

# Facultad de Ingeniería

Universidad de la República

---

Tratamiento de aguas para caldera

Mauricio Ohanian

mohanian@fing.edu.uy

**Junio 2022**



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# Bibliografía recomendada

- The Nalco Water Handbook, Nalco Company, D. J. Flynn, Ed. (2011)
- The Nalco Guide to Boiler Failure Analysis, Nalco Company, James J. Dillon, Paul B. Desch, Tammy S. Lai, Daniel J. Flynn Editor (2011)

# Contenido

- Problemas asociados al agua de calderas
- Fuentes de agua
- El agua y sus impurezas
- Requerimientos de calidad del agua para calderas
- Pretratamiento del agua de reposición
- Tratamiento interno

# *¿Por qué tratar el agua de caldera?*



- Fallas del equipo, roturas
- Reposición prematura (equipos y cañerías)
- Alto mantenimiento
- Pérdida de eficiencia, pérdida de lucro cesante
- Accidentes

Patologías a prevenir

- INCRUSTACIONES
- CORROSION
- ARRASTRE

¿qué implica el  
concepto de  
control?

Todos los sistemas de generación y distribución de vapor requieren la aplicación de algún tipo de control del lado agua/vapor, de manera de alcanzar objetivos de seguridad, operativos y económicos

¿en qué  
condiciones del  
sistema?

## GENERADORES de VAPOR

Texto Ordenado de  
Resoluciones de URSEA  
Versión marzo 2020

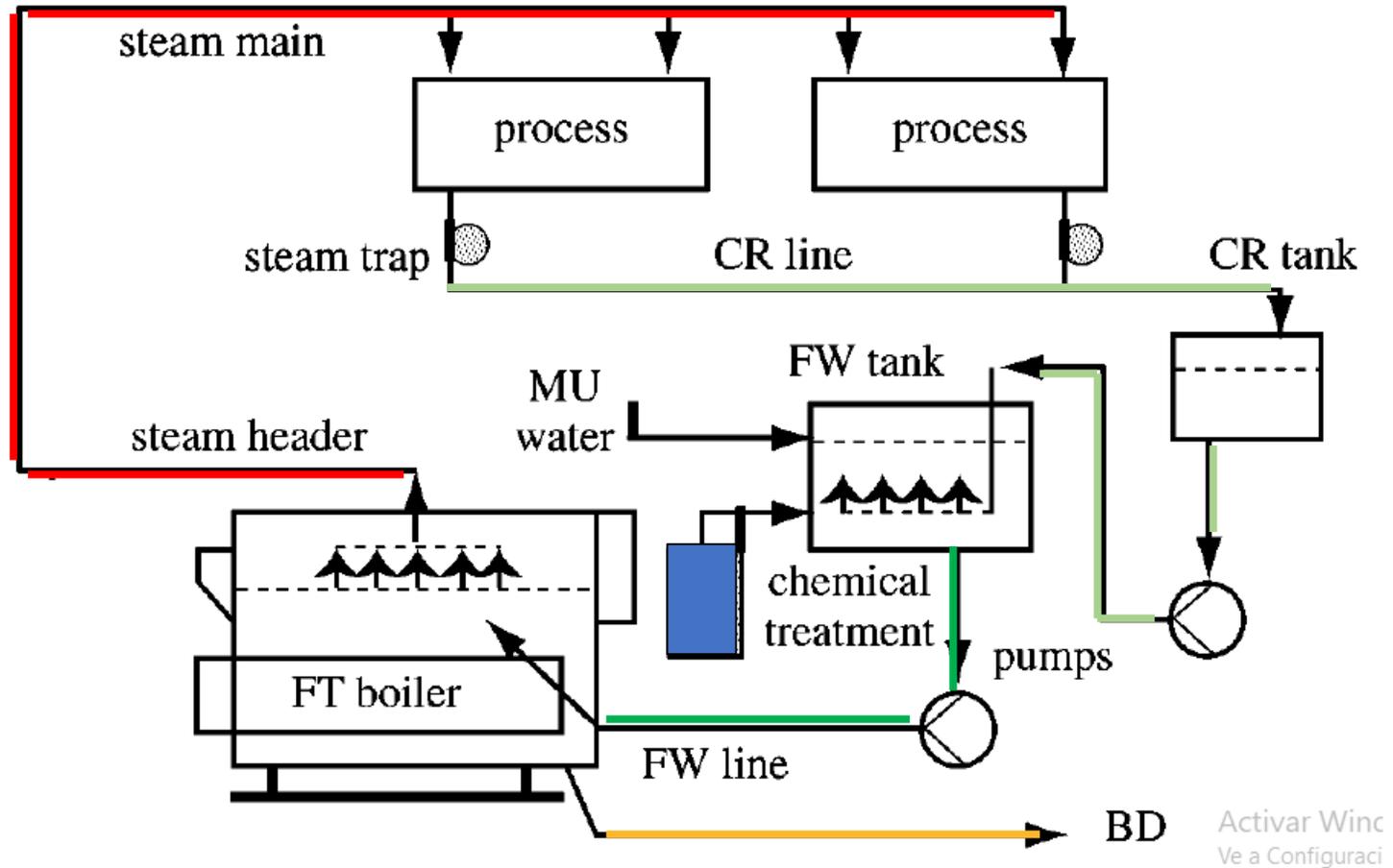
ACLARACIÓN: El presente documento constituye un texto que tiene como objeto mostrar de modo ordenado el conjunto de resoluciones aprobadas por la URSEA en materia de Generadores de Vapor. Tiene una finalidad meramente ilustrativa, contribuyendo a facilitar la comprensión de la regulación en la materia. No constituye una reglamentación, por lo que carece de efectos jurídicos vinculantes, debiendo estarse en todo caso a las resoluciones específicas dictadas por la URSEA. La consulta de los actos jurídicos específicos es ineludable en ese sentido.

[www.ursea.gub.uy](http://www.ursea.gub.uy)

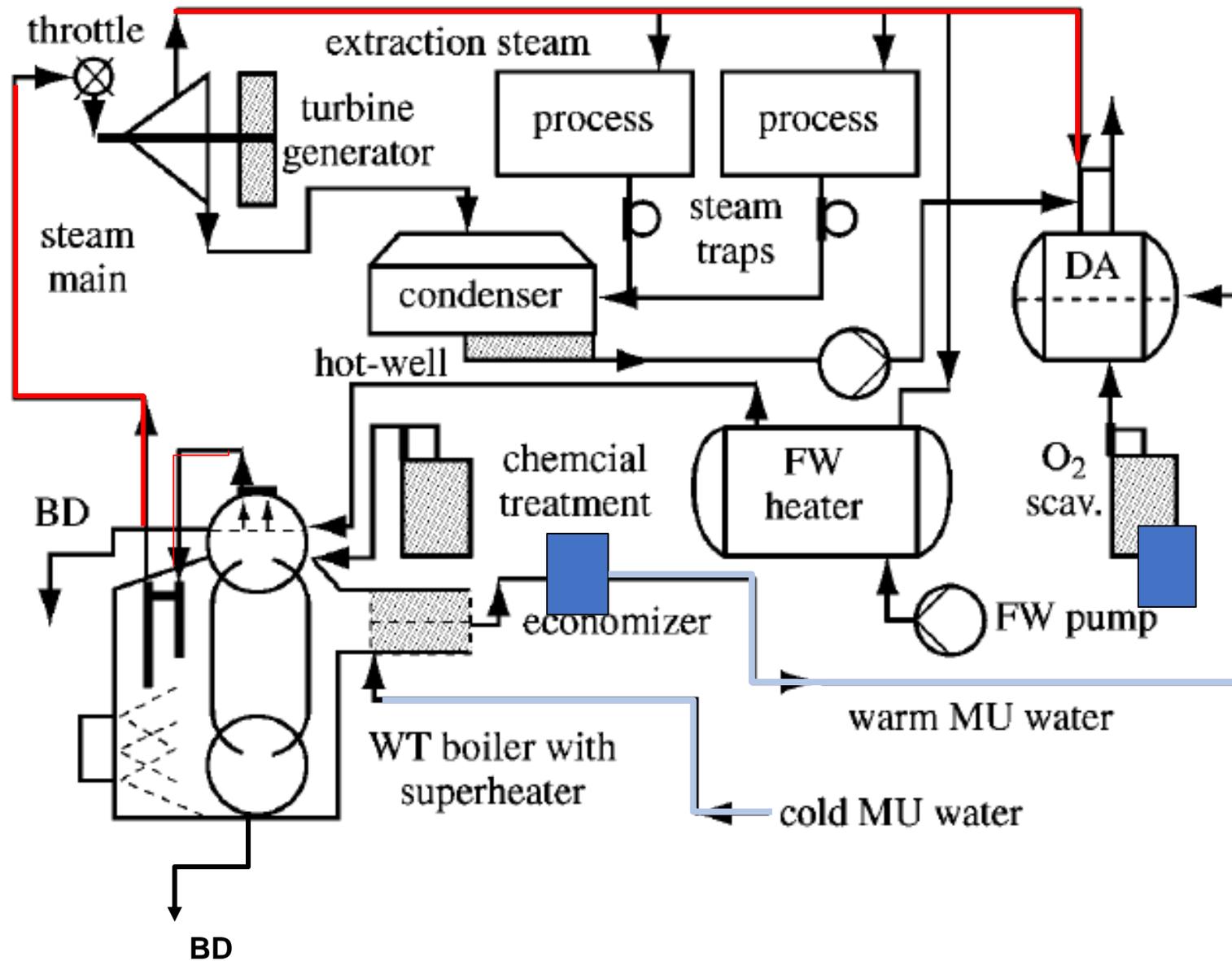
- q) Elaborar y hacer cumplir un Plan de Mantenimiento de cada Generador de Vapor de acuerdo con lo establecido por el fabricante, las buenas prácticas de la Ingeniería y lo establecido en el presente Reglamento.
- h) Elaborar y hacer cumplir un Plan de Mantenimiento de cada Generador de Vapor de acuerdo con lo establecido por el fabricante, las buenas prácticas de la Ingeniería, los requerimientos de las observaciones de los foguistas, Inspecciones rutinarias y lo establecido en el presente Reglamento.
- l) Contar con un programa de tratamiento de agua adecuado según lo recomendado por el fabricante del Generador de Vapor, los códigos y normas Internacionales correspondientes y las Instrucciones del Ingeniero Químico Responsable del mismo.
- j) Ejecutar las reparaciones y/o alteraciones requeridas en función de los resultados de Inspecciones rutinarias y/o de Integridad.
- k) Cumplir en tiempo y alcance con las Inspecciones que le correspondan a cada uno de los Generadores de Vapor que operen en su Instalación.
- l) Acondicionar los generadores de vapor y facilitar todo el apoyo logístico y técnico requerido para la realización de las Inspecciones de cualquier tipo o Estudios de Integridad que le correspondan a cada Generador de Vapor.

**Fuente: Artículo 1º Resolución URSEA Nº 61/016 de 19/4/2016, publicada D.O. 29/04/2016.**

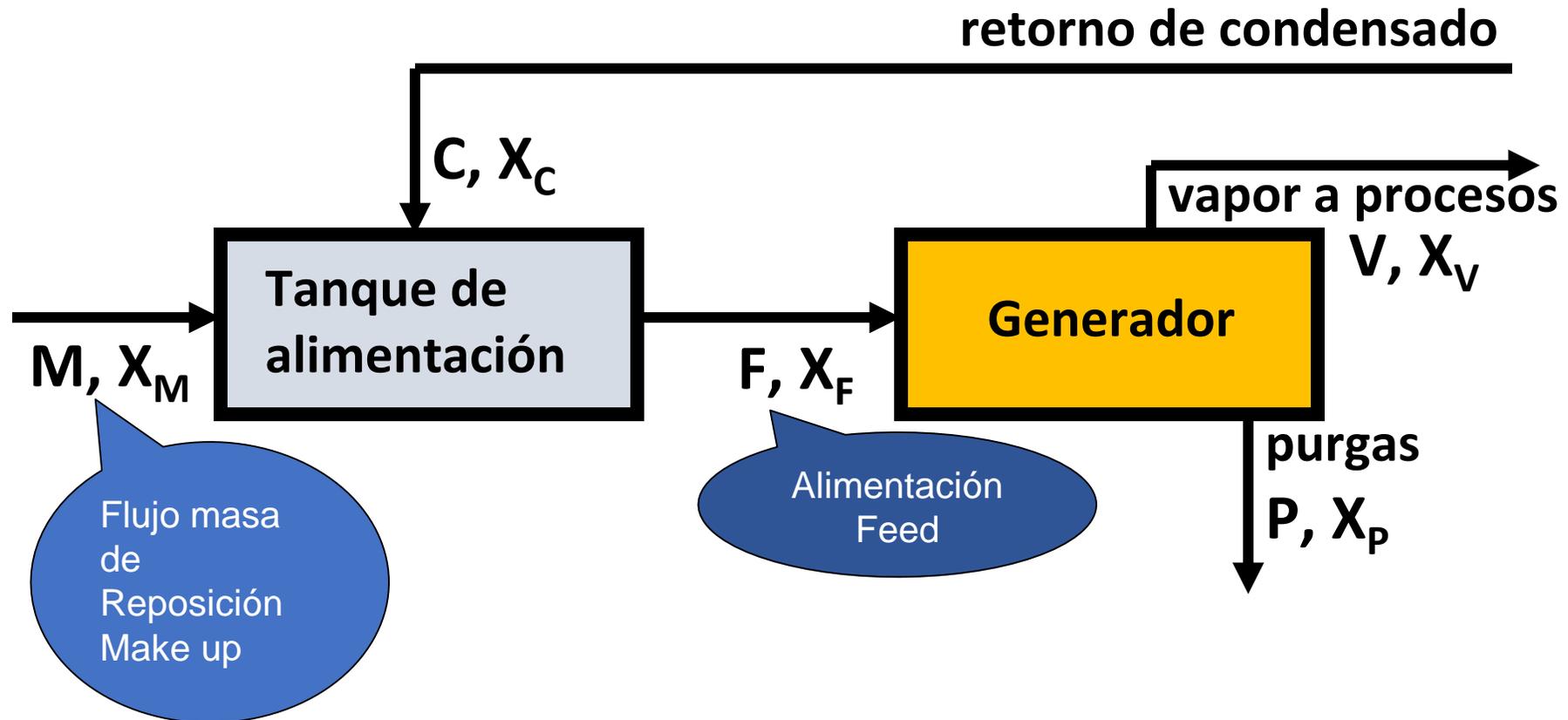
Ciclo de agua/ vapor en una planta industrial



