

**EVALUACION DEL MÉTODO DE ÓSMOSIS INVERSA COMO COMPLEMENTO
AL SISTEMA CONVENCIONAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS PARA LA
GENERACION DE VAPOR Y ENERGIA DE UNA PLANTA DE EXTRACCION DE
ACEITE DE PALMA**

**WILMAR HERNAN ALARCON GORDO
LUISA FERNANDA ESPAÑA MORENO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2012

**EVALUACION DEL MÉTODO DE ÓSMOSIS INVERSA COMO COMPLEMENTO
AL SISTEMA CONVENCIONAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS PARA LA
GENERACION DE VAPOR Y ENERGIA DE UNA PLANTA DE EXTRACCION DE
ACEITE DE PALMA**

**WILMAR HERNAN ALARCON GORDO
LUISA FERNANDA ESPAÑA MORENO**

Trabajo de grado presentado para optar al título de
Especialista en Ingeniería Ambiental

**DIRECTOR:
Dr. LUIS JAVIER LÓPEZ GIRALDO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-QUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERÍA AMBIENTAL
BUCARAMANGA**

2012

A mis padres, que han sido el apoyo para lograr todo lo que soy, toda mi educación, tanto académica como profesional y a nivel personal.

Luisa

Son muchas las personas especiales a las que me gustaría agradecer, por su amistad, apoyo, animo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. Algunas están aquí conmigo y otras en mis recuerdos y en el corazón. Sin importar en donde este o si alguna vez llegan a leer estas dedicatorias quiero darles las gracias por formar parte de mi vida, por todo lo que me han brindado y por todo su cariño.

Wilmar

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	12
1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.....	14
1.2.1 Agua para generación de vapor.....	18
1.2.2 Agua para procesamiento de materiales	19
1.2.3. Productos Químicos empleados.....	19
1.2.4. Agua de purga de calderas.....	20
2. JUSTIFICACIÓN.....	21
3. MARCO REFERENCIAL.....	24
3.1. PARAMETROS DE CALIDAD DE AGUA EN PROCESOS INDUSTRIALES	24
3.1.1 Parámetros físicos:	24
3.1.2. Parámetros químicos	26
3.1.3 Parámetros a controlar y valores máximos.....	35
4. TRATAMIENTOS DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL.....	36
4.1. TRATAMIENTO CONVENCIONAL.....	36
4.2. TRATAMIENTO POR ÓSMOSIS INVERSA	43
4.2.1. Principio de la ósmosis inversa.....	43
4.2.2. Aplicaciones de la ósmosis inversa	46
5. MÉTODO DE ÓSMOSIS INVERSA COMO COMPLEMENTO AL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA.....	48
6. CONCLUSIONES	51
BIBLIOGRAFÍA.....	53

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Caracterización Fisicoquímica del agua según fuente de Captación.....	16
Tabla 2 Evaluación de purgas de la caldera en planta extractora de aceite	20
Tabla 3 Parámetros de calidad para agua de alimentación.	35
Tabla 4 Parámetros de calidad para agua de purgas	35

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ciclo del Agua.....	15
Figura 2 Incrustaciones en tuberías.....	17
Figura 3. Corrosión en tuberías de calderas.....	18
Figura 4 Equipo para ósmosis inversa.....	22
Figura 5 Procesos impactados con el tratamiento de aguas.....	23
Figura 6 Modelo de floculador.....	37
Figura 7 Sistema de filtración.....	39
Figura 8 Sistema de Suavización.....	40
Figura 9 Esquema de ósmosis.....	44
Figura 10 Esquema de ósmosis inversa.....	45
Figura 11 Esquema de sistema de ósmosis inversa.....	46

TÍTULO: EVALUACION DEL MÉTODO DE ÓSMOSIS INVERSA COMO COMPLEMENTO AL SISTEMA CONVENCIONAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS PARA LA GENERACION DE VAPOR Y ENERGIA DE UNA PLANTA DE EXTRACCION DE ACEITE DE PALMA*

AUTORES: LUISA FERNANDA ESPAÑA MORENO
WILMAR HERNÁN ALARCON GORDO**

PALABRAS CLAVES: Agua, Ósmosis Inversa, Tratamiento, Procesos.

DESCRIPCION

Hay una gran cantidad de procesos industriales para los cuales el agua es una parte fundamental de la fabricación, y es necesario controlar la calidad de la misma para garantizar la vida útil de los equipos que se emplean en la operación de dichos procesos industriales. En la industria el agua tiene varias aplicaciones e interviene en varios procesos tales como: generación de vapor, enfriamiento y procesamiento. Sin embargo, el agua utilizada en todos estos procesos debe de cumplir con ciertos requisitos que se definen de acuerdo con la etapa de proceso a emplear.

Una tecnología adecuada para complementar el tratamiento convencional del agua para procesos industriales es la ósmosis inversa, tratamiento que reduce la concentración de sólidos totales disueltos, incluyendo una variedad de iones, metales y partículas pequeñas en suspensión.

De la etapa de ósmosis inversa resulta agua con contenido de sales y minerales muy bajo, removiendo la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en el agua (hasta el 99%), materiales suspendidos y microorganismos. Como resultados importantes se da la reducción en el parámetro de la sílice, que requerirá menores dosis de productos químicos para su ingreso a equipos como calderas y turbinas en una quinta parte a los utilizados en el tratamiento convencional, aumentar los tiempos de residencia del agua dentro de la caldera, disminución de la frecuencia de las purgas, y con las aguas residuales de la tecnología, se propone alternativa de recirculación para aprovechamiento del 30% del total del agua.

* Trabajo de grado para optar al título de Especialista en Ingeniería Ambiental.

** Facultad de Ingeniería Físicoquímica. Escuela de Ingeniería Química., Especialización en Ingeniería Ambiental, Director: Dr. Luis Javier López Giraldo.

TITLE: EVALUATION OF THE METHOD REVERSE OSMOSIS AS A COMPLEMENT OF THE CONVENTIONAL SYSTEM OF WATER TREATMENT FOR STEAM GENERATION AND ENERGY OF A PALM KERNEL OIL EXTRACTION PLANT*

AUTHORS: LUISA FERNANDA ESPAÑA MORENO.
WILMAR HERNÁN ALARCON GORDO**

KEY WORKS: Water, Reverse Osmosis, Treatment, Processes

DESCRIPTION

There are a large number of industrial processes in which water is an essential part of the manufacturing process and quality control is necessary to ensure the useful life of the equipment used in the operation of the said industrial processes. In the industry water has several applications and is involved in various processes such as steam generation, cooling and processing. However, the water used in these processes must meet certain requirements that are defined according to the step of the process to be used.

An adequate technology to complement the conventional water treatment for industrial processes is the reverse osmosis treatment which reduces the concentration of total dissolved solids, including a variety of ions, metals and small particles in suspension.

From the stage of reverse osmosis results water containing very low mineral and salts, removing most of the solid (inorganic or organic) dissolved in water (up to 99%), suspended materials and microorganisms. As an important result is given the reduction in the parameter of silica, which will require lower doses of chemicals for entry into equipment such as boilers and turbines in one fifth of those used in conventional treatment, increase water residence times within the boiler, reducing the frequency of the purges, and with the wastewater of the technology, is proposed the alternative of recirculation to use 30% of the total water.

* Job to obtain the degree of Environmental Engineer Specialist.

** Engineering Faculty of de Physical Chemistry. School of Chemical Engineering. Specialization in Environmental Engineering. Director: Dr. Luis Javier López Giraldo.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la tecnología de ósmosis inversa como complemento al sistema convencional de tratamiento de aguas de proceso para la generación de vapor y energía de una planta de extracción de aceite de palma.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los parámetros de calidad para aguas industriales que impactan en las plantas extractoras de aceite de palma para sus etapas de generación de vapor y energía.
- Realizar la caracterización de los parámetros fisicoquímicos del agua según su fuente de captación (pozo profundo - agua de río)
- Evaluar la implementación de la tecnología de ósmosis inversa en el tratamiento de aguas para proceso de una planta de extracción de aceite de palma para optimizar las etapas de generación de vapor y energía.
- Elaborar una propuesta para el manejo de las purgas de las calderas que transportan agua con residual químico.

INTRODUCCION

Los requerimientos básicos de los recursos de agua y energía fundamentan la viabilidad técnica de cualquier proyecto, además de definir las acciones a implementar en el caso en que dichos recursos sean ineficientes.

El agua natural puede contener una gran variedad de impurezas, características del ciclo hidrológico que ha experimentado previamente. El agua natural puede llegar directamente a la industria desde una captación independiente o a través de una red de suministro que probablemente entregara el agua con algunas modificaciones en su composición original. Cuando las impurezas representan elementos nocivos para el uso a que va destinada el agua se denominan contaminantes. Por lo tanto, es el grado de calidad requerido el que determina si una impureza es contaminante o no.

Cada proceso industrial requiere unas características especiales del agua, exenta de determinados contaminantes. Para eliminarlos se somete el agua a unos tratamientos de purificación a su vez los proceso industriales introducen en el agua nuevos contaminantes.

