

5
EJ 2

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO .

FACULTAD DE INGENIERIA.



REUSO DE AGUA RESIDUAL DOMESTICA TRATADA
PARA SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO EN PLANTAS
TERMoeLECTRICAS

T E S I S

Que para obtener el Titulo de:
Ingeniero Mecánico Electricista.

(Area Mecánica)

Presenta:

ALCARAZ FERNANDEZ CEJUDO JORGE ARTURO.

Director: Ing. José Antonio Martínez Méndez.

México D.F. 1993.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

T E S I S

TEMA:

*Reuso de Agua Residual Doméstica en Sistemas de
Enfriamiento en Plantas Termoeléctricas.*

I N D I C E .

1.- INTRODUCCION. _____	1
2.- REUSO DE AGUA RESIDUAL DOMESTICA. _____	4
2.1. EN QUE CONSISTE LA PRACTICA DEL REUSO. _____	4
2.2. CARACTERISTICAS Y CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DOMESTICA. _____	6
2.2.1. Características Físicas. _____	7
2.2.2. Características Químicas. _____	11
2.2.3. Características Biológicas. _____	18
Tabla 2.2.1. Composición Típica del Agua Residual Doméstica sin Tratamiento. _____	21
2.3. DISTINTAS POSIBILIDADES DEL REUSO. _____	22
2.3.1. Riego en Agricultura y Areas Verdes. _____	23
2.3.2. Recarga de Agua Subterráneas. _____	24
2.3.3. Reuso Recreativo / Mejoramiento Ambiental. _____	26
2.3.4. Reuso Potable. _____	27
2.3.5. Reuso Industrial. _____	29
Tabla 2.3. Categorías de Reuso de Agua Residual y Problemas Potenciales. _____	31
2.4. CALIDADES DE AGUA REQUERIDAS SEGUN APLICACIONES DE REUSO. _____	32
Tabla 2.4. Calidad del Efluente Típico de una Planta de tratamiento Secundario vs. Estándares para Agua Potable. _____	37

<i>Figura 2.4. Potenciales de Reuso Según el Nivel de Tratamiento</i>	38
2.5. REUSO INDUSTRIAL CON ELEVADA DEMANDA DE AGUA.	39
2.5.1. <i>Generación de Energía Mediante Vapor.</i>	40
2.5.2. <i>Las Industrias Manufactureras.</i>	40
2.5.3. <i>Las Industrias Mineras.</i>	41
<i>Tabla 2.5.1. Las Tres Dificultades Mayores Encontradas en la Industria cuando se Utiliza Agua con Calidad Impropia.</i>	43
2.6. TRATAMIENTOS AVANZADOS PARA EL REUSO.	44
2.6.1. <i>Eficiencia del Proceso de Tratamiento.</i>	45
2.6.2. <i>Remoción de Sólidos Suspendidos Totales.</i>	45
2.6.3. <i>Combinación de Procesos para la Restauración Avanzada de Agua Residual.</i>	48
<i>Tabla 2.6.1. Valores Típicos de Calidad Según el Nivel de Tratamiento.</i>	50
2.7. POLITICA Y COSTOS DEL REUSO.	51
2.7.1. <i>Objetivos del Proyecto.</i>	52
2.7.2. <i>Estudio de Mercado.</i>	53
2.7.3. <i>Reporte del Diseño.</i>	54
<i>Tabla 2.7.1. Estudio del Mercado del Agua Residual Doméstica Restaurada (Fuente e información de respaldo).</i>	55
<i>Tabla 2.7.2. Planteamiento para el Proyecto de Restauración y Reuso de Agua Residual.</i>	57
2.8. EL REUSO INDUSTRIAL EN MEXICO.	60
2.8.1. <i>Los Antecedentes del Reuso en México.</i>	60
2.8.2. <i>El Agua Residual en el Distrito Federal.</i>	61
2.8.3. <i>Los Reglamentos Referentes al Reuso en el Distrito Federal.</i>	62
2.8.4. <i>Reuso Industrial Proyectado en México.</i>	63

Tabla 2.8.	<i>Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en la Ciudad de México.</i>	66
------------	--	----

3.-	EL REUSO DE AGUA RESIDUAL DOMESTICA EN SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.	68
-----	---	----

3.1.	MARCO GENERAL: TERMOELECTRICAS.	68
------	--	----

3.1.1.	<i>Sistemas de Enfriamiento que Utilizan Agua para este Servicio.</i>	69
--------	---	----

3.1.2.	<i>Torres de Enfriamiento.</i>	72
--------	--------------------------------	----

3.1.3.	<i>Generación de Energía Mecánica a partir de Vapor (Ciclo Rankine).</i>	72
--------	--	----

Figura 3.1.1.	<i>Ilustración Sobre el Plano T-S y Diagrama del Ciclo Rankine.</i>	75
---------------	---	----

3.2.	DEMANDA DE AGUA PARA SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.	76
------	---	----

3.2.1.	<i>Funcionamiento de una Torre de Enfriamiento.</i>	76
--------	---	----

3.2.2.	<i>Deducción de los Ciclos Concentración.</i>	80
--------	---	----

Figura 3.3.	<i>Balace de Sales en una Torre de Enfriamiento Evaporativa.</i>	83
-------------	--	----

3.3.	PRINCIPALES PARAMETROS DE CONTROL Y TOLERANCIAS DE AGUA PARA SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.	84
------	---	----

3.3.1.	<i>Control de Depósitos (Incrustaciones y Ensuciamiento).</i>	85
--------	---	----

3.3.2.	<i>Control de la Corrosión.</i>	90
--------	---------------------------------	----

3.3.3.	<i>Control Microbiológico.</i>	93
--------	--------------------------------	----

3.3.4.	<i>Deterioro de la Madera de las Torres de Enfriamiento.</i>	96
--------	--	----

Tabla 3.2.	<i>Problemas de Calidad de Agua Asociados con Agua de Enfriamiento y Tratamiento Posible para Minimizar el Problema.</i>	100
------------	--	-----

3.4.	PARAMETROS DE CALIDAD DE AGUA RESIDUAL TRATADA CON FINES DE REUSO PARA ENFRIAMIENTO.	101
------	---	-----

3.4.1.	<i>Incrustaciones.</i>	102
--------	------------------------	-----

3.4.2.	Ensuciamiento.	103
3.4.3.	Corrosión Metálica.	103
3.4.4.	Crecimientos Biológicos.	104
3.4.5.	Deterioro de la Madera.	105
Tabla 3.4.1.	Requerimientos de Calidad de Agua para Sistema de Enfriamiento con Recirculación (Valores Límites).	107
Tabla 3.4.2.	Problemas de Calidad de Agua Asociados a Agua de Reposición para Sistemas de Enfriamiento.	108
3.5.	TREN DE TRATAMIENTO.	109
3.5.1.	Clasificación de los Tratamientos de Agua.	110
3.5.2.	Procesamiento del Agua Residual Doméstica.	111
3.5.3.	Tratamiento de Agua para Torres de Enfriamiento Industrial, Considerando Agua Residual Doméstica sin Tratamiento.	114
3.5.4.	Tratamiento de Agua para Torres de Enfriamiento Industrial, Considerando Agua Residual Doméstica con Tratamiento de Nivel Secundario.	116
Tabla 3.5.1.	Porcentaje de Remoción de Material en Aguas Residuales Domésticas de un Tratamiento Primario.	118
Tabla 3.5.2.	Porcentaje de Remoción del Tratamiento de Lodos Activados con Respecto a Efluentes Primarios.	119
Tabla 3.5.3.	Porcentaje de Remoción del Tratamiento de Nitrificación Biológica con Respecto a Efluentes Secundarios.	120
Tabla 3.5.4.	Porcentaje de Remoción del Proceso de Coagulación-Sedimentación por Adición de Cal con Respecto a Efluentes Secundarios.	121
Tabla 3.5.5.	Porcentaje de Remoción del Proceso de Filtración Después de un Tratamiento Físico-Químico con Respecto a un Efluente de Clarificación Secundaria.	122
Anexo 3.5.	Proceso Convencional.	123
Figura 3.5.	Diagrama de Flujo del Tren de Tratamiento Propuesto.	134
3.6.	COSTOS.	135

3.6.1.	<i>Nivel de Tecnología Necesaria para el Tratamiento de Agua Residual.</i>	135
3.6.2.	<i>Evaluación de la Tecnología Existente.</i>	137
Cuadro 3.6.	<i>Aprovechamiento del Agua Residual Doméstica.</i>	141
Tabla 3.6.1.	<i>Restricciones Funcionales de los Procesos de Tratamiento.</i>	142
Tabla 3.6.2.	<i>Evaluación Económica de los Procesos de Tratamiento.</i>	144
4. -	<i>LA EXPERIENCIA EN LA TERMOELECTRICA DE TULA.</i>	146
4.1.	<i>ANTECEDENTES DEL REUSO EN TULA.</i>	146
4.2.	<i>LA PRACTICA DEL REUSO EN TULA.</i>	148
4.2.1.	<i>Descripción de Componentes.</i>	150
Figura 4.2.1.	<i>Diagrama de Flujo de la Planta de Tratamiento de agua de Tula.</i>	154
4.3.	<i>LA EXPERIENCIA DE TULA.</i>	155
5. -	<i>CONCLUSIONES.</i>	157
-	<i>APENDICES.</i>	160
Apéndice 1.	<i>Los Reglamentos Referentes al Reuso en el Distrito Federal.</i>	160
Apéndice 2.	<i>Definiciones Útiles para el estudio de la Demanda de Agua en las Torres de Enfriamiento.</i>	167
-	<i>GLOSSARIO.</i>	170
-	<i>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.</i>	172

CAPITULO 1

INTRODUCCION

1. INTRODUCCION.

En la actualidad las tendencias más recientes en la Ingeniería, así como en todas las actividades humanas, están siendo encaminadas a impactar lo menos posible al ambiente, ya que se están viviendo los efectos adversos que son resultado de haber mal usado los recursos naturales, como se observa en la contaminación de: agua, aire y tierra; cambios climatológicos, lluvia ácida, etc.

Es por eso que ahora se escuchan con mayor frecuencia ciertos términos que antes no eran de uso común, como: uso racional de recursos renovables y no renovables, ahorro energético, reciclamiento, cogeneración, etc. Mismos que involucran filosofías modernas de vida, que se reflejan en todos los aspectos cotidianos y también se pueden apreciar en las tendencias actuales de diseño ingenieril.

Una de esas tendencias recientes es el reuso de agua residual doméstica, que no solo prevee el suministro alternativo de agua en donde no se requiere agua con calidad potable, sino también el uso racional de éste recurso natural.

Este estudio informa, en el capítulo segundo, del campo que tiene el reuso de agua residual doméstica, el cual es muy

amplio. Para algunas necesidades el tratamiento que se requiere, previo para su reuso, es mínimo o nulo. Para otros usos el tratamiento que se necesita, es el mismo que se le debiera dar para su reincorporación al ambiente, con la visión de no contaminar ni impactar más los receptáculos de agua, como: ríos, lagos, océanos y estuarios. También existen otras aplicaciones, donde el tratamiento que se requiere, es de calidad superior a la que se ha determinado para el agua potable, como lo es el caso del agua para alimentación de calderas de alta presión, transporte de materiales y otros procesos industriales.

En el capítulo tercero se definieron los parámetros que se deben considerar para el reuso de agua residual doméstica en los sistemas de enfriamiento, en particular aquellos que utilizan torres. A pesar de que en éstas las pérdidas de agua se han minimizado, los volúmenes que se necesitan son enormes y el agua que se utiliza en éstas torres, no precisa tener la calidad que se desea para agua de uso potable, y aún con ésta calidad se requiere de la adición de aditivos químicos para el buen funcionamiento y conservación de la misma torre.

En el capítulo cuarto, como ejemplo práctico, se consideró la central termoeléctrica "Fco. Pérez Ríos" en Tula Hidalgo, por utilizar agua residual doméstica tratada en una

de sus torres de enfriamiento, objeto de estudio de ésta tesis.

CAPITULO 2

REUSO DE AGUA RESIDUAL DOMESTICA

2.1. EN QUE CONSISTE LA PRACTICA DEL REUSO

El continuo crecimiento de la población, la contaminación de aguas superficiales y subterráneas (acuíferos), la distribución desigual de las fuentes de suministro de agua y las sequías periódicas, han forzado a la búsqueda de nuevas fuentes de abastecimiento de agua.

En el pasado, la disposición del agua residual se realizaba por los métodos más sencillos (por ejemplo: dilución en grandes volúmenes de agua). Pero con el incremento del desarrollo urbano e industrial, la disposición del efluente y sus efectos ambientales comenzaron a requerir de consideraciones especiales.

El uso de efluentes de agua residual doméstica tratada, hoy día descargada al medio ambiente por las plantas de tratamiento de agua residual, está recibiendo más atención como una fuente real de suministro de agua. Además un tratamiento secundario, que es el que se da en la mayoría de estas plantas, tiene un nivel con calidad suficiente para la mayoría de las aplicaciones de reuso municipal e industrial⁴. Cuando se requiere un proceso avanzado para obtener una calidad predeterminada para algún reuso específico, las oportunidades para el reuso de ese efluente se incrementan y

pueden ser evaluadas en los planes de diseño.

Las plantas de tratamiento habrán de ser diseñadas y localizadas, de tal manera, que una porción del efluente tratado pueda tener una variedad de aplicaciones para el reuso, como: riego de campos, enfriamiento industrial y recarga de mantos acuíferos. Esta tendencia se espera que se incremente en el futuro, especialmente donde el abasto de agua fresca es limitado o difícil de realizar.

Después del tratamiento, el agua residual doméstica, se puede reusar y/o reincorporarse al medio ambiente, diluyéndola en ríos, lagos, estuarios o al océano. Pero no importando cual sea el camino que se elija, se deben evitar los impactos negativos en el cuerpo de agua donde se va a desechar y se debe procurar que la calidad del efluente de agua a disponer sea consistente con la del agua local donde se descarga.

En muchos lugares del planeta el reuso de agua residual es ya un elemento importante en los planes de abasto de agua. El reuso de agua residual doméstica, técnicamente es ya una opción viable, pero es de primordial importancia asegurar la conservación del agua, el uso eficiente de las fuentes de abasto existentes y el desarrollo de nuevas fuentes de abastecimiento de agua, que son otras alternativas que deben ser evaluadas.

2.2. CARACTERISTICAS Y CALIDAD DEL AGUA RESIDUAL DOMESTICA.

Las descargas del agua residual doméstica son relativamente constantes durante todo el año, ya que están destinadas principalmente al uso y consumo del hombre, son las que se encuentran más dispersas en medios urbanos y rurales, debido a los amplios asentamientos humanos, y siempre están destinadas a crecer, al igual que todas las actividades productivas del hombre y eso hace que generalmente sean la fuente más viable para tratarlas y reutilizarlas. Pero por la misma variabilidad de su uso, las costumbres locales, los materiales, mercancías y productos disponibles del lugar, el tipo de industrias que ahí laboran, etc. son las razones por la que no se puede estandarizar una característica y calidad universal de ésta.

Los factores que afectan la calidad del efluente de agua residual doméstica son²:

- Tipo de sistema de tratamiento utilizado para potabilizar el agua.
- Calidad inicial del agua de abasto.
- Uso del agua.
- Impacto de alguna descarga residual industrial.
- Infiltraciones en el sistema de colección.

El agua residual doméstica se caracteriza en términos de su composición:

- Física
- Química
- Biológica

Las cuales se definen a continuación:

2.2.1. Características Físicas.

La característica física más importante del agua residual doméstica es el contenido total de sólidos, que están compuestos de: materia flotante, materia sedimentable, materia coloidal y materia en solución. Otras características físicas importantes incluyen: olor, temperatura, densidad, color y turbiedad. Se hace una breve descripción de las siguientes características:

- Sólidos Totales
- Olor
- Temperatura
- Densidad
- Color
- Turbiedad

- Sólidos Totales.-

Analíticamente el contenido total de sólidos del agua residual doméstica está definido como toda la materia que queda como residuo después de la evaporación realizada de 103°C hasta 105°C. La materia que tiene una presión de vapor significativa a ésta temperatura se pierde durante la evaporación, por lo que no está definida como un sólido. Los sólidos sedimentables son los que se sedimentan en el fondo de un contenedor en un periodo de 60 minutos, lo comprenden materia orgánica e inorgánica con un diámetro equivalente de 1µm a 100µm, ejemplos de éstos son: arcillas, arenas, polvos y organismos vivos, como: algas, bacterias y peces. Los sólidos filtrables consisten en sólidos disueltos y coloidales, donde los coloidales son partículas de materia con un tamaño aproximado de 10^{-9} µm. hasta 1µm, ejemplos de éstos son: polvos muy finos y virus. Los disueltos consisten en moléculas orgánicas, inorgánicas e iones que se encuentran presentes en solución de agua, los sólidos disueltos tienen un diámetro equivalente entre 10^{-5} µm y 10^{-9} µm.

El rango típico en el que se encuentran los sólidos totales, en el agua residual doméstica es de 720mg/l. llegando a concentraciones de 1200mg/l.

- Olor. -

Los olores en el agua residual doméstica son causados por los gases producidos por la descomposición de la materia orgánica o por sustancias añadidas a ésta. La característica mayor de olor de agua añeja o pútrida es por ácido sulfúrico que es producido por los microorganismos anaerobios. Las aportaciones de las aguas residuales industriales pueden contener compuestos olorosos o compuestos que producen olores durante el proceso de tratamiento de agua residual.

- Temperatura. -

La temperatura del agua residual doméstica comunmente es más alta que la del agua fresca, y esto se debe a las descargas de agua tibia de los servicios domésticos y las actividades industriales. Dependiendo de la locación geográfica, la temperatura promedio del agua residual doméstica varía desde los 10°C hasta los 21.1°C aproximadamente, el valor de 15.6°C es un valor representativo del agua residual. La temperatura del agua es un parámetro muy importante debido al efecto que tiene en reacciones químicas, grado de reacción de contaminantes en

los procesos de tratamiento de agua residual, vida acuática y la factibilidad de utilizar esa agua para usos posteriores.

- Densidad.-

La densidad en el agua residual doméstica es una característica importante, debido al potencial que tiene de formar corrientes por diferencia de densidades en los tanques de sedimentación y otras unidades de tratamiento. La densidad en el agua residual doméstica se incrementa al ser mayor el impacto de descargas industriales. La densidad y la gravedad específica del agua residual doméstica depende de la temperatura y varía con la concentración de sólidos totales presente en ésta.

- Color.-

El agua residual doméstica fresca normalmente tiene un color café-grisáceo, conforme pasa el tiempo, se incrementa su cantidad en el sistema de colección y se desarrollan más condiciones anaerobias, el color cambia substancialmente de gris a gris oscuro y últimamente se torna a negro. Cuando el color se torna negro es cuando el agua residual se describe

como afeja. El agua residual industrial también añaden color al agua residual doméstica, por la formación de sulfuros metálicos producidos bajo condiciones anaeróbicas en reacción con los metales contenidos en el agua residual doméstica.

- Turbiedad.-

La turbiedad es una medida de la propiedad del agua de transmitir la luz, se utiliza para indicar la calidad de las descargas residuales con respecto a materia coloidal como: jabones, detergentes o emulsificantes. La materia coloidal refractará o absorberá luz y por lo tanto impedirá su transmisión. En general no hay relación entre la turbiedad y la concentración de sólidos suspendidos.

2.2.2. Características Químicas.

Estas pueden ser Orgánicas e Inorgánicas:

Materia Orgánica	{	Proteínas
		Carbohidratos
		Agentes Tensoactivos
		Contaminantes de Interés
		Compuestos Orgánicos Volátiles
		Pesticidas y Herbicidas

Materia Inorgánica { pH
Cloratos
Alcalinidad
Nitrógeno y Fósforo
Sulfuros
Compuestos Inorgánicos Tóxicos
Gases

- Materia Orgánica.-

En el agua residual doméstica aproximadamente el 75% de los sólidos suspendidos y el 40% de los filtrables, son de naturaleza orgánica. Los compuestos orgánicos se deberán a síntesis orgánicas que son el resultado de una combinación de: carbón, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. En algunos casos también algunos otros elementos, como: azufre, fósforo y fierro, pueden estar presentes. Los grupos principales de substancias orgánicas presentes en el agua residual doméstica, son: proteínas (40 al 60%), carbohidratos (25 al 50%) y grasas (10%). La urea es otro compuesto importante en el agua residual doméstica, pero su descomposición es muy rápida.

Junto con los anteriores, el agua residual doméstica contiene pequeñas cantidades de un gran número de diferentes moléculas sintéticas orgánicas, que pueden ser muy simples en su estructura o extremadamente complejas, ejemplos típicos

son: los agentes tenso-activos; contaminantes de interés, por su efecto cancerígeno, mutágeno, alta toxicidad, etc.; compuestos orgánicos volátiles; insecticidas y pesticidas. A continuación se describen brevemente:

- **Proteínas:** Complejas en su estructura química e inestables, pueden ser solubles o insolubles en agua.
- **Carbohidratos:** Incluyen azúcares, melazas, celulosa y fibras de madera.
- **Agentes Tenso-activos:** Largas moléculas orgánicas que son ligeramente solubles en agua y causan la formación de espumas. También reciben el nombre de sustancias activas al azul de metileno.
- **Contaminantes de interés:** La "Agencia de Protección Ambiental" (EPA por sus siglas en inglés) ha definido 129, de ellos en 65 clases y han sido seleccionados por sus características antes mencionadas.
- **Compuestos Orgánicos Volátiles:** Son los que tienen un punto de ebullición $\leq 100^{\circ}\text{C}$ y/o una presión de vapor mayor que 1mmHg a 25°C y resultan de interés ya que:
1) En estado de vapor tienen más movilidad, por lo que es más probable que se liberen al ambiente; 2) La presencia de ellos en el medio ambiente conlleva

riesgos en la salud pública; 3) Ellos contribuyen al incremento general de la reactividad de los hidrocarburos en la atmósfera, los cuales ayudan a la formación de oxidantes fotoquímicos.

- Pesticidas y Herbicidas: Y otros químicos utilizados en la agricultura son tóxicos para casi todas las formas de vida.

- Medición del Contenido Orgánico. -

Hoy día los métodos que se utilizan comúnmente para medir cantidades de materia orgánica mayores a 1mg/l. , son:

- 1) Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO): Mide el oxígeno disuelto que es utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica. La DBO del agua residual doméstica típicamente se encuentra en el rango de $110 - 400\text{mg/l.}$, siendo una concentración media 220mg/l.
- 2) Demanda Química de Oxígeno (DQO): Se utiliza para medir el contenido de material orgánico que puede ser oxidado. También se utiliza para medir la materia orgánica en residuos industriales y domésticos que

son tóxicos para la vida biológica. En el agua residual doméstica la DQO se encuentra entre los 250 - 1000mg/l., con una concentración media de 500mg/l.

