada por el dióxido de carbono (CO_2).

El CO_2 entra al sistema con el agua de alimentación en forma de sales de carbonato o bicarbonato (alcalinidad) que cuando se ponen en contacto con el agua interior de la caldera a alta temperatura, estos compuestos se rompen formando dióxido de carbono que es transportado por el vapor y se condensa en las tuberías y equipos que forman el sistema de condensados, transformándose en ácido carbónico (H_2CO_3).

3 Arrastre de agua

3.1 Generalidades

El arrastre de agua ocurre cuando una porción de líquido entra al sistema de distribución de vapor y se forma una especie de émbolo de agua que viaja a la misma velocidad del vapor (figura 3.1). Existen varias causas que pueden provocar esto, como son: un aumento en la demanda de vapor, caídas bruscas en la presión del sistema, purgas, la abertura rápida de válvulas en el sistema de distribución, tamaño inadecuado de la tobera o del cabezal de vapor. Este fenómeno también puede producirse por el aumento repentino de la cantidad de condensado en una tubería.

Una condición típica en que ocurre el arrastre de agua se da cuando la caldera ha alcanzado la presión de trabajo y el operario abre rápidamente la válvula de distribución del cabezal de vapor. En pocos minutos se notará que el nivel del agua oscila de arriba hacia abajo, oscilación que puede volverse bastante violenta y causar que la caldera se pare debido a que el sensor de nivel interpreta esto como bajo nivel de agua.

Lo que ocurrió en realidad es que toda la tubería de distribución y el equipo de intercambio de calor al que el cabezal suministra vapor se encuentran fríos y el vapor se condensa rápidamente, quizá formando un vacío, lo que causa que dentro de la caldera se produzca una ebullición violenta; con esto se produce una serie de oscilaciones en la superficie del agua que alcanza la tobera de vapor. La elevación del nivel del agua no se puede mantener y cae rápidamente iniciando un efecto de vaivén. Se inicia un efecto de ola que permite que el agua entre al sistema de vapor intermitentemente, lo que es una condición peligrosa que puede ocasionar alteraciones a la circulación del agua en la caldera y provocar daños al equipo al producirse el llamado “golpe de ariete” cuando la porción de agua impacta, a una velocidad muy alta, los elementos del sistema de distribución de vapor o de los equipos, como por ejemplo, los álabes de turbinas.

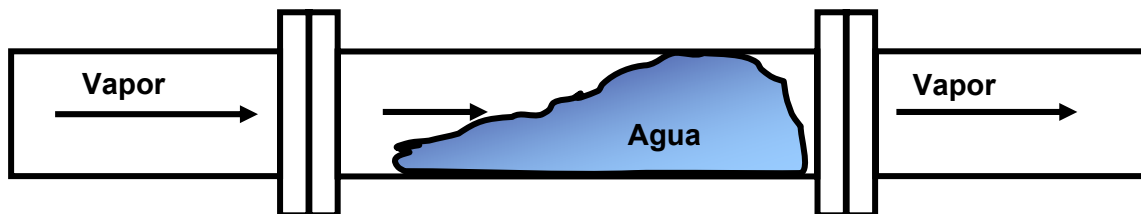


Figura 3.1 Cuando una porción de líquido entra al sistema de distribución de vapor por cambios bruscos en el nivel o se forma por acumulación de condensados en la tubería, se produce el fenómeno llamado “golpe de ariete”.

Una buena práctica es el aumentar la temperatura del agua en la caldera lentamente, a un promedio de 40 °C por hora y abrir poco a poco las válvulas, permitiendo que todo el sistema se caliente gradualmente y se establezca su temperatura antes de introducir una demanda brusca de vapor.

3.2 Recuperación de calor de la purga continua

La purga continua, también llamada de superficie o “desnatado”, es lo más efectivo para controlar la concentración de sólidos en el agua de la caldera. Donde se utiliza el sistema de purga continua, la purga de fondo o de lodos se utiliza para eliminar las impurezas precipitadas, en especial aquellas que tienden a depositarse en las partes más bajas de la caldera.

Se pueden utilizar intercambiadores de calor en combinación con la purga continua para recuperar la energía del agua, en forma de vapor, que sale de la caldera.

3.3 ¿Qué tan pura debe ser el agua de alimentación?

La pureza del agua de alimentación depende de la cantidad de impurezas y de la naturaleza de éstas. Algunas impurezas como la dureza, hierro y sílice, por ejemplo, son de mayor preocupación que las sales de sodio. Los requerimientos de pureza dependen de cuánta agua de alimentación se utiliza y del diseño particular de la caldera de que se trate. Asimismo, la presión, grado de transferencia de calor y equipo instalado en el sistema, como turbinas, pistones, etc. tienen que ser considerados para definir la pureza del agua de alimentación.

Los requerimientos de pureza del agua de alimentación varían ampliamente. Una caldera de tubos de humo a baja presión puede, normalmente, tolerar una dureza alta del agua mediante un tratamiento químico adecuado, mientras que prácticamente todas las impurezas deben ser eliminadas del agua para las calderas modernas de tubos de agua y alta presión.

3.4 Acarreo de agua en el vapor

El agua evaporada para producir vapor no debe contener materiales contaminantes, sin embargo, el vapor puede acarrear junto con él, gotas de agua, debido a varias causas.