Las técnicas de tratamiento de agua cubren una amplia variedad de procesos de purificación. Si el agua fuese siempre pura, o si siempre tuviese una composición constante de los contaminantes presentes, su acondicionamiento para un uso industrial determinado sería simple y uniforme. Sin embargo éste no es el caso y la variabilidad de las impurezas junto con las alternativas diferentes de tratamiento que se puede seleccionar, cada una óptima para unas condiciones determinadas, requieren una evaluación experta basados en unos conocimientos especializados y basados en un manejo ambientalmente sostenible.

Una tecnología adecuada para complementar el tratamiento del agua para procesos industriales es la ósmosis inversa, tratamiento que reduce la concentración de sólidos totales disueltos, incluyendo una variedad de iones, metales y partículas pequeñas en suspensión como los asbestos. Este trabajo se va a basar en la evaluación de la tecnología como complemento a la tradicional enfocada a la reducción de costos y como alternativa ambiental.

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.

1.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.

La calidad del agua que proviene de ríos y pozos profundos impide su utilización directa en el proceso industrial de extracción de aceite de palma, por tal motivo se emplean tratamientos que garantizan condiciones específicas del agua, usando para tal fin dosis de productos químicos en etapas del tratamiento que se evidencian en los residuales de las purgas.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA.

Un 97% del agua que se encuentra en la superficie terrestre forma los océanos. El 2,1 % se encuentra en forma de capas de hielo y glaciares y el resto, el 0,7 %, forma los ríos, lagos y aguas subterráneas. El agua está sometida a un continuo proceso de redistribución. Se evapora de los lagos y ríos, incorporándose a la atmósfera, y luego retorna en forma de lluvia y nieve, que se desplaza por la superficie y se filtra a través de los suelos hasta que, finalmente, vuelve a los mares. En el curso de este ciclo se disuelve muchas de las sustancias de la corteza terrestre que, eventualmente se acumulan en los océanos.^[1]

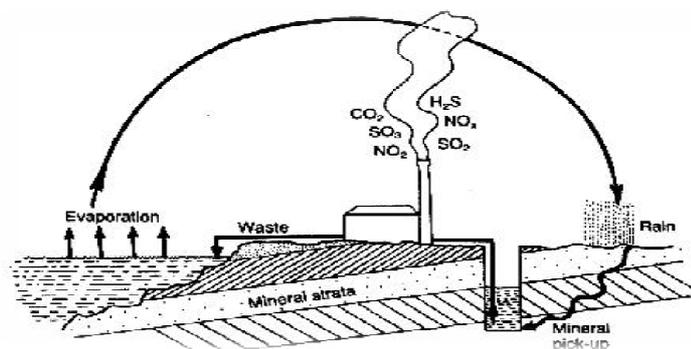
El agua se ha convertido en una materia prima importante en la industria moderna. Hay una gran cantidad de procesos industriales para los cuales el agua es una parte fundamental de la fabricación, y es necesario controlar la calidad de la misma para garantizar la vida útil de los equipos que se emplean en la operación de dichos procesos industriales.

^[1] RODRIGUEZ, Santiago. *La dureza del Agua*. Bahía Blanca: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, 2010.

En la industria el agua tiene varias aplicaciones e interviene en varios procesos tales como: generación de vapor, enfriamiento y procesamiento. Sin embargo, el agua utilizada en todos estos procesos debe de cumplir con ciertos requisitos que se definen de acuerdo con la etapa de proceso a emplear.

Las plantas extractoras de aceite de palma por su ubicación en zonas rurales, captan usualmente el agua para proceso de fuentes directas como ríos, quebradas o pozos profundos, los cuales poseen distintos tipos de impurezas, sales minerales ó material orgánico, así mismo el agua lluvia al caer puede absorber oxígeno, CO₂, nitrógeno, polvo y otras impurezas contenidas en el aire, y también disolver sustancias minerales de la tierra. Esta contaminación puede incrementarse además con ácidos procedentes de la descomposición de materias orgánicas, residuos industriales y aguas sépticas descargadas en lagos y ríos. El ciclo del agua (Figura 1), indica que la humedad atmosférica resulta de la evaporación de las fuentes de agua, la que luego al condensarse precipita en forma de lluvia, granizo o nieve, absorbiendo gases y otras sustancias descargadas por el hombre a la atmósfera. Esta situación es la causa de que la lluvia contenga una gran cantidad de impurezas al momento de entrar en contacto con la tierra.

Figura 1. Ciclo del Agua



Fuente: OELKER, A. (2011) Tratamiento de agua para calderas, THERMAL ENGINEERING LTDA. Santiago - Chile.

A medida que el agua fluye sobre la superficie de la tierra o se filtra a través de las capas de ésta, continúa atrapando o disolviendo impurezas del suelo o minerales por los que atraviesa. Así es como agua aparentemente cristalina proveniente de estos, ríos y vertientes, puede tener un elevado contenido de sólidos disueltos. Las impurezas encontradas con mayor frecuencia en las fuentes de agua, son los sólidos en suspensión, líquidos no mezclables con agua (ej. aceite), colorantes, bacterias y otros microorganismos, sustancias semi-coloidales, gases disueltos, sales minerales disueltas (cationes, aniones y sílice).

Para el caso en estudio, en la Tabla 1, se puede observar la cantidad de contaminantes presentes en un agua típica según fuente de captación para este tipo de industrias, considerando que la captación se realiza en quebrada cercana a la planta extractora o por medio de pozo profundo.

Tabla 1 Caracterización Físicoquímica del agua según fuente de Captación.

	Quebrada	Pozo Profundo	Unidades
DBO	< 2	< 2	mg/L O ₂
Turbiedad	7	< 1,33	NTU
Alcalinidad	< 0,15	3,4	mg/ L CaCO ₃
Nitritos	< 0,005	< 0,005	mg NO ₂ - N/L
Cloruros	10,76	8,32	mg /L Cl
Sulfatos	2,02	< 1,8	mg/L SO ₄
Solidos Disueltos	14	34	mg/L
Dureza Total	30	34	mg/L CaCO ₃
Color Aparente	27	0	Un. Pto Co.
Silicio	43,40	7,00	Mg Si/L
Hierro Total	0,23	0,20	mg Fe/L
Coliformes Fecales	70	49	NMP/100ml
Coliformes Totales	1600	1600	NMP/100ml

Fuente: Indupalma Ltda.

Los valores críticos de los parámetros corresponden a la Dureza, la cual se encuentra en 14 NTU para el agua de la quebrada y 34 NTU para el agua del pozo profundo.

La sílice también reporta valores altos del agua de alimentación al encontrarse en la quebrada en 43,40 ppm superando el valor máximo permitido de 10ppm. Considerando que la sílice disminuye la vida útil de los equipos como son equipos de generación de vapor (Calderas) y generación de energía (Turbina)

El tratamiento de aguas de una planta extractora de aceite de palma, comprende el bombeo desde un río o pozo profundo, por medio de una captación o bocatoma y luego un desarenador, de donde se bombea a una piscina o reservorio de almacenamiento. De allí el agua va por bombeo hasta un sistema de floculación en el cual se utiliza un polímero para propiciar la floculación de la mayoría de los sólidos en suspensión.

El agua luego se decanta y se filtra por medio de filtros de arena a presión para dar término a la etapa general de purificación y finalmente un proceso de suavización que elimina la dureza del agua destinada a la producción de vapor en las calderas para finalmente realizar un acondicionamiento con productos químicos para garantizar agua que no genere problemas de incrustación (Figura 2) y corrosión en las tuberías de las calderas (Figura 3).

Figura 2 Incrustaciones en tuberías.



Fuente: OELKER, A. (2011) Tratamiento de Agua para Calderas, THERMAL ENGINEERING LTDA. Santiago - Chile.

Figura 3. Corrosión en tuberías de calderas



Fuente: OELKER, A. (2011) Tratamiento de Agua para Calderas, THERMAL ENGINEERING LTDA. Santiago - Chile.

1.2.1 Agua para generación de vapor

Todas las aguas de alimentación se encuentran contaminadas en mayor o menor grado, lo que ocasiona dificultades en las calderas para la producción del vapor. Estas impurezas son la causa de problemas de diferente índole y gravedad que traen como resultado muy frecuente la pérdida no solo de tiempo sino de la caldera misma. La gravedad de tales efectos será proporcional al tipo de caldera en uso, a su presión y capacidad.

En el agua de alimentación de una caldera que produce vapor a una presión de 2.000 libras por pulgada cuadrada, cualquier sustancia cuya concentración sea mayor a unos cuantos microgramos por litro (partes por mil millones) se considera un contaminante. Aun en calderas que trabajen con presiones entre 600 y 1.500 lb/in², la concentración de sales disueltas y los sólidos suspendidos no debe de exceder unos cuantos miligramos por litro.

Las propiedades más importantes para analizar en el agua de alimentación de una caldera son pH, alcalinidad, sílice, dureza, hierro, fosfatos, sulfitos y sólidos totales. Todas estas propiedades hay que controlarlas bajo unos parámetros

establecidos por las empresas constructoras de calderas, para evitar el daño de sus componentes.