Ciclo de agua/ vapor en una central de generación



# Balance de masa en el sistema



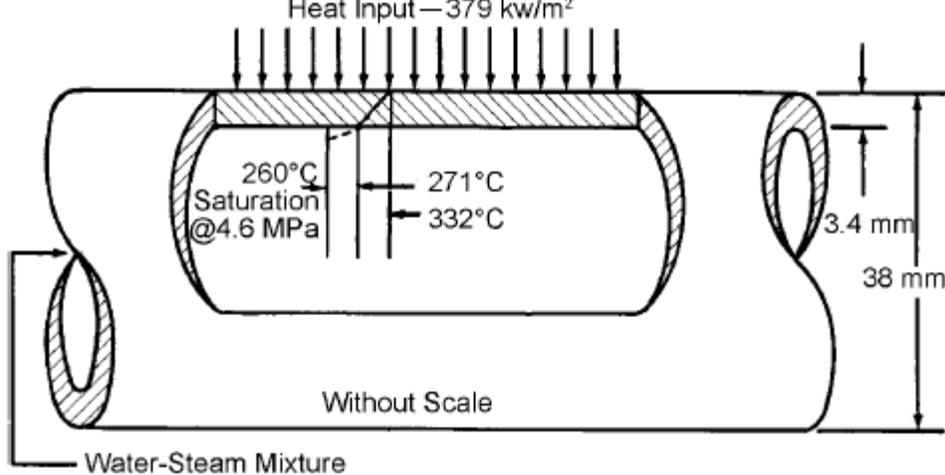


## Problemas asociados al agua de calderas

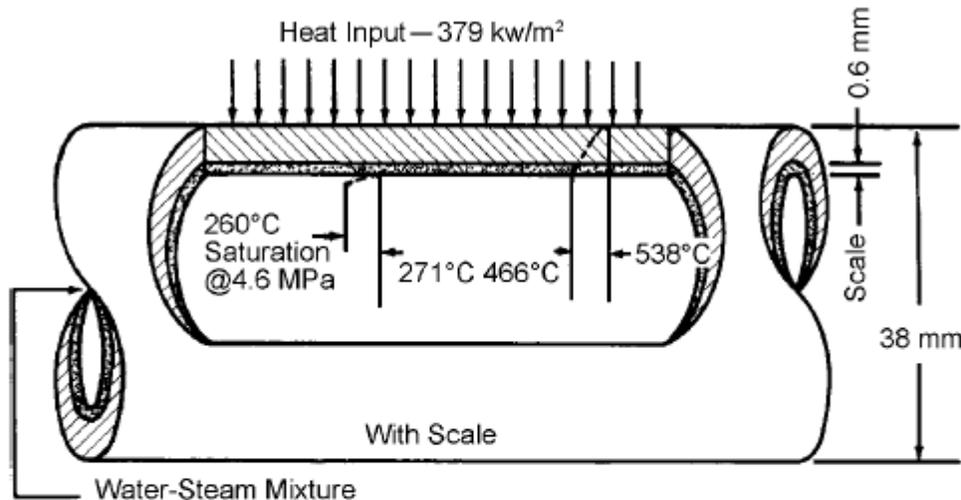
# Problemas asociados al agua de calderas: Incrustación y Deposición

- ***Incrustaciones***: Precipitación de sales en la parte interna de la caldera cuando su concentración excede los límites de solubilidad
- Pueden ser:
  - ***Cristalinas***: Precipitación lenta, directamente sobre la pared del tubo
  - ***Amorfas***: Precipitados previamente formados, en forma de barros, que se van acumulando en la pared del tubo

# Efectos de la presencia de incrustaciones



Temp Drop across Water Film = 11°C  
Temp Drop across Tube Wall = 61°C



Temp Drop across Water Film = 11°C  
Temp Drop across Internal Scale = 195°C  
Temp Drop across Tube Wall = 72°C

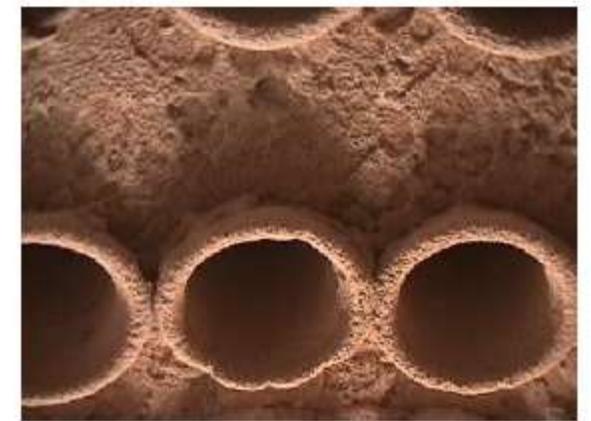
Assumed  $\text{CaSO}_4$  Scale 0.61 mm  
Thermal Conductivity 1.44 W/[m•K]

Maximum Tube Temp (538°C) is above Allowable  
Oxidation Temp Limit for SA-210 Carbon Steel

- Reducción de la eficiencia (mayor consumo combustible, incremento emisiones de GEI)
- Riesgo de fallas en tubos por sobrecalentamiento del metal
- Deterioro de la integridad del sistema de generación de vapor, reducción de la vida útil de equipos, incremento de riesgos operativos, paradas no programadas
- Disminución de la sección de flujo (disminuye el flujo)

(Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

# Incrustaciones



Deterioro del material debido a su exposición a altas temperaturas durante tiempos prolongados.

- No hay disminución notoria de espesor.
- Genera abombamientos.
- Cambios a nivel de microestructura
- Genera falla masiva.



# Problemas asociados al agua de calderas:

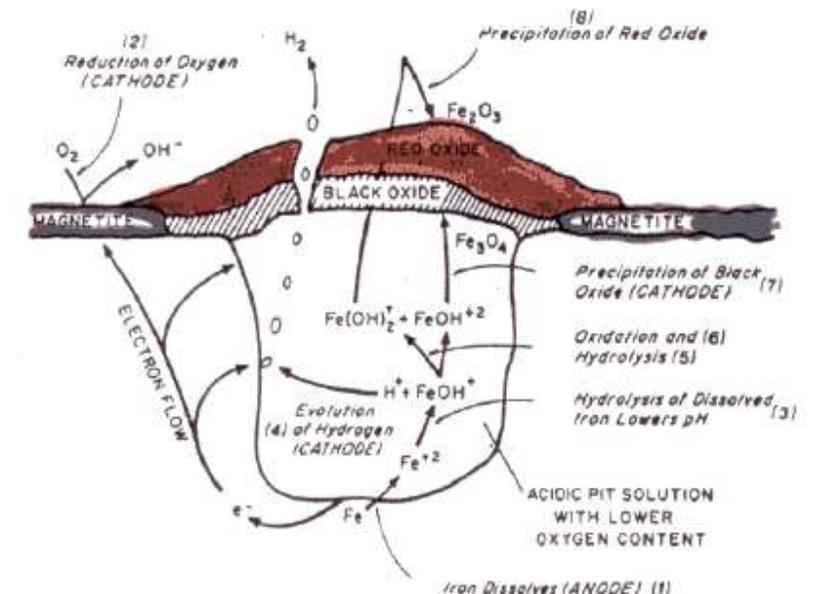
## Corrosión

- **Corrosión:** es una reacción interfacial irreversible de un material con el ambiente, que resulta en el consumo del material o la disolución de este en el ambiente
- Clasificación por morfología de ataque:
  - **Corrosión generalizada (uniforme):** Se produce de forma homogénea sobre toda la superficie del metal, generando una **reducción del espesor uniforme**
  - **Corrosión localizada:** Se presenta en **puntos concretos del material** y puede perforar el metal en tiempos relativamente cortos
- Las causas de corrosión en calderas son, mayoritariamente:
  - **presencia de  $O_2$  disuelto**
  - **pH bajos**
  - **pH muy altos**

# Problemas asociados al agua de calderas: Corrosión

## **Corrosión por oxígeno o pitting**

- Reacción del **oxígeno disuelto** en el agua con el metal de la caldera, provocando su disolución.
- Resulta en tubérculos formados sobre la zona de corrosión
- Especialmente en calderas fuera de operación



# Problemas asociados al agua de calderas: Corrosión

## *Corrosión por pH*

- El acero al carbono se utiliza en la construcción de sistemas de generación de vapor
- A alta temperatura en condiciones alcalinas reductoras se forma una **delgada capa protectora** de **magnetita** ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) en la superficie que protege el metal del ambiente acuoso corrosivo (pasivado)
- La **estabilidad de la capa de magnetita** formada en la caldera **depende del pH del agua**. Puede mantener la estabilidad y protección máxima a pH entre 9-12

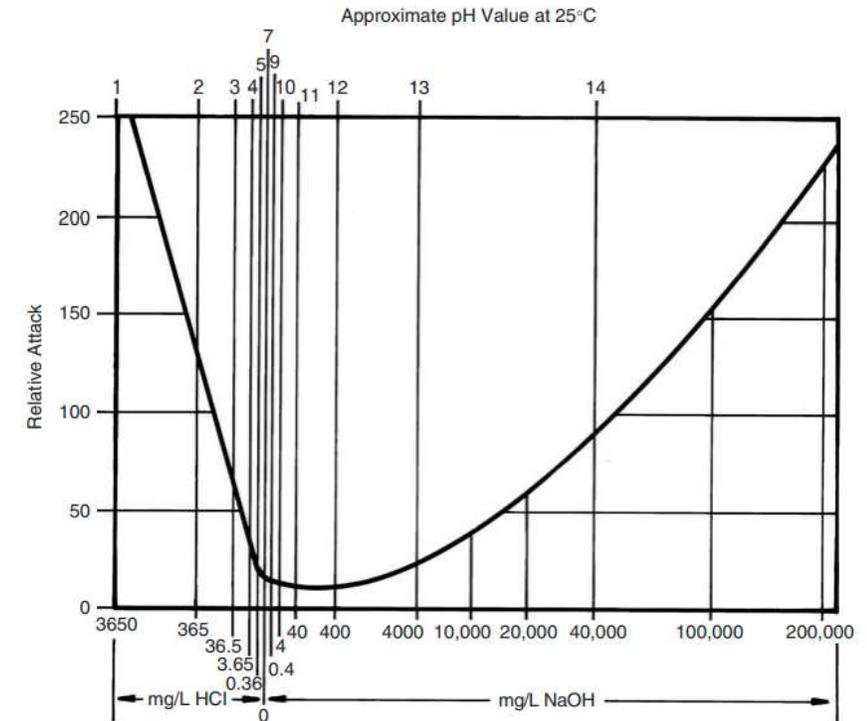


Figura 2: Tasa de corrosión del acero en función del pH del agua (Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

# Problemas asociados al agua de calderas: Corrosión

## ***Corrosión por bajo pH***

- Este tipo de corrosión no es probable en calderas en operación, aparece en sistemas de operación intermitente o en tanques de alimentación



Corrosión ácida durante limpieza química



Corrosión ácida durante servicio

# Problemas asociados al agua de calderas: Corrosión



## ***Corrosión por muy alto pH***

- Los depósitos porosos en la superficie del tubo permiten que el agua de la caldera que contiene  $\text{OH}^-$  pase a través de la interface tubo/depósito
- El flujo de calor vaporiza el agua y concentra el  $\text{OH}^-$ , el vapor escapa del depósito y más agua de la caldera ingresa
- La solución concentrada en  $\text{OH}^-$  disuelve rápidamente el film de magnetita
- El acero expuesto reacciona con el agua en el intento de formar de nuevo la magnetita
- Mientras exista un ***exceso localizado de  $\text{OH}^-$*** , el ciclo de ***disolución*** y nueva formación de ***magnetita*** continúa, junto con la ***pérdida de metal*** del tubo en el área