3.4.1 Acarreo de humedad

Al hervir el agua se produce una neblina muy fina. Cuando las burbujas de vapor dejan la superficie del agua, queda una depresión momentánea que al ser llenada por el líquido produce una pequeña gota que se eleva de la parte central de la depresión. Como resultado de esto se producen muchas gotas de agua pequeñas que son proyectadas hacia arriba de la superficie y se forma una neblina. Esta neblina puede ser eliminada parcialmente en la sección seca de la caldera, sin embargo, la cantidad de humedad que permanece junto con el vapor tendrá el mismo nivel de contaminación que el agua de la caldera. Este proceso se ilustra en la Fig. 3.2.

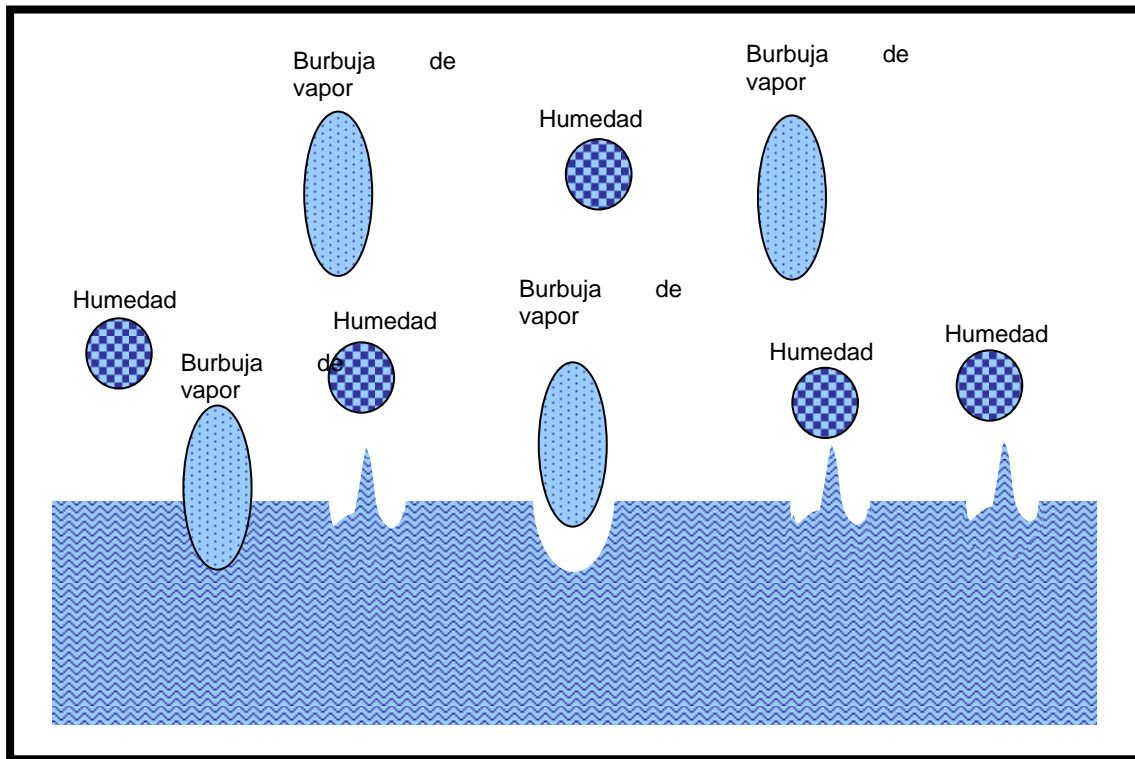


Figura 3.2 Formación de humedad en el agua hirviendo con niveles altos de impurezas. En la parte superior se encuentra el vapor de agua, se ilustra cómo se forman las burbujas de vapor y se producen las pequeñas gotas de agua al cerrarse la superficie del agua en el lugar de donde salió la burbuja de vapor.

3.5 Acarreo de espuma

La alcalinidad, el contenido total de sólidos en suspensión y los sólidos disueltos (TSD) interactúan para crear espuma dentro de la caldera. Una capa ligera de espuma ayuda a reducir la formación de humedad hasta cierto punto. Por otro lado, una capa gruesa de espuma es otra fuente de arrastre de líquido dentro de la corriente de vapor. El nivel de espumado puede controlarse normalmente hasta un límite razonable manteniendo el grado total de alcalinidad menor que el 20% de los TSD y el de los sólidos suspendidos abajo del 8% del total de los sólidos disueltos. Se añaden, además, agentes anti-espumado al dispersante de sedimentos (lignosulfonado de sodio).

3.6 Arrastre de agua

El arrastre de agua se explica por la entrada de volúmenes considerables de agua en exceso dentro del domo de vapor, el cual vierte este exceso dentro del espacio de vapor y es arrastrado hacia el cabezal. Este arrastre es causado, en la gran mayoría de los casos, por un problema mecánico o propiedades mecánicas, como puede ser un control de alimentación de agua mal ajustado (hipersensitivo) o procedimientos incorrectos de purga. Para controlar esto, no existe un método de control químico.

