



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES ZARAGOZA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA

TRATAMIENTO INTERNO Y EXTERNO DEL AGUA EN UN SISTEMA DE  
GENERACIÓN DE VAPOR DEL TIPO ACUOTUBULAR

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO

PRESENTA

ZITA SILVIA GARCIA MENDOZA

ASESOR ING. RENÉ DE LA MORA MEDINA



CDMX 2018



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Con cariño a la niña invisible que se atrevió a soñar y tuvo la determinación de lanzarse a la aventura de la vida, para trabajar por lo soñado.

Quiero agradecer a las personas que contribuyeron a que esto fuera posible, muy especialmente a mi madre Sra. Catalina Mendoza de García, al Ingeniero René de la Mora Medina, que fue una guía en mi vida universitaria.

Una mención muy especial a la pequeña Edén, mi hija, que, sin aun existir físicamente, en mi mente siempre estuvo presente, sirviendo como estímulo a levantar el ánimo cuando este decaía.

GRACIAS A LA VIDA.

# ÍNDICE

	páginas
RESUMEN .....	i
INTRODUCCION .....	ii
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	
OBJETIVO GENERAL .....	iii
OBJETIVOS PARTICULARES .....	iii
CAPÍTULO 1 GENERALIDADES DEL AGUA	
1.1 La molécula del agua y sus propiedades físicas y químicas .....	1
1.1.1 Tensión superficial elevada .....	3
1.1.2 Iones y constante dieléctrica .....	4
1.1.3 Acción disolvente del agua .....	6
1.1.4 Quelatación .....	10
1.2 Fuentes de abastecimiento de agua .....	11
1.3 Impurezas contenidas en el agua .....	14
CAPÍTULO 2 PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA	
2.1 Energía interna y calor .....	27
2.2 Definición de algunos conceptos termodinámicos .....	29
2.2.1 Proceso de vaporización .....	31
2.2.2 Propiedades del vapor de agua .....	32
2.3 Ciclos termodinámicos con vapor .....	35
2.4 Clasificación del vapor como servicio de planta de proceso .....	40
2.4.1 Clasificación del vapor .....	40
2.5 Aplicaciones del vapor en la industria .....	42
CAPÍTULO 3 GENERADORES DE VAPOR ACUOTUBULARES	
3.1 Definición y características .....	45

	páginas
3.2 Funcionamiento .....	47
3.3 Partes principales de calderas acuotubulares o tubos de agua .....	49
3.4 Clasificación de calderas acuotubulares o tubos de agua .....	51
3.5 Como se mejora la eficiencia de una caldera .....	55
3.6 Sistema de alimentación de agua a las calderas .....	62
<b>CAPÍTULO 4 TRATAMIENTO DE AGUA A CALDERAS</b>	
4.1 Impurezas comunes en agua de alimentación .....	64
4.2 Principales problemas que se presentan por impurezas en agua .....	66
4.3 Tratamiento de agua a calderas .....	74
4.3.1 Tratamiento externo .....	74
4.3.2 Tratamiento interno .....	92
4.4 Normas oficiales vigentes en tratamiento de agua para calderas	98
4.5 Formatos sugeridos para control de agua en calderas .....	99
4.5.1 Formatos para el control de incrustaciones .....	99
CONCLUSIONES .....	105
BIBLIOGRAFÍA .....	107

## ÍNDICE DE FIGURAS

páginas

### CAPÍTULO 1 GENERALIDADES DEL AGUA

Figura 1.1 Unión de molécula diatómica de hidrogeno y oxígeno para producir moléculas de agua de naturaleza polar . . . . .	2
Figura 1.2 Un clip con densidad mayor a la del agua puede flotar debido a su elevada tension superficial . . . . .	3
Figura 1.3 Se forma un menisco cuando los átomos de hidrogeno se mueven hacia arriba para humedecer la superficie del óxido en la línea del agua en un tubo de vidrio . . . . .	3
Figura 1.4 Las orientaciones de las moléculas del agua tienden a evitar que los iones se recombinen y, por tanto, precipiten en la solución. Es por esta razón su alto grado disolvente . . . . .	4

### CAPÍTULO 2 PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA

Figura 2.1 Proceso hielo-agua-vapor . . . . .	29
Figura 2.2 Diagrama de T-s de vapor . . . . .	36
Figura 2.3 Instalación con turbina de vapor, según el ciclo de CLASIUS-RANKINE . . . . .	37
Figura 2.4 Distribución típica de vapor . . . . .	44

### CAPÍTULO 3 GENERADORES DE VAPOR ACUOTUBULAR

Figura 3.1 Caldera de tubo de agua . . . . .	48
Figura 3.2 Caldera de dos tambores y tubos curvos . . . . .	52
Figura 3.3 Caldera de tres tambores y tubos curvos . . . . .	52
Figura 3.4 Esquema de diferentes arreglos de tambor y tubos, en calderas de tubos curvos . . . . .	53
Figura 3.5 Representa calderas de a) Circulación natural b) Circulación forzada . . . . .	54

Figura 3.6 En el tambor de vapor, el agua es removida por separadores ciclónicos y filtros secundarios o secadores de malla	56
Figura 3.7 Separador cilíndrico con trayectoria de partículas	57
Figura 3.8 Separador por estrangulamiento (calorímetro)	57
Figura 3.9 Adición de calor en el vapor de saturación por medio de un sobrecalentado	60
Figura 3.10 Recalentador de vapor	61
Figura 3.11 Economizador	61
Figura 3.12 Transferencia de calor de las diferentes secciones de un generador de vapor	62
CAPÍTULO 4 TRATAMIENTO DE AGUA A CALDERAS	
Figura 4.1 Incrustación en calderas	68
Figura 4.2 Se puede apreciar incrustaciones en el fondo de la caldera	69
Figura 4.3 Corrosión en tubos de horno por pitting	71
Figura 4.4 Corrosión caustica	73
Figura 4.5 Filtro vertical de presión	75
Figura 4.6 Desaireador	79
Figura 4.7 Suavizador simplex	82
Figura 4.8 Intercambiador catiónico ciclo hidrogeno, de operación automática y tanque regenerador	85
Figura 4.9 Esquemmatización de tratamiento de dureza del agua	86
Figura 4.10 Precipitador vertical para un proceso de cal sodada en frio	90
Figura 4.11 Planta de ablandamiento de agua para el proceso de cal sodada en caliente y eliminación de sílice	91

## ÍNDICE DE TABLAS

	páginas
<b>CAPÍTULO 1 GENERALIDADES DEL AGUA</b>	
Tabla 1.1 Propiedades térmicas y componentes similares . . . . .	2
Tabla 1.2 Pesos de algunos compuestos comunes utilizados en el tratamiento de agua	6
Tabla 1.3 Solubilidad de algunos compuestos inorgánicos en agua a 20°C . . . . .	8
Tabla 1.4 Tabla simplificada de solubilidades . . . . .	9
Tabla 1.5 Minerales usualmente determinados en agua de uso industrial . . . . .	18
<b>CAPÍTULO 2 PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA</b>	
Tabla 2.1 Información contenida en tablas de vapor . . . . .	33
Tabla 2.2 VAPOR SATURADO Tabla de temperaturas . . . . .	38
Tabla 2.3 VAPOR SATURADO Tabla de presiones . . . . .	39
<b>CAPÍTULO 4 TRATAMIENTO DE AGUA A CALDERAS</b>	
Tabla 4.1 Impurezas químicas más comunes en aguas de alimentación . . . . .	65
Tabla 4.2 Factores que afectan el arrastre de sólidos . . . . .	70
Tabla 4.3 Filtros Verticales: áreas, retrolavado y velocidades de filtración . . . . .	76
Tabla 4.4 Sedimentación de diferentes partículas, a las condiciones de temperatura del agua 10°C y densidad del material 2.65 . . . . .	78
Tabla 4.5 Intercambiadores catiónicos ciclo sódico . . . . .	83
Tabla 4.6 Las relaciones Sulfato-Carbonato sugeridas por ASME . . . . .	94
Tabla 4.7 Requerimientos agua alimentación calderas vapor según BS 2486 . . . . .	98
Tabla 4.8 Requerimiento agua caldera según BS 2486 . . . . .	98



## ÍNDICE DE FORMATOS

páginas

### CAPÍTULO 4 TRATAMIENTO DE AGUA A CALDERAS

Formato 4.1 Determinación en campo de agua de alimentación por el operador . . . . .	100
Formato 4.2 Determinación en campo de agua de alimentación por operador y contratista . . .	101
Formato 4.3 Determinación en campo de agua en caldera por el operador . . . . .	102
Formato 4.4 Determinación en campo de agua en caldera por operador y contratista . . . . .	103
Formato 4.5 Control de purgas . . . . .	104

## RESUMEN

Dentro de la ingeniería conceptual de las instalaciones de Proceso deberá ser tomada en cuenta los servicios auxiliares que se requieren para sus distintas formas de operar de una planta, entre las cuales suele requerirse de la generación de vapor.

El agua guarda características muy precisas que la hacen ser el mejor medio para generar vapor de alta calidad, dependiendo de la fuente de que se obtenga, serán los pasos a seguir en su tratamiento que está dividido básicamente en tratamiento interno y externo, para esto nos valdremos de herramientas mecánicas y químicas, para así poder satisfacer las necesidades dictadas por la norma BS 24886, y así poder evitar problemas de corrosión e incrustación en los equipos.

Por otro lado, es de nuestro conocimiento que las calderas acuotubulares tiene como característica que el agua circula dentro de los tubos y maneja presiones en el rango de (169.9 a 179.9) Bar, lo que hace necesario un mayor control de las características del agua de alimentación y reposición con una dureza de cero y eliminación de gases disueltos entre otras.

Es de nuestro conocimiento que aquello que no es medible no se puede controlar, por lo que se hace necesario un control rutinario de las características del agua que esta en contacto con la caldera. En este trabajo se incluyen algunos formatos que plasman los resultados obtenidos del análisis del agua y que, al ser detectadas alguna anomalía, se puedan tomar las acciones pertinentes en el proceso del tratamiento.

## INTRODUCCIÓN

El tratamiento de agua para alimentación a calderas pudiera parecer un tema relativamente sencillo, pero encontrándonos en el ámbito laboral podemos apreciar la falta de pericia en la toma de decisiones al respecto, y sin dejar de señalar la importancia de dicho tema ya que el desconocimiento de este puede llevar no solo a provocar accidentes que es muy grave, sino también a la pérdida de recursos económicos que se verán reflejados en las utilidades de trabajadores y empresa.

Es por estas razones que el presente trabajo trata de abarcar los puntos neurálgicos más importantes del tratamiento de agua para calderas acuotubulares.

En el primer capítulo se trata el punto de las características físicas y químicas del agua que la hacen el mejor medio para transferir energía en forma de vapor, mismos que serán utilizados de diferentes maneras según los procesos para que se destine.

En el segundo capítulo se hace una semblanza de las propiedades termodinámicas del vapor.

En el tercer capítulo se hace un señalamiento amplio de las calderas acuotubulares, clasificación y equipo auxiliar.

Como último tema, capítulo cuatro se describe el tratamiento de agua para calderas acuotubulares, se hace la recomendación que el tratamiento sea llevado por empresas especializadas, ya que el agua empleada para dicho proceso tendrá que guardar características muy precisas según la norma BS 2486 del Reino Unido, utilizando para esto, procedimientos mecánicos y químicos. Se incluyen formatos para el control de análisis en el agua.

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua generalmente presenta diferentes concentraciones de carbonatos, bicarbonatos, cloruros, sulfatos, etc., que suelen causar efectos negativos en la caldera tales como incrustaciones y corrosión, entre otros efectos consecuencia de lo anterior como fragilidad en el equipo generador de vapor, un mal tratamiento en el agua de alimentación reducirá el tiempo de vida del equipo, se presentara una mayor consumo de combustible y también podrá en riesgo al personal operativo ya que puede provocarse accidentes.

### OBJETIVOS:

#### 1. OBJETIVO GENERAL

Conocer las características y funcionamiento de las calderas acuotubulares y en base a la composición química del agua de la fuente de abastecimiento, poder determinar el tratamiento que debe de darse al agua de alimentación y tratamiento interno de la misma.

#### 2. OBJETIVOS PARTICULARES

- ❖ Conocer las fuentes de abastecimiento del agua para la industria.
- ❖ Conocer las características de las calderas acuotubulares.
- ❖ Determinar el tratamiento químico y/o mecánico que se debe de dar al agua, de acuerdo a sus características fisicoquímicas para alimentación a calderas acuotubulares.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES DEL AGUA

### 1.1 La molécula del agua y sus propiedades físicas y químicas

El agua es un elemento útil para las diferentes formas de vida, es poseedora de características extraordinarias tales como ser el mejor disolvente universal, su alta tensión superficial y su capacidad de almacenar gran cantidad de energía en forma de vapor.

Por lo anterior en los diferentes procesos industriales es utilizada ampliamente y dependerán de las necesidades de cada uno de ellos, las características que deberá tener el agua para su empleo.

“Los dos átomos de hidrógeno están separados entre sí por  $105^\circ$ , adyacente al átomo de oxígeno de forma que la molécula es asimétrica, cargada positivamente del lado de hidrógeno y negativamente del lado del oxígeno. Por esta razón se dice que el agua es dipolar. Esto hace que la molécula se aglomere, el hidrógeno de una molécula atrae el oxígeno de la molécula vecina. La unión de las moléculas como resultado de esta fuerza de atracción recibe el nombre de *punte de hidrógeno*”.<sup>1</sup> *Figura 1.1*

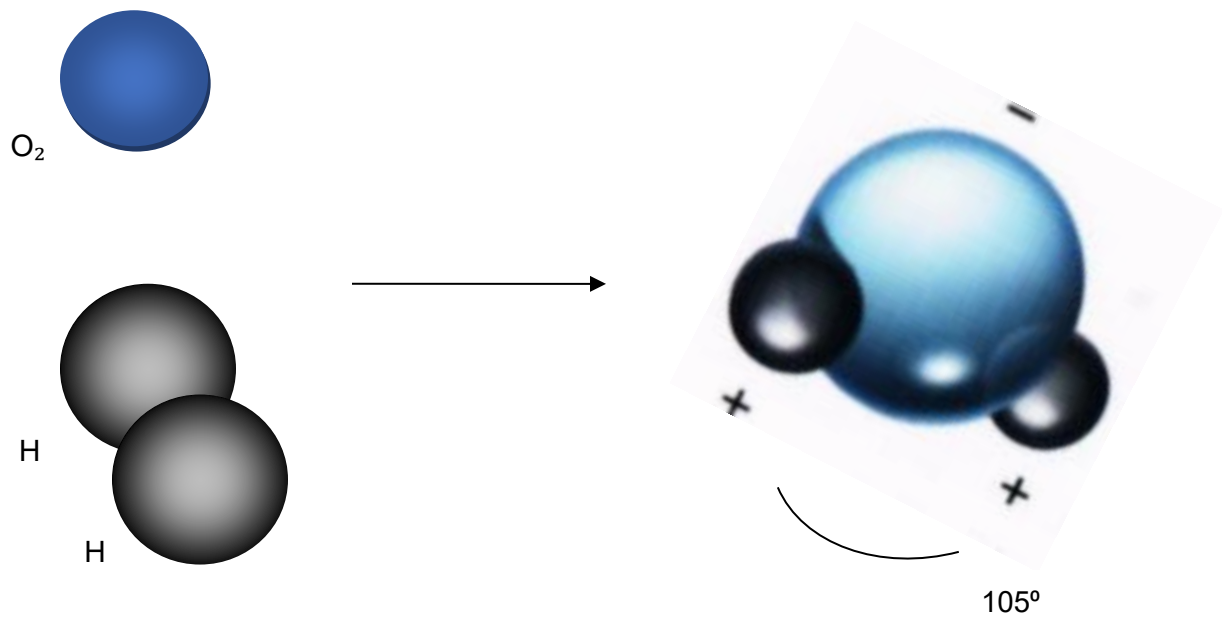
Siendo estos puentes de hidrógeno quienes otorgan al agua la característica de requerir una gran cantidad de energía para convertir agua líquida en vapor, energía que será liberada cuando el proceso se de en forma reversible misma que se libera como calor, esto sucede cuando el vapor entra en contacto con una superficie más fría.

Por tal motivo el vapor es un medio de energía empleado en la industria con las características de ser versátil y estéril.

En la tabla 1.1 se comparan las propiedades caloríficas del agua con otras moléculas similares, que son líquidas a temperatura ambiente.

---

<sup>1</sup> Kemmer N. Frank, McCallion, *Manual del agua*, Ed. Mc Graw Hill, tomo I, México 1994, pág.1-1



**Figura 1.1 Unión de molécula diatómica de hidrogeno y oxígeno para producir moléculas de agua de naturaleza polar**

**Fuente. Manual del Agua NALCO, tomo I, 1994, pág.1-2**

Tabla 1.1 Propiedades térmicas del agua y componentes similares

Sustancias	Calor especifico	Punto de congelación (°C)	Punto de ebullición (°C)	Calor latente de vaporización (cal/kg)
H <sub>2</sub> O	1.00	0	100	540
Metanol	0.57	-98	65	269
Etanol	0.54	-117	79	202
benceno	0-39	6	80	95

Fuente: Manual del Agua NALCO, tomo I, 1994, pág.1-2

El agua líquida es más densa que congelada, esto se debe que en el estado sólido aumenta su volumen ya que los puentes de hidrogeno producen un rearrreglo cristalino que provoca que el hielo se expanda.

### 1.1.1 Tensión superficial elevada

Los puentes de hidrógeno son también los responsables de la elevada tensión superficial del agua cuyo valor a 20°C es "72.75 dinas/cm."<sup>2</sup> Esto se demuestra mediante el ejemplo de hacer flotar un clip en el agua figura 1.2, o bien que el agua se eleve en un tubo capilar.

Figura 1.3.



Figura 1.2 Un clip con densidad mayor a la del agua, puede flotar debido a su elevada tensión superficial

Fuente: <https://www.slideshare.net/nbeatriz/tensin-superficial>

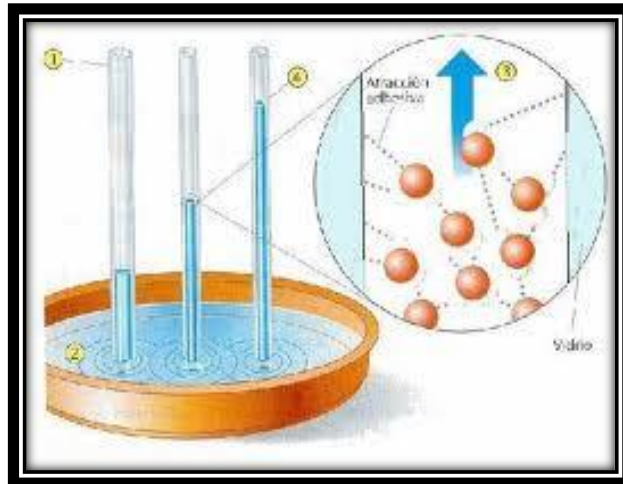


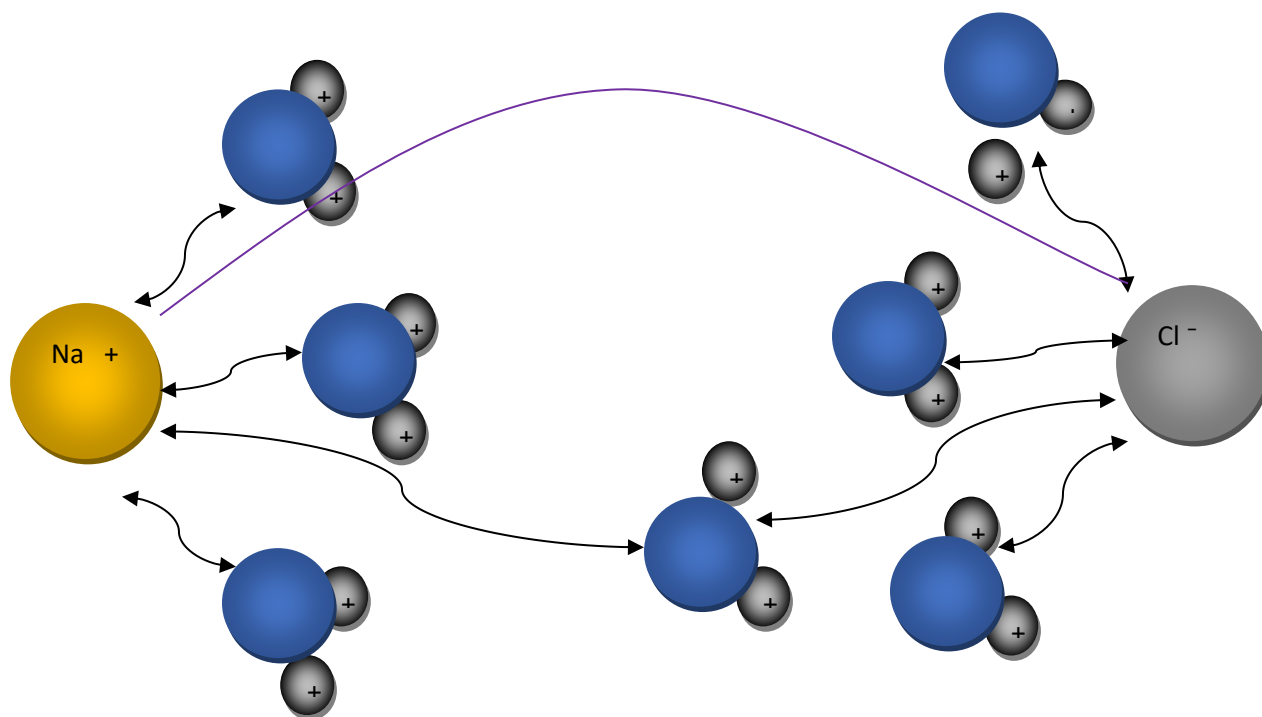
Figura 1.3 Se forma un menisco cuando los átomos de hidrogeno se mueven hacia arriba para humedecer la superficie del óxido en la línea del agua en un tubo de vidrio.

Fuente: <https://sites.google.com/site/quiaspracticadellaboratorio/capilaridad>

<sup>2</sup> Castellan, Gilbert W., *Fisicoquímica*, Ed. Pearson, pág. 433, tema 18 Fenómenos superficiales. Fuente [https://es.wikipedia.org/wiki/Tensi%C3%B3n\\_superficial](https://es.wikipedia.org/wiki/Tensi%C3%B3n_superficial)

### 1.1.2 Iones y la constante dieléctrica

La alta constante dieléctrica que posee el agua “78.5 a 24.85°C”<sup>3</sup>, es debida a que es un solvente altamente polar, ya que presenta un átomo muy electronegativo, el oxígeno y dos muy poco electronegativos el hidrógeno, lo que da como resultado que las moléculas cargadas eléctricamente son fácilmente disociadas en presencia de agua. *Figura 1.4*



**Figura1. 4** Las orientaciones de las moléculas de agua tienden a evitar que los iones se recombinen y, por tanto, precipiten en la solución. Es por esta razón su alto grado disolvente.

Fuente: Manual de NALCO tomo 1,1994, pág. 1-4

<sup>3</sup> Dr. Edgar Vázquez-Contreras, Instituto de Química, UNAM, Fuente <http://bq.unam.mx/~evazquez>



Cuando se disuelven minerales en agua se forman nuevos materiales a partir de los átomos liberados por el mineral, estas partículas se llaman iones. La ruptura de un compuesto químico mediante su disolución en agua forma cationes cargados positivamente, y aniones cargados negativamente. En general, un aumento en la temperatura del agua provoca un aumento en la solubilidad de la mayor parte de las sales. Excepciones importantes son  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{MgCO}_3$  y  $\text{Mg(OH)}_2$ , todas se vuelven menos solubles al aumentar la temperatura, esto es debido a que en presencia de agua y aplicando calor el hidróxido de magnesio se descompone en  $\text{CO}_2$  y bicarbonato de magnesio. Los bicarbonato de calcio, y de magnesio conjuntamente con el sulfato de calcio no se disocian en el agua.

En la química del agua, el peso molecular de un mineral suele ser de menos utilidad en los cálculos que el peso equivalente, puesto que la mayor parte de los minerales disueltos en el agua están ionizados.

“El peso equivalente de un catión es el peso que desplazara a 1.0 gramo de hidrógeno de una sustancia acuosa. En la mayor parte de las reacciones, el peso equivalente es el peso molecular de una sustancia dividido entre su valencia.”<sup>4</sup> En la tabla 1.2 se presentan los pesos moleculares y pesos equivalentes de algunos electrolitos comunes,

Los iones que están formados por diferentes átomos se llaman radicales. Los radicales comunes en la química del agua incluyen el amonio  $\text{NH}_4^{+i}$ , un catión; al nitrato  $\text{NO}_3^{-i}$ , sulfato  $\text{SO}_4^{-2}$ , y al fosfato  $\text{PO}_3^{-3}$ , los cuales son aniones.

---

<sup>4</sup> Kemmer N. Frank, Op. Cit., pág. 3-6

**Tabla 1.2 Pesos de algunos compuestos comunes utilizados en el tratamiento de agua**

Nombre común	Formulas	Peso mol	Peso equivalente
Cloruro de sodio	NaCl	58.5	58.5
Sosa caustica	NaOH	40	40
Sulfato de sodio	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	142	71
Carbonatosódico anhídrido	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	106	53
Piedra caliza	CaCO <sub>3</sub>	100	50
Cal viva	CaO	56	28
Cal apagada	Ca(OH) <sub>2</sub>	74	37
Yeso	CaSO <sub>4</sub> •2H <sub>2</sub> O	172.2	86.1
Ácido muriático	HCl	36.5	36.5
Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	98	49
Amoniaco acuoso	NH <sub>4</sub> OH	35	35

Fuente: Manual de NALCO tomo 1,1994, pág. 3-6

### 1.1.3 Acción disolvente del agua

El agua en su estado puro no presenta sabor, ni olor, ni color, pero debido a su gran polaridad y la formación de puentes de hidrógeno tiende a disolver gran variedad de sustancias ya sea sólidas, líquidas y gaseosas.

El agua es un buen disolvente de iones y moléculas polares [...] este tipo de moléculas representan la separación de cargas eléctricas en la misma molécula ...<sup>5</sup>

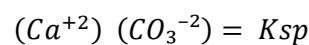
<sup>5</sup> Jaume Casobo Gispert, *Estructura atómica y enlaces quícos*. fuente [https://es.wikipedia.org/wiki/Polaridad\\_\(qu%C3%ADmica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Polaridad_(qu%C3%ADmica))

Predicción de las solubilidades:

“Existe reglas que se pueden utilizar para determinar la solubilidad en agua de cualquier compuesto químico, ya sea orgánico o inorgánico:

- ✓ Sales de sodio, potasio y amonio son muy solubles
- ✓ Ácidos minerales ( $H_2SO_4$  y  $HCl$ ) son solubles, excepción de ciertos cationes de los metales pesados (Pb, Ag)
- ✓ Halogenuros (Cl, Br, I) son solubles excepción del fluoruro.
- ✓ Casi todos los carbonatos, hidróxidos y fosfatos son tan solo ligeramente solubles, con excepción de aquellos asociados con  $Na^+$ ,  $K^+$  y  $NH_4$ . “<sup>6</sup>

El producto de solubilidad hace que sea posible calcular la solubilidad residual de una sustancia química, después del tratamiento químico para eliminarla del agua mediante precipitación. De acuerdo con el concepto de producto de solubilidad, la concentración de los cationes multiplicada por la concentración de los aniones da como resultado un producto que es constante a una temperatura dada, un ejemplo sencillo de lo expresado sería el carbonato de calcio.



En la tabla 1.3 se muestran solubilidades de compuestos inorgánicos a 20°C

---

<sup>6</sup> Kemmer N. Frank, Op. Cit., pág. 3-11

**Tabla 1.3 Solubilidad de algunos compuestos inorgánicos en agua a 20°C**

Catión	Compuesto	Solubilidad % en peso
H <sup>+</sup>	HCl	41.9
	HNO <sub>3</sub>	*
	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	*
Na <sup>+</sup>	NaCl	26.5
	NaOH(●H <sub>2</sub> O)	52.1
	NaNO <sub>3</sub>	46.7
	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (●10H <sub>2</sub> O)	17.7
	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (●10H <sub>2</sub> O)	16.2
	Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (●12H <sub>2</sub> O)	9.1
K <sup>+</sup>	KCl	25.4
	KOH(●2H <sub>2</sub> O)	52.8
	KNO <sub>3</sub>	24.0
	K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (●2H <sub>2</sub> O)	53.5
Mg <sup>+2</sup>	MgCl <sub>2</sub> (●6H <sub>2</sub> O)	35.3
	Mg(OH) <sub>2</sub>	0.0
	MgCO <sub>3</sub>	0.0
	MgSO <sub>4</sub> (●7H <sub>2</sub> O)	26.2
Ca <sup>+2</sup>	CaCl <sub>2</sub> (●6H <sub>2</sub> O)	42.7
	Ca(OH) <sub>2</sub>	0.17
	CaSO <sub>4</sub> (●2H <sub>2</sub> O)	0.2
	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	0.0
Fe <sup>+2</sup>	FeCl <sub>2</sub> (●4H <sub>2</sub> O)	40.8
	Fe(OH) <sub>2</sub>	0.0
Fe <sup>+</sup>	FeCl <sub>3</sub>	47.9
	Fe(OH) <sub>3</sub>	0.0

\*solubilidad infinita

Fuente: del Manual del Agua NALCO, tomo I,1994, pág.3-8

En la tabla 1.4 se presenta una serie simplificada de la solubilidad. Los datos de la solubilidad se determinan únicamente de la investigación en el laboratorio.