# Problemas asociados al uso del agua en calderas: Corrosión de líneas de condensado

- El condensado formado a partir de vapor tiene habitualmente una conductividad muy baja y un pH de 6,5 a 7,0. En estas condiciones el condensado es agresivo para la mayoría de los metales
- Cantidades muy pequeñas de **contaminantes en el vapor** pueden **disolverse** al condensar el agua **disminuyendo aún más el pH** y acelerando la velocidad de corrosión de la mayoría de metales
- Los contaminantes más corrosivos son el **CO<sub>2</sub> y el O<sub>2</sub>**
- El **NH<sub>3</sub> y O<sub>2</sub>** son la mayor amenaza para las **aleaciones de cobre**

# Problemas asociados al uso del agua en calderas: Arrastre

- **Arrastre:** Cualquier contaminante del vapor que abandona el domo junto con este
- Puede ser **sólido, líquido o gas**
  - \* sólidos: sólidos en suspensión, que se formaron por precipitación de sales, en forma de barros.
  - \* líquidos: agua líquida que sale del domo como humedad en el vapor. Ésta, a su vez, arrastra sólidos disueltos.
  - \* gases: O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>
- **Causas** de arrastre:
  - Elevada alcalinidad
  - Elevados TDS
  - Incremento rápido de la demanda
  - Operación superior a la capacidad de diseño
  - Contaminación del agua por orgánicos



Buscar

[https://www.youtube.com/watch?v=z3mQq\\_mrcBg](https://www.youtube.com/watch?v=z3mQq_mrcBg)





## Fuentes de agua

# Fuentes de agua: Ciclo hidrológico del agua

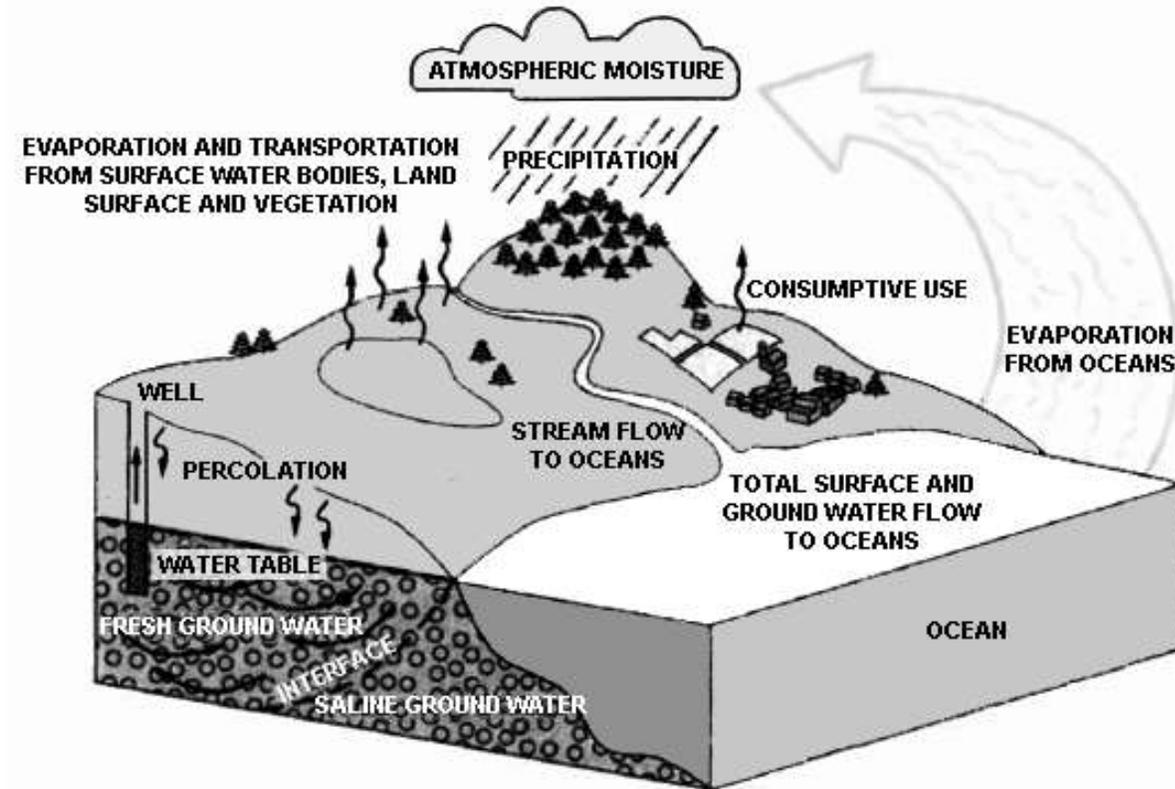


Figura 4: Ciclo hidrológico del agua (Fuente: Handbook of Industrial Water Treatment, SUEZ)

# Fuentes de agua: Agua superficial vs. Agua subterránea

	Fuente de Agua	
Parámetro	<i><b>SUPERFICIAL</b></i>	<i><b>SUBTERRÁNEA</b></i>
Temperatura	Variación estacional	Constante
Sólidos Disueltos Totales (TDS)	Inferior	Superior
Gases Disueltos	Presentes, agua en continuo contacto con el aire	Pueden estar presentes CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S en concentración superior a la saturación
Alcalinidad y pH	Variación estacional debido a precipitaciones y corrientes	Constantes
Turbidez	Posibilidad de elevados sólidos suspendidos y turbidez con variación estacional con lluvia y corrientes	Turbidez generalmente baja



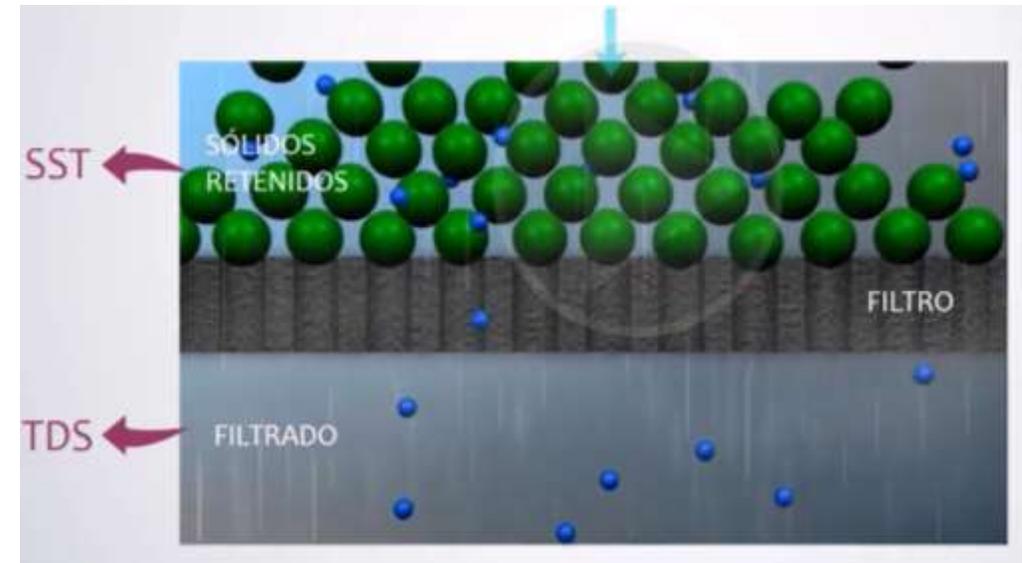
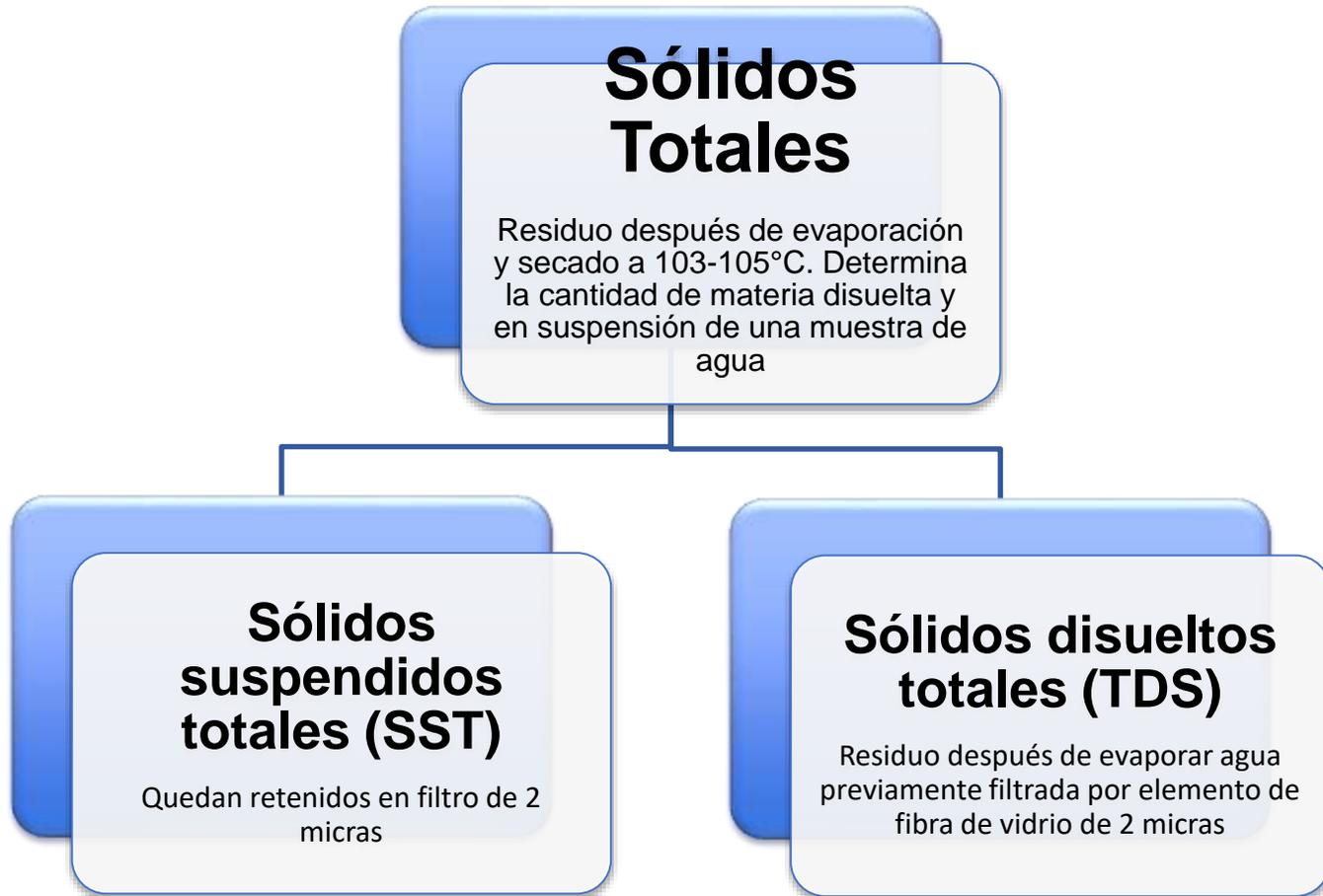
# El agua y sus impurezas

# El agua y sus impurezas: Soluciones vs Suspensiones

- Impurezas ***solubles*** (sales inorgánicas, compuestos orgánicos)
- Impurezas ***suspendidas*** (partículas de lodo, suciedad, óxidos metálicos, material orgánico, MO)