- 3) **Carbón Orgánico Total (COT):** Se aplica cuando las concentraciones de material orgánico son pequeñas. En el agua residual doméstica el COT se encuentra con una concentración media de 160mg/l. siendo el valor mínimo 80mg/l. y el máximo de 290mg/l.

- Materia Inorgánica.-

Muchos de los compuestos inorgánicos en el agua residual doméstica son importantes al establecer y controlar criterios de calidad de agua. Las concentraciones de sustancias inorgánicas se incrementan al entrar el agua en contacto con: formaciones geológicas, residuos de rocas y de minerales. Debido a que la concentración de varios constituyentes inorgánicos puede afectar en gran medida los usos benéficos, es que es deseable, examinar la naturaleza de éstos.

- **pH:** Es un parámetro importante de calidad. El rango

de concentración deseable para la existencia de vida biológica es estrecho y crítico, el agua residual doméstica con una concentración adversa de ión hidrógeno dificulta los tratamientos biológicos.

- **Cloratos:** Provenientes de rocas y sólidos que contienen cloro y áreas costeras, adicionalmente el agua residual residencial es una fuente importante de cloratos. Por ejemplo los desechos humanos contienen aproximadamente 6g. de clorato por persona por día, los suavizantes para uso doméstico de agua añaden una gran cantidad de cloratos. En el agua residual doméstica el contenido típico de cloratos es de 30 - 100mg/l. siendo un valor medio 50mg/l.
- **Alcalinidad:** Resulta de la presencia de los hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos tales como calcio, magnesio, sodio, potasio o amonía, siendo más comunes los de calcio y magnesio. El agua residual doméstica normalmente es alcalina, recibiendo esta característica por los materiales añadidos durante su uso residencial. La concentración típica es de 50 - 200mg/l. la concentración media es de 100mg/l en forma de CaCO_3 .
- **Nitrógeno y Fósforo:** Son esenciales para propiciar los

crecimientos biológicos, ya que son bien conocidos como nutrientes o bioestimulantes, por lo que su presencia será deseable para tratamientos biológicos e indeseable para su reuso posterior. El nitrógeno en el agua residual doméstica fresca es el resultado de la combinación de proteínas y urea, con una concentración media de 40mg/l. teniendo como valores límites 20 - 85mg/l. El fósforo es un importante constituyente en el agua proveniente de residuos de origen industrial y el contenido de éste en el agua residual doméstica es de 4 - 15mg/l. siendo 8mg/l. un valor medio.

- **Sulfuros:** Se requieren para la síntesis de proteínas y también son liberados durante su degradación. Son el producto de la reducción de materia biológica bajo condiciones anaerobias, su concentración típica en el agua residual doméstica es de 20 - 50mg/l. teniendo a 30mg/l. como valor medio.
- **Compuestos Inorgánicos Tóxicos y Metales Pesados:** Son considerados como contaminantes de interés (cobre, plomo, plata, cromo, arsénico, bario, fluor, etc.). Algunos aniones tóxicos están presentes por impactos industriales. Los Metales Pesados y trazas de éstos (níquel, magnesio, plomo, cobre, cadmio, zinc, fierro,

mercurio) son constituyentes importantes en muchas clases de agua, algunos son necesarios para propiciar los crecimientos biológicos, pero en exceso son considerados contaminantes de interés e interfieren con el reuso posterior del agua residual tratada.

- Gases: Los gases presentes en el agua residual doméstica son nitrógeno, oxígeno, bióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno, amonía y metano. Los dos primeros se encuentran presentes en todas las aguas superficiales por estar presentes en la atmósfera, los cuatro últimos son producto de la degradación biológica de la materia orgánica.

2.2.3. Características Biológicas.

Los principales grupos de microorganismos presentes en las aguas residuales domésticas se clasifican en:

- Bacterias
- Viruses
- Hongos
- Protozoarios
- Algas
- Plantas y Animales
- Organismos Patógenos

- **Bacterias:** Microorganismos de una célula, es la forma más pequeña de vida capaz de sintetizar el protoplasma de su ambiente circundante.
- **Virus:** Es la estructura más pequeña que contiene toda la información genética necesaria para su reproducción.
- **Hongos:** Junto con las bacterias son los organismos responsables de la descomposición de la materia.
- **Protozoarios:** Es la forma animal más pequeña, organismos unicelulares.
- **Algas:** Su presencia afecta la posibilidad de utilizar el agua para abasto debido a que ocasionan problemas de olor y sabor.
- **Plantas y Animales:** Entre ellos se consideran lombrices microscópicas y crustáceos.
- **Organismos Patógenos:** Los que se encuentran en el agua residual doméstica son producto de desechos humanos y causan enfermedades gastrointestinales.

La presencia de algunos de éstos, puede indicar un agua con un alto valor en nutrientes, lo cual será benéfico en tratamientos biológicos para la descomposición de la materia orgánica, también se utiliza para indicar el nivel de

contaminación por residuos humanos (bacterias coliformes fecales). Pero para fines de reuso, su control es necesario ya que algunos tienen la característica de ser tóxicos y otros propician enfermedades como: hepatitis, gastrointestinales, amibiocis, etc. e inclusive la muerte.

El análisis de los anteriores se realiza utilizando un organismo indicador, debido a la complejidad que representaría enumerar a cada uno de los anteriores. Para el agua residual doméstica se utilizan las bacterias coliformes fecales.

En el agua residual doméstica los coliformes totales tienen concentraciones típicas de 10^6 - 10^7 /100ml. como mínimo, de 10^7 - 10^8 /100ml. como medio y 10^7 - 10^9 /100ml. como máximo.

Tabla 2.2.1. Composición Típica del Agua Residual Doméstica sin Tratamiento^a.

Contaminante	Unidades	Mínima	Media	Máxima
Sólidos totales(ST)	mg/l	350	720	1200
Sólidos disueltos(SDT)	mg/l	250	500	850
Sólidos suspendidos(SST)	mg/l	100	220	350
Sólidos sedimentables	mg/l	5	10	20
Bemanda bioquímica de oxígeno 5-días, 20°C.	mg/l	110	220	400
Carbón orgánico total(COT)	mg/l	80	160	290
Demanda quím. de oxígeno(COD)	mg/l	250	500	1000
Nitrógeno (total)	mg/l	20	40	85
Fósforo (total)	mg/l	4	8	15
Cloratos ^a	mg/l	30	50	100
Sulfatos ^a	mg/l	20	30	50
Alcalinidad (como CaCO ₃)	mg/l	50	100	150
Grasa	mg/l	50	100	150
Coliformes totales	no/100ml	10 ⁶ -10 ⁷	10 ⁷ -10 ⁸	10 ⁷ -10 ⁹

^aLas cantidades se aumentan por la cantidad presente en el agua de abasto.

2.3. DISTINTAS POSIBILIDADES DEL REUSO.

En el planteamiento e implementación para el tratamiento y el reuso del agua residual doméstica, las aplicaciones (Tabla 2.3.) regirán la calidad que requiere el agua para ese reuso planeado y el tratamiento necesario para poder obtenerla, mismos que determinan los procesos y operaciones de tratamiento. Porque el reacondicionamiento de agua residual necesita asegurar la prevención de un abasto continuo de agua con una calidad consistente.

La factibilidad que tengan los procesos y operaciones del tratamiento para el reuso, existente o propuesto, deben ser evaluadas en la etapa de planeación.

Las categorías principales de reuso son²:

- 1.- *Riego en Agricultura y en Areas Verdes.*
- 2.- *Recarga de Aguas Subterráneas (Acuíferos).*
- 3.- *Usos Recreativos y de Mejoramiento Ambiental.*
- 4.- *Reuso Potable.*
- 5.- *Aplicaciones Industriales.*

2.3.1. Riego en Agricultura y Areas Verdes.

El reuso en riego de hortalizas es utilizado para alimentar agua fuera de época de lluvias, incrementar el número de cosechas por año y reducir el riesgo de perderlas durante los periodos de sequía y además el riego con agua residual doméstica es, en si, una forma efectiva de tratamiento de agua, lo que se denomina percolación, pero se requiere de un tratamiento de pre-aplicación del agua para proteger la salud pública, prevenir condiciones insalubres durante su almacenaje y aplicación y pervenir daños a hortalizas, suelos y agua subterránea (Tabla 2.3.).

Las ventajas que se derivan del uso de agua residual doméstica tratada para riego, dependen de las condiciones locales, pero se ha visto que éstas ventajas caen en las siguientes categorías²:

- Se asegura el abasto de agua.
- El agua residual tratada tiene cualidades fertilizantes.
- Compatibilidad con políticas y legislaciones de tratamiento de agua residual doméstica.
- Conservación de agua fresca.
- Costo reducido de agua para riego.

2.3.2. Recarga de Agua Subterránea.

La recarga de mantos acuíferos con efluentes de agua residual tratada es un acercamiento al reuso de que propicia un aumento planeado de las reservas del agua subterránea.

La recarga de agua subterránea se ha utilizado para^{2y3}:

- Reducir, detener o aún revertir el descenso de los niveles de agua subterránea.
- Proteger el agua subterránea dulce contra la intrusión de agua salada del océano, en acuíferos cercanos a la costa.
- Almacenar agua residual tratada y agua superficial, incluyendo la de lluvias, inundaciones u otra agua sobrante, para usos futuros.

Para la recarga de agua subterránea, utilizando agua residual tratada, existen tres técnicas, que son: goteo superficial o percolación, que de igual manera que en el punto 2.3.1., sirve como tratamiento de agua residual; inyección directa, para la que se requiere de un alto nivel de calidad para evitar la contaminación de mantos acuíferos; e infiltración a partir de los cauces de ríos y lagos, que es

un método de recarga indirecta, ya que el lugar donde se realiza la extracción se encuentra a una distancia considerable de estos cauces que pueden contener agua residual tratada.

Existen varias ventajas al almacenar agua subterránea^{2ya}:

- El costo de la reserva superficial es menor que el costo de reservas superficiales equivalente.
- El acuífero sirve como un sistema eventual de distribución y puede eliminar la necesidad de tubería y canales superficiales.
- El agua almacenada en depósitos superficiales está expuesta a la evaporación y a problemas potenciales de sabor y olor, causados por crecimientos acuáticos, algas y contaminación.
- Los sitios deseables para reservas superficiales, pueden ser no eficaces y/o ambientalmente aceptables.
- La inclusión de recarga de mantos acuíferos en un proyecto de reuso de agua residual, provee beneficios secundarios: psicológicos y estéticos, como resultado de la transición del concepto de agua residual tratada a agua subterránea.

2.3.3. Reuso Recreativo / Mejoramiento Ambiental.

El agua residual tratada ha sido utilizada para una gran variedad de aplicaciones recreativas y para mejorar lugares que de otra manera serían áridos.

Para muchos casos la motivación principal fué la falta de abasto de agua o la prohibición del uso de agua potable para: el llenado de lagos artificiales, aumentar el cauce de los ríos durante la época de sequía, para proveer de trampas de agua en campos de Golf, etc.

Normalmente el agua residual tratada soporta la mayoría de los usos para recreación.

El agua residual tratada para propósitos recreativos o de mejoramiento ambiental se usa en:

- Lagos recreativos usados para nadar y/o sky acuático.
- Lagos recreativos usados para pesca o navegación.
- Aumentar el flujo de cauces naturales en ríos.
- Mejorar hábitats silvestres o humedecer tierras.
- Fines estéticos, como lagos sin acceso al público en parques, trampas de agua en campos de Golf, fuentes ornamentales, etc.

Los beneficios de las aplicaciones recreativas incluyen:

- Poder disfrutar de complejos recreativos en una misma localidad sin tener la necesidad de viajar.
- Incrementar el valor de las propiedades como resultado de un embellecimiento ambiental.
- Este reuso tiende a complementar los esfuerzos de conservación ambiental.
- Una placentera cualidad estética trae como resultado ganancias económicas secundarias como el incremento en el turismo y de atractivos estatales y para nuevas industrias.

2.3.4. Reuso Potable.

La actitud tomada con referencia al uso de agua residual tratada para agua potable, ha sido cautelosa, porque concierne a la salud y seguridad pública. Aún así, en algunas comunidades ha habido necesidad de desarrollar o implementar planes para el reuso potable, directo* o indirecto**, para suplir el abastecimiento de agua fresca. Además las cantidades involucradas en los proyectos pilotos de reuso potable son pequeñas, los intereses tecnológicos y de salud

pública son grandes, de aquí que una investigación considerable ha sido dirigida hacia el reuso potable del agua⁹, que tiende a obtener la calidad necesaria para su consumo, partiendo de efluentes altamente tratados de las plantas de tratamiento avanzado, donde se le da énfasis a los efectos crónicos en la salud, que pueden ser resultado de la ingestión prolongada de una mezcla de contaminantes orgánicos e inorgánicos que quedan remanentes en el agua, aún después de que ha sido sujeta a los métodos más avanzados de tratamiento.

También dentro de ésta misma política entra el reuso recreativo con contacto directo, tomando como directrices el grado de contacto del ser humano con el agua restaurada.

*El reuso potable directo²: es la incorporación de agua residual tratada al sistema de abasto de agua potable, esto se realiza sin escatimar recursos para el control necesario de ésta fuente de agua.

**El reuso potable indirecto²: es la incorporación del agua residual tratada en el sistema de abasto de agua fresca, el control de la calidad se realiza después de permitir el mezclado y la dispersión de ésta agua en el acuífero, pozo o cauce receptor del agua tratada.

2.3.5. Reuso Industrial.

Uno de los potenciales más grandes para el reuso de agua, es el de complementar o reemplazar la demanda industrial de agua potable o fresca.

Existen dos fuentes potenciales de agua susceptible a ser tratada: una es la industria misma y la otra son las plantas de tratamiento de agua residual doméstica.

Con las nuevas legislaciones para los requerimientos de tratamiento de agua residual industrial, se puede producir agua con la calidad necesaria para permitir el reciclamiento dentro de la misma planta.

La mayoría del reciclamiento de agua dentro de la industria ha sido motivado por la falta de fuentes adecuadas o por los estrictos estándares en cuanto a efluentes industriales se refiere. Los proyectos de reciclamiento en planta son únicos para cada situación particular.

El potencial de reuso con el agua producto de desechos domésticos tratados, se incrementará en el futuro, cuando el abasto de agua potable se vuelva más limitado y su costo más elevado. En conjunción con la mejora de la calidad de los efluentes de las plantas de tratamiento de aguas residual municipales, así como, la implementación de programas de

tratamiento previo a la disposición por parte de las industrias, se reducirán las concentraciones de contaminantes orgánicos e inorgánicos en el agua tratada.

La industria debe contar con una cantidad y calidad determinada de agua para asegurar su producción.

Existe un amplio rango de usos de agua industrial; los usos que demandan más volúmenes de agua son:

- Agua con calidad para sistemas de enfriamiento abiertos recirculatorios.
- Enfriamiento de paso, incluyendo enfriamiento de bombas y compresores.
- Agua para procesos y alimentación de calderas.
- Agua para lavado.
- Usos múltiples como: riego, control de polvos, agua para sistemas contra incendios, etc.

Los tres primeros puntos son de interés particular, ya que requieren de grandes volúmenes de agua, Causa por la cual nos enfocaremos en ésta tesis al primero de los usos.

Tabla 2.3. Categorías de Reuso de Agua Residual y Problemas Potenciales^a.

Reuso de agua residual	Problemas potenciales
Riego en agricultura Hortalizas Cosechas comerciales	Contaminación superficial y de aguas subterráneas. Comercialización y aceptación pública. Salud pública en cuanto a patógenos. El uso de área de control y seguridad incrementa el costo
Riego de áreas verdes Parques Pacios escolares Camellones Campos de Golf Cementerios Acotamientos Residencias	
Reciclamiento y reuso industrial Enfriamiento Alimentación de calderas Agua de proceso Construcción pesada	Incrustaciones, corrosión, ensuciamiento, crecimientos biológicos. Salud pública por transmisión en vapor. Químicos orgánicos y efectos tóxicos. Sólidos totales patógenos y nitratos.
Recarga de aguas subterráneas Reimplementación Control de intrusiones Control subsecuente	
Uso recreacional/ambiental Lagos y estanques Decorativo Aumento de caudales Pesca deportiva Hielo artificial	Salud pública por virus y bacterias. Toxicidad en vida acuática. Eutroficación por N y P.
Usos urbanos no potables Protección contra incendios Aire acondicionado Descarga de inodoros	
Uso potable Mezcla con agua de abasto abasto por pipas	Efectos tóxicos de químicos orgánicos. aceptación pública y apariencia. Salud pública.

● Enlistado en orden descendiente al volumen de uso proyectado.

2.4. CALIDADES DE AGUA REQUERIDAS SEGUN APLICACIONES DE REUSO.

El tratamiento que se requiere para tratar el agua residual, varía con cada aplicación de reuso (Figura 2.4.). En este contexto, el beneficio que se obtiene por el reuso de agua residual doméstica, se observa al hacer notar las ventajas que se tienen al proveer ésta para agua de abasto, en vez de, la necesidad de aplicación de medidas para el control de la contaminación, sin ningún otro aprovechamiento posterior.

- Requerimientos de Calidad para Riego en Agricultura. -

Adicionalmente al control de la contaminación y protección a la salud, los requerimientos de calidad están determinados por una evaluación de los posibles efectos adversos en las hortalizas por constituyentes químicos presentes en el agua residual doméstica. También es importante el considerar problemas potenciales que se puedan presentar en los sistemas de riego, como taponamiento de los ductos, principalmente en los sistemas de riego por goteo.

La guía a seguir en la calidad del agua restaurada está

dada por parámetros físicos, químicos y bacteriológicos, que en cada caso dependen de: clima, suelo, hortaliza y protección de agua subterránea que son específicos para condiciones particulares.

- Requerimientos de Calidad para Recarga de Agua
Subterránea.-

Hay cuatro factores de particular importancia en la calidad de agua al reutilizarla para recarga de acuíferos:

- Patógenos.
- Minerales totales.
- Metales pesados.
- Sustancias orgánicas estables.

Los tratamientos varían considerablemente, dependiendo de la fuente de agua residual doméstica, calidad, lugar y método de recarga. Debido a que el agua subterránea será una fuente eventual de agua potable, la restauración para recarga de mantos acuíferos involucra tratamientos más allá del nivel secundario. El tratamiento avanzado deberá incluir: oxidación química, desinfección, coagulación, filtración, aereación, intercambio iónico, adsorción de contaminantes por carbón

activado, ósmosis inversa y otros procesos de separación mediante membrana.

- Requerimientos de Calidad para el Reuso Industrial.-

Las calidades requeridas son muy variables, dependen del tipo de industria y aún dentro de ésta dependerá del tipo de proceso.

Como punto de partida, el agua residual doméstica necesitará un tratamiento secundario y desinfección. Esta agua puede tener una calidad aceptable para algunos usos industriales, de todas maneras, el pulimiento del efluente, para incrementar su nivel de calidad puede ser necesario, lo anterior lo determinará el reuso que se le de en la industria.

- Requerimientos de Calidad para Reusos Recreativos /
Mejoramiento Ambiental.-

El criterio de calidad que se aplica al agua restaurada que tiene usos recreativos, depende del tipo de uso y del nivel de contacto humano previsto. Así pues, los usos que no permitan contacto público directo y que solo sirvan para

vistas estéticas podrán contar con efluentes secundarios sin desinfección. Usos para pesca o navegación que no contemplen actividades continuas de contacto directo, requerirán un grado mayor de tratamiento y desinfección que aquellos que sirvan solo para vistas estéticas. Agua que se utilice para recreación con contacto directo requerirá el nivel más alto de desinfección, equivalente al que se tenga para uso potable. Una tabla comparativa entre parámetros de calidad potable y de efluentes secundarios se muestra en la tabla 2.4 y esquemáticamente en la figura 2.4

- Requerimientos de Calidad para el Reuso Potable.-

Los contaminantes de interés en el reuso potable, directo o indirecto, son los mismos que se tienen para el tratamiento de agua natural para su consumo: microbiológico, químicos inorgánicos, y químicos orgánicos. El grado de remoción de contaminantes necesario dependerá de: la dilución y dispersión en el caso de reuso indirecto, tiempo de almacenaje, y carga de contaminantes del agua residual doméstica.

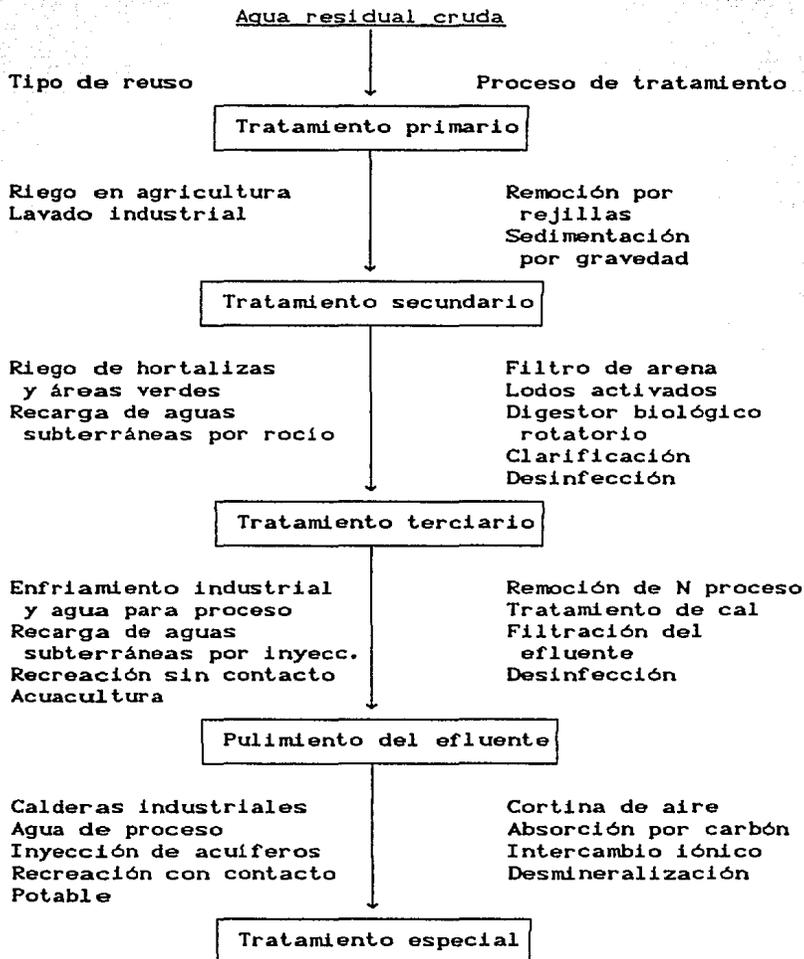
Los microorganismos patógenos están presentes en alta densidad en el agua residual doméstica y su remoción es

básica para aprobar su reuso potable. Los contaminantes inorgánicos (sólidos disueltos) son removidos eficazmente por procesos como: intercambio iónico o procesos de separación de membrana. En cambio, los compuestos orgánicos presentes son incuantificables debido a que su número es muy grande y los productos y subproductos de su descomposición incrementan su cantidad enormemente. El riesgo a la salud por consumir éstas complejas mezclas de compuestos orgánicos se estima al realizar pruebas de efectos en la salud, que se realizan mediante pruebas de toxicidad en animales para determinar el efecto presumible que tendrá en los seres humanos.