4 Acarreo de sólidos disueltos

4.1 Acarreo de sílice

La sílice dentro del agua de la caldera puede evaporarse y entrar en la corriente de vapor, independientemente del arrastre de agua. Cuando esto ocurre, la sílice puede formar un depósito en los álabes de las turbinas y otros equipos al condensarse el vapor. Esto puede ser controlado manteniendo un nivel bajo de sílice en el agua de la caldera. Los límites recomendados dependen de la presión de trabajo de la caldera y se muestran en la tabla 4.1.

Presión de trabajo (kg/cm ²)	Contenido de sílice permitido como SiO ₂ (ppm)
0 - 1	200
1 - 10	200
10 - 21	150
21 - 32	90
32 - 42	40
42 - 53	30
53 y más	20

Tabla 4.1 Límites permitidos de sílice en el agua de la caldera.

4.1.1 Determinando el volumen acarreado

La mejor manera para determinar si existe acarreo es la medición de la conductividad del vapor; una conductividad de 20 a 30 micromhos indica que existe muy poca probabilidad de que exista un acarreo significativo.

4.1.2 La alta conductividad indica acarreo

Una medida alta de la conductividad del condensado de vapor indica que existe acarreo o que existen fugas en el sistema de vapor. En este caso, debe de verificarse la dureza. Si se encuentra dureza, la contaminación del condensado indicada por la alta conductividad se debe a fugas dentro del sistema de condensado y no por acarreo. Esto se explica porque el arrastre se da en condiciones de baja dureza del agua debido al tratamiento químico o a que no se requiere mucho tratamiento para el agua de repuesto.

4.2 Factores que influyen en el arrastre de sólidos

La tabla 4.2 muestra los factores que influyen en el arrastre de sólidos disueltos.

Factores mecánicos	Condición del agua	Operación
Diseño de la caldera	Tipo de fuente y cantidad de reposición	Capacidad
Dimensión de domos	Ciclos de concentración	Variaciones en capacidad
Cantidad de domos	Alcalinidad	Presión de trabajo
Accesorios en domos	Contenido de materia orgánica	Nivel del agua
Circulación del agua	Sólidos en suspensión	Variaciones en el nivel
Superficie de calefacción radiante	Tipo de tratamiento químico	Sólidos en purgas
Superficie de calefacción por convección	Capacidad de espumeo	Válvulas de seguridad en mal estado

Tabla 4.2 Factores que influyen en el arrastre de sólidos

5 Corrosión

Los gases no condensables son aquellos que no se condensan a la temperatura normal del agua cruda y entran al sistema de generación de vapor arrastrados por el agua. Los más comunes y dañinos son el oxígeno disuelto en el agua y el bióxido de carbono.

El oxígeno disuelto ataca al hierro y forma hidróxido férrico; esta corrosión se presenta como ampollas en la superficie del metal y con el tiempo puede llegar a perforarlo. El bióxido de carbono ataca al metal, especialmente cuando está en presencia del oxígeno disuelto. El bióxido de carbono combinado con el agua forma ácido carbónico que, bajo ciertas condiciones, es un agente corrosivo para los metales féreos y las aleaciones de níquel y cobre.

En ocasiones se puede presentar otro gas no condensable, el hidróxido de amonio, que ataca a las aleaciones de cobre con que están fabricadas las válvulas y conexiones.

En las líneas de retorno de condensados se puede llegar a presentar corrosión debido a la presencia de oxígeno y de bióxido de carbono. El primero se encuentra disuelto en el agua y también puede ser absorbido directamente del aire que entra en contacto con el agua. El bióxido de carbono se produce por la transformación de los bicarbonatos contenidos en el agua que se convierten en carbonatos al elevarse la temperatura de ésta.

5.1 Eliminación del oxígeno del agua de alimentación

Para la remoción del oxígeno contenido en el agua de alimentación se requiere un deareador, en donde el agua de repuesto y el retorno de condensado son mezclados, calentados y agitados mediante la inyección de vapor vivo. Esta acción separa al oxígeno y otros gases no condensables del agua, los cuales salen por el tubo de venteo junto con una pequeña cantidad de vapor.

5.1.1 Deareadores

El oxígeno y el dióxido de carbono son dañinos para los sistemas de generación y distribución de vapor. Para eliminarlos se han diseñado equipos deareadores cuya función es eliminar los gases disueltos en el agua de alimentación a la caldera. Son bastante eficientes y pueden reducir el contenido de oxígeno hasta niveles de trazas, más o menos 0.005 ppm. No obstante la eficiencia de los éstos equipos, las trazas de oxígeno pueden causar bastante corrosión, por lo que es necesario utilizar un tratamiento químico para evitar esto.

El deareador elimina la mayoría del dióxido de carbono del agua de alimentación, sin embargo, dentro de la caldera, la alcalinidad debida a los carbonatos y bicarbonatos produce una cantidad adicional de dióxido de carbono. Esto requiere un tratamiento adicional del agua de la caldera.

Los deaereadores contienen una sección de calentamiento y otra propiamente para la deaereación. La sección de almacenamiento se diseña comúnmente con una capacidad equivalente a 10 minutos de bombeo de agua de alimentación.