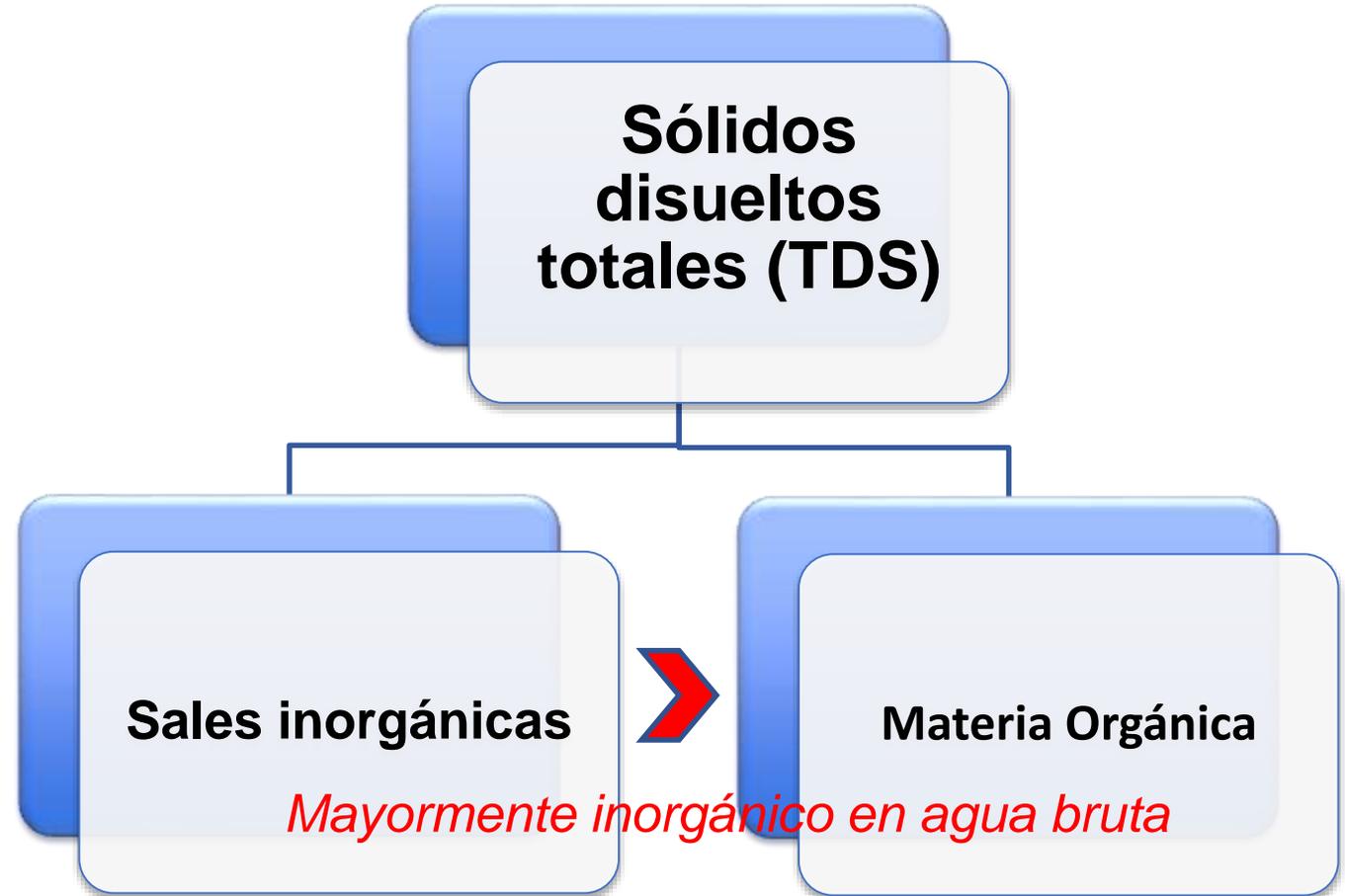


# El agua y sus impurezas: Sólidos en agua



# El agua y sus impurezas: Sólidos disueltos en agua

La **conductividad** es una estimación de los sólidos disueltos



# El agua y sus impurezas: Sólidos en agua

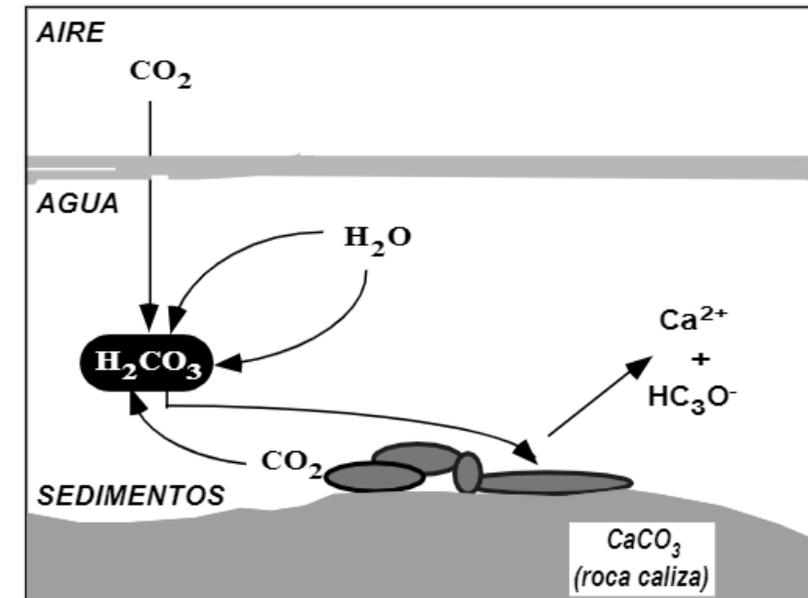
- Importancia de su control en sistemas de generación de vapor:
  - SST generarán **taponamientos** de los sistemas de pretratamiento de agua
  - Altas concentraciones de TDS favorecen el espumado y así el **arrastre** de gotas con el vapor, disminuyendo su pureza
  - Altas concentraciones de TDS por su concentración en caldera generarán problemas de **corrosión** e **incrustación**

# El agua y sus impurezas: Alcalinidad

- Capacidad que tiene un agua de **amortiguar un pH** ante el agregado de ácidos
- Principal forma que tienen las aguas naturales de mantener su pH



pH=6.5



# El agua y sus impurezas: Alcalinidad

- Las aguas naturales contienen disueltas diversas sales que le confieren su alcalinidad
- Aniones: Cloruros ( $\text{Cl}^-$ ); Sulfatos ( $\text{SO}_4^{2-}$ ); Nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ); Silicatos ( $\text{SiO}_3^-$ ); **Carbonatos ( $\text{CO}_3^{2-}$ ); Bicarbonatos ( $\text{CO}_3\text{H}^-$ )**
- Principales aniones: Carbonatos y Bicarbonatos. En menor medida  $\text{OH}^-$

# El agua y sus impurezas: Alcalinidad

- Importancia de su control en calderas:
  - Formación de *incrustaciones*
  - La alcalinidad reacciona en la caldera formando  $\text{CO}_2$  que se volatiliza y se transporta con el vapor. Al condensar este, el  $\text{CO}_2$  se disuelve en el agua formando  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , bajando el pH y favoreciendo reacciones de *corrosión*
  - Altas concentraciones de alcalinidad favorecen el espumado y así el *arrastre* de gotas con el vapor, disminuyendo su pureza

# El agua y sus impurezas: Dureza

- Suma de cationes ***Calcio ( $Ca^{+2}$ )*** y ***Magnesio ( $Mg^{+2}$ )*** en el agua
- ***Solubilidad*** de las sales ***decrece*** con el ***aumento*** de ***temperatura***
- El agua de alimentación eleva su temperatura en la caldera y se concentra, formando ***incrustaciones*** cuando se excede la solubilidad de las sales
- La precipitación ocurre generalmente en sistemas de alimentación y en calderas de baja presión sin pretratamiento del agua o tratada en ablandadores mal mantenidos

# Problemas asociados al uso del agua en calderas: Dureza

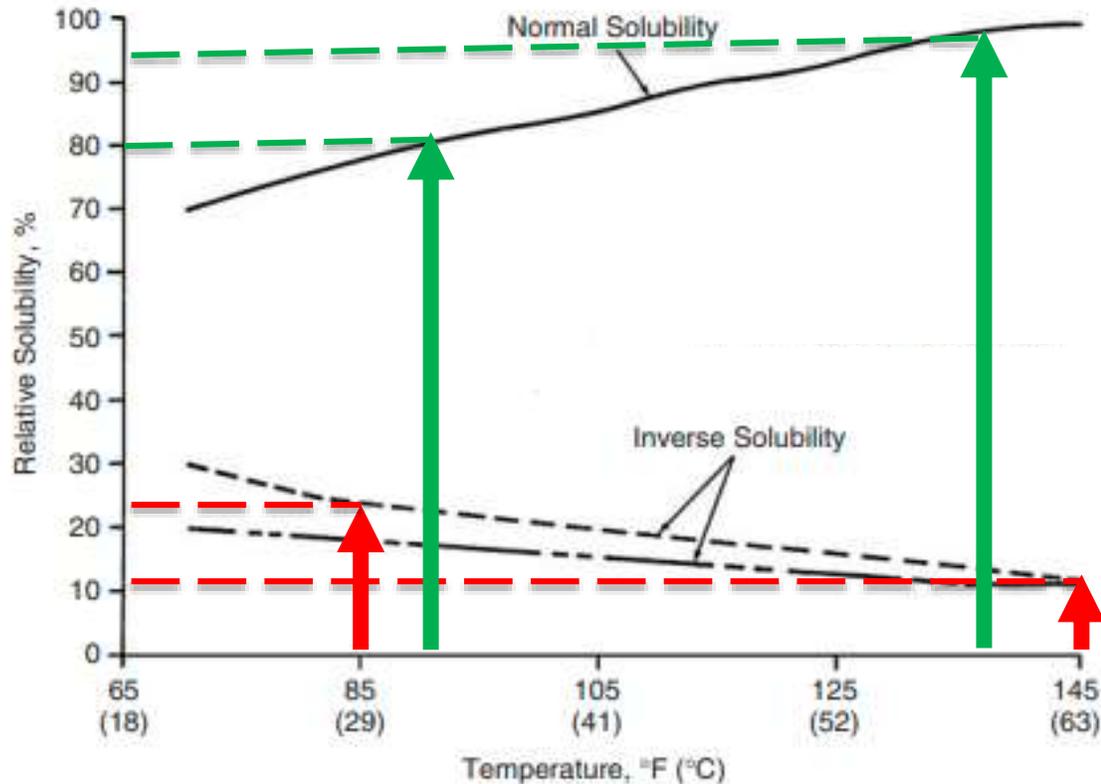


Figura 5 : Efecto de la T en la solubilidad de compuestos (Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

Compound	Solubility (g/L as CaCO <sub>3</sub> )	
	32°F (0°C)	212°F (100°C)
<b>Calcium</b>		
Bicarbonate	1.6	decomposes
Carbonate	0.015	0.013
Sulfate	1.29	1.25
<b>Magnesium</b>		
Bicarbonate	37.1	decomposes
Carbonate	0.1	0.075
Sulfate	170	356
<b>Sodium</b>		
Bicarbonate	38.7	decomposes
Carbonate	61.4	290
Chloride	225	243
Hydroxide	370	970
Sulfate	33.6	210

Figura 6 : Efecto de la T en la solubilidad de algunas sales (Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

# El agua y sus impurezas: Gases Disueltos

- ***Gases disueltos*** presentes porque el agua está continuamente en contacto con el aire
- Causan muchos problemas de ***corrosión***:
  - Pitting (corrosión localizada) por presencia de  $O_2$
  - Corrosión por  $CO_2$  en sistemas de condensado
  - Ataque a accesorios de cobre o bronce por  $NH_3$  en presencia de  $O_2$
  - Productos de corrosión generan depósitos en las superficies de intercambio de calor

# El agua y sus impurezas: Gases Disueltos

- **Solubilidad** de cualquier gas en un líquido es **directamente proporcional** a la **presión parcial del gas en la superficie** del líquido (Ley de Henry)  $C_A = cteP_A$

$C_A$ : Concentración del gas A en la solución

$P_A$ : Presión parcial del gas A sobre la superficie de la solución

- **Disminuye** con el **aumento de la temperatura** del líquido

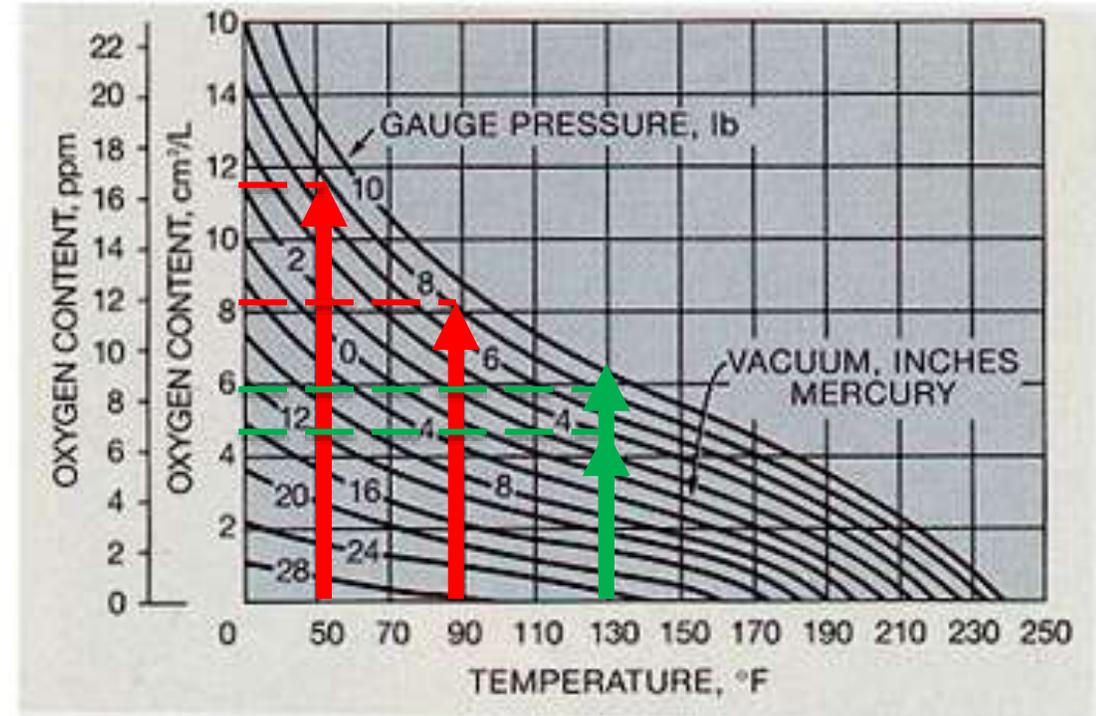


Figura 7: Solubilidad del O<sub>2</sub> vs. T y P (Fuente: Handbook of Industrial Water Treatment, SUEZ)