1.2.2 Agua para procesamiento de materiales

No existe un patrón común para proporcionar agua a las industrias. En el agua que se usa en el proceso de extracción de aceite de palma, debe reducirse al mínimo parámetros que puedan afectar negativamente equipos por incrustaciones y corrosiones. Las sales disueltas deben eliminarse y el costo de su eliminación es muy bajo en comparación con los problemas que traería en el proceso si no se eliminan. Niveles infinitesimales de cobre y el mercurio pueden originar el agrietamiento de las aleaciones de aluminio.^[2]

1.2.3. Productos Químicos empleados.

Los químicos para caldera tienen dos funciones: prevenir la incrustación y ajustar el pH del agua de la caldera para inhibir la corrosión.

Secuestrante de oxígeno

El secuestrante de oxígeno es un químico el cual secuestra el oxígeno disuelto en agua por una reacción de reducción y de este modo inhibe la corrosión causada por éste.

Inhibidor de incrustación

El inhibidor para incrustación tiene como función minimizar el efecto de corrosión que se da en forma natural para conservar la integridad mecánica de los equipos de intercambio de calor y líneas de conducción

^[2] RIGOLA, Mauricio, *Tratamiento de aguas industriales – Aguas de Proceso y Residuales*. Barcelona España: Editorial Marcombo S.A.. 1990.

1.2.4. Agua de purga de calderas

El agua de alimentación de caldera contiene sólidos disueltos, procedentes de la propia agua y de los productos químicos para su tratamiento. Durante la evaporación, la concentración de total de sólidos disueltos (TDS) en la caldera aumenta. Si no se controlan, se producirá espuma en el espacio vapor. Que causan arrastres y la contaminación del vapor transportado por el sistema. Estos productos se depositan en las superficies de calentamiento y en equipo auxiliar afectando la eficiencia y productividad de la planta.

Los sólidos en suspensión también pueden causar problemas ya que se depositan en el fondo de la caldera. Si no se controlan, eventualmente se acumularían hasta un nivel peligroso. Todas las calderas de vapor incorporan una salida en el punto más bajo para eliminar periódicamente los sólidos precipitados, conocida como purga de fondo. Se requiere una descarga breve y súbita para una eliminación eficiente, que se consigue abriendo una válvula de gran paso que elimina grandes cantidades de agua de caldera ^[3]. En la actualidad, en la planta extractora se tiene los siguientes resultados en las purgas de las calderas (Tabla 2):

Tabla 2 Evaluación de purgas de la caldera en planta extractora de aceite

PARAMETRO	PURGA CALDERA
Sulfito	25ppm
Dureza	0 – 4ppm
Alcalinidad P	225 – 250ppm
Alcalinidad M	250 – 300ppm
Alcalinidad OH	200ppm
Sílice	148 – 179 ppm
Residual de químicos	50,5 -68,1ppm
pH	10,5
Conductividad	1491 – 1179 micro S/cm

Fuente: OELKER, A. et. al. (2011) Tratamiento de Agua para Calderas, THERMAL ENGINEERING LTDA. Santiago - Chile.

^[3] Spirax, Sarco. "Purgas de Caldera." N.p., 01 julio 2012. Web. 2003. <<http://www.spiraxsarco.com/ar/pdfs/SB/p403-56.pdf>>.

2. JUSTIFICACIÓN

Cada proceso industrial requiere unas características especiales del agua, exenta de determinados contaminantes. Para eliminarlos se somete el agua a técnicas de tratamiento que cubren una amplia variedad de procesos de purificación. Si el agua fuese siempre pura, o si siempre tuviese una composición constante de los contaminantes presentes, su acondicionamiento para un uso industrial determinado sería simple y uniforme. Sin embargo éste no es el caso y la variabilidad de las impurezas junto con las alternativas diferentes de tratamiento que se puede seleccionar, cada una óptima para unas condiciones determinadas, requieren una evaluación experta basados en un manejo ambientalmente sostenible.

Una tecnología adecuada para complementar el tratamiento del agua para procesos industriales es la ósmosis inversa, tratamiento que reduce la concentración de sólidos totales disueltos, incluyendo una variedad de iones, metales y partículas pequeñas en suspensión como los asbestos. La ósmosis inversa también remueve contaminantes orgánicos, algunos detergentes y pesticidas específicos ^[4]. En la Figura 4, se observa un equipo de la tecnología de ósmosis inversa ofrecido en el mercado nacional.

El uso de equipos de ósmosis inversa como pretratamiento de los sistemas de intercambio o, en algunos casos, como único tratamiento, se ha generalizado en todo el mundo debido a una serie de ventajas como las que se describen a continuación:

- a. Disminución de regenerantes químicos (hasta el 80%) y mano de obra.

^[4] CCE, (1995). Tratamiento de Agua por osmosis Inversa, Prowater Argentina.

- b. Mejoramiento de la calidad del agua producida, cabe señalar que combinado con desmineralizadores, se utiliza en la producción de agua ultrapura.
- c. Prolongación de la vida útil de las resinas de intercambio por la eliminación de los sólidos orgánicos disueltos y en suspensión.
- d. Disminución del tamaño de los equipos convencionales.
- e. Reducción del contenido de sílice.^[5]

Figura 4 Equipo para ósmosis inversa

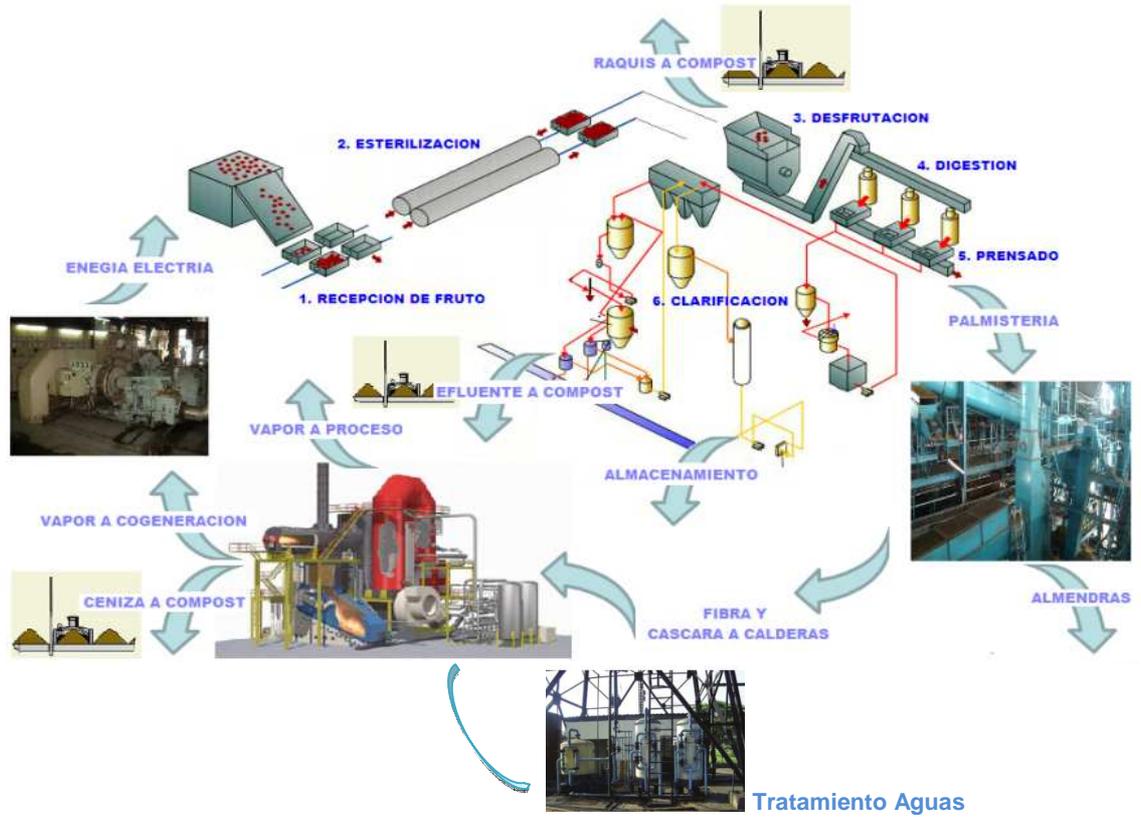


Fuente: Equipos, Nalco Colombia Ltda. <http://www.nalco.com/aboutnalco/colombia.htm>

Aunque con el tratamiento de aguas se acondiciona el agua de proceso para las columnas de vacío además de el agua de alimentación para las calderas (Figura 5), en el caso de estudio, con la implementación de la tecnología de ósmosis inversa se busca eliminar la sílice del agua de alimentación de las calderas de alta presión, con el fin de alargar la vida útil de los equipos de generación de vapor y energía, y la disminución a más del 75% de los químicos utilizados en el tratamiento de aguas como son el secuestrante de oxígeno y el acondicionador o inhibidor de incrustación para la disminución de costos y el manejo de aguas residuales, disminuyendo el impacto ambiental.

^[5] Lenntech, BV. *Lenntech*. N.p., 2011. Web. 15 agosto 2012. <<http://www.lenntech.es/biblioteca/osmosis-inversa/que-es-osmosis-inversa.htm>>

Figura 5 Procesos impactados con el tratamiento de aguas



Fuente: Sistema de Floculacion, Indupalma Ltda.