Al entrar el agua en el deaerador, se “rompe” en forma de atomización o neblina y es mezclada con vapor para forzar la eliminación de los gases disueltos. El vapor y los gases no condensables fluyen hacia arriba, a la sección de venteo, donde el vapor es condensado. Los gases eliminados se descargan a la atmósfera a través de la salida de venteo.

5.1.2 Control del deaerador

Para la correcta operación del deaerador, se deben vigilar muy de cerca las condiciones siguientes:

Pluma de vapor.- Es conveniente de observar que la pluma de vapor salga constantemente por el tubo de venteo.

Temperatura y presión.- La presión del deaerador y la temperatura del agua de salida deben controlarse.

Para una presión dada, la temperatura tendrá que estar un grado centígrado por arriba o abajo de la temperatura mostrada en la figura 5.1, dependiendo de la altura sobre el nivel del mar del sitio donde se encuentra instalado. Si el flujo de vapor en el venteo es bajo o la temperatura del vapor es menor a la requerida, el equipo no operará correctamente.

La mezcla de agua con oxígeno es una combinación muy corrosiva; la corrosividad se duplica por cada 10 °C de aumento en la temperatura.

La corrosión por oxígeno se reconoce por la formación de pequeñas muescas o picaduras que aparecen en la parte superior del domo de vapor o en la línea de nivel de agua. El oxígeno puede eliminarse del agua de alimentación por deaereación mecánica o química; se suelen utilizar los dos métodos simultáneamente.

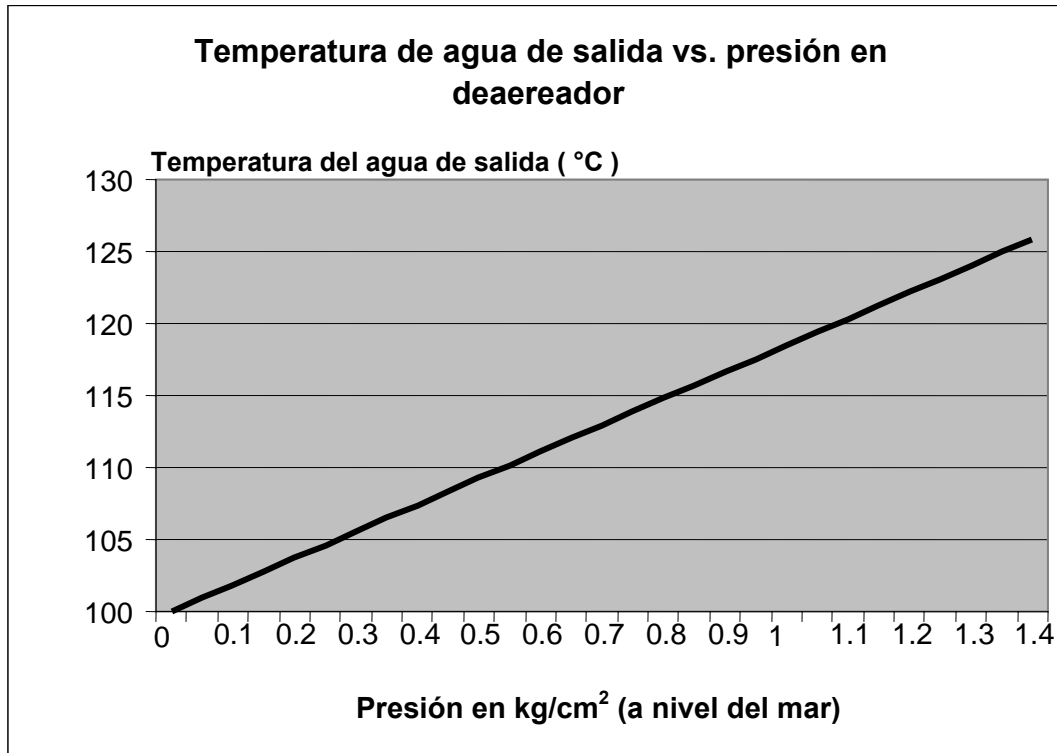
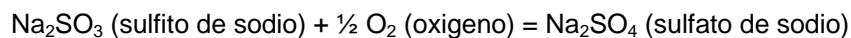


Figura 5.1 Temperatura de salida del agua recomendada para varias presiones del deaerador (a nivel del mar).

5.2 Remoción del oxígeno por método químico

Los deaeradores mecánicos pueden reducir el contenido de oxígeno en el agua de alimentación hasta fracciones de ppm. Sin embargo, para una eliminación completa se requiere un tratamiento químico adicional. Uno de los métodos más comunes es el que utiliza sulfito de sodio como catalizador, que reacciona con el oxígeno, produciendo sulfato de sodio, el cual no provoca corrosión.



La reacción química requiere 7.88 kg de sulfito de sodio puro por cada kilogramo de oxígeno. En la práctica se añaden, aproximadamente, 10 kg de sulfito de sodio por kilogramo de oxígeno para mantener un pequeño exceso de sulfito en el agua de la caldera. Este exceso dependerá de la presión de trabajo de la caldera, como se muestra en la Tabla 5.1.

El sulfito de sodio se debe administrar continuamente a la caldera. Si se utilizan niveles más altos de sulfito, esto se convierte en un desperdicio; además, el sulfito se puede descomponer y causar que el vapor y su condensado se vuelvan corrosivos.