# El agua y sus impurezas: Gases Disueltos

- Usualmente el agua de alimentación es *desaireada* para *remoción* de la *mayor cantidad de gas* posible
- Estos sistemas se basan en equilibrios por lo que no pueden remover todo el oxígeno presente y se requiere dosificación química para reducir el O<sub>2</sub> residual restante
- Especial atención a este parámetro en *calderas fuera de operación*

# El agua y sus impurezas: Sílice

- El silicio (Si) constituye el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre.
- La degradación de las rocas da lugar al dióxido de silicio (sílice), que se encuentra en el agua natural
- Las ***incrustaciones*** ocurren en ***sistemas de baja presión*** donde la caldera trabaja con ***elevados ciclos de concentración***
- Puede formar varios tipos de depósitos como la ***sílice amorfa*** y el ***silicato de magnesio***

# El agua y sus impurezas: Sílice

- La ***sílice amorfa*** aparece como un depósito liso similar al vidrio de ***muy difícil remoción***
- El silicato de magnesio tiene una textura rugosa
- Ambas formas tienen propiedades aislantes
- Puede ***vaporizarse*** en la caldera y ser transportada con el vapor, ***precipitando*** en la superficie metálica de ***turbinas de vapor***
- Esto reduce la eficiencia del equipo pudiendo resultar en desequilibrio de los álabes
- Son depósitos de ***muy difícil remoción***



# El agua y sus impurezas: Impurezas del agua

Componente	Problemas asociados	Tratamiento
Turbidez	Imparte al agua un aspecto turbio. Depósitos en líneas de agua, equipos de proceso, etc. Interfiere en la mayoría de usos	Coagulación, decantación y filtración
Dureza	Principal fuente de incrustación en intercambiadores de calor, calderas, líneas, etc.	Ablandamiento, desmineralización, tratamiento interno del agua de caldera
Alcalinidad	Espuma y arrastre de sólidos en el vapor. Fragilización del acero de la caldera. Los bicarbonatos y carbonatos producen CO <sub>2</sub> en el vapor, una fuente de corrosión en las líneas de condensado	Ablandamiento por cal y soda, tratamiento ácido, ablandamiento por zeolita de hidrógeno, desmineralización, dealcalinización por intercambio iónico.
Dióxido de carbono	Corrosión en líneas de agua, especialmente en líneas de vapor y condensado	Aireación, desaireación, neutralización con álcalis
pH	pH varía de acuerdo a los constituyentes ácidos o alcalinos en el agua. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH entre 6-8.	Puede aumentarse con álcalis o disminuirse con ácidos.

**Tabla 1: Impurezas comunes en el agua fresca (Fuente: Handbook of Industrial Water Treatment, SUEZ)**

# El agua y sus impurezas: Impurezas del agua II

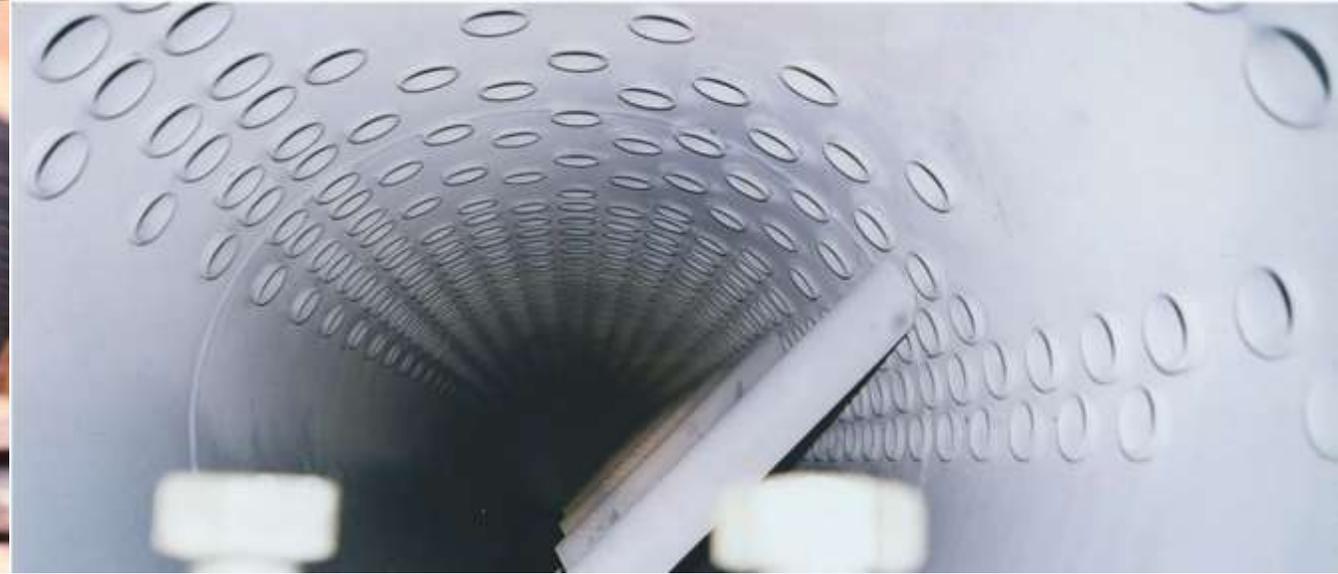
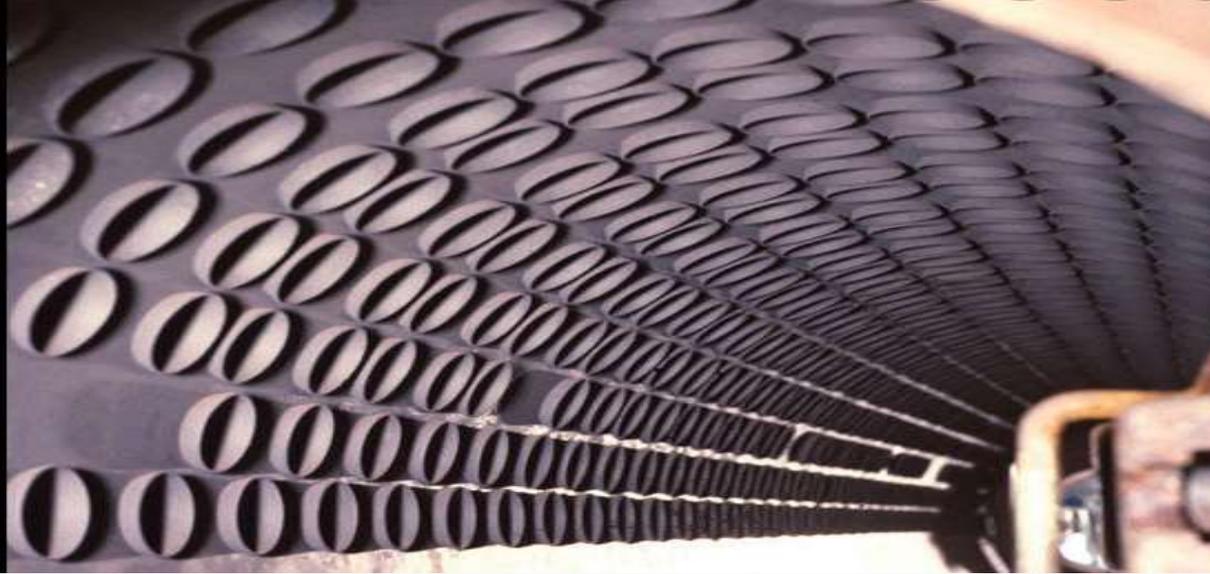
Componente	Problemas asociados	Tratamiento
Sulfato	Aumenta el contenido de sólidos del agua pero por si mismo en general no es significativo. Se combina con el calcio formando incrustación por sulfato de calcio.	Desmineralización
Cloruro	Aumenta el contenido de sólidos y aumenta el carácter corrosivo del agua	Desmineralización
Sodio	Aumenta el contenido de sólidos del agua, Cuando es combinado con OH-, causa corrosión en calderas, bajo determinadas condiciones	Desmineralización
Sílice	Incrustación en calderas y sistemas de enfriamiento. Depósitos insolubles en los álabes de las turbinas debido a la vaporización de la sílice	Desmineralización
Hierro	Fuente de depósitos en líneas de agua, calderas.	Aireación, coagulación, filtración, ablandamiento por cal, intercambio iónico
Aluminio	Generalmente presente por arrastre de flóculos del clarificadores, Puede contribuir con incrustaciones complejas de la caldera.	Mejor operación del clarificador y filtro

**Tabla 1: Impurezas comunes en el agua fresca (Fuente: Handbook of Industrial Water Treatment, SUEZ)**

# El agua y sus impurezas: Impurezas del agua III

Componente	Problemas asociados	Tratamiento
Sólidos disueltos	Refiere al total de la materia disuelta, determinado por evaporación. Altas concentraciones son perjudiciales porque afecta el proceso y causa formación de espuma en las calderas	Desmineralización
Sólidos suspendidos	Refiere a la materia no disuelta, determinada gravimétricamente. Causan depósitos en equipos de intercambio de calor, calderas, líneas de agua, etc.	Filtración, generalmente precedida por coagulación y decantación
Sólidos totales	Es la suma de sólidos disueltos y suspendidos, determinada gravimétricamente	Ver anteriores

**Tabla 1: Impurezas comunes en el agua fresca (Fuente: Handbook of Industrial Water Treatment, SUEZ)**



## Requerimientos de calidad del agua para calderas

- Varios estándares y normas que son una guía para definir los parámetros y rangos óptimos de trabajo en calderas de alta y baja presión
- ASME establece **pautas** categorizadas de acuerdo al rango de presión de operación por ser el factor principal que determina el tipo de tratamiento interno de la caldera, los ciclos de concentración de operación, la volatilidad de la sílice y la tendencia al arrastre

Pressure (psi)	Pressure (MPa)	Steam Saturation Temperature [°F (°C)]	Maximum (ppm)						Range (ppm)		
			Dissolved Solids	Suspended Solids*	Total Alkalinity <sup>†</sup>	Silica	Sludge Conditioners		Residual Phosphate	Residual Sulfite	Residual Hydrazine
							Natural	Synthetic			
100	0.69	328 (164)	5000	500	900	250	150	15	NR <sup>‡</sup>	90–100	NR
200	1.38	382 (194)	4000	350	800	200	150	15	40–50	80–90	NR
300	2.07	417 (214)	3500	300	700	175	100	15	30–40	60–70	NR
500	3.45	467 (241)	3000	60	600	40	70	15	25–30	45–60	NR
600	4.14	486 (252)	2500	50	500	35	70	10	20–25	30–45	NR
750	5.17	510 (266)	2000	40	300	30	NR	10	15–20	25–30	NR
900	6.21	532 (278)	1000	20	200	20	NR	5	10–15	15–20	0.10–0.15
1000	6.89	545 (285)	500	10	50	10	NR	3	5–10	NR	0.10–0.15
1500	10.34	596 (313)	150	3	0	3	NR	NR	β–6	NR	0.05–0.10
2000	13.80	636 (336)	50	1	0	1	NR	NR	1–3	NR	0.05–0.10
2500	17.24	668 (353)	10	0	0	0.5	NR	NR	NR	NR	0.02–0.03
3200	22.06	705 (374)	0.02	0	0	0.02	NR	NR	NR	NR	0.01–0.02

\*Guidelines for pressures from 100 to 900 psi apply to conventional field-erected boilers with moderate rates of heat transfer, say 50,000 Btu/(ft<sup>2</sup> · h). At high rates characteristic of package boilers, large amounts of insoluble material cannot be managed effectively by a dispersant presently available.

<sup>†</sup>Zero alkalinity refers to hydroxide ion, i.e., P and M alkalinities (2P-M). There is always some alkalinity produced by ammonia, hydrazine, morpholine, or other bases.

<sup>‡</sup>NR = not recommended.

Source: James W. McCoy, *The Chemical Treatment of Boiler Water*, Chemical Publishing Company, New York, 1981.