3. MARCO REFERENCIAL.

3.1. PARAMETROS DE CALIDAD DE AGUA EN PROCESOS INDUSTRIALES

3.1.1 Parámetros físicos:

a. Color y Sabor

El sabor y color del agua son determinaciones organolépticas subjetivas, para las cuales no existen instrumentos de observación, ni registro, ni unidades de medida. Tienen un interés evidente en las aguas potables destinadas al consumo humano. Las aguas adquieren un sabor salado a partir de los 300 ppm de Cl^- , y un gusto salado y amargo con más de 450 ppm de SO_4^{2-} . El CO_2 libre le da un gusto picante. Trazas de fenoles u otros compuestos orgánicos le confieren un color y sabor desagradables.

El color es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. No se puede atribuir a ningún constituyente único, aunque ciertos colores en aguas naturales son indicativos de la presencia de ciertos contaminantes.

El agua pura sólo es azulada en grandes espesores. En general presenta colores inducidos por materiales orgánicos de los suelos vegetales, como el color amarillento debido a los ácidos húmicos. La presencia de hierro puede darle color rojizo, y la del manganeso un color negro. El color afecta estéticamente la potabilidad de las aguas, puede representar un potencial colorante de ciertos productos cuando se utiliza como material de proceso, y un potencial espumante en su uso en calderas.

Según el origen del color los principales tratamientos de eliminación pueden ser la coagulación y filtración, la cloración, o la adsorción sobre carbón activo. ^[6]

b. Turbidez

La turbidez es la dificultad del agua para transmitir la luz debido a materiales insolubles en suspensión, coloidales o muy finos, que se presentan principalmente en aguas superficiales. Son difíciles de decantar y filtrar, y pueden dar lugar a la formación de depósitos en las conducciones de agua, equipos de proceso, etc. Además interfiere con la mayoría de los procesos a que se pueda destinar el agua. Las aguas subterráneas suelen tener valores inferiores a 1 ppm de sílice, pero las superficiales pueden alcanzar varias decenas. Las aguas con 1ppm son muy transparentes y permiten ver a su través hasta profundidades de 4 ó 5 m.

Con 10 ppm, que sería el máximo deseable para una buena operación de los filtros, la transparencia se acerca al metro de profundidad. Por encima de 100 ppm la transparencia está por debajo de los 10 cm y los filtros se obstruyen rápidamente. La turbidez se elimina mediante procesos de coagulación, decantación y filtración.

C. Conductividad y Resistividad

La conductividad eléctrica es la medida de la capacidad del agua para conducir la electricidad. Es indicativa de la materia ionizable total presente en el agua. El agua pura contribuye mínimamente a la conductividad, y en su casi totalidad es el resultado del movimiento de los iones de las impurezas presentes. La resistividad es la medida recíproca de la conductividad.

^[6] Unitek, . "Parámetros físicoquímicos del agua." Ingeniería en tratamiento del agua. Unitek, n.d. Web. agosto 2012. <http://www.unitek.com.ar/productos-osmosis-inversa.php?id_lib_tecnica=6>.

La medida de la conductividad es una buena forma de control de calidad de un agua, siempre que:

No se trate de contaminación orgánica por sustancias no ionizables. Las mediciones se realizan a la misma temperatura, la composición del agua se mantenga relativamente constante.

La unidad estándar de resistencia eléctrica es el ohm y la resistividad de las aguas se expresa convenientemente en megaohm-centímetro. La conductividad se expresa en el valor recíproco, normalmente como microsiemens por centímetro. Para el agua ultrapura los valores respectivos son de 18,24 Mohms.cm y 0,05483 ps/cma 25 grados centígrados. ^[6]

3.1.2. Parámetros químicos

a. pH

El pH es una medida de la concentración de hidrogeniones y se define como $pH = \text{Log}(1/(H^+))$. Es una medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar a los usos específicos del agua. La mayoría de aguas naturales tienen un pH entre 6 y 8.

Su medición se realiza fácilmente con un pHmetro, aunque también se puede disponer de papeles especiales que, por coloración, indican el pH. Los valores del pH han de ser referidos a la temperatura de medición pues varían con ella. El pH se corrige por neutralización.

^[6] Unitek, . "Parámetros fisicoquímicos del agua." Ingeniería en tratamiento del agua. Unitek, n.d. Web. agosto 2012. <http://www.unitek.com.ar/productos-osmosis-inversa.php?id_lib_tecnica=6>.

b. Dureza:

La dureza, debida a la presencia de sales disueltas de calcio y magnesio, mide la capacidad del agua para producir incrustaciones. Afecta tanto a las aguas domesticas como a las industriales, siendo la principal fuente de depósitos e incrustaciones en calderas, intercambiadores de calor, tuberías, etc. Por el contrario, las aguas muy blandas son agresivas y pueden no ser indicadas para el consumo. El agua dura es conocida por taponar las tuberías y complicar la disolución de detergentes en agua.

La medición puede hacerse por análisis total o por complejación empleando EDTA. Para disminuir la dureza, las aguas pueden someterse a tratamiento de ablandamiento o desmineralización. En las calderas y circuitos de refrigeración se usan completamente tratamientos internos.

c. Alcalinidad

La alcalinidad es una medida de la capacidad para neutralizar ácidos. Contribuyen a la alcalinidad principalmente los iones bicarbonato, CO_3H carbonato y oxhidrilo, pero también los fosfatos y ácido silícico u otros ácidos de carácter débil. Los bicarbonatos y los carbonatos pueden producir CO_2 en el vapor, que es una fuente de corrosión en las líneas de condensado. También pueden producir espumas, provocar arrastre de sólidos con el vapor y fragilizar el acero de las calderas. La alcalinidad se corrige por descarbonatación con cal, tratamiento con ácido o desmineralización por intercambio iónico. ^[2]

^[2] RIGOLA, Mauricio, *Tratamiento de aguas industriales – Aguas de Proceso y Residuales*. Barcelona España: Editorial Marcombo S.A.. 1990

d. Sólidos Disueltos

Los sólidos disueltos o salinidad total, es una medida de la cantidad de materia disuelta en el agua, determinada por evaporación de un volumen de agua previamente filtrada. Corresponde al residuo seco con filtración previa. El origen de los sólidos disueltos puede ser múltiple, orgánico e inorgánico, tanto en aguas subterráneas como superficiales. En los usos industriales la concentración elevada de sólidos disueltos puede ser objeccionable por la posible interferencia en procesos de fabricación, o como causa de espuma en calderas.

Los procesos de tratamiento son múltiples en función de la composición incluyendo la precipitación, intercambio iónico, destilación, electrodiálisis y ósmosis inversa.

e. Sólidos en Suspensión

Los sólidos en suspensión (SS) son una medida de los sólidos sedimentables no disueltos que pueden ser retenidos en un filtro. Se pueden determinar pesando el residuo que queda en el filtro después de secado. Son indeseables en las aguas de proceso porque pueden causar depósitos en las conducciones, calderas, equipos, etc. Las aguas subterráneas suelen tener menos de 1ppm, pero en las superficiales varía mucho en función del origen y las circunstancias de la captación. Se separa por filtración y decantación.

f. Sólidos Totales

Los sólidos totales son la suma de los sólidos disueltos y de los sólidos en suspensión. ^[6]

^[6] Unitek, . "*Parámetros físicoquímicos del agua.*" Ingeniería en tratamiento del agua. Unitek, n.d. Web. agosto 2012. <http://www.unitek.com.ar/productos-osmosis-inversa.php?id_lib_tecnica=6>.

g. Cloruros

El ión cloruro, Cl^- , forma sales en general muy solubles. Suele ir asociados al ión Na^+ , especialmente en aguas muy salinas. Las aguas dulces contienen entre 10 y 250ppm de cloruros, pero no es raro encontrar valores mayores. Las aguas salobres pueden tener centenares e incluso millares de ppm. El agua de mar contiene alrededor de 20.000ppm.

Las aguas con cloruros pueden ser muy corrosivas debido al pequeño tamaño del ión que puede penetrar la capa protectora en la interface óxido-metal y reaccionar con el hierro estructural. Se valora con nitratos de plata usando cromato potásico como indicador.

Se separa por intercambio iónico, aunque es menos retenido que los iones polivalentes, por lo cual las aguas de alta pureza requieren un pulido final.

h. Sulfatos

El ión sulfato, $\text{SO}_4^{=}$, hacen parte de sales moderadamente solubles a muy solubles. Las aguas dulces contienen de 2 a 150ppm y el agua de mar cerca de 3.000ppm. Aunque el agua pura se satura a 1.500ppm, como SO_4Ca , la presencia de otras sales aumenta su solubilidad.

La determinación analítica por gravimetría con cloruro de bario es la más segura, si se emplean métodos complexométricos hay que estar seguros de evitar interferencias. No afecta especialmente el agua en cantidades moderadas. Algunos centenares de ppm perjudican la resistencia del hormigón. Industrialmente es importante porque en presencia de iones de calcio, se combina para formar incrustaciones de sulfato cálcico. Su eliminación se realiza por intercambio iónico.

i. Nitratos

El ión nitrato, NO_3^- , forma sales muy solubles y bastante estables, aunque en medio reductor puede pasar a nitrito, nitrógeno o amoníaco. Las aguas normales contienen menos de 10ppm y el agua de mar hasta 1ppm, pero las aguas contaminadas, principalmente por fertilizantes pueden llegar a varios centenares de ppm.