Presión (kg/cm ²)	Sulfito residual (ppm de SO ₃)
0 – 1	30 - 60
1 - 10	30 - 60
10 - 14	30 - 60
14 - 31	20 - 40
31 - 42	20 - 40
42 - 52	15 - 30
52 - más	15 - 30

Tabla 5.1 Nivel de sulfito (SO₃) en el agua de la caldera

5.3 Corrosión en el condensado

Cualquier cantidad de dióxido de carbono en el agua de alimentación debe ser eliminado por el deaerador. Sin embargo, alguna forma de combinación del dióxido de carbono puede entrar al agua de alimentación de la caldera en forma de carbonatos o bicarbonatos. Bajo la acción del calor y la presión, estos compuestos pueden formar dióxido de carbono libre que saldrá de la caldera junto con el vapor.

5.4 Control del CO₂ con aminas neutralizantes

Las aminas son compuestos químicos orgánicos derivados del amoníaco y resultan de la sustitución de hidrógenos por radicales alquilo. Según se sustituyan uno, dos o tres hidrógenos, las aminas serán primarias, secundarias o terciarias; respectivamente.

El dióxido de carbono en las calderas de vapor y sus sistemas puede controlarse neutralizándolo con una amina volátil (neutralizante), que al añadirse al agua de la caldera, se vaporiza y pasa al sistema de distribución, donde se combina con el CO₂ libre contenido en el vapor de agua para formar un nuevo compuesto denominado amida¹.

Las aminas más comúnmente usadas son la morfolina y la ciclohexilamina. Cuando el vapor inicia su condensación, en los puntos del sistema de distribución cercanos a la caldera, la morfolina estará presente en concentraciones altas. En los puntos más lejanos del sistema de distribución, la ciclohexilamina estará disponible en concentraciones altas y será más efectiva para controlar la corrosión. Para una mejor protección se utilizan juntos estos dos compuestos químicos.

5.5 Control del CO₂ con aminas que forman película

Otra medida para evitar la corrosión por CO₂ es la utilización de aminas, que tienen la propiedad de producir un recubrimiento protector, como la octadecilamina, que forma una película en el interior de la tubería de condensado, protegiéndola contra la humedad, ya que actúa como una barrera entre el

¹ Las amidas son compuestos orgánicos cuyo grupo funcional es del tipo RCONR'R".

condensado y el metal de los tubos, lo que provee una protección contra el oxígeno y el dióxido de carbono, aunque no los neutralizan.

Las aminas se utilizan normalmente en concentraciones de 0.7 a 1.0 ppm y debido a que presentan dificultad para su manejo y mezclado, se deben suministrar directamente en el cabezal de vapor.

El tipo correcto de amina, neutralizante o de película, depende del sistema de generación y distribución de vapor, el trazado de las líneas, condiciones de operación y composición del agua de alimentación. Las aminas volátiles son más adecuadas en sistemas con agua que requiere poco tratamiento previo, con poca alcalinidad y un buen control del oxígeno.

En general, los inhibidores tipo película dan una protección más económica en los sistemas con buen tratamiento previo del agua, alta alcalinidad del agua de alimentación y en sistemas que operan intermitentemente. En la mayoría de los casos, se recomienda la combinación de estos métodos para combatir mejor el problema de corrosión de los sistemas de condensado.

6 Tratamiento de agua

6.1 Agua de repuesto

El agua de repuesto la que se añade a la caldera, desde una fuente externa, para reemplazar la que se pierde en la caldera y el sistema de distribución de vapor y retorno de condensado; esto incluye las purgas, fugas de vapor, pérdidas de condensado y el vapor utilizado directamente en los procesos.

La fuente normal del agua de repuesto es el suministro de agua potable municipal. Ésta es, generalmente, agua tratada que tiene una calidad uniforme y que se mantiene prácticamente igual día con día. Algunas otras fuentes de alimentación son pozos de agua, aguas superficiales o ríos, lagos y lagunas, que no son tratadas de igual forma que las municipales.

La uniformidad de la calidad del agua de repuesto es muy importante para diseñar y operar con confiabilidad el sistema de tratamiento de agua de la caldera.

El tratamiento del agua de repuesto varía según las necesidades de cada instalación en particular y se pueden utilizar varios procesos para mejorar su calidad, entre los que se incluyen:

1. Ablandamiento mediante cal y bicarbonato de sodio
2. Intercambio de iones (general)
3. Intercambio de iones de sodio
4. Intercambio de iones de hidrógeno
5. Deionización
6. Dealcalinización
7. Destilación
8. Ósmosis inversa
9. Electrodialisis

El agua de repuesto se combina con el condensado del vapor que regresa del sistema de distribución, llamado retorno de condensado, para formar el agua de alimentación a la caldera. Ésta es deaereada para eliminar los gases no condensables y tratada con los eliminadores de oxígeno.

6.2 Tratamiento interno del agua

El mejor método es la eliminación de los materiales que producen la incrustación del agua de repuesto, reduciendo la dureza de ésta a valores cercanos a cero.

El tratamiento interno del agua se realiza mediante la adición de los químicos requeridos para prevenir la incrustación derivada de los materiales que no fueron eliminados por el tratamiento externo al agua de repuesto y la formación de depósitos de lodo por la precipitación de estos materiales.