## Pretratamiento del agua de reposición

# Pretratamiento del agua de reposición: Clarificación

- Proceso cuyo objetivo es la remoción de ***sólidos suspendidos***
- Los sólidos suspendidos pueden consistir en partículas sedimentables, de gran tamaño, que se separan solamente por acción de la gravedad y partículas no sedimentables
- Remoción normalmente se lleva a cabo por ***coagulación, floculación y sedimentación***
- La combinación de estos 3 procesos se denomina habitualmente ***CLARIFICACIÓN***

# Pretratamiento del agua de reposición: Clarificación

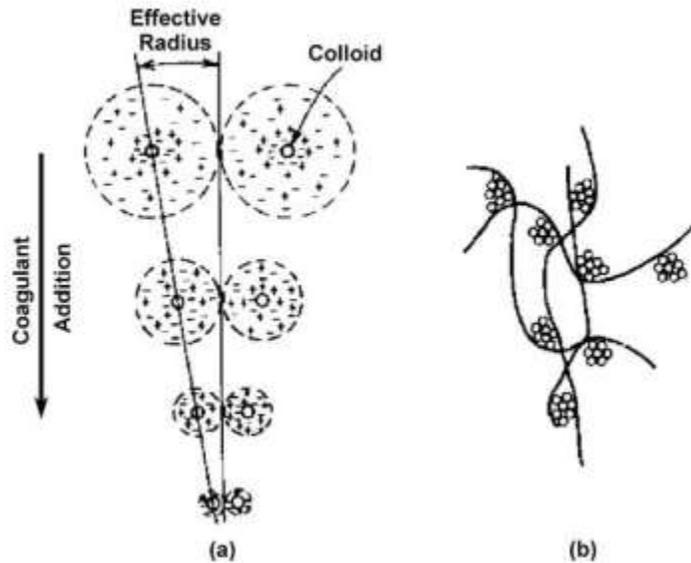


Figura 8: (a) Coagulación: La adición de un coagulante neutraliza las cargas lo que permite que las partículas se aglomeren. (b) Floculación: Unión de partículas aglomeradas formando grandes flocs (Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

- **Coagulación:** Desestabilización por neutralización de cargas superficiales en la partícula. Agitación intensa para que el coagulante se mezcle con el agua. Una vez neutralizadas las cargas, las partículas dejan de repelerse y se acercan.
- **Floculación:** Unión de partículas desestabilizadas para formar un “floc”. Agitación lenta para que las partículas se unan y logren mayor tamaño y peso.
- **Sedimentación:** Proceso físico de remoción del material coagulado y floculado. Al reducirse la velocidad de circulación del agua, las partículas descienden por su propio peso.

# Pretratamiento del agua de reposición: Filtración

- Proceso de remoción de **sólidos suspendidos** por el pasaje del agua a través de un medio filtrante
- Los filtros pueden ser de un solo medio o multimedia
- Los sólidos suspendidos filtrados se remueven del filtro al sacarlo de servicio y retrolavar el medio

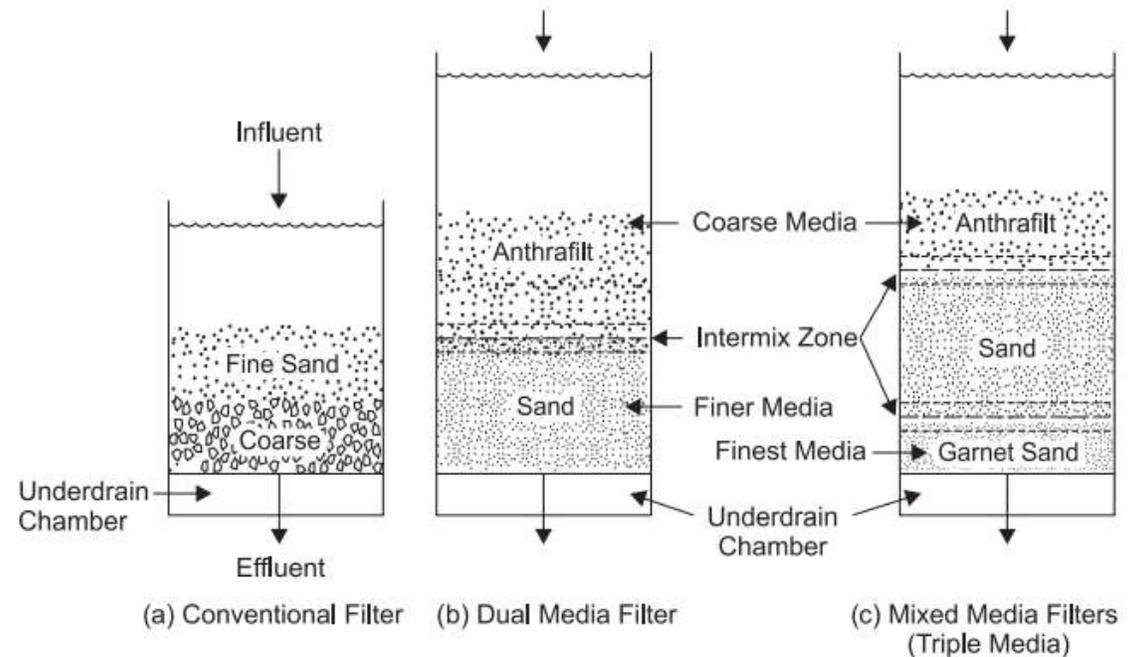
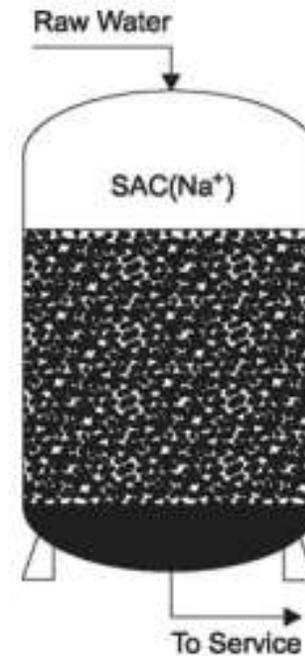


Figura 9: Composición de medios filtrantes y sus arreglos (Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

# Pretratamiento del agua de reposición: Ablandamiento

- Intercambio de cationes capaces de formar incrustaciones ( $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$ ) por sodio completamente soluble
- Proceso más habitualmente utilizado en tratamiento de agua superficial y de pozo
- Utiliza una resina catiónica fuertemente ácida ( $Na^+$ )



**NALCO** Analytical Laboratory Report  
Ion Exchange – Water Analysis

Constituent*	Raw	SAC ( $Na^+$ )
Calcium	194.0	-
Magnesium	70.2	-
Sodium	14.4	278.6
Potassium	1.5	1.5
FMA	-	-
<b>Total Cations</b>	<b>280.1</b>	<b>280.1</b>
Bicarbonate	220.0	220.0
Chloride	5.2	5.2
Sulfate	54.0	54.0
Nitrate	0.9	0.9
TMA	60.1	60.1
<b>Total Anions</b>	<b>280.1</b>	<b>280.1</b>
P Alkalinity	-	-
M Alkalinity	220	220
Carbon Dioxide, $CO_2$	11	11
Silica reactive, $SiO_2$	0.7	0.7
TDS, mg/L	428	454
Conductivity, $\mu S/cm$	564	555
pH, units	7.6	7.6

\* All mg/L as  $CaCO_3$  unless otherwise noted

Figura 10: Ablandador típico. Figura 11: Análisis de agua cruda y ablandada (Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

# Pretratamiento del agua de reposición: Ablandamiento



<https://www.youtube.com/watch?v=75DEsyCwIGI>

# Pretratamiento del agua de reposición: Desmineralización por intercambio iónico

- Proceso de remoción de **sólidos disueltos** por intercambio iónico para producción de agua desmineralizada
- El agua pasa a través de la resina, se produce un **intercambio de iones**, eliminando iones indeseables del agua y reemplazándolos con iones cargados previamente en la resina en la etapa de regeneración
- El regenerante utilizado y el tipo de resina cargada en el tratador determinan los iones que serán intercambiados entre la resina y el agua

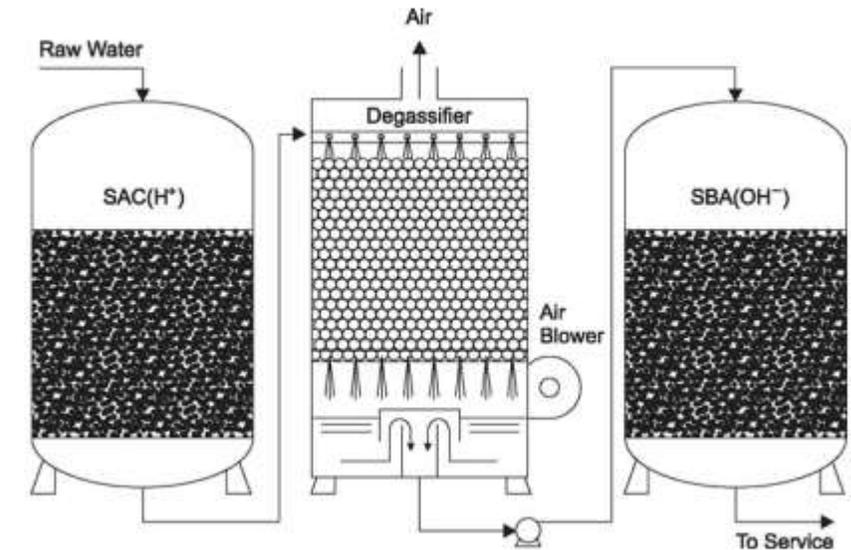


Figura 12: Unidad de desmineralización con torre decarbonatadora (Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

# Pretratamiento del agua de reposición: Desmineralización por intercambio iónico

- El proceso es *reversible*; el lecho de resina debe ser *regenerado una vez agotado*
- Unidad de desmineralización convencional compuesta por resina catiónica fuertemente ácida (H<sup>+</sup>) para remoción de todos los cationes, seguida de una resina aniónica fuertemente básica (OH<sup>-</sup>) para remoción de todos los aniones
- Usualmente se utiliza una torre descarbonatadora entre ambas resinas para reducción del CO<sub>2</sub> a la resina aniónica (disminuye V<sub>resina</sub> y regenerante)

**NALCO** Analytical Laboratory Report  
Ion Exchange – Water Analysis

Constituent*	Raw	SAC (H <sup>+</sup> )	Decarb	SBA (OH <sup>-</sup> )
Calcium	194.0	-	-	-
Magnesium	70.2	-	-	-
Sodium	14.4	2.0	2.0	2.0
Potassium	1.5	-	-	-
FMA	-	58.1	58.1	-
<b>Total Cations</b>	<b>280.1</b>	<b>60.1</b>	<b>60.1</b>	<b>2.0</b>
Bicarbonate	220.0	-	-	-
Hydroxide	-	-	-	2.0
Chloride	5.2	5.2	5.2	-
Sulfate	54.0	54.0	54.0	-
Nitrate	0.9	0.9	0.9	-
TMA	60.1	60.1	60.1	-
<b>Total Anions</b>	<b>280.1</b>	<b>60.1</b>	<b>65.1</b>	<b>2.0</b>
P Alkalinity	-	-	-	2
M Alkalinity	220	-	-	2
Carbon Dioxide, CO <sub>2</sub>	11	204	10	0.2
Silica reactive, SiO <sub>2</sub>	0.7	0.7	0.7	-
TDS, mg/L	428	58	58	3
Conductivity, μS/cm	564	NA	NA	9
pH, units	7.6	3.0	3.0	9.4

\* All mg/L as CaCO<sub>3</sub> unless otherwise noted

Figura 13: Análisis de agua cruda y tratada  
(Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

# Pretratamiento del agua de reposición: Desmineralización por membranas

- En resinas, hay intercambio de iones del agua a los sitios de la resina de intercambio iónico los que permanecen hasta que son liberados por la solución regenerante
- Proceso de intercambio iónico consume **grandes cantidades de químicos regenerantes** (problemas de manejo y disposición)
- Alternativa: Desmineralización por proceso de **ósmosis inversa** (RO) para la remoción de **sólidos disueltos**

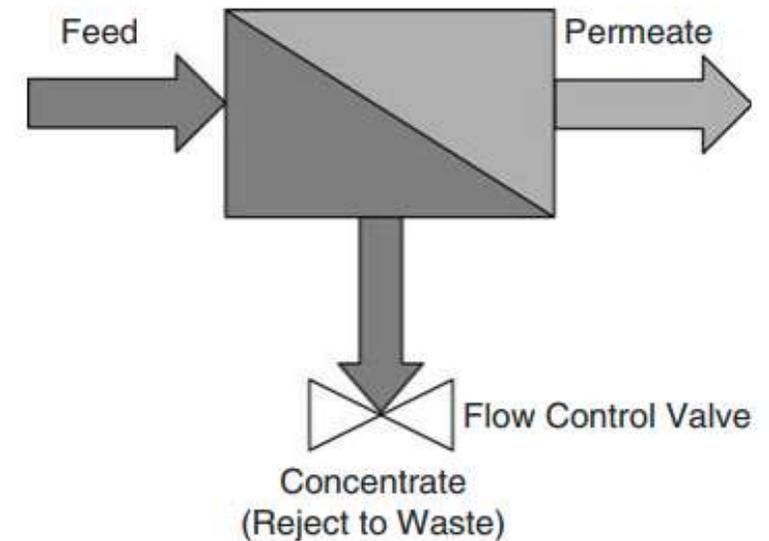


Figura 14: Representación de una operación de ósmosis inversa convencional (Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