Tabla 2.4. Calidad del Efluente Típico de una Planta de Tratamiento Secundario vs. Estándares para Agua Potable².

Parámetro	Calidad de Agua Potable (mg/L)	Efluente de tratamiento secundario (mg/L)
Arsénico	0.05	0.005
Bario	1.0	0.1
Cadmio	0.01	0.001
Cloro	0.05	0.05
Cobre	1.0	0.01
Fierro	0.3	0.2
Fluoruro	4.0	0.7
Plomo	0.05	0.02
Manganeso	0.05	0.05
Mercurio	0.002	0.0002
Nitratos	10.0	1.0
Selenio	0.01	0.001
Plata	0.05	0.005
Zinc	5.0	0.5
Turbiedad	1.0	25.0
Color (unidades)	15.0	60.0
Agentes espumantes	0.5	1.5
Olor (Ton)	3.0	40.0
Coliformes, bacterias (colonias 100mL.)	1.0	1x10 ⁷

Figura 2.4. Potenciales de Reuso Según Nivel de Tratamiento¹.



2.5. REUSO INDUSTRIAL CON ELEVADA DEMANDA DE AGUA.

La cantidad de agua abastecida por agencias gubernamentales, a las industrias, para propósitos de proceso, es muy variable, debido a las condiciones de precio, disponibilidad y tecnología de operaciones.

Las industrias con alto consumo de agua, tales como: generación de energía eléctrica, procesadoras de alimentos, plantas químicas y refinerías, normalmente tienen su propia fuente de suministro que no depende de agencias gubernamentales, debido a que se les concede la explotación de alguna fuente de suministro de agua.

Otras industrias, como las llamadas de "alta tecnología", que tienen requerimientos más modestos, dependen totalmente del abasto gubernamental⁴.

Tres grupos industriales se han definido para estimar el potencial de reuso de agua residual⁵:

- Generación de Energía Mediante Vapor.
- Industrias Manufactureras.
- Industrias Mineras.

2.5.1. Generación de Energía Mediante Vapor.

El agua de enfriamiento para las plantas termoeléctricas, representa un gran necesidad de agua fresca. Con el reciclamiento y el reuso de agua residual se espera que se supla parte significativa del agua utilizada con calidad para enfriamiento. El agua salada de baja calidad es aceptable en plantas costeras, así como el agua sin alto nivel de tratamiento también es aceptada para el enfriamiento de paso.

Pero en los sistemas de enfriamiento abierto recirculatorio, con el pretratamiento adecuado, el agua residual ofrece un gran potencial de reuso para varios ciclos de concentración a través de los condensadores de vapor.

2.5.2. Las Industrias Manufactureras.

Consisten en: metales primarios; químicos y derivados; papel y derivados; petróleo y productos de carbón; comida y enlatados; equipo de transportación; molienda de productos; textiles y otras.

Las tres primeras categorías son las que típicamente requieren mayor cantidad de agua.

El agua utilizada en las industrias manufactureras es para tres propósitos esenciales:

- Enfriamiento
- Alimentación de Calderas
- Proceso.

A cerca del 60% de todos los usos industriales de agua se destina para el enfriamiento, lo que representa el mayor potencial para reuso y reciclamiento de agua residual.

El agua para alimentación de calderas y para proceso, requieren de alta calidad, por lo que el potencial de reuso en estas áreas es limitado, debido que a pesar de que se han establecido los requerimientos de calidad, misma que supera a la calidad del agua potable (Ejs. procesos, transporte de materiales, alimentación para calderas, etc.), el costo del agua residual tratada es muy alto para justificar su uso, ya que se presentan problemas inherentes a la calidad del agua (Tabla 2.5.1.).

2.5.3. Las Industrias Mineras.

Estas incluyen: extracción de metales, combustibles y minerales no ferrosos. En la minería, el agua se utiliza

para: lavado de carbón, de arena y de grava; y en la extracción de hierro y cobre. Los requerimientos de calidad de agua para la aplicación de éstos procesos es mínima, aunque el potencial de éste sector es grande, generalmente la mayoría de los depósitos mineros, se encuentra lejos de fuentes de abasto de agua residual doméstica tratada, por lo que el costo de transportación de ésta resulta prohibitivo.

Tabla 2.5.1. Las Tres Dificultades Mayores Encontradas en la Industria Cuando se Utiliza Agua con Calidad Impropia¹.

Degradación del producto:
<p>Contaminación via actividad biológica.</p> <p>Coloración.</p> <p>Corrosión.</p> <p>Reacción y contaminación química.</p>
Deterioro del equipo:
<p>Corrosión.</p> <p>Erosión.</p> <p>Depósito de incrustaciones.</p>
Reducción de eficiencia o capacidad de equipo:
<p>Turbulencia.</p> <p>Formación de lodos.</p> <p>Depositos de incrustaciones.</p> <p>Espumas.</p> <p>Crecimientos orgánicos.</p>

2.6. TRATAMIENTOS AVANZADOS PARA EL REUSO.

La mayoría de las tecnologías actuales de restauración para agua residual, son esencialmente las mismas que aquellas utilizadas para los tratamientos del agua residual doméstica.

En ciertos casos, procesos adicionales de tratamiento pueden ser requeridos para liberar de contaminantes físicos y químicos selectos, y para propiciar la inactividad y remoción de patógenos biológicos. En la evaluación tecnológica de reacondicionamiento de agua residual, las consideraciones generales son: la factibilidad operacional para cada unidad de proceso, cuyo estudio se debe realizar en la etapa de diseño y el comportamiento global del sistema de tratamiento que provea el agua residual tratada que cumpla con criterios establecidos para ese fin, tomando en cuenta la variabilidad del influente en cuanto a calidad y cantidad.

Tratamientos posteriores pueden ser dados para remover adicionalmente: material suspendido y disuelto, remanentes de efluentes secundarios, éstos procesos y operaciones se conocen como "Tratamiento Terciario o Avanzado". Estos tratamientos adicionales pueden incluir³: precipitación química; remoción de sólidos suspendidos y fósforo; remoción de nitrógeno (por varios métodos); tratamientos de carbón

activado, para remover material orgánico disuelto; y remoción de materia inorgánica por métodos físico/químicos. La clarificación química y adición de cloro, ozono o permanganato de potasio, han removido efectivamente algunos microorganismos del agua y se ha reportado que reducen la cantidad de virus hasta en cinco órdenes de magnitud.

A continuación se consideran algunos conceptos y tecnologías de tratamiento, que son de importancia especial para el reuso de agua residual tratada.

2.6.1. Eficiencia del Proceso de Tratamiento.

La eficiencia una planta de tratamiento de agua residual doméstica, puede estar basada en términos de su capacidad para producir efluentes restaurados, con una consistencia aceptable. Existen dos causas que pueden afectar el desempeño y calidad de una planta para la restauración de influentes:

- 1) Fallas mecánicas, deficiencias de diseño, u operación inadecuada.
- 2) Variabilidad del influente de agua residual, aún cuando la planta de restauración de agua esté diseñada, operada y mantenida propiamente.

Con respecto a la primera causa, las fallas de operación y mantenimiento, son los problemas más frecuentes que ocasionan un pobre desempeño de la planta de tratamiento de agua residual doméstica.

Para la segunda categoría de problemas, la evaluación de como varía la calidad del influente, así como la correspondiente eficiencia operacional de la planta, son de particular importancia en el diseño de los sistemas de reacondicionamiento de agua residual.

La variabilidad de la calidad del agua residual tratada, debe tomarse como un indicador de problemas inherentes de tratamiento en planta o un problema causado por variantes diurnas o temporales, en flujo y características del agua residual de entrada. Un análisis estadístico debe ser llevado para evaluar la irregularidad del desempeño de la planta de tratamiento, así como también una práctica de control, de cada proceso integrado a la planta.

2.6.2. Remoción de Sólidos Suspendidos Totales.

El camino reciente que ha tomado el uso de agua residual doméstica tratada, en ambientes urbanos, ha tenido como resultado, que un mayor número de personas entren en contacto

directo con éste tipo de agua.

Por lo que existe preocupación al aplicar tales reusos de agua residual doméstica, ya que existen riesgos de salud: por patógenos y orgánicos, y por su apariencia estética, en relación con la aceptación pública.

Para ejecutar una inactividad y remoción eficiente de patógenos bacteriales y virales, dos criterios fundamentales de operación, deben buscarse^a:

- 1) El efluente debe ser bajo en: sólidos suspendidos y turbiedad, antes de la desinfección, para así reducir el resguardo de patógenos y también aminorar la demanda de cloro.
- 2) Una dosis y tiempo de contacto suficiente de desinfectante, debe de ser proporcionada para la restauración segura de agua residual.

Para satisfacer el primer criterio, es frecuente instalar, una filtración granular media terciaria, para :

- 1° Remover sólidos suspendidos en el efluente secundario, que pueden interferir con la desinfección subsecuente.

- 2° Reducir la concentración de materia orgánica que pueda reaccionar con el desinfectante.
- 3° Mejorar la calidad estética del agua residual al reducir su turbiedad.

En el tratamiento del agua, la filtración se usa como un proceso anterior a la desinfección y como un paso intermedio de tratamiento avanzado.

2.6.3. Combinación de Procesos para la Restauración Avanzada de Agua Residual.

En la creciente atención que se le ha dado a la calidad del agua potable, se ha encontrado que existen tres clases de contaminantes que son de interés especial: virus, contaminantes orgánicos (incluyendo pesticidas) y metales pesados.

La interacción de éstos contaminantes con respecto a efectos en la salud, aún no es comprensible totalmente, en consecuencia, las agencias reguladoras están procediendo con cautela al permitir aplicaciones de reuso que puedan afectar el abasto de agua potable.

Combinando varias unidades de procesos y operaciones, y utilizando experiencias obtenidas con plantas de tratamiento avanzado de agua residual, es posible obtener agua de alta calidad para cualquier aplicación de reuso en la tabla 2.6. se presentan distintos niveles de tratamiento, así como, los valores típicos de calidad de éstos procesos. De cualquier modo, la factibilidad de tales programas de reuso, dependerán de la aceptación pública y de su costo.

Tabla 2.6. Valores Típicos de Calidad Según el Nivel de Tratamiento¹.

Nivel de tratamiento	DBO mg/L	DQO mg/L	SS mg/L	TU	P mg/L	N mg/L	Color †	Coli- ‡
Agua cruda	300	500	250	---	12	25	---	10 ⁸
Primario(1)	200	250	100	---	9	25	--	10 ⁷
Secundario(2)	30	60	30	---	6	25 ^a	---	10 ⁶ ^b
1+2+Filtración(3)	5	40	10	5	6	25	30	<2.2 ^c
1+2+coagulación-sedimentación(4)+3	2	30	<1	<1	<1	25	30	<2.2
1+2+4+Carbón Activado(5)+3	<1	10	<1	<1	<1	25	10	<2.2

^aNitógeno se reduce por nitrificación.

^bReducción por desinfección.

^cDepende del nivel de desinfección y del modo de operación.

BOD Demanda bioquímica de oxígeno.

DQO Demanda química de oxígeno.

SS Sólidos suspendidos.

TU Turbiedad.

P Fósforo.

N Nitrógeno (amonía).

Coli- Coliformes totales.

† Unidades de color.

‡ NMP/100mL.

2.7. POLITICA Y COSTOS DEL REUSO. ^(2y3)

Los objetivos y las bases de diseño para llevar a cabo el planteamiento del tratamiento y reuso del agua residual, deben estar bien definidos. El proyecto óptimo es ejecutado mejor al integrar el tratamiento del agua y las necesidades de abasto, en un solo plán.

Este acercamiento integrado que se realiza al proponer un tren de tratamiento específico, para uno o varios tipos de reuso posible, es de alguna manera, diferente del planteamiento de tratamiento de agua residual doméstica convencional, en cuyo caso, el planteamiento solo se realiza por conducción, tratamiento y disposición del agua residual doméstica.

El plán deseable de tratamiento y reuso de agua residual doméstica debe incluir el siguiente análisis:

- 1.- Volúmen de agua residual doméstica tratada y sus necesidades de disposición.
- 2.- Volúmen de agua tratada y demanda a proveer.
- 3.- Volúmen provisto, basado en el potencial de reuso.
- 4.- Análisis del mercado para agua residual doméstica tratada.

5.- Análisis general y económico de alternativas de abasto de agua.

6.- Plán de implementación para el uso de agua residual doméstica tratada con su análisis financiero.

2.7.1. *Objetivos del Proyecto.*

El tratamiento y reuso de agua residual doméstica debe cumplir con dos funciones: control de contaminación y abasto de agua.

En la última década, en los procesos del planteamiento del proyecto, se ha incrementado la atención dada a los beneficios de abasto de agua, con agua residual doméstica tratada. Debido al gran potencial de abasto de agua, con éste tipo de efluentes, es que se han construido más instalaciones para incrementar el desarrollo de ésta alternativa. Por ejemplo: el reuso de agua residual doméstica óptimo, sería más costeable, si una planta satélite de tratamiento de agua residual doméstica, se hubiese construido con el fin del reuso en mente, en vez de una gran planta regional de tratamiento y distribuir ésta a sus usuarios a través de grandes distancias.

2.7.2. Estudio de Mercado.

En el diseño de un proyecto de tratamiento de agua residual para reuso, es esencial encontrar clientes potenciales que quieran y sean capaces de utilizar agua residual tratada. El éxito de un proyecto de reuso de agua residual doméstica, depende en gran medida, de la seguridad del mercado para el reuso de ésta.

El estudio de mercado consiste en:

- Determinar un respaldo de información, que incluya los usos potenciales del agua residual restaurada.
- Una inspección de los usuarios potenciales de agua residual tratada y sus necesidades.

La información de respaldo e inspección, necesaria para un estudio de mercado de reuso de agua residual tratada, se lista en la tabla 2.7.1. El resultado de éste estudio, forma la base de las alternativas a desarrollar y determina la factibilidad financiera de un proyecto.

2.7.3. Reporte del Diseño.

Los resultados del planteamiento completo, deben estar documentados en el reporte de diseño de tratamiento y reuso de agua residual doméstica. Un bosquejo se muestra en la tabla 2.7.2.; que también sirve como lista para checar las consideraciones del diseño. Todos los puntos de la tabla se han encontrado que afectan los proyectos de tratamiento y reuso de agua residual doméstica de una u otra forma. De este modo, no todos los puntos listados merecen un análisis profundo, pero deben ser al menos considerados. No obstante al énfasis en el abasto de agua fresca o agua residual, los aspectos variarán, dependiendo si se trata de un proyecto de simple o de múltiple propósito. La naturaleza de la restauración y reuso de agua residual doméstica, es tal, que ambos aspectos deben de ser considerados.

*Tabla 2.7.1. Estudio del Mercado del Agua Residual,
Restaurada (Fuente e información de respaldo)^a*

- 1.- Inventario de usuarios y usos potenciales del agua residual restaurada.
- 2.- Conocer los requerimientos relacionados con la salud pública acorde a la calidad de agua y sus aplicaciones (por ejemplo: Uso de áreas de control) para cada tipo de aplicación del agua residual restaurada.
- 3.- Determinar los requerimientos de las normas existentes para prevenir enfermedades y problemas con la calidad del agua, así como, restricciones para proteger el agua del subsuelo.
- 4.- Desarrollar las proyecciones a futuro de la calidad de agua que se podrá obtener con varios niveles de tratamiento y compararlos con las normas y necesidades del usuario.
- 5.- Realizar un estimado de costos futuros de agua fresca del usuario potencial del agua residual tratada.
- 6.- Fuentes de usuarios de agua residual tratada, conteniendo la siguiente información:
 - a) Usos potenciales específicos de agua residual tratada.

- b) Cantidades necesarias presentes y futuras.
- c) Necesidades periódicas y rentabilidad.
- d) Calidad de agua requerida.
- e) Modificaciones en planta para obtener agua residual tratada y encontrar requerimientos normativos para proteger la salud pública y prevenir problemas de contaminación por el uso de la misma.
- f) Inversiones de capital del usuario para realizar modificaciones en planta, cambio de costos operacionales, tasa de retorno, periodo de pagos y ahorros en el costo del agua.
- g) Planes de cambios futuros en la planta.

7.- Informar a los usuarios potenciales de la aplicación de normas restrictivas, calidad disponible con distintos niveles de tratamiento, rentabilidad, costos futuros y calidad comparada entre el agua tratada y el agua fresca.

8.- Conocer el deseo de usuarios potenciales para usar agua residual tratada ahora y en el futuro.

Tabla 2.7.2. Planteamiento del Proyecto de Restauración y Reuso de Agua Residual^{2y8}.

- 1.- Estudio de las características del agua: Geografía, geología, clima, mantos del agua del subsuelo, agua superficial, usos de tierra y crecimiento de la población.
- 2.- Características y facilidades de abasto de agua: Agencias jurisdiccionales, fuentes y calidades de abasto, descripción de las aplicaciones mayores, tipo de uso, necesidades futuras, mantenimiento y problemas de agua subterránea, costos presentes y futuros de agua fresca, subsidios y costos de los clientes.
- 3.- Características y facilidades del agua residual: Agencias jurisdiccionales, descripción de las mayores aplicaciones, continuidad y calidad del efluente tratado, variaciones de la calidad del influente según estación y hora, necesidades futuras, necesidades y descripción de los constituyentes que afectan el reuso (usuarios, cantidades, acuerdos contractuales y costos).
- 4.- Requerimientos de tratamiento para la descarga, el reuso y otras restricciones, requerimientos relacionados con

la salud y la calidad del agua, requerimientos específicos de calidad de agua del usuario y controles del área de uso.

5.- Clientes potenciales del agua de reuso: Análisis y descripción de los procedimientos del mercado, inventario del potencial de los usuarios del agua residual tratada y resultados obtenidos por el mismo.

6.- Análisis alternativo del proyecto: Costos de capital, operación y mantenimiento, factibilidad de ingeniería, análisis: económico, financiero y energético, impacto de la calidad del agua, aceptación pública y del mercado, derechos del agua, impactos sociales y ambientales y comparación de alternativas de selección:

- a) Alternativas de tratamiento.
- b) Mercados alternativos basados en diferentes niveles de tratamiento y áreas de servicio.
- c) Rutas alternas de tubería.
- d) Lugares alternativos de depósito del agua tratada.
- e) Alternativas de agua fresca.
- f) Controles alternativos de agua contaminada.
- g) Proyecto sin alternativa.

7.- Plan recomendado: Descripción de las facilidades propuestas, criterios de diseño preliminar, costos

proyectados, listado de usuarios potenciales, demanda en relación al abasto de la calidad y variación del agua tratada, necesidades de abasto de agua complementaria o de respaldo, plan de implementación y operacional.

8.- Plan de funcionamiento, de construcción y programa revisado: Recursos y tiempo de los fundamentos del diseño y construcción, póliza cuantificable del agua tratada, diferencia de costos entre los beneficios del abasto de agua y propósitos de control de contaminación, proyección a futuro del uso de agua tratada, precios del agua fresca, costos del proyecto de restauración, costo y precio de las unidades revisión total, subsidios, costos: caídos, incalculables y análisis de la sencibilidad de condiciones cambiantes.

2.8. EL REUSO INDUSTRIAL EN MEXICO.

2.8.1. Los Antecedentes del Reuso en México⁽⁵⁾.

Desde hace varias décadas se ha reconocido la conveniencia de evitar el empleo de agua potable en usos que no requerían de esa calidad. En 1956 se inició la operación de la primera planta de tratamiento de agua residual domésticalocalizada en el Bosque de Chapultepec; el agua se destinaba al riego de áreas verdes y al llenado de lagos recreativos. En 1987 se contaba ya con siete plantas, con una capacidad instalada de $4.3 \text{ m}^3/\text{s}$. sin embargo, no existía un mantenimiento adecuado de éstas, ni se había contemplado la red de distribución para utilizar agua renovada. Por estas razones y además porque la demanda de riego y llenado de lagos fluctúa a lo largo del año, la capacidad aprovechable era de sólo $1.3 \text{ m}^3/\text{s}$.

Actualmente existen 13 plantas de tratamiento (Tabla 2.8.), de las cuales 2 están concesionadas a industrias de Iztacalco y de Vallejo. Existiendo además plantas particulares que emplean agua residual doméstica en procesos de enfriamiento (Comisión Federal de Electricidad y Pemex) en Ecatepec y San Juan Ixhuatepec en el Estado de México⁶.

De las 13 plantas, el caudal medio producido en 1990 fué de 2 m³/s, sin embargo, en muchos casos se omiten las características físicas, químicas y biológicas del agua residual doméstica que es conducida por el sistema de drenaje.

Inicialmente la red de distribución de agua residual tratada contaba con 130 km, posteriormente se incrementaron 500 km más, y ahora es posible aprovechar hasta el 59% de la capacidad instalada, o sea un caudal de 2.5 m³/s (5,10 y 11). La mayor parte se entrega a los usuarios con la red de distribución, pero también se han instalado las llamadas "Garzas", es decir, tanques estacionarios que alimentan a las pipas que efectúan el riego de camellones y parques públicos, ubicados en las zonas en donde no existe o no es costeable regar con tubería.

2.8.2. El Agua Residual en el Distrito Federal^(5y6).

El drenaje del D.F. conduce generalmente una mezcla de agua de lluvia, agua residual doméstica e industrial. No fué sino hasta el año de 1980 en que 15 puntos de la red de colección, empezaron a ser monitoreados en forma sistemática y de acuerdo al comportamiento de 152 parámetros que definen

la calidad física, química y biológica de esta mezcla de agua, con el fin de determinar el tratamiento que deben recibir, en diversas zonas de la ciudad, para que una vez renovadas puedan emplearse en diferentes usos.

Actualmente se generan 40 m³/s de agua residual, de éstos sólo 2 m³/s se tratan o se reusan para el riego de parques, llenado de lagos y usos industriales. El agua residual que se desaloja de las áreas urbanas representan un caudal prácticamente constante a lo largo del año.

2.8.3. Los Reglamentos Referentes al Reuso en el Distrito Federal ^[7].

El "Reglamento del Servicio de Agua y Drenaje para el Distrito Federal" (su extracto se muestra en el Apéndice 1.) es el primer reglamento de éste tipo con el que se cuenta en la Ciudad de México, anteriormente no se contaba con alguna reglamentación relacionada con el uso, consumo y disposición de agua. Actualmente se encuentran en elaboración el "Reglamento de Agua Renovada" y el "Reglamento para uso del Drenaje", que junto con el "Reglamento para a Prevención y Control de la Contaminación" darán el conjunto de normas que regirán el reuso de agua futuro en el Distrito Federal y en

todo el país (la mejor interrelación de éstos reglamentos se observa mejor en el cuadro 3.6.).