6.3 Formación de depósitos

Existen dos causas principales por las que se forman los depósitos en las calderas:

1. **Incrustación:** las altas temperaturas en el interior de las calderas causan la precipitación de los compuestos donde la solubilidad es inversamente proporcional a la temperatura de solución.
2. **Lodos:** la concentración en el agua de la caldera causa que ciertos compuestos, a una temperatura dada, excedan su máxima solubilidad, forzando la precipitación de éstos en las áreas de la caldera donde la concentración es más alta.

Es una descripción muy simplificada de los mecanismos involucrados en la formación de depósitos, sin embargo, incluye los factores esenciales para su formación.

6.4 Incrustación

Se produce por el crecimiento de cristales sobre el lado de agua de las superficies de transferencia de calor y es más severa en las zonas donde ocurre la máxima transferencia de calor. La figura 6.1 muestra la relación existente entre la eficiencia de la transferencia de calor y el espesor de la incrustación.

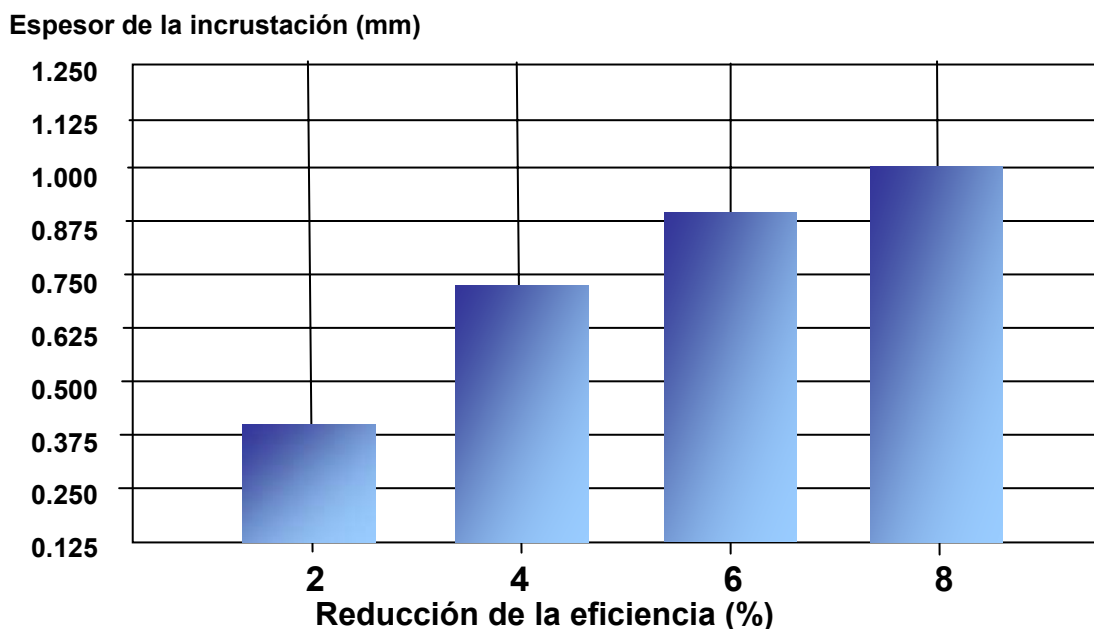


Figura 6.1 Reducción de la eficiencia de la transferencia de calor vs. espesor de la incrustación.

6.5 Problemas causados por la incrustación

Las calderas de vapor utilizan una fuente de calor externo que normalmente se encuentra a una temperatura mucho mayor que la del agua en el interior de la caldera. Los tubos o placas metálicas que forman las superficies de intercambio de calor se mantienen a una temperatura menor que la del hogar, ya que son enfriados por el agua de la caldera. Al formarse los depósitos, éstos actúan como un material aislante entre el agua y el metal, lo que da como resultado el que los tubos y/o placas tengan que trabajar sometidos a una temperatura mayor. A mayor espesor del depósito o incrustación, el efecto aislante es también mayor, y los tubos y placas tienen que soportar temperaturas más altas. A temperaturas muy altas, el metal con que están hechos los tubos o placas pueden perder su resistencia a la tensión y romperse.

6.5.1 Lodos

Los lodos son precipitados directamente en el cuerpo principal de la caldera cuando la solubilidad de los sólidos disueltos es excedida. Estos depósitos ocurren, normalmente, cuando existe la presencia de materiales aglutinantes o la circulación del agua es tal que permite que se asienten en puntos calientes y se endurezcan sobre éstos.

6.5.2 Sólidos totales en suspensión (TSD)

El total de sólidos disueltos en la caldera (TSD) es uno de los parámetros utilizados para controlar el programa de tratamiento de agua.

Con el agua de repuesto, continuamente se están añadiendo sólidos disueltos al agua de la caldera; éstos no son evaporados junto con el vapor y, como resultado de esto, los sólidos totales en suspensión aumentan entre más vapor se genera. El nivel de concentración de estos sólidos (TSD) es determinado por la cantidad de estas sales, que son eliminadas por la purga de la caldera; por esto, el control del nivel de TSD es crítico para la operación de la caldera. Si se reduce la purga de caldera, se tendrá una mejor eficiencia, pero el nivel de TSD aumentará y afectará su operación.