Industrialmente no tiene efectos significativos e incluso es útil para controlar la fragilidad del metal de las calderas.

Se elimina por intercambio iónico, pero no es un método económico en los procesos de potabilización en grandes volúmenes. Su presencia en las aguas superficiales, conjuntamente con fosfatos, determina la eutrofización que se caracteriza por un excesivo crecimiento de las algas.

j. Fosfatos

El ión fosfato, $\text{PO}_4^{=}$, en general forma sales muy poco solubles y precipita fácilmente como fosfato cálcico. Al ser un ácido débil, contribuye a la alcalinidad de las aguas.

En general no se encuentran en el agua más de 1 ppm, pero pueden llegar a algunas decenas debido al uso de fertilizantes. Puede ser crítico en la eutrofización de las aguas superficiales. No suele determinarse en los análisis de rutina, pero puede hacerse colorimétricamente.^[2]

^[2] RIGOLA, Mauricio, *Tratamiento de aguas industriales – Aguas de Proceso y Residuales*. Barcelona España: Editorial Marcombo S.A.. 1990

k. Sílice

La sílice, SiO_2 , se encuentra en el agua disuelta como ácido silícico, SiO_4H_4 , y como materia coloidal. Contribuye ligeramente a la alcalinidad del agua. Las aguas naturales contienen entre 1 y 40 ppm, pudiendo llegar a 100 ppm, especialmente si son aguas bicarbonatadas sódicas. Se determina analíticamente por colorimetría.

La sílice tiene mucha importancia en los usos industriales porque forma incrustaciones en las calderas y sistemas de refrigeración, y forma depósitos insolubles sobre los álabes de las turbinas. Su eliminación se consigue parcialmente por precipitación o adsorción sobre resinas de intercambio iónico fuertemente básica.

l. Bicarbonato y Carbonatos

Existe una estrecha relación entre los iones bicarbonato, CO_3H^- , carbonato, $\text{CO}_3^{=}$, el CO_2 gas y el CO_2 disuelto.

A su vez el equilibrio está afectado por el pH. Estos iones contribuyen fundamentalmente a la alcalinidad del agua.

Los carbonatos precipitan fácilmente en presencia de iones calcio. Las aguas dulces suelen contener entre 50 y 350 ppm de ión bicarbonato, y si el pH es inferior a 8,3 no hay prácticamente ión bicarbonato. El agua de mar tiene unos 100 ppm de ión bicarbonato.^[6]

^[6] Unitek, . "Parámetros fisicoquímicos del agua." Ingeniería en tratamiento del agua. Unitek, n.d. Web. agosto 2012. <http://www.unitek.com.ar/productos-osmosis-inversa.php?id_lib_tecnica=6>.

m. Otros componentes aniónicos

Los sulfuros, $S^{=}$, y el ácido sulfhídrico son característicos de medios reductores, pero en general las aguas contienen mucho menos de 1 ppm. Comunican muy mal olor al agua, lo cual permite su detección. Son especialmente corrosivos para las aleaciones de cobre.

Los compuestos fenólicos afectan la potabilidad del agua, produciendo olores y gustos muy desagradables, especialmente después de su cloración.

Los detergentes son sólo ligeramente tóxicos pero presentan problemas de formación de espumas, y pueden interferir en los procesos floculación y coagulación, y afectar la oxigenación del agua. Los ácidos húmicos pueden afectar ciertos procesos de pretratamiento e intercambio iónico.

n. Sodio

El ión sodio, Na^{+} , corresponde a sales de solubilidad muy elevada y difíciles de precipitar. Suele estar asociado al ión cloruro. El contenido en aguas dulces suele estar entre 1 y 150 ppm, pero es fácil encontrar valores muy superiores, de hasta varios miles de ppm. El agua de mar contiene cerca de 11.000 ppm. Es un indicador potencial de corrosión.

El sodio se elimina por intercambio iónico, pero como ión monovalente es una de las primeras sustancias que migran de la columna catiónica o del lecho mixto.

o. Calcio

El ión calcio, Ca^{++} , forma sales desde moderadamente solubles a muy insolubles. Precipita fácilmente como CO_3Ca . Contribuye de forma muy especial a la dureza

del agua y a la formación de incrustaciones. Las aguas dulces suelen contener de 10 a 250 ppm, o incluso 600 ppm. El agua de mar contiene unos 400 ppm. La eliminación del calcio se realiza por precipitación e intercambio iónico.

p. Magnesio

El ión magnesio, Mg^{++} , tiene propiedades muy similares a las del ión calcio, pero sus sales son, en general, más solubles y difíciles de precipitar; por contrario, su hidróxido, $Mg(OH)_2$, es menos soluble. Las aguas dulces suelen contener entre 1 y 100 ppm, y el agua de mar contiene unos 1.300 ppm. Cuando el contenido en agua alcanza varios centenares le da un sabor amargo y propiedades laxantes, que pueden afectar su potabilidad.

Contribuye a la dureza y pH alcalino del agua, además en su forma de hidróxido puede formar incrustaciones. Se puede precipitar como hidróxido pero su eliminación se realiza fundamentalmente por intercambio iónico.

q. Hierro

El ión hierro se puede presentar como ión ferroso, Fe^{++} , o en la forma más oxidada de ión férrico, Fe^{+3} , la estabilidad de las distintas formas químicas dependen del pH, condiciones oxidantes o reductoras del medio, composición de la solución, presencia de materias orgánicas, etc.

La presencia del hierro puede afectar a la potabilidad del agua y, en general, es un inconveniente en las aguas industriales por dar lugar a depósitos e incrustaciones. Las condiciones de estabilidad hacen que las aguas subterráneas normalmente sólo contengan Fe^{++} disuelto. Solo las aguas de pH ácido pueden tener contenidos de hierro de varias decenas de ppm.

Por aireación del agua la forma ferrosa pasa a férrica y precipita, o bien se elimina por coagulación y filtración. También se puede emplear el intercambio catiónico. ^[2]

r. Gases Disueltos

El dióxido de carbono, CO₂, es un gas relativamente soluble que se hidroliza en función del pH del agua para formar iones bicarbonato y carbonato. Las aguas subterráneas profundas pueden contener hasta 1.500ppm, pero en las aguas superficiales se sitúa entre 1 y 30ppm, un exceso de CO₂ hace al agua corrosiva, factor importante en las líneas de vapor y condensados. Se elimina por aeración, desgasificación o descarbonatación.

El oxígeno por su carácter oxidante juega un papel importante en la solubilización o precipitación de iones que presentan una forma insoluble. Es el parámetro más importante en el control de la calidad de las aguas superficiales en cauces naturales. Provoca la corrosión de los metales, en líneas y equipos; pero su ausencia puede representar la presencia de otros gases objetables tales como metano, ácido sulfhídrico, etc. Se elimina por desgasificación o mediante reductores como el sulfito sódico y la hidracina.

El amoníaco, NH₃, es un indicador de contaminación del agua y en forma no iónica es tóxico para los peces. Al clorar el agua a partir del amoníaco se forman cloramidas, también tóxicas. Provoca la corrosión de las aleaciones de cobre y zinc, formando un complejo soluble. Se elimina por desgasificación o intercambio catiónico. ^[6]

^[2] RIGOLA, Mauricio, *Tratamiento de aguas industriales – Aguas de Proceso y Residuales*. Barcelona España: Editorial Marcombo S.A.. 1990.

^[6] Unitek, . "Parámetros fisicoquímicos del agua." Ingeniería en tratamiento del agua. Unitek, n.d. Web. agosto 2012. <http://www.unitek.com.ar/productos-osmosis-inversa.php?id_lib_tecnica=6>.

3.1.3 Parámetros a controlar y valores máximos

De acuerdo a las definiciones anteriormente mencionadas y el impacto que generan se definen los parámetros críticos y valores permitidos de la siguiente forma (Tablas 3 y 4) ^[7]:

En Agua de alimentación:

Tabla 3 Parámetros de calidad para agua de alimentación.

PARAMETROS	RANGOS CONTROL
Dureza total	0,0 –0,3 PPM
Alcalinidad	0,0 –50 PPM
Cloruros	0,0 –10 PPM
Silice	0,0 –10 PPM
Conductividad	0,0 –200 microS/cm

Fuente: OELKER, A. (2011) Tratamiento de Agua para Calderas, THERMAL ENGINEERING LTDA. Santiago - Chile.

Tabla 4 Parámetros de calidad para agua de purgas

PARAMETROS	RANGOS CONTROL
Dureza total	0,0 –3,0 PPM
Alcalinidad OH	200 –300 PPM
Cloruros	0,0 –500 PPM
Sílice	0,0 –150 PPM
Conductividad	0,0 –2000 microS/cm
Residual sulfito	30 –60 PPM
Residual fosfato	30 –60 PPM
pH Purga	10,5 –11,5
pH Condensado	8,2 –9,0

Fuente: OELKER, A. (2011) Tratamiento de Agua para Calderas, THERMAL ENGINEERING LTDA. Santiago - Chile.