**Tabla 1.4 Tabla simplificada de solubilidades**

anión→ ↓catión	$F^-$	$Cr^-$	$Br^-$	$I^-$	$HCO_3^-$	$OH^-$	$NO_3^-$	$CO_3^{-2}$	$SO_4^{-2}$	$S^{-2}$	$CrO_4^{-2}$	$PO_4^{-3}$
$Na^+$	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
$K^+$	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
$NH_4^+$	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
$H^+$	S	S	S	S	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	S	CO <sub>2</sub>	S	H <sub>2</sub> S	S	S
$Ca^{+2}$	I	S	S	S	LS	MPS	S	I	MPS	X	S	I
$Mg^{+2}$	MPS	S	S	S	S	I	S	MPS	S	X	S	I
$Ba^{+2}$	MPS	S	S	S	MPS	S	S	MPS	I	X	I	I
$Sr^{+2}$	MPS	S	S	S	MPS	LS	S	I	MPS	X	MPS	I
$Zn^{+2}$	S	S	S	S	MPS	I	S	I	S	I	MPS	I
$Fe^{+2}$	LS	S	S	S	LS	MPS	S	MPS	S	I	X	I
$Fe^{+3}$	LS	S	S	S	I	I	S	I	S	X	X	I
$Al^{+3}$	S	S	S	S	X	I	S	X	S	X	X	I
$Ag^{+1}$	I	I	I	I	I	I	S	MPS	S	I	I	I
$Pb^{+2}$	MPS	S	LS	MPS	I	MPS	S	I	I	I	I	I
$Hg^{+1}$	I	I	I	I	I	I	S	S	MPS	I	MPS	I
$Hg^{+2}$	S	S	S	I	I	I	S	I	MPS	I	LS	I
$Cu^{+2}$	LS	S	S	MPS	I	I	S	I	S	I	I	I

S Soluble, más de 5 000 mg/l

Fuente: Manual del Agua NALCO tomo I,1994, pág. 3-12

LS Ligeramente soluble, 2 000-5 000 mg/l

MPS muy poco soluble, 20-2 000 mg/l

I Insoluble, menos de 20 mg/l X No es compuesto

#### 1.1.4 Quelatación

Un agente quelante es una molécula generalmente orgánica que es muy soluble en agua y reacciona con iones metálicos para mantenerlos en solución. Este proceso es muy utilizado en el tratamiento de agua.

“La ecuación química para la quelatación es similar a la del intercambio iónico. Por ejemplo, un quelante común es la sal de sodio del ácido etilen diamin tetra acético (EDTA). Agregado al agua este quelato reacciona con los iones de calcio para mantenerlos en solución, evitando la formación de incrustaciones de  $\text{CaCO}_3$ .”<sup>7</sup>



La reacción (1.1) es solo parte del proceso de quelatación.

Existen diferentes materiales orgánicos naturales en agua que tienen propiedades quelantes, como el ácido húmico y la lignina. Debido a estas propiedades quelantes, algunos materiales orgánicos interfieren con ciertos procesos de ablandamiento de agua.

Relacionado de cierta forma con la quelatación está el proceso de secuestro, también llamado “tratamiento de umbral”. En este proceso se utilizan diversos compuestos fosfatados llamados polifosfatos.

---

<sup>7</sup> Kemmer N. Frank, Op. Cit., pág. 3-18

## 1.2 Fuentes de abastecimiento de agua

Las fuentes de abastecimiento natural son de dos tipos; aguas superficiales y aguas subterráneas.

### Aguas superficiales

- lagos naturales
- ríos
- embalses
- mar

### Aguas subterráneas

- pozo
- manantiales
- filtraciones subterráneas

### **Aguas superficiales**

Por lo general las instalaciones de procesos dependen de abastecimientos superficiales, ya que en su mayoría representan una fuente de suministro segura, debido a que son de una extensión considerable para cubrir los requerimientos dentro de las plantas.

#### Lagos naturales:

Los lagos pueden proporcionar agua de buena calidad, excepto en sus márgenes y en la vecindad de descargas de drenajes o de corrientes fuertes, se debe de tener cuidado para localizar los puntos de toma de agua. Este tipo de agua requiere un tratamiento mínimo y la disponibilidad de las cantidades de agua constituyen una ventaja.

Por lo general, las aguas de los lagos son hasta cierto punto uniformes en su composición de un día a otro y no varía tanto en su temperatura como los ríos y los embalses.

Otras características de las aguas de los lagos, generalmente de temporada y relacionada con la actividad biológica, es el sabor y el color. Excepto en los casos en que estos son introducidos por las descargas de agua de desecho, por lo general se deben a la materia orgánica, como los aceites esenciales producidos por el crecimiento de las algas.

#### Aguas de ríos:

El agua de ríos presenta turbiedad o enturbiamiento, el contenido mineral y el grado de contaminación varían considerablemente de un día a otro. La variación de la temperatura del agua durante el año también puede hacerla indeseable, especialmente durante los meses calurosos de verano. Este tipo de abastecimiento tiene la ventaja de que la inversión que debe hacerse en la planta de tratamiento es menos, porque no se requiere construir costosos muros de retención, ni canales, ni grandes extensiones de terreno.

#### Agua de embalses:

La cantidad de agua que lleva una corriente está sujeta a grandes variaciones de un día a otro, así como durante las diferentes épocas del año.

Cuando el consumo de agua en las instalaciones de proceso es mayor o incluso cercano al del caudal de la corriente, puede ser necesario construir una represa, creando así un embalse para almacenar el agua durante la temporada de lluvias la cual será utilizada durante la subsecuente época de estiaje. Los embalses tienen, además, la ventaja de eliminar la mayor parte de lodos o enturbiamiento del agua por sedimentación, durante el almacenamiento. Puede haber ventajas adicionales, tales como disminución de bacterias y también desventajas como la producción de olores y sabores debido a las algas.

#### Agua de mar:

La composición del agua de los océanos es generalmente uniforme. Puede haber cambios locales en la salinidad causados por los arrastres de las aguas superficiales hasta el océano, el flujo de los ríos hacia el mar o la fusión de los glaciales y de los polos. El agua de mar es una fuente valiosa de agua para la industria, previo tratamiento.

“Los distintos procesos existentes, se pueden agrupar en dos grandes tipos: procesos que separan el agua y procesos que separan los iones salinos. Dentro de estos dos grandes grupos se puede hacer la siguiente clasificación:



- A) Proceso que separa agua
  - a) Destilación [...]
  - b) Cristalización: Congelación y Formación de hidratos
  - c) Filtración: Osmosis inversa
  
- B) Procesos que separan sales
  - a) Filtración selectiva
  
  - b) Intercambio: Cambio iónico. Adsorción<sup>8</sup>

### **Aguas subterráneas**

Este tipo de abastecimiento es utilizado cuando no hay disponibilidad de una fuente superficial, ya que existen limitaciones en los volúmenes de acuíferos. Un inconveniente de las aguas subterráneas es su tendencia a ser de una excesiva dureza, lo cual se debe a que los constituyentes que causan la dureza son lavados de los depósitos minerales. Por otro lado, el abastecimiento subterráneo tiene la ventaja de proporcionar aguas que requieren un menor grado de tratamiento porque las “impurezas” se eliminan de forma natural a medida que atraviesan las capas del suelo y el subsuelo.

Agua de pozo:

Debido a la propiedad del agua de ser un buen disolvente el agua de pozo tendrá que ver en su composición química de las formaciones geológicas del sitio en que se perfore

“Al filtrarse el agua a través del suelo, los organismos presentes en la tierra consumen el oxígeno disuelto y producen dióxido de carbono, uno de los principales agentes corrosivos en la disolución de minerales de las estructuras geológicas. Es común encontrar hierro y manganeso en las aguas que carecen de oxígeno, si estas han estado en contacto con

---

<sup>8</sup> Torres Corral Miguel, *La desalación de agua de mar, ¿Recurso hídrico alternativo?*, pag 135. Fuente [http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c11/\\$File/PGA-c11.pdf](http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c11/$File/PGA-c11.pdf)

minerales que contienen hierro. Los pozos profundos que contiene oxígeno están generalmente libres de hierro.”<sup>9</sup>

Agua de manantiales:

El agua de manantial surge a través de la corteza terrestre, presenta la composición química del lugar donde está ubicado; existen dos tipos de manantial el intermitente y el continuo también conocido como artesiano este es artificial, es decir provocado por el hombre.

Cuando el agua brota a la superficie puede formar un estanque o arroyo. Las aguas termales y géiseres, también son manantiales.

### **1.3 Impurezas contenidas en el agua**

Como ya se pudo apreciar en párrafos anteriores al agua tendrá en su composición diferentes elementos de acuerdo a la fuente de que provenga, esto por su acción disolvente, también podremos encontrar contaminantes industriales y polvos que tendrán bacterias, levaduras, mohos, etc.

Es por esta razón que tendrá que hacerse un análisis del agua y darle las características adecuadas para su empleo.

Para efecto de la utilización de las aguas en el uso industrial las impurezas que están presentes en ella son:

- Sustancias minerales disueltas
- Gases disueltos
- Turbidez y sedimentos
- Color y materia orgánica
- Sabores y olores

---

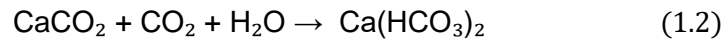
<sup>9</sup> Kemmer N: Frank, Op. Cit., pág. 2-11 y2-12

➤ Microorganismos

**Sustancias minerales disueltas**

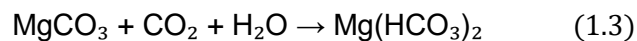
Todas las aguas naturales, ya sea como agua cruda o después de tratamiento, contienen materia mineral disuelta, estos constituyentes minerales difieren grandemente en las cantidades relativas presentes en varios suministros de agua. Los más abundantes son los bicarbonatos, sulfatos y cloruros, en los que se encuentran calcio, magnesio y sodio, combinados con sus respectivos aniones. Se describirá cada sal y sus solubilidades se dan en términos de su equivalente de carbonato de calcio.

*Bicarbonato de calcio*  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ . Este compuesto existe únicamente en solución y se forma por la acción del agua que contienen  $\text{CO}_2$  sobre la piedra caliza, mármol, calcita dolomita y otros minerales que contiene carbonato de calcio de acuerdo a la siguiente reacción.



Cuando la temperatura aumenta, la solubilidad disminuye debido a que se incrementa la velocidad de la reacción en sentido contrario a la expresada por la ecuación anterior. En las calderas la reversibilidad es completa y el contenido total de bicarbonato de calcio se descompone en bióxido de carbono, agua y carbonato de calcio, este último tiene solubilidad muy baja “0.0013 g/100 mL (25 °C).”<sup>10</sup>

*Bicarbonato de magnesio*  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ . Este compuesto solo existe en solución y se forma por la acción del agua que contiene bióxido de carbono libre sobre la magnesita, dolomita, piedra caliza y otros minerales que contengan carbonato de magnesio, de acuerdo con la siguiente reacción.



La solubilidad del bicarbonato de magnesio en agua a 0°C saturada con bióxido de carbono y a presión atmosférica tiene una solubilidad de 37,100 ppm. Mientras que la solubilidad

---

<sup>10</sup> [https://es.wikipedia.org/wiki/Carbonato\\_de\\_calcio](https://es.wikipedia.org/wiki/Carbonato_de_calcio)

máxima del bicarbonato de magnesio es alta, la cantidad que de él se encuentra en el suministro de agua natural, usualmente esta por los 75 ppm y muy rara vez alcanza el doble de esta cifra. El ion bicarbonato primeramente es calculado unido al calcio y al exceso de magnesio, y la cantidad restante al sodio; con el aumento de temperatura la solubilidad decrece debido a que la ecuación anterior es reversible, formándose primero bióxido de carbono, agua y carbonato de magnesio, el cual, en agua pura tiene una solubilidad de 101 ppm a 32°C y 75 ppm a 100°C. A altas temperaturas como sucede en las calderas, toma lugar otro cambio a medida que el carbonato de magnesio reacciona con el agua para liberar bióxido de carbono e hidróxido de magnesio, que tiene una solubilidad muy baja 17 ppm a 0°C y 8 ppm a 100°C.

*Bicarbonato de sodio  $NaHCO_3$ .* Es una sal blanca comúnmente conocida como “bicarbonato de soda” y “soda de hornear”. Su solubilidad en agua es de 38,700ppm a 0°C, esta solubilidad aumenta al elevarse la temperatura, pero a los 37°C empieza a perder bióxido de carbono y a los 100 °C se descompone a bióxido de carbono, agua y carbonato de sodio altamente soluble. En las calderas reacciona con el agua de manera que la mayor parte de él se convierte en bióxido de carbono e hidróxido de sodio.

*Sulfato de calcio  $CaSO_4$ .* El sulfato de calcio se presenta en forma deshidratado ( $CaSO_4 \bullet 2H_2O$ ) en minerales tales como yeso, alabastro y selenita; el compuesto de  $CaCl_2$  forma varios hidratos tales como el monihidrato ( $CaCl_2 \bullet H_2O$ ). Todas estas formas son deliquescentes y altamente solubles 336,000ppm a 0°C y 554,00 ppm a 100 °C. En las calderas de vapor es corrosivo.

*Cloruro de magnesio  $MgCl_2$ .* Se encuentra en agua de mar, salmueras naturales, depósitos salinos, etc. Cuatro de sus formas minerales son: la cloromagnesita ( $MgCl_2$ ). El hexahidrato “Biscofita”  $MgCl_2 \bullet KCl \bullet 6H_2O$ , la doble sal con cloruro de potasio “Carnalita”  $KMgCl \cdot 6H_2O$  y la “taquidrita”  $CaMg_2Cl_6 \cdot 12H_2O$ . El cloruro de magnesio es deliquescente y muy soluble 362,000 ppm a 0°C y 443,000 ppm a 100°C. Es muy corrosivo en calderas de vapor, y reacciona con el agua a dichas temperaturas para formar ácidos clorhídrico e hidróxido de magnesio.

*Cloruro de sodio NaCl.* Se le conoce ampliamente con el nombre de “sal común”. El nombre mineralógico es “halita”. Es el principal constituyente mineral del agua de mar, se encuentra también en depósitos salinos, lagos salados, salmueras naturales, etc. Es anhidro en su composición, pero sus cristales a menudo encierran algo de agua, al igual que las otras sales de sodio encontradas en las aguas naturales y tratadas, tiene una alta solubilidad y no forma depósitos.

Otras sustancias minerales que pueden ser encontradas en las aguas naturales, incluyen sílice, hierro, manganeso, nitrato, nitrito, potasio, ácidos, etc.

*La sílice (SiO<sub>2</sub>).* Este se encuentra en estado de alta pureza en el cuarzo y en varias arenas. Es también un constituyente principal del granito, arcilla y de otros minerales. Se le encuentra prácticamente en todas las aguas naturales y puede estar presente en cantidades que varían de 1 ppm o menos hasta más de 100 ppm.

*El hierro (Fe).* Se encuentra presente en muchos suministros de agua en cantidades pequeñas, si se encuentra presente en 0.1 ppm o menos puede ser considerado como despreciable para muchos usos industriales. Si se presenta en cantidades mayores de 0.2 ó 0.3 ppm generalmente es objetable. El manganeso es un constituyente raro del agua, pero es más dañino que el hierro y su tolerancia para usos especiales son menores que para el hierro.

*Los nitritos.* Solo se presentan como trazas o están ausentes, pero de esto hay excepciones, si se encuentra presentes cantidades apreciables, es necesario hacer una determinación de nitratos.

Debido a que el potasio está presente en muy pequeñas cantidades y sus propiedades son muy semejantes a las del sodio se agrupa con éste. Los fluoruros que pueden encontrarse en aguas de ciertas localidades desde cantidades menores de 1 hasta 8 ppm, son importantes desde el punto de vista de la salud, pero son de poca importancia para la mayoría de las industrias.

Los constituyentes mostrados en la tabla 1.5 son los minerales que se necesitan considerar respecto a la cantidad mineral disuelta para los usos industriales ordinarios.

**Tabla 1.5 Minerales usualmente determinados en agua de uso industrial**

Nombre	Formula	Expresado como	Nombre común
Calcio	Ca	CaCO <sub>3</sub>	*dureza de calcio
Magnesio	Mg	MgCO <sub>3</sub>	**dureza de magnesio
Sodio	Na	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	-
Bicarbonato	HCO <sub>3</sub>	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	Alcalinidad de carbonato
Carbonato	CO <sub>3</sub>	CaCO <sub>3</sub>	Alcalinidad caustica
Hidróxido	OH	Ca(OH) <sub>2</sub>	-
Cloruro	Cl	CaCl <sub>2</sub>	-
Sulfato	SO <sub>4</sub>	CaSO <sub>4</sub>	-
Nitrato	NO <sub>3</sub>	Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-
Acidez mineral**	-	-	Acidez mineral
Fluoruro	F	F	-
Sílice	SiO <sub>2</sub>	SiO <sub>2</sub>	-
Hierro	Fe	Fe	-
Manganeso	Mn	Mn	-

\*La suma de ambas es la dureza total

\*\*La acidez mineral puede ser debida a ácido sulfúrico o sulfato de hierro, aluminio o manganeso y acidez encontrado en agua de minas y en algunas aguas superficiales contaminadas con agua de proceso o de drenajes de mina

**Fuente: Manual del Agua NALCO, tomo I, 1994**

### **Gases disueltos**

En el proceso de lavado atmosférico conocido como el ciclo hidrológico, los gases disueltos de la atmosfera son solubles en agua.

Los gases disueltos que se encuentran en los abastecimientos de agua son:

- ✓ Bióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)
- ✓ Oxígeno (O<sub>2</sub>)
- ✓ Nitrógeno (N<sub>2</sub>)
- ✓ Sulfato de hidrógeno (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)
- ✓ Metano (CH<sub>2</sub>)

De los gases antes mencionados el bióxido de carbono y oxígeno son la causa principal de la corrosión encontrada en calderas, líneas de condensados y equipos accesorios.

*Bióxido de carbono:*

Se forma por la descomposición de la materia orgánica, también puede ser adicionado por fisuras en la corteza terrestre provocando la disolución de muchos minerales que recogen el agua durante su recolección a través del suelo, el bióxido de carbono al desprenderse y quedar libre en su descomposición con el **bicarbonato de calcio, viaja con el vapor a través de las líneas, cuando este vapor se condensa el bióxido de carbono forma ácido carbónico que es muy corrosivo el cual debe de neutralizarse.**

El bióxido de carbono libre lo podemos determinar titulando una muestra, con solución valorada de carbonato de sodio o hidróxido de sodio que solo se encuentra en carbonato (no indica color con la fenolftaleína).

Formas para remover el bióxido de carbono:

- a. Aire desgasificador o desaireador al vacío
- b. En caliente por medio de un desairados al vacío
- c. Adición de productos químicos
- d. Por medio de un filtro neutralizado que contiene granos de calcita

*Oxígeno:*

Si tenemos presente oxígeno seco, su acción sobre el metal no es corrosivo, pero se vuelve muy corrosivo cuando se encuentra en solución, por esto en aguas de uso industrial se

vuelve de vital importancia el oxígeno disuelto, en pequeñas cantidades el oxígeno disuelto (mayor de 0.003 mg/litro) en alimentación a calderas de alta presión provoca efectos severos de corrosión.

El oxígeno en agua es muy corrosivo para metales como acero, fierro y latón. Un valor alto de pH, retarda la velocidad de corrosión por oxígeno y un valor bajo la eleva.

En calderas de baja presión una pequeña incrustación con minerales de calcio y magnesio, usualmente funcionan como protección contra la corrosión.

El oxígeno disuelto ataca las tuberías de fierro y acero formando tubérculos bajo los cuales se encuentra una cavidad.

Concluyendo se puede decir que el control de la corrosión se puede realizar por los siguientes métodos:

- Manteniendo un elevado valor de pH evitando de esta manera tener una alta concentración de iones de hidrogeno.
- Reducción o eliminación del contenido del de oxígeno
- Reducción del contenido de bióxido de carbono
- Mantener una ligera incrustación en la superficie del metal de los fluxes
- Adicionar produciendo químico adecuado
- Uso de equipo de aireadores

#### *Nitrógeno:*

Al analizar aguas, el nitrógeno prácticamente nunca se determina, puesto que es inerte, relativamente no tiene ninguna importancia determinarlo. Ciertas bacterias tales como las que se encuentran en las raíces del trébol, chícharo y frijol, tienen la habilidad de tornar aire de la atmósfera y formar compuestos con él. También las descargas eléctricas atmosféricas provocan la unión del nitrógeno con el oxígeno, de manera que el agua de lluvia puede contener nitratos que pueden servir de alimento a las plantas. Por otra parte, el nitrógeno es casi inerte y no tiene efecto corrosivo sobre los suministros de agua.



El nitrógeno está presente en aguas superficiales y agua aireadas. También se ha encontrado en aguas de manantiales y aguas de pozo profundo y probablemente se encuentre en las aguas subterráneas, pero no hay datos analíticos que lo corroboren.

*Sulfato de hidrógeno:*

Las aguas que contienen sulfuro comúnmente se conocen como aguas sulfurosas. Sus propiedades más características son su olor a huevo podrido y su marcada corrosividad. Su olor es característico del gas sulfuro de hidrógeno. Se aprecia aun en frío en concentraciones en el agua de 0.5 ppm o más y cuando están presentes en cantidades de 1 ppm o más su olor es muy desagradable. Si el agua tiene un pH alto, el olor puede ser poco, ya que en este caso mucho azufre puede estar presente como un sulfuro alcalino en lugar del sulfuro de hidrógeno.

La mayoría de las aguas sulfurosas son aguas subterráneas, en forma común las aguas que se pueden usar tienen por debajo de 10 ppm, y la gran mayoría contiene menos de 5 ppm. Ocasionalmente un pozo profundo de agua se ennegrece con sulfuro ferroso, usualmente esta sustancia está finamente dividida y basta una pequeña cantidad de sulfuro ferroso para dar el efecto mencionado. Estas aguas negras pueden también a veces presentarse al final de las líneas principales en donde por acción bacteriana los sulfatos se han reducido a sulfuros. El remedio para esto es la cloración a altas dosis al principio y el purgado de las líneas y tratar de mantener una pequeña dosis de cloro residual. Las salmueras de los campos petroleros frecuentemente contienen cantidades objetables de sulfuro de hidrógeno y pueden ser muy corrosivas.

Gran parte de los depósitos debido a la corrosión por aguas sulfurosas son de sulfuro ferroso, algunos análisis indican que en tuberías muy corroídas los depósitos pueden consistir de  $\text{FeS}_2$  en lugar de  $\text{FeS}$ . La aeración se emplea ampliamente para reducir el contenido de sulfuro de las aguas, pero la reducción especialmente en aguas de alcalinidad alta es únicamente parcial.

### *Metano:*

El metano comúnmente se desprende de aguas estancadas y pantanosas donde se llevan a efecto procesos de putrefacción (de aquí su nombre común de gas de los pantanos).

De una manera general, las aguas que contienen metano se han encontrado en acarrees glaciares o en regiones de pozos de gas y petróleo y en geiser. En un reporte titulado "Methane in Ground Waters", Buswell y Larson reportan análisis de algunas aguas que contiene metano en pozos del estado de Illinois. La cantidad de metano en esas aguas varían de 0.1 a 11.6 pies cúbicos de 1000 galones. Esto es equivalente aproximadamente de 0.8 a 87 ml, de metano por litro de agua. Como la solubilidad del metano a 60°F y a presión atmosférica es únicamente un poco mayor de 36 ml/l, un agua que contenga 87 ml/l efervecerá a temperaturas ordinarias cuando la presión disminuya.

Mientras que el metano aparentemente no es objetable en agua para beber, es aconsejable airear el agua independientemente de su uso industrial o casero, para eliminar así el peligro de explosión y fuego. Esto puede hacerse de una manera simple con cualquier tipo de aireador abierto, de manera que el gas puede escapar libremente a la atmosfera.

### **Turbidez y sedimentación**

Debido a la erosión en la superficie de la tierra la turbidez es una característica en casi todas las aguas. Cualquier impureza insoluble finamente dividida que disminuye la claridad en el agua es lo que se conoce como turbidez. La naturaleza de estas impurezas puede ser de origen inorgánico; arcilla, carbonato de calcio, silica, hidróxido de azufre, etc.

El sedimento, es el material que debido a su tamaño rápidamente se asienta.

La turbidez es la medida de la opacidad del agua más no es la determinación de la masa de partículas suspendidas.

El método de Jackson, es el método estándar aceptado para la determinación de turbidez.

El método consiste en determinar la turbidez a partir de la profundidad del agua a través de la cual la llama de una bujía deja de percibirse cuando se ve a lo largo de un tubo de cristal.

La remoción de turbidez y sedimento se maneja como una sola cosa y son eliminados por:

- Coagulación y filtración
- Coagulación y asentamiento
- Coagulación, asentamiento y filtración

### **Color y materia orgánica**

El color se debe generalmente a la existencia de material orgánico la cual proviene de desechos industriales, municipales, de la vegetación en descomposición. La existencia de iones metálicos y de ligninas, ácidos húmicos y otros productos de vegetación que se considera existen en suspensión coloidal.

El color amarillento muy pálido o café es explicable en el agua debido a que la corriente de agua arrastra la descomposición vegetal.

Una clasificación amplia de estos materiales orgánicos es: sustancias húmicas (compuestos solubles en agua), ácido fúlvico (materia alcalino soluble) y húmicas (materia de alto peso molecular e insoluble en agua).

Para medir el color natural del agua se utiliza las escalas artificiales de color, utilizando testigos preparados con cloroplatinato de potasio y cloruro de cobalto.

Como el color de las aguas naturales es de naturaleza orgánica aumentándose por el hierro o manganeso en estado coloidal. Los estándares de color de tipo inorgánico solo miden la intensidad del color en el agua y no la masa de los agentes colorantes.

Con los tubos de Nessier se pueden observar lecturas de colores por debajo de lo que usualmente no podrían detectarse de manera directa, comparándolos contra colores estándar.

Los colores arriba de 20 unidades pueden ser observados directamente y se considera que esta cifra es alta.

La materia orgánica presente en el agua de suministro industrial interfiere con los procesos de tratamiento de agua, agota las resinas intercambiadoras de iones empobreciendo la calidad del agua por lo cual la resina tiene un promedio de vida corto. La reducción o remoción de color y materia orgánica se realiza por medio de la coagulación, sedimentación

y filtración. El coagulante más utilizado es el sulfato de aluminio, la coagulación se efectúa con un rango de pH 3.5 a 5.3 o bien será a un pH arriba de 9.0.

### **Sabores y olores**

Los sabores y olores se generan por los minerales que constituyen el agua y otros por la actividad biológica. Debido a esta actividad, cuando muere una población grande de organismos se producen olores y sabores muy desagradables.

Estos olores y sabores son muy diversos por lo cual su clasificación es muy compleja.

Para la destrucción de los olores, se utilizan técnicas como la oxidación de las sustancias, siendo la cloración el método más común empleado de los agentes oxidantes, otros oxidantes empleados son el ozono, el permanganato de potasio y el sulfato de calcio.

Universalmente el método más empleado y usado es el carbón activado para el control de olores y sabores.

El carbón activado puede ser usado en forma pulverulenta en las pilas de asentamiento o coagulación o bien en forma granulada en los filtros.

### **Microorganismos**

Los microorganismos están presentes prácticamente en todas las aguas naturales, estos crecimientos orgánicos se encuentran en mayor cantidad en las aguas superficiales. Existen miles de variedades, algunas son visibles a simple vista y otras no. Son clasificadas como plantas (algas) y otras como animales (protozoarios), de diferentes formas, tamaños y colores.

Los tipos de organismo que se encuentran en un control microbiano son: bacterias, hongos, algas y protozoarios.

Las bacterias, son pequeños organismos vivos que se reproducen por fisión o por esporas, que se identifican por sus formas: cocos, esféricas, bacilos con forma de bastoncillos y espirilos, curvas, etc.

Las bacterias en los sistemas acuáticos producen sabores y olores indeseables y se agrupan como sigue:

- Bacterias formadoras de limo
- Bacterias formadoras de esporas
- Bacterias depositadoras de hierro
- Bacterias nitrificadoras
- Bacterias reductoras de sulfatos
- Bacterias corrosivas anaeróbicas

En aguas que contiene hierro y magnesio pueden estar presentes bacterias de ambos minerales que se denominan “crenatrix” que son extremadamente molestas.

Las algas verdes simples que contienen clorofila muchas son microscópicas, pero en condiciones favorables para su crecimiento crecen en colonias y producen capas y masas perjudiciales, utilizan la luz solar para efectuar la fotosíntesis.