7 Purgas

7.1 Consecuencias por defecto de la purga

7.1.1 *Total de sólidos disueltos (TSD) muy alto*

- Corrosión de los metales de la caldera
- Se produce espumado y acarreos
- Se alteran las trayectorias de ebullición en los tubos y se provocan depósitos

7.1.2 *Alta cantidad de sólidos en suspensión y lodos*

- Los sólidos se depositan y endurecen (incrustación) sobre las superficies de transferencia de calor, causando la pérdida de eficiencia
- Se alteran las características de la ebullición
- Se ensucian internamente las calderas, lo que implica un alto costo por limpieza y mayor tiempo de paro del equipo
- Se absorben ciertos compuestos químicos, como el PO₄, que derivan en incrustaciones y pérdida de eficiencia

7.1.3 *Alta dureza y niveles de sales*

- Incrustación y pérdida de eficiencia

7.1.4 *Muy alta alcalinidad*

- Incrustación y pérdida de eficiencia

7.2 Conservación de energía mediante un control adecuado de la purga

La purga de caldera es un mecanismo para su operación limpia y segura, sin embargo, no debemos olvidar que el agua purgada que sale de la caldera lleva una cantidad considerable de energía. El ahorro de energía requiere que se mantenga la mayor cantidad de ciclos de concentración permitidos en el agua de la caldera; para lograr esto, es preciso sacrificar un poco el margen de seguridad y permitir se incremente en cierto grado la cantidad de sólidos disueltos, e instalar un buen sistema de control para asegurar que no se provocará un daño a la caldera como resultado de operar en estas condiciones.

En muchas instalaciones se pueden incrementar los ciclos de concentración, reduciendo la cantidad de purga, disminuyendo la concentración total de sólidos en el agua de alimentación o modificando el programa de tratamiento del agua al interior de la caldera.

Para reducir el contenido de sólidos en el agua de repuesto, es necesario cambiar la fuente de suministro de agua a la planta o modificar el programa de tratamiento de agua de suministro externo mediante la instalación de filtros, deionizadores o algún otro tipo de equipo de tratamiento previo.

7.3 Purgas de fondo

En muchas instalaciones, no obstante apegarse a un programa estricto de purgas de fondo, se tienen problemas por excesiva formación de lodos en el domo inferior. Esto puede ser debido a que es insuficiente el tiempo que se mantiene la válvula de purga abierta; en la práctica se ha demostrado que la purga de fondo es más efectiva si se realizan purgas más frecuentes y de corta duración (10 a 20 seg.) que purgas ocasionales de larga duración.

Los primeros segundos de la purga son los más efectivos. Si se mantiene la purga de fondo por un periodo largo, se crean problemas de turbulencia, que agitan los lodos depositados en el fondo y pueden ser arrastrados hacia los tubos de generación, donde se calientan y endurecen provocando incrustación.

Como se ha dicho, el total de sólidos disueltos se controla con una purga continua, típicamente en el domo de vapor. A continuación, en la Tabla 7.1 se dan los límites de conductividad y del TSD para calderas de vapor.

Presión de trabajo (kg/cm ²)	TSD máximo (ppm)	Conductividad máxima (µmho)
0 - 1	6,000	9,000
1.1 – 10.5	4,000	6,000
10.6 – 21	4,000	6,000
21.1 – 31.6	3,500	5,250
31.7 - 42.1	3,000	4,500
42.2 – 52.6	2,500	3,720
52.7 - MÁS	2,000	3,000

Tabla 7.1 Límites para los TSD y la conductividad en calderas de vapor

7.4 Cálculo de la purga

La cantidad de agua que se debe purgar es crítica para controlar el TSD en el agua de la caldera.

Consideraciones:

1. La cantidad de agua que se alimenta a la caldera debe ser igual a la de agua que se pierde.
2. Sea

A = Cantidad de agua de alimentación (kg/hr)

V = Cantidad de vapor generado (kg/hr)

$P =$ Cantidad de agua purgada (kg/hr)

Entonces: $A = V + P$

3. La cantidad de purga puede relacionarse con la cantidad de agua de alimentación utilizando los ciclos de concentración (C_c)

$$C_c = A / P$$

Donde:

$C_c =$ Ciclos de concentración

$A =$ Cantidad de agua de alimentación (kg/hr)

$P =$ Cantidad de agua purgada (kg/hr)

En la tabla 7.2 se muestran los valores sugeridos por la Asociación Americana de Fabricantes de Calderas (AMBA, por sus siglas en inglés) como límites de la composición del agua para obtener una buena calidad de vapor, para varias presiones de trabajo.