^[7] OELKER, A. et. al. (2011) *Tratamiento de Agua para Calderas*, THERMAL ENGINEERING LTDA. Santiago - Chile.

4. TRATAMIENTOS DE AGUA PARA USO INDUSTRIAL

4.1. TRATAMIENTO CONVENCIONAL

Pre-tratamiento

Una vez el agua cruda es captada en la bocatoma sobre el río San Alberto, ésta es sometida a un pre-tratamiento físico que consiste de un “desarenado”, que tiene por objeto retirar las piedras, arenas y partículas minerales más o menos grandes, con el fin de evitar la formación de depósitos en las tuberías o en los tanques y proteger las bombas y demás aparatos contra la abrasión.

Coagulación - Floculación

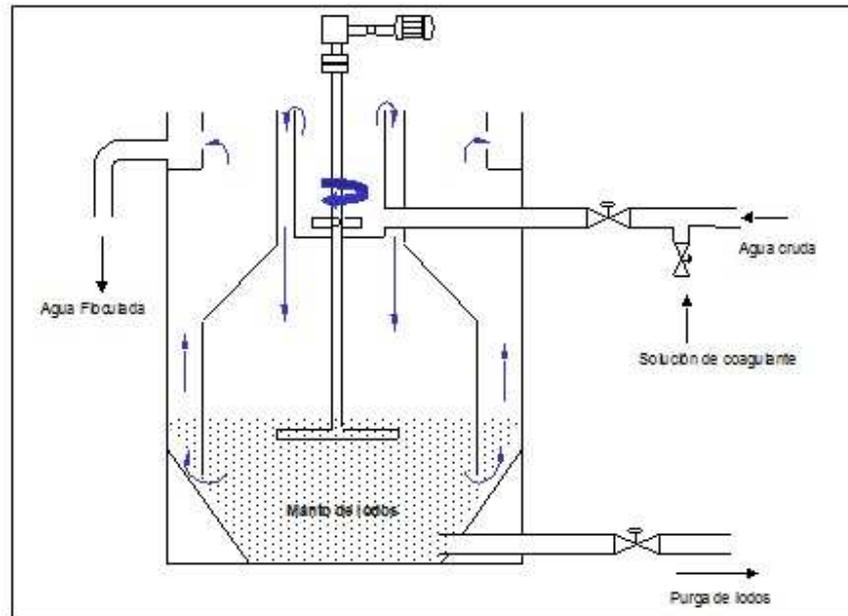
La floculación se lleva a cabo en tanques grandes de construcción especial provistos de un agitador. A estos tanques, se le inyecta al agua, una solución de polímero, que sirve como coagulante de las impurezas del agua para hacerlas más pesadas y lograr que sedimenten al fondo del tanque floculador. De esta manera se pueden eliminar las impurezas sedimentadas mediante purgas.

La solución de polímero se prepara en un tanque y se adiciona al agua mediante una bomba de dosificación a la que se le puede regular el caudal, dependiendo de la cantidad de impurezas presentes en el agua (turbidez). A mayor turbidez, se requiere adicionar mayor cantidad de polímero.

Las muestras para observación y control de la floculación pueden tomarse en el tanque floculador en tres llaves especiales localizadas: una sobre la zona de mezcla, otra sobre la zona de floculación y una tercera sobre la zona de decantación ó clarificación.

Para obtener una buena floculación, es necesario efectuar durante algunos minutos, un mezclado energético, en el momento de introducción del polímero. Este mezclado se realiza por agitación con un impulsor (Figura 6).

Figura 6 Modelo de floculador



Fuente: Sistema de Floculación, Indupalma Ltda.

Esquema floculador

La llegada del agua cruda se hace directamente a la zona de floculación. Un impulsor situado en la parte de la zona de floculación, hace circular el agua floculada hacia la zona de decantación. Los lodos que se depositan en esta última tienden a llegar por gravedad a la parte central. El enriquecimiento en lodos que resulta permite una floculación rápida y la formación de un sedimento denso. Una o varias salidas permiten extraer los lodos en exceso, bajo una forma tan concentrada como sea posible.

En el fondo de la zona de decantación se forma entonces el “colchón ó lecho de lodos”, que tiene gran importancia, puesto que permite que durante el paso del agua a través del mismo, ésta sufra una “filtración” saliendo pura y limpia hacia el canal de descarga situado en la parte superior. Se puede comparar un lecho de lodos con un resorte que tiende a comprimirse bajo la acción de su propio peso, pero que se estira más o menos por las fuerzas de fricción del agua que va en ascenso, sobre las partículas de lodos que constituyen este resorte y que aumentan naturalmente con la velocidad del agua.

Filtración

El agua clarificada que sale de la floculación debe filtrarse, pasándola a través de filtros de arena fina que trabajan a presión. Se dispone en la planta, de tres de estos filtros para una operación en paralelo, es decir, que puede funcionar independientemente el uno del otro.

Los filtros mencionados son del tipo rápido de lecho filtrante a presión. La filtración sobre lecho filtrante (Figura 7) se utiliza cuando la cantidad de materia que debe retenerse es grande y cuando el tamaño de las partículas contenidas en el agua es relativamente pequeño. Es necesario que los materiales de los cuales está compuesto el lecho sean cuidadosamente seleccionados, tanto en granulometría (tamaño de partícula) como en altura de capa, para que el agua filtrada corresponda a la calidad que se busca. Todo filtro se satura, en la medida en que el lecho se carga de materias retenidas. Cuando la saturación alcanza un valor excesivo o cuando se ve que la calidad del agua se deteriora, es necesario proceder al lavado del lecho filtrante.

Figura 7 Sistema de filtración.



Fuente: Autores, Sistema de Filtración, Indupalma Ltda.

El lavado del lecho de arena se hace en contracorriente en el momento en que se presente a través de ese lecho una caída de presión de 10 psi, lo que puede deducirse por la lectura de los manómetros respectivos.

Una vez el agua ha sido coagulada y decantada, esta no debe contener sino trazas de coágulos (floc). Con una buena decantación los filtros recibirán un agua poco cargada de "flocs". La filtración es un tratamiento de acabado y de seguridad para obtener un agua de calidad aceptable para consumo humano y para los procesos. La velocidad de paso a través de los filtros puede encontrarse en el orden de 5 a 15 m / hora.

Suavización

El proceso de suavización (Figura 8) se utiliza únicamente para el agua que va a ser utilizada en la producción de vapor. Su objetivo es eliminar la "dureza" del agua que está constituida por iones como el calcio y el magnesio y que se encuentran disueltos en el agua. La presencia de estos iones ocasiona la

formación de incrustaciones en los tubos de las calderas; por lo tanto se busca eliminarlos antes de alimentar el agua a las calderas.

Figura 8 Sistema de Suavización



Fuente: Indupalma, Equipos de Suavización.

El principio de la suavización se basa en la capacidad que tienen algunas sustancias de poder intercambiar sus iones positivos o cationes con los cationes de las sales contenidas en el agua.

La planta consta de tres suavizadores catiónicos funcionando en paralelo. Cada suavizador está constituido por un recipiente cilíndrico vertical cerrado, que contiene la resina. El agua se pone en contacto con la resina por medio de unas boquillas repartidas uniformemente en la parte superior. Sobre la resina debe quedar un espacio libre tal que permita la expansión de la misma en el momento del esponjado, entre 30 y 100% del volumen de la resina compactada, dependiendo del tipo de resina empleada. El aparato está provisto exteriormente de un conjunto de válvulas, que permita realizar las diversas operaciones de fijación, esponjado, regeneración y enjuague.

Todas las sales del agua tratada son transformadas en sales de sodio. El pH no varía durante el proceso.

La regeneración de los intercambiadores catiónicos se efectúa haciendo pasar a través de la resina una solución de cloruro de sodio (sal común).

Después de la etapa de suavización misma (o fijación como también se le llama) vienen las etapas de esponjado, regeneración y enjuague que se describen con más detalle a continuación.

a) Esponjado o lavado a contracorriente

Durante el funcionamiento normal, en el cual el líquido atraviesa el lecho del intercambiador de iones de arriba abajo, el producto se comprime y la pérdida de presión del agua aumenta ligeramente; por otra parte, las materias en suspensión contenidas en el líquido se van acumulando en la superficie del lecho de la resina, aumentando también la pérdida de presión.

Es necesario entonces hacer un lavado de la resina de abajo hacia arriba, antes de la regeneración propiamente dicha, con el fin de poner de nuevo el producto en suspensión en el agua y eliminar de esta manera los caminos preferenciales que se han formado, como consecuencia del aumento del diferencial de presión y para retirar además mediante este lavado, las materias que se hayan podido acumular sobre la superficie de la resina.