2.8.4. Reuso Industrial Proyectado en México^(5y11).

Es necesario construir redes dobles de distribución, ya que el usuario tendría contacto directo con ésta agua, la cual se usaría en servicios como los sanitarios, el lavado de calles y vehículos. En vista de que se requiere un tratamiento avanzado, la calidad de esta agua renovada la hace apta para emplearse en procesos industriales. Se ha estimado un potencial, para todos los usos anteriores, de $10.5 \text{ m}^3/\text{s}$.

Actualmente, el Departamento del Distrito Federal cuenta con diez plantas de tratamiento de tipo secundario, en las cuales se emplea el proceso biológico de lodos activados y gas cloro para su desinfección, así como con tres plantas de tratamiento terciario.

La infraestructura del sistema se complementa con 17 tanques de almacenamiento, con una capacidad conjunta de $41,600 \text{ m}^3$, 13 plantas de bombeo, con capacidad conjunta de $2,650 \text{ l/s}$. y 739 km. de tubería que conducen el agua residual tratada hacia los sitios de consumo.

El 83% del caudal de destina al riego de áreas verdes y llenado de lagos recreativos, el 10% se utiliza en el sector industrial, el 5% para riego agrícola y el restante 2% en el sector comercial, básicamente en los sitios donde se lavan vehículos automotores, en talleres y con distribuidores de automóviles.

Las acciones de concertación con los usuarios potenciales de este recurso, ha permitido establecer más de 940 convenios para el uso de agua residual tratada, con lo que se ha logrado utilizar en promedio 2,400 l/s durante 1991, es decir, el doble de lo que se empleó en 1988 y un 25% más de lo que se utilizó en 1990. Dentro de éstos convenios conviene señalar por su importancia, la concesión de la operación, mantenimiento y comercialización del agua producida, en las plantas de tratamiento del Acueducto de Guadalupe y Ciudad Deportiva, a los industriales de Vallejo e Iztacalco, respectivamente; además, se analiza la factibilidad de concesionar otras dos unidades, y para lograr un uso mayor del agua residual tratada, se han incorporado etapas de tratamiento avanzado en tres plantas.

Como parte del desarrollo de la tecnología en la ciudad y con el fin de estudiar procesos de tratamiento avanzado de agua residual, se cuenta con una planta piloto de 0.5 l/s.,

en donde se han definido los parámetros de diseño y los procesos más adecuados de tratamiento.

En lo que se refiere al aspecto financiero y comercial, se llegará al cobro del costo real del agua suministrada, mediante tarifas diferenciales que permitan alcanzar la autosuficiencia y motivar el empleo eficiente del agua potable y un mayor uso del agua residual tratada.

Tabla 2.8. Plantas de Tratamiento de Agua Residual en la Ciudad de México⁽⁵⁾.

Nombre	Capacidades		Motivo de Construcción	Inicio de Operación
	Diseño	Producc.		
	L/s	L/s		
Chapultepec	160	120	Mantener el nivel del lago del Bosque de Chapultepec y riego de áreas verdes.	1956
Coyoacán	1,200	211	Mantener el nivel de los canales de Xochimilco.	1959
Cd. Deportiva	230	165	Riego de áreas verdes en Cd. Dep.	1960
San J. Aragón	500	215	Mantener el nivel del lago de Aragón y riego de áreas verdes.	1963
Tlaltelolco	22	18	Tratar el agua residual del conj. y usarla para riego de áreas verdes.	1965
Iztacalco	15	---	Riego de áreas verdes de la U. Infonavit Izta-calco.	1971
Cerro de la Estrella	2,000	1,400	Tratar agua residual y cambiarla para riego agrícola en el Edo. de Mex.	1971
Bosque de las Lomas	55	30	Tratar agua residual de la zona hab. y usarla para riego local.	1973

Tabla 2.8. (cont.)

Acueducto de Guadalupe	80	60	Tratar agua residual y usarla para riego local.	1979
Azcapotzalco	25	25	Llenado del lago y riego.	1979
H. Colegio Militar	20	20	Saneamiento de la zona lacustre de Xochimilco y riego.	1980
Reclusorio Sur	20	20	Saneamiento de la zona lacustre de Xochimilco y riego.	1981
San Luis Tlaxiálmalco	75	60	Mant. el nivel de los caudales de la zona chinampera e iniciar la recarga artificial del acuífero	1989

C A P I T U L O 3

EL REUSO DE AGUA RESIDUAL DOMESTICA EN SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO

3.1. MARCO GENERAL: TERMOELECTRICAS.

La generación de potencia, da una gran variedad de servicios, tales como: energía mecánica y eléctrica; calor o vapor para procesos; agua potable para servicios y para procesos; refrigeración; compresión de aire y gases; ventilación, calefacción y aire acondicionado; etc.⁴ y de todas las fuentes de energía, la más utilizada es a partir de combustibles de origen fósil para la generación de vapor, y éste a su vez utilizarlo, ya sea, para generar energía eléctrica, por medio de una turbina de vapor o para vapor de proceso en una industria, o ambas, lo que ahora se denomina cogeneración, la cual está recibiendo un gran impulso y desarrollo.

Estos sistemas generalmente funcionan con ciclos cerrados y para el caso de las termoeléctricas, obtención de energía eléctrica por la expansión del vapor en una turbina acoplada a un generador eléctrico, una vez expandido el vapor es necesario condensarlo, para así cerrar el ciclo termodinámico, esta condensación se logra por medio de los sistemas de enfriamiento.

3.1.1. *Sistemas de Enfriamiento que Utilizan Agua para este Servicio.*

Dentro de estos, en los que se utiliza agua para el servicio de enfriamiento, se requiere que el agua no produzca obstrucciones o taponamiento, por lo que es necesario reducir al mínimo la cantidad de sólidos suspendidos; disminuir las características corrosivas, por lo que se agregan inhibidores de la corrosión para controlar la dureza del agua y para evitar las incrustaciones en las camisas de enfriamiento del equipo, lo cual se logra con el ablandamiento del agua; también es necesario controlar el crecimiento de microorganismos, que se logra al agregar algicidas y biocidas⁴.

- Enfriamiento de Paso.- Los sistemas de enfriamiento que utilizan el agua una sola vez antes de descargarla directamente como desecho, son los que se identifican como sistemas de enfriamiento de paso. Aún los sistemas de éste tipo que son de dimensiones pequeñas utilizan grandes cantidades de agua para desempeñar su función. Estos sistemas se utilizan generalmente solo donde el agua con una temperatura sensiblemente baja es disponible en grandes

volúmenes y a bajo costo.

Las fuentes de abasto comunes para éstos sistemas, son: pozos, ríos y lagos, donde el único costo involucrado es el de bombeo. Generalmente, el único tratamiento externo aplicado para las aguas obtenidas de ríos y lagos, es una filtración gruesa, para remover objetos grandes que puedan dañar a los equipos de bombeo y/o el equipo del intercambiador de calor. Debido a que la evaporación existente en estos sistemas es despreciable, el contenido mineral en el agua del influente y del efluente es virtualmente el mismo¹².

- Sistemas Recirculatorios Cerrados. - Estos sistemas representan una evolución tecnológica en la cual el agua circula dentro de un ciclo cerrado y se sujeta a enfriamiento y calentamiento sin tener contacto con el aire. El calor absorbido por el agua en el ciclo cerrado, normalmente es transferido a un intercambiador de calor agua-agua a un sistema abierto recirculatorio, en el cual el calor puede ser cedido a la atmósfera.

Los sistemas recirculatorios cerrados son aplicados a máquinas de enfriamiento de gas y compresores. Las máquinas diesel en servicio estacionario o de locomoción, normalmente usan un sistema con radiador similar al sistema de

enfriamiento utilizado por los automóviles, también estos sistemas son muy utilizados para el acondicionamiento de aire, transferir el refrigerante de enfriamiento a las unidades de lavado de aire. Estos sistemas presentan muchas ventajas al tener un mayor control de temperaturas y sus bajos requerimientos de agua de alimentación, con lo que se simplifica el control de los problemas ocasionados por las impurezas en el agua. Se minimizan los problemas de incrustaciones, son menos susceptibles a problemas de ensuciamiento y crecimientos biológicos y se reducen los problemas de corrosión, debido a que el agua en recirculación no se encuentra saturada de oxígeno¹².

- Sistemas Recirculatorios Abiertos. - El creciente interés en la conservación del agua ha puesto nuevas demandas en los programas de reuso del agua. La industria está tendiendo a usar sistemas de enfriamiento con recirculación, donde el agua de enfriamiento puede ser utilizada una y otra vez. Un sistema recirculatorio abierto con una torre de enfriamiento o un estanque de rocío o un condensador evaporativo para disipar el calor, permite un reuso intensivo de agua y reduce la necesidad de cantidad de agua de alimentación.

Pero en un sistema como éste se intensifica el potencial de incrustaciones, ensuciamiento y corrosión de los ductos¹².

Debido a las razones antes mencionadas es que se toma el caso de los Sistemas Recirculatorios Abiertos para continuar con su estudio en ésta Tesis. Además se considera el caso de las Torres de Enfriamiento porque también se presenta deterioro en la madera con la que éstas están construidas, ésto debido a la calidad del agua en recirculación.

3.1.2. Torres de Enfriamiento⁴.

En las torres de enfriamiento, prevalece el sistema en que se disipa el calor por medio de la evaporación de parte del agua que se rocía sobre aire que circula dentro de la torre. Este sistema se usa ampliamente en los lugares en los que la disponibilidad del agua es limitada, en donde la contaminación de las reservas de agua por temperatura está prohibida, en donde se debe efectuar la correcta conservación del agua o en donde deben evitarse otras fuentes de contaminación.

3.1.3. Generación de Energía Mecánica a partir de Vapor (Ciclo Rankine)⁴.

El ciclo Rankine, es el empleado generalmente por los

ingenieros, como un estándar de referencia para comparar los rendimientos de las máquinas y de las turbinas de vapor reales. En la Figura 3.1.1. se ilustra éste ciclo sobre los planos S-T (entropía en las abscisas y temperatura en las ordenadas)

El ciclo Rankine básicamente cuenta con cuatro elementos:

- Caldera.
- Turbina de Vapor.
- Condensador.
- Bomba.

La caldera es el dispositivo por medio del cual el agua se convierte en vapor , de aquí sale vapor a presión.

En la turbina ése vapor a presión se expande, produciendo energía mecánica, por lo que pierde presión; de esta manera, sale vapor a baja presión.

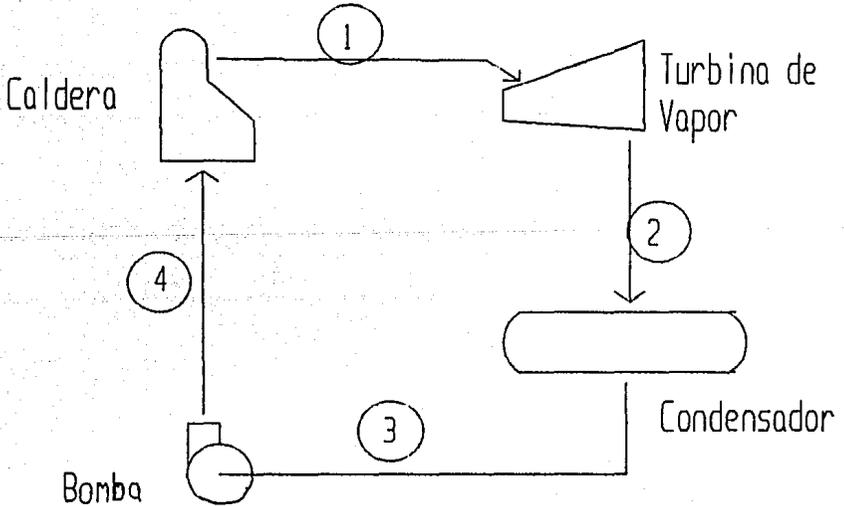
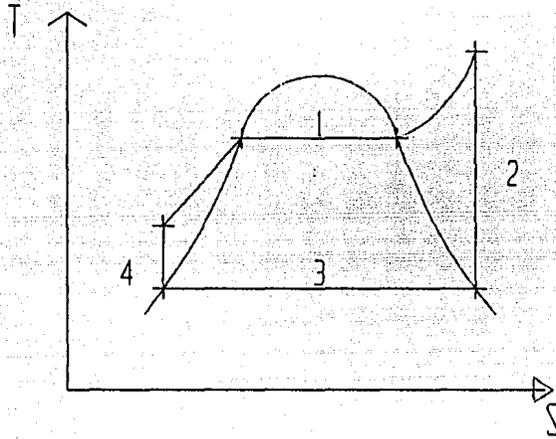
El condensador se encarga de convertir ese vapor remanente en líquido.

La bomba incrementa la presión del líquido para ser introducido nuevamente a la caldera y generar vapor a presión.

El uso de grandes volúmenes de agua se da entonces en el agua de alimentación para la caldera, agua de enfriamiento y

agua para servicios diversos, incluyendo agua contra incendios, siendo los volúmenes más grandes en el agua de alimentación para calderas (también la más alta calidad de agua requerida) y agua para sistemas de enfriamiento.

FIGURA 3.1. ILUSTRACION SOBRE EL PLANO T-S Y DIAGRAMA DEL CICLO RANKINE



3.2. DEMANDA DE AGUA PARA SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.

El principio básico de la operación de una torre de enfriamiento, es: la condensación evaporativa y el intercambio de calor sensible. La mezcla de agua caliente y aire, libera calor latente de evaporación. El agua expuesta a la atmósfera se evapora y se convierte en vapor, por lo que el calor es consumido⁹.

3.2.1. Funcionamiento de una Torre de Enfriamiento.

La función de las torres de enfriamiento es la de disipar a la atmósfera, el calor contenido en el agua que se encuentra en circulación, el calor es extraído por:

- Evaporación
- Convección

La convección se dá del contacto directo entre el agua tibia, que cae a través de la irrigación interior de la torre y el aire frío que entra por la base.

El principio general es el de distribuir el agua tibia que viene de los condensadores y transformarla en una brisa fina, la cual al caer por una serie de traves y tablonés se enfria al entrar en contacto con el aire ascendente. El

movimiento ascendente del aire, se logra por el incremento de su temperatura y la producción de un fino vapor de agua, los cuales son más ligeros que el aire seco. Parte del interior de la torre está cubierta con travesaños (persianas) de madera los cuales distribuyen el agua que ha de ser enfriada. El fondo de la torre está abierto a la atmósfera y un tanque receptor está localizado exactamente debajo, donde cae, en forma de una pequeña lluvia, el agua que se está enfriando y recirculando. El agua en recirculación es bombeada sobre una altura de 10 a 15m. sobre el tanque receptor, donde se distribuye a través de espreas y por los travesaños.

El proceso de enfriamiento es muy complejo y la capacidad correcta de la torre de enfriamiento, para unas condiciones dadas, no es fácilmente determinable debido a una gran variedad de factores a considerar, los cuales varían según la localización geográfica y las condiciones climáticas. Cuando se diseña una instalación de torres de enfriamiento, es esencial que el diseño del condensador y la torre de enfriamiento se realicen conjuntamente¹⁴.

El propósito de la torre de enfriamiento es el de extraer del agua en circulación una cantidad de calor equivalente a la que se obtiene del proceso de condensación,

las temperaturas del agua en circulación a la entrada y la salida son variables y se autoajustarán a las condiciones de la turbina, atmósfera, etc.

La eficiencia relativa de la torre de enfriamiento se traduce en el aumento y disminución de las temperaturas en sí. La eficiencia de una torre de enfriamiento puede ser expresada convenientemente como¹⁴:

$$\eta = \frac{T_i - T_o}{T_i - T_{b_s}} \times 100$$

Donde:

η .#. eficiencia

T_o .#. Temp. salida

T_i .#. Temp. entrada

T_{b_s} .#. Temp. bolbo seco

La cantidad de agua evaporada por la torre, dependerá de la cantidad de calor rechazado por el agua de enfriamiento, o en otras palabras, a la cantidad de vapor pasado por el condensador. El agua evaporada normalmente está entre el 90 y 95% del vapor condensado. La cantidad de agua evaporada en la torre es aproximadamente 1.89 a 2.26 L/Unidad generada. En su paso por la torre el aire toma humedad y por consiguiente también hay una remoción del agua circulante.

La nube de vapor que es visible en la parte alta de cualquier torre, es evidencia de la pérdida de agua del

sistema. La pérdida, es vapor - agua destilada y pura - mientras que el agua de abasto y reposición contiene sólidos disueltos. Esta continua evaporación es causa de un incremento gradual de sólidos disueltos, que hace necesario que el sistema de enfriamiento con agua, sea desconcentrado a intervalos regulares, para mayores detalles ver el apéndice 2 definición de "Purga". Si dicho procedimiento no se lleva a cabo, el agua de enfriamiento estaría saturada con carbonatos de calcio y por consiguiente se depositarían incrustaciones.

Para mantener el nivel de dureza del agua circulante en los límites prescritos, es necesario purgar el sistema. Cuando el agua de reposición es limitada, el uso de procesos de ablandamiento del agua son útiles¹⁴.

Bajo condiciones normales de operación, el agua que se pierde de la torre de enfriamiento hacia la atmósfera, en forma de una nube de vapor, es de aproximadamente 1.0% del agua en circulación por cada 10°C de diferencia en el rango de enfriamiento; el arrastre o el agua perdida en la parte alta de la torre por las corrientes de aire generadas, es el segundo mecanismo por el que se pierde agua del sistema de enfriamiento, de ésta manera se pierde el 0.05% del agua de recirculación⁹.

3.2.2. Dedución de los Ciclos de Concentración³.

(fig 3.2.)

El balance de agua en la torre de enfriamiento es:

$$Q_m = Q_b + Q_d + Q_e$$

Donde:

$Q_m \equiv$ agua con calidad para torre de enfriamiento (agua tipo) [l/min]

$Q_b \equiv$ purga [l/min]

$Q_d \equiv$ arrastre de agua [l/min]

$Q_e \equiv$ perdida por evaporación [l/min]

Q_d es lo suficientemente pequeña por lo que puede ser ignorada (0.05%).

De manera similar, el balance de sales en la torre es:

$$Q_m C_m = Q_b C_b + Q_d C_d + Q_e C_e$$

Donde:

$C_m \equiv$ concentración de sal en el agua tipo [mg/l]

$C_b \equiv$ concent.de sal en la purga [mg/l]

$C_d \equiv$ concent.de sal en el arrastre [mg/l]

$C_e \equiv$ concent.de sal en la evap. [mg/l]

Ya que Q_d es despreciable, el término $Q_d C_d$ puede ser omitido sin gran error; la concentración de sal en el agua evaporada también es despreciable, por lo que la expresión puede ser reducida con muy buena aproximación a:

$$Q_m C_m \cong Q_b C_b$$

La magnitud de la purga (y por lo tanto el flujo de agua tipo de repuesto), depende de la concentración de los precipitados potenciales en el agua de recirculación.

La razón de concentración de las sales en la purga " C_b " a su concentración en el agua tipo " C_m " es conocida como "ciclos de concentración".

$$\therefore \text{Ciclos de Concentración} = C_b/C_m = Q_m/Q_b$$

Por lo que se puede apreciar en la última expresión que los ciclos de concentración son iguales a la razón de el flujo de agua de alimentación (tipo) entre el agua perdida en la purga.

A continuación para apreciar la magnitud del consumo de agua en un sistema de enfriamiento, se toma el caso de una

torre con una capacidad de $6,253.5 \text{ m}^3/\text{h}$.¹⁴, que viene siendo la que se requiere para una planta que genera 3MW.

Capacidad de la torre: $1'650,000 \text{ gph.} = 6,253.5 \text{ m}^3/\text{h}$.

Pérdida por evaporación: 0.89 - 0.95% de la capacidad normal

$\Rightarrow 55.656 - 59.4 \text{ m}^3/\text{h}$.

Pérdida por arrastre: 0.01 - 0.05% de la capacidad normal

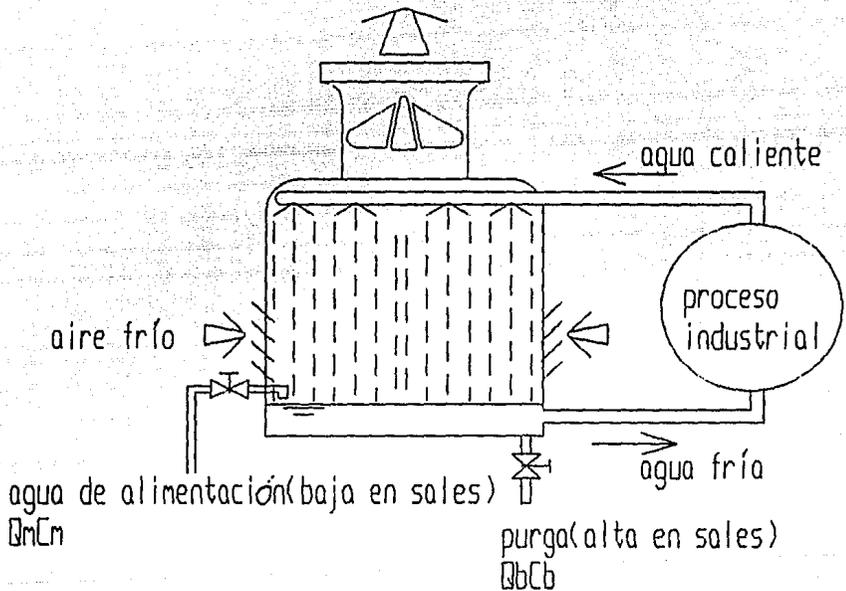
$\Rightarrow 0.625 - 3.126 \text{ m}^3/\text{h}$.

\therefore Agua requerida para reposición: 0.9 - 1.0% de la capacidad

normal $\Rightarrow 56.28 - 62.535 \text{ m}^3/\text{h}$.

FIGURA 3.2. BALANCE ESQUEMATICO DE SALES EN UNA TORRE DE ENFRIAMIENTO ABIERTA CON RECIRCULACION

$$\begin{aligned} \text{aire caliente} + \text{evaporada}(\text{sin sales}) &= \dot{Q}_e C_e \\ + \text{arrastre}(\text{con sales}) &= \dot{Q}_d C_d \end{aligned}$$



3.3. PRINCIPALES PARAMETROS DE CONTROL Y TOLERANCIAS DE AGUA PARA SISTEMAS DE ENFRIAMIENTO.

Los sistemas de enfriamiento de agua, presentan un gran número de problemas y éstos son difíciles de corregir, debido a que los diseños y los materiales de construcción para los sistemas de enfriamiento, no se encuentran tan estandarizados como lo son para otros equipos (p.e. calderas).

Los problemas concernientes con la calidad de agua (Tabla 3.3.) para los sistemas de torres de enfriamiento generalmente son¹²:

- 1) Incrustaciones.
- 2) Depósitos Sólidos en los Intercambiadores de Calor.
- 3) Corrosión Metálica.
- 4) Crecimientos Microbiológicos.
- 5) Deterioro de la Madera de las Torres de Enfriamiento.