Presión en la caldera (kg/cm ²)	Total de sólidos disueltos (ppm)	Alcalinidad (ppm)	Sólidos en suspensión (ppm)	Sílice (ppm)
0 - 20	3,500	700	300	125
21 - 30	3,000	600	250	90
31 - 42	2,500	500	150	50
43 - 52	2,000	400	100	35
53 - 63	1,500	300	60	20
64 - 70	1,250	250	40	8.0
71 - 105	1,000	200	20	2.5
106 - 140	750	150	10	1.0
más de 140	500	100	5	0.5

Tabla 7.2 Límites de composición del agua de caldera para varias presiones de trabajo.- AMBA

Agua de alimentación

Presión en domo vapor (kg/cm ²)	Hierro (ppm Fe)	Cobre (ppm Cu)	Dureza total (ppmCaCO ₃)	Sílice (ppm SiO ₃)	Alcalinidad total (ppm CaCO ₃)	Conductancia específica (μmho/cm)
0 - 20	0.100	0.050	0.300	150	350	3500
21 - 30	0.050	0.025	0.300	90	300	3000
31 - 42	0.030	0.020	0.200	40	250	2500
43 - 52	0.025	0.020	0.200	30	200	2000
53 - 63	0.020	0.015	0.100	20	150	1500
64 - 70	0.020	0.015	0.050	8	100	1000
71 - 105	0.010	0.010	ND	2	NS	150
106 - 140	0.010	0.010	ND	1	NS	100

Tabla 7.3 Límites de contenido de elementos en agua de alimentación. (ASME, Comité de investigación). NS: No especificado - ND: no detectable

8 Anexo

8.1 Potencial de hidrógeno (pH)

8.1.1 Generalidades

En 1909, el químico danés Sorensen definió el potencial hidrógeno (pH) como el logaritmo negativo de la concentración molar (más exactamente de la actividad molar) de los iones hidrógeno. Esto es:

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Desde entonces, el término pH ha sido universalmente utilizado por la facilidad de su uso, evitando así el manejo de cifras largas y complejas. Por ejemplo, una concentración de $[\text{H}^+] = 1 \times 10^{-8} \text{ M}$ (0.00000001) es simplemente un pH de 8 ya que : $\text{pH} = -\log[10^{-8}] = 8$.

<p>Más básico</p> <p>↑</p> <p>→ Punto de neutro</p> <p>↓</p> <p>Más ácido</p>		pH	Conc. H^+	Conc. OH^-	pOH
		14	1×10^{-14}	1×10^0	0
	NaOH, 0.1 M	13	1×10^{-13}	1×10^{-1}	1
	Blanquedor casero	12	1×10^{-12}	1×10^{-2}	2
	Amoniaco casero	11	1×10^{-11}	1×10^{-3}	3
	Agua de cal	10	1×10^{-10}	1×10^{-4}	4
	Leche de magnesia	9	1×10^{-9}	1×10^{-5}	5
	Borax	8	1×10^{-8}	1×10^{-6}	6
	Clara de huevo, agua de mar	7	1×10^{-7}	1×10^{-7}	7
	Sangre humana, lágrimas	6	1×10^{-6}	1×10^{-8}	8
	Lluvia	5	1×10^{-5}	1×10^{-9}	9
	Café negro	4	1×10^{-4}	1×10^{-10}	10
	Plátanos, tomates	3	1×10^{-3}	1×10^{-11}	11
	Vino	2	1×10^{-2}	1×10^{-12}	12
	CocaCola, vinagre	1	1×10^{-1}	1×10^{-13}	13
	Jugo de limón	0	1×10^0	1×10^{-14}	14
	Jugo gástrico				

RELACIÓN DE pH, pOH y Concentración de H^+ y OH^-

8.1.2 Principios

La determinación del pH en el agua es una medida de la tendencia de su acidez o de su alcalinidad. No mide el valor de la acidez o alcalinidad

Un pH menor de 7.0 indica una tendencia hacia la acidez, mientras que un valor mayor de 7.0 muestra una tendencia hacia lo alcalino.

La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 4 y 9, aunque muchas de ellas tienen un pH ligeramente básico, debido a la presencia de carbonatos y bicarbonatos. Un pH muy ácido o muy alcalino puede ser indicio de una contaminación industrial.

El valor del pH en el agua es utilizado también cuando nos interesa conocer su tendencia corrosiva o incrustante, así como en las plantas de tratamiento de agua.

Impurezas más comunes encontradas en aguas de alimentación			
Nombre	Fórmula	Nombre común	Efecto que provoca
Bicarbonato de calcio	$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	-----	Incrustación
Bicarbonato de magnesio	$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	-----	Incrustación Corrosión
Bicarbonato de sodio	$\text{Na}(\text{HCO}_3)_2$	-----	Espumado
Carbonato de calcio	CaCO_3	Caliza o calcita	Incrustación
Carbonato de sodio	Na_2CO_3	Sosa común, Soda ash	Alcalinidad
Cloruro de calcio	CaCl_2	-----	Corrosión
Cloruro de magnesio	MgCl_2	-----	Corrosión
Cloruro de sodio	NaCl	Sal común	Electrólisis
Dióxido de silicio	SiO_4	Sílice	Incrustación
Hidróxido de magnesio	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	-----	Incrustación
Hidróxido de sodio	NaOH	Sosa cáustica	Cristalización
Sulfato de calcio	CaSO_4	Yeso de París	Incrustación
Sulfato de magnesio	MgSO_4	Sales Epsom	Incrustación
Sulfato de sodio	Na_2SO_4	Sales Glauber	Incrustación

Tabla 8.1 Impurezas más comunes encontradas en aguas de alimentación