En su mayoría las algas crecen densas y fibrosas y son caldo de cultivo para que crezcan bacterias anaeróbicas bajo estos depósitos de algas, ocasionando en tuberías taponamientos.

Los hongos son organismo unicelular sin clorofila, a veces filamentosos, el moho y las levaduras se incluyen en esta categoría crecen mejor en ausencia de luz. A menudo se les encuentra en madera cuando el relleno de las torres es de este material.

Los protozoarios, crecen y se desarrollan en cualquier agua que está contaminada, su presencia es indicio de una mala desinfección, el hábitat natural de estos microorganismos es la humedad ya que muchos de estos organismos patógenos mueren por secado, se recomienda para evitar el ataque microbiano en la madera tenerla a un contenido de humedad menor al 20%.

Por medio de la ósmosis, cuando los microbios se colocan en solución salina de 10-15% o en solución azucarada de 50-70%, se deshidratan las células de tal manera que mueren.

Como se puede observar tanto para uso municipal como para uso industrial el control de esta actividad microbiana es de vital importancia para evitar efectos nocivos con la salud y las plantas industriales.

Existen métodos para el control de la actividad microbiana, como observamos, las algas aumentan su proliferación con la luz del sol, de tal manera lo recomendable es almacenar el agua en depósitos cerrados para prevenir su crecimiento. En los depósitos de gran tamaño se emplean productos químicos para evitar su crecimiento.

En las plantas industriales se emplea cloro para la destrucción de estos organismos y un agente coagulante, posteriormente se realiza una filtración de este proceso continua una poscloración.

Productos químicos más usados para el control microbiano:

- Biosidas oxidantes
- Biosidas no oxidantes
- Compuestos orgánicos
- Fenoles clorados
- Biosidas catiónicas
- Organometálicos

## CAPÍTULO 2

### PROPIEDADES DEL VAPOR DE AGUA

#### 2.1 Energía interna y calor

“La termodinámica es la rama de la ciencia que se ocupa de los principios de la transformación de energía en sistemas macroscópicos...”<sup>11</sup>

“La termodinámica es una herramienta analítica teórica y práctica que interpreta fenómenos naturales desde el punto de vista de las relaciones de materia y energía...”<sup>12</sup>

“La primera ley de la termodinámica establece que la energía se conserva, que, aunque es factible alterar su forma y transferirla de un lugar a otro, la cantidad total permanece constante...”<sup>13</sup>

La materia está constituida por átomos y estos están en constante movimiento. En la fase gaseosa la molécula tiene más libertad y energía que en estado sólido o líquido, pero también en estado sólido existe la actividad molecular.

Cuando se calienta un sólido y su temperatura gradualmente es aumentada hasta el punto que la actividad molecular sea tan grande que la sustancia no pueda existir como sólido gradualmente empezara a cambiar a la forma líquida. Durante este proceso, se requiere de un gran aumento de energía para efectuar el cambio de sólido a líquido, pero la temperatura permanece constante. Esta energía se conoce con el nombre de **calor de fusión**. Si se agrega más energía al líquido resultante, la temperatura continuará elevándose hasta tener una temperatura en la cual el líquido empezará a transformarse en vapor o estado gaseoso. Aquí de nuevo la temperatura permanecerá constante durante la

---

<sup>11</sup> Perry Robert; Chilton, *Manual del Ingeniero Químico*, 2ª edición en español, 1982, pág. 4-47.

<sup>12</sup> Rodríguez Jorge A., *Introducción a la Termodinámica con algunas aplicaciones de ingeniería*, Universidad Tecnológica Nacional, pág. 1. Fuente <http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Curso%20Mabe%20Termo/Introducci%C3%B3n%20a%20la%20Termodinamica.pdf>

<sup>13</sup> Perry Robert, Op. Cit. pág. 4-47.

ebullición, y la energía agregada, a fin de efectuar el cambio de fase, es llamado **calor de vaporización**.

Considerándose como ejemplo el proceso familiar hielo-agua-vapor:

Se tiene 1 Kg de hielo a  $-32^{\circ}\text{F}$  en un cilindro a la presión de 1 Bar, si el hielo es calentado, cuando su temperatura llega a  $32^{\circ}\text{F}$ , éste empezará a cambiar a líquido y su temperatura permanecerá constante en  $32^{\circ}\text{F}$  hasta que todo el hielo en contacto con el agua se haya fundido. Para efectuar este cambio, el calor de fusión suministrado al hielo debe ser de 144 BTU/lb (más exactamente (143.35)).

En las condiciones de 1 BAR Y  $32^{\circ}\text{F}$  el agua se encuentra en fase líquida y tiene un determinado volumen específico (**Estado 1**). Si se continúa calentando la temperatura aumentará y su volumen específico será mayor y cambiará de líquido a vapor, al llegar a la temperatura de  $212^{\circ}\text{F}$ . Para efectuar este cambio de líquido a vapor deberá suministrarse 972.3 BTU/lb de agua. Se requiere de este gran aumento de energía para romper las interacciones moleculares de la condición del estado sólido para pasar a la fase vapor, incrementándose el volumen del vapor hasta ocupar el espacio del cuarto mismo donde está el líquido expandiéndose contra la presión atmosférica. La temperatura permanece constante durante la vaporización. Si el vapor resultante es calentado fuera de su contacto con el líquido, se tendrá un incremento de temperatura respecto de la temperatura de ebullición o saturación y se tendrá entonces vapor sobrecalentado. Todo este proceso se muestra en la *figura 2.1*

Si se invierte completamente el proceso y el calor es sustraído, ocurrirán los mismos cambios, pero en orden invertido. Durante la condensación, la cual toma lugar a la temperatura constante de  $212^{\circ}\text{F}$ , deberán sustraerse 972.3 BTU/lb de vapor condensado para poder efectuar el cambio y durante la congelación, la cual se efectúa a la temperatura de  $32^{\circ}\text{F}$ , deberá sustraerse 143.35 BTU/lb de agua.

**A esta forma de energía la cual es almacenada en las moléculas o átomos de las sustancias, se le conoce como energía interna.** Está es una forma de la **energía térmica** y es incorrectamente llamada “calor”. Es preferible llamar a esta energía interna la cual está asociada con la misma sustancia y reservarse el término “calor” **para la transferencia de energía** que ocurre cuando existen diferencias de temperaturas. El término calor será



restringido para describir el flujo de energía que se obtenga al haber un gradiente de temperatura.

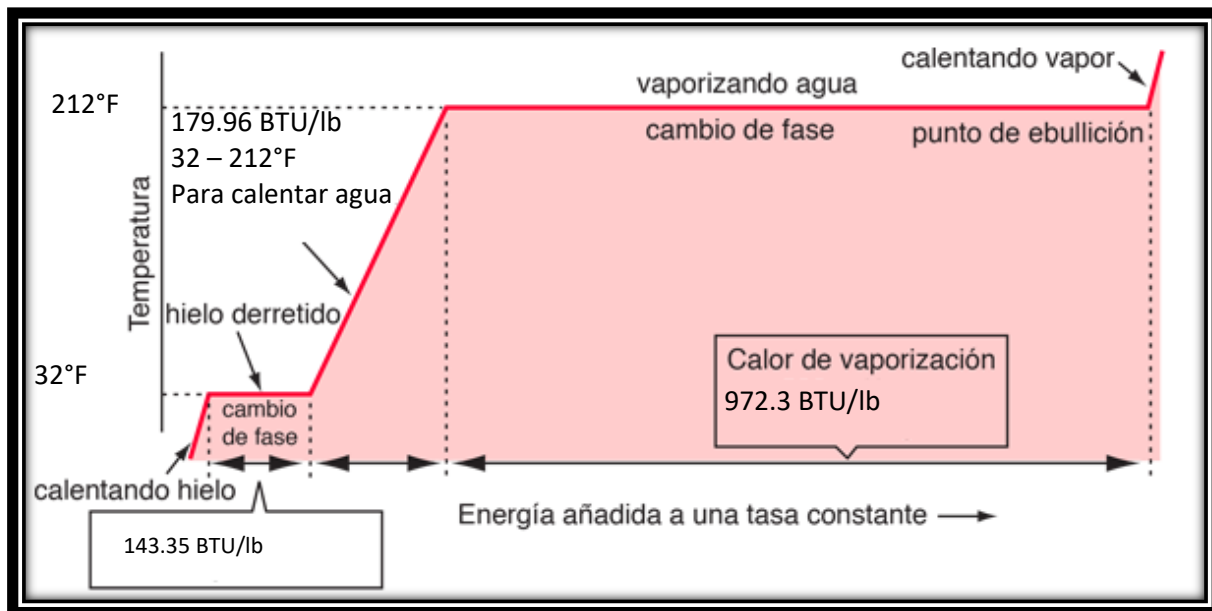


Figura 2.1 Proceso hielo-agua-vapor

Fuente: [hyperphysics.phy-astr-gsu.edu/hbasees/thermo/phase.html](http://hyperphysics.phy-astr-gsu.edu/hbasees/thermo/phase.html)

## 2.2 Definición de algunos conceptos termodinámicos

**“Sistema, frontera, medio exterior:** Un sistema termodinámico es aquella parte del universo físico cuyas propiedades se están investigando...”<sup>14</sup>

**“Calor:** En termodinámica se define el calor como una cantidad que fluye a través de la frontera de un sistema durante un cambio de estado, en virtud de una diferencia de temperatura entre el sistema y su medio exterior, y que fluye de un punto de mayor a un punto de menor temperatura.”<sup>15</sup> Esta forma de energía provoca un cambio físico en las sustancias que es calentada, así por ejemplo los metales se expanden y pueden llegar a

<sup>14</sup> J. A. Beattie, *Lectures on Elementary Chemical Thermodynamics*, Fuente Castellan Gilbert W., Físicoquímica, Ed. Fondo Educativo Internacional, S.A., 1974, pág. 103.

<sup>15</sup> J.A: Beattie, Op. Cit., pág. 105.

fundirse, y cambiar al estado líquido, los líquidos pueden vaporizar y el vapor generado al hacer contacto con una superficie a menor temperatura condensar.

**Calor latente:** es la cantidad de calor requerida para lograr cambiar el estado físico de una sustancia sin que haya variación de temperatura.

**Calor sensible:** es el calor que produce elevación de temperatura en un cuerpo.

**Trasmisión de calor:** es el flujo de calor de un cuerpo de temperatura más alta que otro que es receptor, existen tres mecanismos de transferencia de calor.

a) **Conducción.**

Se realiza entre dos cuerpos o diferentes partes de un sistema sólido requiriéndose tan solo de un gradiente de temperatura.

b) **Convección.**

Ocurre entre partes frías y caliente de un fluido por medio de una mezcla, es decir, que la parte del líquido o gas que están más en contacto con la fuente de calor sufre un cambio de densidad lo que lo obliga a ascender y provoca un movimiento global durante el cual ocurre la transferencia, si el fenómeno se efectúa de manera natural hay una convección libre, si no es así y se induce el movimiento por algún medio mecánico se tiene una convección forzada.

c) **Radiación.**

El calor es transferido en paquetes de energía por medio de ondas desde el sistema de mayor temperatura al receptor no haciéndose necesario de alguna manera la presencia de un medio conductor, ya que este fenómeno se puede realizar en el vacío, aun cuando este mecanismo de transferencia ocurra solo a grandes temperaturas.

**Coefficiente de transferencia de calor:** es la cantidad de flujo de calor en Kcal o BTU por hora a través de 1 m<sup>2</sup> o ft<sup>2</sup> de superficie por grado de diferencia de temperatura.

**Sublimación:** es el cambio de fase sólida a fase vapor.

**Evaporación:** es la vaporización de un líquido la cual tiene lugar exclusivamente en la superficie libre del líquido, la evaporación puede tener lugar a cualquier temperatura de líquido, tal es el caso de la evaporación del agua.

**Ebullición:** es la vaporización de un líquido la cual se realiza en el seno del líquido, la ebullición tiene lugar a una temperatura cuyo valor depende de la presión a que está sometido el líquido, a mayor presión mayor temperatura de ebullición.

**Condensación:** es el cambio de vapor a líquido transfiriéndose el calor del vapor a la superficie de condensación.

### 2.2.1 Proceso de vaporización

**Vapor Húmedo:** es aquel que tiene al mismo tiempo la fase líquida y la fase vapor, su temperatura es igual a la de la de ebullición, para definirlo es necesario dar su presión de vapor o temperatura, además de su calidad.

La cantidad de vapor húmedo es la relación del peso del fluido que está en la fase vapor y el peso total del fluido (X)

$$X = \frac{\text{masa de vapor}}{\text{masa total}} = \frac{m''}{m' + m''} \quad (2.1)$$

$m'$  = masa del líquido

$m''$  = masa de vapor

X = 0 (líquido saturado)

X = 1 (vapor saturado, seco)

**Vapor saturado:** son aquellos que tiene una temperatura igual a la de ebullición y consta únicamente de la fase vapor, el cual está a punto de condensarse, puede definirse por su presión o por su temperatura.

**Vapor sobrecalentado:** cuando se habla de un vapor sobrecalentado se hace referencia a aquel que tiene una temperatura superior a la temperatura de ebullición estando obviamente, presente la fase vapor. Para definir un vapor sobrecalentado hay que indicar

su presión y temperatura o bien su sobrecalentamiento. El sobrecalentamiento de un vapor es la diferencia entre la temperatura de ebullición correspondiente a su presión.

Como se ha mencionado el estado de un vapor se define por dos o tres características, de las que hablaremos a continuación.

**Presión:** es la fuerza ejercida por un fluido en la unidad de superficie de la pared del recipiente que lo contiene en el seno mismo del fluido. Es medido mediante un manómetro y se expresa en (Kg/cm<sup>2</sup>, lb/pg<sup>2</sup>, bar)

Los manómetros miden la presión relativa, es decir, la presión arriba de la presión atmosférica. Para obtener la presión absoluta hay que sumar a la lectura del manómetro y la presión atmosférica, en el lugar del experimento. Las tablas y graficas de vapor se refieren a la presión absoluta.

**Presión absoluta:** es la presión que resulta de la adición de la presión manométrica y la presión atmosférica.

**Presión de vacío:** si la presión absoluta es menor que la atmosférica, a la lectura manométrica se le llama presión de vacío.

**Caída de presión:** es la diferencia de presión entre dos puntos, causada por la resistencia a la fricción y condensación en una línea de tubería.

**Temperatura:** es una magnitud física que se mide con un termómetro e indica el grado térmico de un sistema y su **poder de comunicar calor a otros cuerpos.**

### 2.2.2 Propiedades del vapor de agua

Tablas de vapor.

Las tablas de vapor comúnmente están divididas en tres partes que son:

1. Vapor saturado: Temperatura
2. Vapor saturado: Presión
3. Vapor sobrecalentado: Presión y Temperatura

**Tabla 2. 1 Información contenida en tablas de vapor**

P	Presión
T	Temperatura
V	Volumen específico
$V_f$ o $V'$	Volumen específico del líquido saturado
$V_g$ o $V''$	Volumen específico del vapor saturado
$V_{fg}$	Volumen específico de vaporización
h	Entalpía específica
$h_f$ o $h'$	Entalpía específica del líquido saturado
$h_g$ o $h''$	Entalpía específica del vapor saturado
S	Entropía específica
$S_f$ o $S'$	Entropía específica del líquido saturado
$S_g$ o $S''$	Entropía específica del vapor saturado
$U_f$ o U	Energía interna específica del líquido saturado
$U_g$ o U	Energía interna específica del vapor saturado
$Sh$	Grado de sobrecalentamiento

Notas de clase de Ingeniería de Servicio

El agua constituye un buen ejemplo de la clase general de sustancias cuyas propiedades son encontradas en tablas elaboradas con datos experimentales y de valores deducidos de dichos datos. Para cada líquido sobre el que se ejerce una presión conocida existe una cierta temperatura bien definida a la cual para dicha presión toma lugar la evaporación o ebullición del mismo.

Este estado, en el cual el líquido y el vapor están en equilibrio a una temperatura y presión, se le conoce como estado de saturación.

Las tablas de las propiedades del vapor de agua Tabla 2.2 y 2.3 (páginas 38 y 39) dan una lista de las presiones de saturación a las correspondientes temperaturas. Por ejemplo, a la presión de 14,696 lb/in<sup>2</sup> (absoluta) la temperatura de saturación o ebullición es de 212°F; a

100 lb/in<sup>2</sup> (absoluta) el agua no hierve hasta que la temperatura llega a ser 327.81°F. Esta temperatura puede ser leída en la columna opuesta a la columna de presión. Las siguientes dos columnas dan valores del volumen específico  $v_f$ , y del volumen específico del vapor saturado seco  $v_g$ .

“Las tablas de vapor de agua consideran como punto de referencia el agua a 32°F a partir del cual empiezan a contarse los valores de las entalpías. Esto indica que la magnitud de  $h$  para el agua a 32°F arbitrariamente se toma como cero... Si una libra de agua a la presión atmosférica se calienta de 32°F a 212°F, entonces el calor agregado es igual al incremento de entalpías.

$$WC_p (t_2 - t_1) = (1) (1) (212 - 32) = 180 \text{ BTU} \quad (2.2)$$

donde valor es el  $h_f$  del vapor a 212°F. El valor de 180.07 que aparece en las tablas está basado en la definición arbitraria de BTU en términos de la International Table Calorie.

Como el calor específico del agua no es unitario para una gran variación de temperatura  $h_f$  no deberá calcularse sino seleccionarse de las tablas. Por ejemplo, a 100 lb/in<sup>2</sup> para líquido  $h_f$  igual a 298.40 BTU/lb. Para temperaturas de agua inferiores a 212°F, la entalpía a cualquier temperatura es aproximadamente.

$$h_f = (1) (t - 32) \text{ BTU/lb} \quad (2.3)$$

Si una libra de agua 212°F es calentada a la presión atmosférica se encontrará que la temperatura permanece constante pero que será necesario un gran aumento de energía para cambiar esta libra de agua en vapor (vapor de agua). **A esto se llama calor de vaporización o calor latente a la energía necesaria para transformar una libra de agua en una libra de vapor.** A 212 °F (14.696 lb/in<sup>2</sup> de presión) esta cantidad es igual a 970.3 BTU y su valor se encuentra en la columna de valores de  $h_{fg}$  tabla (2.2) pagina 39. La entalpía de cada libra de vapor saturado seco a 32°F como punto de referencia es la suma de  $h_f + h_{fg}$  y es llamada  $h_g$ . A 212°F (14.696 lb/pg<sup>2</sup>)  $h_g = 180.7 + 970.3 = 1150.4 \text{ BTU/lb}$

Durante la ebullición rápida, sucede con frecuencia que parte del agua es asociada con el vapor entregado, en forma de pequeñas gotas o neblina. Si se tuviera el caso de un vapor de agua que tenga 10% en peso de humedad, es obvio que hay 90% de vapor seco. Este porcentaje de vapor seco que está en el vapor de agua se conoce como título del vapor y es costumbre denominarlo con la letra X.

La variación del título X puede ser de 0.0 a 1.0.

La entalpía del vapor húmedo a un título cualquiera es:

$$h_x = h_f + x h_{fg} \quad \text{BTU/lb} \quad (2.4)$$

El volumen específico del vapor húmedo es:

$$v_x = v_f + x v_{fg} = (1 - X) v_f + x v_g \quad \text{pies}^3 \text{ por libra} \quad \text{ó} \quad (2.5)$$

$$v_x = x v_g \quad \text{pies}^3 \text{ por libra} \dots$$

Si se calienta vapor de agua hasta que desaparezcan todas las trazas de humedad, su temperatura se eleva arriba de la temperatura de saturación correspondiente a la presión de saturación. **El vapor sobrecalentado se asemeja a un gas en su comportamiento y en algunos casos puede ser tratado usando las leyes simples de los gases,** pero para casi todos los cálculos incluyendo los efectuados en plantas de fuerza, se recurre a tablas de propiedades de vapor que incluyen propiedades de vapor sobrecalentado. Las tablas (2 y 3) no incluyen valores para ningún sobrecalentado.

Las últimas dos columnas de las tablas (2 y 3) proporcionan valores de la entropía del vapor, la cual es importante en problemas de cálculo en donde interviene el vapor de agua, así como el equipo de generación de vapor.”<sup>16</sup>

### 2.3 Ciclos termodinámicos con vapor

El proceso ya descrito de vaporización se podría repetir a distintas presiones o midiendo temperaturas y volúmenes específicos se determinan los estados de la curva de líquido saturado y vapor saturado. Las dos curvas se encuentran en el punto crítico k *figura 2.2*. A mayores presiones que la del punto crítico es imposible observar la vaporización entre ambas fases.

---

<sup>16</sup> Burgess H. Jennings, Lewis, *Aire acondicionado y refrigeración*, Ed. CECSA, 1954, pág.53,56. 57

T

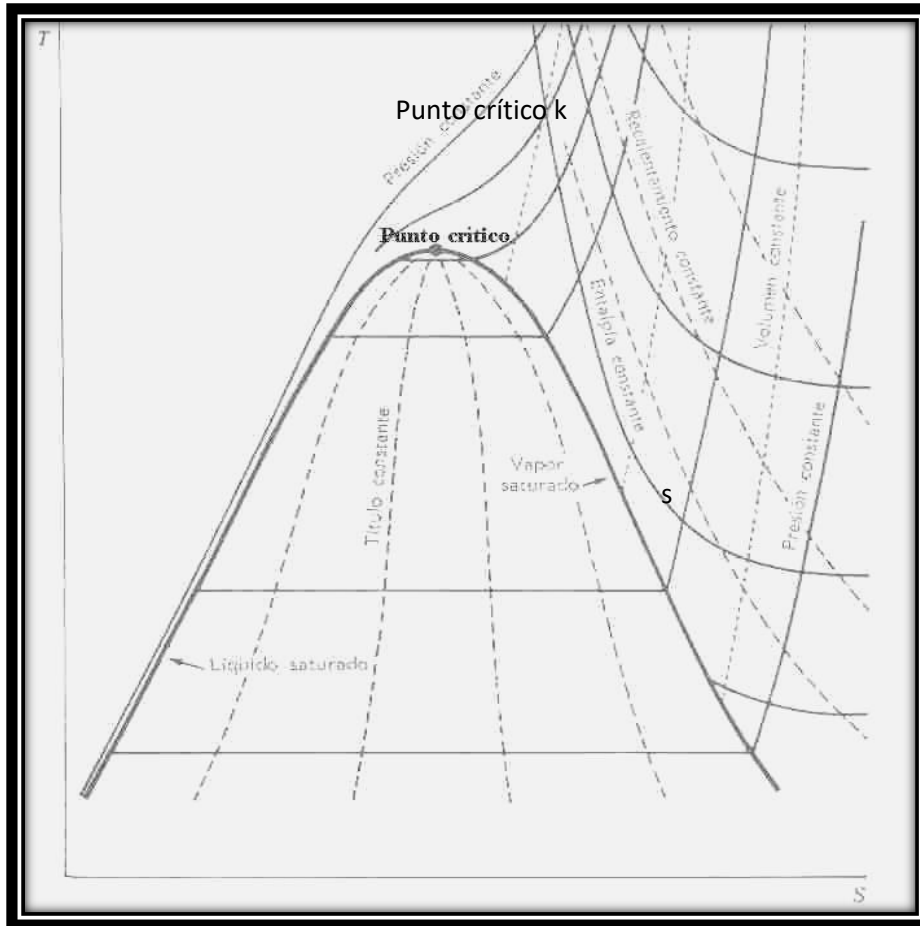


Figura 2.2 Diagrama Temperatura-Entropía de vapor

Fuente:

<http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/Curso%20Mabe%20Termo/Introducci%3%b3n%20a%20la%20Termo%20dinamica.pdf>

La sustancia más utilizada en estos ciclos de potencia es el agua.

A fin de completar un ciclo de potencia con vapor se requiere como mínimo: el generador de vapor, turbina de vapor, condensador y bomba de alimentación. *Figura 2.3.*



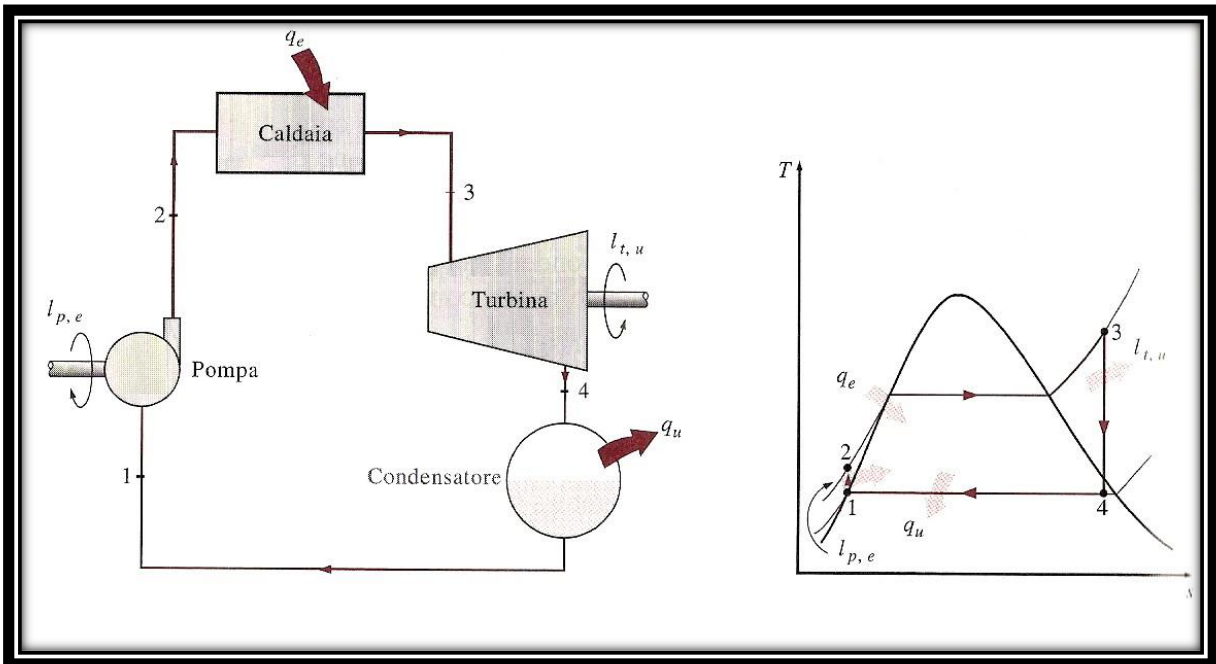


Figura 2.3 Instalación con turbina de vapor, según el ciclo CLASIUS-RANKINE

Fuente: [utptermodinamica2.blogspot.mx/2013/11/ciclo-renkine-smple-sobrecalentamiento.html](http://utptermodinamica2.blogspot.mx/2013/11/ciclo-renkine-smple-sobrecalentamiento.html)

### CICLO DE CLAUSIUS-RANKINE

Representa una instalación con turbina de vapor, operando según el ciclo CLASIUS-RANKINE figura (3). La bomba comprime isotrópicamente desde la presión  $P_0$  del condensado (**estado 1**), hasta la presión  $P$  del generador de vapor (**estado 2**) en el generador se eleva su temperatura, a presión constante, hasta la saturación correspondiente. El vapor seco saturado que se forma, (**estado 3**), se expande isotrópicamente en la turbina hasta alcanzar la presión de  $P_0$  del condensador, (**estado 4**). En el condensador, el vapor húmedo se condensa totalmente, (**punto 1**).