# Pretratamiento del agua de reposición: Desmineralización por membranas

- El *proceso de ósmosis natural es reversible* si se aplica sobre la solución concentrada una *presión mayor a la presión osmótica*
- La presión externa produce una *inversión del flujo a través de la membrana*
- Es la base de la *ósmosis inversa*, por la cual se obtiene un agua desalada a través de la aplicación de una presión externa ( $P_{\text{externa}} > P_{\text{osmótica}}$ )

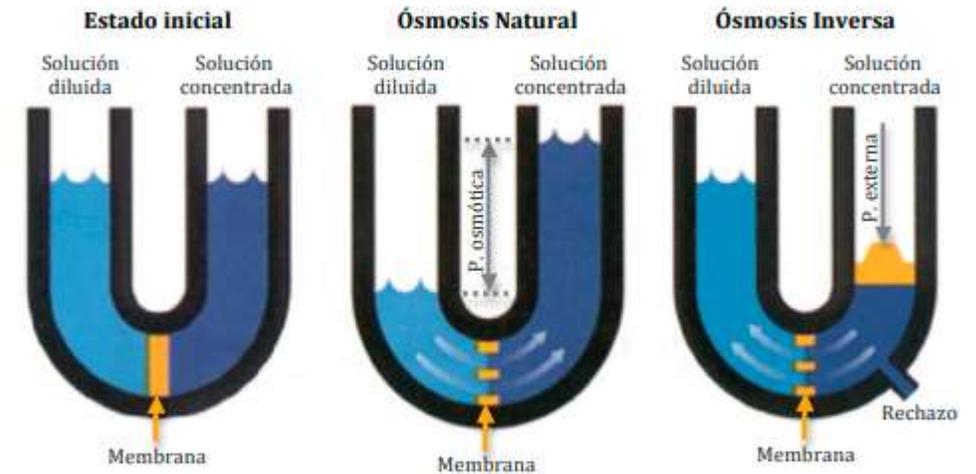


Figura 16: Esquema del proceso de ósmosis natural y ósmosis inversa (Fuente: Tesis Doctoral: Desalación de aguas de mar mediante ósmosis inversa. Estudio de los mecanismos de ensuciamiento y limpieza de las membranas)



# Tratamiento interno

# Tratamiento interno

- Se realiza dentro del equipo, ***complementario al tratamiento externo***
- El tratamiento externo no es 100% efectivo, básicamente por limitaciones de los equipos y razones económicas
- Involucra:
  - ***Tratamiento mecánico***
    - Purgas de fondo
    - Purga continua
  - ***Tratamiento químico***
    - Dosificación de productos químicos

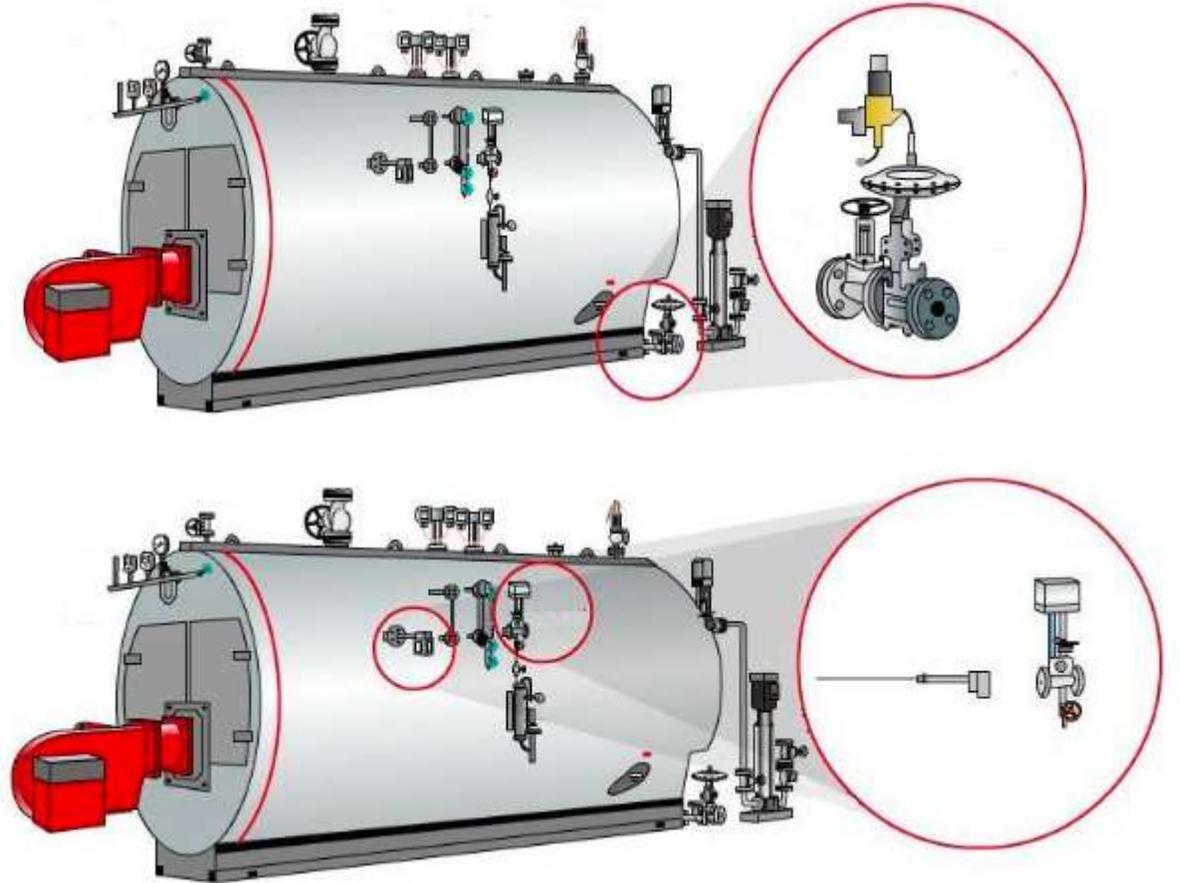
# Tratamiento interno: Tratamiento Mecánico

- ***Purgas de fondo***

- Apertura de una válvula de fondo durante algunos segundos
- Objetivo: Remoción de barros acumulados en el fondo de la caldera

- ***Purgas de nivel***

- Remoción continua del agua del domo
- Objetivo: Control de la concentración de sales disueltas



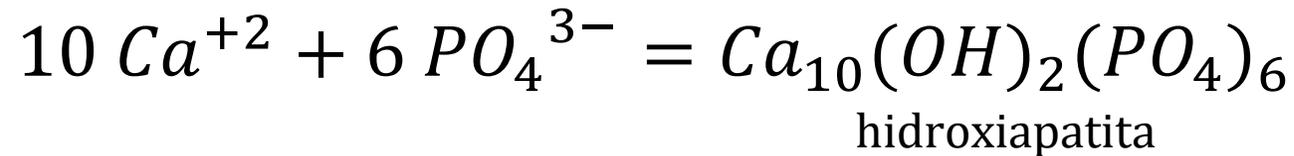
# Tratamiento interno: Tratamiento químico- Control de formación de incrustaciones

- Los sistemas de pretratamiento del agua deben funcionar y ser mantenidos correctamente
- El tratamiento químico se utiliza para acondicionar cualquier fugas del sistema de pretratamiento
- Tratamientos ***más comunes:***
  - ***Fosfatos (con o sin polímero)***
  - ***Quelantes***
  - ***Polímeros***

# Tratamiento interno: Tratamiento químico- Control de formación de incrustaciones

## *Agregado de fosfatos para control de dureza*

- Se basa en la ***baja solubilidad del  $Ca_3(PO_4)_2$***
- Se ***previenen incrustaciones por  $CaSO_4$ ,  $CaCO_3$  y  $Ca_2SiO_4$***  por la remoción de  $Ca^{+2}$  a través de la ***adición controlada de fosfatos***



- En presencia de la alcalinidad suficiente, se forma la hidroxiapatita que es un ***barro no adherente***, fácilmente ***removible por la purga de fondo***
- El  $Mg^{+2}$  va a ***precipitar*** preferentemente como  ***$Mg(OH)_2$ , silicato de magnesio o serpentita*** que resultan en un ***barro no adherente***

# Tratamiento interno: Tratamiento químico- Control de formación de incrustaciones

## *Programas con 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***
- Los más ampliamente utilizados: EDTA y NTA
- Se deben usar a bajas y medias presiones ya que a altas T se degradan

# Tratamiento interno: Tratamiento químico- Control de formación de incrustaciones

## *Programas con polímero*

- Funcionan ***dispersando partículas*** como óxidos de hierro y barros y formando complejos con los iones de dureza para prevenir la precipitación de sales minerales
- Los polímeros utilizados en el tratamiento de calderas son ***aniónicos*** en el rango de pH alcalino
- Tienen una atracción hacia las superficies de las partículas de óxidos de hierro, incrustaciones minerales y barros y pueden adsorberse en estas superficies
- Cuando los polímeros se ***adsorben en la superficie de las partículas***, mejoran la carga eléctrica de la superficie y ***aumentan la fuerza repulsiva*** entre las partículas

# Tratamiento interno: Tratamiento químico- Control de formación de incrustaciones

## *Programas con polímero*

- Además, el tamaño de las moléculas de polímero generan una barrera física que reduce la posibilidad de aglomeración o deposición. A todo este mecanismo se le llama dispersión
- Estos programas inhiben la formación de incrustaciones por dureza ***manteniendo en solución a los iones  $Ca^{+2}$  y  $Mg^{+2}$***
- El mecanismo involucra la ***formación de complejos*** de dureza

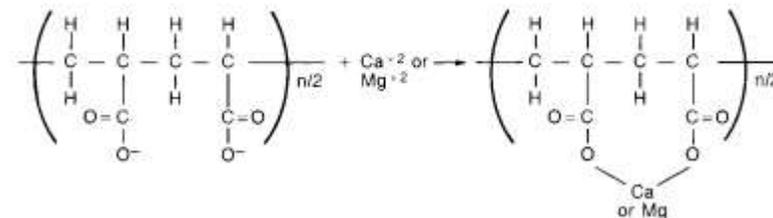


Figura 17: Mecanismo de solubilización de la dureza por polímeros (Fuente: The Nalco Water Handbook, NALCO)

# Tratamiento interno: Tratamiento químico- Control de la corrosión por O<sub>2</sub>

- Mayoría de desaireadores a presión son capaces de reducir la concentración de O<sub>2</sub> a niveles inferior a 10 µg/L
- Requerimiento de remover trazas de O<sub>2</sub>: Necesidad del uso de **secuestrantes de O<sub>2</sub>** que reaccionan con el O<sub>2</sub> libre formando productos de oxidación que no son nocivos para la caldera
- Más comunes:
  - Sulfito (Na<sub>2</sub>SO<sub>3</sub>)
  - Hidracina (N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>)
  - Carbohidracida [(NH<sub>2</sub>NH)<sub>2</sub>CO]
  - Dietilhidroxilamina [(C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>)<sub>2</sub>NOH]

Tratamiento interno: Tratamiento químico-Control de la corrosión por O<sub>2</sub>



- La ***ausencia de O<sub>2</sub> se controla por un excesos de SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>*** en el domo del generador
- Puede o no ser catalizado. Se prefiere catalizado por muy bajo tiempo de reacción disponible
- ***Desventajas*** del uso:
  - Agrega ***sólidos al sistema***
  - ***Descomposición del sulfito a gases corrosivos*** (H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>) comienza a P>600 psig. No recomendado en sistemas de P>900 psig
  - Acción como secuestrante O<sub>2</sub>, ***no pasivante de superficie metálica***