Para tener la seguridad de que se efectúa un esponjamiento correcto, la expansión de la masa del intercambiador de iones deberá alcanzar un volumen de 30 a 40% mayor y la duración de la operación será del orden de 10 a 15 minutos. El agua utilizada para este fin debe ser agua cruda filtrada. Es de anotar que el buen rendimiento de un intercambiador depende en gran medida de la eficiencia del esponjado.

b) Regeneración

El lavado del intercambiador de iones con una solución salina elimina los iones adsorbidos y los reemplaza por sodio, de forma que le devuelve su composición original.

La solución en este caso es salmuera con una concentración del 30% p/v, por lo cual es muy importante solicitar sal de buena calidad, exenta de hierro. La salmuera se introduce por la parte superior del intercambiador. El rendimiento total no llega al 100%, es decir que siempre deberá utilizarse una cantidad de regenerante superior a la teóricamente necesaria.

c) Enjuague

Es el paso final mediante el cual se extraen de la resina los excesos de regenerante y adicionalmente, se termina el proceso de eliminar la dureza que se extrajo del agua. Inyección de productos químicos para ajuste final del pH y eliminación de oxígeno: Como es bien sabido, la dureza excesiva en el agua puede formar incrustaciones en los tubos de las calderas. Sin embargo, la ausencia total de salinidad tampoco es conveniente pues impide la formación de una delgada capa protectora que evita la corrosión provocada por ejemplo, por el oxígeno (O₂) disuelto en el agua. El ajuste del pH a un valor de 8.5 – 9, recomendado por el fabricante de las calderas, se puede llevar a efecto por inyección de una solución de un producto químico, con una dosificación que debe determinarse experimentalmente por revisión del pH en el agua de purgas. Debe controlarse que en ningún caso el pH en el agua de alimentación a la caldera sobrepase el valor de 10 – 11.

Puesto que el oxígeno es causa de corrosión, generalmente se elimina su efecto con la aplicación de un producto con base en hiposulfitos. En el proceso de extracción de aceite de palma no es posible recuperar sino una parte muy pequeña de condensados provenientes del vapor utilizado, así que es necesario la

reposición permanente de prácticamente toda el agua. Aunque exista un tratamiento adecuado, el contenido de sales tiende a concentrarse en el interior de la caldera, de manera que se requieren purgas frecuentes para eliminar el exceso de dichas sales. Las cantidades de productos químicos a agregar se determinan mediante la medición de la cantidad residual de sulfitos (para el secuestrante de oxígeno) y fosfatos (para el acondicionador de pH) en el agua de purgas de la caldera.

4.2. TRATAMIENTO POR ÓSMOSIS INVERSA

Con el crecimiento de la población mundial la demanda de agua dulce a aumentado, si sumamos ha esto el crecimiento industrial, el tratamiento de aguas y efluentes se ha transformado en algo importantísimo para el desarrollo de esta sociedad. Es por esta razón que se ha declarado al agua como un recurso escaso.

De acuerdo con la ubicación y recursos económicos de los distintos países, estos adoptan distintas técnicas de tratamientos de efluentes y aguas. Por ejemplo, en países donde la energía es barata, se opta por tratamientos como la evaporación de aguas salobres, en otros países ricos en aguas subterráneas se opta por el tratamiento de intercambio iónico. Con el desarrollo de la tecnología actual, se han creado nuevas alternativas para el tratamiento de aguas y efluentes, una de estas alternativas es la ósmosis inversa la cual a tenido un desarrollo masivo en el campo de la desalinización de aguas salobres, sobre todo en el campo industrial, reemplazando o complementando a los métodos anteriores, ya que es un método no excluyente. Y en algunos países se ha transformado en la única opción factible.

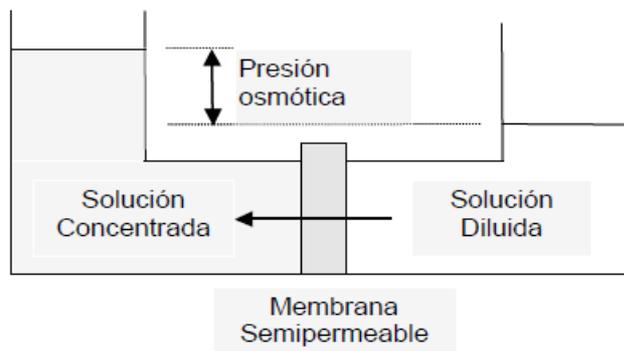
4.2.1. Principio de la ósmosis inversa

La ósmosis inversa consiste en separar un componente de otro en una solución, mediante las fuerzas ejercidas sobre una membrana semi-permeable. Su nombre

proviene de "ósmosis", el fenómeno natural por el cual se proveen de agua las células vegetales y animales para mantener la vida. En el caso de la ósmosis (Figura 9), el solvente (no el soluto) pasa espontáneamente de una solución menos concentrada a otra más concentrada, a través de una membrana semipermeable. ^[10]

Entre ambas soluciones existe una fuerza guía, originada en la diferencia de concentraciones. El solvente pasará en el sentido indicado hasta alcanzar el equilibrio. Si se agrega a la solución más concentrada energía en forma de presión, el flujo de solvente se detendrá cuando la presión aplicada sea igual a la presión osmótica aparente entre las 2 soluciones. Esta presión osmótica aparente es una medida de la diferencia de energía potencial entre ambas soluciones. Si se aplica una presión mayor a la solución más concentrada, el solvente comenzará a fluir en el sentido inverso. Se trata de la ósmosis inversa (Figura 10 y 11). El flujo de solvente es una función de la presión aplicada, de la presión osmótica aparente y del área de la membrana.

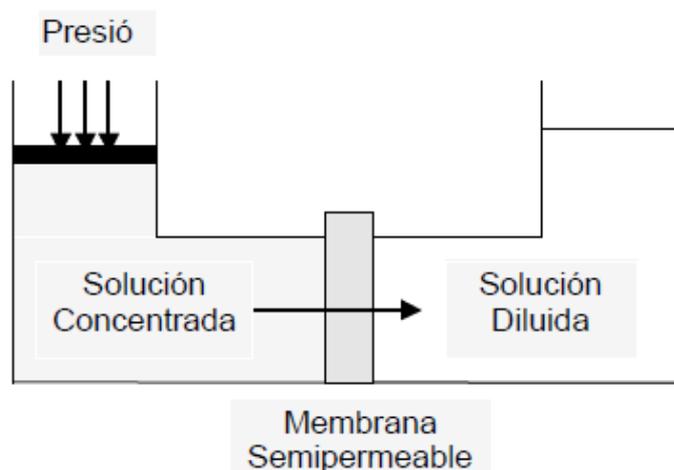
Figura 9 Esquema de ósmosis.



Fuente: INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUA DE ALIMENTACIÓN DE CALDERA, MAIVSA LTDA.

^[10] PARDILLOS, R.J. et. al. (2010) *Tratamiento del agua de una Caldera de Vapor*, Escuela Universitaria de Ingeniería Tcnica Industrial, Zaragoza - España.

Figura 10 Esquema de ósmosis inversa.



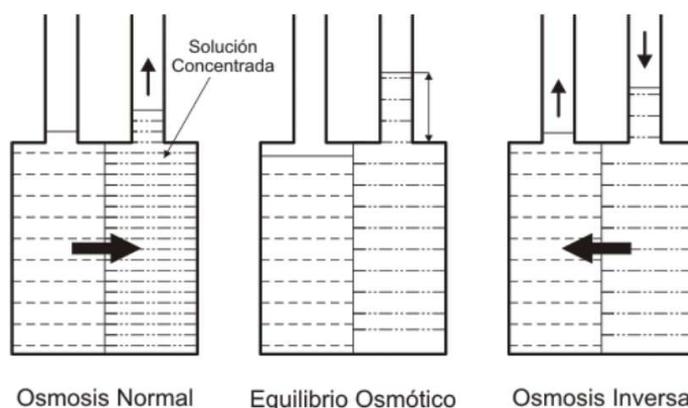
Fuente: INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE AGUA DE ALIMENTACIÓN DE CALDERA, MAIVSA LTDA.

Los componentes básicos de una instalación típica de ósmosis inversa son: un tubo que contiene la membrana, aunque normalmente se utilizan varios de estos tubos, ordenados en serie o paralelo. Una bomba suministra en forma continua el fluido, y, además, es la encargada en la práctica de suministrar la presión necesaria para producir el proceso. Una válvula reguladora en la corriente de concentrado, es la encargada de controlar la presión dentro de los elementos (se denominan así a las membranas convenientemente dispuestas).

Hoy en día, hay 3 configuraciones posibles de la membrana: el elemento tubular, el elemento espiral y el elemento de fibras huecas. Más del 60% de los sistemas instalados en el mundo trabajan con elementos en espiral debido a 2 ventajas apreciables:

- Buena relación área de membrana/volumen del elemento.
- Diseño que le permite ser usado sin dificultades de operación en la mayoría de las aplicaciones, ya que admite un fluido con una turbiedad 3 veces mayor que los elementos de fibra hueca.

Figura 11 Esquema de sistema de ósmosis inversa



Fuente: PARDILLOS, R.J. et. al. (2010) Tratamiento del agua de una Caldera de Vapor, Escuela Universitaria de Ingeniería Tecnica Industrial, Zaragoza - España.