Finalmente el agua removida de la torre de enfriamiento, ya sea en forma continua o intermitente, se realiza para prevenir las incrustaciones y el ensuciamiento. Esta agua procedente de la purga, invariablemente contiene sólidos suspendidos, sales concentradas, óxidos de metales,

inhibidores de la corrosión, dispersantes y agentes para el control microbiológico¹². Por tales razones, es que se debe tratar el agua de purga antes de descargarla a los cuerpos receptores de agua residual.

3.3.1. Control de Depósitos (Incrustaciones y Ensuciamiento).

Simplemente el asegurar un control adecuado sobre la cantidad de agua en las purgas¹³, puede ser, algunas veces suficiente para minimizar los problemas de los depósitos e incrustaciones. Algunos equipos requerirán de un sofisticado programa que involucre, al menos, el uso de dos agentes químicos para controlar los depósitos y aparte modificaciones mecánicas, como puede ser un flujo paralelo con filtración^{12,14}.

- Formación de Incrustaciones.- Las incrustaciones son la precipitación de material denso, que se adhiere en las superficies del intercambiador de calor. La precipitación de las sales que las forman, ocurre cuando sus solubilidades son excedidas, debido a una concentración alta o un incremento en temperatura. La solubilidad de la mayoría de las sales que

forman las incrustaciones decrece cuando se incrementa la temperatura^{12.19}. Obviamente que el paso del agua circulante por el equipo del intercambiador de calor incrementará la temperatura del agua. Frecuentemente ésta elevación de temperatura, es suficiente para causar la precipitación de material incrustable en las superficies del intercambiador de calor.

El mecanismo de concentración en los sistemas abiertos con recirculación, también es el mecanismo de enfriamiento, la evaporación del agua cuando pasa por la torre da como resultado las condiciones de saturación (como se explica en el apéndice 2). El parámetro que compara las concentraciones del agua en circulación y del agua de repuesto es "los ciclos de concentración", por ejemplo: Cuando se tienen 2 ciclos de concentración, implica que el agua circulante tiene el doble de la concentración de un elemento que el que se tiene en el agua de repuesto o tipo.

Las incrustaciones de carbonatos de calcio es un problema potencial en los sistemas de enfriamiento con recirculación, pero las incrustaciones de silicatos de calcio y de magnesio así como sulfatos de calcio también deben ser contemplados. Tradicionalmente, limitar los ciclos de concentración y añadir ácidos son métodos que se utilizan

para prevenir las incrustaciones. Los inhibidores de incrustaciones han sido utilizados con gran éxito para minimizar la formación de éstas¹².

- Control de Ciclos.- El limitar los ciclos de concentración ha sido una de las principales formas de eliminar la formación de incrustaciones. Al limitar los ciclos del agua en circulación la sobre-saturación puede ser prevenida o ser mantenida en un rango efectivo para el tratamiento utilizado. La purga remueve una porción del agua concentrada, la cual se reemplaza con agua de reposición.

Manteniendo un número mayor de tres ciclos, aún utilizando ácidos o inhibidores de incrustaciones, que deben ser añadidos, se logra un importante ahorro de agua y una reducción en los requerimientos de tratamiento de agua.

- Tratamiento con Acido.- El ácido sulfúrico es el que se utiliza comúnmente para tratar agua en circulación. Se debe utilizar suficiente cantidad para reducir, no eliminar, la alcalinidad del agua circulante. La alcalinidad se reduce lo suficiente para asegurar índices de saturación y estabilidad, que cualitativamente indiquen condiciones de no incrustación. El tratamiento con ácido convierte al bicarbonato de calcio a

sulfato de calcio, que es más soluble y estable.

Si el contenido de sulfato de calcio en el agua de repuesto es elevado, se puede utilizar ácido hipoclorídico para ajustar la alcalinidad y reducir la posibilidad de que se deposite. Bajo condiciones como ésta, un ablandamiento externo del agua de reposición debe considerarse como una alternativa del método de tratamiento¹².

- **Inhibidores de Incrustaciones.**- Uno utilizado ampliamente es el polifosfato, que se aplica a rangos de 0.5 a 5 ppm en el agua en circulación¹². En éstas concentraciones, el polifosfato inhibe la cristalización del carbonato de calcio de las soluciones saturadas. El mecanismo de inhibición se da por la adsorción parcial en las superficies de los cristales en crecimiento y la consecuente inclusión del incipiente núcleo de cristalización. Estas acciones inhiben el crecimiento del cristal y la nucleación.

- **Depósitos Sólidos.**- Causan el ensuciamiento en los tubos intercambiador de calor, que se define como el depósito de material no incrustable, como lo son:

- Sílice o hierro suspendido en el agua de repuesto.

- Orgánicos contenidos en el agua de repuesto.
- Partículas de materia provenientes de la atmósfera.
- Depósitos de aditivos químicos debido a un deficiente control.
- Contaminación orgánica debida al proceso.
- Productos de la corrosión.

La cantidad de materia asentada es directamente proporcional al tamaño de la partícula e inversamente proporcional a la viscosidad del líquido, por lo que el control del tamaño de la partícula es uno de los aspectos más importantes para el control de los depósitos.

Una vez que las partículas se asientan, la naturaleza del depósito resultante depende de las fuerzas de atracción entre las partículas y la superficie de contacto. Si las fuerzas son fuertes, el depósito será denso y bien estructurado y de difícil remoción; si éstas fuerzas son débiles, el depósito será suave e inclusive fluirá.

Los mecanismos básicos para el control de los depósitos son¹²:

- Control de las fuerzas de atracción entre partículas.
- Control de las fuerzas de atracción entre partículas y superficies.

- Control de la cantidad precipitada y retardo del crecimiento del cristal.

- Control de Ensuciamiento. -

Dispersantes: Estos funcionan por el principio de la adsorción, la cual involucra fuerzas electrostáticas simples en vez de enlaces covalentes. Los polímeros de bajo peso molecular son efectivos para su uso en los sistemas de enfriamiento de agua.

Floculantes: Son polímeros de alto peso molecular que promueven la formación de un flóculo ligero, el cual se remueve en la purga o por un filtro.

Surfactantes: Se utilizan para emulsificar los contaminantes, previniendo su depósito y ayudan a su dispersión al mantener la materia en suspensión y permite la remoción de depósitos viejos.

3.3.2. Control de la Corrosión.

La prevención de la corrosión en los sistemas abiertos recirculatorios ha sido un problema al que se le ha dedicado mucha investigación. Se han desarrollado medidas anticorrosivas efectivas que son aplicables a costos razonables.

- Causas de la Corrosión.- El contacto constante e íntimo del agua de enfriamiento con el aire, crea problemas únicos de corrosión y los intensifica.

El primer factor que agrava la corrosión, es el paso del agua por la torre de enfriamiento con un continuo contacto con el oxígeno. Los contaminantes que se adquieren debido al contacto con el aire, como gases y partículas de materia, causan un incremento de la corrosión.

La concentración de sólidos disueltos, especialmente cloratos y sulfatos, incrementa la corrosividad del agua en circulación.

También debido a que las temperaturas que se tienen en los sistemas de enfriamiento abiertos recirculatorios son altas, se tiene un mayor potencial para agravar éste problema.

- Prevención de la Corrosión.- Esta se logra al mantener en el agua de enfriamiento, cantidades constantes de aditivos químicos (inhibidores de la corrosión). Los inhibidores de la corrosión retardan la destrucción de los metales debido a su medio ambiente por reacciones químicas o electroquímicas.

- Inhibidores de la Corrosión.- Los que con mayor frecuencia

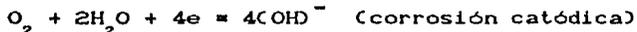
se utilizan en estos sistemas, se designan "pasivadores"¹². Este tipo de inhibición se logra al evitar que se forme una capa de óxido (o de otro tipo) en la superficie del metal. Las combinaciones de cloratos, fosfatos y zinc, son los que se utilizan comúnmente. Otros inhibidores de la corrosión incluyen el uso de nitratos, silicatos, aminas y otros agentes orgánicos.

Los cloratos, nitratos y fosfatos son inhibidores anódicos, éstos restringen la reacción de corrosión:



Este tipo de inhibidores se deben utilizar en cantidades suficientes o de lo contrario se presentará corrosión localizada, en forma de picaduras.

Sales de metales, como el zinc que forma hidróxidos, óxidos, carbonatos y fosfatos, que son moderadamente solubles, actúan como inhibidores catódicos. Los inhibidores catódicos son los que restringen la corrosión del tipo:



Los carbonatos y fosfatos de calcio también actúan como inhibidores catódicos. En general, si un tratamiento forma un recubrimiento adherente en el metal, funciona como un inhibidor catódico.

- Corrosión de los Metales No Ferrosos.- El cobre y sus aleaciones son metales relativamente resistentes a la corrosión, pero muchos químicos específicos y factores mecánicos promueven el ataque de la corrosión. Los tipos más comunes de ataque son: des-zincificación, erosión-corrosión, fracturas por esfuerzo y por fatiga.

Algunos factores químicos que contribuyen a la corrosión de las aleaciones de cobre son: bajos valores de pH, amonía, sulfuros, cianuros y exceso del cloro residual.

3.3.3. Control Microbiológico.

El control del ensuciamiento biológico previene pérdidas en la transferencia de calor y el aumento en la corrosión debido a los crecimientos de algas y lamas. La exposición del agua en circulación a la luz solar, en las torres de enfriamiento, incrementa el crecimiento de algas. Las temperaturas óptimas de funcionamiento, la alta concentración de nutrientes y la gran incidencia de la contaminación por aire, incrementa la formación de lamas en éstos sistemas recirculatorios abiertos.

-Dificultades debido al Ensuciamiento Biológico.- El

ensuciamiento biológico en éstos sistemas es el resultado del desarrollo y crecimiento excesivo de formas de vida básicas llamadas: algas, hongos y bacterias. En las partes donde incide la luz solar se da el crecimiento de algas y en las partes no expuestas crece la lama, ésta es una acumualción de microorganismos y sus excreciones contenidas en una misma masa.

- Elección del programa de Control Biológico.- Para el control de crecimientos biológicos se utilizan biocidas y bioestatos, los primeros matan a los organismos y los segundos inhiben su crecimiento y reproducción.

Donde se utiliza un agente biocida o bioestático se debe mantener una concentración residual para asegurar un tiempo suficiente de contacto para que el agente funcione propiamente. La dosificación y el tiempo de contacto deben ser determinados por experimentación en el sistema. Muchas son las variantes que influyen en el proceso de desarrollo biológico. Cada sistema debe ser considerado individualmente, y diferentes programas deben ser utilizados para las diferentes estaciones del año.

Los tóxicos utilizados para el control biológico caen en dos grupos:

- Biocidas Oxidantes.- Son los que en suma de su acción desinfectante oxidan otros compuestos.

Cloro.- Es tóxico para la mayoría de los microorganismos y reacciona rápido aún en bajas concentraciones.

Para controlar lamas y algas:

- Cloro suficiente debe ser alimentado para asegurar la muerte de los organismos.
- Debe ser mantenido un residual en el sistema con fines de control, se utilizan residuales de 0.2 a 1.0 ppm.

Dióxido de Cloro.-Tiene un mayor poder oxidante que el cloro.

- Biocidas No-oxidantes.-

Fenoles Clorados ; Compuestos de Amonia.- Utilizados como germicidas, su toxicidad varía con los diferentes organismos.

Sales de Cobre.- Son tóxicas para las bacterias, pero la presencia de otros iones y materia orgánica nulifican su toxicidad.

3.3.4. Deterioro de la Madera de las Torres de Enfriamiento.

La madera es el material básico de construcción, por lo que se debe evitar su deterioro, éste acorta la vida útil de la torre de 20 - 25 años a 10 o menos.

La madera está compuesta por tres componentes:

- Celulosa: Fibras largas que dan dureza a la madera.
- Lignina: Es el agente que cementa la celulosa.
- Extractos Naturales: Contienen la mayoría de los compuestos naturales que permiten resistir la descomposición, éstos son altamente solubles en agua.

-Tipos de Deterioro de la Madera.- La madera de las torres de enfriamiento experimenta tres tipos de deterioro: químico, biológico y físico. Normalmente éstos se presentan en forma simultánea¹².

- Ataque Químico.- Comúnmente se manifiesta en forma de delignificación que es causada por agentes oxidantes y materiales alcalinos. Debido a que el ataque químico remueve

lignina, los residuales son ricos en celulosa, la madera toma una coloración blanca y su superficie se vuelve fibrosa. El agua que cae en la torre, en forma de cascada, lava las fibras superficiales, por lo que la madera se adelgaza severamente.

- Ataque Biológico.- Este es de dos tipos: suave o superficial y de descomposición interna. Los organismos que atacan a la madera de la torre de enfriamiento son los capaces de utilizar la celulosa como fuente de carbón para su crecimiento y desarrollo, razón por la cual el residuo es rico en lignina, por lo que la madera se oscurece, pierde mucha fuerza y se torna suave, con hendiduras y fibrosa.

La descomposición interna es más severa y no se detecta oportunamente. Difícilmente se encuentra en zonas inundadas, debido a que se elimina el oxígeno del interior de la madera, pero en las partes donde fluye el agua existe una gran cantidad de oxígeno para permitir el crecimiento y desarrollo de los organismos. La humedad y la temperatura, así como el oxígeno tienen una influencia marcada en el desarrollo de los organismos; donde la humedad relativa es del 20% al 27% y la temperatura está en el orden de 30 a 40°C las condiciones para el desarrollo de los organismos son óptimas¹².

- **Ataque Físico y Otros Factores.**- Uno de los factores físicos que afectan adversamente a la madera es la temperatura. La continua exposición a altas temperaturas (mayores de 35°C) producen cambios en el grosor de la estructura, por lo que se acelera la pérdida de substancias lo que la predispone al ataque biológico.

Otros factores que ayudan al deterioro de la madera son los clavos y estructuras de fierro, debido a que la madera pierde fuerza y se producen rajadas que ceden con facilidad.

Las algas, lamas, depósitos de polvo y aceites, ayudan al desarrollo de organismos que suavizan la madera.

La alta concentración de sólidos disueltos se debe evitar, debido a que se erosiona la madera y la cristalización de sales rompe las células de la madera.

- **Control del Deterioro de la Madera.**- El único método efectivo para proteger la operación de una torre de enfriamiento es un programa de mantenimiento preventivo.

Las medidas preventivas en las zonas donde fluye el agua para la protección de las superficies al ataque químico y biológico en la madera, es un problema de tratamiento de agua, que requiere:

- Uso de biocidas no oxidantes, para control de lamas y algas.

- Control en la adición de cloro, para minimizar el ataque químico y el cloro residual debe restringirse a 1 ppm. o menos, de preferencia un rango de 0.3 a 0.7 ppm.

Con un programa combinado de cloro y biocidas no oxidantes es posible mantener el ataque químico en un mínimo y el ataque biológico puede ser controlado efectivamente.

En las partes donde no hay flujo de agua los mantenimientos preventivos requieren^{12,14};

- Inspecciones periódicas (por lo menos una vez al año).
- Reemplazar la madera dañada con madera tratada.
- Aspersión periódica de fungicidas.

Debido a que no existe flujo de agua, no se pierde material por erosión, pero el problema más serio es la descomposición interna.

Tabla 3.3. Problemas de Calidad del Agua Asociados con Agua de Enfriamiento y Tratamiento Posible para Minimizar el Problema¹.

Problema	Factores que contribuyen al problema	Tratamiento o solución
Corrosión	Oxígeno y otros gases disueltos, sólidos suspendidos o disueltos, pH, velocidad, temperatura y crecimientos biológicos.	<ul style="list-style-type: none"> ● Deaeración, ● Ajuste del pH, ● Cloración ● Inhibidores quim.
Incrustaciones	Concentraciones de calcio, magnesio, sílice, aluminio, sólidos totales disueltos y alcalinidad.	<ul style="list-style-type: none"> ● Ablandamiento por cal
Sedimentos o esuciamiento	Concentración de suciedad, masas microbiales, productos de corrosión y precipitados.	<ul style="list-style-type: none"> ● Dispersores quim. ● Purga
Crecimientos biológicos	Concentración de nutrientes y crecimientos biológicos en el influente.	<ul style="list-style-type: none"> ● Oxidantes quim. ● Biocidas
Espumas	Fosfatos, reactivos orgánicos, alto pH y alta alcalinidad.	<ul style="list-style-type: none"> ● Agentes anti-espumantes ● Ajuste de pH y alcalinidad por ácidos
Delignificación	Presencia de carbonato de sodio en el influente.	<ul style="list-style-type: none"> ● Ajuste de pH entre 6.5-7.5 ● Balance favorable de carbo - nato-bicarbonato

3.4. PARAMETROS DE CALIDAD DE AGUA RESIDUAL TRATADA CON FINES DE REUSO PARA ENFRIAMIENTO.

El agua residual tratada para reuso en sistemas de enfriamiento, representa la aplicación industrial más grande de reuso, por lo que se obtienen ahorros considerables de agua fresca o de primer uso¹⁶, disminuyéndose así la demanda de agua superficial y agua provenientes del subsuelo¹⁷, pero se requieren consideraciones especiales de control, de calidad y tratamiento de agua¹.

Las consideraciones básicas para la calidad del agua de enfriamiento son^{1,2,3}:

- 1) No se deben depositar incrustaciones.
- 2) El ensuciamiento de los intercambiadores debe estar controlado.
- 3) No se debe generar corrosión en el sistema.
- 4) No debe haber presencia de nutrientes para evitar los crecimientos biológicos.
- 5) No se debe propiciar el deterioro en la madera de la torre de enfriamiento.

Tanto el agua de primer uso como el agua residual

tratada, contienen contaminantes que pueden causar estos problemas, pero las concentraciones de éstos en el agua residual tratada son más elevados⁹.

Los criterios básicos de calidad de agua residual tratada que cumplen con los criterios se presentan en la tabla 3.4.1. y los problemas causados por una calidad inadecuada de agua residual tratada se enlistan en la tabla 3.4.2.

3.4.1. Incrustaciones.

Las incrustaciones formadas por carbonatos de calcio están presentes tanto en agua de primer uso como en el agua residual tratada, pero en ésta última se encuentran en mayores concentraciones. Las incrustaciones formadas por los fosfatos de calcio están presentes específicamente en el agua residual tratada debido al alto contenido de fosfatos en éste tipo de agua¹⁶, mismos que se incrementan debido a los ciclos de concentración. También son de interés el magnesio, la alcalinidad, los sulfatos y el sílice por su tendencia a formar incrustaciones¹⁷. Por lo anterior el agua para enfriamiento no debe formar incrustaciones en el rango de 30-45°C, que es la temperatura en la superficie de los tubos del intercambiador de calor¹⁸.

3.4.2. *Ensuciamiento.*

El ensuciamiento debido a crecimientos biológicos se encuentra en la mayoría de los sistemas de enfriamiento con recirculación, pero cuando el agua residual doméstica tratada se utiliza para agua de reposición los crecimientos biológicos se incrementan debido a el contenido de materia orgánica residual y al alto contenido de nutrientes como nitrógeno y fósforo.

Los sólidos suspendidos también son factores a considerar por el potencial que tienen de causar ensuciamiento en los intercambiadores de calor y en los contenedores de recolección¹⁷.

3.4.3. *Corrosión Metálica.*

Los sólidos totales disueltos (STD) incluyendo a los cloratos, son el factor que promueve la corrosión tanto en el agua de primer uso, así como, en el agua residual tratada, pero de igual manera, en el agua residual tratada se encuentran en concentraciones más altas. Su concentración en el agua en circulación se controla con los ciclos de concentración y con la purga. Un factor que propicia la

corrosión que es específico de los efluentes de agua residual tratada es el amoníaco, la cual es corrosiva para las aleaciones de cobre que se utilizan en el intercambiador de calor^{16y17}.

Los sólidos totales disueltos (STD) incrementan la conductividad eléctrica de la solución, y por consiguiente acelera la reacción de corrosión. El oxígeno disuelto y ciertos metales, como: magnesio, hierro y aluminio, promueven la corrosión por su alto potencial oxidante.

La corrosión máxima debe de ser menor a 0.15 mm/año.

3.4.4. *Crecimientos Biológicos.*

Los crecimientos biológicos que se observan en todos los sistemas de enfriamiento con recirculación, son en forma de: biomasa estancada y como materia orgánica suspendida.

El amoníaco y los fosfatos son nutrientes para las especies biológicas y la materia orgánica es una fuente de formación de espumas en las torres de enfriamiento¹⁷.

Debido a que el agua residual tratada contiene una concentración más alta de materia orgánica, es que se requiere de dosis más grandes de biocidas. También es posible que la mayoría de los nutrientes y materia orgánica presente,

sea removida del agua residual por los tratamientos biológicos y químicos.

Cuando se utiliza agua residual tratada para sistemas de enfriamiento, el asegurar una desinfección adecuada y eficiente, es de primordial importancia para proteger la salud de los trabajadores y lugares vecinos⁹.

3.4.5. Deterioro de la Madera.

El mantenimiento preventivo de la madera de la torre debe ser más estricto y para no propiciar la delignificación de la misma se debe controlar la concentración de carbonatos de sodio que es su causante principal. Manteniendo el pH entre 5.5 y 6.5 se logra un equilibrio favorable de bicarbonatos, minimizando el problema. También se debe controlar la concentración de sólidos suspendidos para no incrementar la erosión de la madera^{1,15}.

Para el enfriamiento de paso, la pureza del agua no tiene grandes consecuencias, pero para los sistemas con recirculación, la misma agua debe recircular varios ciclos. El número de ciclos que pueden ser tolerados dependen de las características de la calidad del agua, tanto a la alimentación como en los ciclos subsecuentes⁹.

En la tabla 3.4.1. se muestra la calidad que se requiere para cinco ciclos de concentración, es obvio que cuando se desea un número mayor de ciclos de concentración la calidad de agua a utilizar debe ser mejor, al igual que los requerimientos químicos de aditivos e inhibidores deben ser mayores.

Tabla 3.4.1. Requerimientos de Calidad para Agua de Enfriamiento con Recirculación^[1,2,3] (Valores Límites).

Componentes		Concentraciones (mg/L.)
Silica	SiO ₂	50.0
Aluminio	Al	0.1
Hierro	Fe	0.5
Magnesio	Mg	0.5
Calcio	Ca	50.0
Amonia	NH ₃ -N	1.0
Fósforo	P	1.0
Bicarbonato	HCO ₃	24.0
Sulfatos	SO ₃	200.0
Cloratos	Cl	500.0
Dureza	CaCO ₃	650.0
Alcalinidad	CaCO ₃	350.0
Substancias activas al azul de Metileno		1.0
DQO		75.0
SDT		500.0
SS		100.0

La aplicación de algunos de éstos criterios para algún caso particular debe ser evaluado basado en materiales de construcción, tratamientos químicos internos del agua de enfriamiento y el factor de impurezas internas previo².

Tabla 3.4.2. Problemas de Calidad de Agua Asociados a Agua de Reposición para Sistemas de Enfriamiento¹.