TABLA 2  
VAPOR SATURADO

"Tabla de temperatura"<sup>17</sup>

Temperatura t F	Presión absoluta p lb/plg <sup>2</sup>	Volumen específico		Entalpía			Entropía	
		Líquido saturado v <sub>f</sub>	Vapor saturado v <sub>g</sub>	Líquido saturado h <sub>f</sub>	Evap. h <sub>fg</sub>	Vapor saturado h <sub>g</sub>	Líquido saturado s <sub>f</sub>	Vapor saturado s <sub>g</sub>
32°	0.08854	0.01602	3306	0.00	1075.8	1075.8	0.0000	2.1877
35	0.09995	0.01602	2947	3.02	1074.1	1077.1	0.0061	2.1770
40	0.12170	0.01602	2444	8.05	1071.3	1079.3	0.0162	2.1597
45	0.14752	0.01602	2036.4	13.06	1068.4	1081.5	0.0262	2.1429
50	0.17811	0.01603	1703.2	18.07	1065.6	1083.7	0.0361	2.1264
60°	0.2563	0.01604	1206.7	28.06	1059.9	1088.0	0.0555	2.0948
70	0.3631	0.01606	867.9	38.04	1054.3	1092.3	0.0745	2.0647
80	0.5069	0.01608	633.1	48.02	1048.6	1096.6	0.0932	2.0360
90	0.6982	0.01610	468.0	57.99	1042.9	1100.9	0.1115	2.0087
100	0.9492	0.01613	350.4	67.97	1037.2	1105.2	0.1295	1.9826
110°	1.2748	0.01617	265.4	77.94	1031.6	1109.5	0.1471	1.9577
120	1.6924	0.01620	203.27	87.92	1025.8	1113.7	0.1645	1.9339
130	2.2225	0.01625	157.34	97.90	1020.0	1117.9	0.1816	1.9112
140	2.8886	0.01629	123.01	107.89	1014.1	1122.0	0.1984	1.8894
150	3.718	0.01634	97.07	117.89	1008.2	1126.1	0.2149	1.8685
160°	4.741	0.01639	77.29	127.89	1002.3	1130.2	0.2311	1.8485
170	5.992	0.01645	62.06	137.90	996.3	1134.2	0.2472	1.8293
180	7.510	0.01651	50.23	147.92	990.2	1138.1	0.2630	1.8109
190	9.339	0.01657	40.96	157.95	984.1	1142.0	0.2785	1.7932
200	11.526	0.01663	33.64	167.99	977.9	1145.9	0.2938	1.7762
210°	14.123	0.01670	27.82	178.05	971.6	1149.7	0.3090	1.7598
212	14.696	0.01672	26.80	180.07	970.3	1150.4	0.3120	1.7566
220	17.186	0.01677	23.15	188.13	965.2	1153.4	0.3239	1.7440
230	20.780	0.01684	19.382	198.23	958.8	1157.0	0.3387	1.7288
240	24.969	0.01692	16.323	208.34	952.2	1160.5	0.3531	1.7140
250°	29.825	0.01700	13.821	218.48	945.5	1164.0	0.3675	1.6998
260	35.429	0.01709	11.763	228.64	938.7	1167.3	0.3817	1.6860
270	41.858	0.01717	10.061	238.84	931.8	1170.6	0.3958	1.6727
280	49.203	0.01726	8.645	249.06	924.7	1173.8	0.4096	1.6597
290	57.556	0.01735	7.461	259.31	917.5	1176.8	0.4234	1.6472
300°	67.013	0.01745	6.466	269.59	910.1	1179.7	0.4369	1.6350
310	77.68	0.01755	5.626	279.92	902.6	1182.5	0.4504	1.6231
320	89.66	0.01765	4.914	290.28	894.9	1185.2	0.4637	1.6115
330	103.06	0.01776	4.307	300.68	887.0	1187.7	0.4769	1.6002
340	118.01	0.01787	3.788	311.13	879.0	1190.1	0.4900	1.5891
350°	134.63	0.01799	3.342	321.63	870.7	1192.3	0.5029	1.5783
360	153.04	0.01811	2.957	332.18	862.2	1194.4	0.5158	1.5677
370	173.37	0.01823	2.625	342.79	853.5	1196.3	0.5286	1.5573
380	195.77	0.01836	2.335	353.45	844.6	1198.1	0.5413	1.5471
390	220.37	0.01850	2.0836	364.17	835.4	1199.6	0.5539	1.5371
400°	247.31	0.01864	1.8633	374.97	826.0	1201.0	0.5664	1.5272
410	276.75	0.01878	1.6700	385.83	816.3	1202.1	0.5788	1.5174
420	308.83	0.01894	1.5000	396.77	806.3	1203.1	0.5912	1.5078
430	343.72	0.01910	1.3499	407.79	796.0	1203.8	0.6035	1.4982
440	381.59	0.01926	1.2171	418.90	785.4	1204.3	0.6158	1.4887
450°	422.6	0.0194	1.0993	430.1	774.5	1204.6	0.6280	1.4793
460	466.9	0.0196	0.9944	441.4	763.2	1204.6	0.6402	1.4700
470	514.7	0.0198	0.9009	452.8	751.5	1204.3	0.6523	1.4606
480	566.1	0.0200	0.8172	464.4	739.4	1203.7	0.6645	1.4513
490	621.4	0.0202	0.7423	476.0	726.8	1202.8	0.6766	1.4419
500°	680.8	0.0204	0.6749	487.8	713.9	1201.7	0.6887	1.4325
520	812.4	0.0209	0.5594	511.9	686.4	1198.2	0.7130	1.4136
540	962.5	0.0215	0.4649	536.6	656.6	1193.2	0.7374	1.3942
560	1133.1	0.0221	0.3868	562.2	624.2	1186.4	0.7621	1.3742
580	1325.8	0.0228	0.3217	588.9	588.4	1177.3	0.7872	1.3532
600°	1542.9	0.0236	0.2668	617.0	548.5	1165.5	0.8131	1.3307
620	1786.6	0.0247	0.2201	646.7	503.6	1150.3	0.8398	1.3062
640	2059.7	0.0260	0.1798	678.6	452.0	1130.5	0.8679	1.2789
660	2365.4	0.0278	0.1442	714.2	390.2	1104.4	0.8987	1.2472
680	2708.1	0.0305	0.1115	757.3	309.9	1067.2	0.9351	1.2071
700°	3093.7	0.0369	0.0761	823.3	172.1	995.4	0.9905	1.1389
705.4	3206.2	0.0503	0.0503	902.7	0	902.7	1.0580	1.0580

<sup>17</sup> Reimpresas con permiso de J. H. Keenan y F. G. Keyes. Thermodynamic Properties of Steam, Recuperado Burgess H. Jennings, Op. Cit. pág.54.

TABLA 2.3  
VAPOR SATURADO  
"Tabla de presión"<sup>18</sup>

Presión absoluta lb/plg <sup>2</sup> <i>p</i>	Temperatura F <i>t</i>	Volumen específico		Entalpía			Entropía	
		Líquido saturado <i>v<sub>f</sub></i>	Vapor saturado <i>v<sub>g</sub></i>	Líquido saturado <i>h<sub>f</sub></i>	Evap. <i>h<sub>fg</sub></i>	Vapor saturado <i>h<sub>g</sub></i>	Líquido saturado <i>s<sub>f</sub></i>	Vapor saturado <i>s<sub>g</sub></i>
1.0	101.74	0.01614	333.6	69.70	1036.3	1106.0	0.1326	1.9782
2.0	126.08	0.01623	173.73	93.99	1022.2	1116.2	0.1749	1.9200
3.0	141.48	0.01630	118.71	109.37	1013.2	1122.6	0.2008	1.8863
4.0	152.97	0.01636	90.63	120.86	1006.4	1127.3	0.2198	1.8625
5.0	162.24	0.01640	73.52	130.13	1001.0	1131.1	0.2347	1.8441
6.0	170.06	0.01645	61.98	137.96	996.2	1134.2	0.2472	1.8292
7.0	176.85	0.01649	53.64	144.76	992.1	1136.9	0.2581	1.8167
8.0	182.86	0.01653	47.34	150.79	988.5	1139.3	0.2674	1.8057
9.0	188.28	0.01656	42.40	156.22	985.2	1141.4	0.2759	1.7962
10	193.21	0.01659	38.42	161.17	982.1	1143.3	0.2835	1.7876
11	197.75	0.01662	35.14	165.73	979.3	1145.0	0.2903	1.7800
12	201.96	0.01665	32.40	169.96	976.6	1146.6	0.2967	1.7730
13	205.88	0.01667	30.06	173.91	974.2	1148.1	0.3027	1.7665
14	209.56	0.01670	28.04	177.61	971.9	1149.5	0.3083	1.7605
14.696	212.00	0.01672	26.80	180.07	970.3	1150.4	0.3120	1.7566
15	213.03	0.01672	26.29	181.11	969.7	1150.8	0.3135	1.7549
16	216.32	0.01674	24.75	184.42	967.6	1152.0	0.3184	1.7497
17	219.44	0.01677	23.39	187.56	965.5	1153.1	0.3231	1.7449
18	222.41	0.01679	22.17	190.56	963.6	1154.2	0.3275	1.7403
19	225.24	0.01681	21.08	193.42	961.9	1155.3	0.3317	1.7360
20	227.96	0.01683	20.089	196.16	960.1	1156.3	0.3356	1.7319
21	230.57	0.01685	19.192	198.79	958.4	1157.2	0.3395	1.7280
22	233.07	0.01687	18.375	201.33	956.8	1158.1	0.3431	1.7242
23	235.49	0.01689	17.627	203.78	955.2	1159.0	0.3466	1.7206
24	237.82	0.01691	16.938	206.14	953.7	1159.8	0.3500	1.7172
25	240.07	0.01692	16.303	208.42	952.1	1160.6	0.3533	1.7139
26	242.25	0.01694	15.715	210.62	950.7	1161.3	0.3564	1.7108
27	244.36	0.01696	15.170	212.75	949.3	1162.0	0.3594	1.7078
28	246.41	0.01698	14.663	214.83	947.9	1162.7	0.3623	1.7048
29	248.40	0.01699	14.189	216.86	946.5	1163.4	0.3652	1.7020
30	250.33	0.01701	13.746	218.82	945.3	1164.1	0.3680	1.6993
35	259.28	0.01708	11.898	227.91	939.2	1167.1	0.3807	1.6870
40	267.25	0.01715	10.498	236.03	933.7	1169.7	0.3919	1.6763
45	274.44	0.01721	9.401	243.36	928.6	1172.0	0.4019	1.6669
50	281.01	0.01727	8.515	250.09	924.0	1174.1	0.4110	1.6585
55	287.07	0.01732	7.787	256.30	919.6	1175.9	0.4193	1.6509
60	292.71	0.01738	7.175	262.09	915.5	1177.6	0.4270	1.6438
65	297.97	0.01743	6.655	267.50	911.6	1179.1	0.4342	1.6374
70	302.92	0.01748	6.206	272.61	907.9	1180.6	0.4409	1.6315
75	307.60	0.01753	5.816	277.43	904.5	1181.9	0.4472	1.6259
80	312.03	0.01757	5.472	282.02	901.1	1183.1	0.4531	1.6207
85	316.25	0.01761	5.168	285.39	897.8	1184.2	0.4587	1.6158
90	320.27	0.01766	4.896	290.56	894.7	1185.3	0.4641	1.6112
95	324.12	0.01770	4.652	294.56	891.7	1186.2	0.4692	1.6068
100	327.81	0.01774	4.432	298.40	888.8	1187.2	0.4740	1.6026
110	334.77	0.01782	4.049	305.66	883.2	1188.9	0.4832	1.5948
120	341.25	0.01789	3.728	312.44	877.9	1190.4	0.4916	1.5878
130	347.32	0.01796	3.455	318.81	872.9	1191.7	0.4995	1.5812
140	353.02	0.01802	3.220	324.82	868.2	1193.0	0.5069	1.5751
150	358.42	0.01809	3.015	330.51	863.6	1194.1	0.5138	1.5694
160	363.53	0.01815	2.834	335.93	859.2	1195.1	0.5204	1.5640
170	368.41	0.01822	2.675	341.09	854.9	1196.0	0.5266	1.5590
180	373.06	0.01827	2.532	346.03	850.8	1196.9	0.5325	1.5542
190	377.51	0.01833	2.404	350.79	846.8	1197.6	0.5381	1.5497
200	381.79	0.01839	2.288	355.36	843.0	1198.4	0.5435	1.5453
250	400.95	0.01865	1.8438	376.00	825.1	1201.1	0.5675	1.5263
300	417.33	0.01890	1.5433	393.84	809.0	1202.8	0.5879	1.5104
400	444.59	0.0193	1.1613	424.0	780.5	1204.5	0.6214	1.4844
500	467.01	0.0197	0.9278	449.4	755.0	1204.4	0.6487	1.4634
600	486.21	0.0201	0.7698	471.6	731.6	1203.2	0.6720	1.4454
700	503.10	0.0205	0.6554	491.5	709.7	1201.2	0.6925	1.4296
800	518.23	0.0209	0.5687	509.7	688.9	1198.6	0.7108	1.4153
1000	544.61	0.0216	0.4456	542.4	649.4	1191.8	0.7430	1.3897
2000	635.82	0.0257	0.1878	671.7	463.4	1135.1	0.8619	1.2849
3000	695.36	0.0346	0.0858	802.5	217.8	1020.3	0.9731	1.1615
3206.2	705.40	0.0503	0.0503	902.7	0	902.7	1.0580	1.0580

<sup>18</sup> Reimpresión con permiso de J. H. Keenan y F. G. Keyes. Thermodynamic Properties of Steam. Recuperado de Burgess H. Jennings, Op. Cit. pág. 55.

## 2.4 Clasificación del vapor como servicio de planta de proceso

En las plantas de proceso uno de los servicios auxiliares primarios, es la generación de vapor ya que su uso adecuado es de vital importancia para la operación eficiente de la planta.

Las principales características del vapor producido son:

- ✓ Relativamente barato
- ✓ Abundante
- ✓ Buena conductividad térmica
- ✓ No toxico
- ✓ Alta eficiencia en el ciclo termodinámico

### 2.4.1 Clasificación del vapor

Se puede clasificar el vapor, de acuerdo a sus condiciones de operación y temperatura en:

- Vapor de generación
- Vapor de proceso
- Vapor de calentamiento

Las condiciones de cada clase de vapor están en función del proceso específico que se tenga, pero, se puede generalizar de la siguiente manera:

#### Vapor de generación

También conocido como vapor de alta presión su característica principal es el grado de **sobrecalentamiento, oscilando en un rango de presión de 420 a 620 lb/in<sup>2</sup>**. En algunos casos se puede trabajar a presiones superiores.

Para las grandes centrales termoeléctricas, la elección más adecuada de las condiciones de operación, magnitud de sobrecalentamiento y presión, dependen fundamentalmente de la experiencia y capacidad del diseñador. En cierta forma resulta arriesgado dar normas de trabajo, en vista de que el rendimiento depende de varios factores. **En todos los casos se emplea vapor con alto grado de sobrecalentamiento, teniendo temperaturas entre 350°F y 750°F.**

En la mayoría de las plantas, el vapor de generación se aprovecha íntegramente para producir energía mecánica o eléctrica al accionar un motor o una turbina de vapor. Es factible emplear este tipo de vapor, para algún proceso en particular, dependiendo de las necesidades de la planta.

### **Vapor de proceso**

**También conocido como vapor de media presión**, generalmente se obtiene a la salida lateral de los turbogeneradores o en ocasiones es etapas intermedias en otros equipos mecánicos.

**Este vapor sobrecalentado, se tiene en rango de presión variable de 150 a 275 lb/in<sup>2</sup>**

Es utilizado en industrias textiles, de productos químicos, de papel, etc. En los que el vapor es requerido como fuente de energía o para elevar la temperatura del proceso de fabricación del algún producto, en la mayoría de las industrias el vapor generado tiene ambas aplicaciones.

Para definir el tipo de utilización más adecuada del vapor, es necesario valorar los siguientes aspectos:

1. Si el vapor es requerido solamente para el proceso y la fuente de energía utilizada es comprada (energía eléctrica)
2. Si el vapor requerido deberá cumplir con las dos funciones

### **Vapor de calentamiento**

**El vapor de calentamiento es básicamente vapor de baja presión. Es vapor saturado de 50 a 80 lb/in<sup>2</sup>** de presión, siendo esta la que corresponde a temperaturas ligeramente por arriba de la temperatura requerida por el fluido a calentar en margen de 10 a 15°F.

Se utiliza para calentamiento de los serpentines de tanque en algunos cambiadores, para producir vacío por medio de los eyectores, en plantas de tratamiento de agua, etc.

Generalmente la utilización de vapor sobrecalentado para ese tipo de servicios no es aplicable, ya que interfiere con el control de la temperatura final del vapor.

Las presiones de vapor saturado, se aplican generalmente para calentamiento de conjuntos habitacionales, oficinas, hospitales, terminales aéreas, tiendas departamentales, etc. Pueden variar desde 2 a 80 lb/in<sup>2</sup> en sus calentadores de espacio o estufas.

Para este tipo de instalaciones, rara vez resulta económico el distribuir vapor a presiones inferiores a las 150 lb/in<sup>2</sup> a través de las largas líneas de tuberías colocadas en los ejemplos anteriores desde la caldera a la posición de cada uno de los calentadores de espacio

Si para el proceso de calentamiento son necesarias presiones de vapor bajas del orden de menos de 100 lb/in<sup>2</sup>, es recomendable generar el vapor a 125 lb/in<sup>2</sup>, después de reducir la presión a la salida del generador, haciéndolo pasar a través de una estación reductora de presión.

Generalmente, las calderas productoras de vapor, para proceso de calentamiento generan una presión de 125 a 250 lb/in<sup>2</sup> para este tipo de servicio y hasta aproximadamente unas 350,000 lb/h, los fabricantes han desarrollado calderas paquete, completamente automáticas para generar vapor a estas condiciones.

## **2.5 Aplicaciones del vapor en la industria**

El vapor es el medio más común de transferencia de energía en las industrias de proceso, es usado para la producción de energía mecánica o eléctrica, como calentamiento en plantas de procesadoras de alimentos, en la industria minera, en la industria de la pulpa y el papel, etc. como reactivo y solvente en procesos químicos, limpieza. Se utiliza el vapor de baja presión para humidificar ambientes como fuente de calor en interiores.

Un sistema de distribución de vapor es mostrado en la *figura 4.1* y este puede ser establecido después de que se determinan las necesidades de proceso.

“...El vapor puede emplearse por su efecto calentador o por su energía motriz.

En las aplicaciones caloríficas la transferencia de calor puede lograrse por contacto directo de vapor con un fluido o con un objeto sólido. La aplicación más común del calentamiento por contacto directo está en el calentador del agua de alimentación en una planta de calderas. En este caso, el vapor no solo sirve para calentar el agua al punto más eficiente en el sistema de alimentación, sino que también actúa separando el oxígeno y el dióxido de

carbono del agua de alimentación y arrastra estos gases no condensables fuera del sistema...

Otro ejemplo de contacto directo del vapor con otro fluido se da en la termocompresora, donde se emplea vapor de alta presión para aumentar la presión del vapor previamente contenido. Por ejemplo, una planta industrial tendrá con frecuencia un exceso de vapor de baja presión a 5-15 psi para los secadores, rehervidores o para algún otro uso en el que se necesiten temperaturas más altas. Una termocompresora eleva la presión del vapor de 5-15psig hasta 50-100psig usando vapor vivo directamente de la caldera en el chorro de la termocompresora.”<sup>19</sup>

---

<sup>19</sup> Kemmer N. Frank, Op. Cit., pág. 39.39

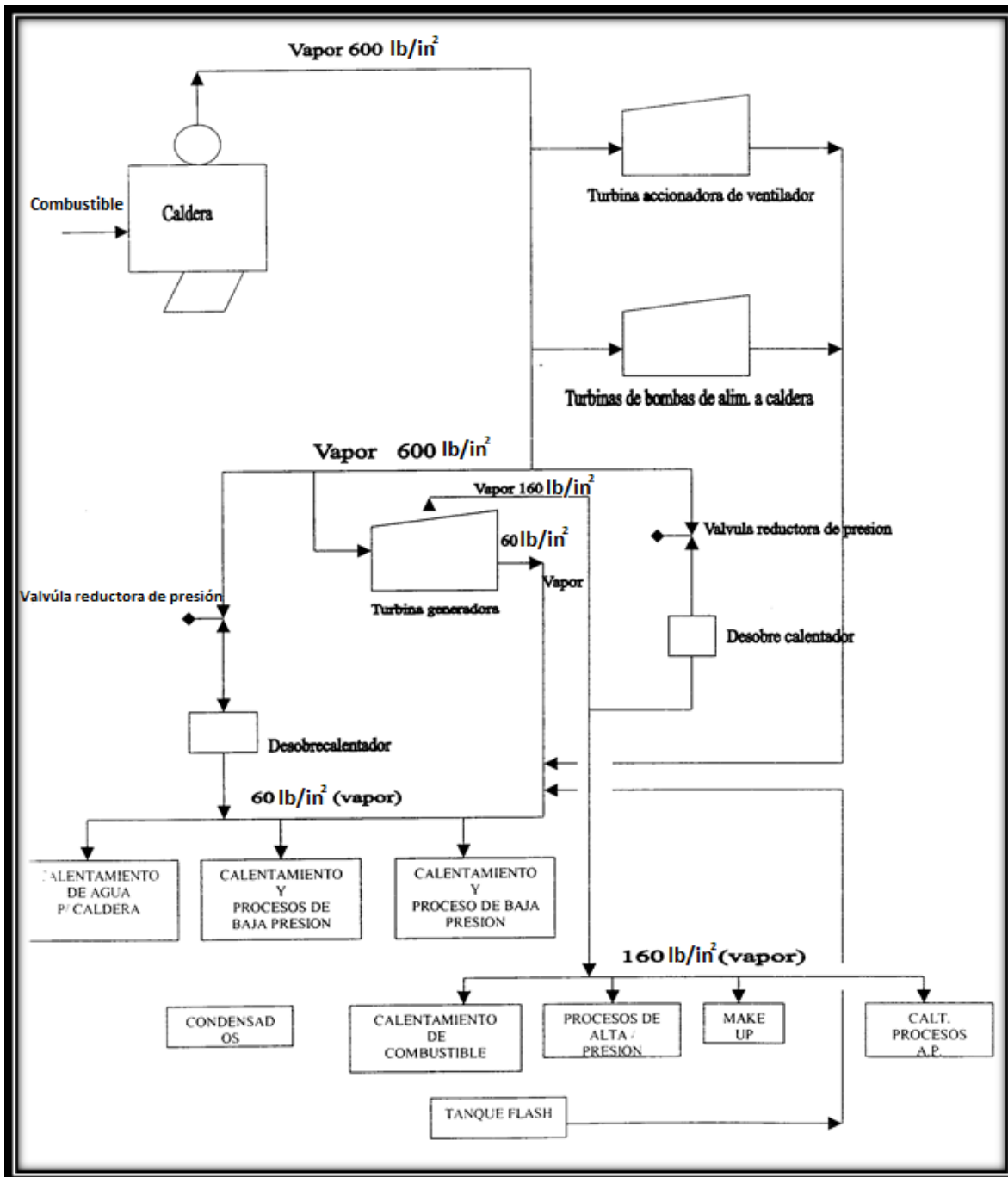


Figura 2.4 Distribución típica del vapor. Fuente: Apuntes de la materia ingeniería de servicios



## CAPÍTULO 3

### GENERADORES DE VAPOR ACUOTUBULARES

#### 3.1 Definición y características

Definición según la NOM-020-STP-2011

“El aparato que se utiliza para generar vapor de agua o para calentar un fluido en estado líquido, mediante la aplicación de calor producido por la combustión de materiales, reacciones químicas o energía solar o eléctrica.”<sup>20</sup>

Definición según la Real Academia Española

“Del lat. *caldaria*.

1. f. Recipiente de metal, grande, abombado en la base, que sirve comúnmente para poner a calentar o cocer algo dentro de él.
2. f. En una instalación de calefacción, aparato dotado de una fuente de energía, donde se calienta el agua que circula por tubos y radiadores.
3. f. Aparato donde hierve el agua, cuyo vapor en tensión constituye la fuerza motriz de una máquina.
4. f. Máquina dotada de una **caldera**.
5. f. Recipiente metálico cerrado que se emplea para calentar o evaporar líquidos.”<sup>21</sup>

Aunque de manera estricta se le llama generador de vapor a la combinación de una caldera y un sobrecalentado, sin embargo, en la práctica es usado el termino caldera para referirse a todo el sistema de calentamiento.

La caldera funciona mediante transferencia de calor que se produce al quemarse un combustible, dicho calor es transferido al agua contenida en los tubos de la caldera.

---

<sup>20</sup> NOM-020-STP-2011. fuente: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5229908&fecha=27/12/2011](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5229908&fecha=27/12/2011)

<sup>21</sup> Real Academia Española, Edición tricentenario, Recuperado de: <http://dle.rae.es/?id=6l3rs02>

Existen diversos tipos de calderas y las clasificaciones que se han hecho de ellas son muchas, pero no todas se refieren a las de uso industrial en las que se distinguen dos tipos principales: las de tubos de humo y las de tubos de agua.

En este trabajo nos enfocaremos a el uso de **calderas de tubos de agua o acuotubulares**, que se caracterizan porque el agua fluye por el interior de los tubos durante su calentamiento y los gases de combustión circulan por el exterior de ellos, son de uso más generalizado y son adecuadas cuando se requiere vapor con presión superior a 150 lb/in<sup>2</sup>. También existen calderas pirotubulares, que en contraste con las anteriores esta se caracteriza por que los gases de la combustión circulan dentro de los tubos y el agua por el exterior, en la tabla 3.1 se mencionan algunas características de ambos tipos.

Tabla 3.1" Comparación entre una caldera de tubos de agua y una caldera tubos de humo"<sup>22</sup>

<p style="text-align: center;">CALDERAS DE TUBOS DE AGUA (ACUOTUBULARES)</p>	<p style="text-align: center;">CALDERAS DE TUBOS DE HUMO (PIROTUBULARES)</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ El agua fluye por el interior de los tubos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ El gas fluye por el interior de los tubos y el agua alrededor de ellos</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Presión de operación (170 – 180)bar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Presión de operación (25) bar</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Alta velocidad de generación de vapor más de 3000 kg/h</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Baja velocidad de generación de vapor 15 kg/h</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Adecuadas para plantas productoras de energía</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Adecuado para industria pequeñas</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La posibilidad de explosión es mayor debido a la alta presión de vapor</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La posibilidad de explosión es baja debido a la baja presión de vapor</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Suministra un vapor de alta presión en plantas productoras de energía eléctrica</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Provee de vapor a la industria química y farmacéutica</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La formación de incrustaciones es baja, debido a que los gases fluyen fuera de los tubos (*)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Mayor posibilidad de formación de incrustaciones (*)</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ La calidad del agua de alimentación es superior</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Menor exigencia en pureza del agua</li> </ul>

(\*) nota aclaratoria de mi autoría: las incrustaciones se presentarán en las superficies que estén en contacto con el agua.

<sup>22</sup> Patel N. K. unidad 6, pág. 3. Fuente: <https://es.scribd.com/document/346358552/Unit-6-Boiler>,

### 3.2 Funcionamiento

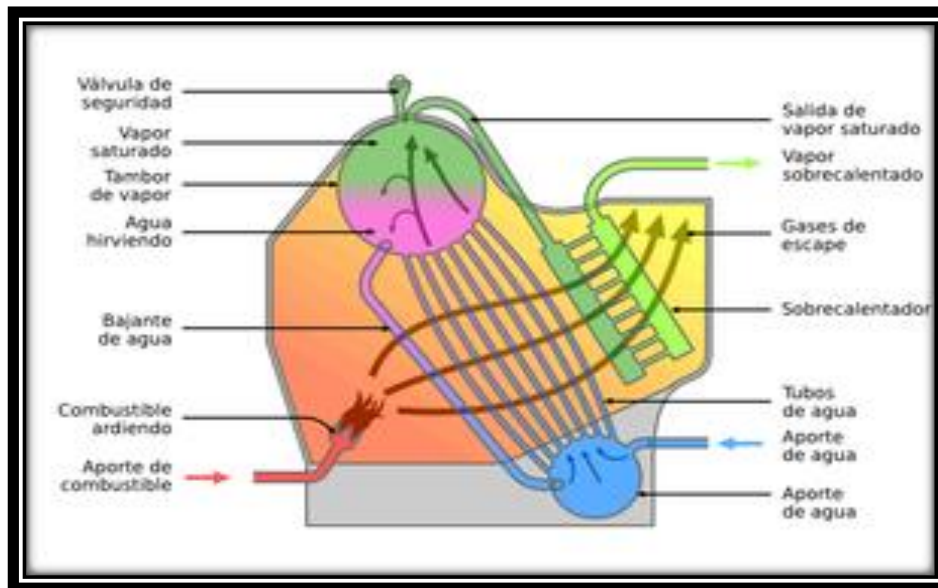
Toda caldera está constituida de dos zonas principales: el hogar o cámara de combustión y la zona de tubos, que transfiere calor principalmente por radiación (llama-agua).

La caldera está constituida por un circuito de tubos de agua *figura 3.1*, se forman burbujas de vapor en el lado calentado de los tubos. La mezcla vapor-agua resultante tiene una densidad inferior a la del agua más fría que está en el lado calentado y sube creando una circulación a través del sistema. Las burbujas de vapor suben hasta que alcanzan el tambor, donde éste se libera desde el agua hasta el espacio del vapor.

El funcionamiento de una caldera es relativamente sencillo el agua es calentada hasta su punto de ebullición para producir vapor, conforme la demanda de vapor aumenta tendrá que suministrarse agua de alimentación para mantener su nivel dentro del rango establecido.

El nivel de agua está en función a la demanda de vapor y deberá mantenerse dentro de los límites inferior y superior, si es bajo las superficies de calentamiento quedaran expuestas y ocurrirá un sobrecalentamiento, si por el contrario está por arriba de lo indicado se presentará un arrastre de vapor con agua y la calidad del vapor disminuirá.

Es recomendable que el agua de alimentación sea precalentada para que así la ebullición del agua dentro de la caldera permanezca en un rango aceptable de temperatura. A sí mismo es necesario suministrar el agua de alimentación de forma continua, para mantener la caldera en equilibrio, a esto se le conoce con el nombre de control modulado, resultado de esto se tendrá un vapor constante y seguro, para cubrir las demandas.