4.2.2. Aplicaciones de la ósmosis inversa

Entre 1950 y 1970, se llevaron a cabo innumerables trabajos a fin de implementar el uso de la ósmosis inversa en la desalinización de aguas salobres y agua de mar. A partir de 1970, esta técnica comenzó a ser competitiva, y en muchos casos superior a algunos de los procesos y operaciones unitarios usados en concentración, separación y purificación de fluidos. Hay razones para justificar esta creciente supremacía, ya que la ósmosis inversa reúne características de excepción, como:

- Permite remover la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en el agua (hasta el 99%). Remueve los materiales suspendidos y microorganismos.
- Realiza el proceso de purificación en una sola etapa y en forma continua.
- Es una tecnología extremadamente simple, que no requiere de mucho mantenimiento y puede operarse con personal no especializado.
- El proceso se realiza sin cambio de fase, con el consiguiente ahorro de energía.

- Es modular y necesita poco espacio, lo que le confiere una versatilidad excepcional en cuanto al tamaño de las plantas: desde 1 m³/día, a 1.000.000 m³/día.

La ósmosis inversa puede aplicarse en un campo muy vasto y entre sus diversos usos podemos mencionar:

- Abastecimiento de aguas para usos industriales y consumo de poblaciones.
- Tratamiento de efluentes municipales e industriales para el control de la contaminación y/o recuperación de compuestos valiosos reutilizables.
- En la industria de la alimentación, para la concentración de alimentos (jugo de frutas, tomate, leche, etc.) y en la industria farmacéutica, para la separación de proteínas, eliminación de virus, etc.

5. MÉTODO DE ÓSMOSIS INVERSA COMO COMPLEMENTO AL SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUA.

Al evaluar técnicamente la integración la tecnología de ósmosis inversa al sistema tradicional de tratamiento de agua para procesos industriales, se encuentra que esta pueda instalarse en la etapa posterior a la suavización en donde se garantiza la entrega de agua con dureza dentro de parámetros para las calderas.

De la etapa de ósmosis inversa resulta agua con contenido de sales y minerales muy bajo, además de reducción en el parámetro de la sílice, que requerirá menores dosis de productos químicos para su ingreso a equipos como calderas y turbinas.

Las aguas residuales regeneradas constituyen un recurso no convencional de agua que se destaca por su volumen y disponibilidad, debido a que se produce de una forma relativamente continua, es decir, es una fuente teórica de agua con características de continuidad en el tiempo.

El agua residual de la ósmosis inversa, que se calcula en aproximadamente un 30% del total de agua alimentada a esta etapa, será recirculada a los tanques de reserva después de filtración, agua que se empleará para uso de proceso en limpieza de equipos y mantenimiento de la planta. Actualmente, se esta utilizando para el proceso de tratamiento de aguas $1,5\text{m}^3$ por tonelada de fruto procesado, lo que representa en una planta grande de 60t/h , la utilización de 90m^3 por hora, por lo que se espera recuperar 27m^3 por hora de proceso.

Para el caso del agua de purga de las calderas, ésta deberá contener una concentración inferior de residual de productos (actualmente se esta presentando residuales alrededor de 50 – 68 ppm según el tipo de caldera y se desea disminuir

a niveles inferiores a 10ppm) y sales que dará vía libre a un enfriamiento y recirculación a la etapa de ósmosis inversa.

A continuación se presentan las ventajas de la integración de ósmosis inversa al tratamiento de agua para proceso.

Ventajas:

- Rechazo de la totalidad de sólidos disueltos
- Permite el funcionamiento de calderas de ciclo alto.
- No necesita regeneradores químicos (ácidos/caústicos)
- No requiere excesiva mano de obra
- Versátil acomplamiento con sistemas de resina
- Ideal para aplicaciones móviles.

Limitaciones

- No concebido para la eliminación de sólidos suspendidos
- Mayor costo eléctrico que los sistemas de resina (bombas de alta presión)
- Genera una significativa corriente de rechazo (por lo general, 20 – 30% de la corriente de entrada)
- No rechaza el CO₂
- Temperatura máxima 80°C

Adicionalmente se presentan algunos beneficios de la calidad del agua obtenida por ósmosis inversa:

- Mejora en la pureza del vapor de los procesos y la turbo-maquinaria.
- La gran reducción de sólidos disueltos disminuye las posibilidades de arrastre.

- Gran reducción de la carga del sistema de recuperación de calor de la purga.
- Mejora de la eficiencia y la confiabilidad de la caldera
- Menos posibilidad de acumulación de sedimentos de incrustación.
- Menor posibilidad de falla de la cañería de la caldera por presencia de incrustación/sobrecalentamiento
- Menor corrosividad del vapor sobre el equipo de procesamiento
- Menor necesidad de administración de ácido carbónico y aminos
- Menor posibilidad de arrastre por alcalinidad. ^[11]

[11] General , Electric. "zenonenv." *Water and Process technologies*. General Electric, n.d. Web. Agosto 2012. <<http://www.zenonenv.com/pdf/watertour/wwtsgo>

6. CONCLUSIONES

Con la caracterización fisicoquímica de las fuentes de captación disponibles se determinó que se presentan dos parámetros que superan el valor máximo permitido para el uso industrial, la dureza y la sílice, obligando a realizar un cambio en el sistema de tratamiento de agua para evitar daños en los equipos en la planta.

La ósmosis inversa ofrece una tecnología complementaria al proceso tradicional de tratamiento de aguas de las plantas extractoras de aceite de palma, proporcionando una remoción del 99% de los sólidos disueltos en el agua y como valor agregado disminuyendo en una quinta parte la adición de químicos acondicionadores del agua de alimentación para las calderas de alta presión. Además de la reducción en el número de purgas requeridas, evitan la eliminación al tratamiento de efluentes de carga química reduciendo costos y alineando el manejo de aguas residuales. Actualmente se está presentando residuales alrededor de 50 – 68 ppm según el tipo de caldera y se desea disminuir a niveles inferiores a 10ppm.

La ósmosis inversa logra una reducción significativa del contenido de sílice prolongando la vida útil de los equipos de generación de vapor y energía, mejorando la eficiencia y confiabilidad de los mismos en las plantas de extracción de aceite de palma.

Con el uso de la tecnología de ósmosis inversa es posible realizar una recirculación de las aguas de purga por su bajo contenido de residual de producto químico.

Con la recirculación del agua de purga de calderas es posible reducir el consumo de agua de fuentes hídricas de las plantas extractoras.

También es posible mejorar la pureza del vapor en los procesos de generación de energía debido a la gran reducción de sólidos disueltos que disminuyen las posibilidades de arrastre que tiende a depositarse en válvulas y turbinas reduciendo capacidad y eficiencia.

Por la reducción de sólidos totales disueltos logrado por la ósmosis inversa permite aumentar el tiempo de residencia del agua dentro de la caldera, disminuyendo la frecuencia de las purgas, ahorrando importantes cantidades de agua, energía y productos químicos para el control.

El agua residual de la ósmosis inversa, que se calcula en aproximadamente un 30% del total de agua alimentada a esta etapa, será recirculada a los tanques de reserva después de filtración, agua que se empleará para uso de proceso en limpieza de equipos y mantenimiento de la planta. Actualmente, se esta utilizando para el proceso de tratamiento de aguas $1,5\text{m}^3$ por tonelada de fruto procesado, lo que representa en una planta grande de 60t/h , la utilización de 90m^3 por hora, por lo que se espera recuperar 27m^3 por hora de proceso.

BIBLIOGRAFÍA

CCE, (1995). Tratamiento de Agua por osmosis Inversa, Prowater Argentina.

General , Electric. "zenonenv." *Water and Process technologies*. General Electric, n.d. Web. Agosto 2012. <<http://www.zenonenv.com/pdf/watertour/wwtsgo>

Informe de caracterización fisicoquímica UIS – Indupalma.

Lenntech, BV. *Lenntech*. N.p., 2011. Web. 15 agosto 2012. <<http://www.lenntech.es/biblioteca/osmosis-inversa/que-es-osmosis-inversa.htm>

OELKER, A. et. al. (2011) *Tratamiento de Agua para Calderas*, THERMAL ENGINEERING LTDA. Santiago - Chile.

PARDILLOS, R.J. et. al. (2010) *Tratamiento del agua de una Caldera de Vapor*, Escuela Universitaria de Ingeniería Tecnica Industrial, Zaragoza - España.

RIGOLA, Mauricio, *Tratamiento de aguas industriales – Aguas de Proceso y Residuales*. Barcelona España: Editorial Marcombo S.A.. 1990

RODRIGUEZ, Santiago. *La dureza del Agua*. Bahia Blanca: Editorial de la Universidad Tecnológica Nacional, 2010.

Spirax, Sarco. "*Purgas de Caldera*". N.p., 01 julio 2012. Web. 2003. <<http://www.spiraxsarco.com/ar/pdfs/SB/p403-56.pdf>>.

Unitek, . "*Parametros fisicoquimicos del agua*." Ingeniería en tratamiento del agua. Unitek, n.d. Web. agosto 2012. <http://www.unitek.com.ar/productos-osmosis-inversa.php?id_lib_tecnica=6>.