Problema	Factores que contribuyen al Problema
Formación de Incrustaciones	Concentración de calcio, magnesio, sílica, aluminio, sólidos disueltos totales y alcalinidad.
Ensuciamiento	Concentración de suciedad, sales, masas microbiológicas, o suciedad en el influente. Productos de la corrosión y precipitados se suman al problema.
Corrosión	Oxígeno y otros gases disueltos, sólidos suspendidos o disueltos, pH, velocidad temperatura y crecimientos biológicos.
Crecimientos Biológicos	Concentración de nutrientes y crecimientos biológicos existentes en el influente.
Deterioro de la Madera (Delignificación)	Presencia de carbonatos de calcio en el influente, sólidos suspendidos y disueltos.
Formación de Espumas	Presencia de sustancias activas al azul de metileno sobre 0.5 mg/l, concentración de fosfatos y orgánicos, alto pH y alcalinidad.

3.5. TREN DE TRATAMIENTO.

Aún el agua con calidad para uso potable y doméstico requiere de un tratamiento adicional cuando se le utiliza para enfriamiento. Cada problema relacionado con la calidad de agua de enfriamiento, para una aplicación particular, merece un examen cuidadoso y completo de todos los factores involucrados, antes de llegar a una conclusión para encontrar el mejor método de solución. Contrario a lo que se espera, la composición del agua tipo y la calidad deseada para enfriamiento no dan información suficiente para asentar un programa de tratamiento de agua. El conocimiento de la construcción (materiales y tipo de sistema de torre de enfriamiento) y la operación del equipo, son necesarias para seleccionar el tren de tratamiento que de la composición química y física del agua a tratar.

Las torres de enfriamiento son sistemas recirculatorios abiertos, y debido, a que la composición del agua tiene cambios durante el proceso de recirculación, la calidad inicial del agua de alimentación y de reposición se debe anticipar a éstos.

3.5.1. Clasificación de los Tratamientos de Agua.

Los contaminantes del agua residual doméstica son removidos por dispositivos físicos, químicos y biológicos. Los métodos individuales son clasificados como operaciones unitarias físicas, procesos unitarios químicos y procesos unitarios biológicos.

- Operaciones Unitarias Físicas.-

Son los métodos de tratamiento en los cuales la aplicación de fuerzas físicas predominan. El cribado, mezclado, floculación, sedimentación, flotación, filtración y transferencia de gases, son operaciones unitarias físicas típicas⁹.

- Procesos Unitarios Químicos.-

Son los métodos de tratamiento en los cuales la remoción o conversión de contaminantes es llevada a cabo por la adición de químicos o por alguna reacción química. La precipitación, adsorción y desinfección son los ejemplos más comunes⁹.

- Procesos Unitarios Biológicos.-

Son los métodos de tratamiento en los cuales la

remoción de contaminantes se lleva a cabo por la actividad biológica de organismos. Estos métodos se utilizan para remover sustancias orgánicas biodegradables (coloidales o disueltas) en el agua residual. También se utilizan para remover nutrientes (nitrógeno y fósforo)³.

3.5.2. Procesamiento del Agua Residual Doméstica.

Las operaciones y procesos unitarios se agrupan para designar niveles de tratamiento, así pues, el término preeliminar y primario se refiere básicamente a operaciones unitarias físicas (remoción de constituyentes físicos), el secundario se refiere a procesos unitarios químicos o biológicos o ambos (remoción de constituyentes químicos y biológicos), y terciario o avanzado que es una combinación de los anteriores y que se utiliza para remover algún constituyente en particular³.

- Tratamiento Preeliminar. -

Se caracteriza por la remoción de constituyentes del agua residual doméstica que puedan causar problemas de mantenimiento o de operación. Ejemplos de operaciones preliminares son: cribado, molido/desmenuzado, y desarenadores³.

-Tratamiento Primario.-

Se remueve una porción de los sólidos suspendidos y materia orgánica. Esto se logra por operaciones físicas, como: sedimentación, flotación y floculación/sedimentación. El efluente de un tratamiento primario tendrá cantidades considerables de materia orgánica y un contenido alto de demanda bioquímica de oxígeno (DBO). La función principal del tratamiento primario es la de ser el precursor del tratamiento secundario³, los niveles de remoción típicos de este nivel de tratamiento se presentan en la tabla 3.5.1.

- Tratamiento Secundario Convencional.-

La función principal es la de remover orgánicos biodegradables y sólidos suspendidos. La desinfección se incluye frecuentemente en éste nivel de tratamiento. El tratamiento secundario convencional está definido como la combinación de procesos con la finalidad de remover los constituyentes antes mencionados, en éste nivel de tratamiento se incluyen procesos unitarios biológicos como: lodos activados, biodiscos y bioreactores³, los niveles de remoción típicos de este nivel de tratamiento se presentan en la tabla 3.5.2.

- Remoción o Control de Nutrientes.-

Los nutrientes de principal interés son el nitrógeno y el fósforo, que son removidos por procesos biológicos, químicos o una combinación de ambos. En muchos casos estos procesos se acoplan al tratamiento secundario, al añadir sales de metales en el tanque de aereación para que el fósforo se precipite en el tanque de sedimentación o un proceso de desnitrificación biológica puede seguir al de lodos activados⁹, los niveles de remoción típicos de éste nivel de tratamiento se presentan en la tabla 3.5.3., éste se puede considerar como tratamiento avanzado o como parte del tratamiento secundario.

- Tratamientos Avanzados o Terciarios.-

Normalmente están definidos como un nivel de tratamiento complementario al tratamiento secundario convencional para remover contaminantes de interés, incluyendo nutrientes, compuestos tóxicos o cantidades mayores de materia orgánica y sólidos suspendidos. Las operaciones y procesos unitarios empleados con más frecuencia son: la coagulación química, floculación y sedimentación, seguidos por filtración y carbón activado⁹. Los porcentajes de remoción de el proceso de coagulación/sedimentación y el

de filtración se presentan en la tablas 3.5.4 y 3.5.5. respectivamente.

3.5.3. Tratamiento de Agua para Torres de Enfriamiento Industrial, considerando Agua Residual Doméstica sin Tratamiento.

Revisando los criterios de calidad establecidos en los apartados "3.3. Principales Parámetros de Control y Tolerancias de Agua para Sistemas de Enfriamiento y 3.4. Parámetros de calidad de Agua Tratada con Fines de Reuso en Enfriamiento" encontramos que:

- Para evitar la formación de incrustaciones se debe controlar material suspendido y alcalinidad.
- Para evitar y controlar el ensuciamiento se debe vigilar la cantidad de materia orgánica suspendida.
- Para evitar la corrosión acelerada del sistema se deben controlar el oxígeno y gases disueltos, partículas suspendidas, sólidos disueltos y el pH.
- Para evitar el crecimiento biológico se deben limitar la cantidad de nutrientes y partículas suspendidas.
- Para evitar el deterioro de la madera se deben

eliminar microorganismos como algas, lamas, materia orgánica disuelta, materia suspendida como sales, aceites y control del pH.

Además de controlar la presencia de organismos patógenos debido a que el agua a utilizar va a entrar en contacto con el humano y será expuesta al medio ambiente.

Por los motivos expuestos anteriormente es que los procesos y operaciones unitarios que se deben considerar deben ir encaminados a remover y controlar:

- Sólidos Suspendidos. - {
 - Cribado 1
 - Sedimentación 1,2,3,4
 - Filtración 1,2,3,4
 - Flotación 1
 - Adición de Coagulantes 1,2,3,4
 - Coagulación/Sedimentación 1,2,3,4

- Materia Orgánica Biodegradable. - {
 - Lodos Activados 3
 - Filtros de Lecho Fijo 3
 - Lagunas Aereadas 3
 - Lagunas de Oxidación 3
 - Filtrac. Intermitente en Arena 3
 - Sistemas Físico-Químicos 2,3,4

- Nutrientes. - {
 - Nitrógeno {
 - Nitrificación 3,4
 - Denitrificación 3,4
 - Nitrificación en lecho Fijo y Denitrificación 3,4
 - Desorción de Amoniaco 4
 - Intercambio Iónico 4
 - Cloración al punto de Quiebre 3,4
 - Fósforo {
 - Adición de Sales Metálicas 3,4
 - Coagulación con Cal/Sedimentación 3,4
 - Remoción Químico Biológica 3,4

- Patógenos. - { Cloración 2,3,4
Hipocloración 3,4
Ozonación 3,4
- Sólidos Orgánicos Disueltos. - { Intercambio Iónico 4
Osmosis Inversa 4
Electrodialisis 4

Nivel en que comunmente se encuentra la operación o proceso unitario:

1 pretatamiento; 2 primario; 3 secundario; 4 terciario

Un tren de tratamiento modelo se presenta en el Anexo 3.5. Proceso Convencional y su diagrama de flujo, en la figura 3.5.

3.5.4. Tratamiento de Agua para Torres de Enfriamiento Industrial, considerando Agua Residual Doméstica con Tratamiento de Nivel Secundario.

Teniendo en cuenta el nivel de remoción de contaminantes que se alcanza en un efluente típico de un tratamiento secundario (tabla 3.5.2), se puede requerir la coagulación con cal/sedimentación, esto para reducir los fosfatos, la dureza y silicatos, pero la alcalinidad debe ser controlada para evitar la precipitación de carbonatos de calcio, de ésta manera revisando y analizando la información obtenida en los apartados " 3.3 y 3.4 " el tren de tratamiento podría

consistir de un tratamiento secundario típico, y después cinco pasos de tratamiento avanzado que consisten en³: 1) Nitrificación Biológica; 2) Ablandamiento por Cal para remover Fósforo; 3) Ajuste del pH.; 4) Filtración ;y 5) Cloración. (anexo 3.5. Proceso Convencional)

Resulta importante tener en cuenta que *"cada problema relacionado con la calidad de agua para enfriamiento merece un examen cuidadoso y completo de todos los factores involucrados"*⁴. Razón por la cual, el tratamiento propuesto puede variar sensiblemente en cuanto a procesos y operaciones, así como, calidad del agua residual doméstica tratada requerida, según los ciclos de concentración deseados y la disponibilidad de aditivos químicos.

Tabla 3.5.1. Porcentaje de Remoción de Material en Agua Residual Doméstica de un Tratamiento Primario².

Constituyente	Porcentaje de Remoción
DBO	42
DQO	38
STD	53
NH ₃ -N	18
Fósforo	27
Aceite y grasa	65
Arsénico	31
Cadmio	38
Cromo	44
Cobre	49
Hierro	43
Plomo	52
Manganeso	20
Mercurio	11
Selenio	0.0
Plata	55
Zinc	36
Color	15
Agentes espumantes	27
Turbiedad	31
Carbón orgánico total	34

Tabla 3.5.2. Porcentaje de Remoción del Tratamiento de Lodos Activados con respecto a Efluentes Primarios².

Constituyente	Porcentaje de Remoción
DBO	89
DQO	72
STD	87
NH ₃ -N	63
NO ₃ -N	*puede incrementar
Fósforo	45
Alcalinidad	38
Aceite y grasa	82
Arsénico	28
Bario	31
Cadmio	54
Cromo	72
Cobre	76
Hierro	72
Plomo	69
Manganeso	33
Mercurio	13
Selenio	7
Plata	79
Zinc	49
Color	48
Agentes espumantes	71
Turbiedad	86
Carbón orgánico total	83

Tabla 3.5.3. Porcentaje de Remoción del Tratamiento de Nitrificación Biológica con respecto a Efluentes Secundarios².

Constituyente	Porcentaje de Remoción
DBO	75
DQO	56
STD	61
NH ₃ -N	97
Fósforo	50
Carbón orgánico total	73

Tabla 3.5.4. Porcentaje de Remoción del Proceso de Coagulación-Sedimentación por Adición de Cal con respecto a Efluentes Secundarios².

Constituyente	Porcentaje de Remoción
DBO	65
DQO	52
STD	70
NH ₃ -N	22
Fósforo	91
Alcalinidad	--
Aceite y grasa	40
Arsénico	6
Bario	61
Cadmio	30
Cromo	56
Cobre	55
Fluoruros	50
Hierro	87
Plomo	44
Manganeso	93
Mercurio	0.0
Selenio	0.0
Plata	49
Zinc	78
Color	46
Agentes espumantes	39
Turbiedad	70
Carbón orgánico total	73

Tabla 3.5.5. Porcentaje de Remoción del Proceso de Filtración después de un tratamiento Físico-Químico con respecto a un Efluente de Clarificación Secundaria².

Constituyente	Porcentaje de Remoción
DBO	36
DQO	22
STD	42
Arsénico	0.0
Bario	22
Cadmio	38
Cromo	9
Cobre	21
Plomo	26
Mercurio	0.0
Selenio	0.0
Turbiedad	31
Carbón orgánico total	26

Anexo 3.5. PROCESO CONVENCIONAL⁶.

Tratamiento Preliminar o Pretratamiento.

Cribado.

Las cribas están clasificadas en finas y gruesas; las gruesas son utilizadas normalmente para proteger el equipo de planta de daños físicos que dan como resultado la reducción de la eficiencia de operación. Las cribas remueven gran cantidad de sólidos y basuras que pueden interferir con operaciones y dispositivos de tratamiento posteriores, tales como, bombas y válvulas, aereadores mecánicos y filtros biológicos².

- Características de la criba.- Mientras más pequeña sea la abertura de la criba, más material podrá retener, las cribas gruesas tienen barras espaciadas aproximadamente 15 mm., retienen: piedras, ramas, raíces, plásticos, hojas, materia orgánica, etc. El material retenido es altamente volátil (80 a 90% o más de contenido de sólidos volátiles, y tienen un contenido de sólidos secos de 15 a 25% con una densidad entre 640 y 960 kg/m³). Las cribas pueden ser limpiadas a mano o mecánicamente. Las cribas finas con aberturas de menos de 15mm., retienen sólidos volátiles

variando entre 65 y 95%. Ya que materia putresible y patógenos fecales se retienen, estos deben ser propiamente manejados y dispuestos, también es alto el contenido de grasas, natas y espumas.

Desarenadores.⁹

Las cámaras desarenadoras están diseñadas para remover partículas de arena, grava, cenizas gruesas y otros materiales sólidos que tienen velocidades de sedimentación o gravedad específica substancialmente más grande que la de aquellos sólidos putresibles en el agua residual doméstica. En adición a esos materiales también se remueven cáscaras de huevo, astillas de huesos, semillas, granos y un gran número de partícula orgánicas, tales como desperdicios de comida. Generalmente lo que se remueve como arenas es material inerte, relativamente seco. La composición puede ser muy variable, con un contenido de humedad de 13 a 65% y el contenido de sólidos volátiles va desde 1 hasta 56%. La gravedad específica de arenas secas e inertes alcanza el valor de 2.7 pero puede ser tan pequeña como 1.3 cuando cantidades substanciales de materia orgánica aglomerada se remueven, se alcanza a obtener densidades secas de 1,600 kg/m³. A veces, es tal la presencia de materia orgánica en

las arenas, que se pudre rápidamente si no es manejada adecuadamente. Las partículas de arena mayores a 0.2mm. han sido la causa de la mayoría de los problemas reportados en procesos posteriores, razón de la importancia de esta operación unitaria.

- Cámaras desarenadoras.- Son utilizadas para:

1) Proteger el equipo mecánico de la abrasión; 2) Reducir la formación de depósitos duros en tubos y canales; y 3) Reducir la frecuencia de limpieza del digestor de lodos por exceso de arenas. Se localizan normalmente después de las cribas y antes de los tanques de sedimentación primaria. Existen tres tipos: De flujo horizontal (ya sea en canales rectangulares o cuadrados), aereadores y de tipo de vórtice.

Tratamiento Primario.

Tanques de Sedimentación Primaria³

Cuando un líquido que contiene sólidos en suspensión es puesto en estado de relativa quietud, éstos sólidos con gravedad específica más grande que la del líquido, tienden a sedimentarse y aquellos con gravedad específica más baja tenderán a subir. Estos principios son usados en el diseño de tanques de sedimentación para el tratamiento de agua residual

doméstica. El objetivo del tratamiento por sedimentación es el de remover un considerable número de sólidos sedimentables y materia flotante, y por consiguiente reducir el contenido de sólidos suspendidos. Los tanques de sedimentación primaria proveen el nivel principal de tratamiento y pueden ser utilizados como paso preliminar para un proceso mayor de agua residual doméstica. Estos tanques logran remover: 1) Sólidos sedimentables, capaces de formar depósitos de lodos; 2) Liberan de aceites, grasas y otros materiales flotantes; y 3) Separan una porción de la carga de materia orgánica. Cuando se utilizan antes de un tratamiento biológico reducen la carga para las unidades de tratamiento subsecuentes. Diseñados y operados eficientemente estos remueven del 50 al 70% de los sólidos suspendidos y del 25 al 40 % de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5). Cuando preceden tratamientos biológicos deben estar diseñados para periodos de detención cortos y una alta tasa de carga superficial.

Espumador o Despumador⁹

El agua residual doméstica normalmente contiene: jabón, detergentes y otros emulsificantes que producen espuma cuando ésta agua es aereada. Si la concentración de sólidos suspendidos es grande, la tendencia a hacer espuma se

mínimiza, pero en éste nivel de tratamiento los sólidos suspendidos se ha reducido considerablemente. La espuma que se produce contiene sólidos de lodos, grasa y un grán número de bacterias del agua residual doméstica. El viento puede soplar estas espumas lejos del tanque, contaminando cualquier cosa que entre en contacto con ellas. La espuma, aparte de ser desagradable a la vista, es peligrosa para los trabajadores, ya que es muy resbalosa, aún después de colapsarse y una vez que la espuma se ha secado resulta muy difícil de eliminar. El funcionamiento del tanque espumador es a través de compresores de aire que la inyectan en el fondo de tanque, así el agua residual a tratar se agita produciendo la espuma la cual queda a disposición. Además se puede dosificar una pequeña cantidad de aditivos químicos anti-emulsificantes después de este proceso.

Tratamiento Secundario.

Proceso de Lodos Activados.

Los lodos activados es un método común para dar tratamiento secundario al agua residual doméstica. Este es un proceso de tratamiento biológico en el cual la materia orgánica biodegradable se utiliza para alimentar microorganismos. El tratamiento se lleva a cabo al agitar y

aerear una mezcla de agua residual doméstica y lodos activados (microorganismos), y se aplica posteriormente una sedimentación de sólidos al efluente. Existen muchas variantes al proceso básico de lodos activados, el cual es muy flexible y puede ser adaptado a casi cualquier tipo de problemas de residuos biológicamente degradables².

El proceso convencional consiste en³:

-Un tanque de aereación.- La aereación se puede llevar a cabo por varios métodos, uno de ellos es por medio de aereadores mecánicos de eje vertical, los cuales pueden ser de superficie o sumergidos. En los tanques el oxígeno requerido se obtiene de la atmósfera y para algunos tipos, el aire u oxígeno puro es introducido por el fondo del tanque. En cualquier caso, el bombeo o la acción de agitar ayuda a conservar la cantidad de aire en la biomasa contenida en el tanque.

-Clarificador secundario.- Tiene la función de separar los sólidos sedimentables de los lodos activados. La separación de sólidos es el paso final para la producción de un efluente estable y clarificado, bajo en DBO y sólidos suspendidos, por lo que representa un eslabón crítico en la operación de un proceso de lodos activados. Mucha de la información para diseño de tanques de sedimentación primaria

es aplicable en éste nivel, pero la presencia de un gran número de flóculos en la mezcla requiere de consideraciones especiales para el diseño de estos. Los sólidos tienden a formar una cubierta que puede llenar la profundidad entera del tanque y sobrepasar los retenes con un rango de flujo bajo, si la capacidad de la bomba de retorno de lodos o el tamaño del tanque sedimentador es inadecuado. Por lo que se deben de considerar los siguientes factores en el diseño de éstos clarificadores: 1) Tipo de tanque; 2) Características de asentamiento de lodos, en relación a los requerimientos de espesor, para la adecuada operación de la planta; 3) Rangos de carga de superficie y de sólidos; 4) Profundidad del agua de salida; 5) Distribución del flujo; 6) Diseño de la toma del influente; 7) Emplazamiento y rango de carga de los retenes; y 8) Remoción de lamas.

La eficiencia de un tratamiento de lodos activados es juzgada por la remoción de la demanda bioquímica de oxígeno (DBO), demanda química de oxígeno (DQO) y sólidos suspendidos (SS)².

Tratamientos Avanzados.

Nitrificación Biológica⁹.

El nitrógeno es uno de los nutrientes principales en los efluentes de agua residual tratada. Las significativas concentraciones de éste puede tener efectos adversos, por lo que el control del nitrógeno está incrementando su importancia en la calidad del agua tratada y en el diseño de plantas de tratamiento de agua residual doméstica.

El nitrógeno en el agua residual doméstica sin tratamiento se encuentra principalmente en forma de amoníaco o nitrógeno orgánico, ambos presentes de forma soluble y en partículas. El nitrógeno orgánico soluble está principalmente en forma de urea y aminoácidos. El agua residual doméstica sin tratamiento casi no contiene nitritos o nitratos. Una porción de las partículas orgánicas se remueve en la sedimentación primaria. Durante el tratamiento biológico la mayor parte de las partículas de nitrógeno orgánico se transforman en amoníaco y otras formas inorgánicas, por lo que el contenido de los compuestos de nitrógeno se incrementan. Menos del 30% del nitrógeno total se remueve por un tratamiento secundario convencional². La operación de los sistemas de nitrificación biológica es básicamente la

misma que la de un sistema de lodos activados, solo que los microorganismos utilizados para este proceso utilizan a los compuestos de nitrógeno como alimento.

Ablandamiento por la Adición de Cal
para la Remoción de Fósforo.

La cal se utiliza como un coagulante para la remoción de fósforo, sólidos suspendidos, turbiedad y las trazas de otros constituyentes. El efluente resultante contiene un pH muy alto, ya que se eleva sobre 11³. El proceso involucra:²

- Agitación rápida, para la dispersión de los químicos en el agua.
- Agitación lenta, para la formación de flóculos sedimentables.
- Asentamiento en clarificadores.

Ajuste del pH.

La recarbonatación es el proceso más común para retornar los niveles normales de pH. El dióxido de carbono (CO₂) necesario esañadido (puede ser como gases producto de la combustión) en un tanque de contacto. El propósito se reducir el pH a 7 después del tratamiento con cal y no el de

remover contaminantes, pero se ha observado la absorción de pequeñas cantidades de flóculos de fósforo en el carbonato de calcio³.

Filtración².

Es un paso clave para producir efluentes de alta calidad, combina procesos físicos y químicos para remover sólidos del agua tratada. Este procedimiento precede a la desinfección. La filtración se lleva a cabo al pasar el agua a través de una cama de granos de arena y grava, donde los sólidos son retenidos en los espacios que existen entre los granos, que eventualmente se saturan, entonces se utiliza un contraflujo para retrolavar y sacar los sólidos acumulados. Esta operación exige una estrecha vigilancia y un cuidadoso mantenimiento por parte del operario. La remoción del material suspendido, depende del tamaño de los espacios presentes en el medio filtrante y su capacidad de filtración puede ser mejorada al añadir coagulantes o ciertos polímeros².

Cloración².

La desinfección del agua residual restaurada se realiza por la destrucción de los agentes patógenos y procurando una

barrera a posibles nacimientos de bacterias y virus, antes de que el agua tratada sea puesta en contacto con el medio ambiente.

La efectividad de la desinfección por cloro depende de numerosas variables, incluyendo: temperatura, pH, tiempo de contacto, turbiedad del agua, la presencia de sustancias que interfieren con la cloración, la concentración de cloro posible, la configuración física del tanque de contacto y el grado de mezclado del agua con el cloro. El tiempo de contacto se calcula entre 15 y 30 minutos para asegurar una reacción adecuada entre el cloro y las bacterias presentes en el agua a tratar.

Los sistemas de cloración son simples y flexibles, y el equipo no es complejo para su manejo. El cloro es relativamente fácil de aplicar y controlar en el tratamiento del agua residual y su bajo costo es una gran ventaja. El ajuste de la dosificación del cloro, normalmente se puede realizar de forma manual. El cloro es un desinfectante efectivo por su fuerte propiedad de oxidación. Esta misma propiedad hace al cloro peligroso en su manejo. Las precauciones deben ser observadas durante todas las fases de embarque, almacenaje y manejo del cloro, así como también en el equipo de cloración.

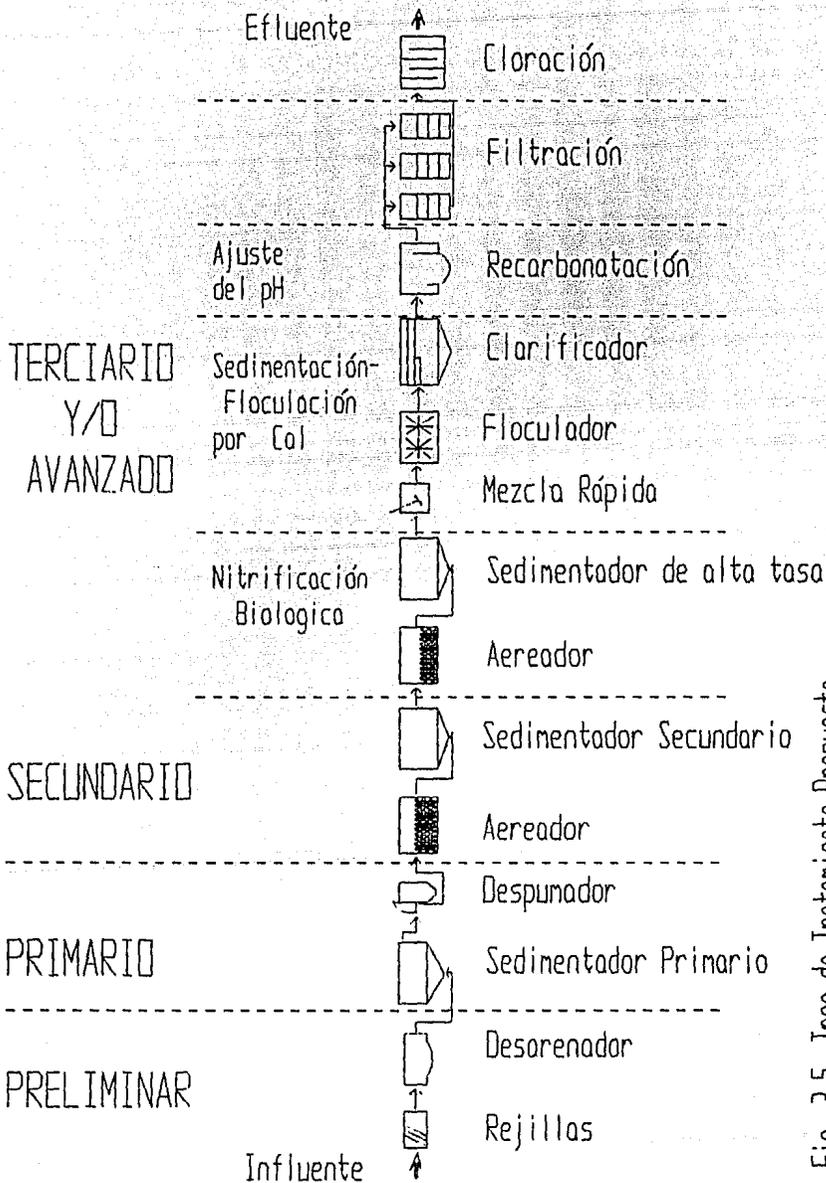


Fig. 3.5. Tren de Tratamiento Propuesto

3.6. COSTOS.

A partir de los años cincuenta, el desarrollo industrial originó que el sistema de drenaje captara nuevos desechos, lo cual modificó la mezcla de: agua residual doméstica, industrial y pluvial, susceptible de ser tratada y reutilizada. Esto último ha llevado a la necesidad de identificar, seleccionar y adaptar tecnologías que permitan seguir aprovechando agua residual a costos que compitan favorablemente con los del agua potable¹⁰.

3.6.1. Nivel de la Tecnología Necesaria para el Tratamiento de Agua Residual.

Con el fin de identificar el tipo de tecnología, que se ha empleado y que se requerirá en el futuro para tratar el agua residual, se ha planteado el marco conceptual que se muestra en el cuadro 3.6., en el que se pueden reconocer distintas fuentes de agua, las alternativas para su manejo y utilización y las restricciones (reglamentos) que habrán de satisfacerse de acuerdo con el uso a que se destinen. La tecnología empleada para potabilizar el agua de primer uso, se restringe generalmente a los procesos convencionales de

desinfección, excepto para el agua de algunos pozos del oriente de la ciudad, los cuales requieren de desgasificación, clarificación y ozonación¹⁰.

La tecnología aplicada para el tratamiento del agua residual doméstica ha respondido a dos enfoques diferentes: tratar para prevenir y controlar la contaminación, y tratar para reusar el agua. En algunos casos, los requerimientos que establece el reglamento para prevenir y controlar la contaminación del agua (Ref. 7) obligan a tratamientos que producen efluentes de calidad físico, química y biológica aceptable, principalmente para ciertos usos industriales. En cambio, los requisitos para reusar el agua son más estrictos, dependiendo de la actividad usuaria a que se destinen, lo que implica un desarrollo tecnológico que permita remover los contaminantes, tanto domésticos como industriales. Esto se logra con mejores resultados si los contaminantes de origen industrial se remueven en su origen, de acuerdo con lo que se especificará en el reglamento que se está elaborando para el uso del sistema de drenaje.

Para identificar la tecnología de tratamiento que debe desarrollarse es necesario comparar la calidad físico,

química y biológica del agua que conduce el sistema de drenaje, con los criterios de calidad que sancionan a el agua renovada, dependiendo el reuso que se les desee dar.

Considerando las variaciones que han tenido las características del agua residual doméstica, debido a influencia de descargas industriales, es necesario modificar los sistemas de las plantas de tratamiento, con el objetivo de tener una base para diseñar sistemas de tratamiento alternativos. En la práctica común, cada operación y proceso unitario, se asocia con un nivel de tratamiento según su capacidad para remover contaminantes, como se muestra en las dos primeras columnas de la tabla 3.6.1. de esta manera, un tratamiento preliminar, permite remover únicamente sólidos gruesos, grasas y aceites, y así sucesivamente se llega a tratamientos terciarios o avanzados, que son eficaces en la remoción de prácticamente todos los demás contaminantes¹⁰.

3.6.2. Evaluación de la Tecnología Existente.

Los procesos de tratamiento que aparecen en la tabla 3.6.1. son los que permiten producir agua renovada utilizable, a partir del agua residual doméstica. Las

tecnologías correspondientes resultan más o menos atractivas, dependiendo de diversos aspectos económicos y de las restricciones funcionales que tendría su implantación en el medio nacional.

La mayoría de los procesos de tratamiento tienen escasas restricciones en relación con la existencia de equipos y materiales en el mercado nacional¹⁰, además del conocimiento suficiente para su diseño y puesta en marcha. Solamente 11 de los 38 procesos estudiados por la D.G.C.O.H. presentan un grado de dificultad tecnológica superior a 50 (tabla 3.6.1.).

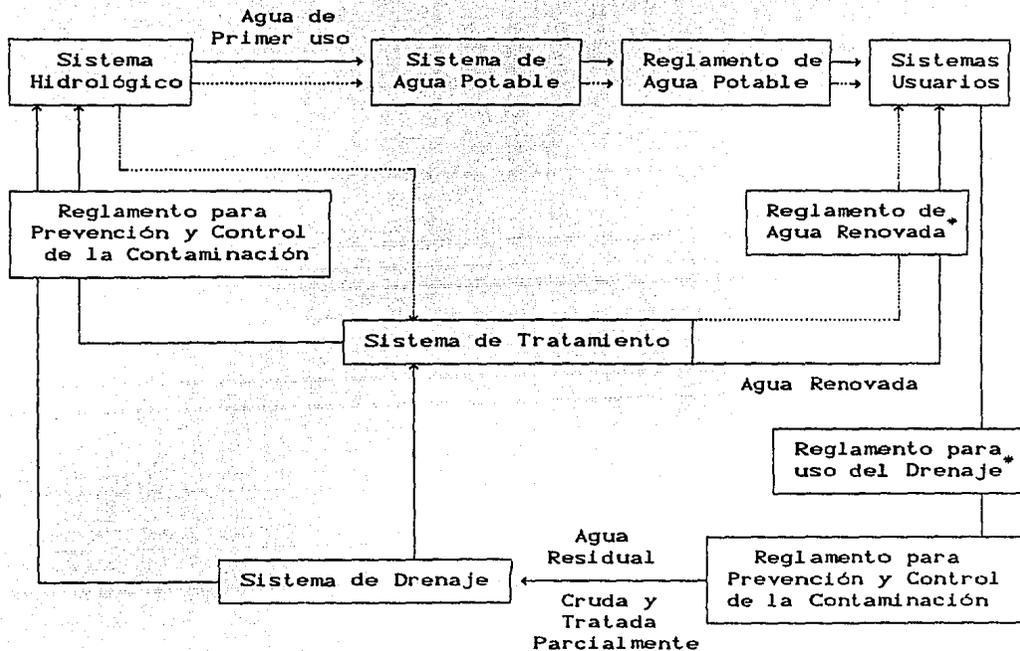
En cuanto a la capacidad de tratamiento, es importante tomar en cuenta la carga y el caudal de material contaminante que puede manejar cada proceso. La carga se refiere al número y variedad de compuestos orgánicos e inorgánicos y de contaminantes biológicos. El caudal se refiere al volumen de agua residual sujeto a un tratamiento. Dado que se requiere flexibilidad en la operación de las plantas de tratamiento también es importante definir la sensibilidad de cada proceso a cambios momentáneos, tanto de carga como de caudal.

La última columna de la tabla 3.6.1. se refiere a los conocimientos ya adquiridos y a la experiencia de los técnicos y operarios nacionales en el diseño, puesta en

marcha y operación de cada proceso. Por otra parte, la evaluación económica que aparece en la tabla 3.6.2., toma en cuenta, para cada proceso, las necesidades de área, equipo, energía eléctrica y personal, así como materiales y refacciones para mantenimiento. El análisis de ambos cuadros permiten señalar los procesos que conviene establecer en forma prioritaria, porque aún cuando no existe la tecnología nacional adecuada, son los requeridos para tratar el agua residual doméstica, y porque además presentan o presentarán costos y funcionalidad adecuados a la realidad mexicana.

Es necesario dar especial atención al problema del manejo y disposición de los subproductos generados durante el tratamiento del agua residual, y considerando que existen opciones de uso del lodo obtenido en una planta de tratamiento, es recomendable la investigación de los efectos, beneficios y desventajas, de aplicar este producto en áreas verdes ubicadas dentro de la zona urbana.

Cuadro 3.6. Aprovechamiento del Agua Residual Doméstica¹⁰.



..... Reuso Indirecto

— Reuso Directo

* Reglamento en Elaboración

Tabla 3.6.1. Restricciones Funcionales de los Procesos de Tratamiento¹⁰.

Nivel	Descripción del Sistema	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Preliminar:							
-Remoción de sólidos gruesos	1. Cribado	10	10	10	10	10	10
	2. Desarenación	10	10	10	10	10	10
-Remoción de grasas y aceites	1. Separador de placas paralelas	20	20	20	60	30	40
	2. Flotación con aire disuelto	40	30	20	30	60	70
Primario:							
-Remoción de sólidos sin uso de reactivos	1. Sedimentación	10	10	10	40	20	10
	2. Cribado fino	30	20	30	10	20	40
-Remoción de sólidos con uso de reactivos	1. Coagulación y sedimentación	10	30	10	20	20	20
	2. Coagulación y flotación	10	30	10	30	80	80
Secundario:							
-Remoción de materia orgánica	1. Aireación convencional	10	30	30	30	40	20
	2. Aireación extendida	10	60	100	10	10	20
	3. Aireación de alta tasa	10	20	20	50	80	40
	4. Aireación modificada	10	20	20	100	100	80
	5. Estabilización por contacto	30	30	70	50	70	80
	6. Zanja de oxidación	40	10	10	10	10	80
	7. Laguna aireada mecánicamente	10	20	20	20	20	20
	8. Laguna de estabilización	10	30	10	30	20	20
	9. Laguna con plantas acuáticas	20	100	40	80	30	60
	10. Filtro rociador	40	30	20	60	80	70
	11. Disco biológico	70	10	30	30	20	100
Terciario:							
-Remoción de nitrógeno por medios biológicos	1. Medio suspendido-fuente de C externa	60	20	30	20	60	80
	2. Medio suspendido-fuente de C interna	80	10	20	20	60	100
	3. Medio fijo-fuente de C ext.	60	30	30	50	30	80
	4. Medio fijo-fuente de C int.	80	20	20	50	30	100
-Remoción de nitrógeno por medios fís-quím.	1. Torres de lavado de amoníaco	50	10	10	60	10	30
	2. Cloración al pto. de quiebre	40	40	20	30	30	60
	3. Intercambio iónico	30	60	10	50	100	40
-Remoción de fósforo por medios biológicos	1. Absorción en medio suspendido	60	10	20	20	60	100

Tabla 3.6.1. Restricciones Funcionales de los Procesos de Tratamiento¹⁰.
(cont.)

-Remoción de fósforo por medios físico-químicos	1. Coagulación y sedimentación	10	10	10	30	30	10
	2. Carbón activado	100	30	10	40	80	40
-Remoción de partículas sólidas finas	1. Filtración en medio mixto	10	40	10	50	80	10
	2. Filtración mecánica	40	20	10	20	30	50
-Remoción de micro-organismos patógenos	1. Cloración convencional	10	60	20	30	30	10
	2. Cloración con dióxido de Cl	80	30	30	50	30	80
	3. Ozonación	60	100	30	70	80	60
-Remoción de materiales refractarios	1. Intercambio iónico	20	20	10	60	100	40
	2. Osmosis inversa	70	60	100	80	100	100
	3. Coagulación-sedimentación	10	30	10	30	30	10
	4. Carbón activado	100	50	10	40	20	60

(1) Disponibilidad de tecnología

(2) Capacidad de Tratamiento: Material

(3) Capacidad de Tratamiento: Caudal

(4) Sensibilidad del proceso a variaciones del: Material

(5) Sensibilidad del proceso a variaciones del: Caudal

(6) Experiencia

10 = Calificación a procesos que presentan pocas restricciones funcionales.

100 = Calificación a procesos que presentan condiciones funcionales muy restringidas.

Tabla 3.6.2. Evaluación Económica de los Procesos de Tratamiento¹⁰.

Nivel	Descripción del Sistema	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Preliminar:						
-Remoción de sólidos gruesos	1. Cribado	10	30	20	10	10
	2. Desarenación	20	20	10	10	10
-Remoción de grasas y aceites	1. Separador de placas paralelas	30	20	10	30	20
	2. Flotación con aire disuelto	40	60	60	10	30
Primario:						
-Remoción de sólidos sin uso de reactivos	1. Sedimentación	50	20	30	20	30
	2. Cribado fino	20	60	10	30	20
-Remoción de sólidos con uso de reactivos	1. Coagulación y sedimentación	30	40	40	20	20
	2. Coagulación y flotación	40	60	60	20	40
Secundario:						
-Remoción de materia orgánica	1. Aireación convencional	70	60	60	40	30
	2. Aireación extendida	80	100	90	40	40
	3. Aireación de alta tasa	50	40	40	40	30
	4. Aireación modificada	30	30	30	40	30
	5. Estabilización por contacto	60	50	50	50	40
	6. Zanja de oxidación	100	90	100	50	40
	7. Laguna aireada mecánicamente	100	40	40	40	20
	8. Laguna de estabilización	100	10	10	30	10
	9. Laguna con plantas acuáticas	80	10	10	40	30
	10. Filtro rociador	30	100	30	40	10
	11. Disco biológico	30	100	30	40	10
Terciario:						
-Remoción de nitrógeno por medios biológicos	1. Medio suspendido-fuente de C externa	50	70	60	60	60
	2. Medio suspendido-fuente de C interna	50	50	40	70	30
	3. Medio fijo-fuente de C ext.	30	90	30	50	30
	4. Medio fijo-fuente de C int.	30	70	20	60	20
-Remoción de nitrógeno por medios fis-quím.	1. Torres de lavado de amoniaco	60	40	30	50	30
	2. Cloración al pto. de quiebre	30	50	30	60	70
	3. Intercambio iónico	20	90	50	80	80
-Remoción de fósforo por medios biológicos	1. Absorción en medio suspendido	60	50	30	50	30

Tabla 3.6.1. Evaluación Económica de los Procesos de Tratamiento¹⁰.
(cont.)

-Remoción de fósforo por medios físico-químicos	1.Coagulación y sedimentación	30	40	40	60	30
	2.Carbón activado	20	80	90	80	70
-Remoción de partículas sólidas finas	1.Filtración en medio mixto	60	20	20	70	20
	2.Filtración mecánica	10	60	50	70	70
-Remoción de micro-organismos patógenos	1.Cloración convencional	30	40	40	30	40
	2.Cloración con dióxido de Cl	40	60	70	60	70
	3.Ozonación	20	70	80	95	40
-Remoción de materiales refractarios	1.Intercambio iónico	20	90	40	80	80
	2.Osmosis inversa	10	100	60	100	100
	3.Coagulación-sedimentación	60	50	30	60	50
	4.Carbón activado	30	60	30	80	70

(1) Area

(2) Equipo

(3) Energía

(4) Personal

(5) Mantenimiento

10 = Calificación a procesos que presentan características de mucha economía.

100 = Calificación a procesos que son pocos económicos.

CAPITULO 4

LA EXPERIENCIA EN LA TERMOELECTRICA DE TULA

4.1. ANTECEDENTES DEL REUSO EN TULA.

La ubicación de la Central Termoeléctrica "Fco. Perez Rios" en Tula, Hidalgo se debió principalmente a la facilidad que se presentaba para el suministro de combustible, al estar junto a la refinería de PEMEX en Tula y a su relativa cercanía a los grandes centros urbanos e industriales del Valle de México, que son los grandes consumidores de energía eléctrica, así de esta manera, las pérdidas por concepto de transporte de energía eléctrica se reducen considerablemente. Pero se encontró el problema de que en el centro de la república, las fuentes de abasto de agua son escasas y gran parte del agua que se consume en el valle, es provista desde lugares lejanos a éste, gracias a una enorme infraestructura de suministro de agua. Debido a ésta escasez de agua fué que se buscó una manera alterna para poder abastecer las necesidades de la central termoeléctrica y ésta se encontró en el agua residual doméstica del mismo valle que se descargan al Río Tula.

En México, el uso de agua negra para sistemas de enfriamiento, ya se había utilizado anteriormente en la Central Termoeléctrica "Valle de México", diseñada y construída en la década de los sesentas, en ésta también se

presentaron problemas en cuanto a suministro de agua.

La Central Termoelectrica de Tula fué concebida y diseñada a fines de los sesentas y principios de los setentas, en el año de 1975 se terminó de construir y se puso en operación la unidad 1 y en el año de 1976 la unidad 2. En esos tiempos todavía no se hacían patentes las tendencias ecologistas y los conceptos del reuso, por lo que la planta de tratamiento que se diseñó, fué unicamente con la finalidad de abastecer agua para el proceso de enfriamiento y no con la idea de reutilizar agua, que si bien cumplen con el mismo fin, los conceptos de planeación y diseño son diferentes, como ya se explicó en el capítulo 2.

4.2. LA PRACTICA DEL REUSO EN TULA^P.

El tratamiento que obtiene el agua residual doméstica en ésta planta, se divide en cinco etapas principales que son:

1.- Tratamiento Preliminar -

La Planta de Tratamiento de Agua Negra de la Termoeléctrica Tula, utiliza el siguiente equipo:

- Placas Deflectora o Desviadora de Sólidos Flotantes
- Rejillas de Barras de Acero
- Desarenador
- Rejillas más finas con eliminación mecánica de basura, denominados peines y operados automáticamente

2.- Tratamiento Primario -

En la Planta de Tratamiento de Agua Negra de la Central Termoeléctrica de Tula, se cuenta con: Tanques de sedimentación simple, con eliminación mecánica de lodos, el cual es de forma circular con rastras y un eliminador superficial de sobrenadantes, tales como grasas y aceites.

En el se agregan algunos productos químicos, tales como: sulfato de aluminio o alumbre, sulfato ferroso con cal, sulfato férrico y cloruro férrico (coagulación, neutralización y precipitación de fósforo)². Se reportan disminuciones de hasta 90% de sólidos suspendidos y 70% en la demanda bioquímica de oxígeno.

También existen tanques de eliminación de espumas y pre-aerean, disminuyendo así las condiciones sépticas y ayudan a eliminar la demanda bioquímica de oxígeno. Estos envían aire a presión por medio de dos sopladores, la espuma generada se elimina por medio de un espreado de agua.

3.- Tratamiento Secundario -

El sistema de lodos activados aerobios consiste en un tanque de aereación es de tipo mecánico con aereadores verticales de aspas sumergidas. El tanque de sedimentación secundaria o final es similar al tanque de sedimentación primario, se utiliza un sistema de bombeo que succiona los lodos acumulados en el sedimentador secundario y recircula una porción de éstos a la entrada del tanque de aereación, donde se combinan con el efluente primario a tratar, reiniciando el ciclo.

4.- Cloración -

Se lleva a cabo después del tratamiento de lodos activados.

Después de estos procesos se almacena el agua para su uso posterior.

4.2.1. Descripción de Componentes.

1.- Obra de Toma.-

Es la obra donde se toma el agua cruda del canal, cuenta con una rejilla de desbaste fija (primaria).

2.- Peines Automáticos (2).-

Es la rejilla más fina, cuenta con compuertas a la llegada y salida para bloquearlo. Puede funcionar manual o automáticamente.

3.- Bombas de Agua Cruda (3).-

Bombas: Centrifugas verticales.

Potencia: 75 HP

Caudal: 350 LPS

Capacidad: 100% cada una

4.- Sedimentador Primario (2).-

Tanque de concreto cilíndrico de $1,802 \text{ m}^3$ de capacidad, tiempo de retención a máxima carga: 1 h. 25 min. dispone de motoreductor y rastra.

5.- Despumadores (4).-

Cada unidad con dos tanques rectangulares de concreto con capacidad de 600 m^3 cada uno y tiempo de retención de 15 min. Cuenta con aireación por difusión proporcionada por tres sopladores centrífugos verticales de $42.5 \text{ m}^3/\text{min.}$ de 100% de capacidad. Uno para cada unidad y uno de reserva.

6.- Tanque de Aireación (2).-

Tanque de concreto rectangular con volúmen de $5,322 \text{ m}^3$, tiempo de retención a máxima carga de 4 h. 13 min. cuenta con seis aeradores mecánicos superficiales con sus respectivos motoreductores.

7.- Bombas Recirculadoras de Lodos (3).-

Bombas:	Centrífugas verticales.
Potencia:	20 HP
Caudal:	175 LPS

(cont.)

Capacidad: 100% cada una (una por cada
unidad, más una de reserva).

8.- Caja Partidora de Lodos (2).-

Receptáculo cuadrado metálico con repartidos
de flujo integrado. Localizado en la entrada de agua al
aerador.

9.- Sedimentador Secundario (2).-

Tanque de concreto cilíndrico de 2,670 m³ de
capacidad, tiempo de retención a máxima carga de 3h. 10 min.

10.- Sistema de Cloración.-

Dos equipos de cloración de 100% de capacidad
cada uno, dosifica continuamente a la entrada del cárcamo de
contacto de cloro, que es un tanque rectangular con
mamparras.

Dispone del siguiente equipo:

Clorador (1) de 950 kg/día. cada uno.
Bombas centrífugas de ayuda a cloración (2)
Evaporador de 100% de capacidad (1)
Cilindros de Cloro (13)
Eyector, líneas y accesorios.

11.- Bombas de Aspersión y Riego (2).-

Bombas: Centrifugas verticales.
Potencia: 50 HP
Caudal: 60 LPS
Capacidad: 100% cada una

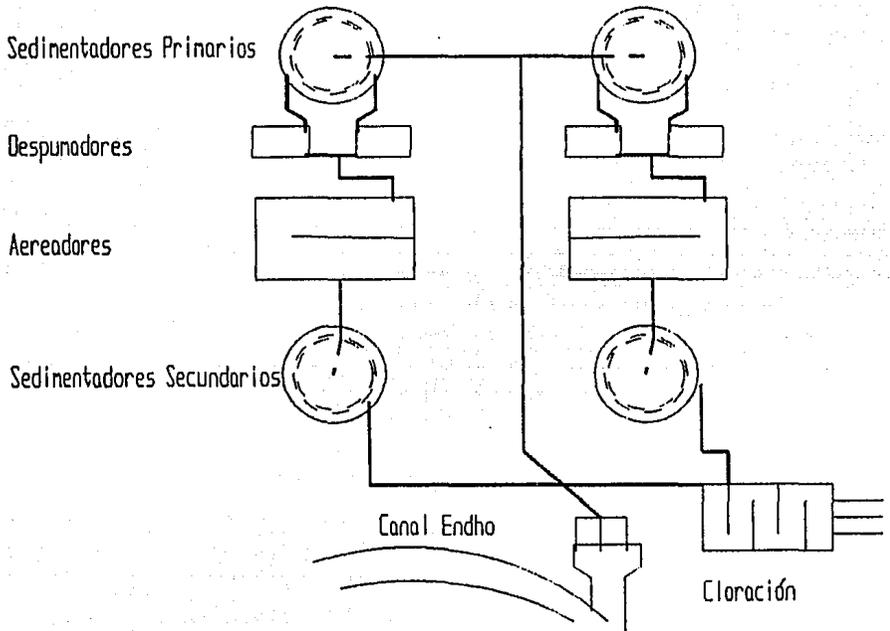
12.- Bombas de Agua Tratada (4).-

Bombas: Centrifugas verticales.
Potencia: 250 HP
Caudal: 350 LPS Diseño
240 LPS Actual

13.- Bombas de Drenaje:

Bombas: Centrifugas verticales.
Potencia: 15 HP
Caudal: 75 LPS Diseño

Fig.4.2. Diagrama de Flujo de la
Planta de Tratamiento de Agua de Tula



4.3. LA EXPERIENCIA DE TULA.

Por la naturaleza del proceso de enfriamiento, a través de torres, los ambientes que predominan en éstas son húmedos y si además se suman las características de un uso de agua con mala calidad, estos resultan ser ambientes sumamente agresivos, lo cual incrementa en forma substancial los costos de operación, en cuanto a cantidades de aditivos químicos que inhiben la corrosión, formación de espumas, sedimentación, ensuciamiento, etc. y sobre todo de mantenimiento, ya que las características de corrosión, sedimentación, lamas, etc. incrementan el ataque, que de por sí, reciben estos equipos.

Actualmente no se planea la construcción de nuevas centrales termoeléctricas en el interior del país, en gran parte por la escasez de agua existente.

Los sistemas de combustión son necesarios para el desarrollo de la Industria de la Transformación y todos estos requieren de sistemas de enfriamiento para su operación. El considerar el reuso de agua residual doméstica tratada para los sistemas de enfriamiento es una buena alternativa para desarrollos futuros.

**** Se agradece la colaboración del Ing. Walter Rangel Urrea del Instituto de Investigaciones Eléctricas, coordinador de Automatización de Centrales Termoeléctricas, Depto. de Instrumentación y Control, para el desarrollo de los capítulos 4.1 y 4.3.**

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

5. CONCLUSIONES.

La práctica del reuso de agua en México debe ser implementada en diseños actuales y futuros, sobre todo ahora que el gobierno, con la colaboración de la Comisión Nacional del Agua (CNA), la Dirección General de Construcción de Obras Hidráulicas (D.G.C.O.H.), y la Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) está prestando más atención a la calidad del agua descargada por las industrias y municipios, lo que implica que el agua deberá llevar un tratamiento previo a su disposición a cauces receptores. Aplicandose los tratamientos adecuadamente, ésta agua se podrá destinar para usos que no requieran calidad de agua potable y así conservar más el agua fresca para usos prioritarios y manteniendo así éste recurso natural, por lo que de ésta manera se evita tener que llegar a lo que se denomina "reuso potable directo", que implica tener que tratar agua residual doméstica para su potabilización para el uso y consumo humano, lo que implica una escasez de agua importante.

En México se ha comenzado a reusar agua residual doméstica tratada para el riego de camellones y de áreas verdes, lavado de automóviles, y se han realizado estudios pilotos para la inyección y recarga de mántos acuíferos (tal

es el caso de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales San Luis Tlaxiatemalco y la Planta de Iztapalapa²).

En las grandes industrias ya se ha dado el reciclamiento, reuso interno y tratamiento para su disposición (p.e. Planta San Juan del Río de fabricación de papel de Kimberly-Clark).

En cuanto al reuso de agua residual doméstica tratada, para sistemas de enfriamiento abiertos con recirculación, existen varias experiencias, tanto en México como en todo el mundo, siendo la más notable, la de la Planta de Generación Nuclear de "Palo Verde" en Arizona, la cual recibe efluentes con tratamiento secundario de las ciudades de Phoenix y Tolleson¹⁷, de la cual se tomó el tren de tratamiento propuesto en el Anexo 3.5., pero la diversidad de tratamientos utilizados en otras plantas generadoras muestran ser también eficaces, e inclusive se utiliza a la torre de enfriamiento como proceso de nitrificación¹⁶.

Los valores de calidad y los parámetros expuestos en éste estudio se pueden establecer para el reuso de agua residual doméstica en cualquier sistema de enfriamiento abierto con recirculación.

En el caso de la Central Termoeléctrica de Tula, el

reuso de agua residual, resulta ser caro y problemático, pero necesario. Ahora con las tendencias actuales de "cero descargas", lo que implica el máximo reciclamiento del agua en las plantas y la filosofía del reuso, los costos iniciales serán mayores, pero se reducirán los gastos operativos y de mantenimiento del sistema de enfriamiento, y de la planta en general, por lo que, como se recomienda en el capítulo 2, debe considerarse la construcción de plantas con tratamientos avanzados de agua residual doméstica, para que de ésta manera, el tratamiento del agua no dependa directamente de la industria y poder tener una mayor diversificación de reusos para desarrollos futuros de sistemas industriales de enfriamiento abiertos con recirculación y en general en todos los tipos de industrias donde se puedan establecer programas de reciclamiento y reuso, y en las demás aplicaciones que no requieran agua fresca.

APENDICES

APENDICE I

Los Reglamentos Referentes al Reuso en el Distrito Federal (7)(extracto).

Es el primer reglamento de éste tipo con el que se cuenta en la Ciudad de México, anteriormente no se contaba con alguna reglamentación relacionada con el uso, consumo y disposición de agua.

REGLAMENTO DEL SERVICIO DE AGUA Y DRENAJE PARA EL DISTRITO FEDERAL.

TITULO PRIMERO

Capítulo Unico.

Disposiciones Generales.

Artículo 1.- Las disposiciones del presente Reglamento son de orden Público e interés general y social, y tienen por objeto regular los servicios de agua potable, tratamiento de aguas, drenaje y alcantarillado del Distrito Federal.

Artículo 3.- Para los efectos del presente reglamento se entenderá por:

V.- Agua residual, el líquido de composición variada, resultante de cualquier uso primario del agua por el que haya

sufrido degradación original;

VI.- Agua residual tratada, el líquido de composición variada proveniente del agua residual y resultante de un conjunto de operaciones y tratamiento, ya sea primario, secundario o terciario;

XLVIII.- Planta de tratamiento, instalación industrial compuesta de un conjunto de unidades de proceso que depuran aguas residuales con el fin de reutilizarse de conformidad con las normas de salud y ecológicas establecidas;

LXXI.- Tratamiento primario, proceso de tratamiento de aguas residuales que remueven los sólidos sedimentables;

LXXII.- Tratamiento secundario, proceso de tratamiento de aguas residuales en el que la materia orgánica ha sido oxidada, y el agua resultante está clarificada y no es putrescible;

LXXIII.- Tratamiento terciario, proceso de tratamiento de aguas residuales por el que se eliminan materiales en suspensión y solubles orgánicos e inorgánicos y contaminantes biológicos;

LXXV.- Uso comercial o industrial, cuando el agua forme parte del bien o servicio industrializado o comercializado, o de su proceso de producción;

Artículo 4.- Corresponde al Departamento:

I.- Construir, autorizar la construcción y supervisar las obras requeridas por nuestra ciudad para el adecuado y suficiente suministro de agua potable hacia la población, para el tratamiento y distribución del agua residual, así como también para mejorar las tecnologías vinculadas con el tratamiento de agua a fin de garantizar la más alta calidad;

II.- Operar, conservar, mantener, controlar y vigilar el funcionamiento de los sistemas de aprovisionamiento y distribución de agua potable, de agua residual tratada, ... ;

VIII.- Establecer y desarrollar la política de reutilización del agua en el Distrito Federal, en coordinación con la Comisión Nacional del Agua;

IX.- Implantar y operar sistemas de tratamiento de aguas residuales de conformidad con las Normas Técnicas Ecológicas aplicables;

X.- Promover y ejecutar programas específicos que apoyen el uso responsable y eficiente del agua en el Distrito Federal;

XII.- Determinar e imponer sanciones a que se hagan acreedores los usuarios por el desperdicio; mal uso del agua, de la infraestructura del agua potable, del agua residual tratada y su sistema, ... ;

TITULO CUARTO

Del servicio público de tratamiento de agua

Capítulo I

Disposiciones Preliminares.

Artículo 62.- Serán materia de tratamiento, las aguas residuales de origen doméstico e industrial y las pluviales que transporten en suspensión materia orgánica o inorgánica, con el fin de incrementar y diversificar su aprovechamiento.

Artículo 63.- Todas las obras y acciones inherentes a la captación, conducción y distribución del agua residual tratada en el Distrito Federal, se realizaraán de acuerdo con los elementos, estructuras, equipo, procesos y controles que señale el Departamento.

Artículo 64.- El agua residual que suministre el Departamento, para su reuso o tratamiento proveniente de servicios públicos, comerciales, industriales y domésticos vertida al sistema de alcantarillado del Distrito Federal, deberá aprovecharse conforme al siguiente orden de prelación: ...

I.- Servicios públicos; para el riego de áreas verdes y llenado de lagos recreativos;

II.- Abrevaderos y vida silvestre;

III.- Acuacultura;

IV.- Giros mercantiles;

V.- Riego de terrenos de cultivo de forrajes y pastura;

VI.- Riego de terrenos de productos agrícolas que se consumen crudos que no requieren preparación para su consumo. Esta agua deberá de estar libre de contaminantes tóxicos y de organismos patógenos;

VII.- Recarga de acuíferos mediante pozos de inyección o estanques de infiltración, previo cumplimiento de las normas de calidad de agua potable y especificaciones que fije la autoridad competente;

VIII.- Riego de terrenos particulares y limpieza de patios;

IX.- Industrial, con fines de equipamiento y limpieza de áreas de servicio;

X.- Lavado de vehículos automotores;

XI.- Otros.

La tecnología utilizada en las plantas de tratamiento y los criterios de calidad física, química y biológica del agua residual tratada se sujetarán a lo que dispongan las Normas Técnicas Ecológicas y Sanitarias o al dictamen que emita la autoridad competente, a fin de evitar riesgos en la salud.

Artículo 65.- El usuario no podrá enajenar o comercializar en forma alguna el agua residual o la residual tratada que

reciba del Departamento, salvo el otorgamiento de la concesión correspondiente en los términos de este Reglamento y de la Ley Orgánica del Departamento del Distrito Federal.

Artículo 66.- Las tomas de agua residual tratada deberán solicitarse al Departamento

Artículo 74.- Las plantas de tratamiento de aguas residuales, deberán contar con un laboratorio para el control de la calidad física, química y biológica del agua tratada que se produzca, conforme a lo que establezcan las Normas Técnicas Ecológicas y Sanitarias aplicables.

Artículo 75.- En caso de que algún proceso industrial no requiera agua potable, los usuarios públicos o privados quedan obligados al aprovechamiento de las aguas residuales derivadas del proceso industrial. Para el efecto, instalarán equipos y dispositivos de recirculación o tratamiento de dichas aguas y se obligarán a presentar semestralmente al Departamento, el reporte de los usos y aprovechamiento de las mismas.

Capítulo III

Usos Industriales del Agua Residual Tratada.

Artículo 77.- El agua residual tratada producida en las

plantas de tratamiento, libre de compuestos tóxicos y orgánicos patógenos que pongan en peligro la salud, podrá ser empleada por los establecimientos, giros mercantiles y la industria ubicada en el Distrito Federal para los procesos de limpieza, transporte, enfriamiento, generación de vapor, lavado de maquinaria, de unidades automotrices y riego de áreas verdes.

Capítulo VI

De las Concesiones

Artículo 80.- El Departamento podrá concesionar la operación y mantenimiento de las plantas de tratamiento de agua residual y pluvial captada en el sistema de alcantarillado del Distrito Federal.

APENDICE 2.

Definiciones Útiles para el estudio de la Demanda de Agua en las Torres de Enfriamiento¹⁹.

Arrastre.- El agua que pierde la torre de enfriamiento en forma de finas gotas por la acción del aire en circulación. Normalmente se expresa como un porcentaje del agua de repuesto.

Purga.- Sacar en forma continua o intermitente, parte del agua en circulación con el fin de minimizar el crecimiento de concentraciones no deseadas y dañinas de sólidos disueltos en el agua. La purga normalmente se expresa como un porcentaje del agua de repuesto o como un volumen dado por minuto. Se calcula por el análisis de algún constituyente en el agua de repuesto y en el agua en circulación (p.e. cloratos).

$$\%Purga = \frac{\text{ppm cloratos en el agua de repuesto}}{\text{ppm cloratos en el agua en circulación}} \times 100$$

Ciclos de Concentración.- Este valor es de hecho el inverso del de la Purga. Es útil al calcular la dosis de

tratamiento. Un alto valor indica que el agua de enfriamiento se está utilizando de manera más eficiente.

$$\text{Ciclos de Concentración} = \frac{\text{ppm cloratos en el agua en circulación}}{\text{ppm cloratos en el agua de repuesto}}$$

Tasa de Evaporación.- La tasa, volúmen por minuto, a la cual el agua se está evaporando para enfriar el agua en circulación. Se requieren de 100 kg. de agua para reducir 10°C dando 1,000 kcals. por lo que la tasa de evaporación es del 1% de la tasa de circulación por cada 10°C de disminución de la temperatura.

$$\text{Tasa de Evaporación} = \frac{\text{rango}}{10} \times \frac{\text{tasa de circulación}}{100}$$

Tasa de Circulación.- Es la cantidad de agua bombeada a la torre, volúmen por unidad de tiempo. La relación del rango y la carga de calor

$$\text{Tasa de Circulación} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{min}} \right] = \frac{\text{carga de calor (kcal/min)}}{\text{rango (}^\circ\text{C)}}$$

Carga de Calor.- La cantidad de calor disipado en una torre de enfriamiento (en calorías) por minuto. Es igual

al peso de agua circulada por unidad de tiempo, multiplicada por el rango de enfriamiento.

Agua de Repuesto o Tipo.- El volúmen de agua por minuto que se requiere para reemplazar aquella que se pierde por evaporación, arrastre y purga.

Capacidad.- El promedio de la cantidad de volúmen de agua circulada en el sistema de enfriamiento en un tiempo dado.

GLOSSARIO

G L O S S A R I O ² y ^B

AGUAS NEGRAS. Cualquier agua que incluya desperdicios humanos.

AGUAS RESIDUALES DOMESTICAS. Agua derivada de usos domésticos, comerciales, industriales e infiltraciones en el sistema de drenaje.

AGUAS RESIDUALES INDUSTRIALES. Agua derivada de usos o procesos industriales exclusivamente.

CLORACIÓN. La aplicación de cloro o compuestos del cloro al agua con el propósito de desinfección, aunque también ayuda a la oxidación y control de olores.

COAGULACIÓN-SEDIMENTACIÓN. La desestabilización y agregación de materia coloidal y materia suspendida por la adición de un coagulante químico.

DELIGNIFICACIÓN. Descomposición química de la madera, éste proceso separa la lignina, pectina y resinas de la celulosa entera o parcialmente fracturada debida a la presencia de carbonatos de calcio.

EFLUENTE. Flujo de líquido que sale de un proceso u operación.

FILTRACIÓN. Proceso de separación de materia de un líquido, pasando a través de un medio que no permite el paso de partículas.

INFLUENTE. Flujo de líquido que entra a un proceso u operación.

LODOS ACTIVADOS. Tratamiento de agua biológico que involucra el uso de microorganismos en un reactor de mezcla bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas.

NITRIFICACIÓN. Parte de un sistema para remover nitrógeno orgánico del agua residual y convertirlo a nitrato.

PRE-TRATAMIENTO. Proceso que precede al tratamiento primario.

RECARBONATACIÓN. Proceso que introduce dióxido de carbono para reducir el pH y estabilizar la solución.

RESTAURACIÓN DE AGUA. La recuperación de agua residual doméstica por medio de operaciones de tratamiento para usos benéficos o su disposición.

REUSO DE AGUA. Término generalizado que se refiere a la restauración de agua residual a través de procesos de tratamiento de agua.

REUSO DIRECTO. El uso planeado y deliberado de agua residual doméstica restaurada para propósitos de uso y consumo humano.

REUSO INDIRECTO. El uso doméstico o industrial de agua residual tratada o no, diluida en agua fresca, con la que tiene contacto directo el ser humano.

TRATAMIENTO AVANZADO DE AGUA RESIDUAL. Cualquier proceso de tratamiento de cualquier tipo utilizado para complementar un mayor grado de tratamiento que el que se alcanza con un tratamiento secundario.

TRATAMIENTO PRIMARIO. Remoción de sólidos flotantes y suspendidos.

TRATAMIENTO SECUNDARIO. Nivel de tratamiento que produce eficiencias de remoción de DBO y SS de 85%. a veces incluye el concepto del proceso de lodos activados.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.

- ¹ "Wastewater Treatment Principles and Design."
James M. Montgomery. Consultig Engineers Inc.
Ed. John Willey & Sons, New York 1985.
- ² "Water Reuse, Manual of Practice SM-3." 2nd Edition.
Water Polution Control Federation. Washington D.C.1989.
- ³ "Wastewater Engineering, Treatment, Disposal and
Reuse" Metcalf & Eddy, Inc. 3th Edition. McGraw-Hill.
New York 1991.
- ⁴ "Manual del Ingeniero Mecánico" Marks 8^{ava} Edición.
(2^{nda} en español) Vol. I Cap 6. McGraw-Hill.
México 1989.
- ⁵ "Agua 2000. Cestrategia para la ciudad de México)."
D.D.F.- D.G.C.O.H. México D.F., 1991.
- ⁶ "El Sistema Hidraulico del Distrito Federal (un
servicio público en transición)." D.D.F. - D.G.C.O.H.
México D.F. 1982.
- ⁷ "Reglamento del servicio de Agua y Drenaje para el
Distrito Federal.: Ciudad de México, D.D.F.
México D.F. 1991.
- ⁸ "Water Quality and Treatment" The American Water Works
Association Inc. McGraw-Hill. New York 1971.

- ⁹ "Manual de Entrenamiento para la Operación de la Planta de Tratamiento de Aguas Negras" C.F.E. Fco. Perez Rios Tula.
- ¹⁰ "Compendio 1992" D.G.C.O.H. México D.F. 1991.
- ¹¹ "El Tratamiento de las Aguas Residuales en la Ciudad de México" Tercer Seminario de Ecología Industrial, Confederación Patronal de la República Mexicana. Documento expuesto por el Ing. Juan Manuel Martinez Garcia, D.G.C.O.H. Julio 31 de 1992.
- ¹² "Handbook of Industrial Water Conditioning" Betz 7th Edition Trevese Pennsylvania 19047, 1976.
- ¹³ "The industrial Cooling Tower" K.K. McKelvey, Max Brooke. Ed. Elsevier Publishing Company, London 1959.
- ¹⁴ "Electric Power Stations" T.H. Carr, Vol I Ed. Chapman & Hall LTD, London 1954.
- ¹⁵ "Solutions to Boiler and Cooling Water Problems" Charles D. Schoeder, Ed. Van Nostrand Reinhold, New York 1991.
- ¹⁶ "Reuse of Wastewater for Industrial Cooling Systems" Menahem Rebhur, Gideon Engel, JWPCF, Vol 60, No.2.
- ¹⁷ "Water Management for Reuse/Recycle" Sheldon D. Strauss, Power, May 1991.
- ¹⁸ "Reclamation and Industrial Reuse of Amarillo's Wastewater" S.L. Terry, JAWWA, 63, 159, March 1971.