**Figura 3.1 Caldera de tubo de agua**

Fuente: [https://es.wikipedia.org/wiki/caldera\\_\(máquina\)](https://es.wikipedia.org/wiki/caldera_(máquina))

Las demandas de vapor son fluctuantes en una planta y la caldera deberá ser capaz de cubrirlas, siempre que estén dentro de los parámetros de diseño. Si una caldera se trabajada muy por debajo de su presión de diseño producirá gran turbulencia en su interior, esto se debe a que presiones bajas las burbujas que produce el vapor son muy grandes y al romperse causan turbulencia en la superficie, lo que ocasiona arrastre de gotitas de agua las cuales reducen la calidad del vapor. Si se requiere vapor de baja presión la caldera tendrá que ser operada a su presión de diseño y bajar la presión con una válvula reductora de presión in situ.

Cuando la demanda de vapor aumenta, la caldera tardará un intervalo de tiempo en satisfacer la nueva demanda, durante este periodo se presentará una caída de presión en el sistema de generación de vapor, ocasionando que en la superficie del agua burbujeante aumente rápidamente donde agua y espuma son arrastrados a el punto de salida del vapor. Cuando la demanda de vapor disminuye, la presión aumenta y el nivel de la superficie se restablece al reanudar una operación normal.

Al presentarse una caída de presión se producirá lo que se conoce como vapor flash, esto es debido al aumentar la demanda de vapor, por lo que es necesario que el incremento se haga en forma paulatina ya que es el aumento no controlado es lo que ocasiona la desestabilidad de la caldera, aunque la demanda este dentro de su capacidad.

### **3.3 Partes principales de calderas acuotubulares o tubos de agua.**

#### **Domo**

Es de forma cilíndrica y en su interior se encuentra los fluidos agua-vapor. Al tener un tamaño reducido será necesario adicionar un separador de gotas para elevar el título del vapor. Al igual que en la virola exterior de las calderas acuotubulares, en el domo van las tubuladuras de control, supervisión y servicio.

#### **Cámara de combustión u hogar**

Este tiene forma de prisma y sus seis lados están delimitados de membrana que, excepto en una de ellas, los cinco restantes son totalmente estancas al paso de los gases de combustión al exterior.

La pared que no se encuentra estaca está diseñada para que los gases salgan del hogar e inicien su camino a través de los diferentes componentes del circuito de gases de la caldera.

#### **Paredes de membrana**

Son los formados en su totalidad de tubos refrigerados por el agua que circula por su interior.

Estos tubos están unidos entre sí por medio de soldadura de estanqueidad en el lado de los gases y, a su vez, colectores distribuidores de mayor tamaño en el lado del agua.

### **Tubos de subida y bajada**

Los tubos de subida son los que transportan el fluido más caliente al domo (por diferencia de temperaturas).

Los tubos de bajada son los que devuelven el fluido que se ha enfriado desde el domo a las zonas de calentamiento.

### **Evaporadores**

Son haces de tubos colocados generalmente a contra corriente de los gases, en especial donde se efectúa el intercambio por convección.

### **Economizadores**

Estos son instalados a la salida de los gases de la caldera para aumentar su rendimiento. Se encuentran formados por tubos lisos o con aletas, por dichos tubos circula el agua de alimentación a la caldera y por fuera de los tubos los gases de la combustión a contracorriente.

### **Recalentadores o Sobrecalentadores**

Son equipos compuestos por serpentines de tubos instalados en la zona mayor temperatura de la caldera. Exceptuando su instalación en la cámara de combustión, generalmente están colocados justo detrás de la pared de membrana y después de la cámara de combustión. La función es elevar el título del vapor a "1", así como, la temperatura de vapor saturado a una temperatura superior a la de saturación.

### **3.4 Clasificación de calderas acuotubulares o tubos de agua**

#### **Calderas de tubos rectos**

Estas se clasifican en tubos rectos verticales y tubos rectos inclinados con aproximadamente  $15^\circ$ . En los tubos rectos verticales estos están sujetos a dos cámaras una de vapor que es la superior y la inferior que es la de lodos. En los tubos retos inclinados, estos están expandidos en cabezales colectores verticales forjados, que en la parte inferior tienen un colector de lodos transversal y en la parte superior se encuentra uno o dos domos y uno de ellos puede estar en forma longitudinal o transversal a el eje de la caldera. Algunas de sus desventajas son el acceso difícil debido a que hay muchas tapas de registro y empaques que tienen que quitarse, las superficies limitadas para el desprendimiento de vapor con una mala separación de este y el agua cuando hay altas velocidades de vaporización.

#### **Calderas de tubos curvos**

Estas son más flexibles que las de tubos rectos y tienen una mayor superficie de transferencia de calor. Los cabezales sirven de puntos colectores en el circuito agua- vapor y como separador de estos. Se han utilizado calderas con dos, tres y a veces con cuatro tambores. En la *figura 3.2* y *figura 3.3* se muestran calderas de tubos de agua curvos con dos o tres tambores. Una caldera de tubos curvos es un vaporizador rápido, con respuesta rápida a las cargas fluctuantes debido a su pequeño volumen de agua respecto a su capacidad de generación. Entre sus ventajas esta un bajo costo en su fabricación y en la operación, accesibilidad para inspección, limpieza y mantenimiento, y la capacidad de operar a más altas velocidades de vaporización y producir vapor más seco.

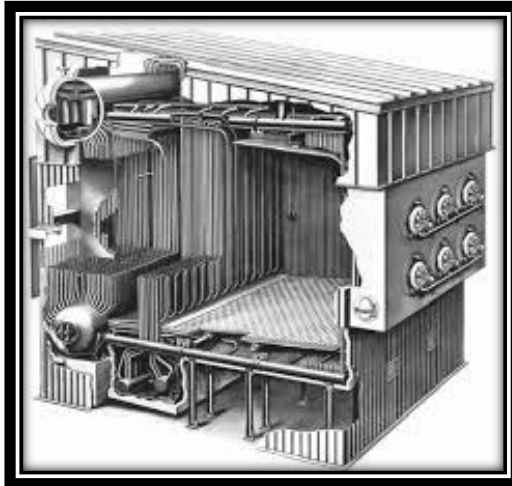


Figura 3.2 Caldera de dos tambores y tubos curvos

Fuente: [www.todocalderas.com.ar/articulo/27/tipos-de-calderas-caracteristicas-detalles-generales.html](http://www.todocalderas.com.ar/articulo/27/tipos-de-calderas-caracteristicas-detalles-generales.html)

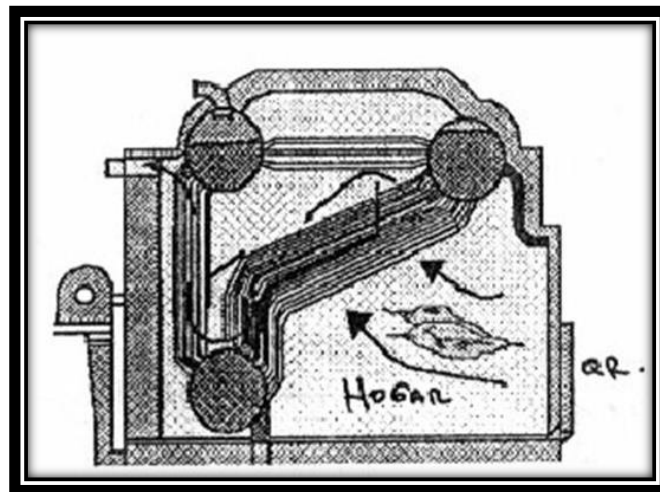


Figura 3.3 Caldera de tres tambores y tubos curvos.

Fuente: [slideplayer.es/slide/5647136/](http://slideplayer.es/slide/5647136/)

Existe una clasificación de este tipo de calderas que son el tipo A, tipo D, tipo O; esta depende del número de tambores y el arreglo de los tubos dentro de la caldera *figura 3.4*.



Tipo A Esta cuenta con un gran tambor superior donde se realiza la separación del agua y del vapor y tambores inferiores para lodos, en estos se requiere de purgado en el fondo de los cabezales.

Tipo D El tambor de vapor y el de lodos esta uno encima del otro, el tambor de arriba es el del vapor y el tambor inferior es el de lodos y desviado hacia un lado del horno formando un patrón de D, los une una serie de tubos en posición vertical. El resto de los tubos se extiende horizontalmente desde los tambores de vapor y de lodo hasta la pared del horno, punto en el que se convierten en tubos de pared de agua.

Topo O En este arreglo el tambor de vapor se localiza directamente encima del de lodos, pero ambos se encuentran en el centro de la caldera, y los tubos que los conectan forman un patrón en forma de O.

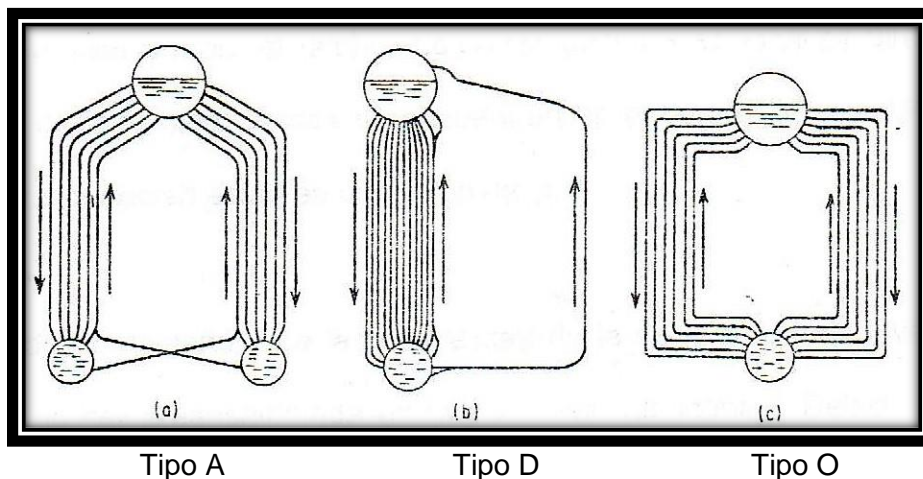


Figura 3. 4 Esquema de diferentes arreglos de tambor y tubos, en calderas de tubos curvos.

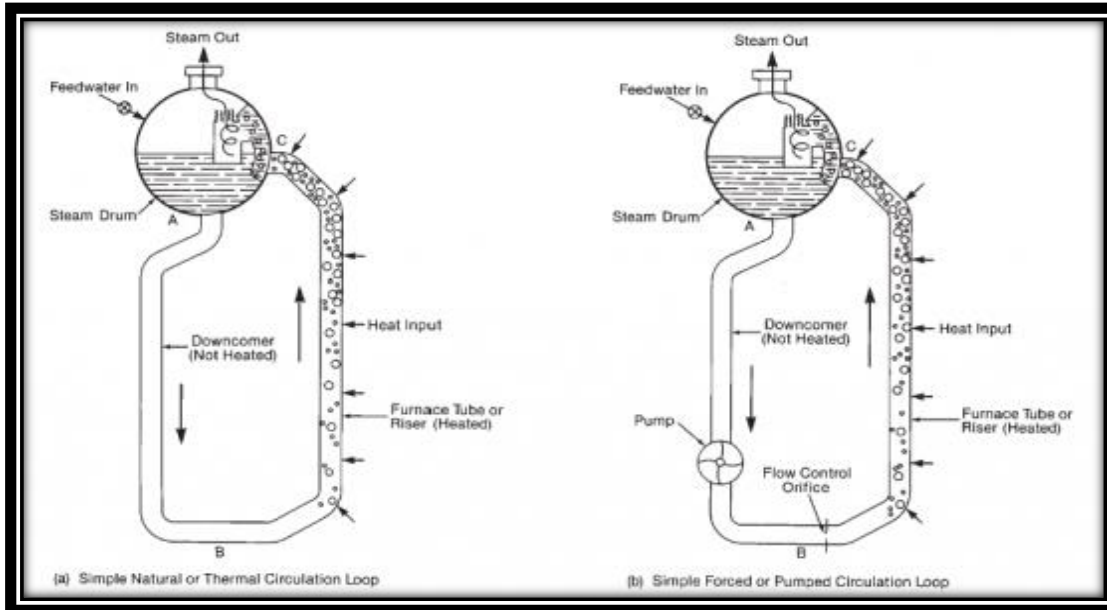
Fuente: [recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio\\_sin\\_paredes/fac\\_ing/Manu\\_cald/1/cap/03.pdf](http://recursosbiblio.url.edu.gt/publicjlg/biblio_sin_paredes/fac_ing/Manu_cald/1/cap/03.pdf)

## Calderas de circulación natural

Las calderas de circulación natural (en las que la circulación se induce por diferencia de densidades) suelen tener muchos circuitos paralelos. Las secciones de tubos en que el agua calentada sube hasta el tambor del vapor, y aquellas a través de las que desciende el agua más fría son los conductos de tubos descendentes. Por lo general, la circulación tiene lugar entre varios tambores.

El tambor en la parte superior separa el vapor de agua, el tambor de lodo en el fondo separa los sólidos suspendidos y el lodo del agua.

Un esquema de un diseño de caldera de este tipo en el que se muestra los montantes, los tubos descendentes y la localización de los tambores de vapor y de lodo, se observan en la *figura 3.5 (a)*. Estos componentes básicos se encuentran en todas las calderas de circulación natural con independencia de los detalles del diseño de la caldera.



a) Circulación natural

b) Circulación forzada

**Figura 3.5 Representa calderas de a) circulación natural y b) circulación forzada**

fuelle: [www.atmosferis.com/tipos-de-circulación-en-generadores-de-vapor/](http://www.atmosferis.com/tipos-de-circulación-en-generadores-de-vapor/)

## **Calderas de circulación forzada**

En las calderas de circulación forzada una bomba proporciona la circulación del agua *figura 5 (b)*. Éste constituye un control más positivo del patrón de circulación que el que se crea solo por diferencia de densidades. Esto es importante si la caldera puede operar en un amplio intervalo de capacidad. Si los requerimientos de espacio limitan la altura de una instalación de caldera las diferencias de densidades disponibles para crear una circulación natural, se vuelven pequeñas y la circulación forzada es más ventajosa. También es ventajosa a altas presiones puesto que la diferencia de densidades entre el vapor y el agua disminuye.

Su principal desventaja es su costo tanto de construcción como de mantenimiento debido a que dispone de más partes móviles. Su costo de instalación de disponibilidad de energía también se ve incrementado ya que requiere de mayor energía para accionar las bombas de circulación.

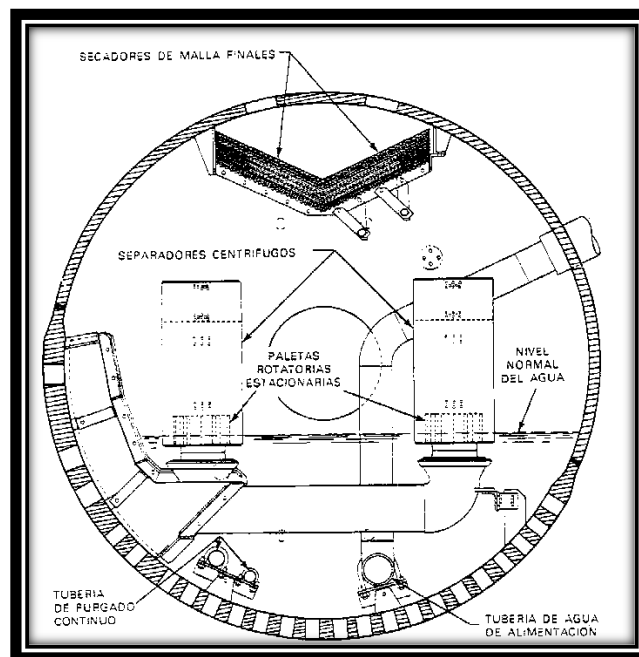
### **3.5 Como se mejoran la eficiencia de calderas**

Se puede obtener una eficiencia aumentada en la caldera llevando el agua a un contacto íntimo con la fuente de calor. Los tubos se constituyen dentro del horno de la caldera para absorber mayor cantidad de calor. En general, todo el hogar, llamado sección radiante, se rodea por tubos de pared de agua, a través de los cuales circula el agua. Las conexiones entre las secciones de tubos de la caldera se logran por medio de cabezales, designados según su localización, como cabezales de la pared de agua, o cabezales de tambor.

La calidad del vapor es de suma importancia en la mayor parte de las operaciones si se quiere lograr un buen funcionamiento de la turbina y una larga vida del equipo. El agua de la caldera se separa del vapor por medio de separadores ciclónicos y de lavadores de vapor localizados en el tambor de vapor *figura 3.6*. El vapor que entra al tambor de vapor se dirige primero a los separadores ciclónicos por medio de mamparas. Los ciclones obligan al vapor a moverse en espiral en su trayectoria hacia la salida en la parte superior del separador, y la fuerza centrífuga separa el agua del vapor *figura 3.7*. El vapor purificado está en la parte superior del separador, mientras que el agua que es más pesada fluye por el fondo y vuelve a entrar al tambor de la caldera.

Después de pasar por los separadores ciclónicos, la remoción final del agua arrastrada del vapor se logra por medio de lavadores secundarios de vapor. Estos consisten en mamparas que cambian la dirección del vapor de modo que el agua que choca sobre ellos y se drena de regreso al tambor de vapor. El vapor final debe de tener menos de 0.1% – 0.5% de humedad.

Esto puede medirse termodinámicamente por medio de un dispositivo llamado calorímetro de estrangulamiento *figura 3.8*, para una determinación con mayor precisión se usa un electrodo de iones, que mide los iones de sodio presentes en una muestra de vapor condensada.



**Figura 3. 6** En el tambor de vapor, el agua es removida por separadores ciclónicos y filtros secundarios o secadores de malla.

**Fuente:** Manual del Agua NALCO tomo III, 1994, pág. 39-31

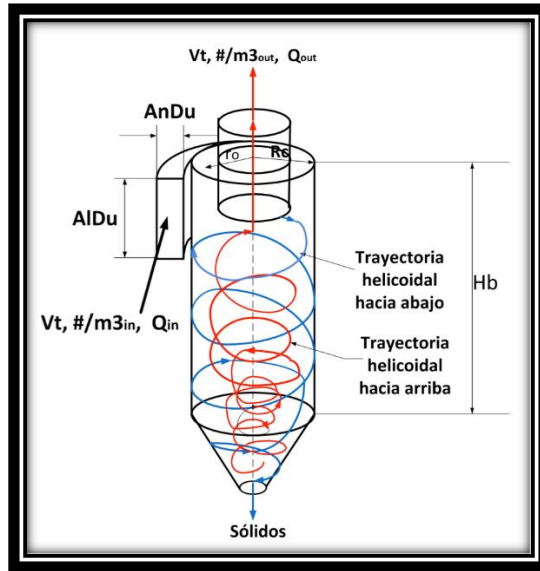


Figura 3. 7 Separador ciclonico con trayectoria de partículas

Fuente: <https://simulacionblog.com/modelado-y-simulacion-del-funcionamiento-de-un-separador-ciclonico>

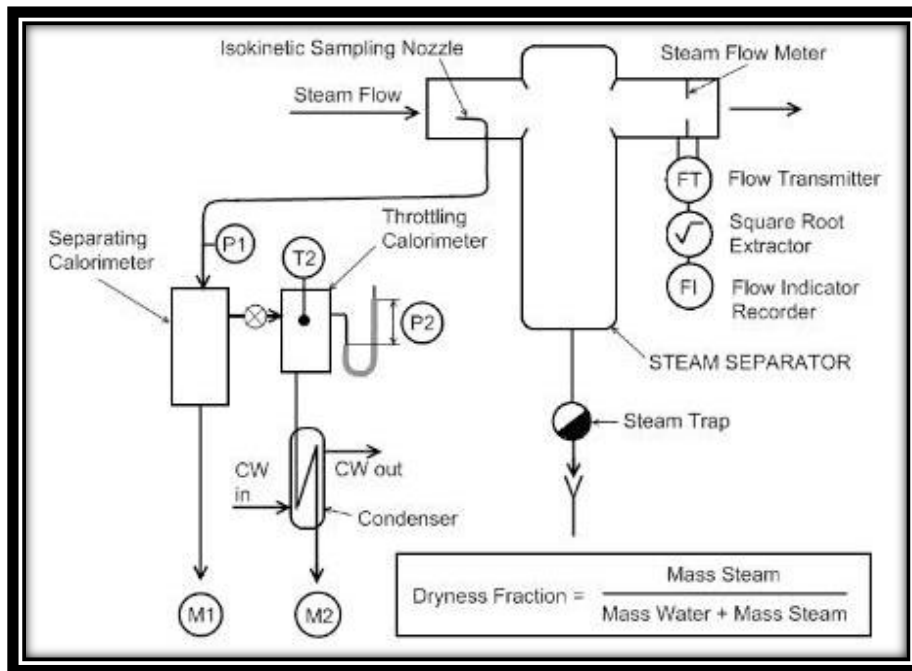
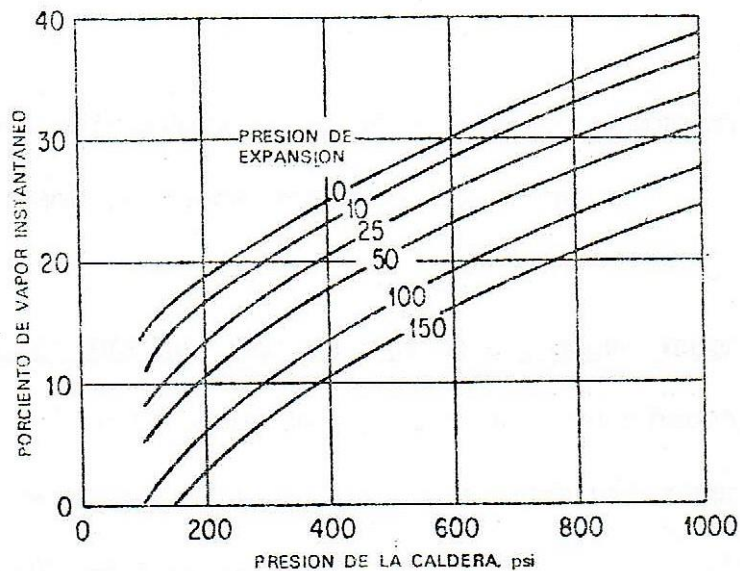


Figura 3. 8 Separador por estrangulamiento (calorímetro)

Fuente: [elmaquinante.blogspot.mx/2016/07/separador-por-extrangulamiento-ii.html](http://elmaquinante.blogspot.mx/2016/07/separador-por-extrangulamiento-ii.html)

“En la *gráfica 3.1* se muestra graficado los resultados de el contenido de iones de sodio en el vapor que sale de una caldera de 250 psi (17 bars), **y como el nivel de sodio, que refleja el agua arrastrada de la caldera, es influido por las condiciones de operación de la caldera.** Una gráfica de la demanda de vapor muestra las oleadas intempestivas que se produjeron gran arrastre. Suponiendo que el agua de la caldera contiene 500 mg/L de Na<sup>+</sup>, un contenido de sodio de 50μ g/L Na en el vapor indica el siguiente contenido de humedad en el vapor.” (Kemmer N. Frank, 1994)

**Gráfica 3.1 Producción de vapor instantáneo a partir de la purga de la caldera**



**Fuente: Manual del Agua NALCO, tomo III, 1994, pág., 39-25**

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Na en el vapor}}{\text{Na en la caldera}} \times 10$$

$$\% \text{ humedad} = 50 \times 10 / 500 = 1.0 \%$$

Como remplazo desmineralizado, el potasio puede ser el catión predominante en la caldera, por lo que el procedimiento de prueba debe tener esto en cuenta.

**“La eficiencia promedio de una caldera de tubos de agua que produce vapor saturado es de alrededor de 85%.”** (Kemmer N. Frank, 1994). La mayor parte del calor que se pierde lo hacen vía gases calientes de la chimenea y por radiación. Se puede lograr una mayor eficiencia añadiendo dispositivos de recuperación de calor.

En la tabla 3.2 se muestran las pérdidas de energía en una planta simple de caldera industrial. Esta es una caldera de 250 psi que quema petróleo y entrega vapor saturado para un proceso que no tiene dispositivos de recuperación de calor. En este ejemplo, la planta ya ha logrado sus condiciones óptimas para el agua con una purga de solo 3.5% y un aumento de eficiencia con el diseño existente se lograría solo un cambio en las condiciones de carga. Sin embargo, se podría recuperar una cantidad apreciable de energía si la planta se retroequipada con auxiliares de recuperación de calor.

**Tabla 3.2 Distribución de las pérdidas en calderas**

	PERDIDA REAL BTU/día	PERDIDA POTENCIAL BTU/día	AHORRO BTU/día
Purga	170.0	17.0	Ninguno
Calor de la chimenea	287.0	275.0	11.5
Aire en exceso	96.9	49.8	47.1
TOTAL	553.9	341.8	58.6

Fuente: Manual del Agua NALCO, tomo III, 1994, pág. 39-33

Una ganancia termodinámica en la eficiencia puede obtenerse aumentando la temperatura del vapor por encima de su punto de saturación. Esto se logra pasando el vapor a través de una serie de tubos, llamados sobrecalentadores, que están localizados en la sección radiante de la caldera *figura 3.9*. De forma semejante el vapor al que sólo se le ha quitado una porción de su contenido calorífico y que se halla a una presión reducida puede ser recalentado a una temperatura cercana a su temperatura inicial y ser reutilizado. Esto se logra en un haz de tubos llamados recalentadores, localizados también en la sección radiante *figura 3.10*.

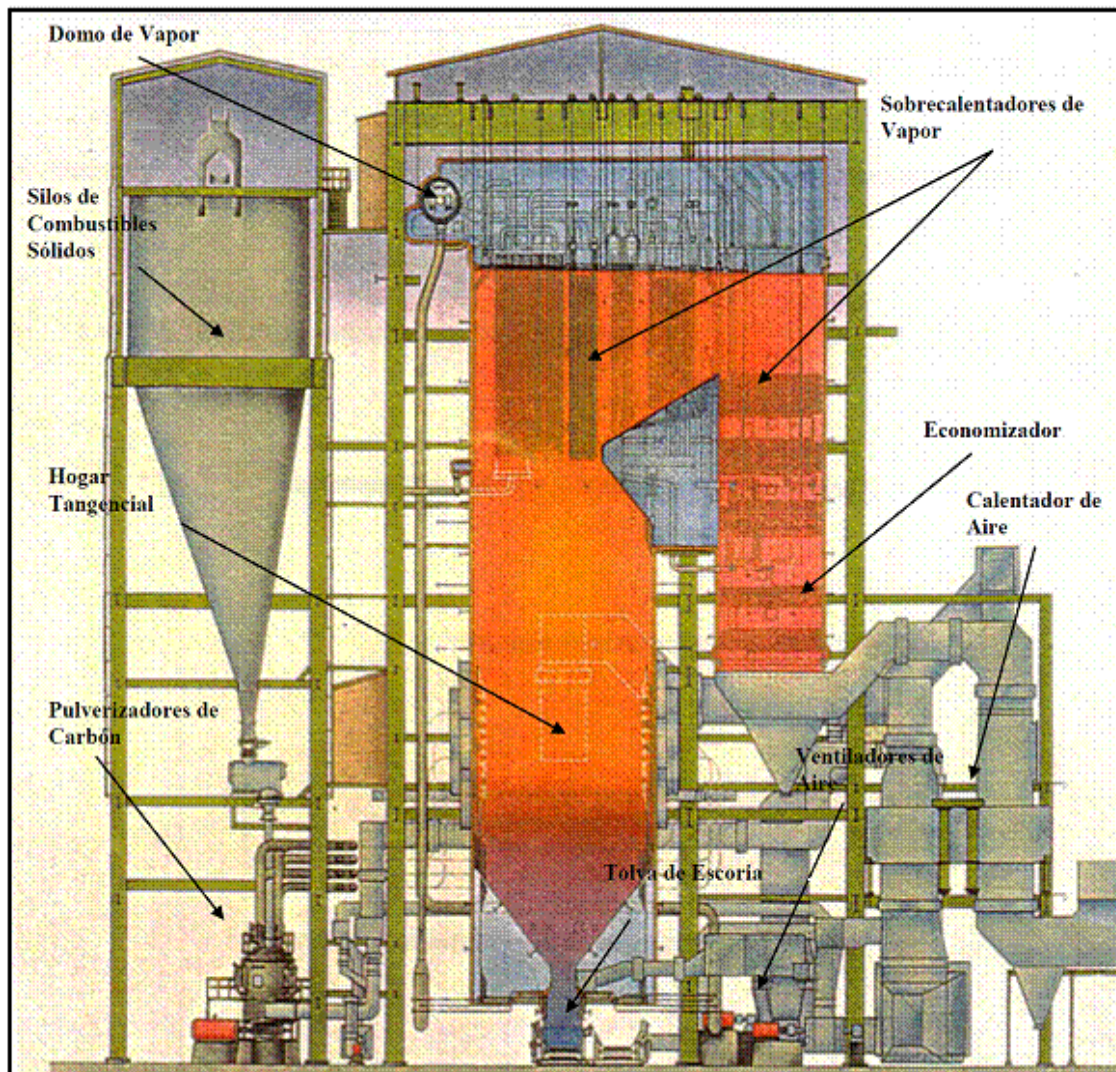


Figura 3.9 Adición de calor en el vapor de saturación por medio de un sobrecalentador

Fuente: [http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/mercados/carbon/carbon\\_archivos/image006.gif](http://hrudnick.sitios.ing.uc.cl/mercados/carbon/carbon_archivos/image006.gif)





figura 3.10 Recalentadores de vapor

Fuente: <https://in.all.biz/es/recalentadores-de-vapor-para-calderas-bgg1084790>

Puede lograrse una ganancia importante en la eficiencia elevando la temperatura del agua de alimentación que entra a la caldera acercándola a la temperatura del agua de la caldera, recuperando calor de los gases calientes de combustión antes de descargarlos por la chimenea a la atmósfera. Este calentamiento del agua de alimentación, tiene lugar en el economizador, figura 3.11.

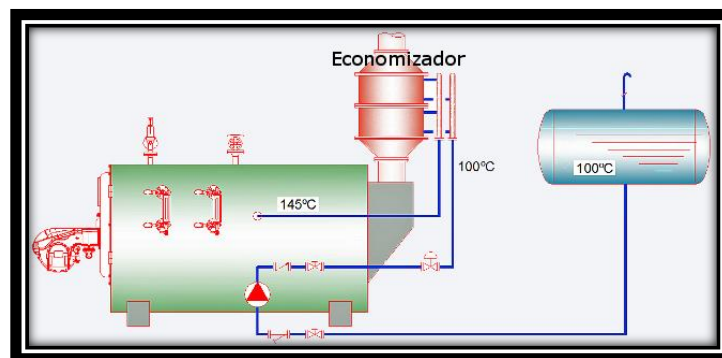


Figura 3.11 Economizador

Fuente:

[http://www.prodinco.es/index.php?option=com\\_content&view=article&id=16&Itemid=121&lang=es](http://www.prodinco.es/index.php?option=com_content&view=article&id=16&Itemid=121&lang=es)

Por otra parte, el aire necesario para la combustión en el horno puede recuperar calor adicional de los gases de combustión al pasar a través de una serie de tubos llamados calentadores del aire. Estos se localizan generalmente después del economizador. El incremento relativo de la absorción del calor ganado por estos dispositivos se muestra en la *figura 3.12*.

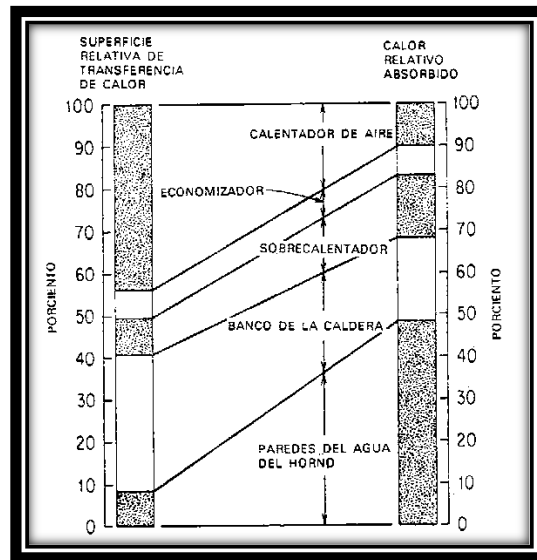


Figura 3.12 Transferencia de calor de las diferentes secciones de un generador de vapor

Fuente: Manual del Agua NALCO, tomo III, 1994 pág. 39-36

### 3.6 Sistemas de alimentación de agua a las calderas

Uno de los factores principales para la operación óptima de una caldera es el de contar con un sistema de suministro de agua adecuado para cada caso en particular. Esto es debido a que es indispensable mantener un nivel de agua constante en el interior de la caldera para que no ocurra un siniestro o falla de algunas de sus partes.

Todo sistema efectivo de alimentación de agua a calderas debe contar con:

1. Reserva mínima de agua (tanque de almacenamiento)
2. Equipo de bombeo y control de sistema

### **Reserva mínima de agua**

“La cantidad de agua que se alimenta a una caldera es prácticamente la cantidad de vapor que se produce, por lo tanto, la reserva de agua necesaria va en proporción a la capacidad de la caldera.

Un criterio recomendable para obtener la cantidad del agua de reserva y la capacidad del tanque es la de almacenar una cantidad mínima de agua suficiente para sostener la evaporación en la caldera “por lo menos durante 20 minutos.”<sup>23</sup>

Es recomendable contar con tanque que tenga la capacidad de cubrir la reserva mínima de agua, así como, recibir la línea de retornos de condensados, esto ayudara a mantener el agua de alimentación a una temperatura adecuada y evitar un choque térmico en la caldera.

En el caso que se requiera que el agua se desaire, el tanque de condensados tendrá que ser complementado con un desaireador.

---

<sup>23</sup> Manual de Calderas SELMEC, Cleaver & Brooks, 1976. Pág.109.

## CAPÍTULO 4

### TRATAMIENTO DE AGUA A CALDERAS

#### 4.1 Impurezas comunes en agua de alimentación

Al utilizar agua en la industria, será necesario su tratamiento previo, ya que de lo contrario se presentarán problemas tales como sedimentación, incrustaciones, fragilizaciones o bien una producción de mala calidad en diferentes puntos del proceso.

En el caso de agua para calderas es de importancia relevante un adecuado tratamiento ya que favorecerá la vida útil del equipo, así como, la seguridad en la operación.

Para llevar acabo lo anterior será necesario cumplir con las especificaciones de las normas que determinen los parámetros en el tratamiento del agua. La norma BS 2486 del Reino Unido aporta datos sobre los estándares en agua de alimentación.

Será necesario que las pruebas del agua sean determinadas por empresas especializadas para ello, y en comunicación con el operario de calderas, esto con el fin de tomar acciones complementarias por ambas partes en caso de presentarse problemas en el agua.

Cualquiera que sea el tipo de caldera el ciclo del agua en el sistema puede quedar definido en los siguientes puntos:

- La caldera recibe el agua de alimentación, que está constituida por agua nueva ya tratada, que es el agua de alimentación y el agua de retorno de los condensados.
- En el interior de la caldera el agua de alimentación cambia a fase vapor la cual podría ser considerada como moléculas de agua pura,
- El agua que se mantiene en la fase líquida en el interior de la caldera, que se carga de todas las sustancias que llega a contener el agua vaporizada a excepción aquellas arrastradas por el vapor.
- Del punto anterior se estima la importancia de las purgas para eliminar las impurezas, ya que, si no se purgara el sistema, la concentración de ella se incrementaría en la fase líquida.

Para poder tratar el agua es necesario precisar el uso que se le va a dar y conocer a fondo las impurezas que lleva consigo, para que de esta forma se pueda atacar el problema de manera efectiva. En la tabla 4.1 se hace mención del tipo de impurezas.

**Tabla 4.1 Impurezas químicas más comunes en aguas de alimentación**

NOMBRE	FORMULA	NOMBRE COMÚN	EFEECTO
Carbonato de calcio	CaCO <sub>3</sub>	Mármol, caliza o calcita	Incrustación
Bicarbonato de calcio	Ca(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Incrustación
Sulfato de calcio	CaSO <sub>4</sub>	Yeso de parís	Incrustación
Cloruro de calcio	CaCl <sub>2</sub>		Corrosión
Sulfato de magnesio	MgSO <sub>4</sub>	Sales Epsom	Incrustación
Bicarbonato de magnesio	Mg(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Incrustación y corrosión
Cloruro de magnesio	MgCl <sub>2</sub>		Corrosión
Hidróxido de magnesio	Mg(OH) <sub>2</sub>		Incrustación
Cloruro de sodio	NaCl	Sal común	Corrosión
Carbonato de sodio	NaCO <sub>3</sub>	Soda ash. Sosa común	Alcalinidad
Bicarbonato de sodio	Na(CO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>		Espuma
Hidróxido de sodio	NaOH	Sosa caustica	Cristalización
Sulfato de sodio	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Sales de Glauber	Incrustación
Dióxido de silicio	SiO <sub>2</sub>	Sílice	Incrustación

Fuente: Manual de Calderas SELMEC, 1976, pág.199

## 4.2 Principales problemas que se presentan por impurezas en agua

Los principales problemas que se presentan son:

- Incrustación
- Espumeo y arrastre
- Corrosión
- Fragilización cáustica
- Depósitos

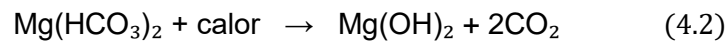
### Incrustación

El agua contiene diferentes elementos tales como: sólidos disueltos y en suspensión, oxígeno y bióxido de carbono, al ser calentado y generar vapor, se separará primero el oxígeno y el anhídrido carbónico, las sustancias difícilmente solubles como las sales de calcio y magnesio se depositarán en la superficie caliente provocando incrustación.

Las sales que se encuentran contenidas en el agua son sales solubles, tales como los bicarbonatos, sulfatos y cloruros de calcio, magnesio y sodio. Las sales de calcio y magnesio son las que producen lo que se ha dado en llamar “dureza” del agua. Esto es uno de los componentes más perjudiciales para la buena operación de una caldera. La sílice es otro de los componentes que aparecen en las aguas naturales, también es proveedora de incrustaciones siendo las más difíciles de eliminar.

La acumulación de sales en una caldera se debe a la concentración por evaporación del agua. Cuando la acumulación de estas sales llega a un punto donde se sobrepasa el nivel de la solubilidad, se produce la precipitación, que causa las incrustaciones. En el **caso del sulfato de calcio, que es muy poco soluble a altas temperaturas produce la formación de capas incrustantes dentro de las calderas bastante difíciles de remover**, dificultando además en forma muy marcada la trasmisión de calor, que se refleja en sobrecalentamiento en las partes metálicas. **Menos soluble son, el carbonato de calcio y el silicato de calcio, los que se depositan en forma de incrustación con los mismos resultados.**

Al aumentar la temperatura del agua dentro de la caldera se efectúa una descomposición de los bicarbonatos, los cuales en presencia de calcio y magnesio dan lugar a las siguientes reacciones químicas:



El bicarbonato de calcio, es en sí, bastante soluble, se convierte en carbonato de calcio con una solubilidad muy baja, provocando incrustaciones y lodos indeseables dentro de la caldera. Cuando este componente se deposita en forma de incrustación en una caldera, puede provocar graves problemas en la operación. Si estas incrustaciones se desprenden bruscamente durante el funcionamiento, puede provocar recalentamiento localizado, muy peligroso en las zonas que se adhiere nuevamente.

La dureza de agua en general se debe a la cantidad de sales minerales antes mencionadas en solución, ahora bien, **la dureza es medida por la cantidad de sales de calcio y magnesio expresado en gramos por galón o en partes por millón.**

Partes por millón equivale a un miligramo de sal disuelto en un litro de agua.

$$1\text{ppm} = 1 \text{ mg de sal}/1 \text{ L agua}$$

**Cuando el agua contiene solamente carbonatos de calcio y magnesio se dice que tiene una dureza temporal** o carbonatada, dando que estas impurezas pueden precipitarse como lodo suave si el agua se calienta a una temperatura cercana a su punto de ebullición a la presión atmosférica.

**El agua que contiene sulfatos de calcio y magnesio se dice que tiene dureza permanente**, dado que estas impurezas no se precipitan como sólidos, hasta que el agua es calentada a una temperatura superior a 300°F. Así cuando el agua pasa directamente a través de un calentador abierto a la caldera, la temperatura de calentamiento no es lo

suficientemente alta para que las impurezas se precipiten, causando dureza permanente y depositándose por consiguiente en la caldera.

Las incrustaciones producidas por la dureza del agua son peligrosas debido a que tienen una baja conductividad térmica, dando como resultado un bajo rendimiento térmico de la caldera lo que provoca un sobrecalentamiento en el metal expuesto al fuego y esto da como resultado corrosión, hinchazón en el metal y a su vez explosión, cuyas consecuencias son graves.

Si las incrustaciones no son removidas oportunamente se corre el riesgo de obstruir las líneas de purga de fondo agravando el problema.

En las *figuras 4.1 y figura 4.2* se puede apreciar las incrustaciones en calderas



**Figura 4.1 incrustaciones en calderas**

**Fuente: Guía Básica de Calderas Industriales eficientes, fenercom, pág. 47**





**Figura 4. 2 Se puede apreciar incrustaciones en el fondo de la caldera**

**Fuente: Guía Básica de Calderas Industriales eficientes, fenercom pag 48**

### **Espumeo y arrastre**

El espumeo y arrastre puede deberse a causas mecánicas o químicas, la cuestión mecánica se refiere a la condición en la operación de una caldera, en la que una espuma es producida y, puede o no ser acompañada por el arrastre de agua (vapor húmedo). Los arrastres de agua pueden ser muy destructivos para las tuberías.

El arrastre puede ser producido por otras causas antes del espumeo, como, por ejemplo, llevar un nivel de agua muy alto, un área de salida muy reducida, o una demanda de vapor irregular que sobrecarga a la capacidad de purga de la caldera.

Una muy alta concentración de sales disueltas es una frecuente causa de espumeo. El espumeo también resulta de la saponificación del agua de la caldera a través de una mezcla

de aceite o grasa con los álcalis. La materia orgánica que flota dentro de la caldera es otra fuente generadora de espuma.

Cuando del espumeo se debe a la concentración de sales en el agua, puede ser corregida alterando el tratamiento de la misma o purgando más esta agua.

“Normalmente una caldera de vapor sin accesorios internos en los domos producirá de 0.5 a 1.5% de humedad de vapor. Esto no es permisible en una planta de alta temperatura y alta presión, en la que se permite hasta 0.1% de humedad. Partes internas defectuosas de la caldera puede ser la causa de un vapor exageradamente húmedo, así como del espumeo y arrastre. Cualquiera que sea la causa, el resultado es el acarreo y la presencia de pequeñísimas gotitas de agua que arrastran impurezas en el flujo de vapor [...]

El espumeo es la fuente más común de arrastre de sólidos en calderas equipadas con accesorios internos en los domos. Algunas pruebas han revelado espesores hasta de 12” de espuma arriba del nivel de agua.”<sup>24</sup>

En la tabla 4.2 se muestran las causas del arrastre de sólidos.

**Tabla 4. 2 Factores que afectan el arrastre de sólidos**

Condiciones Mecánicas	Condiciones Del Agua	Condiciones De Operación
Diseño de la caldera	Origen y reposición	Capacidad
Tamaño de los domos	Concentración	Cambios en capacidad presión
Número de los domos	Alcalinidad	Presión
Circulación	Materia en suspensión	Cambios en el nivel
Superficie de calefacción radiante	Tratamiento químico	Sólidos de las purgas
Superficie de calefacción por convección	Capacidad de espumeo inherente	Válvulas de seguridad defectuosas

Fuente: Manual de calderas SELMEC, 1976, pág. 1

<sup>24</sup> Manual de Calderas SELMEC, Op. Cit., pág. 198

## Corrosión

Los gases que ocasionan problemas de corrosión es el oxígeno que se encuentra disuelto en el agua o que bien lo adquiere del aire al entrar en contacto con este, el bióxido de carbono que es adquirido por el agua cuando ésta tiene bicarbonatos, debido que al estar en contacto con agua y a temperaturas altas son transformados a carbonatos. Esto se debe a que cuando los bicarbonatos entran en contacto con un intercambiador de iones ciclo sódico, los bicarbonatos de calcio y magnesio cambian a bicarbonatos de sodio, siendo estos últimos los que producen el bióxido de carbono al aumentar la temperatura. Las líneas de retorno de condensados pueden verse afectadas por estos gases.

### *La corrosión por oxígeno o pitting*

Las consecuencias de corrosión por oxígeno disuelto en agua, en una caldera es que ataca al hierro formando hidróxido férrico. Esta corrosión se ve acentuada en zonas donde existen incrustaciones que con la presencia del oxígeno se forman como ámpulas negras en el material y dependiendo del tiempo que el oxígeno ataca al material, puede llegar a perforarlo. *Figura 4.3*



**Figura 4. 3 Corrosión en tubos de humo por pitting**

**Fuente: Guía Básica de Calderas Industriales eficientes, fenercom pág. 50**

“El bióxido de carbono corroe el material y muy especialmente en presencia de oxígeno disuelto. El bióxido de carbono combinado con el agua, forma ácido carbónico, el cual es un agente de corrosión bajo ciertas condiciones para metales ferrosos, aleaciones de níquel y aleaciones de cobre; ocasionalmente se presenta en el agua otro gas no condensable, llamado hidróxido de amonio o álcali el cual si bien, no corroe las partes metálicas de la caldera, si ataca las aleaciones de cobre comúnmente empleadas en válvulas, tubos y otras conexiones.”<sup>25</sup>

### **Fragilización cáustica**

La fragilización cáustica también conocida como falla intercrystalina, es ocasionada por una acción mecánica o química; la mecánica se debe a que el metal es sometido a un esfuerzo mayor a su límite de elasticidad y la química se presenta por un incremento en la concentración de sales causticas.

Las fallas mecánicas tales como las fugas y las tensiones externas se pueden evitar en las calderas por medio de una correcta fabricación de las mismas.

La fragilización cáustica es provocada por una sobre concentración de sales alcalinas en zonas de elevada carga térmica como fogones, placa trasera y cámara trasera. Este tipo de corrosión se da en forma de cavidades profundas rellenas de óxido *figura 4.4*.

El hidróxido de sodio ataca la estructura intercrystalina del acero a tal grado que sin previo aviso por efecto de la presión interna dentro de la caldera se presentan serias explosiones.

El factor químico puede sobreponerse evitando alcalinidades altas en las salinas de la caldera o por el uso de inhibidores. Se puede utilizar inhibidores orgánicos e inorgánicos.

---

<sup>25</sup> Manual de Calderas SELMEC, Op. Cit., pág. 198



**Figura 4.4 Corrosión caustica**

**Fuente: Guía Básica de Calderas Industriales eficientes, fenercom pág.51**

### **Depósitos**

El agua de calderas tiene sólidos en suspensión que provienen del agua de alimentación o bien de los aditivos y procesos de eliminación de las incrustaciones que se precipitan en el fondo de la caldera en forma de lodos

La conductividad térmica de estos lodos es baja, lo que provoca un daño al metal por sobrecalentamiento también pueden alterar las lecturas de nivel o presión de la caldera.

### **4.3 Tratamiento de agua a calderas**

El agua de alimentación es el agua de reposición que se ha extraído de la caldera por evaporación o por descargas.

El agua de alimentación a la caldera tendrá que ser libre de agentes que puedan dañar a la caldera, tuberías y equipos complementarios. El tratamiento es dividido en tratamiento externo e interno.

Dependiendo de la calidad de alimentación será necesario aplicar uno o varios de los procesos que continuación se detallan.

#### **4.3.1 Tratamiento externo**

- Filtración
- Sedimentación
- Coagulación
- Desaireación
- Suavización
- Dealkalización
- Desmineralización
- Proceso de cal sodada en frío
- Proceso de cal sodada en caliente
- Destilación
- Tratamiento de los condensados

#### **Filtración**

Para la filtración se requieren filtros verticales los cuales tiene un medio filtrante que generalmente es arena fina y el agua se hace pasar a través de ellos.

“El filtro más usado para la filtración del agua que va a alimentar a una caldera es el llamado filtro vertical de presión en la cual la parte filtrante está formada por una serie de capas de diferente material granular y diferente espesor según se ilustra en la *figura 4.5*.

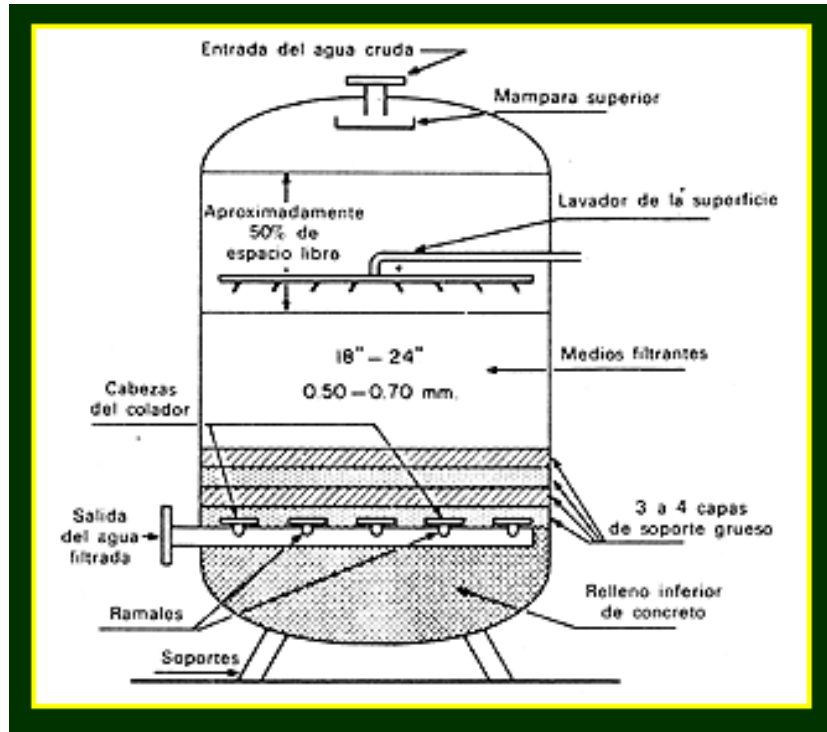


Figura 4.5 Filtro vertical de presión

Fuente: Manual del Agua NALCO Tomo I, 1194, pág. 9-20

Las impurezas de los filtros cuando están saturados de estas, se efectúa principalmente un lavado en contracorriente. La velocidad de filtración para este tipo de filtros de 3 galones por minuto por pie cuadrado de área de filtración.

La tabla 3 enlista las capacidades a 3 gpm/pie<sup>2</sup> de unidades simples y baterías de 2 a 6 unidades de filtros verticales de 75 cm a 3 m de diámetro.”<sup>26</sup>

<sup>26</sup> Manual de Calderas SELMEC, Op. Cit., pág. 201

**Tabla 4.3 Filtros Verticales: áreas, retrolavado y velocidad de filtración de unidades simples y baterías de 2 a 6 unidades, con flujo de 3 gpm/pie<sup>2</sup>**

Diámetro (in)	Unidades simples			Flujo total por batería (gpm)				
	Área (pies <sup>2</sup> )	Retrolavado (gpm)	Flujo (gpm)	2 unidades	3 unidades	4 unidades	5 unidades	6 unidades
36	7.1	70	21	42	63	85	105	125
30	4.9	49	15	30	45	60	75	80
42	9.6	96	29	58	87	115	145	175
48	12.6	126	38	75	113	150	190	225
54	15.9	159	48	95	143	190	240	285
60	19.6	186	59	118	177	235	295	355
66	23.8	238	71	143	215	285	375	430
72	28.3	283	85	170	255	340	425	510
78	33.2	332	100	200	300	400	500	600
84	38.5	385	116	230	350	460	580	695
90	44.2	442	133	265	400	530	665	795
96	50.3	503	150	300	450	605	755	905
102	56.8	568	170	340	510	680	850	1020
108	63.6	636	190	380	570	765	955	1145
120	78.5	785	235	470	705	945	1180	1415

Fuente: Manual de calderas SELMEC, 1976, pág. 202



## Sedimentación

La sedimentación se presenta por la acción de la gravedad sobre las partículas que se encuentran suspendidas en el agua, dando como resultado un agua libre de sólidos y la formación de lodos en el fondo del tanque de precipitados.

“Las impurezas son clasificadas en tres estados de suspensión y estos son en función del diámetro,

- a) Suspensión hasta de  $10^{-4}$  cm
- b) Coloides entre  $10^{-4}$  y  $10^{-6}$  cm
- c) Soluciones para diámetros aún menores de  $10^{-6}$  cm “

La separación de cada uno de ellos es la siguiente.

El primero es por separación simple y separa diámetros de  $10^{-4}$  cm.

El segundo se lleva a cabo por la aglutinación de los coloides para formar un floc y ser eliminado.”<sup>27</sup>

El tercero es la formación de un floc de los sólidos solubles y convertirlo en insoluble para su sedimentación.

Los factores que se consideran como determinantes de la velocidad de sedimentación son principalmente; peso, forma y tamaño de las partículas, viscosidad y resistencia de fricción del agua, etc.

Como ilustración de estos efectos, en la tabla 4 se muestra las velocidades de asentamiento de partículas de arena y fango en agua estancada.

Es frecuente que los tanques de sedimentación presenten varios cambios de dirección con el fin de favorecer la sedimentación. El tiempo límite de la sedimentación lo determinará el diámetro mínimo de las partículas que el tanque pueda remover.

---

<sup>27</sup> Pérez Farrás Luis, *Teoría de la sedimentación*, Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2005. Recuperado de: [http://www.fi.uba.ar/archivos/intitutos\\_teoria\\_sedimentación.pdf](http://www.fi.uba.ar/archivos/intitutos_teoria_sedimentación.pdf)

**Tabla 4.4 Sedimentación de diferentes partículas, a las condiciones de temperatura del agua 10°C y densidad del material 2.65**

Diámetro de la partícula (mm)	Orden de la magnitud	Tiempo necesario para asentarse la partícula 30.5 cm (1 pie)
10.0	Grava	0.3 s
1.0	Arena gruesa	3 s
0.1	Arena fina	38 s
0.01	Fango	33 min
0.001	Bacteria	35 hr
0.0001	Partícula de barro	230 días
0.00001	Partícula coloidal	63 años

Fuente: Manual de calderas SELMEC, 1976, pág. 202

### **Coagulación**

La acción de coagulación se presenta con partículas sólidas muy pequeñas que solo pueden ser eliminadas mediante la formación de un floc por la acción de sustancias químicas. Las sustancias químicas usadas para tal efecto se llaman coagulantes y más frecuentemente usados son el sulfato de aluminio, sulfato férrico, sulfato ferroso, aluminato de sodio, alumbre de potasio o amonio y los precipitados gelatinosos que se obtienen se llaman flóculos.

Si los flóculos o floc se producen en condiciones apropiadas formarán grupos o grumos suficientemente grandes para ser retenidos por el filtro o bien asentarse fácilmente en el tanque de sedimentación.

### **Desaireación**

Esta es empleada para eliminar los gases indeseables como el oxígeno y el bióxido de carbono.

“El fenómeno físico que se presenta en la desaireación es como sigue:

1.- A altas temperaturas la solubilidad de los gases en el agua es muy reducida, por ejemplo, en el aire y a presión atmosférica, el agua a 80°F puede contener 8 veces más oxígeno que a 200°F la desaireación es realizada normalmente a temperatura elevada combinando el proceso con agua de alimentación precalentada.

2.- La solubilidad de un gas en un líquido es proporcional a la presión absoluta del gas en el líquido. Por ejemplo, el aire en el agua a 80°F, contiene 5.5 veces más oxígeno cuando la presión es de 25 lb/in<sup>2</sup> absolutas, que cuando está a 5 lb/in<sup>2</sup> absolutas. Para tomar ventaja de este fenómeno, el agua que ha de tratarse será rodeada por una atmósfera de vapor con el cual se reducirá parcialmente la presión de los gases.

3.- Para que los gases en el agua sean eliminados fácil y rápidamente; el agua deberá ser atomizada, en estas condiciones los gases escapan hacia la atmósfera.”<sup>28</sup>

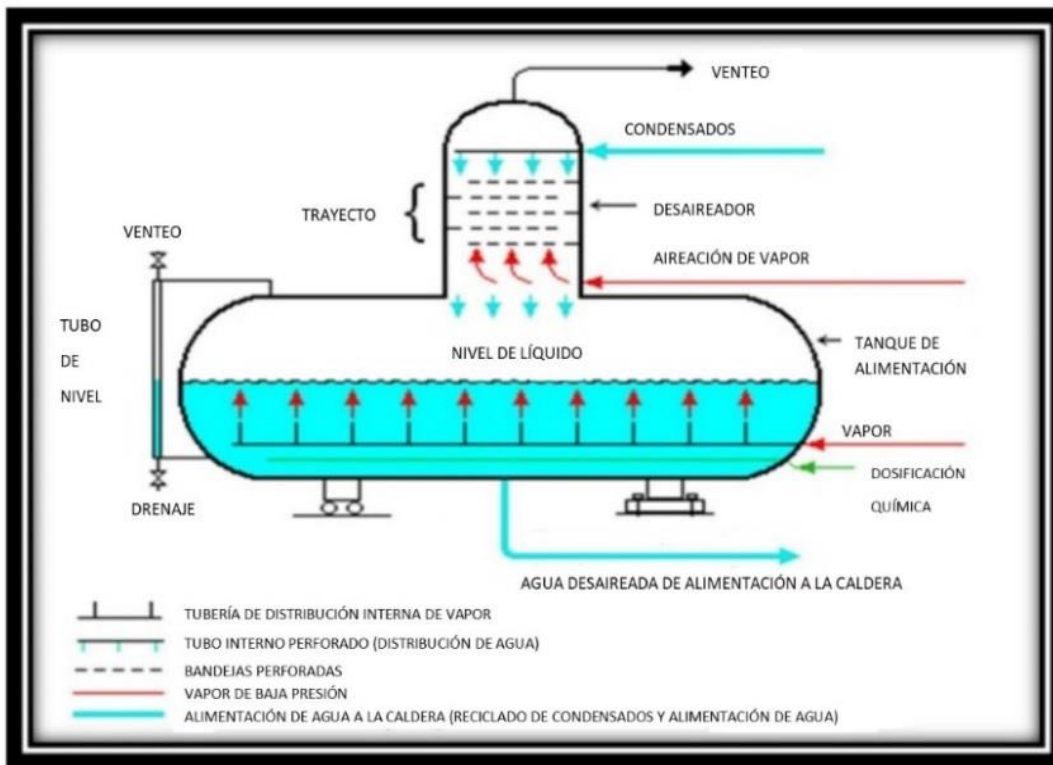


Figura 4. 6 Desaireador

Fuente: INSTITUTO MEXICANO DE INGENIEROS QUÍMICOS, A.C.

<sup>28</sup> Manual de Calderas SELMEC, Op. Cit., pág. 203

## Suavización

Como ya se ha mencionado las sales de calcio y magnesio son las que provocan la dureza en el agua, una manera de eliminarlas es mediante la suavización.

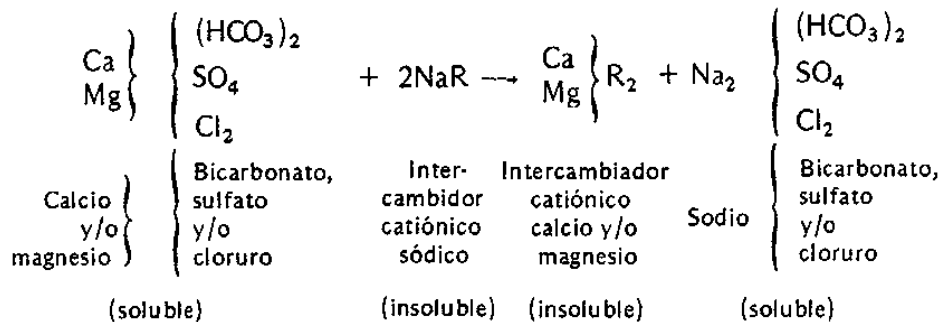
El método más utilizado por su bajo costo es el de intercambio iónico ciclo sódico.

### *Intercambiador iónico ciclo sódico*

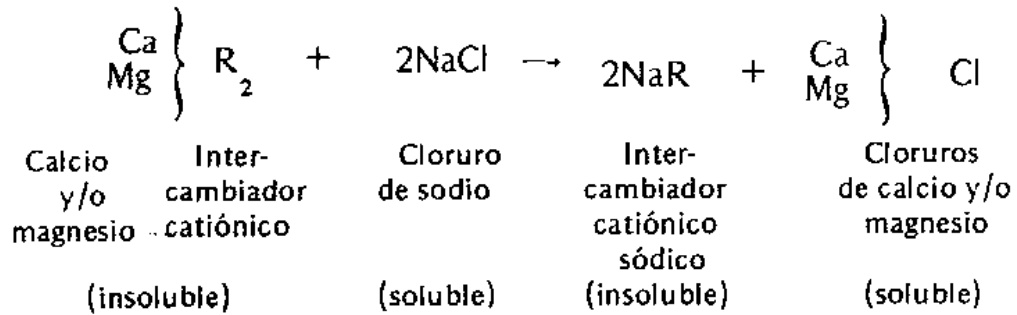
El material intercambiable es conocido con el nombre de zeolita que puede ser de origen sintético o natural. En algunos casos se utilizan compuestos orgánicos sulfurados a los que también se les da el nombre de zeolitas.

“Principio de operación:

Cuando un agua dura se pasa a través de un lecho de un intercambiador continuo, el magnesio y el calcio se fijan en el intercambiador catiónico, el que trasfiere a la solución una cantidad equivalente de sodio. Usando el símbolo “R” para el radical intercambiador las reacciones de ablandamiento son las siguientes:



Cuando la capacidad del intercambiador catiónico para producir un agua completamente blanda se agota, ese ablandador se elimina temporalmente del servicio, se retrolava para limpiarlo, se regenera con una solución de sal común que elimina el calcio y magnesio en forma de sales solubles de cloro. La reacción de regeneración es la siguiente:



Consumo de sal:

En n3meros cerrados, la cantidad te3rica requerida es de 0-17 lb de sal por kilogramo de dureza removida. Sin embargo, es necesario usar un exceso de sal para poder efectuar la regeneraci3n. Con las primeras zeolitas comerciales la cantidad de sal requerida fue de 1 lb/kg. Despu3s, cuando se us3 el "greensand" se determin3 que 0.5 lb de sal por kilogramo es suficiente, en la actualidad el consumo de sal para ablandadores de tipo industrial es de 0.4 lb/kg."<sup>29</sup>

Su desventaja es que no reduce la alcalinidad.

### **C3lculo de la capacidad de un suavizador de agua ciclo s3dico para ablandar el agua de alimentaci3n a una caldera.**

Para efectuar el c3lculo planteado es necesario conocer los siguientes datos:

- 1) Dureza del agua de alimentaci3n en partes por mill3n expresada como CaCO<sub>3</sub>
- 2) Capacidad de la caldera en caballos caldera o capacidad de evaporaci3n de la misma
- 3) Horas de operaci3n al d3a
- 4) Porcentaje de retorno de condensados

Se parte del hecho que se cuenta con una caldera con capacidad de 100 caballos caldera, la cual trabaja las 24 h al d3a y cuenta con un 40% de retorno, la dureza del agua de alimentaci3n es de 200 ppm como CaCO<sub>3</sub>

$$\text{Capacidad de evaporaci3n} = 15.65 \text{ kg/h} \times 100 \text{ CC} = 1565 \text{ kg/h}$$

<sup>29</sup> Manual de Calderas SELMEC, Op. Cit., p3g. 204

Agua de reposición = 60% de 1565 kg/h = 939 kg/h  
Dureza por eliminar = 939 kg/h x 200 ppm = 187,800 ppm/h  
Capacidad del suavizador por día = 187,800 ppm/h x 24 h = 4,507,200

La capacidad del suavizador puede calcularse por día siendo la regeneración diaria o bien cada dos o tres o más días.

Cuando se requiere de un suministro de agua suave en forma ininterrumpida se utilizan dos columnas de resina estando siempre una columna en operación mientras que la segunda se encuentra regenerando. A este sistema se le conoce como Dúplex. Cuando el sistema consiste en una sola columna se le denomina Simplex *figura 4.7*.

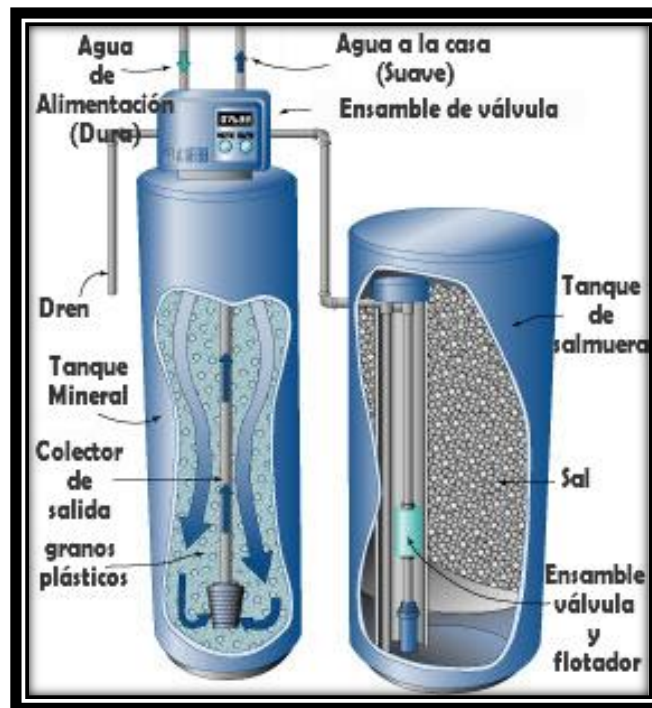


Figura 4.7 Suavizador simplex

Fuente: <https://www.purificadoragua.tododeagua.mx/filtro/suavizadores-residencial-y-comercial-suavizador-de-agua-de-2-pie-cubico-valvula-logix-performa-de-control-automatico-sc60-268-so.html>

**Tabla 4.5 Intercambiadores catiónico ciclo sódico**

Intercambiadores Catiónicos Sódicos	Tamaño (malla)	Peso (lb/pie <sup>3</sup> )	Color	Consumo de sal		Capacidades (Kg/pie <sup>3</sup> )
				(lb/kg)	(lb/pie <sup>3</sup> )	
Resina de poliestireno alta capacidad	16-50	53	Ámbar	0.5	13.5	27
				0.45	11.7	26
				0.40	10.0	25
				0.35	8.4	24
				0.30	6.6	22
				0.275	5.5	20
Carbonáceas	16-50	24-30	Negro	0.45	3.15	7
				0.40	2.68	6.7
				0.375	2.37	6.3
				0.35	2.10	6
Zeolitas sintéticas (tipo gelatinoso)	16-50	54	Blanco o blanco amarillo	0.5	0.5	10
				0.45	4.05	9
				0.4	3.2	8
Greensand alta capacidad	16-50	80	Negro	0.5	2.75	5.5
				0.45	2.25	5
				0.4	1.76	4.4
Greensand estándar	16-50	85	Verde	0.5	1.5	3
				0.45	1.26	2.8
				0.4	0.96	2.4

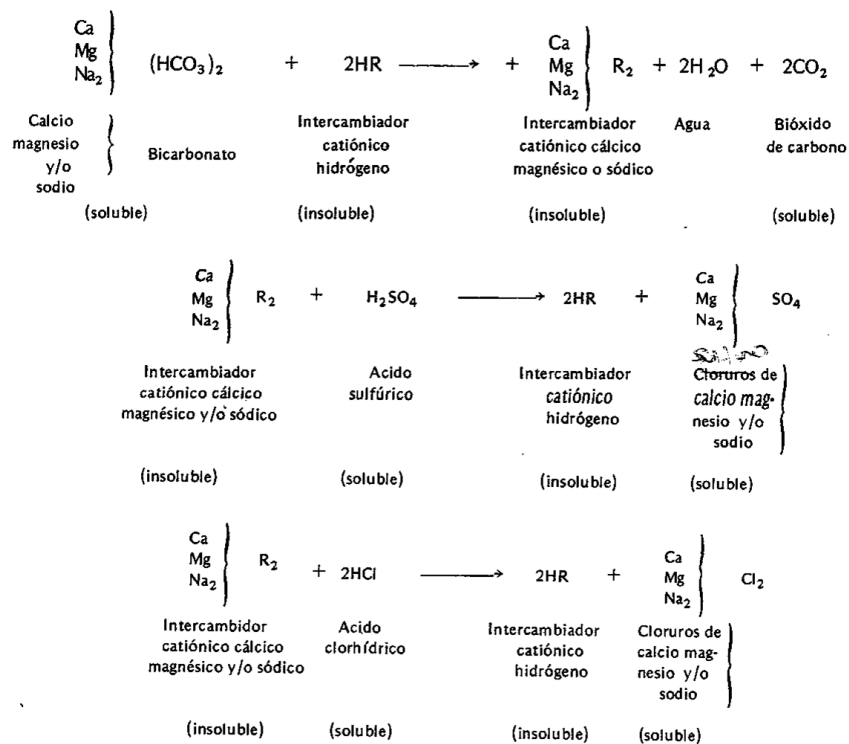
Fuente: Manual de calderas SELMEC, 1976, pág. 205

## Dealkalización

### Proceso de intercambio iónico ciclo hidrógeno

La dealkalización es un intercambio catiónico ciclo hidrógeno, para realizarla se utiliza ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) y el clorhídrico (HCl). Este método presenta la característica de reducir la alcalinidad y los sólidos, además de eliminar completamente la dureza, su limitante es su alto costo de operación.

“Reacciones que se llevan a cabo en el intercambio iónico ciclo hidrógeno.



Dosis de regeneración:

La cantidad teórica de ácido sulfúrico de 66° Be (93.2 %  $H_2SO_4$ ), requerida para 1 kg de cationes como  $CaCO_3$  es de 0.062 kg sin embargo es necesario usar un exceso el cual depende del tipo de intercambiador. En general la dosis requerida es de 2 a 4 veces la cantidad teórica.



Para el caso del ácido clorhídrico la dosis es de 2 a 4 veces la cantidad teórica, siendo esta 0.104 libra de HCl por kilogramos de cationes.<sup>30</sup>

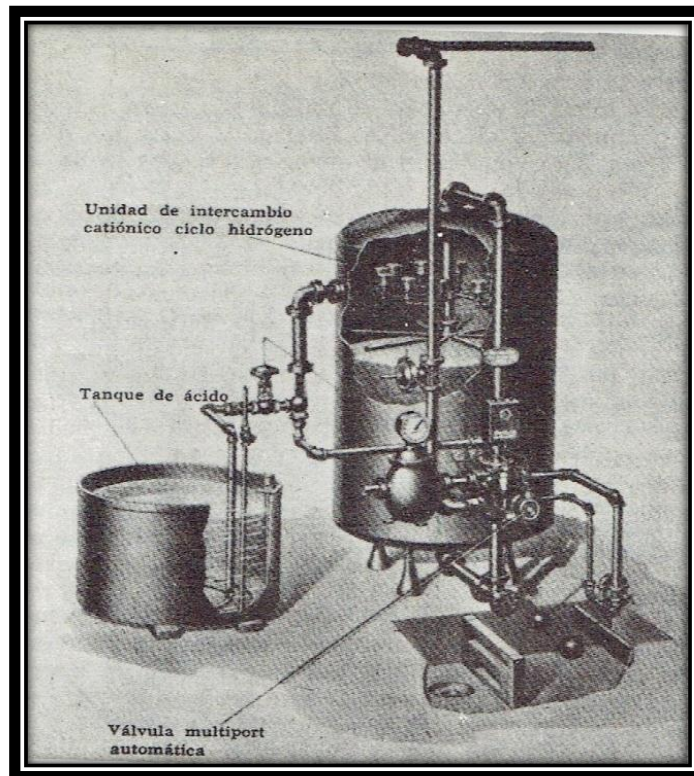
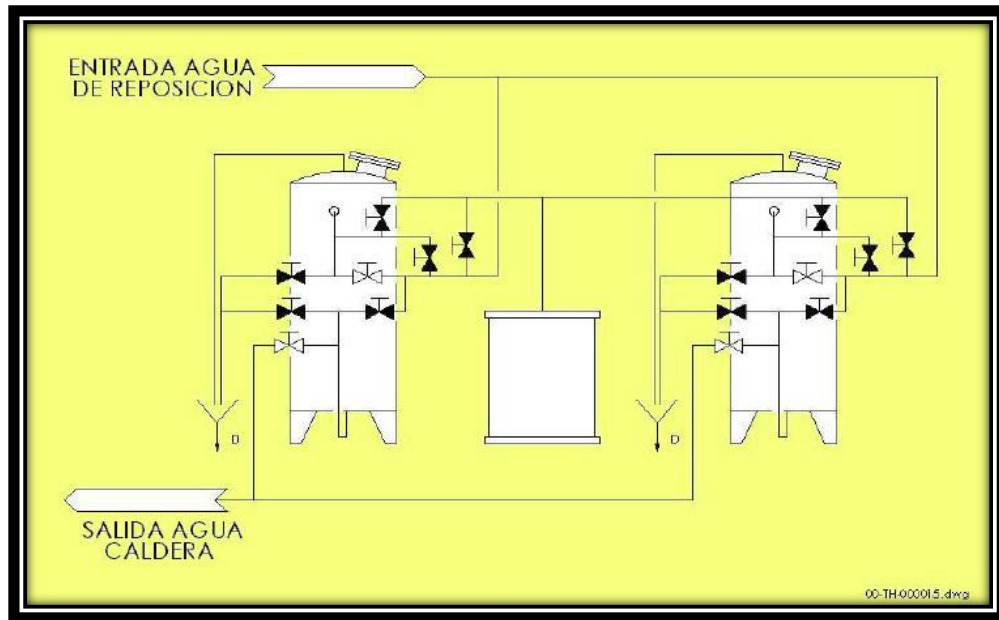


Figura 4. 8 Intercambiador catiónico ciclo hidrógeno, de operación automática y tanque regenerador.

Fuente: Manual De Calderas SELMEC, 1976, pág.208

<sup>30</sup> Manual de Calderas SELMEC, Op. Cit., pág. 207



**Figura 4. 9 Esquematzación de tratamiento de dureza de agua**

**Fuente: Guía Básica de Calderas Industriales eficientes, fenercom pág. 59**

### **Desmineralización**

Solamente hay dos procesos para remover prácticamente toda la materia mineral del agua. Estos son la desmineralización por intercambio iónico y la destilación. Siendo de frecuente uso la desmineralización por su más bajo costo.

Los procesos de desmineralización por intercambio iónico, se usan ampliamente en el tratamiento de agua para calderas de alta presión y para eliminar sílice.

En esta sección nos ocuparemos de la remoción de sílice, dado que el proceso de suavización fue tratado en la eliminación de la dureza por sales de calcio y magnesio.

La remoción de sílice no siempre es necesaria, está en función de la presencia de turbinas, debido a que ahí se presenta la condensación y por ende la concentración de sílice, que al no ser totalmente disociado viaja a través del vapor provocando incrustaciones muy difíciles que eliminar.

“...Se considera primero un sistema de desmineralización y eliminación de sílice en dos etapas, el primer paso sería pasar el agua a través del intercambiador catiónico en ciclo hidrógeno, y el segundo pasar este efluente a través de un intercambiador aniónico altamente básico. En el primer paso, los cationes de hidrógeno serían intercambiados por los cationes; calcio, magnesio, sodio, que serían tomados por el intercambiador catiónico. Esto daría como resultado la formación de ácidos minerales fuertemente ionizados, tales como sulfúrico, clorhídrico y/o ácidos nítricos y ácidos muy poco ionizados tales como el carbónico.

En el segundo paso, tanto los ácidos fuertemente ionizados como los débiles que se formaron en el primer paso, serían tomados por el intercambiador aniónico, el que daría en intercambio una cantidad equivalente de iones de hidroxilo que se unirán.

Por lo tanto, el equipo que se usa puede ser una unidad (o batería de unidades) de intercambio catiónico en ciclo hidrógeno y una unidad (o batería de unidades) de intercambio aniónico fuertemente básico, con sus respectivos tanques regeneradores.

La regeneración una vez agotadas las resinas se hará con ácido sulfúrico para el caso de intercambiador catiónico en ciclo hidrógeno o bien con ácido clorhídrico.

Para el intercambiador aniónico fuertemente básico la regeneración se llevaría a efecto con hidróxido de sodio NaOH.”<sup>31</sup>

### **Proceso de cal sodada en frío**

Este proceso está en función de la composición del agua de alimentación y las necesidades del proceso. Mediante este método es factible la eliminación de otras sustancias como sílice, hierro, manganeso, fluoruro y dureza hasta “17 ppm”, dato reportado por el manual de calderas SELMEC. en la *figura 4.10* se puede ver un precipitador para el proceso de cal sodada en frío.

---

<sup>31</sup> Manual de Calderas SELMEC, Op. Cit., pág. 209

Las sustancias químicas más utilizadas en este proceso son la cal viva, cal hidratada y para la eliminación de sílice dolomita o cal dolomítica hidratada.

La cal viva también tiene el nombre de cal quemada y su pureza deberá de ser de 90% de CaO.

El manejo de la cal hidratada es más fácil que el de la viva, la pureza promedio de ella es de 93% de  $\text{Ca(OH)}_2$ .

En la cal dolomítica y cal dolomítica hidratada el contenido de magnesio que contienen tiende a variar, para la eliminación de sílice la cal dolomítica deberá tener un promedio de 58% de CaO y 40% de MgO, la cal dolomítica hidratada deberá tener 62% de  $\text{Ca(OH)}_2$  y 32% de MgO.

Soda ash, el grado comercial usado es la ligera con 58% de  $\text{Na}_2\text{O}$  que es equivalente a 99.2% de carbonato de sodio.

Los coagulantes más utilizados es el de sulfato de aluminio, sulfato férrico y sulfato ferroso.

Los ablandadores para este proceso, son los de tipo continuo como: el de lecho suspendido, tipo convencional, el de tipo catalítico en estos el agua es tratada conforme pasa por él equipo, y el de tipo intermitente.

### **Proceso de cal sodada en caliente**

Los procesos de cal sodada en caliente pueden clasificarse en tres divisiones:

1. Proceso de cal sodada en caliente.
2. Proceso en dos pasos, cal sodada en caliente y fosfatos.
3. Proceso en dos pasos, cal en caliente e intercambio catiónico ciclo sódico.

Además, la eliminación de sílice puede añadirse a cualquiera de estos procesos. Las reacciones químicas en el proceso en caliente se efectúan más rápido que en el proceso cal sodada en frío. Los precipitados son más pesados, ya que el agua caliente es menos viscosa, el asentamiento es más rápido y no es necesario el uso de coagulantes.

El proceso de cal sodada en caliente es un proceso continuo, en el cual el agua primero se calienta, segundo se trata con una cantidad determinada de productos químicos, lo que produce un asentamiento y por último se filtra.

Las sustancias químicas usadas son soda ash y cal hidratada. Cuando se requiere eliminar sílice puede usarse cal dolomita hidratada y/o magnesia activada.

**“Calculo de Reactivos (dosis requerida).**

A = Alcalinidad como  $\text{CaCO}_3$  en ppm

Mg = Dureza de magnesio como  $\text{CaCO}_3$  en ppm

H = Dureza total  $\text{CaCO}_3$  en ppm

Cal hidratada (93%), libras por cada 1000 galones de agua =  $A + \text{Mg}/151$

Si se usa cal viva (90%), libras por cada 1000 galones de agua =  $A + \text{Mg}/193$

Soda ash (98%), libras por cada 1000 galones de agua =  $H - A/111 + \text{exceso}$

El exceso es usualmente es de 0.25 libras.”<sup>32</sup>

En la *figura 4.11* se observa una planta de tratamiento de cal sodada en caliente y eliminación de sílice.

---

<sup>32</sup> Manual de Calderas SELMEC, Op. Cit., pág. 210

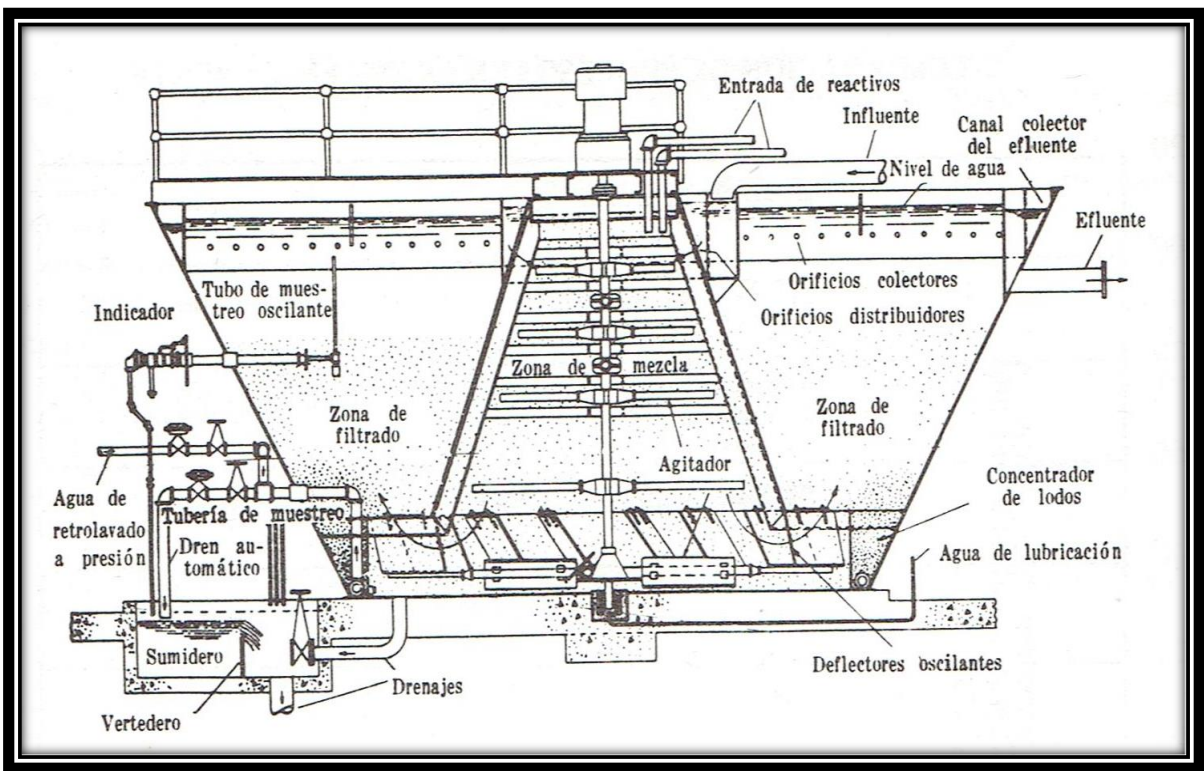


Figura 4.10 Precipitador vertical para un proceso de cal sodada en frío

Fuente: Manual de Calderas SELMEC Cleaver Brooks, 1976, pág. 212

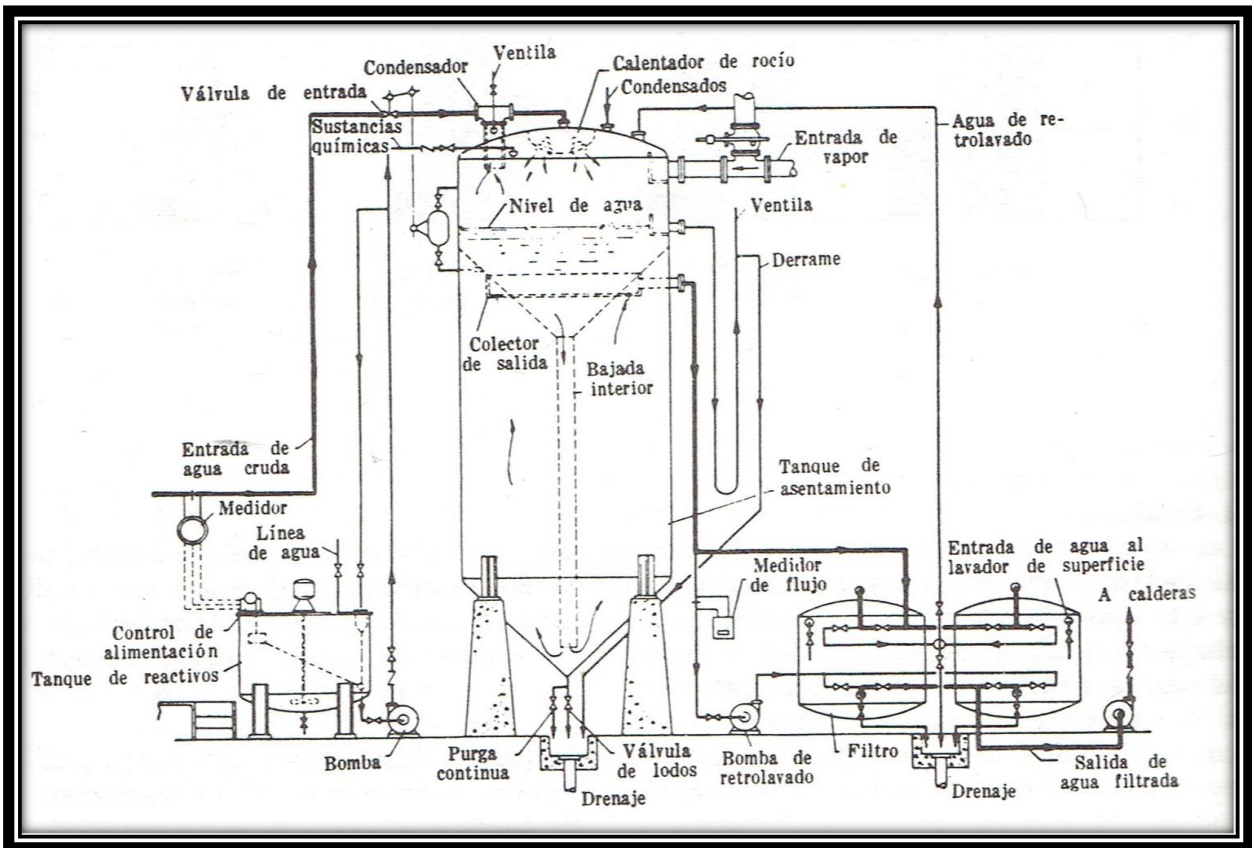


Figura 4.11 Planta de ablandamiento de agua para el proceso de cal sodada en caliente y eliminación de sílice

Fuente: Manual de Calderas SELMEC Cleaver Brooks, 1976, 212

## Destilación

Las ventajas de la destilación son que remueven casi completamente no solo la dureza, si no también todas las sustancias minerales disueltas en el agua cruda. Su principal desventaja es su alto costo inicial y de operación.

## Tratamiento de los condensados

Los condensados son prácticamente agua destilada que usualmente contiene pequeñas cantidades de materia mineral la que varía desde alguna ppm hasta un poco más de 20 ppm el contenido de dureza puede variar desde cero hasta 15 ppm, también puede estar

presente cierta cantidad de bióxido de carbono, así como de oxígeno disuelto los que pueden ser eliminados por deseireación según convenga o bien por sulfito de sodio como un tratamiento interno.

En plantas donde se manejan presiones altas el condensado deberá ser de alta calidad y deberá eliminarse las impurezas como el hierro, cobre, sílice y electrolitos que ocasionan corrosión o bien incrustaciones deberán reducirse a lo mínimo.

#### **4.3.2 Tratamiento interno**

El objetivo principal del tratamiento interno es prevenir la corrosión e incrustación que dañen el equipo y reduzca la transferencia de calor.

La calidad del agua debe de ser adecuada en cualquier punto del proceso del generador de vapor ya sea el agua de reposición, agua de alimentación, agua de interior de la caldera, condensados, vapor sobrecalentado, vapor recalentado. Si se trabaja con criterios de calidad se logrará una mejor eficiencia energética, disminuirá la incrustación o corrosión, se podrá disminuir el caudal de purga y por tanto se disminuirá los costos de operación del equipo.

#### **Corrosión**

La corrosión en calderas es por presencia de oxígeno o "Pitting" y corrosión cáustica.

La corrosión por oxígeno consiste en la reacción de oxígeno disuelto en el agua con los componentes metálicos de la caldera.

La prevención de la corrosión por oxígeno se consigue mediante una adecuada desgasificación del agua de alimentación y mantener un exceso de secuestrante de oxígeno en el agua de calera.

Otra corrosión en caldera puede encontrarse en la línea de retorno de condensados, ya que los óxidos producidos son arrastrados a la caldera con el agua de alimentación.



La corrosión en la línea de retorno de condensados se produce por la acción del ácido carbónico que en estas se forma.

La prevención de la corrosión en la línea de retorno de condensados, puede ser a través de aminas neutralizantes o fílmicas tales como la morfolina y la ciclohexilamina, que neutralizan la acción del ácido carbónico y aminas fílmicas que forman una película en el interior de la tubería de condensados protegiéndolas contra la humedad, es ODA (octadecilamina) y el tallow (amina de soya),

“...Las aminas volátiles (neutralizantes) son adecuadas en sistemas con agua que requieren poco tratamiento previo, con poca alcalinidad y buen control del oxígeno. Las aminas fílmicas dan una protección más económica en los sistemas con buen tratamiento previo alta alcalinidad y en los sistemas que operan intermitentemente. En la mayoría de los casos se recomienda la combinación de ambos métodos...”<sup>33</sup>

La presencia de CO<sub>2</sub> como tal o formando ácido carbónico, es causante de corrosión a calderas.

La utilización conjunta de desgasificadores mecánicos y reductores químicos es lo usual para tratar estos problemas.

Los reductores químicos más utilizados son:

Sulfito sódico: su empleo está limitado a calderas de baja o media presión. Su reacción con el oxígeno es, muy rápida incluso con agua fría y da lugar a la formación de sulfatos, incrementando la salinidad del agua. Es un producto apto para el tratamiento de calderas cuyo vapor estará en contacto con alimentos.

Hidracina: es el desoxigenante más ampliamente usado para calderas que operan a muy alta presión, pese a que se sospecha que es un precursor de cáncer. Los productos de reacción son inertes y no modifican las características del agua. Su reactividad es inferior a la del sulfito sódico, por lo que suele emplearse catalizada. Este compuesto es el de mayor porcentaje de efectividad.

Carbohidracida: se trata de un producto no hidracínico, pero que produce hidracina en el interior de la calera. Como efecto negativo también produce CO<sub>2</sub> por descomposición,

---

<sup>33</sup> Fuente: [http://catarina.udlap.mx/u\\_dl\\_a/tales/documentos/lqi/bautista\\_v\\_g/capitulo5.pdf](http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lqi/bautista_v_g/capitulo5.pdf), pág 30

Dietil hidroxilamina (DEHA): se trata de un reductor no hidracínico, altamente volátil y que por descomposición da lugar a la formación de ácido acético y CO<sub>2</sub>, por lo que su aplicación debe controlarse adecuadamente y su uso limitado a baja y media presión.

Hidroquinona: se trata de un reductor volátil y con muy elevada reactividad, motivo por lo que se utiliza para catalizar la reacción de reducción con otros desoxigenantes. La reactividad con el O<sub>2</sub> es alta incluso a bajas temperaturas.

Para controlar la corrosión de los condensados, es necesario usar algún tipo de amina que neutraliza a las condiciones de acidas, también es posible utilizar el intercambio iónico., que consiste en el intercambio de bicarbonatos y sulfatos por cloruro de sodio, el cual no provoca ningún problema en la caldera. Estos equipos operan como un suavizador de agua y son regeneraos con sal común. Al no haber bicarbonato en el agua de alimentación, el bióxido de carbono en condensados es muy bajo y por tanto la corrosión en la línea de retornos deja de ser problema.

Para evitar la fragilización cáustica puede utilizarse inhibidores orgánicos e inorgánicos.

Los fosfatos y nitratos de sodio se encuentran entre los inhibidores inorgánicos, así como la relación entre sulfatos y carbonatos que deben de mantenerse en las salinas de la caldera.

Los sulfonatos, el quebracho y los taninos son inhibidores orgánicos.

“El Nitrato de sodio su dosificación es de 0.3 – 0.4 ppm por 1ppm de alcalinidad.

Las relaciones de Sulfato-Carbonato sugeridas por ASME <sup>34</sup>

**Tabla 4.6 Las relaciones de Sulfato-Carbonato sugeridas por ASME**

PRESION DE OPERACIÓN		
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> = 1	Caldera 150 lb/in <sup>2</sup>
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> = 2	Caldera hasta 250 lb/in <sup>2</sup>
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> = 3	<250 lb/in <sup>2</sup>

<sup>34</sup> Manual de Calderas SELMEC, Op. Cit., pág. 215

## **Incrustación**

La presencia de restos salinos en el agua de alimentación tales como  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{CO}_3$ ,  $\text{CO}_3\text{OH}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}^{+2}$  pueden dar lugar a la formación de precipitados que pueden originar incrustaciones o lodos dependiendo de su naturaleza y de la capacidad acondicionadora de los estabilizantes aplicados. Los depósitos formados dan como resultado una baja conductividad térmica y originan una pérdida importante de la transferencia de calor, lo que puede ocasionar una serie de acontecimientos que pueden terminar en rupturas. La prevención es tener cuidado con la calidad del agua de alimentación, la aplicación de anti-incrustantes o estabilizantes adecuados.

Los tratamientos a base de fosfatos basan su acción en la formación de precipitados no adherentes, fundamentalmente con sales en solución incluso por encima de sus productos de solubilidad, para ser eliminadas por las purgas continuas. En las calderas de alta y muy alta presión, el tratamiento de fosfatos, además de evitar la incrustación de las sales, permite controlar el pH del agua de la caldera. La presencia de ácido carbónico, silícico y ácidos orgánicos, puede disminuir los pH del vapor y condensados producidos. Estos pH deben ser corregidos y estabilizados en un valor próximo a 9 y para ello se utilizan alcalinizantes volátiles, que en el caso del vapor para turbinas deben afectar mínimamente a la conductividad catiónica.

Los fosfatos más comúnmente usados son el fosfato monosódico anhidro, fosfato monosódico, fosfato disódico, fosfato disódico anhidro, fosfato trisódico y metafosfato de sodio

Los productos habitualmente utilizados en calderas de baja y media presión son aminas neutralizantes del tipo morfolina, ciclohexilmina, 2-amino2-metilpropanol, dietilamino etanol, etc., mientras que en calderas de muy alta presión el producto habitualmente utilizado es el amoniaco. Las aminas se distinguen por su capacidad neutralizante y por su coeficiente de reparto (vapor/agua).

## Purgas

Tiene la finalidad de extraer de la caldera cierto porcentaje de agua, reemplazándola por una mezcla de agua de alimentación y agua de condensados.

El número de purgas que se deben realizar se lleva a cabo por la medición de cloruros en el agua de alimentación y agua de caldera. Los cloruros son utilizados como variable de control, ya que no participan en el tratamiento de agua y son fáciles de medir mediante el método de las gotas (reacción entre nitrato de plata y el cloruro).

Se realizan dos tipos de purga las de fondo en forma de lodos y las purgas superficiales o sales disueltas.

La purga de fondo se encuentra en la parte inferior de la caldera y elimina los precipitados del fondo en forma de lodos. *Figura 4.12.*

Esta purga está formada por una válvula de rápido accionamiento, un activador neumático y un temporizador, para programar los ciclos de la purga de fondo requeridas.

En general calderas con presión menor a 213 lb/in<sup>2</sup> la calidad del agua de alimentación puede no ser tan estricta y podrá aumentarse el número de purgas, teniendo como consecuencia un aumento en el consumo de combustible.

Las purgas superficiales *figura 4.13* o de sales disueltas, son purgas automáticas que se encuentran formadas por un sensor de conductividad, una válvula con actuador y un controlador. El sensor de conductividad mide la conductividad del agua de la caldera (sólidos disueltos) y envía la información al controlador. Este a su vez compara el valor obtenido con el de conductividad máxima previamente programado, para luego abrir o cerrar la válvula de purga.

En no contar con un porcentaje de purga adecuado en la caldera dará como resultado espuma y arrastre y a su vez contaminará el vapor generado, con consecuencias negativas en el proceso que se vaya a utilizar dicho vapor.

Método para el cálculo de purga con respecto de a vaporización.

$$\%Purga = [TAC \text{ alimentación} / TAC \text{ máxima en caldera} - TAC \text{ alimentación}] \times 100$$

Donde:

TAC = alcalinidad total

Si el cálculo arroja un porcentaje de purga mayor del 25% de la vaporización total, es necesario realizar un tratamiento de agua con mayor control en el agua de alimentación.

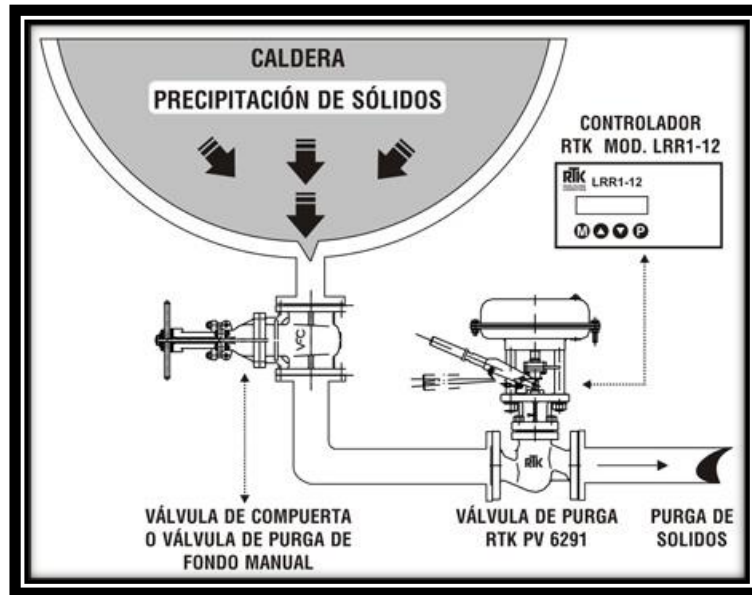


Figura 4.12 Purga de fondos

Fuente: <https://vaportecvalvulas.wordpress.com/notiboletines/>

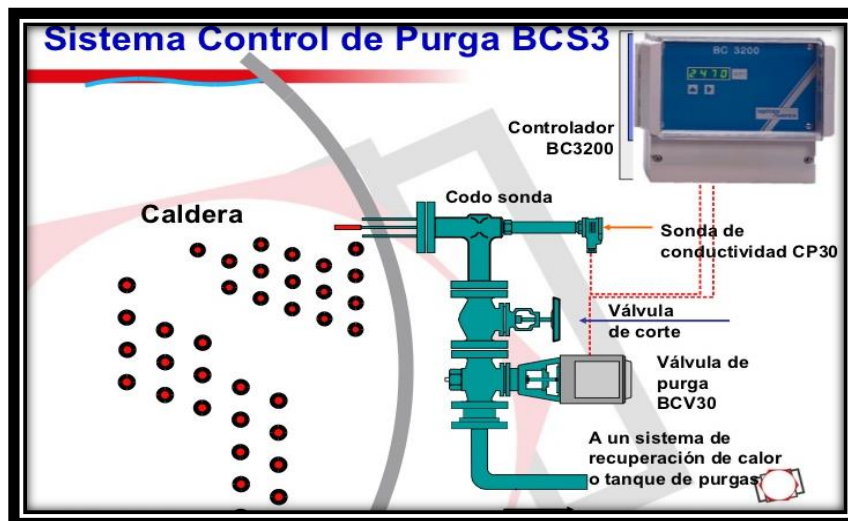


Figura 4.13 Purga automática de superficie

Fuente: <https://es.slideshare.net/TermoEficiente/uso-eficiente-de-la-energia-del-vapor>

#### 4.4 Normas oficiales vigente en tratamiento de agua para calderas de vapor

La normatividad vigente referente a los recipientes a presión se encuentra en la norma NOM-020-STPS-2011.

La norma BS 2486 del Reino Unido aporta datos sobre los estándares en agua de alimentación a calderas, ya que hasta el momento no se cuenta con una norma Oficial Mexicana.

Tabla 4.7 Requerimientos agua alimentación calderas vapor según BS 2486

PARÁMETRO	VALOR REQUERIDO
Dureza total	< 2 ppm
Contenido de oxígeno	< 8 ppb
Dióxido de carbono	< 25 mg/l
Contenido total de hierro	< 0,05 mg/l
Contenido total de cobre	< 0,01 mg/l
Alcalinidad total	< 25 ppm
Contenido de aceite	< 1 mg/l
pH a 25 °C	8.5 – 9.5
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.

**Tabla n°1: Requerimientos agua alimentación calderas vapor según BS 2486.**

Fuente norma BS 2486 Reino Unido

Tabla 4.8 Requerimientos agua caldera según BS 2486

PARÁMETRO	VALOR RECOMENDADO
pH a 25 °C	10.5 - 11,8
Alcalinidad Total CaCO <sub>3</sub>	< 700 ppm
Alcalinidad Cáustica	> 350 ppm
Secuestrantes de Oxígeno:	
□ Sulfito de Sodio	30 – 70 ppm
□ Hidrazina	0.1 – 10 ppm
□ Taninos	120 – 180 ppm
□ Dietilhidroxilamina	0.1 – 1.0 ppm (en agua alimentación)
Fosfato Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	30 - 60 mg/l
Hierro	< 3.0 ppm
Sílice	150 ppm
Sólidos disueltos	< 3500 ppm
Sólidos en suspensión	< 200 ppm
Conductividad	< 7000 uS/cm
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.

**Tabla n°2: Requerimientos agua caldera según BS 2486.**

Fuente norma BS 2486 Reino Unido

#### 4.5 Formatos sugeridos para control de agua en calderas

Un análisis de lo anterior expuesto, hace reconocer la importancia de las características del agua en las calderas, por tanto, se presentan formatos para el registro de los parámetros del agua que al ser medibles son susceptibles a su control.

Para prevenir eventualidades en la operación de calderas es importante tomar en cuenta los siguientes puntos:

- ✓ Qué se va hacer, quién lo va hacer, con qué se va hacer
- ✓ Contra que se van a medir los parámetros
- ✓ Verificar la caducidad de los reactivos
- ✓ Respetar los procedimientos para el muestro y técnica del procedimiento.
- ✓ La calibración del equipo que se utilizará para las pruebas de verificación de la caldera
- ✓ Calibración de válvulas de seguridad, medidores de presión, temperatura, flujo, indicadores de nivel, etc. de acuerdo con el programa de mantenimiento.

##### 4.5.1 Formatos para el control de incrustaciones.

Los siguientes formatos sugeridos contribuyen a plasmar la información obtenida en campo:

- Determinación en campo de agua **de alimentación** por el operador
- Determinación en campo de agua **de alimentación** por operador y contratista
- Determinación en campo de agua **en caldera** por el operador
- Determinación en campo de agua **en caldera** por operador y contratista
- Control de purgas

Formato 4.1 DETERMINACIÓN EN CAMPO DE AGUA DE ALIMENTACIÓN POR  
EL OPERADOR

JEFE DEL DEPARTAMENTO:	OPERARIO DE CALDERAS:
CALDERA:	FECHA:

PARAMETROS	VALOR RECOMENDADO	T°C	MUESTRA RED	TANQUE SUAVIZADOR	TANQUE CONDENSADOS	CALDERA
Dureza total NMX-AA-072-SCFI-2001	<2ppm					
Contenido de oxígeno	<8ppm					
Dióxido de carbono	<25 mg/L					
Contenido total de hierro	<0.05 mg/L					
Contenido total de cobre	<0.01 mg/L					
Alcalinidad total	<25 ppm					
Contenido de aceite	<1 mg/L					
pH a 25 °C	8.5 – 9.5					
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles					
Cloro total	<0.5 ppm					

Nota: se realizarán las determinaciones el primer día de la semana, o antes si se requiere, por sospecha de alguna falla en el proceso.

Los parámetros que se encuentren fuera de rango se deberán anotar las acciones tomadas por el ingeniero responsable y ser reportadas por escrito con fecha y hora de inicio y termino de la actividad.

OBSERVACIONES:

NOMBRE Y FIRMA JEFE DEL DEPARTAMENTO

NOMBRE Y FIRMA DEL OPERARIO



Formato 4.2 DETERMINACIÓN EN CAMPO DE AGUA DE ALIMENTACIÓN POR  
OPERADOR Y CONTRATISTA

NOMBRE DEL CONTRATISTA	OPERARIO DE CALDERAS:
CALDERA:	FECHA:

PARAMETROS	VALOR RECOMENDADO	T°C	MUESTRA RED		TANQUE SUAVIZADOR		TANQUE CONDENSADOS		CALDERA	
			C	O	C	O	C	O	C	O
Dureza total NMX-AA-072- SCFI-2001	<2ppm									
Contenido de oxígeno	<8ppm									
Dióxido de carbono	<25 mg/L									
Contenido total de hierro	<0.05 mg/L									
Contenido total de cobre	<0.01 mg/L									
Alcalinidad total	<25 ppm									
Contenido de aceite	<1 mg/L									
pH a 25 °C	8.5 – 9.5									
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles									
Cloro total	<0.5 ppm									

Nota: Se realizarán las determinaciones la primera semana de mes por el contratista, tras habilidad con operario de la planta. Donde C resultados contratista y O resultados operario.

Los parámetros que se encuentren fuera de rango se deberán anotar las acciones tomadas por el ingeniero responsable y ser reportadas por escrito con fecha y hora de inicio y termino de la actividad.

OBSERVACIONES:

NOMBRE Y FIRMA JEFE DEL DEPARTAMENTO	NOMBRE Y FIRMA DEL CONTRATISTA

## Formato 4.3 DETERMINACIÓN EN CAMPO DE AGUA EN CALDERA POR EL OPERADOR

JEFE DEL DEPARTAMENTO:	OPERARIO DE CALDERAS:
CALDERA:	FECHA:

PARAMETROS	VALOR RECOMENDADO	T°C	MUESTRA CALDERA	VALORES FUERA DE RANGO	RECOMENDACIONES
pH a 25°C	10.5 – 11.8				
Alcalinidad total NMX-AA-03-SCFI-2001	<700 ppm				
Alcalinidad Cáustica	<350 ppm				
Secuestrantes de Oxígeno <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sulfato de sodio</li> <li>▪ Hidracina</li> <li>▪ Taninos</li> <li>▪ Dietilhidroxilamina</li> </ul>	Valores 30 – 70 ppm 0.1 – 10 ppm 120 - 180ppm 0.1 - 1.0ppm (en agua de alimentación)				
Fosfato Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	30 -60 mg/L				
Hierro	<3.0 ppm				
Sílice	150 ppm				
Sólidos disueltos	<3500 ppm				
Sólidos en suspensión	<200 ppm				
Conductividad	<7000 uS/cm				
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.				

Nota: Se realizarán las determinaciones el primer día de la semana, o antes si se requiere, por sospecha de alguna falla en el proceso.

Los parámetros que se encuentren fuera de rango se deberán anotar las acciones tomadas por el ingeniero responsable y ser reportadas por escrito con fecha y hora de inicio y termino de la actividad.

OBSERVACIONES:

NOMBRE Y FIRMA JEFE DEL DEPARTAMENTO	NOMBRE Y FIRMA DEL OPERARIO

## Formato 4.4 DETERMINACIÓN EN CAMPO DE AGUA EN CALDERA POR OPERADOR Y CONTRATISTA

JEFE DEL DEPARTAMENTO:	OPERARIO DE CALDERAS:
CALDERA:	FECHA:

PARAMETROS	VALOR RECOMENDADO	T°C	MUESTRA CALDERA	MUESTRA CALDERA	VALORES FUERA DE RANGO	RECOMENDACIONES
			C	O		
pH a 25°C	10.5 – 11.8					
Alcalinidad total NMX-AA-036-SCFI-2001	<700 ppm					
Alcalinidad Cáustica	>350 ppm					
Secuestrantes de Oxígeno <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sulfato de sodio</li> <li>▪ Hidracina</li> <li>▪ Taninos</li> <li>▪ Dietilhidroxilamina</li> </ul>	Valores 30 – 70 ppm 0.2 – 10 ppm 120 - 180ppm 0.1 - 1.0ppm (en agua de alimentación)					
Fosfato Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	30 -60 mg/L					
Hierro	<3.0 ppm					
Sílice	150 ppm					
Sólidos disueltos	<3500 ppm					
Sólidos en suspensión	<200 ppm					
Conductividad	<7000 uS/cm					
Condición general	Incoloro, claro y libre de agentes insolubles.					

Nota: Se realizarán las determinaciones la primera semana de mes por el contratista, o antes si se requiere, tras habilidad con operario de planta. Donde **C** resultados contratista y **O** resultados de operario.

Los parámetros que se encuentren fuera de rango se deberán anotar las acciones tomadas por el ingeniero responsable y ser reportadas por escrito con fecha y hora de inicio y termino de la actividad.

OBSERVACIONES:

NOMBRE Y FIRMA JEFE DEL DEPARTAMENTO

NOMBRE Y FIRMA DEL CONTRATISTA

### Formato 4.5 CONTROL DE PURGAS

FECHA:	CALDERA:
JEFE DE AREA:	OPERARIO:

PARAMETROS	VALOR DETERMINADO	% CALCULADO DE PURGA NIVEL	% CALCULADO DE PURGA INFERIOR
Sólidos totales de agua de compensación en ppm			
Tiempo recomendado de purga en minutos			

La determinación se realizará por el jefe de área los días 15 y 30 de cada mes.

NOMBRE Y FIRMA JEFE DE ÁREA

## CONCLUSIONES

En el mercado se ofrecen diferentes tipos de calderas, la aquí descrita de manera amplia fue la de tubos de agua. La caldera tendrá que ser seleccionada según las necesidades de la planta.

Pero sea cual sea la caldera a elegir, el tratamiento del agua para alimentarla tendrá que ser en términos generales libre de dureza, controlar los gases que causan corrosión y libre de partículas suspendidas principalmente.

El tratamiento que se le dé al agua de alimentación estará en función a las condiciones de operación de la caldera, estas pueden operar a diferentes rangos de presión, siendo las calderas de alta presión las que deben tener mayor control en el título del vapor generado.

El mejor tratamiento interno del agua de los generadores de vapor debe comenzar por la calidad del agua de alimentación que está constituida por el agua de reposición y por los condensados recuperados, ya que garantizar una adecuada calidad permitirá disminuir los costos de operación y mantenimiento, alargando la vida útil de los equipos.

El tratamiento químico está dividido en externo e interno. En forma resumida una planta de tratamiento de agua debe estar compuesta por equipos que separan sólidos como los filtros, para el ablandamiento del agua y desaireadores. El agua ya acondicionada se alimenta a la caldera y ya en ella se hará necesario adicionar algunos productos tales como secuestrantes de oxígeno, alcalinizantes, etc., que ayuden a mantener el agua en condiciones ideales.

Es evidente que no todos los pasos señalados en el tratamiento de agua, serán aplicados a todas las calderas, estos tendrán que ser seleccionados de acuerdo a diferentes factores como las condiciones de operación de la caldera y características químicas del agua de alimentación, debido a que entre más equipo requiera se incrementara el costo de operación

La información a aquí plasmada fue obtenida por diferentes fuentes bibliográficas y está es amplia respecto al tema, pero indudablemente siempre habrá algo nuevo que permita al

ingeniero mejorar el tratamiento al agua, y la caldera pueda tener un mejor desempeño, para así brindar un servicio auxiliar con la calidad requerida en el proceso.

Muy importante en la vida personal y laboral conducirse con ética, ya que mucha información fidedigna de diferentes temas de ingeniería se encuentran ya investigados y plasmados en diferentes fuentes, pero es triste observar que la ética profesional es un valor muchas veces no aplicado por el profesionista y pasa por alto todo tipo de recomendaciones para una mejor operación de la planta, dando como resultado diferentes anomalías, tales como accidentes laborales, pérdida de recursos materiales y humanos, enriquecimiento ilícito, etc.

La ética con la que debemos conducir nuestra vida profesional debe de ser como el aire que respiramos en una montaña: fresco, limpio y transparente para que al introducirlo a nuestros pulmones nos proporcione satisfacción, salud, paz y felicidad. Estas deberán ser las mismas sensaciones que debemos experimentar al finalizar nuestra jornada de trabajo o bien al concluir alguna encomienda, y de esta manera, con la satisfacción del deber cumplido, honremos nuestra patria, nuestros padres, nuestros hijos y a nosotros mismos.

Un verdadero profesionista deberá pensar siempre en un bien social, que contribuya a fomentar un entorno laboral saludable, evitando entre otras cosas, el consumo desmedido que conduce al empobrecimiento.

## BIBLIOGRAFÍA

- American Water Works Association: Water Quality and Treatment, Ed. Mc. Graw-Hill, New York, 1971.
- Burgess H. Jennings y Samuel R. Lewis: Aire Acondicionado y Refrigeración, Ed. CECSA, 1970.
- Castellan Gilbert W., Físicoquímica, Ed. Fondo Educativo Interamericano S.A., 1976.
- Fair G.M. Geyer J.C., y Okun D.A., Elements of Water Supply and Waste-Water Treatment, New York, 1971.
- Kemmer Frank N., Manual de Agua, Tomo I y II, NALCO, Mc. Graw Hill, México, 1994.
- Manual de Calderas SELMEC, Cleaver Brooks, 1984.
- Arnulfo Oelker Behn, Thermal Engineering LTDA, Santiago de Chile, Recuperado de [norse.com/publicaciones/Tratamiento%20Agua%20Calderas.pdf](http://norse.com/publicaciones/Tratamiento%20Agua%20Calderas.pdf)
- Edgar Vázquez Contreras, Instituto de Química, UNAM, recuperado de: <http://bq.unam.mx/~evazquez>
- Isela Menjirar, Wilson Espinal, Diego Robles, 2012, Tratamiento de Agua a Calderas, Universidad Centroamericana José Simeón Cañas, Recuperado de: <https://es.scribd.com/doc/99124785/tratamiento-de-agua-de-Caldera>
- Jaime Santiago, Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes, comunidad de Madrid, Recuperado de: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Guia-basica-calderas-industriales-eficientes-fenercom-2013.pdf>

- John Alexander Garavito Angarita, Jimmy Moya Duarte, 2015, Calderas Acuotubulares, Recuperado de: <https://prezi.com/ldapoyhqzbya/calderas-acuotubulares/>
- Jaume Casobo Gispert, Estructura atómica y enlaces químicos, Recuperado de: [https://es.wikipedia.org/wiki/Polaridad\\_\(qu%C3%ADmica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Polaridad_(qu%C3%ADmica))
- Luis Pérez Farrás, Teoría de la Sedimentación, Instituto de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 2005, Recuperado de: [http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos\\_teor%C3%ADa\\_sedimentacion.pdf](http://www.fi.uba.ar/archivos/institutos_teor%C3%ADa_sedimentacion.pdf)
- Miguel Torres Corral, La desalación de agua de mar, ¿Recurso hídrico alternativo?, Recuperado de: [http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c11/\\$File/PGA-c11.pdf](http://www.dipalme.org/Servicios/Anexos/anexosiea.nsf/VAnexos/IEA-PGA-c11/$File/PGA-c11.pdf)
- NOM-020-STP-2011. Recuperado de: [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5229908&fecha=27/12/2011](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5229908&fecha=27/12/2011)
- Patel N:K., College of Pure & Applied Sciences, Unit 6, Recuperado de: <https://es.scribd.com/document/346358552/Unit-6-Boiler>,
- Pedro Abarca Bahamondes, Descripción de Calderas y Generadores de Vapor, Recuperado de: [www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitación/CentrodeFichas/Documents/descrpcion-de-caldera-y-generadores-de-vapor-pdf](http://www.achs.cl/portal/trabajadores/Capacitación/CentrodeFichas/Documents/descrpcion-de-caldera-y-generadores-de-vapor-pdf)
- Real Academia Española, Edición tricentenario, Recuperado de: <http://dle.rae.es/?id=6l3rs02>