# Tratamiento interno: Tratamiento químico-Control de la corrosión de líneas de condensado

## ***Control de pH del condensado por agregado de aminas neutralizantes***

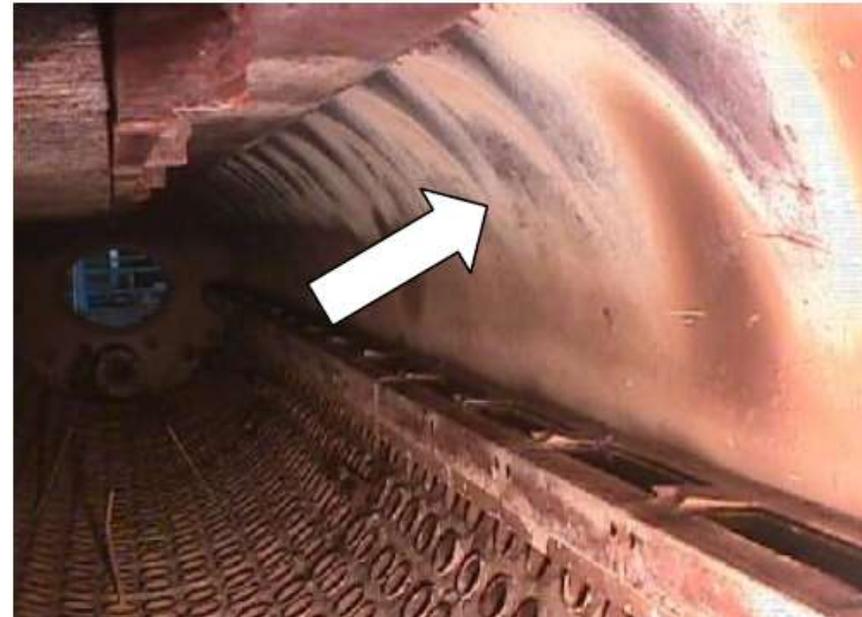
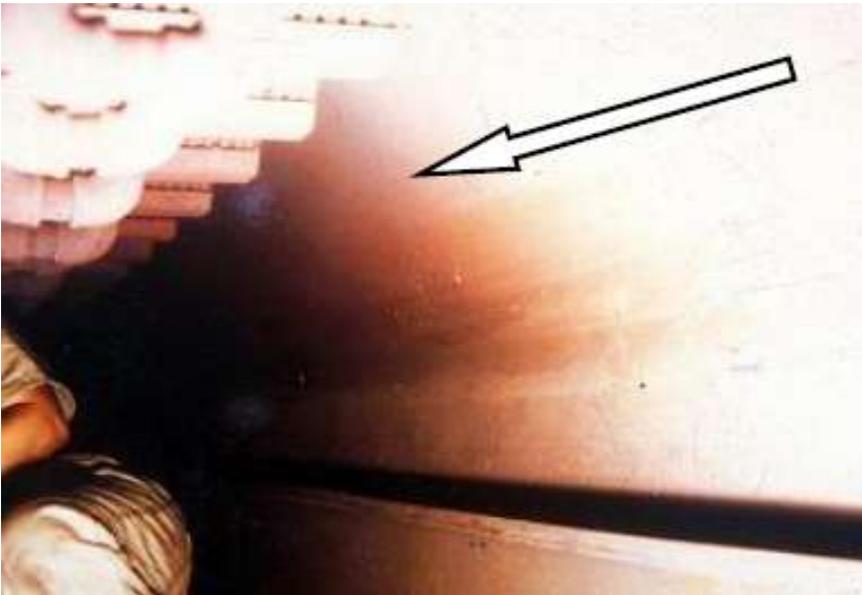
- Son compuestos alcalinos volátiles que se dosifican al sistema de generación de vapor
- Se ***volatilizan*** con el vapor y ***condensan en las líneas de retorno de condensado, neutralizando el  $H_2CO_3$***
- Se utilizan mezclas de aminas neutralizantes
- El control y su dosificación se realizan a través del seguimiento del pH del condensado

## Control de arrastre

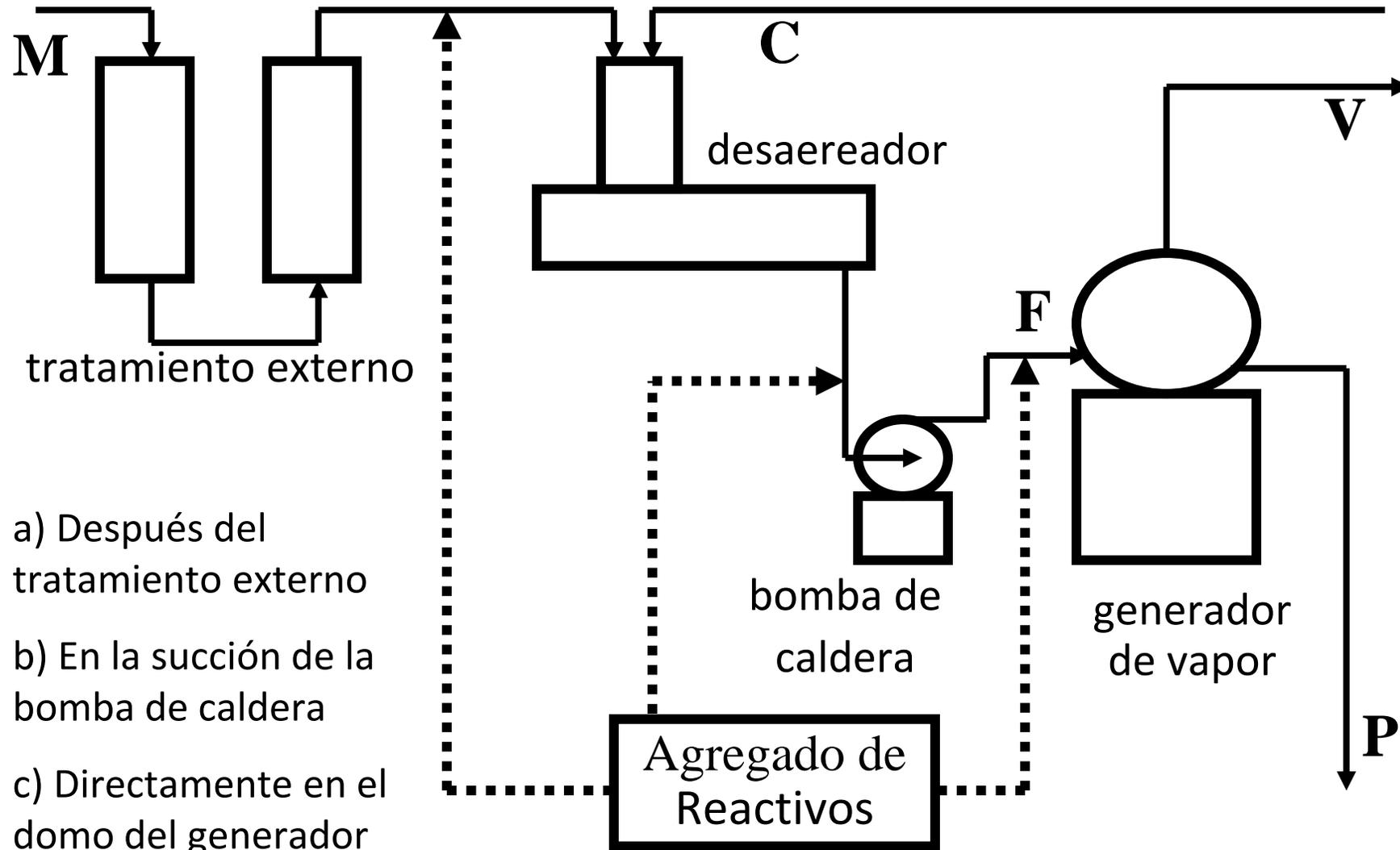
Adecuado diseño de separadores  
Buen manejo de la caldera

Control de impurezas en la caldera

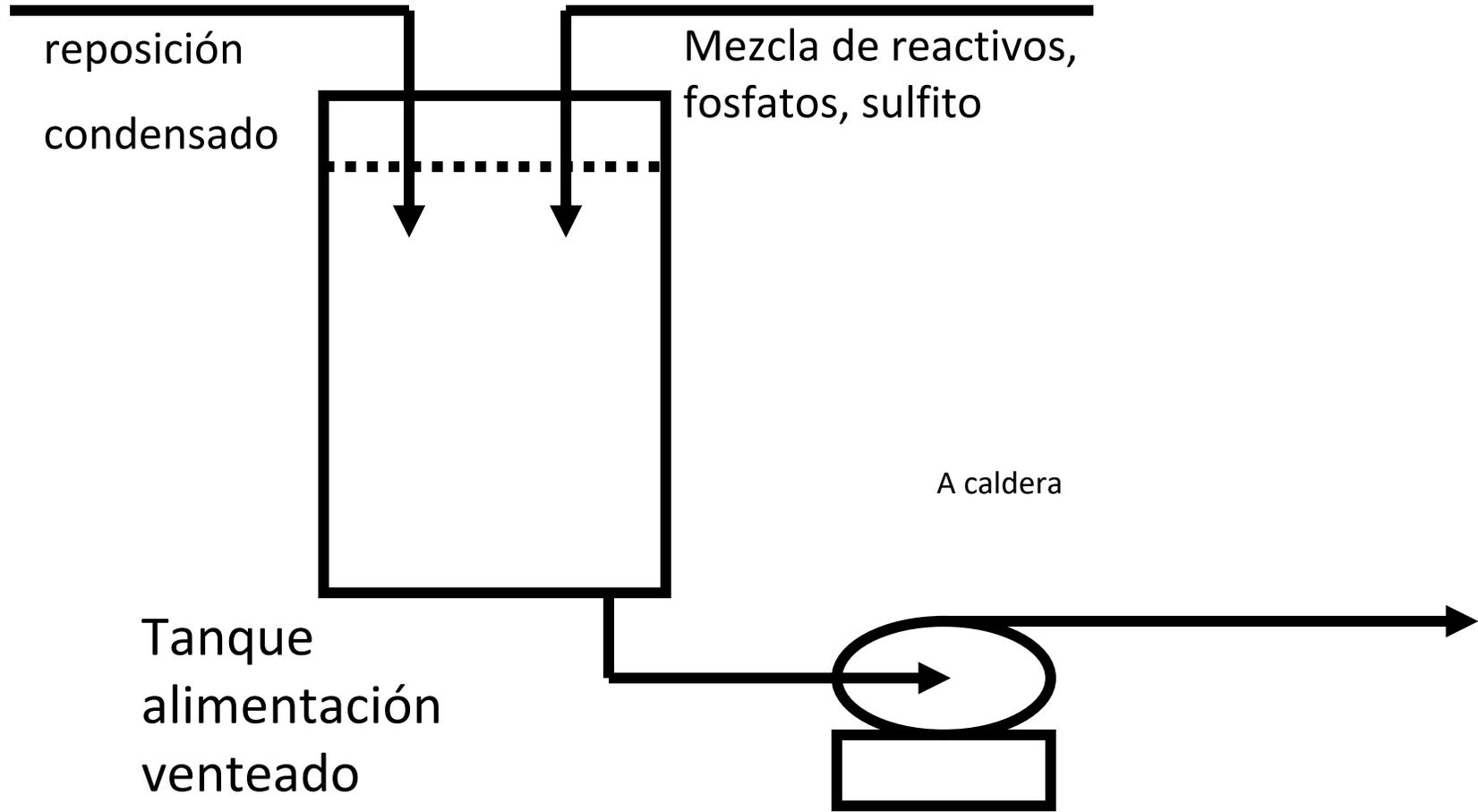
Uso de antiespumantes (polioxiglicoles o poliamidas)



# Tratamiento químico: Agregado de reactivos



Caldera de baja presión



# Conservación de la caldera

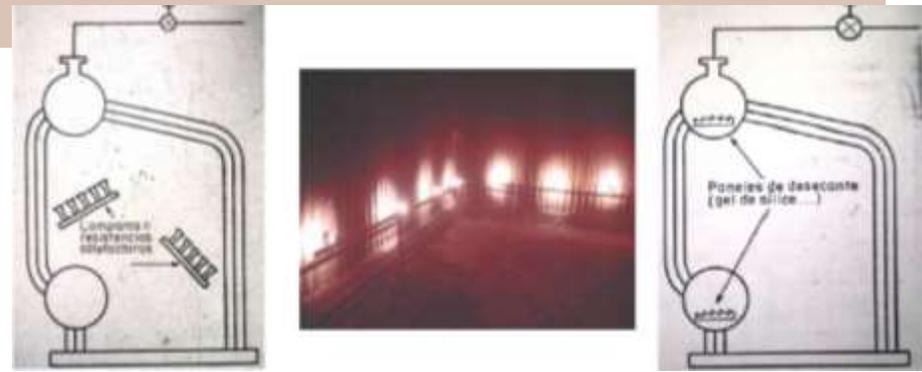
Cuando una caldera va a permanecer un periodo prolongado fuera de uso, las superficies metálicas se ven expuestas a un riesgo mayor de corrosión

## Métodos húmedos de conservación

Inundar la caldera desplazando las superficies de contacto de aire  
Reforzar la concentración de barredor de oxígeno. pH en rango recomendado (uso de alcalinizante).  
Controlar a lo largo del tiempo nivel y concentraciones

## Métodos secos de conservación

Vaciar la caldera, secarla y dotar de atmósfera no corrosiva.



# Limpieza

Un sistema correctamente manejado no tendría necesidad de ser sometido a una limpieza de superficie

Caracterización de los depósitos: composición, espesor

- Hervido alcalino
- Limpieza ácida
- Pasivado

El tratamiento del agua del sistema comprende no solo la dosificación de productos químicos.

El agua integra un sistema de generación, distribución, uso de vapor y recuperación de condensado.

Los aditivos químicos deben responder a estudios científicos de la química del agua y no hacen milagros ni superan por sí solos los errores de concepción, diseño o manejo del sistema de generación de vapor.

**M. Johnston, J. Ramada en Avances en Ingeniería de Tratamiento de Agua**

***¿Consultas o comentarios?***



# Muchas gracias



FACULTAD DE  
INGENIERÍA



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY