



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIO SUPERIORES  
ZARAGOZA

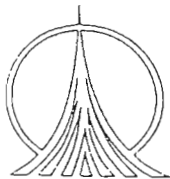
“ADECUACION Y REHABILITACION DE LOS PROCESOS DE  
TRATAMIENTO EN LA POTABILIZACION DEL AGUA A PIE DE POZO,  
PARA LA PLANTA SAN SEBASTIAN TECOLOXTITLA”

T E S I S  
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE  
INGENIERO QUIMICO.  
P R E S E N T A:  
AYALA RUIZ RODRIGO

DIRECTOR: ING. JUAN CARLOS PRIETO LOPEZ

MEXICO D.F.

1988



m342998



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



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

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

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

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



FACULTAD DE ESTUDIOS  
SUPERIORES ZARAGOZA

JEFATURA DE LA CARRERA  
DE INGENIERIA QUIMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/047/04

ASUNTO: Asignación de Jurado

**ALUMNO: AYALA RUIZ RODRIGO**

**P r e s e n t e .**

En respuesta a su solicitud de asignación de jurado, la jefatura a mi cargo, ha propuesto a los siguientes sinodales:

<b>Presidente</b>	<b>I.B.Q. Lorenzo Rojas Hernández</b>
<b>Vocal</b>	<b>I.Q. Juan Carlos Prieto López</b>
<b>Secretario</b>	<b>Biol. Guillermo González Martínez</b>
<b>Suplente</b>	<b>I.Q. José Mariano Ramos Olmos</b>
<b>Suplente</b>	<b>I.Q. Ana Lilia Maldonado Arellano</b>

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

**A t e n t a m e n t e**

**“POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU”**

México, D.F., 28 de Septiembre de 2004.

**EL JEFE DE LA CARRERA**

A handwritten signature in black ink, appearing to be 'M. en C. Andrés Aquino Canchola', written over a circular stamp or seal.

**M. en C. ANDRES AQUINO CANCHOLA**

## **Agradecimientos:**

### **A mis padres**

J. Guadalupe Ayala Meza\*

Irene Ruiz Flores

Como agradecimiento a su esfuerzo y apoyo, con la cual me ayudaron a forjarme en la vida y por brindarme una de las herencias más valiosas, una carrera universitaria.

### **A mi esposa**

Ma. Olivia Venegas Díaz

Porque la amo y por haberme impulsado moral y físicamente durante el proceso de titulación.

### **A mi hijo**

Eduardo Ayala Venegas

Quien fue el eslabón principal que me impulsó a titularme y para brindarle en el futuro, un ejemplo a seguir, para convertirse en un profesionista más.

### **A mis Hermanos**

Carlos, Vicente, Ma. De Lourdes, Rafael, Irineo, Ma. Guadalupe y Nancy.

Con quienes compartí mi vida desde pequeño y que actualmente compartimos una muy agradable relación y con esta titulación cerramos un ciclo de profesionistas en la familia Ayala Ruiz.

### **A la U.N.A.M., F.E.Z. Zaragoza y a mis Sinodales,**

Por los conocimientos que me transmitieron y por contribuir de una manera directa o indirecta en la realización de este trabajo.

### **A mi asesor**

Por brindarme el tiempo necesario, conocimientos y experiencia en la realización de este trabajo.

# INDICE GENERAL

<b>RESUMEN</b>	iv
<b>INTRODUCCION</b>	v
<b>OBJETIVOS</b>	vi
<b>CAPITULO 1: GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA</b>	1
1.1 POTABILIZACION DEL AGUA	2
1.2 NORMAS DE CALIDAD DE AGUA POTABLE	3
1.3 PRINCIPALES IMPUREZAS	5
1.4 GENERALIDADES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO	8
<b>CAPITULO 2: PRINCIPALES TRATAMIENTOS DEL AGUA A PIE DE POZO PARA SU POTABILIZACION</b>	16
2.1 PROCESO DE EXTRACCION DE AGUA DE POZO	17
2.2 PROCESO DE OXIDACION (OZONO)	23
2.2.1 OZONO Y SUS PROPIEDADES	23
2.2.2 APLICACIONES	24
2.2.3 SISTEMA DE OZONACION	26
2.2.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO	32

2.3 PROCESO DE FILTRACION	37
2.3.1 FILTRACION	37
2.3.2 FILTROS DE PRESION	38
2.3.3 FILTROS DE GRAVEDAD	46
2.4 PROCESO DE ADSORCION CON CARBON ACTIVADO	48
2.4.1 ADSORCION	48
2.4.2 MECANISMO DE LA ADSORCION	49
2.4.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ADSORCION	52
2.4.4 CARBON ACTIVADO; PROPIEDADES FISICOQUIMICAS Y SUS APLICACIONES	53
2.5 PROCESO DE LA OSMOSIS INVERSA	60
2.5.1 TEORIA DE LA OSMOSIS INVERSA	60
2.5.2 CARACTERISTICAS DE LAS MEMBRANAS	64
2.5.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO	71
2.5.4 APLICACIONES	75
2.6 PROCESO DE DESINFECCION	77
2.6.1 DESINFECCION	77
2.6.2 METODOS DE DESINFECCION	79
2.6.3 CLORACION	83
2.6.4 HIPOCLORACION	85
<b>CAPITULO 3: CASO APLICACION: ANALISIS DE LA PLANTA SAN SEBASTIAN TECOLOXTITLA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA A PIE DE POZO CUYA CALIDAD DE AGUA ES DEFICIENTE</b>	<b>92</b>
3.1 ANTEDECEDENTES	93
3.2 OBJETIVO GENERAL	94
3.3 DESCRIPCION DEL SISTEMA	94
3.4 CROQUIS DE LOCALIZACION	106
3.5 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO	106

3.6 BALANCE DE MATERIA	107
3.7 EVALUACION DE LA PLANTA POTABILIZADORA SAN SEBASTIAN TECOLOXTITLA	110
3.8 ADECUACION Y REHABILITACION DE LA PLANTA SAN SEBASTIAN TECOLOXTITLA	126
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>133</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>135</b>

## RESUMEN

En el presente trabajo se aplica la experiencia profesional que he adquirido en los años de servicio en el área de plantas potabilizadoras a pie de pozo en la Dependencia del Gobierno del Distrito Federal "Secretaría del Medio Ambiente, Sistema de Aguas de la Ciudad de México".

El trabajo se basa en la evaluación de la remoción de los contaminantes presentes en el agua de pozo y su correspondiente revisión de diseño de los equipos de proceso. Para ello se contemplan tres capítulos, en el primer capítulo se describen los procesos de tratamiento de agua potable, que existen en la literatura así como en el campo laboral, aplicables de acuerdo a la calidad del agua cruda. El capítulo dos, inicia con un conocimiento teórico de las operaciones unitarias; oxidación con ozono, adsorción con carbón activado, filtración, ósmosis inversa y desinfección, que forman parte del tren de tratamiento de la planta potabilizadora San Sebastián Tecoloxtitla, ubicada en la zona oriente del D. F.

Con el conocimiento teórico de las operaciones unitarias, da origen al capítulo tres, donde se realiza una evaluación operativa de los procesos a nivel diseño, tomando como parámetros; la carga hidráulica superficial, medio filtrante y el tiempo de retención hidráulico.

Con la revisión del diseño, se plasman las adecuaciones, rehabilitaciones y algunas recomendaciones operativas, para un buen funcionamiento en la eficiencia de operación y por ende el suministro de agua con buena calidad, apta para consumo humano.



## INTRODUCCION

En años recientes el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, ha identificado un deterioro gradual de la calidad del agua en el oriente y sur del D. F., donde se ubican las Delegaciones Iztapalapa con el 87%, Iztacalco con el 70%, Tlahuac con el 57% y Xochimilco con el 41%.

Los principales problemas identificados son el incremento de sales inorgánicas disueltas asociadas con hierro, manganeso, calcio, magnesio y otros metales alcalinotérreos, no de consecuencias tóxicas la mayoría de ellos, pero sí de aspectos estéticos que limitan su aprovechamiento en diversas actividades y en algunos casos la presencia de materiales de origen orgánico.

Por lo que es de vital importancia la implementación de plantas potabilizadoras a pie de pozo que permitan transformar el agua obtenida de los acuíferos del oriente de la Ciudad de México, en agua apta para consumo humano.

Dentro de la Ingeniería Ambiental se practica que para determinar la calidad de una fuente de agua potable, se debe realizar una caracterización que incluya análisis físicos, químicos y bacteriológicos; y en base a los resultados de estas pruebas se determina el uso potencial en que puede destinarse el agua en cuestión, mediante comparación de la calidad obtenida con las normas y criterios de calidad establecidos para cada uso.

Así la planta potabilizadora de San Sebastián Tecoloxtitla, ubicada en Iztapalapa, contempla un tren de tratamiento constituido por; oxidación con ozono, filtración dual arena-antracita, adsorción con carbón activado, ósmosis inversa y desinfección con hipoclorito de sodio. Este tren permitió obtener un agua de calidad hasta el año de 1998. Por lo que fue necesaria una evaluación de los procesos ya mencionados a nivel diseño, que permitan cumplir con agua de buena calidad.

## OBJETIVOS

- Evaluación del tren de tratamiento en la potabilización del agua del pozo San Sebastián Tecoloxtitla, que actualmente presenta características deficientes.
- Revisión del diseño de las operaciones unitarias; oxidación con ozono, filtración, adsorción, ósmosis inversa y desinfección.
- Implementación de alternativas de tratamiento o adecuaciones al tren de potabilización que permita obtener agua de calidad en base a la Norma NOM-127- SSA1-1994.

## **CAPITULO 1**

# **GENERALIDADES DE LOS PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE**

## 1.1 POTABILIZACION DEL AGUA

El agua en estado de absoluta pureza no existe en la naturaleza, debido a diversas situaciones que se presentan en las fuentes de abastecimiento, tales como: geología del terreno, factores ambientales, empleo de pesticidas y vertido de aguas residuales entre otros. Todos estos factores de una forma u otra repercuten también, en el ciclo hidrológico que recorre el agua.

La expresión agua potable se adoptó convencionalmente para calificar el agua apta para consumo humano y uso doméstico, así que las impurezas del agua tienen un significado muy relativo, ya que depende enteramente de las características propias de las sustancias que la ocasionan o del uso específico al cual son destinadas.

El agua potable contiene algunos elementos y compuestos, principalmente sales minerales disueltas, que al contrario de limitar su uso en fines potables, son la principal fuente de estos elementos en la dieta humana. El agua pura, es decir, exenta de todo material diferente de  $H_2O$ , no se considera recomendable para ser consumida en forma rutinaria por el cuerpo humano, ya que algunas de las sales naturales asociadas con Sodio, Potasio, Calcio, Manganeso, Magnesio, Hierro, son utilizadas por el organismo humano, el cual no funcionaría adecuadamente si no cuenta con una dosis adecuada de estos elementos y sus compuestos.

Las concentraciones excesivas de algunos de estos elementos y sus compuestos son los que en un momento dado limitan el aprovechamiento del recurso con fines potables y deben ser removidos hasta alcanzar las concentraciones, que de acuerdo con investigaciones profundas, no presentan riesgo en la salud humana.

Cabe destacar que algunos elementos como Calcio, Hierro, Manganeso, no se han identificado necesariamente como tóxicos al cuerpo humano. Sin embargo dichos elementos están relacionados con la estética del agua. El Hierro, por ejemplo imparte al agua un color de amarillo a rojizo intenso dependiendo de su concentración. El calcio

y el magnesio son los principales elementos que causan la dureza del agua con efecto sobre la formación de sarro en las tuberías y la inhibición de la actividad de los detergentes. Los cloruros imparten sabor salado al agua. Se requiere por lo tanto limitar las concentraciones de estos elementos.

## **1.2 NORMAS DE CALIDAD DEL AGUA POTABLE**

La legislación mexicana presenta grandes limitaciones en la regularización y sancionamiento de una gran cantidad de elementos y compuestos contaminantes. Existen además otros elementos, compuestos y microorganismos que pueden ser sancionados. En la Tabla 1 se presentan los valores de los parámetros sancionados en el proyecto de la Norma Oficial Mexicana **NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano – Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización**, publicada en el Diario Oficial de la Federación el 15 de agosto de 1994 referida al 18 de enero de 1996.

**TABLA 1 NORMA OFICIAL MEXICANA NOM - 127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO – LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION".<sup>19</sup>**

<b>Características bacteriológicas</b>	<b>Límite permisible</b>
Organismos coliformes totales	2 NMP/100ml 2 UFC/100 ml
Organismos coliformes fecales	No detectable NMP/100 ml Cero UFC/100 ml
<b>Características físicas y organolépticas</b>	<b>Límite permisible</b>
Color	20 unidades de color verdadero en la escala de platino- cobalto
Olor y sabor	Agradable (se aceptarán aquellos que sean tolerables para la mayoría de los consumidores, siempre que no sean resultados de condiciones objetables desde el punto de vista biológico o químico)
Turbiedad	5 unidades de turbiedad nefelométricas (UTN) o su equivalente en otro método.
<b>Características químicas</b>	<b>Límite permisible en mg/l</b>
Aluminio	0.20
Arsénico	0.05
Bario	0.70
Cadmio	0.005
Cianuros como (CN <sup>-</sup> )	0.07
Cloro residual libre	0.2 - 1.5
Cloruros (como Cl <sup>-</sup> )	250.00
Cobre	2.00
Cromo total	0.05
Dureza total (como CaCO <sub>3</sub> )	500.00
Fenoles o compuestos fenólicos	0.001
Fierro	0.30

<sup>19</sup>( Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994)

Fluoruros (como F <sup>-</sup> )	1.50
Manganeso	0.15
Mercurio	0.001
Nitratos (como N)	10.00
Nitritos (como N)	0.05
Nitrógeno amoniacal (como N)	0.50
pH (potencial hidrógeno) en unidades de pH	6.5 - 8.5
Plomo	0.025
Sodio	200.00
Sólidos disueltos totales	1,000.00
Sulfatos (como SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	400.00
Sustancias activas al azul de metileno(SAAM)	0.50
Trihalometanos totales	0.20
Zinc	5.00
<b>Plaguicidas</b>	<b>Límite permisible en <math>\mu</math> g/l</b>
Aldrín y dieldrín (separados o combinados)	0.03
Clordano (total de isómeros)	0.30
DDT (total de isómeros)	1.00
Gamma-HCH (lindano)	2.00
Hexaclorobenceno	0.01
Heptacloro y epóxido de heptacloro	0.03
Metoxicloro	20.00
2,4-D	50.00

NMP/100 ml (Número más probable por 100 ml)

UFC/100 ml (Unidades formadoras de colonias por 100 ml)

### 1.3 PRINCIPALES IMPUREZAS

La evaluación de la calidad fisicoquímica y biológica del agua freática bajo el suelo de la zona urbana del D. F, tiene como propósito conocer la variación en el tiempo en la calidad del agua (Cuadro 1).

**CUADRO 1 ESTADISTICA DESCRIPTIVA DE LA VARIACION DE LA CALIDAD DE AGUA FREATICA DE LA ZONA ORIENTE Y SUR DEL D.F. (1995-2000)<sup>15</sup>**

VARIABLE	LIMITE DE CALIDAD (1)	PROMEDIO	COEFICIENTE VARIACION	VALOR MAXIMO	VALOR MINIMO	CRITERIO DE IMPORTANCIA
Color	20	8.5	148.74	200	0	2
Conductividad	1500	507.21	85.18	4300	11.7	2
pH	6.5 – 8.5	7.73	4.53	10	2.5	1
Sólidos totales	1000	378.72	82.42	5220	102	2
Alcalinidad	400	186.93	71.93	1161.96	51	2
Cloruros	250	37.57	132.89	250	0	0
Dureza total	500	143.41	79.32	1380	15	2
Fluoruros	1.5	0.21	91.45	2.5	0	1
N amoniacal	0.5	0.26	224.43	6.38	0	3
N protéico	0.1	0.12	102.19	2.52	0	3
Sulfatos	250	37.43	266.05	1810	0	2
Arsénicos		0.00	186.63	0.046	0	0
Cadmio (2)	0.005	0.006	117.69	0.211	0	3
Calcio	30	22.27	72.48	193.5	0.002	
Zinc	5	0.02	409.00	1.63	0.0002	0
Cobre	2	0.01	304.30	1.2	0	0
Cromo	0.05	0.01	90.10	0.128	0	2
Hierro	0.3	0.11	662.65	33.45	0	2
Manganeso	0.15	0.08	249.83	2.68	0	3
Mercurio	0.001	0.00	101.65	0.0077	0	1
Potasio	100	8.33	89.72	92	0.93	0
Plomo	0.025	0.049	63.28	0.79	0	
Selenio	0.01	0.00	195.46	0.044	0.00006	1
Sodio	200	60.18	120.65	700	3.2	2
Magnesio	125	22.60	91.62	265.5	0.008	1

(1) Tomado como base la NOM-127-SSA1 -1994

(2) Parámetros fuera de norma debido a los límites de detección de las técnicas empleadas

<sup>15</sup>(Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente. Sistema de aguas de la Ciudad de México)



Todos los parámetros se reportan en ppm con las siguientes excepciones:

- Color = unidades de la escala platino – cobalto
- Conductividad en micromohos/cm
- pH sin unidades
- **Criterio de importancia:**
- 0 se tiene 0% de ocurrencias
- 1 es un problema frecuente de la demanda
- 2 es un problema frecuente en el proceso de potabilización del agua
- 3 es un problema que demanda atención inmediata

En el cuadro anterior, se observa que el contenido de cloruros, arsénico, zinc, cobre y potasio, son parámetros de la calidad del agua que en más de 40 años se han presentado en concentraciones muy por debajo de los límites permisibles establecidos en la Norma Nacional de agua para uso y consumo humano.

Parámetros como pH, el contenido de fluoruros, mercurio, selenio y magnesio, rara vez se presentan en concentraciones que exceden a los límites de calidad del agua.

Asociado a la explotación del manto acuífero, a la naturaleza geológica del subsuelo, se presentan cambios en la calidad del agua, los cuales con frecuencia se traducen en contenidos por arriba del límite permisible de calidad para los siguientes parámetros: color, conductividad, sólidos totales, alcalinidad, dureza, sulfatos, cromo, hierro, y contenido de coliformes fecales.

La presencia de coliformes fecales y el consumo elevado de oxígeno bajo condiciones moderadas de acidez, son indicativos de modificaciones del acuífero por materia orgánica. En el resto de los parámetros, su presencia puede relacionarse con la naturaleza geológica de la formación y su variación pudiera estar asociada en parte a los ritmos de extracción de agua y al abatimiento de los niveles estáticos.

El contenido de N-amoniaco y protéico así como del Calcio, Manganeso, y coliformes totales, se presentan en concentraciones anormalmente altas por lo que son indicativos de contaminación orgánica muy probablemente por filtraciones de aguas

negras. Estos son parámetros críticos de la calidad del agua, ya que afectan a la salud humana.

Los ritmos de explotación del acuífero es de 15.87 m<sup>3</sup>/s en 1999, lo que significa un fenómeno que ha ocasionado el abatimiento de los niveles estáticos, así como alteraciones en la calidad fisicoquímica del agua freática y muy probablemente el hundimiento del suelo

#### **1.4 GENERALIDADES DE LAS PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUA**

La calidad del agua cruda oscila grandemente de una fuente a otra; por ello el tipo de tratamiento requerido para producir agua potable también varía. Dependiendo de la calidad del agua cruda, el grado de complejidad de tratamiento es diferente.<sup>26</sup>

Cabe señalar que en la literatura pueden encontrarse diferentes procesos que pueden aplicarse para un mismo propósito, por tal motivo, para la selección de cualquiera de ellos es conveniente tomar en cuenta las experiencias previas y hasta donde sea posible, la disponibilidad en el mercado mexicano de los equipos y reactivos requeridos para cada proceso.

El tren de tratamiento del agua es muy variado, desde aquellos que incluyen únicamente una operación unitaria hasta otros que están formados por seis o más. En los trenes de tratamiento, se pueden encontrar unidades de aireación, oxidación, filtración, ablandamiento, intercambio iónico, adsorción, ósmosis inversa, etc.

En el Cuadro 2 se resumen algunos de los procesos de tratamiento de agua más usados en la actualidad.

<sup>26</sup> (Romero Rojas J.A.: (1978). Potabilización del Agua)

**CUADRO 2 PROCESOS DE TRATAMIENTO DE AGUA <sup>26</sup>**

PROCESO	PROPOSITO
<b>TRATAMIENTO PRELIMINAR</b>	
Cribado	Remoción de desechos grandes que pueden obstruir o dañar los equipos de la planta
Pretratamiento químico	Remoción eventual de algas y otros elementos acuáticos que causan sabor, olor y color
Presedimentación	Remoción de grava, arena, limo y otros materiales sedimentales.
Aforo	Medida del agua cruda por tratar
<b>TRATAMIENTO PRINCIPAL</b>	
Aireación	Remoción de hierro, manganeso, olores y gases disueltos; adición de oxígeno para mejorar sabor.
Coagulación/floculación	Conversión de sólidos no sedimentales en sólidos sedimentales.
Sedimentación	Remoción de sólidos sedimentables
Ablandamiento	Remoción de dureza
Filtración	Remoción de sólidos finos, flóculo en suspensión y la mayoría de los microorganismos
Adsorción	Remoción de sustancias orgánicas, cloro residual, olor y color
Intercambio iónico	Remoción de aniones o cationes
Osmosis inversa	Remoción de iones y moléculas

Estabilización	Prevención de incrustaciones y corrosión
Fluoruración	Prevención de caries dental
Desinfección	Exterminio de organismos patógenos

Se han formulado criterios generales de tratamiento de agua cruda, según la calidad de la fuente, las cuales sirven como guía. El Cuadro 3 resume las recomendaciones sobre requisitos de tratamiento, en relación con la calidad bacteriológica del agua cruda.

**CUADRO 3 REQUISITOS DE TRATAMIENTO EN RELACION CON LA CALIDAD BACTERIOLOGICA<sup>26</sup>**

GRUPO	TIPO DE TRATAMIENTO	CONTENIDO DE BACTERIAS COLIFORMES
1	Ninguno	Limitado a aguas subterráneas no sujetas a ningún tipo de contaminación.
2	Cloración	Promedio en cualquier mes 50/100 ml.
3	Complemento con filtración rápida en arena y poscloración	Promedio en cualquier mes 5000/100 ml. Sin exceder este valor en más del 20% de las muestras examinadas en cualquier mes
4	Tratamiento adicional: presedimentación y precloración	Promedio en cualquier mes 5000/100 ml pero excediendo este valor en más del 20% de las muestras analizadas en cualquier mes, y sin exceder de 20000/100ml en más del 5% de las muestras examinadas en cualquier mes.

El agua debe purificarse para que este siempre libre de todo organismo patógeno, es decir, que sea biológicamente segura. La desinfección es efectiva para dicho propósito si el agua carece de material suspendido. La posibilidad de que los microorganismos patógenos, especialmente los virus se encuentren embebidos dentro de un recubrimiento protector del material que produce turbiedad en el agua hace necesario, para una buena desinfección, la remoción previa de la turbiedad.

<sup>26</sup> (Romero Rojas J.A.; (1978).Potabilización del Agua)

El Comité de Control de Polución del Estado de California ha promulgado estándares de calidad del agua cruda para suministros domésticos, los cuales se incluyen en el Cuadro 4.

**CUADRO 4 ESTANDARES PARA FUENTES DE AGUAS CRUDAS, SUMINISTRO DOMESTICO<sup>26</sup>**

PARAMETRO	FUENTE EXCELENTE REQUIERE SOLAMENTE DESINFECCION COMO TRATAMIENTO	FUENTE BUENA REQUIERE TRATAMIENTO USUAL TAL COMO FILTRACION Y DESINFECCION	FUENTE POBRE REQUIERE TRATAMIENTO ESPECIAL O ADICIONAL Y DESINFECCION
DBO mg/L			
Promedio mensual	0.75-1.5	1.5 – 2.5	>2.5
Máximo diario, o muestra	1.0-3.0	3.0 – 4.0	>4.0
NMP de coliformes /100 mL promedio mensual	50-100	50 – 5000	>5000
máximo diario o muestra	<5% sobre 100	<20% sobre 5000	<5% sobre 20000
OD			
Promedio mg/L	4.0-7.5	4.0 – 6.5	4.0
% de saturación	>75	>60	-
pH promedio	6.0-8.5	5.0 – 9.0	3.8 – 10.5
cloruros mg/L máx	<50	50 – 250	>250
fluoruros mg/L	<1.5	1.5 – 3.0	> 3.0
fenoles mg/L máx	0	0.005	>0.005
color – en Upt/Co	0 – 20	20 – 150	>150
turbiedad, en UTN	0 – 10	10 – 250	>250

En el Cuadro 5 se efectúa un resumen de la frecuencia que inciden parámetros problemáticos de la calidad del agua en la zona oriente y sur del D.F. y que han demandado la instalación de plantas de potabilización.

<sup>17</sup>(Romero Rojas J.A.; (1978).Potabilización del Agua)

**CUADRO 5 FRECUENCIA DE PARAMETROS PROBLEMATICOS DE LA CALIDAD DEL AGUA <sup>15</sup>**

PARAMETRO	FRECUENCIA QUE APARECE COMO CRITICO
N – Amoniacal	68.8%
Color	60.0%
N – protéico	44%
Hierro	40%
Conductividad	40%
Manganeso	32%
Alcalinidad	32%
Sólidos disueltos totales	32%
Sodio	24%
Cloruros	16%
Sulfatos	8%
Dureza	8%

El nitrógeno amoniacal y protéico, así como el color son los parámetros que con mayor frecuencia (68% a 44% de las veces) requieren ser removidos con propósitos de potabilización del agua, ya que se presentan en el acuífero en concentraciones por arriba de los límites establecidos en la normatividad nacional.

Con el propósito de ilustrar el ordenamiento de los procesos y operaciones de tratamiento, así como sus diferentes aplicaciones se presentan en el Cuadro 6, algunos diagramas de bloques de plantas potabilizadoras de aguas.

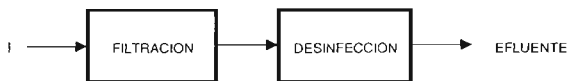
<sup>15</sup> (Gobierno del Distrito Federal. Secretaría del Medio Ambiente, Sistema de Aguas de la Ciudad de México.)

CUADRO 6 ALGUNOS DIAGRAMAS DE BLOQUES DE PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS<sup>15,26</sup>

PLANTA PARA UN SUMINISTRO PEQUEÑO CON AGUA CRUDA DE EXCELENTE CALIDAD



PLANTAS PARA AGUA CRUDA DE BUENA CALIDAD (FUENTE BUENA)

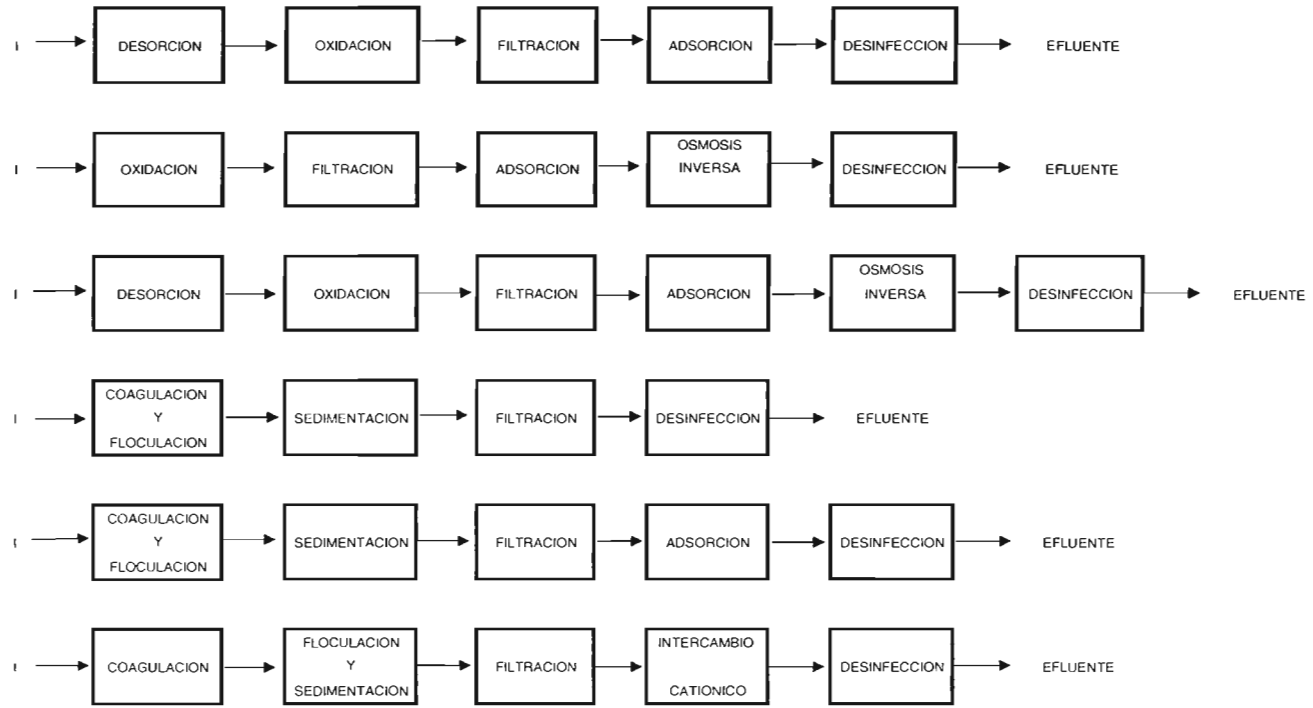


PLANTAS PARA AGUA CRUDA DE MALA CALIDAD (FUENTE POBRE)



<sup>15</sup> (G.O.F. Secretaría del Medio Ambiente, Sistema de Aguas de la Ciudad de México)

<sup>26</sup> (Romero Rojas J. A. (1978). Potabilización del agua)



NOMENCLATURA

I = INFLUENTE

41

<sup>15</sup> (G.D.F.Secretaría del Medio Ambiente, Sistema de Aguas de la Ciudad de México)

<sup>26</sup> (Romero Rojas J. A. (1978). Potabilización del agua)



El objetivo básico del diseño de una planta tratadora de agua es el de integrar, de la manera mas económica los procesos y operaciones de tratamiento para que, cuando sea operada adecuadamente pueda proveer sin interrupción del caudal de diseño y satisfacer los requerimientos de calidad de agua potable.

## **CAPITULO 2**

### **PRINCIPALES TRATAMIENTOS DEL AGUA A PIE DE POZO**

#### **PARA SU POTABILIZACION**

## 2.1 PROCESO DE EXTRACCION DE AGUA DE POZO

El agua circula continuamente a través del interminable ciclo hidrológico de precipitación o lluvia, escurrimiento, infiltración, retención o almacenamiento, evaporación, y así sucesivamente. Se entiende por fuente de abastecimiento de agua aquel punto o fase del ciclo natural del cual se desvía o aparta el agua, temporalmente, para ser usada regresando finalmente a la naturaleza.

Un inconveniente de los abastecimientos subterráneos es su tendencia a proporcionar aguas excesivamente duras, debido a los lavados de los depósitos minerales. Por otro lado, el abastecimiento subterráneo tiene la ventaja de proporcionar aguas que requieren un menor grado de tratamiento, porque las impurezas se eliminan en forma natural a medida que el agua atraviesa las capas del suelo y el subsuelo.<sup>8</sup>

**Pozos.** Los abastos de agua por medio de pozos profundos, son un recurso muy usado hoy en día. Estos tienen algunas ventajas sobre las aguas superficiales, entre las que se pueden citar, claridad, estar libre de colores orgánicos, sabores, olores y tienen una temperatura constante.

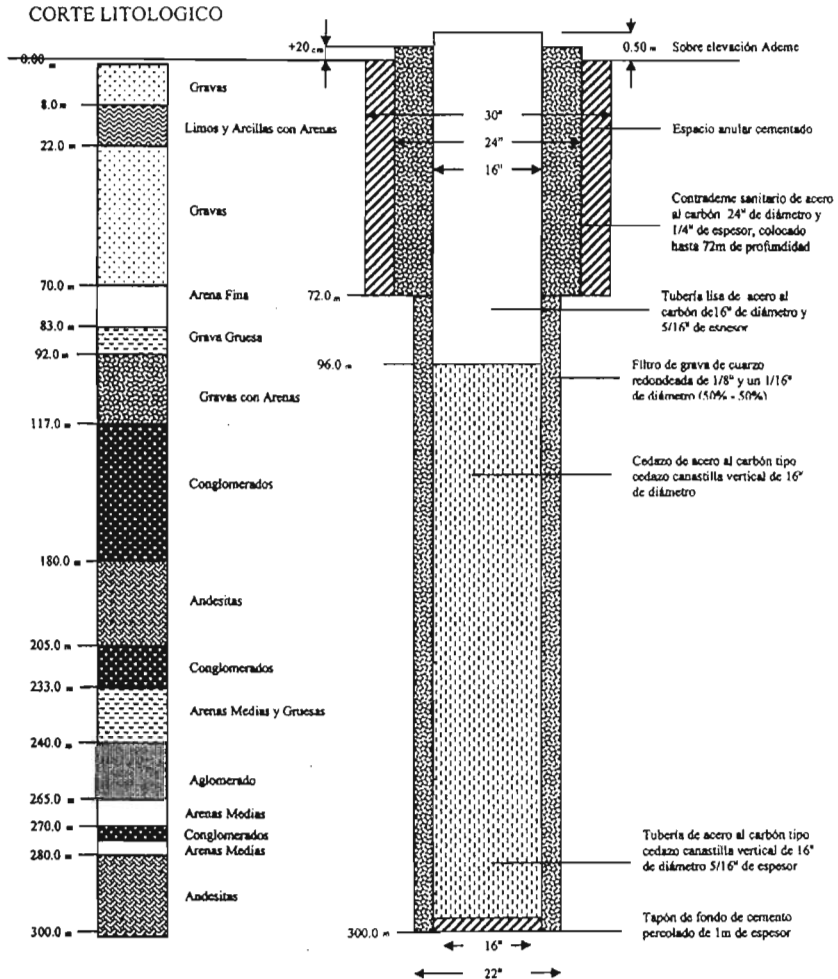
Los pozos profundos se dividen en dos clases principales, pozos profundos y poco profundos. Un pozo profundo es aquel que pasa a través de un estrato impermeable hasta localizar el agua que pasa debajo de él (Figura 1), mientras que un pozo poco profundo es el que meramente se extiende hasta una capa permeable para extraer el agua que pasa debajo de ella. La línea divisoria por lo que se refiere a profundidad, no es completamente clara, pero es práctica común de que pozos mayores de 30 m. son considerados como pozos profundos y los de menor profundidad como pozos no profundos.

Los pozos poco profundos usualmente son de material no consolidado y a menudo se cavan de manera que se les conoce como norias. El diámetro de estos pozos puede variar de 1 a 15 m.. Para hacer un pozo profundo generalmente se hace uso de

<sup>8</sup> (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York:(1980). Manual de Tratamiento de Aguas)

FIGURA 1 DIAGRAMA ESQUEMATICO DE UN POZO PROFUNDO <sup>15</sup>

DISEÑO DEFINITIVO DEL POZO  
AV. UNIVERSIDAD (165)



<sup>15</sup>(Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio ambiente, Sistema de Aguas de la Ciudad de México)

barrenas, las que son obviamente necesarias para taladrar estratos de roca dura. Los pozos profundos, pueden variar de 30 a más de 100 m., la mayoría de ellos está entre los 30 y poco más de 300 m, usualmente los pozos profundos se ademan para evitar derrumbes y aislar el agua de estratos indeseables. El ensanchamiento, empackado y desarrollo de los pozos, ya sea por retrolavado o por purga, son métodos que se usan para aumentar el flujo de agua y prevenir el taponamiento de los veneros por arena fija.

Los objetivos que se buscan obtener con un buen diseño de pozo son:

- Adecuado rendimiento y larga vida útil
- Agua de buena calidad
- Costo razonable <sup>6</sup>

La parte estructural de un pozo se encuentra constituida por dos elementos principales:

- Cámara de bombeo
- Sección de admisión <sup>6</sup>

La cámara de bombeo es la porción donde se aloja la bomba y el conducto vertical mediante el cual el agua asciende desde su nivel estático y/o dinámico hasta la introducción de la bomba. La porción de succión es la que se encuentra ademada con un tubo ranurado que permite el libre paso del agua y evita la filtración de material suelto.

La sección de admisión corresponde a la parte inferior de la estructura de un pozo en donde se realiza la introducción del agua del acuífero hacia el interior del tubo de ademe.

Equipo de bombeo. La función principal de una bomba es la de impartir energía hidráulica a un volumen de agua, originando de esta manera un flujo de corriente o movimiento. Las bombas se emplean para elevar el agua de su nivel de

<sup>6</sup> (Comisión Nacional del Agua; (1994). Manual de Diseño de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento)

almacenamiento (en el subsuelo), hasta la superficie del terreno, o simplemente para mover un fluido a través de un conducto de un lugar a otro.

Las bombas se clasifican en dos grupos:

- Bombas de desplazamiento constante
  - De émbolo o de pistón
  - Rotatorias
  - Rotor helicoidal
  
- Bombas de desplazamiento variable
  - Bombas centrifugas: de succión elevada, de turbina y de turbina sumergible
  - Bombas de chorro

Las bombas de desplazamiento constante, suministran esencialmente la misma cantidad de agua contra cualquier carga que este dentro de su capacidad de funcionamiento, y se emplean en pozos someros, domésticos y de monitoreo.

Bombas de desplazamiento variable. La característica que distingue estas bombas, es la relación inversa que existe entre el caudal que puede suministrar y la carga contra la cual se realiza el bombeo, es decir, el régimen de bombeo disminuye al aumentar la carga de presión. Actualmente son las más utilizadas en pozos profundos, especialmente el tipo de bombas sumergibles. En las Figuras 2 y 3, se muestran bombas para pozo profundo tipo turbina.

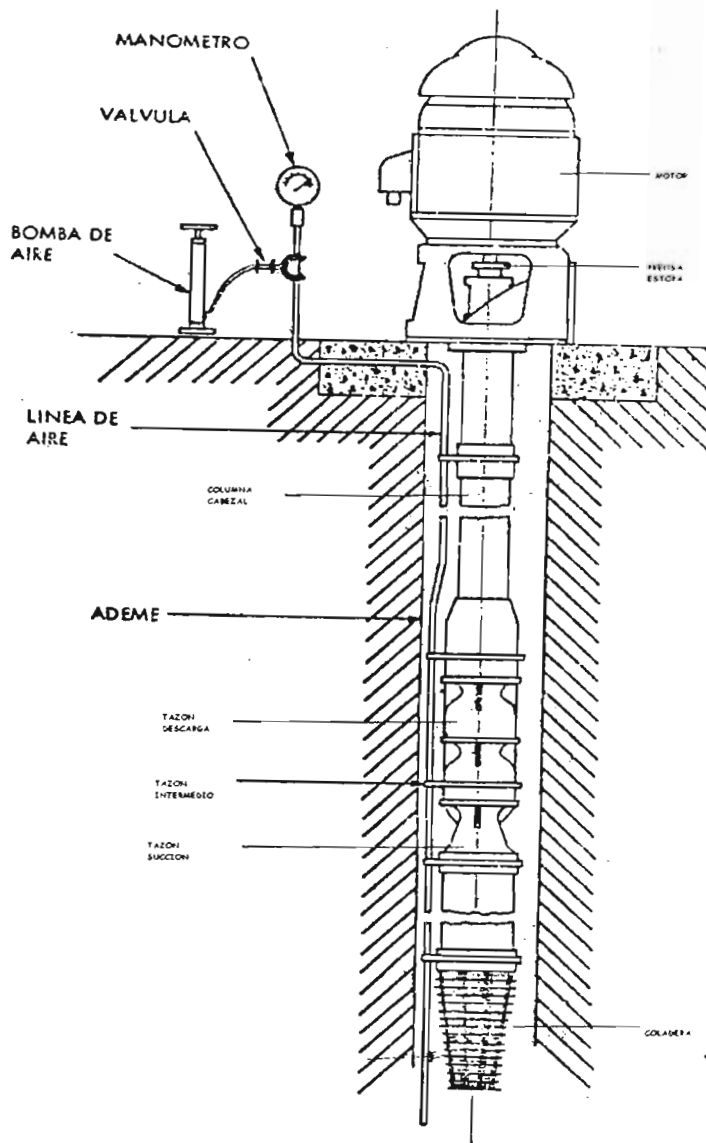


FIGURA 2 BOMBA DE POZO PROFUNDO TIPO TURBINA LUBRICADA POR AGUA

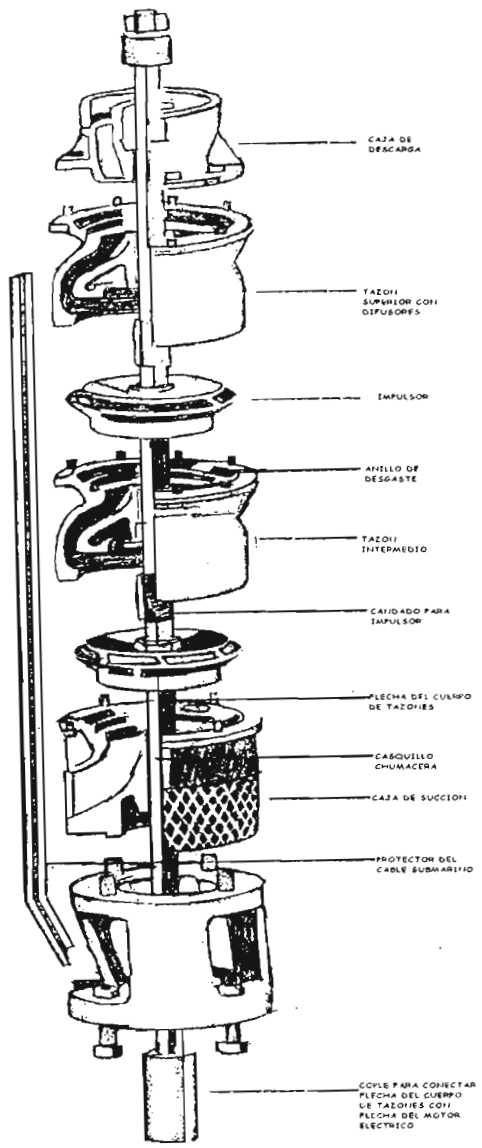


FIGURA 3 BOMBA DE POZO PROFUNDO TIPO TURBINA SUMERGIBLE



## 2.2 PROCESO DE OXIDACION (OZONO)

### 2.2.1 OZONO Y SUS PROPIEDADES

El ozono, proveniente de la palabra griega ozein, que significa oler, cuya fórmula molecular es  $O_3$ , es un gas inestable, de color azul, con olor característico picante, muy tóxico por inhalación, muy inestable y es uno de los oxidantes más fuertes que se conocen, para degradar o eliminar sustancias orgánicas y minerales entre los que se encuentran el hierro, manganeso, proteínas, ácidos aminados, compuestos responsables del deterioro del sabor, color y olor del agua, asimismo posee poderes bactericidas y viricidas.

Generalmente el ozono es encontrado en una mezcla diluida con aire u oxígeno y es formado fotoquímicamente en la atmósfera de la tierra, pero en la biosfera se encuentra en muy bajas concentraciones.

**Propiedades físicas.** Los valores de las constantes físicas del ozono son listados en la Tabla 2.

**TABLA 2 CONSTANTES FISICAS DEL OZONO**

CONSTANTE	VALOR
Peso molecular	48
Punto de ebullición (760 mmHg)	-111.9 °C
Punto de fusión (760 mmHg)	-192.7 °C
Temperatura crítica	-12.1 °C
Presión crítica	54.6 Kg/cm <sup>2</sup>
Densidad crítica	0.437 g/ml
Volumen crítico	0.147 l/mol
Densidad fase gas (0 °C)	2.144 g/l

Las reacciones del ozono con compuestos contaminantes son las siguientes:

- Oxidación de metales, como Hierro, Manganeso
- Oxidación de halógenos, como son Cloro, Bromo, Yodo
- Oxidación de amoníaco
- Oxidación de nitritos
- Oxidación de sulfuros
- Oxidación de cianuros
- Oxidación de hidrocarburos alifáticos, y sus derivados halogenados.
- Oxidación de alcoholes, éteres, aldehidos y ácidos carboxílicos
- Oxidación de compuestos aromáticos

## **2.2.2 APLICACIONES**

El ozono es usado en tres formas: como un biocida, como un oxidante clásico y como un pre-tratamiento para mejorar procesos subsecuentes. Dentro de las principales aplicaciones en el tratamiento de aguas potables para cada una de estas formas de acción tenemos:

### **ACCION COMO BIOCIDA (ACCION BIOLOGICA)**

Desinfección y control de algas. El ozono, debido a sus propiedades oxidantes, puede ser considerado como uno de los agentes microbicidas más rápido y eficaz que se conoce, su acción posee un amplio espectro que engloba la eliminación de:

- Bacterias (efecto bactericida)
- Virus (efecto viricida)
- Hongos (efecto fungicida)
- Esporas (efecto esporicida)

## **ACCION OXIDANTE CLASICA (ACCION QUIMICA)**

- Oxidación de contaminantes inorgánicos (Fierro, Manganese,..)
- Oxidación de microcontaminantes orgánicos:
  - a) A compuestos que producen olor y sabor de agua
  - b) Contaminantes fenólicos
  - c) Pesticidas
- Oxidación de macro contaminantes orgánicos
  - a) Eliminación de color

## **ACCION COMO UN PRETRATAMIENTO PARA MEJORAR PROCESOS SUBSECUENTES (ACCION INDIRECTA)**

- Mejora en la coagulación- floculación de varios compuestos

Los efectos coagulantes del ozono han sido usados con éxito en plantas potabilizadoras modernas de floculación- sedimentación- filtración y en plantas de filtración directa que usan una amplia variedad de medios filtrantes para el control de turbidez.

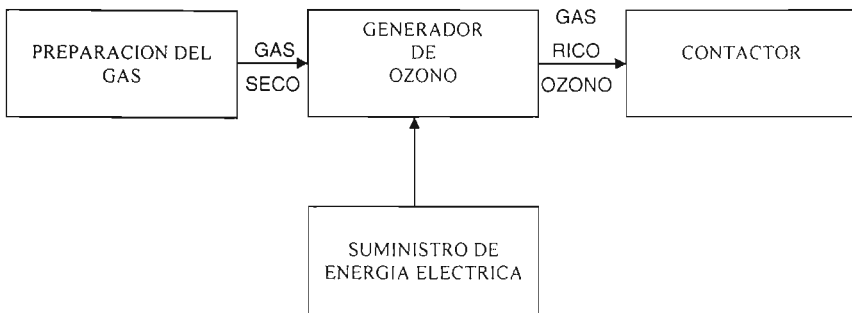
Los problemas más críticos en tratamiento de agua subterránea o agua de pozo son el hierro (Fe), el manganeso (Mn) y el ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ), los cuales están contenidos en muchas fuentes de agua subterránea en grandes cantidades causando así graves problemas de olor y sabor que pueden ser asociados con problemas bacteriológicos, clasificando el agua como no aceptable para consumo humano.

La mayoría de las fuentes de agua, ya sean subterráneas o superficiales, contienen hierro que es un elemento común en la naturaleza, de hecho más del 5% de la corteza terrestre está constituida de este material. El hierro natural se presenta comúnmente como un óxido insoluble, pero en el agua subterránea se presenta en forma soluble.

### 2.2.3 SISTEMA DE OZONACION

Los sistemas de ozonación están generalmente compuestos por cuatro componentes (Figura 4):

- Sistema de separación del gas de alimentación (limpio y seco).
- Los generadores de ozono.
- Los contactores, y
- Sistema de destrucción del gas residual.



**FIGURA 4 CUATRO COMPONENTES BASICOS DE UN SISTEMA DE OZONACION**

**Preparación del gas de alimentación.** El ozono es generado comúnmente usando el método de corona de descarga, a partir de una corriente de gas de alimentación que contiene oxígeno (aire u oxígeno), dicha corriente debe estar limpia y libre de humedad a fin de proteger el equipo de daños.

La concentración de ozono varía dependiendo de la fuente de gas de alimentación. El oxígeno gaseoso contiene cinco veces más moléculas de oxígeno que el mismo volumen de aire del ambiente.

Aunque el ozono puede ser generado por otras fuentes de energía, como la radiación ultravioleta, es la corona de descarga eléctrica el método mas empleado en el

tratamiento de aguas. Los generadores de corona de descarga eléctrica se encuentran disponibles en una variedad de configuraciones. La mayoría utiliza la configuración tubular horizontal con agua de enfriamiento. Existen otras alternativas como son el tubo vertical y plato dieléctrico, y la configuración con aire de enfriamiento. El ozono es formado en la corona de descarga por la interacción entre una descarga eléctrica y las moléculas de oxígeno de la corriente de gas que pasa a través del generador. La descarga es inducida por una corriente alterna la cual crea un ciclo de voltaje a través de una abertura entre dos electrodos. Uno de los electrodos está cubierto con vidrio o cerámica, material dieléctrico que proporciona una superficie pulida para distribuir la descarga eléctrica uniformemente a lo largo de la superficie.

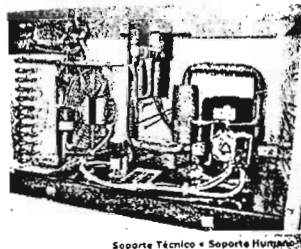
En la Tabla 3 se presentan las características de los generadores de ozono que existen comercialmente.

**TABLA 3 CARACTERISTICAS DE LOS GENERADORES DE OZONO<sup>20</sup>**

TIPO	FRECUENCIA(Hz)	VOLTAJE (Kv)	POTENCIA
Baja frecuencia	60	10 – 20	> ó = 0.4
Media frecuencia	700 – 800	8 – 14	> ó = 0.8
Alta frecuencia	2000 - 3000	8 – 10	1

En las Figuras 5, 6, 7 y 8 se muestran las partes que integran un generador de ozono típico (compresor, secador, tanque de oxígeno y generador de ozono ) en plantas potabilizadoras del Sistema de Aguas de la Ciudad de México.

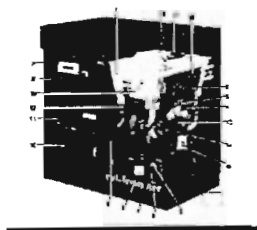
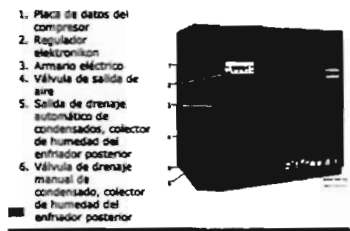
**SECADORES REFRIGERATIVOS**



**FIGURA 5 SECADORES REFRIGERATIVOS EN EL EQUIPO DE OZONACION**

<sup>20</sup> (Orta M.T Ozonación)

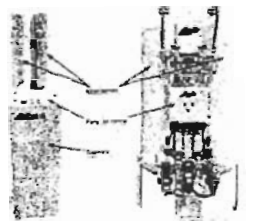
## FIGURA 6 COMPRESORES TIPO TORNILLO UTILIZADOS EN EL EQUIPO DE OZONACION



1. Enfriador posterior
2. Enfriador intermedio
3. Válvula todo/mada
4. Válvula de solenoide de carga
5. Tapón de llenado de aceite
6. Milla de nivel de aceite
7. Filtro de aceite
8. Válvula de drenaje de aceite
9. Motor de compresor
10. Colector de humedad enfriador posterior
11. Válvula de seguridad de alta presión
12. Válvula de retención
13. Elemento compresor de alta presión
14. Elemento compresor de baja presión
15. Respiradero

15. Motor de ventilador
17. Ventilador de enfriamiento
18. Refrigerador de aceite
19. Puerta de acceso a los enfriadores
20. Armario eléctrico
21. Regulador Elektronikon
22. Filtro de aire
23. Amortiguador de pulsaciones
24. Válvula de seguridad de baja presión
25. Colector de humedad, enfriador intermedio
26. Amortiguador de vibraciones
27. Preenfriador posterior
28. Válvula de regulación, flujo de agua a través de enfriador de aceite/enfriador intermedio
29. Válvula de regulación, flujo de agua a través de enfriador intermedio

## FIGURA 7 GENERADORES DE OXIGENO UTILIZADOS EN EL EQUIPO DE OZONACION



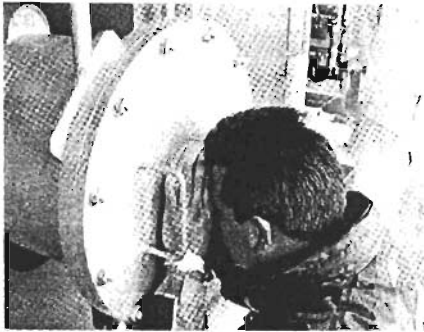
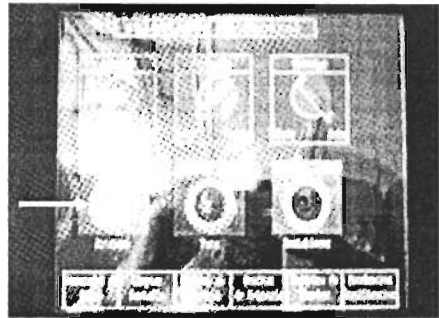
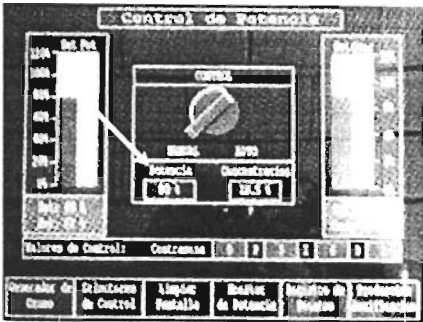


Fig. 44 - Efecto Corona.

Fotografía de la descarga del generador de ozono M. de Frise Circa 1906

## FIGURA 8 PANEL DE CONTROL Y EFECTO CORONA EN CALANDRIA DEL EQUIPO OZONADOR

**Cámara de contacto.** El contacto entre el ozono y el agua a tratar es un elemento muy importante en el sistema de ozonación, y debe diseñarse de tal manera que se maximice la transferencia del ozono gaseoso a la fase líquida. Esto se puede conseguir si existe una buena combinación en la cámara de contacto y un buen sistema de difusión. En la Tabla 4, se describen los diferentes tipos de difusores.

**TABLA 4 APLICACIONES DE LOS DIFERENTES TIPOS DE DIFUSORES<sup>20</sup>**

APLICACION	TIPO DE DIFUSOR
Desinfección primaria	Difusor de burbujas finas multietapas
Eliminación de hierro y manganeso	Difusor poroso de burbuja fina
Eliminación de color	Difusor tipo inyector Difusor de burbuja fina
Eliminación de olor y sabor	Difusor de burbuja fina multietapas
Eliminación de algas	Difusor tipo turbina
Remoción de partículas	Para eliminar partículas en etapas primarias de tratamiento, se han empleado diferentes sistemas de difusión, presentando todos satisfactorios

En la Figura 9 se muestran algunos tipos de contactores utilizados en plantas potabilizadoras.

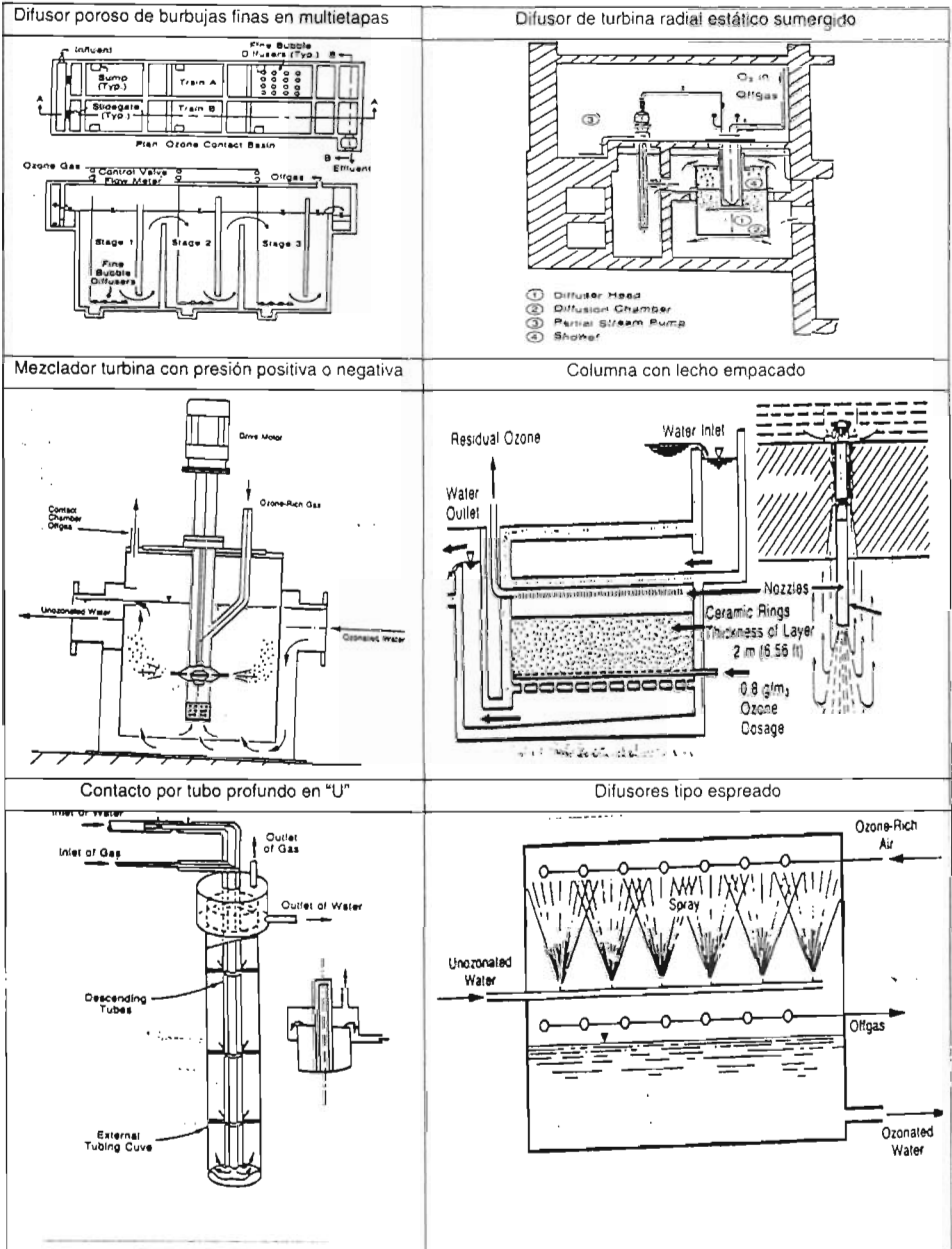
Para la disolución del ozono en el agua, se deben tomar en cuenta aspectos tales como:

- Diseño
- Condiciones de operación
- Funciones específicas del ozono (oxidación, desinfección)
- Puntos de aplicación y,
- Diseño de las cámaras de contacto

<sup>20</sup> (Orta M. T. Ozonación)



**FIGURA 9 SISTEMAS DE CONTACTO PARA OZONO<sup>20</sup>**



## 2.2.4 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

El ozono es un gas inestable el cual debe ser generado en el sitio. Dos de las importantes consideraciones en el diseño del proceso son:

- La transferencia de masa del ozono de la fase gaseosa a la acuosa, y
- La descomposición química del mismo que depende de las reacciones químicas que se producen en el agua a tratar.

El ozono es poco soluble en agua y en solución acuosa, su descomposición es dependiente del pH. Sus constantes de solubilidad siguen la ley de Henry, que varían en función del pH y la temperatura, así como por la presencia de impurezas que modifican estos valores.<sup>28</sup>

La constante de Henry es:

$$H_A = 3.84 \times 10^7 (\text{OH}^-)^{0.035} \exp(-2428/T)$$

Donde:

$H_A$ : constante de solubilidad de la ley de Henry (atm/fracción mol)

$(\text{OH}^-)$ : concentración del ión hidróxido

T: temperatura (K)

Considerando un sistema de agua pura, la solubilidad del ozono se tiene:

$$(\text{O}_3) = 1.80 \times 10^{-2} \text{PO}_3 / H_A$$

Donde:

$(\text{O}_3)$ : solubilidad del ozono (M)

$(\text{PO}_3)$ : presión parcial del ozono en el aire saturado (atm)

<sup>28</sup> (Weber W. J.,(1979). Control de la Calidad del Agua. Procesos Físicoquímicos)

La ecuación general de transferencia de masa específica:

$$N_a = K_{La} ( (O_3)^*_{L} - (O_3)_L ) V$$

Donde:

$N_a$ : transferencia de masa por unidad de tiempo

$K_{La}$ : coeficiente de transferencia de masa

$(O_3)^*_{L}$ : concentración de saturación de ozono en fase líquida

$(O_3)_L$ : concentración instantánea de ozono en fase líquida

$V$ : volumen de líquido

El coeficiente de transferencia de masa,  $K_{La}$ , depende de la configuración física del reactor y de la transferencia de gas.

El efecto químico de la desintegración del ozono con las materias contenidas en el agua, dependen esencialmente de dos reacciones simultaneas que se llevan a cabo durante el mecanismo de oxidación.

- Una reacción directa del ozono disuelto con las materias en solución.
- Una reacción de radicales libres  $OH^\cdot$ , formados después de la descomposición del ozono.

La descomposición del ozono en agua se presenta con las siguientes reacciones:



Dentro de los principales factores que afectan la efectividad de un proceso de ozonación, se encuentran:

- Tiempo de contacto
- Dosis de ozono
- Calidad del agua

El tiempo de contacto puede ser clasificado en tres fases:

Fase 1: Demanda de ozono que es transferido sin residual

Fase 2: Mantener un residual de ozono (medición de residual)

Fase 3: Fase de destrucción del residual (eliminación de ozono y oxígeno)

El tiempo requerido para la fase 1, típicamente es de 1 a 4 minutos y depende de la velocidad de aplicación y del tipo de agua a ser tratada. El tiempo de contacto en la fase 2 es importante para la inactivación microbiológica; la inactivación máxima ocurre cuando el ozono residual (en mg/l) y tiempo de contacto (en min) excede de 5. Con residuales de 0.5 – 1.0 mg/l, el tiempo de contacto en la fase 2 debe ser de 5 a 10 minutos.<sup>18</sup>

En base a datos publicados en Europa, los parámetros considerados para el diseño de la cámara de contacto del ozono, se muestran en la Tabla 5. En la Figura 10 se muestra una cámara de contacto de ozono.

<sup>18</sup> (Montgomery J.,(1985): Water Treatment Principles and Design)

**TABLA 5 PARAMETROS DE DISEÑO EN CAMARAS DE CONTACTO <sup>18</sup>**

PARAMETRO	CRITERIO
Altura	3 – 5 m (10 – 16 ft)
Compartimientos	No menos de dos etapas en serie y una etapa de desgasificación
Tiempo de contacto	5 minutos por etapa
Desgasificación	El exceso de ozono u oxígeno debe ser eliminado en la etapa final (tiempo de retención 30 – 120 segundos)
Dosis de aplicación	1.0 – 4.0 mg/l para plantas de agua potable, dependiendo de la calidad del agua
Requerimiento de energía para ozonadores y compresores	30 KW-hr/kg ozono (13.6 KW – hr/lb)

<sup>18</sup>(Montgomery J.,(1985).Water Treatment Principles and Design)

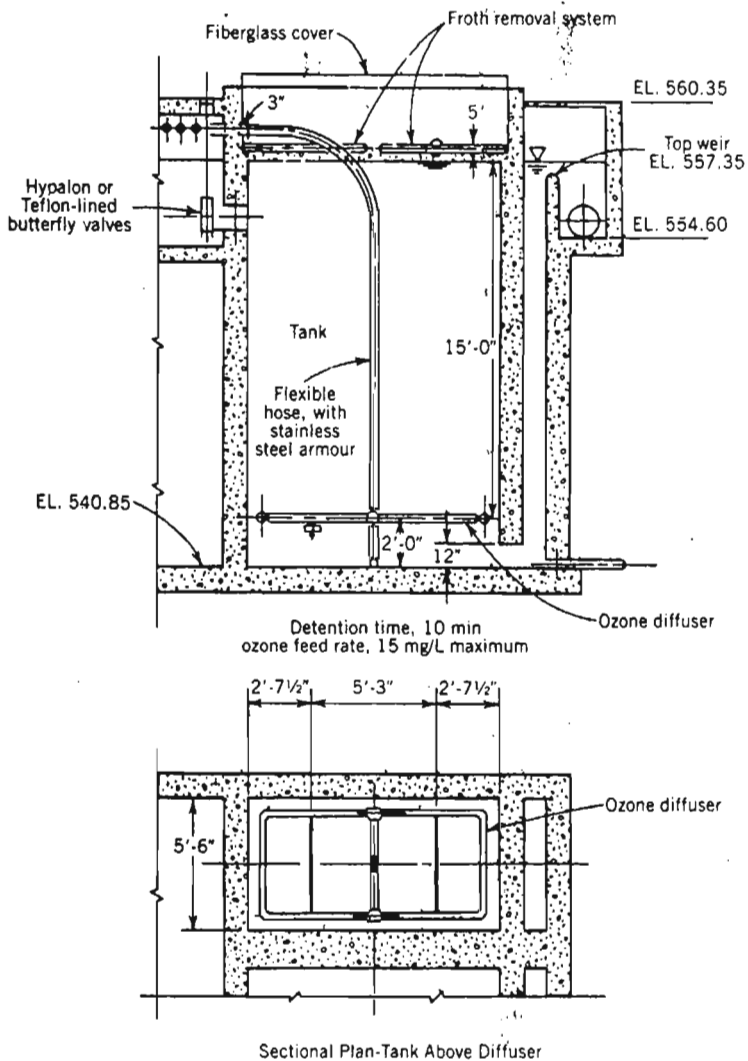


FIGURA 10 DETALLE TIPICO DE UNA CAMARA DE CONTACTO DE OZONO<sup>18</sup>

<sup>18</sup> (Montgomery J.;(1985). Water Treatment Principles and Design)

## 2.3 PROCESO DE FILTRACION DEL AGUA

### 2.3.1 FILTRACION

La filtración es la operación unitaria utilizada en el tratamiento de agua para llevar a cabo la remoción de partículas suspendidas y la materia coloidal comúnmente encontradas en el agua, en este proceso el agua pasa a través del medio filtrante y la materia en suspensión se acumulará ya sea en la superficie o será capturada a través de la profundidad del lecho filtrante, el material suspendido puede consistir de partículas en un amplio rango de tamaños entre los cuales se encuentran algas, compuestos húmicos coloidales, virus, bacterias, etc.

En resumen la filtración:

- Disminuye la carga de sólidos y material coloidal en el agua.
- Remueve partículas y material coloidal no sedimentable después de la floculación biológica o química de ambas.
- Incrementa la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, fósforo, DBO, DQO, metales pesados, bacterias, virus y otras sustancias.
- Mejora la eficiencia y reduce el costo de desinfección a través de la remoción de materia orgánica suspendida y otras sustancias interferentes.
- Asegura la operación continua de la planta y una calidad del efluente constante.

Dentro de los aparatos utilizados en filtración tenemos:

- Filtros prensa (discontinuos de presión)
- Filtros espesadores de presión (continuos de presión)
- Filtros rotatorios
- Filtros centrífugos
- Filtros de aire
- Filtros de arena a presión
- Filtros rápidos de arena o abierto

En el Sistema de Aguas de la Ciudad de México, para efectos de potabilización, lo más comunes son los filtros presurizados y filtros de gravedad. Generalmente los filtros usados para la filtración de agua, casi todos son de diseño que emplea material granular como medio filtrante, tales como arena fina, a través de los cuales el agua se filtra en flujo descendente. A este tipo de filtros se les conoce genéricamente como filtros de arena. Hay dos tipos generales de filtros de arena que se utilizan para la purificación de agua. Se clasifican como filtros de arena de acción lenta y filtros de arena de acción rápida. Difieren principalmente en la velocidad a la que operan, pero también tienen diferencias esenciales en su teoría y operación. Los filtros de arena a su vez se clasifican como filtros de gravedad y filtros de presión.<sup>10</sup>

En los filtros de arena de acción rápida, el agua pasa hacia abajo, a través de la arena a una velocidad relativamente alta, usualmente a 2 o 3 gpm/ft<sup>2</sup> de arena de filtro. En un filtro de arena de acción lenta el agua pasa a través del lecho de arena a baja velocidad, normalmente a unos 0.05 a 0.15 gpm/ft<sup>2</sup>.

Actualmente, se utiliza el filtro rápido o americano. La velocidad de filtración por este tipo de filtros es de 3 gpm/pie<sup>2</sup> para uso municipal se diseñan con 2 gpm/pie<sup>2</sup>. Como se ha dicho los filtros rápidos se pueden dividir en dos clases: (1) de presión, (2) de gravedad. En las instalaciones industriales se usa casi siempre el primer tipo. Pero cuando se manejan grandes volúmenes de agua se usa el de tipo gravedad, principalmente en el proceso de ablandamiento de cal en frío.

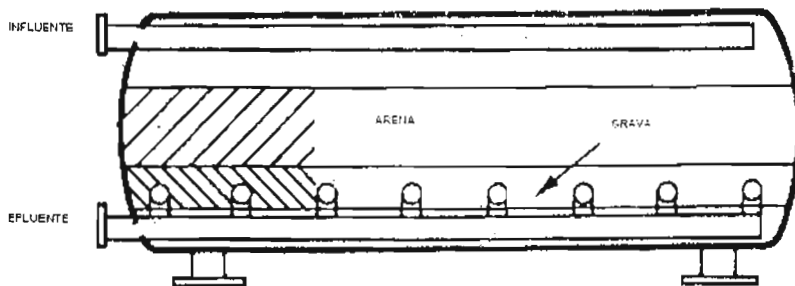
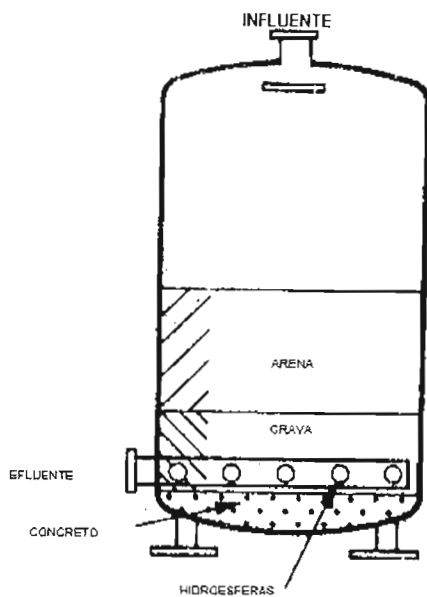
### 2.3.2 FILTROS DE PRESION

En el caso particular de la planta San Sebastián Tecoloxtitla, la filtración que se utiliza es del tipo a presión. Los filtros de presión se fabrican en el tipo vertical y horizontal Figura 11. Los filtros están formados por una coraza metálica cilíndrica con tapas abombadas que contienen una capa de medio filtrante (arena o antracita) soportado por capas de grava o antracita, donde la fuerza impulsora es ejercida por la presión

<sup>10</sup>(Eskel Nordel; (1984). Tratamiento de Agua para la Industria y Otros Usos)



FILTRO VERTICAL



FILTRO HORIZONTAL

FIGURA 11 FILTROS DE PRESION: TIPO VERTICAL Y HORIZONTAL<sup>24</sup>

<sup>24</sup>(Reynolds and Richards; (1982). Unite Operations and Process in Environmental Engineering)

por la presión de un bombeo. Los filtros a presión están equipados con los accesorios necesarios para llevar a efecto las operaciones; (1) filtración, (2) retrolavado y (3) enjuague. Los filtros verticales varían de 30 cm a 3 m de diámetro, y tienen velocidades de filtración de 2 a 10 gpm/pie<sup>2</sup> de superficie filtrante. La altura de los filtros verticales es usualmente de 1.6 m en la parte cilíndrica, aunque ocasionalmente se usan de 1.2 m. los filtros horizontales tienen 2.5 m. de diámetro y su longitud varia de 3.5 m a 8.5 m. y tienen capacidades de 201 a 516 gpm.

Dependiendo de los requerimientos, las instalaciones pueden contar con una o más unidades. La Tabla 6 enlista las capacidades, a 3 gpm/pie<sup>2</sup> de unidades simples y baterías de 2 a 6 unidades de filtros verticales de 75 cm a 3 m. de diámetro. La Tabla 7 enlista las capacidades de los filtros horizontales desde 2.5 de diámetro y con longitud de 3.5 a 8.5 m.

En estas unidades, la filtración se efectúa pasando el agua en flujo descendente a través de un lecho de arena fina soportada por lechos de gravas graduadas. El material mas ampliamente usado y también el más antiguo es la arena. En segundo lugar la antracita lavada y graduada. La ventaja de usar un medio filtrante granular es que en la operación de lavado, el lecho se expande provocando que la materia insoluble retenida en el filtrado sea puesta en libertad.

**TABLA 6 FILTROS VERTICALES: AREAS, RETROLAVADO Y VELOCIDADES DE FILTRACION DE UNIDADES SIMPLES Y BATERIAS DE 2 A 6 UNIDADES, CON UNA VELOCIDAD DE FILTRACION DE 3 GPM/PIE<sup>2</sup> (10)**

Diámetro plg	Unidades simples			Flujo total por batería (gpm)				
	Area (pies <sup>2</sup> )	Retrolavado (gpm)	Flujo (gpm)	2 unidades	3 unidades	4 unidades	5 unidades	6 unidades
30	4.9	49	15	30	45	60	75	90
36	7.1	70	21	42	63	85	105	125
42	9.6	96	29	58	87	115	145	175
48	12.6	126	38	75	113	150	190	225
54	15.9	159	48	95	143	190	240	285
60	19.6	196	59	118	177	235	295	355
66	23.8	238	71	143	215	285	375	430
72	28.3	283	85	170	255	340	425	510
78	33.2	332	100	200	300	400	500	600
84	38.5	385	116	230	350	460	580	695
90	44.2	442	133	265	400	530	665	795
96	50.3	503	150	300	450	605	755	905
102	56.8	568	170	340	510	680	850	1020
108	63.6	636	190	380	570	765	955	1145
120	78.5	785	235	470	705	945	1180	1415

**TABLA 7 FILTROS HORIZONTALES: AREAS, RETROLAVADO Y VELOCIDADES DE FILTRACION DE UNIDADES SIMPLES Y BATERIAS DE 2 A 6 UNIDADES, DE 2.5 M DE DIAMETRO A UNA VELOCIDAD DE FILTRACION DE 3 GPM/PIE<sup>2</sup>. (10)**

Longitud	Unidades simples			Flujo total por batería (gpm)				
	Area (pies <sup>2</sup> )	Retrolavado (gpm)	Flujo (gpm)	2 unidades	3 unidades	4 unidades	5 unidades	6 unidades
10' 6"	67	840	201	400	600	800	1000	1200
12' 2"	79	960	237	475	710	1050	1185	1420
14' 5"	95	1140	285	570	855	1140	1425	1710
16' 5"	109	1300	327	655	980	1310	1635	1960
18' 3"	124	1460	372	745	1115	1490	1860	2230
20' 2"	137	1600	411	820	1235	1645	2055	2465
25' 0"	172	2000	516	1030	1550	2065	2580	3095

<sup>10</sup>(Eskel Nordel; (1984). Tratamiento del Agua para la Industria y Otros Usos)

**Medio filtrante:** *grava y arena.* Con los filtros de arena las capas del medio filtrante de la parte superior al fondo, para filtros de tipo vertical, puede ser lo siguiente :

12" arena fina, 0.45 a 0.5 mm tamaño efectivo.

10" arena gruesa, 0.8 a 1.2 mm tamaño efectivo.

4" grava delgada, 1/8" a 1/4".

4" grava mediana, 1/4" a 1/2 "

8" grava gruesa, 1/2" a 1".

Con los filtros horizontales se usa el siguiente medio filtrante:

18" antracita, 0.55 a 0.65 mm tamaño efectivo.

10" arena fina, 0.8 a 1.2 mm, tamaño efectivo.

6" grava delgada, 1/8" a 1/4"

4" grava mediana, 1/4" a 1/2"

4" grava gruesa, 1/2 a 1"

**Drenes.** Las capas de arena y grava o de antracita, están colocadas sobre un sistema colector- distribuidor que sirve al doble propósito de (1) recoger el agua filtrada durante la operación de filtrado, y (2) distribución del agua de retrolavado durante la operación de limpieza para lavar bien el filtro.

**Deflectores de entrada.** En los filtros de tipo vertical a presión, el flujo de agua a la entrada se amortigua por medio de un deflector colocado en la parte superior del filtro. El propósito de este deflector es evitar que el agua golpee directamente la superficie del lecho de arena, evitando rugosidades y durante el retrolavado el agua se colecta en la parte superior de este deflector. En el tipo de filtro horizontal, se usa un distribuidor perforado para dispersar el agua que entra al filtro durante la filtración y retirar el agua de retrolavado.

**Operación de los filtros.** Cuando un filtro se pone en operación de filtrado, por algunos minutos el agua que se filtra se manda al drenaje. Esto se debe a que una buena acción filtrante no se asegura sino hasta después de que el lecho filtrante se haya compactado y se acumule en su superficie una pequeña cantidad de flóculos. La

eficiencia de la filtración se checa fácilmente tomando muestras y viendo su claridad. Tan pronto como el efluente sea claro, se deja de mandar agua al drenaje y el filtro se pone en línea. Los filtros de presión generalmente se operan a 5 gpm/pie<sup>2</sup> de área de filtración, es buena práctica no exceder este límite excepto en periodos de tiempo muy cortos. La operación de filtrado se continúa hasta que los indicadores de pérdida de carga muestran que se deben retrolavar los filtros. Usualmente los filtros no se lavan antes de que haya una pérdida de carga de 5 lb/plg<sup>2</sup>, y raramente se continúan operando más allá de las 8 lb/plg<sup>2</sup>. El flujo mínimo para retrolavar un filtro de presión son 10 gpm/pie<sup>2</sup> y se prefieren flujos más altos. El retrolavado se lleva a cabo durante 8 o 10 minutos.

Las variables generales de operación y diseño de filtros se muestran en la Tabla 8, estas variables permiten:

- Caracterizar el material filtrante
- Estimar la pérdida de carga con fines de diseño
- Caracterizar el material que será filtrado

#### **TABLA 8 VARIABLES GENERALES DE OPERACION Y DISEÑO**

1. Tamaño del medio filtrante, densidad y composición
2. Porosidad
3. Pérdida de carga producida por el lecho limpio
4. Profundidad del medio filtrante
5. Tasa de filtración
6. Pérdida de carga permisible
7. Características del influente
  - a).- Concentración de sólidos suspendidos
  - b).- Distribución y tamaño del flóculo
  - c).- Estabilidad del flóculo
  - d).- Carga eléctrica del flóculo

## TIPO DE MEDIO FILTRANTE

El medio filtrante usado en plantas de tratamiento de agua, está constituido por arena sílica, antracita, granate o una combinación de dichos materiales. Los filtros utilizan generalmente un solo medio, arena o antracita; un medio dual, arena y antracita, o un lecho mezclado: arena, antracita y granate o ilmita. La forma tiene importancia no sólo por el aspecto hidráulico (pérdida de carga inicial) sino por la relación superficial a volumen, ya que el proceso de la filtración tiene relación directa con el área total de granos.

El medio ideal debe poseer un tamaño tal que permita obtener un efluente satisfactorio; debe ser de un material durable, capaz de retener la máxima cantidad de sólidos y ofrecer facilidad para limpiarlo con una cantidad mínima de agua de lavado, para ello se utilizan los parámetros de tamaño efectivo y coeficiente de uniformidad para caracterizar medios filtrantes.

El tamaño efectivo (TE) es el tamaño del tamiz, en mm, que permite el paso del 10% del medio filtrante. El coeficiente de uniformidad (CU) es la relación que existe entre los tamaños de mallas que dejan pasar un 60% y un 10% respectivamente. En la Tabla 9 se muestran granulometrías típicas de arena y antracita para filtros duales y en la Tabla 10 resume algunas de las principales características de los filtros más utilizados en el tratamiento de agua potable.

**TABLA 9 FILTRO TIPO DE MEDIO DUAL<sup>26</sup>**

Característica		Valor	
		Intervalo	Típico
<b>ANTRACITA</b>			
	Profundidad, cm	20-60	46
	TE, mm	0.8-2.0	1.2
	CU	1.4 – 1.8	1.5
<b>ARENA</b>			
	Profundidad, cm	25 – 60	30
	TE, mm	0.3 – 0.8	0.5
	CU	1.2 – 1.6	1.4
<b>TASA DE FILTRACION, m/d</b>		120 – 600	350

**TABLA 10 PRINCIPALES CARACTERISTICAS DE FILTROS<sup>26</sup>**

Característica	Filtros lentos de arena	Filtros rápidos de arena	Filtros de alta tasa
Tasa de filtración	2 – 5 (<12 m/d)	120 m/d	180 – 480 m/d
Medio	Arena	Arena	Arena y antracita
Distribución del medio	No estratificado	Estratificado: fino a grueso	Estratificado: grueso a fino
Duración carrera	20 – 60 días	12 – 36 horas	12 -36 horas
Pérdida de carga	Inicial: 0.6 m Final: 1.2 m	Inicial: 0.3 m Final: 2.4 – 3 m	Inicial: 0.3 m Final: 2.4 – 3m
Agua de lavado	No usa	2 – 4% del agua filtrada	6% del agua filtrada
Profundidad del medio	0.6 – 1.0 m	0.60 – 0.75 m	Antracita: 0.4 – 0.6 m Arena: 0.15 - 0.3 m
Profundidad de grava	0.30 m	0.30 – 0.45 m	0.30 – 0.45 m
Drenaje	Tubería perforada	Tubería perforada Falsos fondos	Tubería perforada Falsos fondos

<sup>26</sup> (Romero Rojas J. A.; (1978). Potabilización del agua)

### 2.3.3 FILTROS DE GRAVEDAD

Los filtros de gravedad no se emplean en la industria tan extensamente como los filtros de presión sin embargo también se usan (Figura 12). Para las aplicaciones industriales generalmente se operan a  $3 \text{ gpm/pie}^2$ ; en la práctica municipal se emplea una velocidad de filtración de  $2 \text{ gpm/pie}^2$ .

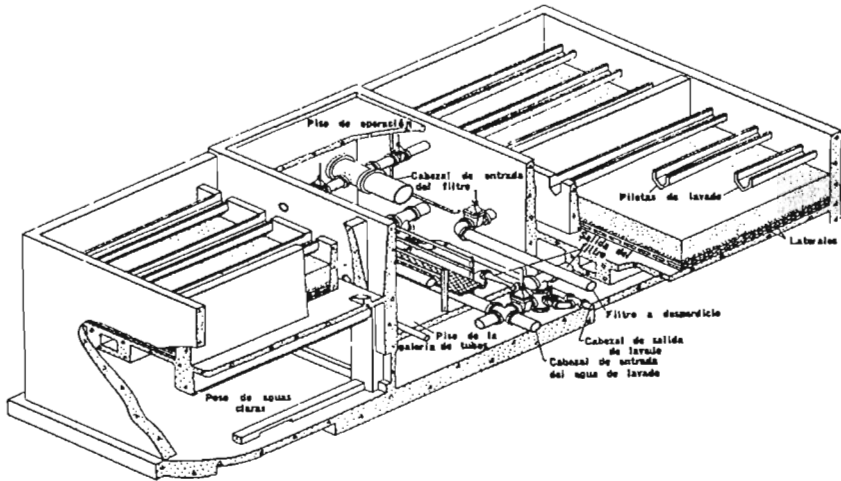


FIGURA 12 FILTRO DE GRAVEDAD DE ACCION RAPIDA<sup>22</sup>

Los filtros de gravedad pueden construirse de concreto, acero o madera pero el concreto es el material que más se usa. También la forma más usada es la rectangular aunque en las plantas más pequeñas son circulares y hechos ya sea de acero o concreto. En la Tabla 11 se incluyen tamaños de filtros para plantas de filtración por gravedad, basados en flujos de 2 y  $3 \text{ gpm/pie}^2$ .

<sup>22</sup> (Ramalho R.S; (1991). Tratamiento de Aguas Residuales)



**TABLA 11 TAMAÑOS DE FILTROS DE GRAVEDAD CON UNA VELOCIDAD DE FILTRACION DE 2 GPM/PIE<sup>2</sup> Y 3 GPM/PIE<sup>2</sup> <sup>(10)</sup>**

Capacidad de la planta		Datos generales				
(gpm)	(mgd)	Número de filtros	Tamaño	Area (pie <sup>2</sup> )	Velocidad de filt.(gpm/pie <sup>2</sup> )	Retrolavado (gpm)
2 gpm/pie <sup>2</sup>						
50	0.07	1	5' 0" x 5'0"	25	2	500
100	.14	2	5' 0"x5'0"	25	2	500
200	.29	2	6'0"x9'0"	54	1.85	1080
300	.43	2	7'6"x10'0"	75	2.0	1500
500	.72	2	9'0"x14'0"	126	1.98	2520
700	1.00	2	12'0"x15'0"	180	1.94	3600
1040	1.50	2	12'0"x21'0"	252	2.06	5040
2080	3.00	4	12'0"x21'0"	252	2.06	5040
3470	5.00	4	18'0"x24'0"	432	2.00	8640
3 gpm/pie <sup>2</sup>						
50	0.07	1	5'0"x5'0"	25	2	500
100	.17	2	5'0"x5'0"	25	2	500
200	.29	2	5'0"x7'6"	37.5	2.68	750
300	.43	2	6'0"x9'0"	54	2.78	1080
500	.72	2	8'0"x11'0"	88	2.84	1760
700	1.00	2	9'0"x13'0"	117	2.99	2340
1040	1.50	2	12'0"x15'0"	180	2.89	3600
2080	3.00	4	12'0"x15'0"	180	2.89	3600
3470	5.00	4	15'0"x21'0"	315	2.76	6300

**Medio filtrante: grava y arena.** Con los filtros de grava y arena tipo gravedad, las capas de estos materiales del fondo hacia arriba son:

4" capa de grava de ¼" a ½"

5" capa de grava de ½" a 1"

5 "capa de grava de 1" a 1 ½"

4"capa de grava de 3/32" a 3/16"

6" arena gruesa de 0.8 a 1.2 mm. Tamaño efectivo

24" arena fina de 0.4 a 0.5 mm. Tamaño efectivo

<sup>10</sup> (Eskel Nordel; (1984). Tratamiento de Agua para la Industria y Otros Usos)

## 2.4 PROCESO DE ADSORCION CON CARBON ACTIVADO

### 2.4.1 ADSORCION

La adsorción es la operación unitaria en la que se transfiere un compuesto presente en la fase líquida o gaseosa hacia la superficie de una fase sólida. El material que se concentra en la superficie o se adsorbe se llama adsorbato y la fase adsorbente se llama adsorbente. El carbón activado es un adsorbente ampliamente usado en tratamiento de agua, debido a que adsorbe una amplia variedad de compuestos orgánicos y su uso es económicamente factible. En el tratamiento de agua es usado para remover compuestos que causan olor, sabor y color. En tratamientos especiales de aguas es usado para adsorber compuestos orgánicos y en tratamiento de aguas industriales es usado principalmente para adsorber compuestos orgánicos tóxicos. La forma más comúnmente usada es en columnas de lecho fijo. El carbón activado generalmente es usado en forma granular o en polvo. Ocasionalmente el carbón activado es usado en polvo en donde muchas veces no hay regeneración ni recuperación. Esta aplicación es poco usada en el tratamiento de agua potable.

La adsorción de una molécula en la superficie sólida puede ser física y reversible (fisisorción) o química e irreversible (quimisorción). En la fisisorción intervienen esencialmente fuerzas de Van der Waals, la energía involucrada es baja ( $< 40$  kJ/mol). La quimisorción se realiza por una reacción entre la molécula y los grupos funcionales de la superficie de la adsorbente, la energía que interviene es más elevada ( $> 40$  kJ/mol).

La adsorción física, en general, predomina a temperatura baja, y se caracteriza por una energía de adsorción relativamente baja, es decir, el adsorbato no está adherido tan fuertemente al adsorbente, como en la adsorción química. Los procesos de adsorción química exhiben elevadas energías de adsorción, debido a que el adsorbato forma unos enlaces fuertes localizados en los centros activos del adsorbente. La interacción química entre la adsorbente y el adsorbato viene favorecida por una temperatura más

elevada, debido a que las reacciones químicas proceden más rápidamente a temperaturas elevadas, que más bajas. De hecho no es fácil distinguir entre adsorción física y química.

#### **2.4.2 MECANISMO DE LA ADSORCION**

El mecanismo de la adsorción ha sido representado y descrito por varios autores (Weber y Smith, 1978, Crittenden y col.; 1987; Zarrouki, 1990). Weber y Smith (1978) proponen que la transferencia de un adsorbato de la fase líquida hacia un sitio de adsorción se realiza en cuatro etapas principales:

1. Transferencia del adsorbato de la fase líquida externa hacia la fase líquida situada a proximidad de la superficie del adsorbente.
2. Transferencia del adsorbato a través de la película líquida hacia la superficie del adsorbente
3. Difusión del adsorbato al interior de los poros del adsorbente bajo el efecto de un gradiente de concentración. La molécula puede ser difundida de un sitio de adsorción a otro (difusión superficial) ó difundir en la fase líquida al interior del grano hasta un sitio de adsorción (difusión porosa).
4. Adsorción. La última etapa es la adsorción del soluto en las superficies interiores que bordean los espacios porosos y capilares de la adsorbente.

De esta manera el proceso de adsorción comprende tres etapas de transferencia y una etapa de fijación sobre el material, la cual es la adsorción propiamente dicha. Debido a que esas cuatro etapas se efectúan en serie, la velocidad de adsorción está limitada por la etapa más lenta. La última etapa es extremadamente rápida, con respecto a las otras tres y su contribución a la cinética del proceso es despreciable.

**Modelización de la adsorción para sistemas discontinuos y de flujo continuo.** La construcción y la supervisión del funcionamiento de las unidades de carbón activado para el tratamiento de aguas deben ser capaces de representar la evolución de las curvas de saturación del adsorbente(carbón activado) a partir de datos relativamente

simples de obtener, tales como las características del agua a tratar y las condiciones hidrodinámicas.

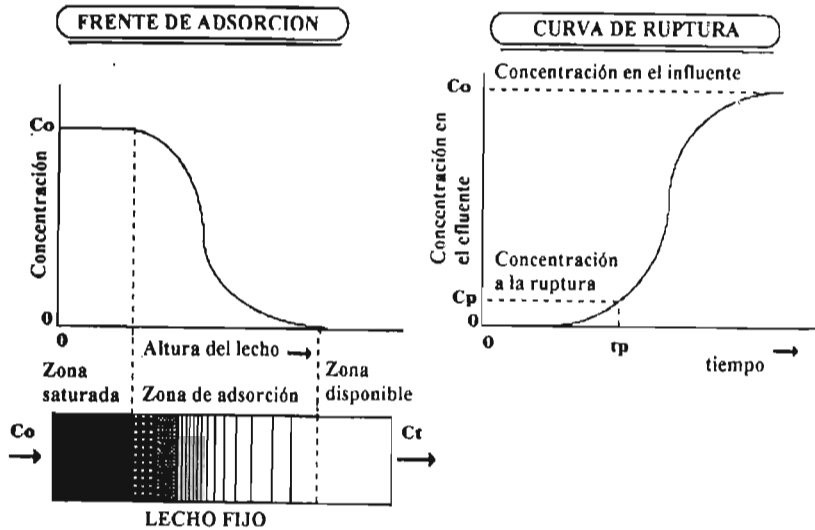
En el sistema discontinuo, una cantidad de carbón se mezcla continuamente con un volumen específico de agua, hasta que la concentración del contaminante en la disolución ha alcanzado su nivel deseado. Entonces se saca el carbón y se revierte o se regenera para usarlo nuevamente.

El método de flujo continuo de tipo columna, el carbón está continuamente en contacto con una solución fresca. Por lo tanto la concentración de la disolución en contacto con una capa de carbón de la columna es relativamente constante. En el tratamiento discontinuo la concentración del soluto en contacto con una cantidad determinada de carbón decrece a medida que la adsorción progresa, y por lo tanto decrece la efectividad del adsorbente para separar el soluto.

En el método de flujo continuo del adsorbente sólido se añade a la cabeza de la columna y el adsorbente gastado se retira por el fondo. La disolución de alimentación fluye en sentido ascendente desde las regiones parcialmente agotadas a las regiones de material fresco añadido.

**Curva de saturación.** La evolución del funcionamiento de las unidades de adsorción se representa gráficamente por los frentes de adsorción y las curvas de ruptura (Figura 13) este es un gráfico del modelo de adsorción que normalmente se obtiene para un adsorbedor, en estado no – estacionario, de lecho fijo. El soluto o impureza se adsorbe más rápida y eficazmente en las capas más superiores de carbón fresco durante los estados iniciales de la operación. Las capas mas superiores están desde luego en contacto con la solución a la concentración mayor,  $C_0$ , las pequeñas cantidades de soluto que escapan de estas primeras capas de adsorbente son separadas en los estratos inferiores del lecho, y la concentración de soluto en el efluente durante el período inicial es prácticamente cero ( $C=0$ ). La zona primaria de adsorción se encuentra inicialmente cerca de la cabeza de la columna o punto de alimentación. A medida que el

agua contaminada fluye a través de la columna, las capas superiores de carbón llegan a saturarse prácticamente con el soluto y ya no son efectivas para una adsorción posterior.



**FIGURA 13 FRENTA DE ADSORCION Y CURVA DE RUPTURA DE UN LECHO FIJO DE CARBON ACTIVADO<sup>23</sup>**

El gráfico de  $C_0$  en función del tiempo, indica un aumento en la relación concentración de efluente a la alimentación, a medida que la zona se desplaza. El punto de saturación (concentración a la ruptura) representa el punto de operación para el cual, la comuna está en equilibrio con el agua de alimentación, y más allá de este punto, la adsorción de soluto será pequeña. En este punto es recomendable reactivar o reemplazar el carbón.

<sup>23</sup> (Ramírez Zamora R. M.:(2000). Procesos de Adsorción con Carbón Activado para el Tratamiento de Aguas)

### 2.4.3 FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ADSORCION

Existe un número importante de factores que influyen en la velocidad y las capacidades de adsorción. Weber (1972) y Ford (1978) determinan los factores de influencia que están asociados al adsorbato, al adsorbente y al medio.

#### ***Naturaleza del adsorbato***

- Estructura molecular. En regla general, los compuestos orgánicos de cadena ramificada son menos adsorbidos que los compuestos de cadena lineal.
- Grupos funcionales. En el caso de compuestos aromáticos, los grupos funcionales de la molécula influyen la adsorbabilidad de carbón portador, no favorece la capacidad de adsorción. Mientras más grande sea este exceso la capacidad será más pequeña.
- Solubilidad. La solubilidad del soluto se opone al fenómeno de atracción hacia el carbón activado. De esta forma, cualquier factor que favorece la solubilidad de compuestos orgánicos, más fuerte es el enlace entre el soluto – disolvente y desfavorece su adsorción.
- Ionización. La ionización no es generalmente favorable a la adsorción sobre carbón activado. Los solutos fuertemente ionizados son ligeramente adsorbidos.

#### ***Características del adsorbente***

Las características más importantes del carbón activado que influyen en el mecanismo de adsorción son el área superficial, la estructura porosa, el oxígeno quimisorbido, la polaridad de superficie y la granulometría.

- Área superficial y estructura porosa. A medida que el área superficial sea elevada, más grande será la capacidad de adsorción de un carbón activado. El área superficial específica puede definirse como la porción del área total que está disponible para la adsorción.
- Funciones oxigenadas de superficie. La presencia de grupos funcionales de superficie que contienen oxígeno aumenta la velocidad de adsorción pero reduce la capacidad de adsorción de compuestos orgánicos.

- Granulometría. La reducción de tamaño de las partículas aumenta la velocidad de adsorción.
- Dureza. La dureza de las partículas del carbón activado es un parámetro que influye en la eficiencia de las unidades de carbón activado. Si la partícula de carbón no resiste a la abrasión durante el retrolavado y la regeneración, las pérdidas de carbón en el sistema serán muy importantes.

### ***Características del medio***

- pH. El pH tiene un efecto directo sobre la ionización de compuestos orgánicos y sobre los grupos funcionales del carbón activado que afectan de alguna manera importante la adsorción. Por ejemplo, para valores bajos de pH, la adsorción de ácidos orgánicos es favorecida, mientras que para pH elevados, es la adsorción de bases la que se ve incrementada.
- Temperatura. La adsorción es un fenómeno de superficie de carácter generalmente exotérmico. En consecuencia, este proceso se ve favorecido cuando la temperatura disminuye.
- Materia orgánica natural de aguas (MON). La presencia de MON es favorable para la adsorción de compuestos. La MON puede actuar de varias maneras sobre la eliminación de micro-contaminantes. Smith (1991) propone que los efectos de la MON sobre la adsorción se pueden atribuir a las interacciones soluto – MON, soluto – carbón activado y MON – carbón activado.

## **2.4.4 CARBÓN ACTIVADO: PROPIEDADES FÍSICOQUÍMICAS Y SUS APLICACIONES**

El carbón activado es el producto que se obtiene como resultado de un proceso de carbonización de materiales de desecho. Las materias primas utilizadas para la fabricación de carbón activado son de origen mineral (hulla, coque.....), vegetal (madera, huesos de frutas, cáscara de coco, ....).

La eficiencia y la capacidad de adsorción de un carbón activado con respecto a un compuesto orgánico o color esta intimamente relacionado con su isoterma de adsorción. Otras medidas de la capacidad de adsorción de un carbón son el Número de Yodo, el Índice de Decoloración de Melazas, el Número de Fenol, el Valor de Taninos, el Valor de Acidos Húmicos, entre otros. Cada uno de estos índices tiene un significado específico que caracteriza, al carbón activado para un uso particular:

Número de Yodo. Es una medida de la capacidad de adsorción del carbón para moléculas pequeñas tales como el yodo.

Índice de Decoloración de Melazas. Es una medida de la capacidad de adsorción del carbón para grandes moléculas tales como aquellas que imparten color.

Número de Fenol. Es usado como índice de la capacidad de un carbón para remover compuestos que imparten olor y sabor al agua.

Número de Taninos y Acidos Húmicos. Es una medida de la capacidad de un carbón para remover moléculas orgánicas de gran tamaño.

### ***Características físicas***

Se ha demostrado que los carbones activados fabricados poseen una estructura cercana a la del grafito. Walker (1962) describe esta estructura como compuesta de capas de planos hexagonales constituidos de carbono. El enlace C – C es de  $1.92 \text{ \AA}$  y la distancia entre dos capas es de  $3.35 \text{ \AA}$ .

Las importantes propiedades adsorbentes del carbón son debido a su importante estructura porosa. Esta estructura se caracteriza por parámetros como la superficie total, el volumen total de poros y la repartición de la dimensión de estos poros. Un ejemplo clásico de la repartición porosa de un carbón activado es presentado por



Dubinín (1966) y la EPA. Dubinín clasifica los poros de carbón activado en tres categorías en función de sus diámetros:

- Microporos 20-100 Å<sup>o</sup> diámetro de poro
- Mesoporos 100 – 1000 Å<sup>o</sup> diámetro de poro
- Macroporos > 1000 Å<sup>o</sup> diámetro de poro

Los macroporos que pueden considerarse como fisuras, no juegan un papel importante en la adsorción. Los mesoporos también llamados poros de transición tienen importancia sobre todo a nivel de la cinética de la adsorción. En efecto, los mesoporos representan las vías de acceso de los solutos hacia los microporos de donde la adsorción se lleva a cabo principalmente.

### ***Características químicas***

- Funciones de superficie. El carbón activado se compone de carbono de una pureza que varía entre el 80 y 95%. Su esqueleto molecular se asemeja a las mallas del grafito que contienen, además del carbono otros elementos tales como el hidrógeno y el oxígeno. Estos elementos se encuentran combinados formando radicales carboxílicos o radicales hidroxilos, los cuales se denominan (funciones oxigenadas de superficie).
- Poder reductor. El carbón activado presenta tres propiedades esenciales en el tratamiento de aguas; un poder adsorbente, un poder de soporte bacteriano y un poder reductor ligado a la importante deslocalización de electrones en el seno de su estructura.

### ***Principales aplicaciones***

El carbón activado se utiliza desde hace mucho tiempo en la potabilización del agua para la remoción de olor y sabor o en la eliminación del cloro libre residual que permanece después de la etapa de desinfección e imparte un mal sabor al agua.

Actualmente, el carbón activado ya no sólo se aplica con los fines anteriores, sino con el de retener los contaminantes orgánicos y sintéticos muy dañinos que se han encontrado en la mayor parte de las fuentes de agua potable incluyendo los pozos profundos. El carbón activado se considera como la mejor tecnología disponible para cumplir con estas tareas y, por lo tanto, es uno de los procesos básicos de potabilización que forman parte de las plantas potabilizadoras.

Las principales aplicaciones son:

- Líquidos
- Gases o vapores

La adsorción en sistemas líquidos se puede mejorar con los siguientes factores:

- a) Seleccionar el carbón óptimo, en términos de su área superficial y del diámetro de sus poros. El diámetro de poro más adecuado, es aquel cuyo tamaño es de 1.5 a 2.0 veces la segunda magnitud más amplia de la molécula a adsorber. Esto se debe a que la molécula es retenida no solo por una pared del poro, si no por todo el perímetro que la rodea.
- b) Aplicar el carbón a la temperatura correcta. Normalmente, la adsorción disminuye mientras mayor es la temperatura.
- c) Utilizar la mayor concentración posible del soluto. La solubilidad del soluto también afecta; mientras menor es la solubilidad, mayor es la eficiencia de la adsorción.

Uno de los más frecuentes usos del carbón activado granular en el tratamiento del agua potable es la remoción de micro-contaminantes presentes en aguas superficiales y subterráneas. En la mayoría de los casos, las concentraciones de estas sustancias son de 0.5 a 5 % de las concentraciones de la materia orgánica natural, la cual compite con los micro-contaminantes para ocupar los sitios de adsorción en el carbón activado.

**Columnas de adsorción.** El carbón activado granular se utiliza en tanques o columnas por la que circula el agua que va a purificarse, la zona de transferencia de masa es la porción de la cama de carbón en la que ocurre la adsorción. En otras palabras es la distancia entre la capa de carbón saturado, que está encima, y la capa de carbón aún no utilizado, que está abajo. Conforme continúa la operación de la columna, la zona de transferencia de masa se desplaza a través de toda su longitud, hasta que alcanza el fondo de la misma. Después de que toda la zona de transferencia de masa ha salido, la cama de carbón está saturada en su totalidad, y la concentración de la impureza en el efluente, es la misma que en el influente.

Los adsorbedores de carbón activado granular, más usados son de lecho fijo o contra corriente de lecho móvil. Los de tipo de lecho fijo pueden ser de flujo ascendente o descendente. Una columna a contra corriente de lecho móvil emplea alimentación del agua por la parte superior y el adsorbente se alimenta por la parte de abajo. Tanto el lecho fijo, como el móvil puede usar la gravedad o presión para alimentar el líquido.

Las configuraciones de los sistemas de adsorción con carbón incluyen:

- Flujo descendente o ascendente del agua a través del lecho de carbón
- Operación en serie o paralelo de dos o más equipos.
- Operación con gravedad en el contacto descendente
- Empacado o expansión del lecho en flujo ascendente
- Materiales de construcción
  - a) Acero o concreto
  - b) Sección transversal circular o rectangular

Las torres de adsorción se emplean a flujo por gravedad o presurizados. Para torres presurizadas, las cuales son generalmente columnas de lecho fijo y son operadas a flujo descendente (Figura 14). Para lechos fijos de flujo descendente el tamaño de carbón es generalmente de malla de 8x30 y para flujo ascendente son de malla 12x40. La carga hidráulica, dependiendo del grueso del lecho, varía de 2 a 10 gpm/pie<sup>2</sup>. El

lecho de carbón activado tiene profundidades de 10 a 30 pies, lo más común es de 15 a 20 pies de altura del lecho.

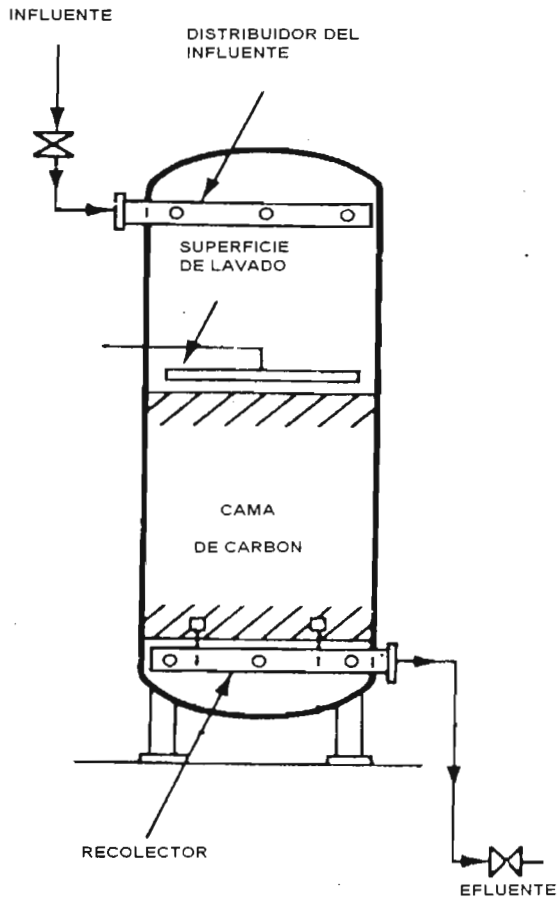


FIGURA 14 COLUMNA DE CARBON ACTIVADO <sup>24</sup>

El retrolavado de columnas de carbón activado de flujo descendente, es realizado para reducir las pérdidas de carga. Un incremento de la pérdida de carga es causada por depósitos de sólidos suspendidos o turbiedad y/o crecimiento microbiológico en la cama

<sup>24</sup> (Reynolds and Richards; (1982). Unit Operations and Process in Environmental Engineering)

de carbón activado granular. La altura de la columna debe ser lo suficiente para permitir hasta un 50 % de expansión del lecho durante el retrolavado para columnas de flujo descendente o un 15 % de lecho expandido para flujos ascendentes de lecho fijo. El retrolavado para columnas de lecho fijo de flujo descendente debe ser de 10 a 15 minutos, con una tasa de retrolavado de 30 a 50 m/hr (12 - 20 gpm/ft<sup>2</sup>).<sup>18</sup>

La capacidad del carbón activado para eliminar sabores y olores es elevada, y bajo condiciones usuales una carga es suficiente para un año de servicio. Se considera buena práctica no tener en servicio a las torres de carbón activado con la misma carga por más de un año de servicio ya que las torres que se trabajan hasta su agotamiento, dan lotes de agua sin tratar.

### **Otras aplicaciones del carbón activado**

Existen en la literatura una gran cantidad de aplicaciones prácticas del carbón activado, entre las cuales tenemos:

- Potabilización; purificadoras de agua, refresqueras, en los filtros de agua industriales.
- Purificación de agua para proceso.
- Aguas residuales industriales; usado en tratamiento terciario, como agente pulidor, en un pretratamiento para eliminar compuestos orgánicos e inorgánicos.
- Eliminación de compuestos carcinógenos.
- Purificación de gases o vapores.
- Decoloración.
- Recuperación de solventes.
- Tratamiento de aire, etc.

<sup>18</sup> (Montgomery J.;(1985). Water Treatment Principles and Design)

## 2.5 PROCESO DE OSMOSIS INVERSA

### 2.5.1 TEORIA DE LA OSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa consiste en separar un componente de otro en una solución, mediante las fuerzas ejercidas sobre una membrana semipermeable. Su nombre proviene de “ósmosis”, el fenómeno natural que ocurre en todas las células vivas. La ósmosis permite la vida del reino animal y vegetal, incluyendo a los seres humanos, al inducir que el agua fluya por difusión desde zonas donde se encuentra relativamente pura, con baja concentraciones de sales, a zonas donde se encuentra con alta concentración a través de una membrana semipermeable.

En el caso de la ósmosis normal el solvente, pasa espontáneamente de una solución menos concentrada a otra más concentrada a través de la membrana semipermeable. Entre ambas soluciones existe una diferencia de energía, originada en la diferencia de concentraciones; el solvente pasará en el sentido indicado hasta alcanzar el equilibrio (Figura 15). Si se agrega a la solución más concentrada energía en forma de presión, el flujo de solvente se detendrá cuando la presión aplicada sea igual a la presión osmótica aparente entre las dos soluciones. Esta presión osmótica aparente, es una medida de la diferencia de energía potencial entre ambas soluciones. Si se aplica una presión mayor a la solución más concentrada, el solvente comenzará a fluir en el sentido inverso. Se trata así, de la ósmosis inversa. El flujo de solvente es una función de la presión aplicada, de la presión osmótica aparente y del área de la membrana presurizada.<sup>9</sup>

La ósmosis inversa es de alguna forma similar a la filtración, ambos procesos implican la separación de un líquido a partir de una mezcla que se hace pasar a través de un dispositivo que retiene los otros componentes. Este proceso también se ha denominado hiperfiltración. Pero existen al menos tres diferencias importantes:

<sup>9</sup> (Departamento Técnico de IDAGUA: (1982). Osmosis inversa)

- La presión osmótica que es muy pequeña en la filtración ordinaria juega un papel importante en la ósmosis inversa.
- En la ósmosis inversa no es posible obtener tortas filtrantes con bajo contenido de humedad, ya que la presión osmótica de la disolución aumenta con la separación del disolvente, y
- Los filtros separan mezclas basándose principalmente en el tamaño, mientras que la semipermeabilidad de las membranas de ósmosis inversa depende de otros factores como pH y temperatura.

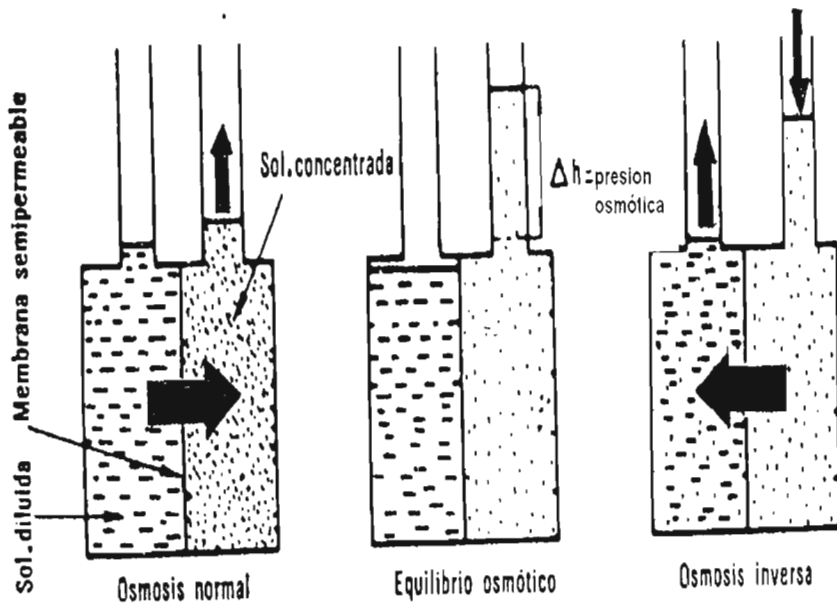


FIGURA 15 PRINCIPIO DE LA OSMOSIS NORMAL E INVERSA <sup>9</sup>

<sup>9</sup> (Departamento Técnico de IDAGUA: (1982). Osmosis inversa)

**Presión osmótica.** La presión osmótica es la presión que se debe vencer para que comience a haber flujo de producto, y es una función del número de partículas en solución que tenga el agua a tratarse. Mientras mayor sea el número de iones o moléculas, mayor es la presión osmótica. La Tabla 12, presenta las presiones osmóticas de algunas soluciones típicas.

**TABLA 12 PRESIONES OSMOTICAS TIPICAS<sup>28</sup>**

COMPUESTO	CONCENTRACION		PRESION OSMOTICA (atm. a 25°C)
	mg/litro	moles/litro	
NaCl	35000	0.6	27.07
NaCl	1000	0.0171	0.77
Na HCO <sub>3</sub>	1000	0.0119	0.87
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	1000	0.00705	0.41
Mg SO <sub>4</sub>	1000	0.00831	0.24
Mg Cl <sub>2</sub>	1000	0.0105	0.66
Ca Cl <sub>2</sub>	1000	0.009	0.56
Sacarosa	1000	0.00292	0.07
Dextrosa	1000	0.00555	0.14

Van't Hoff. Observó que la presión osmótica,  $\pi^{\circ}$ , varía con la concentración y temperatura de la misma forma que la presión de un gas ideal. Por ejemplo, para el agua;

$$\pi^{\circ} = \frac{n RT}{V}$$



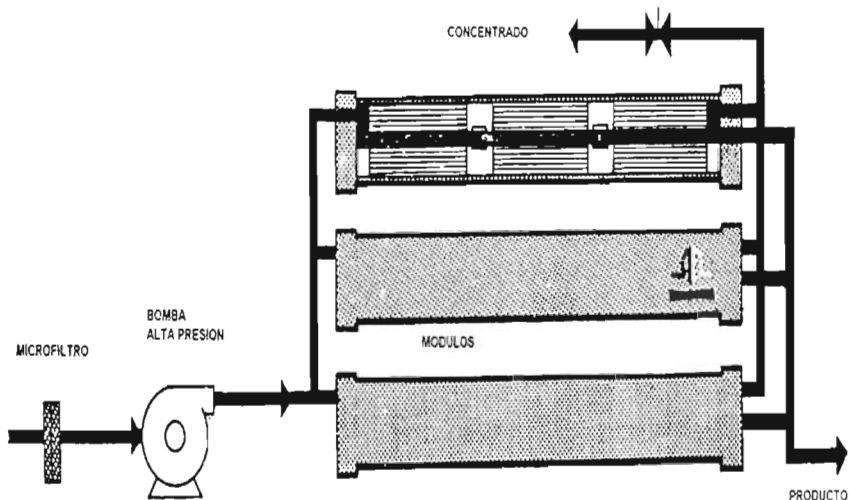
En donde  $n$  es el número de moles de soluto,  $V$  es el volumen molar del agua,  $R$  la constante universal de los gases y  $T$  la temperatura absoluta. Según la ecuación,  $\pi^\circ$  dependería solamente de la concentración y temperatura y no de la naturaleza de la solución. Sin embargo, la ecuación al igual que la ley de un gas ideal solo es válida para soluciones diluidas. Para soluciones más concentradas, es necesario modificar la expresión de Van't Hoff, Introduciendo un coeficiente de presión osmótica,  $\phi_c$ .

$$\pi^\circ = \phi_c \frac{nRT}{V}$$

Robinson y Stokes (1959) han tabulado los coeficientes de presión osmótica para muchos electrolitos.

En la Figura 16, se muestran los componentes básicos de una instalación de ósmosis inversa; se trata de un esquema de tres tubos de presión, conteniendo en su interior las membranas, aunque normalmente se emplean varios de estos tubos colocados en serie y/o paralelo. La bomba de alta presión suministra en forma continua al fluido a tratar a los tubos, así mismo, de presión y además es la encargada en la práctica de suministrar la presión necesaria para producir el proceso.

Una válvula reguladora colocada en el flujo de concentrado es la encargada de controlar la misma dentro de los elementos que contienen las membranas y por lo tanto en éstas.

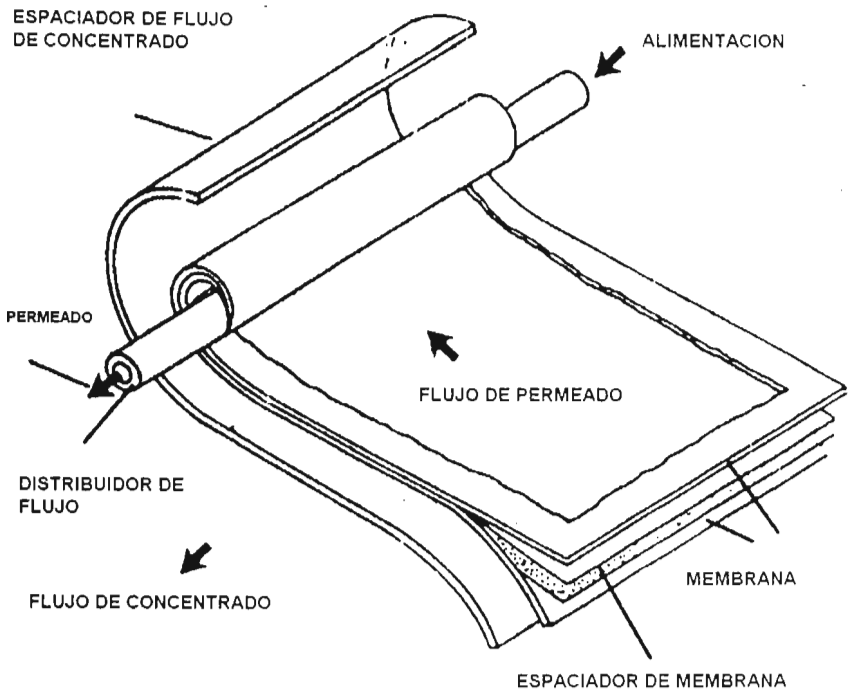


**FIGURA 16 SISTEMA PRACTICO DE OSMOSIS INVERSA QUE CONSISTE, FUNDAMENTALMENTE, EN UNA BOMBA DE ALTA PRESION Y MODULOS DE OSMOSIS INVERSA<sup>12</sup>**

### **2.5.2 CARACTERISTICAS DE LAS MEMBRANAS**

Una membrana puede definirse como una fase que actúa como una barrera al flujo de especies moleculares o iónicas entre las fases que separa (Figura 17). Para que la membrana actúe como un dispositivo útil de separación, debe transportar algunas moléculas más rápidamente que otras, es decir debe ser altamente permeoselectiva.

<sup>12</sup> (Fluid System Division. Osmosis inversa: Agua Potable y Efluentes Municipales)



**FIGURA 17 ESQUEMA DE UNA MEMBRANA<sup>28</sup>**

Las membranas son capas de hojas muy delgadas microporosas sujetas a una estructura de soporte más gruesa y porosa, generalmente hecha de polipropileno, poliéster o hasta de politetrafluoretileno. A diferencia del papel o tela, el material de las membranas varía desde acetato de celulosa o cerámicos y otros polímeros como polisulfonatos, polivinildieno, funcionan como filtros asimétricos. Dependiendo de los tamaños de los poros con los que se fabrica la membrana, la filtración a través es empleada en los rangos de ósmosis inversa, nanofiltración, ultrafiltración y de reciente uso la microfiltración (Tabla 13).

<sup>28</sup>(Weber W. J.: (1979). Control de la Calidad del Agua, Procesos Físicoquímicos)

**TABLA 13 CARACTERISTICAS DE LOS PROCESOS DE MEMBRANA<sup>4</sup>**

	OSMOSIS INVERSA	NANOFILTRACION.	ULTRAFILTRACION	MICROFILTRACION
MEMBRANAS	ASIMETRICA	ASIMÉTRICA	ASIMETRICA	ASIMETRICA SIMETRICA
Grueso	150 m	150 m	150 – 250 m	10 – 150 m
Capa superficial	1 m	1 m	1 m	1 m
Tamaño de poro	<0.002 m	< 0.002 m	0.05 - 0.2 m	0.2 – 5 m
Rechazos	HMWC* LMWC Cloruro de sodio, glucosa, aminoácidos, proteínas	LMWC, mono, di y oligosacáridos, aniones polivalentes	Macromoléculas* proteínas, polisacáridos, virus.	Partículas Arcilla, bacterias.
Materiales de membranas	CA* Capa delgada	CA* Capa delgada	Cerámica, PSO*, CA*, PVDF Capa delgada	Cerámica, PP*, PSO*,PVDF*
Módulo de membrana	Tubular, enrollado en espiral, placa y marco	Tubular, enrollado en espiral, placa y marco	Tubular, fibra hueca, enrollado en espiral, placa y marco	Tubular, fibra hueca, placa y marco
Presión de operación	15 – 148 atm	5 – 34 atm	1 – 10 atm	2 atm

\*CA – acetato de celulosa

\*PSO – fluoruro de polivinil

\*PP – polipropileno

\*HMWC – compuesto de alto peso molecular (100,000 a 1,000,000 moles/gr)

\*LMWC – compuesto de bajo peso molecular (1000 a 100,000 moles /gr)

\*Macromoléculas – 1,000,000 moles/gr

<sup>4</sup> (Brett Elias and Javez Van Cleef; (1998). High-Shear Membrane Separation for Process and Waste Water Treatment)

La mayoría de las membranas para ósmosis inversa, son hechas a base de dos polímeros; acetato de celulosa (CA) y poliamida (PA). En general las de acetato de celulosa son más aceptables por ser menos caras, mientras que las de poliamida ofrecen niveles más altos de rechazo a sales pero son más caras y susceptibles a daño por oxidantes.

**Tipos de membrana.** Existen cuatro módulos de configuraciones posibles de la membrana; el elemento tubular, el de placa y marco, el elemento de espiral y el elemento de fibras huecas (Figura 18).

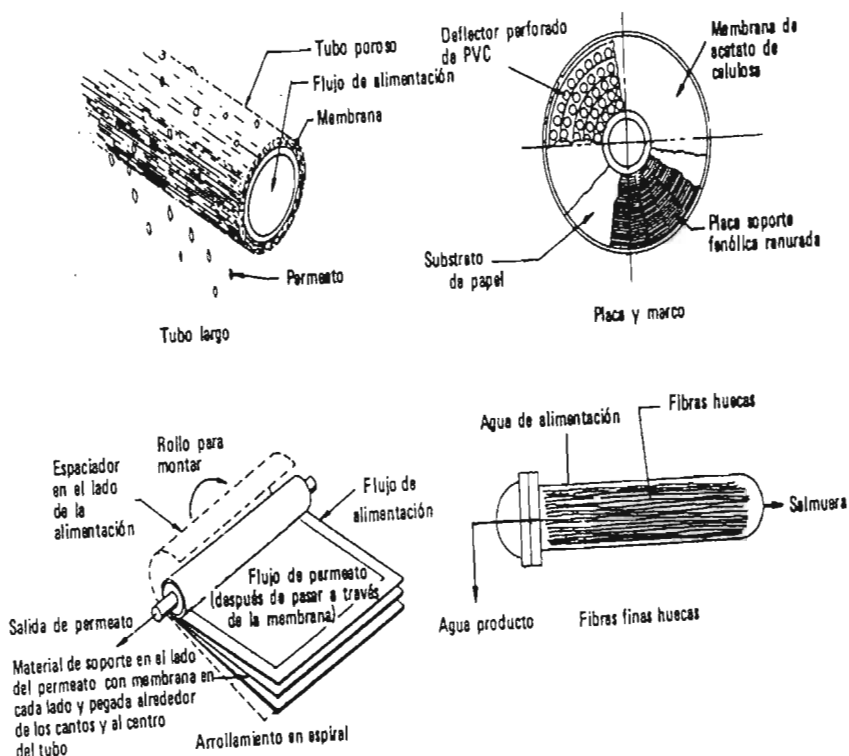


FIGURA 18 DISEÑO DE MÓDULOS DE ÓSMOSIS INVERSA <sup>28</sup>

<sup>28</sup> (Weber W. J.; (1979). Control de la Calidad del Agua. Procesos Físicoquímicos)

Más del 60% de los sistemas instalados en el mundo trabajan con elementos en espiral (Figura 19 y Figura 20), debido a dos ventajas apreciables:

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

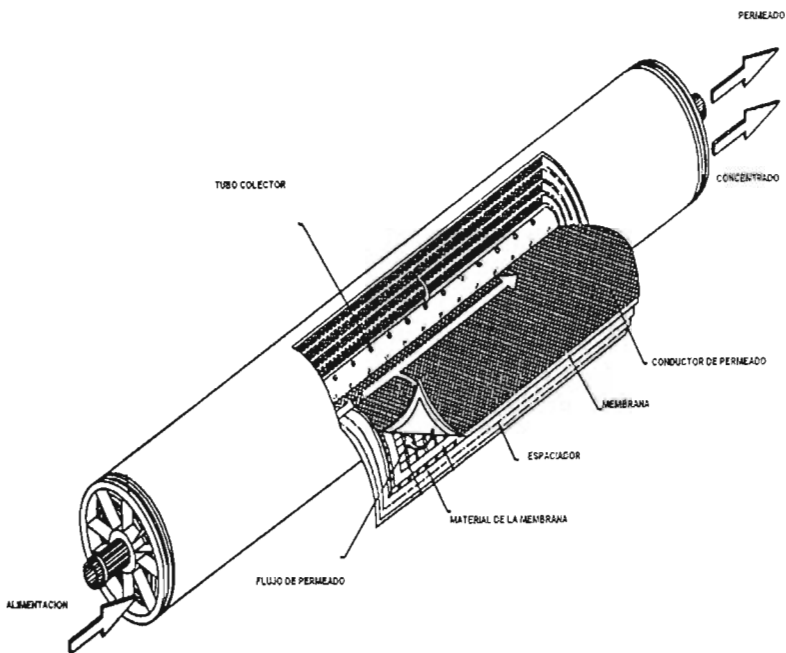


FIGURA 19 ELEMENTO EN ESPIRAL<sup>14</sup>

<sup>14</sup> (Gerencia Técnica de Acuamen: (1976). Osmosis Inversa: Tratamiento de Agua y Efluentes)

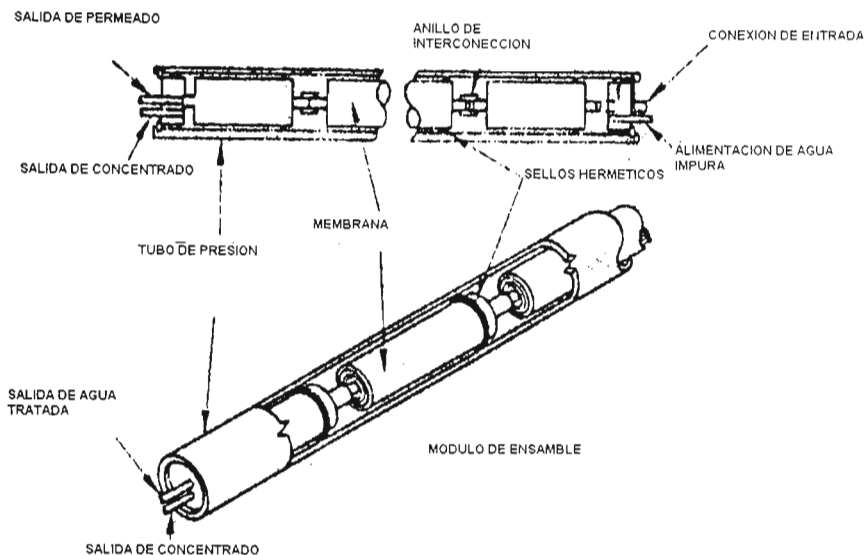


FIGURA 20 DISPOSICION EN SERIE DENTRO DE UN TUBO DE PRESION<sup>14</sup>

En la actualidad estos elementos se fabrican con membranas de acetato de celulosa o poliamida y con distintos grados de rechazo y producción.

**Factor de rechazo de las membranas.** El objetivo de la ósmosis inversa es el rechazo de soluto (sales). Sin embargo no existe membrana perfecta que logre un rechazo de sales del 100%. Las membranas comerciales de agua salobre obtienen un rechazo de sales de entre 90 y 99% y las de agua de mar de entre un 98 y 99.7%.

El rechazo de soluto en la ósmosis inversa,  $Ri^o$ , está dado por la siguiente ecuación:

$$Ri^o = \frac{C_{ic} - C_{ip}}{C_{ic}}$$

<sup>14</sup> (Gerencia Técnica de Acuamen; (1976). Osmosis Inversa; Tratamiento de Agua y Efluentes)

Donde:

$C_{ic}$  = concentración de las especies  $i$  en la corriente de concentrado.

$C_{ip}$  = concentración de  $i$  en el permeado o producto

La capacidad de una membrana para rechazar sales disminuye con el tiempo de operación. La variación del rechazo se presenta en la Figura 21.

Al comienzo el descenso es más pronunciado para iones pequeños monovalentes como  $Na^+$  y los cloruros  $Cl^-$ . Normalmente estos iones se encuentran entre los más permeables, presentando el rechazo inicial menor y teniendo la velocidad más alta del descenso

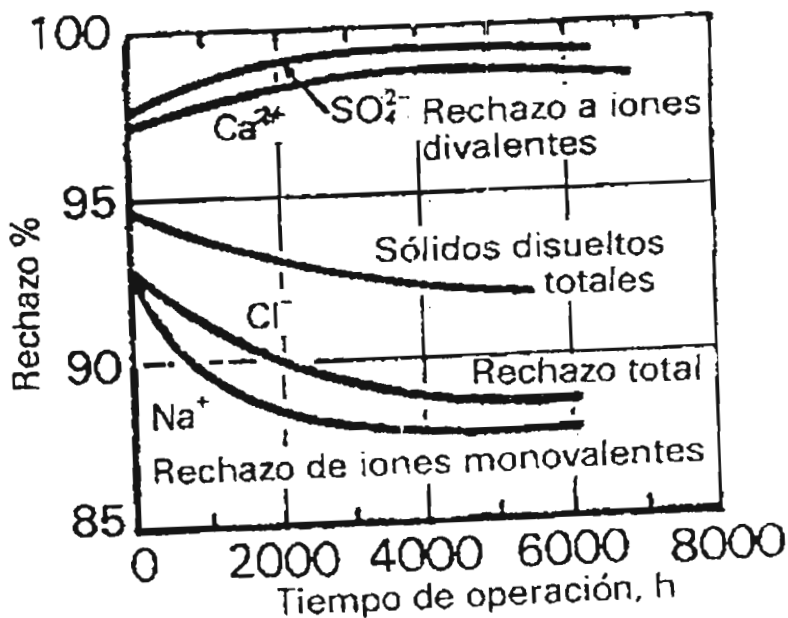


FIGURA 21 VARIACION DEL RECHAZO DE SALES CON EL TIEMPO DE OPERACION<sup>22</sup>

<sup>22</sup> (Ramalho R.S.; (1991). Tratamiento de Aguas Residuales)



### 2.5.3 CONSIDERACIONES DE DISEÑO

En el diseño de un sistema de ósmosis inversa económico y que responda, aparecen muchos problemas de ingeniería difíciles. A continuación se enumeran algunos de los pasos más difíciles durante el diseño:

1. Soportar una membrana frágil para que pueda aguantar presiones diferenciales de 300 a 102 atm.
2. Evitar que los flujos de alimentación de alta presión y salmuera entren en contacto con el flujo de agua producto de baja presión.
3. Obtener una densidad de empacamiento lo suficiente alta como para reducir al mínimo el costo del recipiente a presión.
4. Reducir al mínimo la polarización por concentración y ensuciamiento por medio del diseño de los canales de alimentación.
5. Evitar las caídas de presión parásitas en los flujos de alimentación, salmuera, producto, y
6. Minimizar los costos de reemplazamiento de las membranas.

Una planta de ósmosis inversa consiste en una disposición de módulos en serie o paralelo. Las variables de diseño más importantes son:

- Recuperación
- Calidad del agua producto
- Presión
- Caudal de salmuera
- Grado de pretratamiento
- Postratamiento

**Recuperación.** La recuperación o conversión se define como el porcentaje del agua de alimentación que se extrae como producto (permeado) y se calcula de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\text{Recuperación} = \frac{\text{Flujo de producto}}{\text{Flujo de alimentación}} \times 100$$

En la práctica la recuperación está limitada por varios factores como son:

- Características de la membrana, como espesor, composición química y porosidad.
- Condiciones del sistema, como la temperatura, presión, concentración salina y velocidad de alimentación.

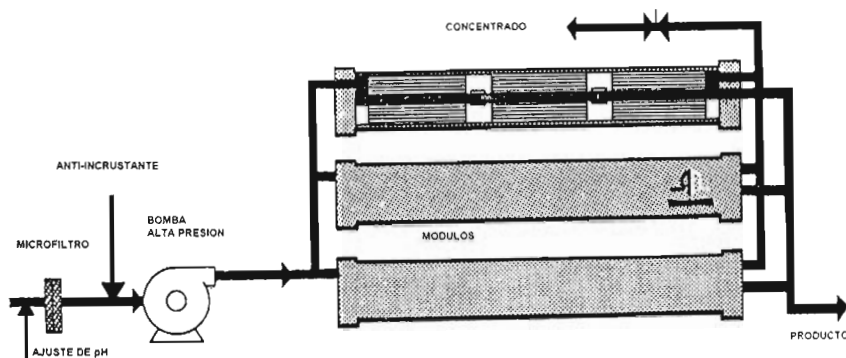
Si la recuperación es muy alta, se tendrá mayor flujo de permeado y en consecuencia mayores probabilidades de que la membrana falle por taponamiento. Si la recuperación es muy baja, se desperdiciará mucha agua. Para obtener altas conversiones, se debe tener el número adecuado de pasos.

**Calidad del agua producto.** En un sistema real, la concentración de sal aumenta en la superficie de la membrana y excede a la concentración de la masa principal de la disolución. Este aumento de la concentración en la superficie de la membrana produce el efecto de polarización por concentración, provocando un aumento de la concentración del soluto en el agua producto.

**Presión.** La presión tiene un efecto directo sobre la calidad y cantidad de agua tratada o permeada. Ambos factores se incrementan cuando la presión del sistema se incrementa (dentro de los límites de diseño). El sistema debe ser operado a la menor presión requerida para obtener el flujo de agua tratada de diseño. Este parámetro también afecta la compactación de la membrana, que progresa a una velocidad mayor cuando se tiene altas presiones y temperaturas.

**Temperatura.** El flujo de agua se incrementa al incrementar la temperatura del agua de alimentación. Se recomienda que el sistema no sea operado a temperaturas mayores a 30° C, en el agua de alimentación, ya que se presenta un incremento en el proceso de deterioración de la membrana y compactación de la misma.

**Grado de pretratamiento.** Es la sección del sistema donde se ajustan las condiciones del agua de alimentación para que las membranas tengan un óptimo funcionamiento y una larga vida útil. Esta etapa del tratamiento se opera a baja presión y consiste en la adición de reactivos químicos, como son el ácido sulfúrico concentrado para ajustar el pH y la dosificación de hexametafosfato de sodio como anti-incrustante (Figura 22).



**FIGURA 22 ESQUEMA DE UN SISTEMA DE PRETRATAMIENTO<sup>12</sup>**

En general, las corrientes de alimentación y salmuera se tratan con los objetivos siguientes:

- Eliminar el exceso de turbidez o sólidos en suspensión.
- Ajustar y controlar el pH y temperatura de la alimentación
- Inhibir o controlar la formación de compuestos, que una vez precipitados taponarán las canalizaciones del agua o el recubrimiento de las membranas.
- Desinfectar y evitar el crecimiento de lodos o contaminación del equipo
- Eliminar los aceites emulsionados o sin emulsionar, y compuestos orgánicos similares.

<sup>12</sup> (Fluid System Division, Osmosis Inversa: Agua Potable y Efluentes)

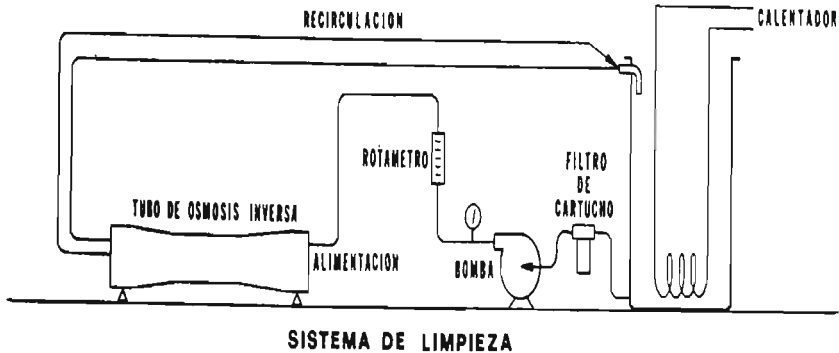
El exceso de turbidez y sólidos en suspensión puede eliminarse generalmente por coagulación y floculación seguida de sedimentación y/o filtración. Puede ser necesario el uso de un filtro de arena de gravedad o a presión y filtros de tierra diatomeas.

El mayor interés lo constituyen los compuestos poco solubles como el carbonato de calcio, sulfato de calcio y los óxidos metálicos hidratados. La deposición del carbonato de calcio y fosfato de calcio puede generalmente eliminarse si mantenemos un pH de operación de 5, el cual también inhibe la hidrólisis de la membrana. El sulfato de calcio incrustante puede inhibirse mediante un tratamiento mínimo con hexametáfosfato de sodio. Las trazas de óxidos pueden eliminarse mediante limpieza.

La deposición de compuestos orgánicos puede evitarse de forma eficaz mediante un pretratamiento con carbón activado. Una gran superficie de membrana da lugar al crecimiento de lodos bacteriales y hongo, y por tanto es preciso inhibir el crecimiento biológico sobre las membranas, una buena técnica de inhibición consiste en la cloración de la alimentación hasta una concentración residual de 0.5 mg/litro; este tratamiento da lugar a una ligera deterioración de la membrana de acetato de celulosa.

**Postratamiento.** El postratamiento del agua permeada generalmente implica un ajuste del pH, una desgacificación para eliminar el dióxido de carbono, y una desinfección si queremos utilizarla como agua potable.

La disminución del flujo por unidad de superficie, es un fenómeno que se presenta en los procesos de membrana. Esta disminución del flujo, es la suma de la compactación de la membrana y el ensuciamiento. Para pequeñas presiones de trabajo (< 40.8 atm) predomina el ensuciamiento. El ensuciamiento de la membrana puede algunas veces reducirse al mínimo, mediante una limpieza periódica (Nusbaum et al., 1970). Un esquema típico de lavado para el equipo de ósmosis inversa, se muestra en la Figura 23.



**FIGURA 23 ESQUEMA DE UN SISTEMA DE LIMPIEZA<sup>25</sup>**

Cada planta de tratamiento tiene que encontrar su solución de lavado óptima, ya que literalmente no existen aguas con condiciones idénticas, y la disponibilidad de reactivos varía en cada caso.

Los lavados se efectúan por 45 minutos a no ser que el fabricante de membranas indique lo contrario.

#### **2.5.4 APLICACIONES**

Entre 1950 y 1970, se llevaron a cabo innumerables trabajos a fin de implementar el uso de la ósmosis inversa en la desalación de aguas salobres y agua de mar. A partir de 1970, esta técnica empezó a ser competitiva, ya que reúne características de excepción, algunas de las cuales se citan a continuación:

- Permite remover la mayoría de los sólidos (inorgánicos u orgánicos) disueltos en el agua (hasta el 99%).

<sup>25</sup> (Riley R. L. y G: Pique.:(2000). Manual Práctico de Ósmosis Inversa)

- Realiza el proceso de purificación en una sola etapa, en un rango de concentración de 400 a 40,000 ppm.
- Es una tecnología extremadamente simple, que requiere un mantenimiento escaso y puede operarse con personal no especializado.
- Posibilita el reciclaje de agua de un efluente, recuperando valiosos elementos reutilizables y obteniendo agua al menor costo.

Estas ventajas confieren a la ósmosis inversa, en un amplio campo de aplicaciones posibles:

- Desalación de aguas salobres y agua de mar para el suministro de agua potable.
- Tratamiento de aguas para la industria
- Abastecimiento de agua para usos industriales y consumo de poblaciones
- En las industrias de la alimentación, para la concentración de alimentos (jugos de fruta, tomate, leche, etc.)
- En la industria farmacéutica, para la separación de proteínas, eliminación de virus, etc.
- Cultivos y riegos. Desalar aguas salobres para cultivos y riegos.

## 2.6 PROCESO DE DESINFECCION

### 2.6.1 DESINFECCION

La desinfección ha sido practicada por miles de años. La práctica de hervir el agua es una de las técnicas más antiguas. El objetivo de la desinfección es la destrucción de los organismos patógenos (productores de enfermedades). Los organismos patógenos son destruidos y/o eliminados, gran parte durante las distintas operaciones de los tratamientos fisicoquímicos del agua y agua residual, incluyendo; coagulación, sedimentación, filtración, ablandamiento por cal-sosa, y adsorción. Cuando estas operaciones se desarrollan en serie, los organismos patógenos se reducen en número considerable. Sin embargo, en el tratamiento del agua y agua residual se efectúa generalmente una desinfección específica para asegurar una protección en contra de las enfermedades transmitidas a través del agua. En la Tabla 14 se enumeran las enfermedades humanas que pueden ser transmitidas por el agua residual de origen doméstico.

La desinfección no implica necesariamente la destrucción completa de los organismos vivos (bacterias, quistes de amebas, algas, esporas y virus), lo cual constituiría un proceso de "esterilización".

***Características de un desinfectante.*** Los desinfectantes del agua deben de poseer las siguientes propiedades:

- Destrucción de microorganismos patógenos
- Las concentraciones requeridas no deben ser tóxicas al hombre ni a los animales domésticos, ni de sabor desagradable.
- Debe ser aplicable a un costo razonable
- Debe persistir en el agua desinfectada con la concentración suficiente para proporcionar una protección residual.

El método más común para evaluar la calidad microbiológica del agua es mediante la prueba de coliformes. La EPA ha propuesto la cuenta estándar en placa como método de rutina para el crecimiento y análisis de dichas bacterias. Recomienda que para un sistema de distribución de agua el número de colonias deban ser menos de 10 por ml.

**TABLA 14 AGENTES INFECCIOSOS POTENCIALMENTE PRESENTES EN LAS AGUAS RESIDUALES DE TIPO DOMESTICO**

ORGANISMO	ENFERMEDAD	EFFECTOS
<b>Bacteria</b>		
<b>Escherichia coli</b>	Gastroenteritis	Diarrea
<b>Legionella pneumophila</b>	Legionelosis	Enfermedades respiratorias agudas
<b>Leptospira</b>	Leptospirosis	Fiebre, ictericia (enfermedad de Weil)
<b>Salmonella Typhi</b>	Fiebre tifoidea	Fiebre alta, diarrea, ulceración
<b>Salmonella</b>	Salmonelosis	Envenenamiento de comida
<b>Shigella</b>	Shigelosis	Disentería
<b>Vibrio cholerae</b>	Cólera	Diarrea, deshidratación
<b>Yersinia enterocolitica</b>	Yersinosis	Diarrea
<b>Virus</b>		
<b>Adenovirus</b>	Enfermedades respiratorias	
<b>Enterovirus</b>	Gastroenteritis, Meningitis	
<b>Hepatitis A</b>	Hepatitis infecciosa	Fiebre, ictericia
<b>Reovirus</b>	Gastroenteritis	Vómitos
<b>Rotavirus</b>	Gastroenteritis	
<b>Protozoarios</b>		
<b>Balantidium coli</b>	Balantidiasis	Diarrea, Disentería
<b>Cryptosporidium</b>	Criptosporidiosis	Diarrea
<b>Entamoeba histolytica</b>	Amibiasis	Diarrea prolongada, abscesos en el intestino
<b>Giardia Lamblia</b>	Giardiasis	Diarrea severa, nausea
<b>Helmintos</b>		
<b>Ascaris lumbricoides</b>	Ascariasis	Infestación
<b>Enterobius vericircularis</b>	Enterobiasis	Pinworm
<b>Fasciola hepática</b>	Pasciolosis	Lombriz ovejuna
<b>Hymenolepis nana</b>	Hymenolepiasis	Tenia solitaria
<b>T. solium</b>	Taeniasis	Tenia solitaria
<b>Thichuris trichiura</b>	Trichuriasis	Tenia solitaria



## 2.6.2 METODOS DE DESINFECCION

El agua se puede desinfectar por diferentes medios, entre los cuales se encuentran: agentes químicos y físicos

### a) Agentes químicos

- Halógenos (flúor, cloro y sus compuestos, bromo, yodo)
- Ozono
- Peróxido de hidrógeno
- Permanganato
- Compuestos metálicos
- Alcalis y ácidos
- Detergentes
- Fenol
- Alcoholes

### b) Agentes físicos

- Calor (temperatura)
- Radiación ultravioleta (UV)
- Sonido

De los métodos anteriores, los aplicados a plantas de tratamiento de agua potable son el cloro y sus derivados, el ozono y la radiación ultravioleta.

***Desinfectantes químicos.*** La desinfección del agua por medio de agentes químicos se logra poniendo en contacto el agua a desinfectar con los diferentes compuestos químicos, a la concentración adecuada y durante el tiempo suficiente para la reacción.

De los agentes químicos, los halógenos tales como el cloro, bromo son los más utilizados. El cloro y algunos de sus compuestos constituyen los desinfectantes más efectivos, universalmente empleados en la desinfección de agua y aguas residuales, en este capítulo se centra principalmente en estos compuestos, la aplicación del cloro como desinfectante será abordada posteriormente.

Los halógenos libres -flúor, cloro, bromo, yodo – son todos los agentes oxidantes, con un poder oxidante decreciente al aumentar el peso atómico. Así, el flúor es el oxidante más fuerte y el yodo el más débil.

**Flúor.** El flúor elemental es el agente oxidante más fuerte. Es capaz de oxidar al agua



Por lo tanto no puede utilizarse para desinfectar el agua. El ácido fluorhídrico y los fluoruros se han utilizado como preservativos contra los hongos y para la desinfección de ciertos virus, pero se desconoce la efectividad bactericida de estos compuestos para concentraciones muy bajas (<1.5 ppm como F<sup>-</sup>)

**El bromo (Br<sub>2</sub>).** El bromo es un halógeno de color café rojizo oscuro, que existe como líquido a presión atmosférica. Produce vapores irritantes y en forma líquida causa severas quemaduras al contacto con la piel.

El bromo es un buen agente germicida, ligeramente soluble en el agua, al igual que el cloro, el bromo forma aminas en presencia de amoníaco y otros materiales nitrogenados y se ha observado la aparición de un fenómeno similar al del “punto de quiebre”. El bromo es más caro que el cloro, en cuanto a peso.

La aplicación del bromo elemental e hipocloritos (BrO<sup>-</sup>) como desinfectante está limitada a aguas industriales y albercas.

**El yodo (I<sub>2</sub>).** Es un sólido negro azulado, que se utiliza principalmente para la desinfección de albercas y de pequeñas cantidades de agua potable. Cuando el yodo se disuelve en agua, este puede permanecer en su forma elemental o hidrolizarse a ácido hipoyodoso (HOI). Tanto el ácido hipoyodoso (HOI) como el I<sub>2</sub> son eficientes germicidas, aunque se requiere mayores cantidades de estos para lograr las mismas

eficiencias germicidas que el cloro y su costo es alto si se compara con el cloro (20 veces mayor que el cloro por unidad de eficiencia germicida).

**El ozono ( $O_3$ ).** El ozono es un gas inestable altamente corrosivo y tóxico, tanto en el agua como en el aire. Debido a su inestabilidad y características, el ozono debe ser generado en sitio donde va a ser usado, y puede ser producido a partir de aire atmosférico o de oxígeno.

El ozono es considerado como el más potente germicida, y esta propiedad ha sido atribuida a su alto poder oxidante.

**Peróxido de hidrógeno.** Los peróxidos son compuestos binarios que contienen mayores proporciones de oxígeno que los óxidos simples. El óxido simple del hidrógeno es el agua. El peróxido de hidrógeno,  $H_2O_2$ , es un líquido claro, es algo inestable, aunque no tanto como el ozono, pueden obtenerse disoluciones hasta un 30% ( Brinkley,1951). Aunque es un fuerte oxidante, actúa generalmente como un desinfectante pobre (Schumb y col; 1955). Para concentraciones de 1.5-5% el mínimo tiempo de contacto en la desinfección es de tres a cuatro horas. Así el peróxido de hidrógeno no es un agente muy adecuado para la desinfección del agua en gran escala.

**Permanganato.** El permanganato potásico se utiliza en el tratamiento de aguas potables para el control de sabor y olor y para eliminar el hierro, manganeso y ácido sulfhídrico. El permanganato potasio,  $MnO_4K$ , es un agente oxidante fuerte, reacciona extensivamente con la materia orgánica, exhibe propiedades desinfectantes notables.

En cuanto a peso, el permanganato es más caro que el cloro, se aplica generalmente en bajas concentraciones.

**iones metálicos.** Desde hace muchos siglos se han conocido los efectos del cobre como alguicida y bactericida, así como también el uso de otros metales, tales como la

plata en dosis pequeñas, el mercurio, cobalto y el níquel, presentan buenas propiedades bactericidas.

La plata se ioniza rápidamente por electrolisis y esta propiedad es la base de algunos sistemas usados en la desinfección del agua (las dosis consideradas para el tratamiento de agua están en el rango de 25 a 75 ppb). La aplicación de la plata como desinfectante del agua es limitada. El ión cobre, aplicado en forma de sulfato cúprico se usa frecuentemente como alguicida en el tratamiento de los suministros de agua. El ión cúprico es fuertemente bacteriostático pero relativamente ineficaz como bactericida. El mercurio es destructivo para las células humanas así como para los microorganismos, y por lo tanto no puede utilizarse para el agua potable.

**Alcalis y ácidos.** Las bacterias patógenas normalmente no sobreviven mucho tiempo en aguas fuertemente alcalinas o ácidas. La desinfección del agua por adición deliberada de ácido o base no se usa en la práctica.

**Detergentes.** Los detergentes catiónicos son altamente germicidas, pero no así los aniónicos. Los detergentes neutros ocupan una posición intermedia. Estos compuestos no han sido considerados seriamente para su uso en la desinfección del agua potable.

**Agentes físicos.** Los principales métodos físicos de la desinfección incluyen la aplicación de energía térmica y radiaciones de alta frecuencia.

**Desinfección por temperatura.** El agua puede ser desinfectada por medio de calentamiento. Este método es efectivo, sin embargo no es práctico en grandes escalas, no tiene acción residual y es caro.

**Radiación ultravioleta (UV).** La luz ultravioleta es un tipo de radiación electromagnética, y ha sido ampliamente demostrado que las bacterias, virus y hongos pueden ser destruidos por la radiación UV. El método de desinfección por medio de

UV, consiste en exponer unas películas delgadas de agua a una o varias lámparas de arco, que emiten radiación UV a una longitud de onda en el rango de 200-295 nm.

Con la radiación UV no se producen olores ni sabores y la sobredosis no produce ningún efecto nocivo, pero no tiene ningún efecto residual y se requieren grandes cantidades de energía eléctrica y de equipo muy caro.

**Ultrasonido.** El uso de las ondas de frecuencia ultrasónica tiene una gran efectividad como bactericida, sin embargo no tiene una aplicación práctica en el tratamiento de aguas, debido al consumo alto de energía eléctrica.

### 2.6.3 CLORACION

La cloración de los abastecimientos públicos de agua representa el proceso más importante usado en la obtención de agua de calidad sanitaria. El uso de cloro ya sea en forma de gas o de alguno de los diversos compuestos que lo contienen, como el cloruro de cal, el hipoclorito de sodio, etc., ha sido el desinfectante activo debido a su costo, confiabilidad, eficiencia y factibilidad de manejo, el cloro es el que prácticamente se usa siempre.

**Propiedades del cloro.** En condiciones normales de presión y temperatura, el cloro es un gas amarillo verdoso, que irrita las membranas mucosas y es muy tóxico. Sin embargo puede comprimirse fácilmente hasta un punto en que se licua y se carga en cilindros de acero. La Tabla 15 resume las propiedades del cloro en las fases gas y líquido.

**TABLA 15 ALGUNAS PROPIEDADES FISICAS DEL CLORO**

Temperatura crítica	143.5 ° C
Presión crítica	76.1 °C
Densidad crítica	0.57g/cm <sup>3</sup>
Peso específico (líquido)	1.57g/cm <sup>3</sup> a - 34 °C
Punto de ebullición (líquido)	- 34 °C
Punto de solidificación (líquido)	-102.4 °C
Solubilidad en agua	7300 mg/litro a 20°C y 1 atm.

Una disolución acuosa saturada de cloro forma un sólido con ocho moléculas de agua llamado hielo de cloro (Cl<sub>2</sub>.8H<sub>2</sub>O) a una temperatura de 9.56°C o inferior. Por esta razón, el agua clorada debe mantenerse entre 10 y 26.6°C.

La cantidad o dosificación de cloro se regula mediante aparatos especiales llamados cloradores, o en su caso hipocloradores. El gas cloro puede aplicarse por dos métodos: (1) adición directa a través de difusores o (2) alimentación a vacío en el cual una pequeña parte del caudal de agua se satura con cloro y después se mezcla con el caudal principal.

El cloro, principalmente en forma concentrada (líquida o gas) es un elemento peligroso y debe manejarse con precauciones especiales. Los posibles peligros asociados con el cloro pueden derivarse de: la toxicidad del gas, su elevada reactividad y los peligros de fuego y/o explosión, corrosión y elevadas presiones de almacenaje del gas.

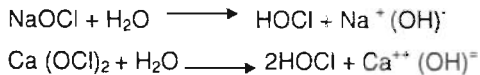
## 2.6.4 HIPOCLORACION

Otros compuestos de cloro, como el hipoclorito de sodio o de calcio, tienen también propiedades desinfectantes. Estos hipocloritos se agregan usualmente en forma de solución al agua que se va a tratar.

La solución de hipoclorito de sodio se puede encontrar bajo diferentes denominaciones comerciales o marcas y su concentración puede variar desde el 3 hasta el 15 % de cloro disponible, en peso, y son razonablemente estables cuando se guardan en lugares frescos y oscuros.

El hipoclorito de calcio, conocido también como cloruro de cal. En general este producto se encuentra disponible en el comercio con una concentración que varía del 25 al 37% de cloro disponible en peso, consistiendo el resto de material inerte.

Los hipocloritos de sodio y calcio se disocian completamente en una solución acuosa diluida dando el ión hipoclorito:



El compuesto activo en ambas soluciones es el ión hipoclorito ( $\text{OCl}^-$ ), el cual se hidroliza para formar el ácido hipocloroso.

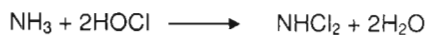
La solución de hipoclorito puede agregarse en un abastecimiento de agua mediante dispositivos improvisados, el tipo que se usa más comúnmente es una bomba de diafragma para soluciones. Hay otros dispositivos disponibles, tales como los tanques de presión en los que se almacena la solución de hipoclorito, la cual es forzada para salir mediante el bombeo de agua, aire o un aceite inerte, sin embargo casi no se utiliza en el tratamiento de aguas.

## Cloraminas

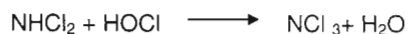
**Monocloramina  $NH_2Cl$ .** La monocloramina es un compuesto con un poder germicida mucho menor que el cloro. Formación de monocloramina,  $NH_2Cl$ .



**Dicloroamina  $NHCl_2$ .** La dicloroamina es un germicida más potente que monocloramina. Este compuesto no es usado en el área de agua potable, ya que origina problemas de olores y sabores. Formación de dicloroamina.



**Tricloroamina  $NCl_3$ .** Este compuesto es un agente oxidante efectivo, ha sido usado por mucho tiempo como fungicida, en el control de insectos de las frutas y como blanqueador de harina. En el área de agua potable no tiene aplicación ya que origina serios problemas de olores y sabores. Formación de tricloroamina,



En general, las velocidades de formación de cloraminas y la proporción de  $NH_2Cl$  y  $NH_2Cl_2$  producidos dependen principalmente del pH y la proporción de reactivos empleados.

El nitrógeno se encuentra presente en el agua en diferentes cantidades y en forma inorgánica y orgánica. Entre los diferentes compuestos más importantes desde el punto de vista cloración tenemos:



Nitrógeno inorgánico	Nitrógeno orgánico
Amonio	Aminoácidos
Nitritos	proteínas
Nitratos	

La cantidad de sustancias reductoras, materia orgánica y amoníaco, varía para cada agua y varía también con el tiempo, en el mismo abastecimiento de agua. Consecuentemente, también varía la cantidad de cloro que tiene que agregarse a un abastecimiento de agua para su desinfección. En la Figura 24 aparece una típica representación gráfica de las reacciones del cloro en el agua, y la curva en cuestión se conoce como (curva de demanda de cloro).

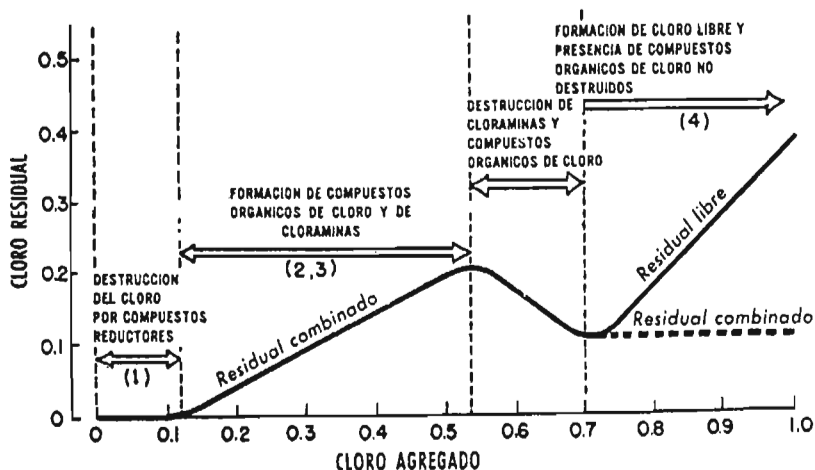


FIGURA 24 REACCIONES DEL CLORO EN EL AGUA<sup>8</sup>

<sup>8</sup>(Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York; (1980). Manual de Tratamiento de Aguas)

El cloro reacciona con elementos fácilmente oxidables, tales como, hierro y manganeso, ácido sulfhídrico, materia orgánica, lo cual ocasiona que parte del cloro sea reducido al ión cloruro. ( punto (1) de la Gráfica).

Después de cubrir esta demanda, el cloro sigue reaccionando con el amonio para formar las cloraminas, (punto (2,3) de la Gráfica)

Entre el punto (2,3) y el punto de quiebre, el cloro es reducido al ión cloruro y alguna cloraminas son oxidadas a tricloruro de nitrógeno.

Continuando la adición de cloro, pasando el punto de quiebre se puede entonces presentar un incremento proporcional de cloro libre disponible ( $\text{HClO}$  que no reacciona).

La cantidad de cloro que consumen las sustancias reductoras y la materia orgánica se define como demanda de cloro. Cuantitativamente se define la demanda de cloro como la cantidad que se agrega, menos la cantidad que hay después del período de reacción seleccionado. La cantidad de cloro que permanece después del período de reacción, se define como cloro residual y se expresa en  $\text{mg/l}$  o  $\text{ppm}$ . El cloro residual puede existir como compuestos clorados de materia orgánica y amoniaco, en cuyo caso se conoce como "cloro residual combinado"; puede estar presente como cloro libre y en este caso se conoce como "cloro residual libre"; o puede estar al mismo tiempo como "combinado" y como "cloro residual libre" , en este caso se conoce como "cloro residual total".

**Factores que influyen en la desinfección.** Cuando el objetivo de la cloración es únicamente la desinfección, las consideraciones más importantes para su eficiencia serán: pH, temperatura, concentración y la resistencia de los organismos presentes a la acción del cloro con períodos de tiempo de contacto largos.

- **Tiempo y concentración.** Estos parámetros son importantes para determinar el período de reacción disponible para la desinfección, así como la cantidad y clase de cloro residual. Si tiene que confiarse en el cloro combinado, que en un desinfectante débil, debe proporcionarse una mayor concentración durante un

tiempo mayor. Por otro lado, si se va a mantener cloro residual libre, el cual es un desinfectante activo, entonces el periodo de reacción puede ser proporcionalmente menor. La Figura 25 ilustra gráficamente estos factores en particular.

- **Temperatura.** La temperatura del agua afecta sensiblemente la acción desinfectante del cloro residual (Figura 26).
- **pH.** El pH del agua afecta la acción desinfectante del cloro, particularmente la del cloro residual combinado la Figura 25, nos indica que al aumentar el pH, debemos aumentar la dosificación de cloro residual y el tiempo de contacto.

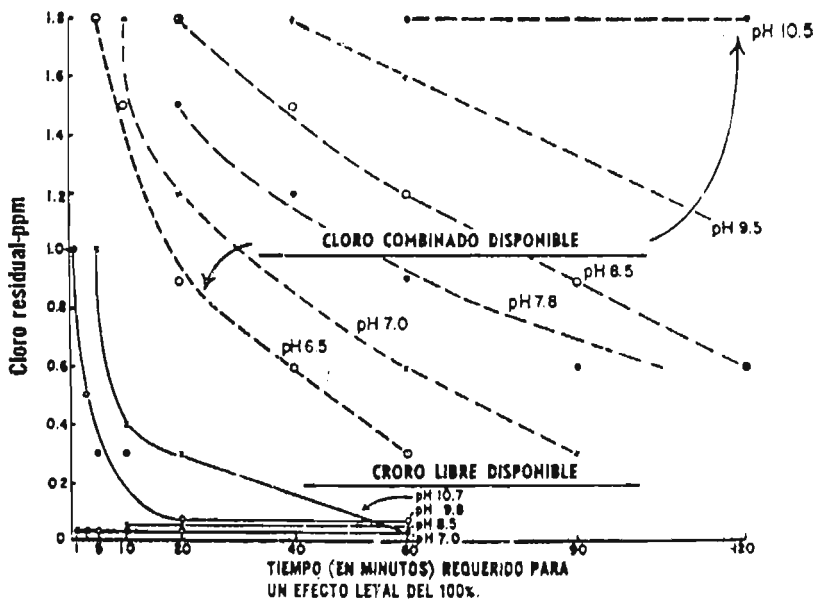


FIGURA 25 EFECTO DE LA CLASE DE CLORO RESIDUAL Y EL TIEMPO<sup>8</sup>

<sup>8</sup> (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York; (1980). Manual de Tratamiento de Aguas)

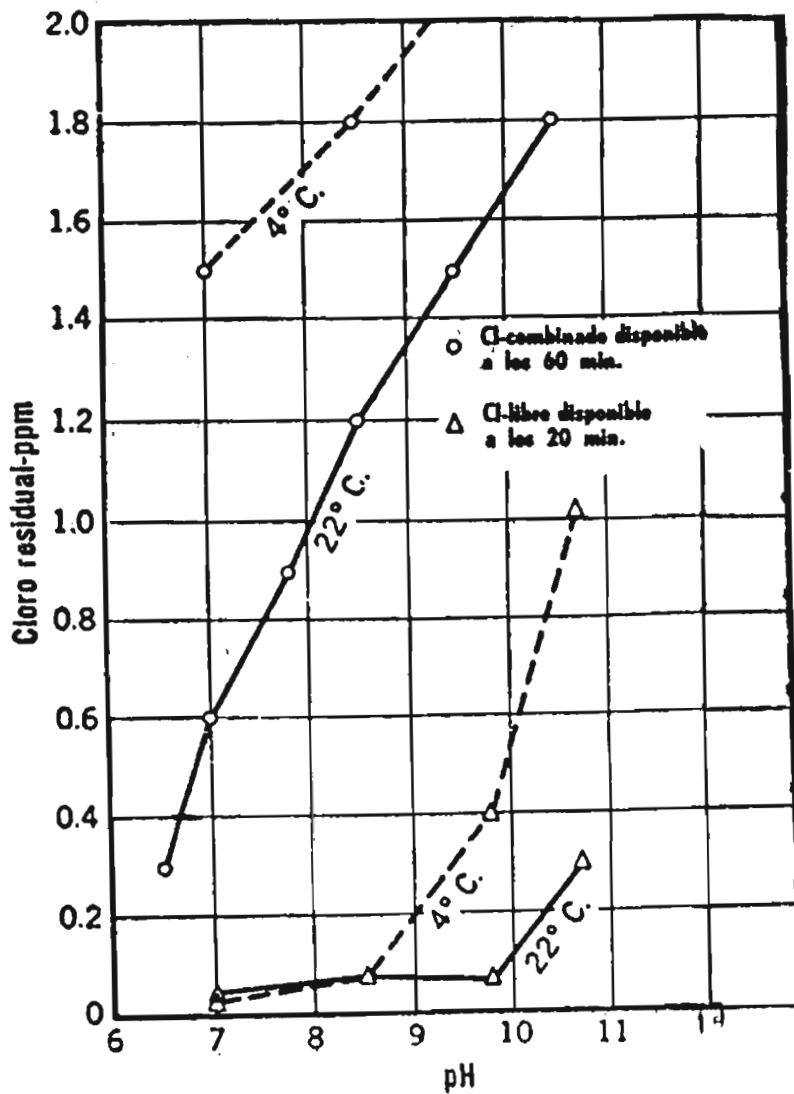


FIGURA 26 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE EL CLORO RESIDUAL<sup>8</sup>

<sup>8</sup> (Departamento de Sanidad del Estado de Nueva York; (1980). Manual de Tratamiento de Aguas)

**Puntos de aplicación.** El uso del cloro en diferentes puntos del sistema de tratamiento de agua y aún en el sistema de distribución es una práctica común.

Fundamentalmente los puntos en los cuales el cloro es aplicado, depende de los objetivos específicos de la cloración y en consideraciones prácticas, económicas y de seguridad.

- **Cloración.** Implica la aplicación de cloro al agua que no recibe ningún tratamiento.
- **Pre-cloración.** Implica la aplicación de cloro al agua antes de cualquier otro proceso de tratamiento.
- **Pos-cloración.** Implica la aplicación del cloro al agua después de los procesos de tratamiento.
- **Re-cloración.** Implica la aplicación del cloro al agua, después de un tratamiento de cloración en uno o más puntos del sistema de distribución especialmente cuando los sistemas de distribución son muy grandes.
- **Decloración.** Es la reducción parcial o completa del cloro residual en el agua por cualquier tratamiento físico o químico. La decloración por bióxido de azufre y sus derivados es una práctica adecuada, rápida y precisa, a estos compuestos se les llama decloradores.

**Bióxido de cloro ( $Cl_2O$ ).** El bióxido de cloro, es un gas inestable pesado, amarillo rojizo, de olor desagradable y picante. Aunque el bióxido de cloro se uso inicialmente para el control del olores y sabores, se ha encontrado que se obtienen disminuciones satisfactorias de bacterias, cuando menos tan efectivas como al usar el cloro en valores normales de pH, y más eficaces a valores de pH más altos.

El bióxido de cloro también se uso para la oxidación de sulfuros, hierro y manganeso. El bióxido de cloro tiene la ventaja de ser un buen bactericida (Clark y Viessman, 1965), siendo la principal desventaja su costo.

## **CAPITULO 3**

### **CASO APLICACION: ANALISIS DE LA PLANTA SAN SEBASTIAN TECOLOXTITLA PARA EL TRATAMIENTO DE AGUA A PIE DE POZO CUYA CALIDAD DE AGUA ES DEFICIENTE**

### 3.1 ANTECEDENTES

El programa de control de calidad del agua de pozos que lleva a cabo la Subdirección Técnica del Sistema de Aguas de la Ciudad de México del D.F., ha mostrado que desde la década de los sesentas, la calidad del acuífero en la zona oriente de la Ciudad de México, se ha deteriorado, conllevando a la implementación de trenes de tratamiento para dar solución a dicha problemática. El comportamiento de estos contaminantes ha sido variable, así como su respuesta a los distintos procesos de potabilización que le son aplicados.<sup>15</sup>

En el caso de la planta potabilizadora San Sebastián Tecoloxtitla, ubicada en la zona oriente de la Ciudad de México, entre las calles Federico Garza y Pedro Aceves, Colonia San Sebastián Tecoloxtitla, Delegación Iztapalapa; el agua que se extrae del pozo en cuestión, ha sido caracterizada durante los últimos años, encontrándose grandes deficiencias en su calidad como fuente abastecedora de agua potable.

Al analizar la información histórica de la calidad del agua del pozo entre los años de 1998 a la fecha, se han identificado que el 40 % de los parámetros evaluados del agua no cumplen satisfactoriamente con la Norma NOM-127-SSA1-1994 agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.

En general los parámetros fuera de norma son los siguientes; color, conductividad eléctrica, alcalinidad total, sólidos disueltos totales, nitrógeno amoniacal, nitrógeno protéico, sodio y potasio, los cuales no son removidos eficientemente por medio del tren de tratamiento implementado en la planta. Por tal motivo se requiere evaluar la funcionalidad de los procesos instalados y determinar si de alguna manera cumple con la función de remover los contaminantes fuera de criterio y que propiciaron la construcción de dichos trenes.

<sup>15</sup> (Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, Sistema de Aguas de la Ciudad de México)

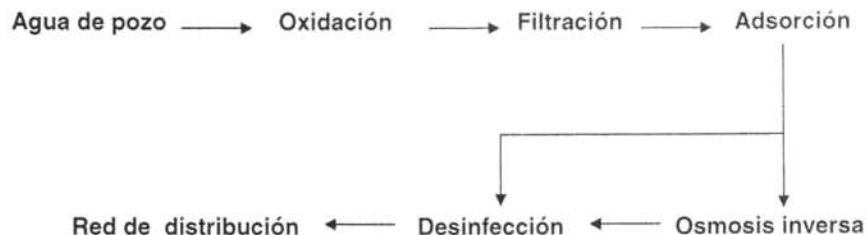
El proceso de tratamiento establecido es el siguiente: oxidación con ozono, filtración dual arena- antracita, adsorción con carbón activado granular, ósmosis inversa y desinfección con hipoclorito de sodio.

### 3.2 OBJETIVO GENERAL

Evaluación del tren de tratamiento en la potabilización del agua del pozo San Sebastián Tecoloxtitla, que actualmente presenta características deficientes e implementar alternativas de tratamiento o adecuaciones que permitan la remoción de los contaminantes y por lo tanto de la calidad del agua esperada, acorde a la Norma NOM-127-SSA1-1994.

### 3.3 DESCRIPCION DEL SISTEMA

Actualmente la planta potabilizadora San Sebastián Tecoloxtitla cuenta con un tren de tratamiento integrado por los siguientes procesos:





## FILOSOFIAS DE OPERACION

- Operación continua todo el año, con personal operativo de turnos de 24 horas.
- La planta sale fuera de operación durante el retrolavado de filtros y columnas de carbón activado.
- Trabajos de mantenimiento a los equipos de proceso, programados por lo general en horas de bajo consumo de agua.
- La planta sale fuera de operación en caso de falla de energía eléctrica, no se cuenta con planta de emergencia.

## AGUA DE POZO

El sistema de bombeo del pozo San Sebastián Tecoloxtitla, ha estado funcionando durante varios años utilizando para la succión del agua, una bomba centrífuga tipo turbina para pozo profundo, con lo siguientes datos generales;

Nombre del pozo: San Sebastián Tecoloxtitla

Bomba: centrífuga tipo turbina lubricada por agua

Gasto teórico y práctico: 29 litros/ segundos

Estado del pozo: operando, suministrando agua a la población

Hp : 75

Voltaje de operación: 440 Volts

Profundidad: 250 m

Nivel estático: 72 m

Nivel dinámico: 76 m

La energía necesaria para conducir el agua a través del tren de tratamiento, es suministrado por bombeo. La alimentación de bombeo, descarga directamente a través de una tubería de acero de 6 pulgadas de diámetro, para su proceso posterior a la oxidación, filtración, adsorción, ósmosis inversa hasta el tanque de contacto para desinfección.

## **OXIDACION**

Se inicia una oxidación con ozono bajo una concentración de 2 mg/l, esta operación unitaria tiene como objetivo general la oxidación del nitrógeno amoniacal y del nitrógeno protéico, parámetros que exceden notablemente la norma, esta operación unitaria permite también la oxidación de otros contaminantes como son el hierro y el manganeso, que influyen en la estética del agua, así como la biomasa presente en el influente.

La operación de oxidación se efectúa en un tanque de acero inoxidable (TP-304) abierto, el ozono se inyecta a través de seis difusores de burbuja fina de 2 pulgadas de diámetro por 24 pulgadas de largo, localizados en la parte central del tanque, es decir a una altura intermedia del mismo, con un ángulo de inclinación de 60°, el flujo es a contra corriente, por lo que la alimentación del influente es por la parte superior del tanque. El efluente oxidado pasa posteriormente a una filtración a presión.

## **DESCRIPCION DEL GENERADOR DE OZONO**

El generador de ozono es una unidad que está alojada dentro de un gabinete de acero inoxidable, el cual solo requiere para su funcionamiento conexión eléctrica, conexiones para agua de enfriamiento, suministro de aire comprimido y tubería para el sistema de contacto de ozono. A continuación se describen las partes del equipo de ozonación.

### **I. PREPARACION DE AIRE**

El generador de ozono tiene un compresor de aire, libre de aceite, montado sobre un tanque receptor completo con arrancador, interruptor de presión, válvula de alivio, indicador de presión y trampa para drenar condensados. El equipo para la preparación del aire forma parte del generador y está compuesto de los siguientes dispositivos:

- 2 Filtros separadores de humedad con trampas de condensados

- Secador de aire con regeneración automática

- Filtro eliminador de polvo

### **Compresor no lubricado**

El compresor es del tipo pistones no lubricados, con motor trifásico.

### **Separador de humedad**

El aire comprimido pasa a través de dos filtros separadores de humedad para remover contaminantes como incrustación de las tuberías y gotas de agua. El segundo filtro tiene un elemento coalescente con una retención de 0.01 micra. Cada prefiltro tiene un dren automático de condensados.

### **Secador de aire**

El secador de aire es del tipo de cambio a base de presión consistiendo de dos cámaras de secado las cuales están alternadamente secando el aire y siendo regeneradas en un ciclo de 4 minutos. El secador está diseñado para producir aire seco a un punto de rocío atmosférico de  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  mientras opera a una presión de  $7\text{ kg/cm}^2$ .

### **Filtro eliminador de polvos**

Después del secador hay un filtro submicronico para eliminar posibles arrastres de polvo de desecante.

## **II. GENERADOR DE OZONO**

El ozono se produce a partir de la alimentación de aire al generador de ozono. El generador es capaz de producir ozono a una concentración de hasta 1.5% en peso con una temperatura de agua de enfriamiento de  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### **Celda generadora**

La celda es parecida en construcción a un intercambiador de tipo coraza y tubos. Está fabricada en acero inoxidable 316L y consiste de una coraza cilíndrica que contiene los tubos alojadores de los dieléctricos con una mirilla de vidrio en el extremo para permitir observar el efecto corona. Entre los tubos fluye agua de enfriamiento. El generador de ozono está diseñado para operar a  $1\text{ Kg/cm}^2$  en lado del aire y a  $2\text{ kg/cm}^2$  en el lado

del agua. La celda contiene dieléctricos de cristal Pyrex, internamente metalizados con un recubrimiento contiguo de aluminio de al menos 0.010" de espesor y firmemente adherida al cristal. Cada dieléctrico está equipado con dos espaciadores y un cepillo de alta tensión.

### **Suministro de potencia**

El generador de ozono necesita energía eléctrica monofásica. Cualquier voltaje estándar puede ser utilizado. Cuenta con un control de potencia capaz de modular la producción de ozono entre 20% y 100 % de la capacidad máxima. La modulación de potencia se obtiene mediante un transformador variable. La salida del transformador variable está conectada al embobinado primario del transformador de alto voltaje.

### **Sistema de control**

El generador de ozono tiene los siguientes elementos de control montados sobre la puerta del gabinete:

- Interruptor para preparación de aire
- Interruptor para la generación de ozono
- Perilla de control del nivel de potencia
- Luces rojas de falla

### **III. SISTEMA DE CONTACTO OZONO-AGUA**

El aire ozonizado se conduce del generador al punto de inyección por medio de tubería de acero inoxidable de 1/2" de diámetro (inyección al tanque de oxidación).

### **FILTRACION**

El efluente proveniente del proceso de oxidación pasa al tren de filtración del tipo a presión constituido por dos filtros con arreglo tipo paralelo, esta operación unitaria tiene la finalidad de remover básicamente el producto de las reacciones de oxidación entre el ozono y la biomasa presente en el agua, remoción de color, turbiedad así como materia

disuelta como fierro y manganeso que dan como resultado la formación de sólidos suspendidos que son eliminados a través de su lecho filtrante que está compuesto de grava (30 cm), arena (15 cm) y antracita (45 cm), opera a flujo descendente, es decir el efluente oxidado se alimenta por la parte superior de cada filtro y desemboca por la parte inferior de los mismos. Así las partículas que se encuentren en el agua serán retenidas en el medio filtrante llevado a cabo por el transporte de las partículas dentro de los poros y la adherencia a los granos del medio. El retrolavado de cada filtro es llevado a cabo de la siguiente manera:

- Se retrolava un filtro a la vez, con agua filtrada.
- El retrolavado se hace con el equipo de bombeo.
- El tiempo de retrolavado es de 10 a 15 minutos.
- El arreglo hidráulico, deberá ser tal, que permita esta operación sin problema alguno.
- El retrolavado se hace a contra-corriente.

## **ADSORCION**

La adsorción con carbón activado granular (de origen mineral, fabricado de carbón lignítico, granulometría 80 X 30 mallas) se lleva a cabo posteriormente a la filtración y es utilizado básicamente para mejorar las propiedades organolépticas del agua como son el color, olor y sabor, esta operación unitaria también tiene como propósito servir como un pre-tratamiento para la ósmosis inversa, dado que al remover la materia orgánica en la adsorción, se reducirán los problemas de saturamiento de las membranas.

El efluente proveniente del proceso de filtración pasa al tren de adsorción del tipo a presión constituido por tres torres con arreglo tipo paralelo. El efluente filtrado se alimenta por la parte superior de cada columna de adsorción, distribuyéndose el agua en el lecho adsorbente, adhiriéndose las moléculas contaminantes en la superficie del carbón activado, por la parte inferior descarga el efluente adsorbido, para su posterior

tratamiento; el 75% de flujo es conducido al proceso de ósmosis inversa y el 25% de flujo es conducido al proceso de desinfección.

El retrolavado de cada torre de adsorción es llevado a cabo de la siguiente manera:

- Se retrolava una columna a la vez, con agua adsorbida.
- Las columnas deben estar completamente inundadas.
- El retrolavado se hace con el equipo de bombeo.
- El tiempo de retrolavado es de 10 a 20 minutos.
- El arreglo hidráulico, deberá ser tal, que permita esta operación sin problema alguno.
- El retrolavado se hace a contra-corriente.

## **OSMOSIS INVERSA**

El proceso de ósmosis inversa tiene como función la remoción de sales, como es el caso del sodio, potasio, que se encuentran en altas concentraciones y por lo tanto disminuir la conductividad eléctrica. El proceso de ósmosis inversa utiliza membranas de poliamida, por la cual pasa el agua libre de contaminantes, que se encuentran presentes en el agua. La ósmosis inversa está integrada por tubos de presión, en el cual, en su interior se encuentran alojadas las membranas, el agua es alimentada por un extremo de los tubos de presión, fluyendo a través de él, el agua purificada pasa a través de la membrana y los contaminantes (salmuera) se descargan en el extremo opuesto del tubo de presión. De esta manera se lleva a cabo la remoción de los contaminantes. El agua purificada (permeado) pasa finalmente al proceso de desinfección. A continuación se describe el equipo de ósmosis inversa.

## **DESCRIPCION DEL EQUIPO DE OSMOSIS**

El sistema de ósmosis inversa (Figura 27) consta de dos etapas que están interrelacionadas y son las siguientes:

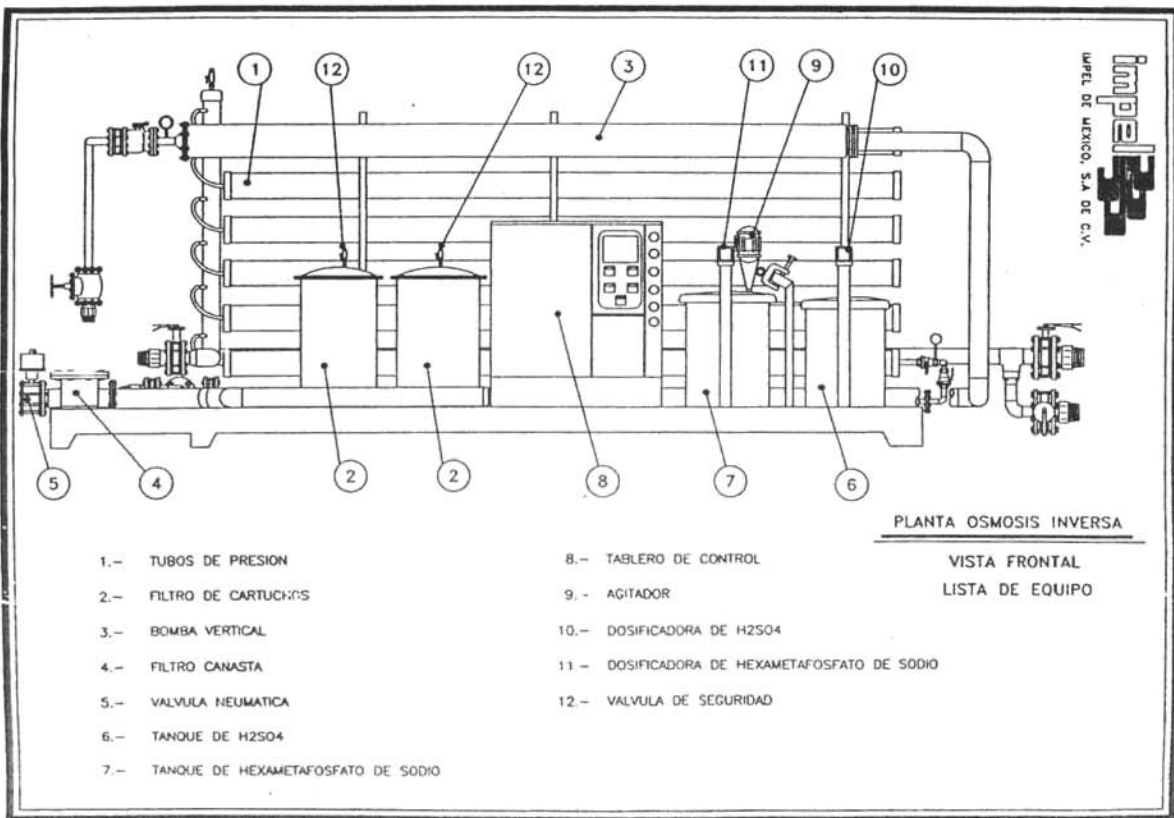


FIGURA 27 EQUIPO DE OSMOSIS INVERSA

## **I PRETRATAMIENTO**

Es la sección del sistema donde se ajustan las condiciones del agua de alimentación para que las membranas tengan un óptimo funcionamiento y una larga vida útil. Esta etapa del tratamiento se opera a baja presión y consiste en la adición de reactivos químicos, como son el ácido sulfúrico concentrado para ajustar el pH y la dosificación de hexametáfosfato de sodio, como anti-incrustante. Así también cuenta con dos filtros de cartucho para eliminar la posible presencia de sólidos en suspensión. El filtro de cartucho es un recipiente a presión fabricado en placa de acero inoxidable TP-304, que tiene en su interior 12 cartuchos filtrantes por cada filtro de cartucho, estos filtros cartucho están fabricados de polipropileno de 29 ¼" de longitud, 1" de diámetro interior y 5 micras de retención.

## **II OSMOSIS INVERSA**

La siguiente sección del tratamiento lo constituyen los tubos de presión donde el agua de alimentación es presurizada y el flujo dirigido a través de las membranas. Una parte importante del agua de alimentación bajo una presión normal de 278 psig es separada de la corriente principal y dirigida a través de la membrana semi-permeable y colectada como permeado (agua tratada).

La corriente principal incrementa en forma progresiva su concentración de sales disueltas a medida que el agua es removida durante su paso a través de los módulos, finalmente sale como una corriente separada denominada salmuera o concentrado.

## **BOMBA DE ALIMENTACION**

Se dispone de una bomba centrífuga para incrementar la presión del agua de alimentación al nivel requerido por el proceso de ósmosis inversa. Con el fin de prevenir que la bomba trabaje en vacío se dispone de un interruptor de presión localizado en la línea de suministro de agua cruda; el cual está calibrado a 20 psig, en forma adicional se dispone de las siguientes protecciones:



Un interruptor de bajo flujo de agua cruda calibrado a 300 gpm

Un interruptor de alta presión calibrado a 310 psig

## **TUBOS DE PRESION**

Los 9 tubos de presión en acero inoxidable tienen arreglo 6-3. El agua de alimentación a presión se divide en un cabezal de tubería y se suministra a los primeros 6 tubos. Como se ha mencionado, el agua de alimentación se separa en dos corrientes durante su paso a través de la membrana semipermeable de los elementos. El agua permeada después de pasar por la membrana se colecta como una corriente separada, mientras que el concentrado de los seis primeros tubos se convierte en el agua de alimentación para el segundo arreglo de tubos.

## **CONDUCTIVIDAD DEL PERMEADO**

La conductividad eléctrica del agua tratada es continuamente monitoreada por un sensor de conductividad colocado en la tubería y la señal transmitida a un indicador montado en el frente del tablero de control.

## **CONTROL DE FLUJO (PERMEADO)**

La cantidad de permeado producido por el proceso de ósmosis inversa es medida por un indicador de gasto montado al frente del tablero de control y se ajusta con la válvula de salida de rechazo. Un ajuste hacia la posición abierta (menor presión de operación) reduce el flujo de permeado; un ajuste hacia la posición cerrada (mayor presión de operación) incrementa el flujo de permeado.

## **CONTROL DE FLUJO (RECHAZO)**

Para su control se dispone de un indicador de flujo en el tablero de control con un transmisor montado en tubería y una válvula de control manual.

## **INDICADORES DE PRESION**

La presión del agua a la cual las membranas semipermeables de los elementos son expuestas, es normalmente descrita como la presión de operación del sistema de

ósmosis inversa. Se dispone de manómetros montados en el panel junto al tablero de control para la los siguientes servicios:

- Pérdida de presión a través del filtro de cartucho
- Presión de operación del sistema de ósmosis inversa
- Presión de operación de la segunda etapa
- Presión en línea de agua tratada o permeado
- Presión en línea de concentrado o rechazo

## **DESINFECCION**

Se finaliza el tren de tratamiento con el proceso de desinfección del agua para la destrucción de los microorganismos patógenos causantes de enfermedades. Las enfermedades bacterianas típicas transmitidas por el agua son: la tifoidea, el cólera y la disentería bacilar, mientras que las enfermedades causadas por los virus incluyen a la poliomielitis, gastroenteritis y la hepatitis infecciosa.

La planta cuenta con un cárcamo de concreto armado en la cual se lleva a cabo la cloración del agua para ser distribuida a la comunidad, asegurando su calidad como agua potable, utilizándose hipoclorito de sodio como desinfectante, bajo la dosis necesaria que produzca un residual de cloro libre de 0.5 mg/l al final del período de contacto, con este residual se garantiza la calidad del agua a lo largo de su recorrido por la red de distribución. La desinfección en la planta San Sebastián Tecoloxtitla se hace con hipoclorito de sodio a una concentración del 12.5%.

## **EFLUENTE FINAL**

Finalmente, el agua potable se conduce hacia la red de distribución donde se mide el residual de cloro libre. La tubería de la planta potabilizadora San Sebastián Tecoloxtitla

es de acero al carbón de 6 pulgadas de diámetro, con válvulas de compuerta de 6 pulgadas de diámetro, para permitir el control de operación del proceso y en el caso de requerirse el mantenimiento de algunos de los tanques de proceso, mediante la acción de abrir o cerrar las válvulas respectivas de la acción necesaria.

En resumen, la planta está configurada para arrancar con las siguientes secuencias de operación:

A).- Bomba de pozo, tanque de oxidación, dos filtros de lecho dual, tres torres de adsorción, ósmosis inversa, desinfección y red de distribución.

B).- Bomba de pozo, tanque de oxidación, dos filtros de lecho dual, tres torres de adsorción, desinfección y red de distribución.

C).- Bomba de pozo, dos filtros de lecho dual, tres torres de adsorción, ósmosis inversa, desinfección y red de distribución.

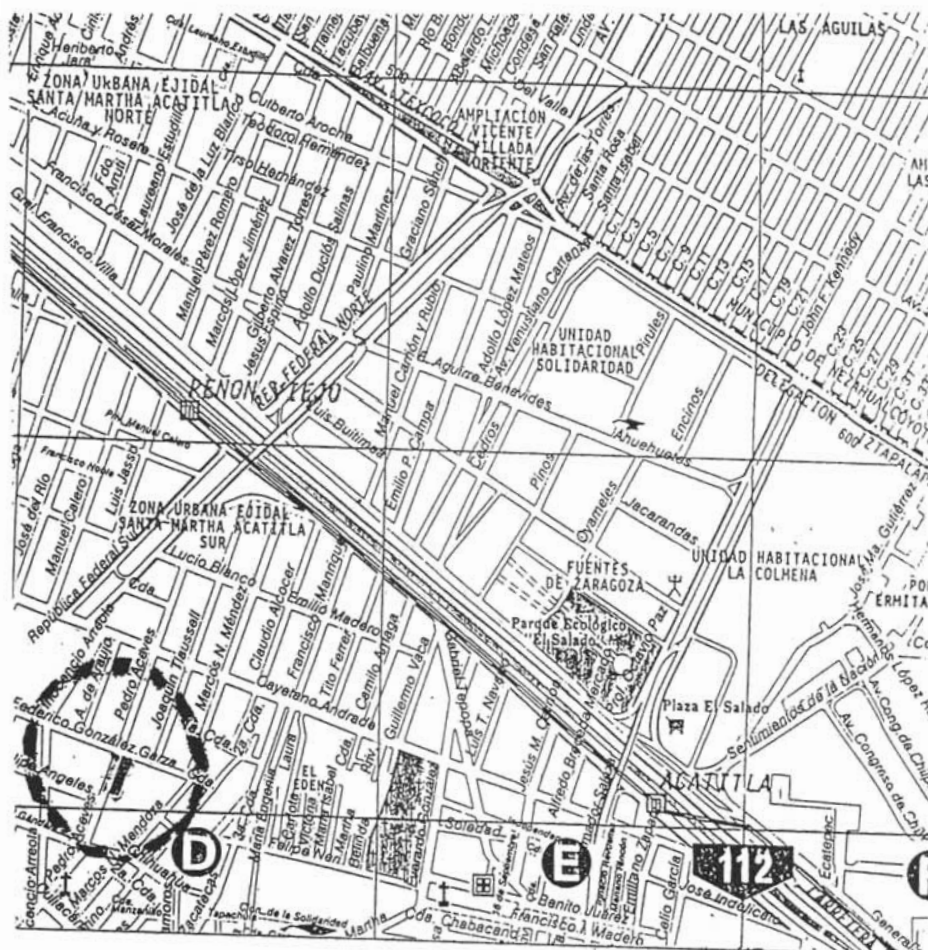
D).- Bomba de pozo, tanque de oxidación, un filtro de lecho dual, dos torres de adsorción, ósmosis inversa, desinfección y red de distribución.

E).- Bomba de pozo, desinfección y red de distribución.

Cabe mencionar que la primer secuencia A), se considera como la mejor condición de tratamiento, ya que cuenta con las operaciones unitarias para la remoción de hierro, manganeso, sólidos suspendidos, a través de la oxidación con ozono, y la subsecuente retención en los filtros de lecho dual arena-antracita; del material orgánico disuelto(color, olor y nitrógeno orgánico) por adsorción en carbón activado; la remoción de sales disueltas como sodio, potasio, sulfatos, etc., mediante ósmosis inversa y la eliminación de microorganismos patógenos por desinfección con hipoclorito de sodio.

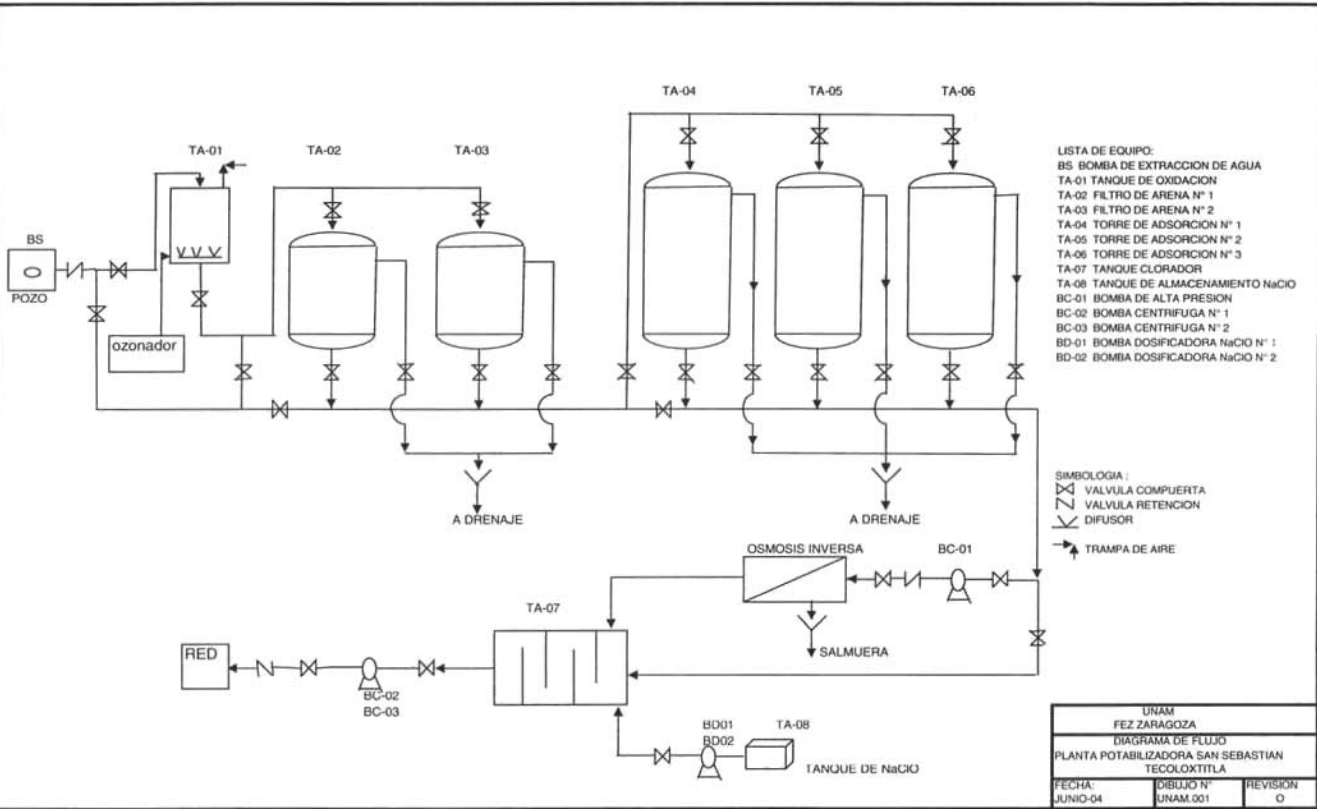
### 3.4 CROQUIS DE LOCALIZACION

El predio que aloja el pozo y el sistema de potabilización actual, se encuentra en la calle Federico Garza sin número, esquina con Pedro Aceves, Colonia San Sebastián Tecoloxtitla Delegación Iztapalapa D. F. <sup>21</sup>



### 3.5 DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO (VER DIBUJO UNAM-001)

<sup>21</sup> (Palacios A. y J. Palacios Roji Garcia; (2000). Guia Roji Ciudad de México)



- LISTA DE EQUIPO:
- BS BOMBA DE EXTRACCION DE AGUA
  - TA-01 TANQUE DE OXIDACION
  - TA-02 FILTRO DE ARENA N° 1
  - TA-03 FILTRO DE ARENA N° 2
  - TA-04 TORRE DE ADSORCION N° 1
  - TA-05 TORRE DE ADSORCION N° 2
  - TA-06 TORRE DE ADSORCION N° 3
  - TA-07 TANQUE CLORADOR
  - TA-08 TANQUE DE ALMACENAMIENTO NaClO
  - BC-01 BOMBA DE ALTA PRESION
  - BC-02 BOMBA CENTRIFUGA N° 1
  - BC-03 BOMBA CENTRIFUGA N° 2
  - BD-01 BOMBA DOSIFICADORA NaClO N° 1
  - BD-02 BOMBA DOSIFICADORA NaClO N° 2

SIMBOLOGIA :

- VALVULA COMPUERTA
- VALVULA RETENCION
- DIFUSOR
- TRAMPA DE AIRE

UNAM		
FEZ ZARAGOZA		
DIAGRAMA DE FLUJO		
PLANTA POTABILIZADORA SAN SEBASTIAN		
TECOLOXITTLA		
FECHA:	DIBUJO N°	REVISION
JUNIO-04	UNAM.001	0

### 3.6 BALANCE DE MATERIA

#### CARACTERISTICAS DEL POZO SAN SEBASTIAN TECOLOXTITLA

CARACTERISTICA	VALOR
Profundidad (m)	250
Diámetro de ademe (pulgadas)	22
Nivel estático (m)	72
Nivel dinámico (m)	76
Gasto nominal (l/s)	29
Gasto de diseño (l/s)	29

#### ANALISIS DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL POZO SAN SEBASTIAN TECOLOXTITLA.

De los resultados proporcionados por el Sistema de Aguas de la Ciudad de México del D.F., acerca de la caracterización del agua del pozo San Sebastián Tecoloxtitla, se observa que los parámetros que salen fuera de los estándares de la calidad establecida por el sistema de aguas de la Ciudad de México (SACM), se encuentran: el color con 22.8 UPT/Co, la conductividad eléctrica con 2362  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , alcalinidad total con 681 mg  $\text{CaCO}_3/\text{l}$ , la D.Q.O. total con 22 mg/l, los sólidos totales disueltos con 1322 mg/l, el nitrógeno amoniacal con 3.3 mg/l, el nitrógeno proteico con 0.4 mg/l, calcio con 33 mg/l y el sodio con 436 mg/l .

La calidad del influente fue determinado en base a registros existentes comprendido durante el periodo 2000 – 2003, en general la calidad del agua que se trata en la planta potabilizadora se resumen en la Tabla 16.

TABLA 16 CALIDAD DEL AGUA DE POZO

PARAMETRO	UNIDAD	CONCENTRACION	
		HISTORICA PROMEDIO AÑOS 2000-2003	NORMA 127-SSA1- 1994 *
pH	Unidades de pH	8.2	6.5-8.5
Turbiedad	UTN	0.6	5
Conductividad eléctrica	µs/cm	2362	1500
Color	UPt/Co	22.8	20
Alcalinidad total	mg/l	681	400
Cloruros	mg/l	184	250
DQO	mg/l	22	4
Sólidos disueltos totales	mg/l	1322	1000
Dureza total	mg/l	266	500
Nitrógeno como nitratos	mg/l	0.9	10
Nitrógeno como nitritos	mg/l	0.011	0.05
Nitrógeno amoniacal	mg/l	3.3	0.50
Nitrógeno proteico	mg/l	0.24	0.10
Sulfatos	mg/l	320.4	400
Calcio	mg/l	33	30
Hierro	mg/l	0.06	0.3
Manganeso	mg/l	0.052	0.15
Arsénico	mg/l	0.00122	0.05
Sodio	mg/l	436	200
Coniformes totales	NMP/100 ml	0	2
Coniformes fecales	NMP/100 ml	0	0
Cuenta estandar	Col/100 ml	77	200

\* Algunos parámetros considerados en la Norma.

## BALANCE DE MATERIA

El balance de materia de los parámetros que se encuentran fuera de norma se presenta en la Tabla 17.

TABLA 17 BALANCE DE MATERIA DE LA PLANTA POTABILIZADORA SAN SEBASTIAN TECOLOXTITLA

(Datos promedio de los meses: Enero Febrero y Marzo del 2004 )

PARAMETRO	UNIDADES	NORMA DE AGUA POTABLE	INFLUENTE	OXIDACION	FILTRACION	ADSORCION	OSMOSIS INVERSA	EFLUENTE
pH	UpH	6.5-8.5	8.2	8.2	8.2	8.3	8.0	7.9
Turbiedad	UTN	5	0.60	0.69	0.52	0.5	0.4	0.5
Color	UPI/Co	20	25.0	30.0	20	23.0	23.0	20.0
Conductividad	μSiemens/cm	1500	2373	2318	2318	2373	2318	2318
Alcalinidad total	mg/l	400	565.3	534.6	532.2	581.6	523	558.8
Dureza total	mg/l	500	249	246	246	253	248	245
Sólidos disueltos totales	mg/l	1000	1468	1494	1468	1466	1452	1494
Nitrógeno de nitrato	mg/l	10	0.94	0.80	0.73	0.73	0.7	0.89
Nitrógeno de nitrito	mg/l	0.05	0.011	0.011	0.011	0.010	0.010	0.015
Nitrógeno amoniacal	mg/l	0.5	2.86	2.71	2.72	1.90	1.57	1.56
Nitrógeno protéico	mg/l	0.1	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22
Sulfatos	mg/l	400	319.2	309.0	280.9	314.9	327.6	336.9
Cloruros	mg/l	250	157.3	148.5	150.2	150.4	145	170.5
DQO	mg/l	4	20.0	23.2	22.4	19.0	18.6	17.0
Coliforme total	Col/100 ml	2	0	0	0	0	0	0
Coliforme fecal	Col/100 ml	0	Negativo-	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo	Negativo
Cuenta estandar	Col/100 ml	200	120	100	20	18	30	5
Hierro total	mg/l	0.3	0.018	0.018	0.018	0.018	0.024	0.018
Manganeso total	mg/l	0.15	0.047	0.040	0.037	0.037	0.039	0.037
Silicio	mg/l		21	21	21	21	21	21
Sodio	mg/l	200	514	504	495	492	455	476
Calcio	mg/l		31.8	31.8	31.8	31.7	27	30.2



De acuerdo con el balance de materia, el tren de potabilización que presenta la planta se encuentra en condiciones deficientes para la remoción satisfactoria de los parámetros fuera de norma.

La presencia de valores superiores a los indicados por la norma, pone en riesgo a los consumidores.

La importancia de la evaluación de la planta, es para cumplir con la dotación de agua potable con un gasto de 29 l/s, considerando una operación de planta de 8760 horas/año, lo que representa un volumen de 2505 m<sup>3</sup>/día. Con dicho suministro es posible atender las necesidades cotidianas de una población cercana a 12528 habitantes.

### **3.7 EVALUACION DE LA PLANTA POTABILIZADORA SAN SEBASTIAN**

Actualmente el pozo de San Sebastián Tecoloxtitla tiene instalado un sistema de tratamiento para potabilizar el agua, el cual consta de los procesos; oxidación con ozono, filtración, adsorción, ósmosis inversa y desinfección, procesos que han sido analizados recientemente en base a la caracterización de su efluente, observándose que la calidad del agua no cumple con los requerimientos para el consumo humano.

En la Tabla que a continuación se presenta se hace mención de los parámetros que deben ser removidos a través de las operaciones unitarias existentes:

## PROCESO DE TRATAMIENTO

OPERACION UNITARIA	REMOCION
Oxidación con ozono	Biomasa, NO <sub>2</sub> , N-amoniacal y N-protéico, color y olor.
Filtración	Turbiedad, color, óxidos precipitados (Fe <sup>+3</sup> y Mn <sup>+4</sup> ), organismos patógenos.
Adsorción	Materia orgánica, color, sabor y olor
Osmosis inversa	Sales disueltas e iones metálicos como: sodio, potasio, y conductividad eléctrica
Desinfección	Organismos patógenos (coliformes)

Sin embargo existen deficiencias de remoción de los parámetros que están fuera de norma, de acuerdo al balance de materia, observándose lo siguiente;

- Los parámetros fuera de norma como es el caso de la conductividad eléctrica, alcalinidad total, sólidos disueltos totales, nitrógeno amoniacal, nitrógeno protéico, DQO y sodio no existe la remoción de ellos.
- En lo que respecta a los parámetros de nitrógeno protéico, sólidos disueltos totales y alcalinidad total, no existe remoción de ellos, ya que se presentan en concentraciones similares.

En la Tabla 18 se resume la caracterización del influente y efluente de la planta potabilizadora San Sebastián Tecoloxtitla, concentraciones promedio del mes de mayo del 2004.

TABLA 18 CARACTERIZACION DEL EFLUENTE DE LA PLANTA POTABILIZADORA SAN SEBASTIAN TECOLOXITLA (Datos promedio del mes de mayo del 2004)

PARAMETRO	UNIDADES	NORMA Y/OCRITERIO DE AGUA POTABLE	INFLUENTE	EFLUENTE	PORCIENTO DE REMOCION
pH	UpH	6.5-8.5	8.1	7.8	3.7
Turbiedad	UTN	5	0.52	0.50	3.8
Color	UPI/Co	20	23.8	22.5	5.46
Conductividad	μSiemens/cm	1500	2351	2378	0
Alcalinidad total	mg/l	400	588.4	581.7	1.13
Dureza total	mg/l	500	265.2	261.4	1.4
Sólidos disueltos totales	mg/l	1000	1401.3	1423.8	0.0
Nitrógeno de nitrato	mg/l	10	0.8	1.02	0.0
Nitrógeno de nitrito	mg/l	0.05	0.011	0.011	0.00
Nitrógeno amoniacal	mg/l	0.5	2.52	1.17	53.57
Nitrógeno protéico	mg/l	0.1	0.21	0.21	0.0
Sulfatos	mg/l	400	313.7	382.5	0.0
Cloruros	mg/l	250	195.7	205.8	0.0
DQO	mg/l	4	21.0	18.15	13.6
Coliforme total	Col/100 ml	0	0	0	0
Coliforme fecal	Col/100 ml	0			
Cuenta estandar	Col/ml	200	125	8	93.6
Calcio total	mg/l		31.8	30.8	3.1
Fierro total	mg/l	0.3	0.024	0.019	20.83
Manganeso total	mg/l	0.15	0.039	0.034	12.8
Sodio	mg/l	200	421.3	426.3	0.0

## OBSERVACIONES

De acuerdo al balance de materia y a la caracterización del efluente de la planta potabilizadora (Tablas 12 y 13), el comportamiento de la calidad del agua no cumple con la Norma NOM-127-SSA1-1994, que de acuerdo a las operaciones unitarias existentes, debe de remover dichos contaminantes. Es importante señalar que el equipo de ósmosis inversa no se encuentra trabajando eficientemente, ya que no se observa remoción en los resultados analíticos y sin embargo cuando es operado de manera óptima presenta una capacidad de remoción de un 85 a 99%.

Por lo que se deduce como una primera alternativa, se plantea una evaluación del diseño del tren de tratamiento; oxidación, filtración y adsorción, basándose en los parámetros de diseño como son: la carga hidráulica superficial y el tiempo de retención hidráulico, para determinar si los equipos instalados cumplen con los parámetros recomendados por la bibliografía para su diseño.

Una segunda alternativa es un mantenimiento correctivo a todas las operaciones unitarias, teniendo prioridad los procesos de ozonación y ósmosis inversa.

Se realiza el análisis teniendo en cuenta la primera alternativa antes mencionada:

## OXIDACION

Diseño actual del tanque de oxidación.

Nº de tanques: 1

Material del tanque: acero inoxidable TP-304

Diámetro del tanque: 1.92 m.

Altura del tanque: 3.00 m.

Cabezas: tipo toriesféricas TP-304

Difusores de burbuja fina: 6 difusores 2" de diámetro por 24" de largo

Posición de difusores: colocados a una altura intermedia del tanque con un ángulo de inclinación de 60°.

Revisión del diseño del tanque de oxidación; en este caso se revisará el tiempo de retención hidráulica.

El caudal de operación es de 29 l/s (1.74 m<sup>3</sup>/min), tiene un diámetro de 1.92 m y una longitud de 3.0 m., con estos valores se determinará el volumen del tanque y su correspondiente tiempo de retención hidráulico.

Cálculo del volumen del tanque:

$$V = \pi D^2 L / 4$$

$$V = \pi (1.92 \text{ m})^2 (3.0 \text{ m}) / 4$$

$$V = 8.6858 \text{ m}^3$$

Cálculo del tiempo de retención hidráulico (TRH) ó tiempo de contacto:

$$\text{TRH} = V / Q$$

$$\text{TRH} = (8.6858 \text{ m}^3) / (1.74 \text{ m}^3 / \text{min})$$

$$\text{TRH} = 4.9918 \text{ min}$$

$$\text{TRH} = 5 \text{ min}$$

El tiempo de retención hidráulico citado en la bibliografía es de 5 a 15 minutos, según Montgomery<sup>18</sup>, sin embargo se recomienda un tiempo de retención hidráulico de 10 minutos, para asegurar que el oxidante reaccione con todo el influente, por lo tanto se deduce que el tanque de oxidación cuenta con el tiempo límite de retención hidráulico recomendado para el diseño, adicionalmente los difusores se encuentran localizados en la parte central de la altura del tanque, por lo que el tiempo de retención hidráulico ya no es de 5 minutos para que el ozono reaccione con el influente.

<sup>18</sup> (Montgomery J.:(1985). Water Treatment Principles and Design)

El sistema de generación de ozono está integrado por un compresor de aire de 5 HP de potencia, con una capacidad de generación de ozono de 210 g/h.

## FILTRACION

Una vez realizada la oxidación con ozono, se lleva a cabo la filtración a través de un tren integrado por dos filtros, con arreglo tipo paralelo.

## DISEÑO ACTUAL DEL TANQUE DE FILTRACION

Tipo: a presión

Número de filtros: 2

Diámetro del filtro: 2.10 m

Altura del filtro (parte recta): 2.4 m

Material del filtro: acero al carbón

Cabezas: tipo toriesféricas, material acero al carbón

Material del lecho: grava, arena y antracita

Antracita:

Altura del lecho: 45 cm

Tamaño efectivo: 0.94 mm

Coefficiente de uniformidad: 1.74

Arena sílica:

Altura del lecho: 15 cm

Tamaño efectivo: 0.48 mm

Coefficiente de uniformidad: 1.65

Grava:

Altura del lecho: 30cm

Revisión del diseño del tanque de filtración; en este caso se determinará si la carga hidráulica de filtración está dentro de los parámetros recomendados por la bibliografía ( $120 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ día}$  a  $600 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ día}$ ), siendo el valor típico de diseño de  $350 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ día}$ .

Cálculo del área del tanque de filtración.

$$A = \pi D^2 / 4$$

$$A = \pi(2.10 \text{ m})^2 / 4$$

$$A = 3.4636 \text{ m}^2$$

Cálculo de la carga hidráulica superficial (CHS)

$$\text{CHS} = Q/A$$

$$Q = 29 \text{ l/s } \text{ ó } 2505.6 \text{ m}^3 / \text{día}$$

Como son dos filtros entonces tenemos un gasto por filtro:

$$Q = 2505.6 / 2$$

$$Q = 1252.8 \text{ m}^3 / \text{día}$$

$$\text{CHS} = Q/A$$

$$\text{CHS} = (1252.8 \text{ m}^3 / \text{día}) / (3.4636 \text{ m}^2)$$

$$\text{CHS} = 361.70 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ día}$$

Como se puede observar el valor de la carga hidráulica superficial de cada filtro está cercano al valor típico, dentro de los parámetros recomendados por la bibliografía.

En lo referente al lecho filtrante, está compuesto de grava, arena y antracita, los cuales tienen una altura de 30 cm, 15 cm y 45 cm respectivamente (criterio de Kawamura y recomendaciones de Degremont), por lo tanto la altura total del lecho filtrante es:

Altura del lecho: 30 cm + 15 cm + 45 cm

Altura del lecho = 90 cm

Si la altura total del filtro actual es de 2.4 m., entonces la altura libre de diseño del filtro es:

Altura libre = 2.4 m – 0.9 m

Altura libre = 1.5 m

La altura libre se encuentra dentro de los valores típicos ( 1.2 m a 2.2 m)

Por lo tanto el volumen de cada tanque es:

Volumen = A.h

Volumen = (3.4636 m<sup>2</sup>) (2.4m)

Volumen = 8.3126 m<sup>3</sup>

Las líneas de conducción de carga y descarga del sistema de filtración son de 6" de diámetro.

Resumiendo la planta potabilizadora cuenta con dos filtros de las siguientes características:

Gasto = 29 l / s

Gasto por filtro = 14.5 l/s

Diámetro del filtro = 2.1 m.

Altura = 2.4 m

Volumen = 8.3 m<sup>3</sup>

CHS = 361.70 m<sup>3</sup> / m<sup>2</sup> día

Area unitaria = 3.46 m<sup>2</sup>



### Cálculo de la carga hidráulica superficial (CHS)

$$\text{CHS} = Q / A$$

$$Q = 29 \text{ l / s } \text{ ó } 2505.6 \text{ m}^3 / \text{día}$$

Como son tres columnas, entonces tenemos un gasto por columna:

$$Q = (2506.3 \text{ m}^3 / \text{día}) / 3$$

$$Q = 835.2 \text{ m}^3 / \text{día}$$

$$\text{CHS} = (835.2 \text{ m}^3 / \text{día}) / (2.7171 \text{ m}^2)$$

$$\text{CHS} = 307.3865 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ día}$$

Como se puede observar el valor de la carga hidráulica superficial está dentro de los parámetros recomendados por la bibliografía que para efecto de un buen funcionamiento operación debe ser de  $117 - 586 \text{ m}^3 / \text{m}^2 \text{ día}$  ( 2 a 10  $\text{gpm/ft}^2$ )

### Cálculo del volumen

$$\text{Volumen} = A \cdot h$$

$$\text{Volumen} = (2.7171 \text{ m}^2) (5.0 \text{ m})$$

$$\text{Volumen} = 13.5855 \text{ m}^3$$

### Cálculo del tiempo de retención hidráulico (TRH)

$$V = ( Q ) (\text{TRH})$$

$$\text{TRH} = V / Q$$

El gasto por columna es  $835.2 \text{ m}^3 / \text{día}$  o  $0.58 \text{ m}^3 / \text{min}$

$$\text{TRH} = (13.5855 \text{ m}^3) / (0.58 \text{ m}^3 / \text{min})$$

$$\text{TRH} = 23.42 \text{ min}$$

Para aplicaciones típicas de potabilización se recomienda de 20 a 30 minutos, por lo que el tiempo de contacto de las torres de adsorción está dentro de los parámetros recomendados.

Si la altura de la torre es de 6 metros y la altura del empaque de carbón activado es de 5 metros, entonces la expansión del lecho del carbón activado considerado en este diseño es:

Altura de la torre = (altura del empaque) (% de expansión)

% expansión =  $6\text{ m} / 5\text{ m}$

% expansión = 1.2

Por lo tanto, la expansión considerada es del 20%

De acuerdo a la literatura; la profundidad de carbón está en el rango de 3 metros a 9.0 metros (10 a 30 pies), y una expansión del 20% al 50%.

Las líneas de carga y descarga del sistema de adsorción son de 6" de diámetro.

Resumiendo la planta potabilizadora cuenta con tres columnas de las siguientes características:

Gasto total: 29 l / s

Número de torres: 3

Gasto por torre: 9.67 l / s

Diámetro por torre: 1.86 m

CHS:  $307.38\text{ m}^3 / \text{m}^2\text{ día}$

Tiempo de contacto: 23.42 min

Altura de empaque: 5.0 m

% de expansión: 20%

Por lo tanto se concluye que las columnas están diseñadas dentro de los parámetros recomendados, en lo referente a la carga hidráulica superficial, mientras que el diseño es justo en cuanto a la expansión de lecho.

## OSMOSIS INVERSA

El equipo de ósmosis inversa de dos pasos combinados para flujo continuo tiene una capacidad de operación de 733 gal/min (46 l/s), este caudal de diseño es reportado por el fabricante, en resumen el equipo de ósmosis inversa cuenta con las siguientes especificaciones:

Presión de operación;	278 psig
Temperatura de alimentación	20 °C
Gasto de alimentación	733 gpm
Recuperación	65%
Gasto de agua tratada (permeado)	477 gpm
Gasto de rechazo	257 gpm
Elementos	Desal
Modelo	46804 OF
Elementos por tubo	4
Total de elementos	36
Material del elemento	poliamida
Número de tubos de presión	9
Material	Acero inoxidable
Diámetro	8 pulgadas
Longitud	4.37 metros
Arreglo	6-3

## Pretratamiento

Adición de ácido	pH 7 – 7.5
Consumo ácido sulfúrico concentrado	180 kg/día
Inhibidor de corrosión	5 mg/l
Consumo de hexametáfosfato de sodio	20 kg/día
Filtración	5 micras
Cartuchos de polipropileno de 30 pulg.	24 piezas

El equipo de ósmosis inversa en la planta San Sebastián Tecoloxtitla, se encuentra trabajando bajo los siguientes flujos de agua:

Gasto de alimentación	366 gpm
Gasto de agua tratada	238 gpm
Gasto de rechazo	128 gpm

Como se puede observar el equipo de ósmosis inversa está sobrado en capacidad en el orden del 100%.

## DESINFECCION

Normalmente la eficiencia de desinfección se evalúa de acuerdo al NMP/100 ml (número más probable de organismos coliformes totales por 100 ml de agua que puede ser eliminado).

**DOSIS DE CLORO.** La dosis de hipoclorito de sodio al 12.5% en peso requerida para la desinfección varía de acuerdo con la calidad del agua a ser tratada. En el caso de la planta San Sebastián Tecoloxtitla está definida únicamente por la cantidad de cloro necesario para mantener un residual de 0.5 mg/l, como máximo. Sin embargo, para tener flexibilidad en la aplicación de la dosis de hipoclorito de sodio, se cuenta con un equipo para dosificar un máximo de 5 mg/l.

La desinfección se efectúa en el tanque de contacto y posteriormente su bombeo para conducir a la red de distribución.

Una vez realizado el proceso de adsorción y el proceso de ósmosis inversa, sus efluentes se mezclan en el cárcamo para llevarse a cabo el proceso de desinfección con hipoclorito de sodio a través del tanque.

Diseño actual del tanque de contacto

Número de tanque: 1

Material del tanque: concreto

Largo: 4.2 m

Ancho: 1.4 m

Altura útil: 3 m

Compartimientos: 5

Revisión del diseño del tanque de contacto; en este caso se determinará, si el tiempo de contacto, está dentro del parámetro de diseño recomendado por la literatura.

Cálculo del volumen del tanque

Volumen = ( L)( a)( h)

Volumen = (4.2 m)(1.4m)(3.0 m)

Volumen = 17.64 m<sup>3</sup>

Cálculo del tiempo de retención hidráulico (TRH) o tiempo de contacto

TRH = V / Q

TRH = (17.64 m<sup>3</sup>) / (1.74 m<sup>3</sup> / min)

TRH = 10.13 min

TRH = 10 min

El tiempo de retención hidráulico citado en la bibliografía es de 10 a 20 minutos, por lo tanto se considera que está dentro de los valores recomendados.

La dosificación de hipoclorito de sodio se lleva a cabo con una bomba dosificadora del tipo diafragma de teflón con una capacidad de 37 galones por hora al 100%, con una presión de descarga de 1.2 kg/cm<sup>2</sup> man; motor de ¾ HP.

## TUBERIA DE CONDUCCION

Cálculo del diámetro de la tubería de conducción:

Datos:

Gasto (Q) = 29 l/s

Velocidad recomendada (v) = 1.5 m /s a 1.85 m/s

Aplicando la ecuación de continuidad, se tiene lo siguiente;

$$A = Q/v$$

$$D = (4A /\pi)^{1/2}$$

$$A = (0.029 \text{ m}^3/\text{s})/(1.5\text{m/s})$$

$$A = 0.0193 \text{ m}^2$$

Por lo tanto el diámetro es;

$$D = (4 \times 0.0193 / \pi)^{1/2}$$

$$D = 0.1568 \text{ m}$$

$$D = 6.17 \text{ pulgadas}$$

Diámetros comerciales;

6 pulg. < 6.17 pulg. < 8 pulg.

Revisando velocidades para 6 y 8 pulgadas;

$$V_{6 \text{ pulg.}} = Q/A_{6 \text{ pulg.}}$$

$$V_{6 \text{ pulg.}} = (0.029 \text{ m}^3/\text{s}) / (0.0182 \text{ m}^2)$$

$$V_{6 \text{ pulg.}} = 1.58 \text{ m/s}$$

$$V_{8 \text{ pulg.}} = Q/A_{8 \text{ pulg.}}$$

$$V_{8 \text{ pulg.}} = (0.029 \text{ m}^3/\text{s}) / (0.0324 \text{ m}^2)$$

$$V_{8 \text{ pulg.}} = 0.89 \text{ m/s}$$

Por lo tanto, el diámetro seleccionado es de 6 pulgadas

Con este cálculo, se deduce que la tubería de conducción de la planta potabilizadora es la adecuada.

**OBSERVACIÓN:** no se realiza un cálculo detallado en lo que se refiere a hidráulica y equipamiento, porque la planta no presenta problema alguno.

## REBOMBEO

El equipo de bombeo está ubicado en el cárcamo de distribución a red donde se lleva a cabo la desinfección. Se realiza un bombeo para la distribución del agua, con dos bombas centrífugas horizontales de 5HP, con las siguientes características:

Modelo: F.R.N.L.D

Marca: Cuma, S.A:

Succión: 3 pulgadas

Descarga: 2 ½ pulgadas

RPM: 3600

Volts: 220/240

Las bombas son utilizadas alternadamente

Realizados los cálculos de las bases de diseño se presenta a continuación un resumen en la Tabla 19.

En esta tabla resumen se presentan los parámetros de cada operación unitaria instalada, los cuales se compararon con los parámetros y recomendaciones en la bibliografía, determinando con ello, si estos se encuentran dentro de lo recomendado.

**TABLA 19 TABLA RESUMEN**

PROCESO	C.H.S. M <sup>3</sup> /M <sup>2</sup> DIA			TRH (MIN)	
	ACTUAL	RECOMENDADA	TIPICO	ACTUAL	RECOMENDADO
OXIDACION	NO APLICA			5	5 A 15
FILTRACION	361.7	120 A 600 <sup>2b</sup>	350	NO APLICA	
ADSORCION	307.38	117 A 586 <sup>1b</sup>	288	23.5	20 A 30
DESINFECCION	NO APLICA			10	10 A 20
OSMOSIS INVERSA				GASTO DISEÑO	GASTO OPERACION
				733 gpm	366 gpm

### 3.8 ADECUACION Y REHABILITACION DE LA PLANTA POTABILIZADORA SAN SEBASTIAN TECOLOXTITLA

La planta está diseñada con las operaciones unitarias adecuadas para la remoción de los contaminantes problema, sin embargo de acuerdo al análisis de diseño de cada operación, es necesario realizar las siguientes adecuaciones y rehabilitaciones.

<sup>1b</sup>(Montgomery J.:(1985). Water Treatment Principles and Design)

<sup>2b</sup>(Romero Rojas J. A.:(1978).Potabilización del Agua)



## OXIDACION

### ADECUACION: OXIDACION

El tanque de oxidación está diseñado con tiempo de residencia de 5 minutos, parámetro que está en el límite del tiempo recomendado (5 a 15 minutos) y con una dosificación de 1 a 4 mg/l, sin embargo debido a la colocación de los difusores se propone lo siguiente:

- Corrección de la localización de los difusores. En el interior del tanque de oxidación, los difusores no están correctamente colocados a la altura recomendada ( 2 ft ). Actualmente los difusores están localizados a una altura intermedia del tanque, es decir a una altura de 1.5 m de la parte recta del tanque y con un ángulo de inclinación de aproximadamente 60° y no se encuentran distribuidos radialmente, lo que ocasiona una deficiencia en la transferencia de masa y por ende un menor tiempo de contacto (aproximadamente 2.5 min.) de los cinco minutos con la cual fue diseñado. De acuerdo a la literatura, deben ser distribuidos radialmente, colocados horizontalmente y localizados a una altura de 30 a 60 cm del fondo hacia arriba, de la altura útil del tanque, para que exista una mayor transferencia de masa, por consiguiente se propone colocar los difusores a una altura de 50 cm del fondo hacia arriba.
- Con la corrección anterior, se revisará la dosis de inyección de ozono, puesto que contará con un mayor tiempo de residencia, si con ello no se logra una remoción eficiente del N-NH<sub>3</sub>, N-protéico, Fe<sup>+2</sup> y Mn<sup>+2</sup>, se propone implementar la adición de otro tanque de oxidación con las mismas dimensiones del tanque actual, para cumplir con un tiempo de contacto de 10 minutos.
- Se propone la instalación de destructores catalíticos de ozono, como una medida de seguridad para el personal operativo, debido a que no todo el ozono que se aplica reacciona.

- Cambio de difusores. Es posible que los poros se obstruyan, particularmente cuando el flujo de agua y la dosis de ozono son aplicados intermitentemente; también debido a la presencia de hierro, manganeso o metales precipitados.
- Mantenimiento completo al equipo de ozono. Cambio de empaque de la celda de generación de ozono para evitar fugas, cambio de conexiones dañadas por conexiones niqueladas y cambio de la alúmina de los secadores.

## RECOMENDACIONES

- Capacitación del personal en el aspecto operativo-técnico en ozonación
- Verificar el buen funcionamiento del equipo de ozono, a través de un reporte diario de condiciones de operación
- Realizar mantenimiento preventivo, de acuerdo al siguiente programa:

### PROGRAMA DE MANTENIMIENTO PARA EL EQUIPO OZONADOR

	DIARIO	CADA SEMANA	CADA 1000 HR.	CADA 12000 HR	CADA 24000 HR
COMPRESOR					
DRENADO AUTOMATICO	•				
FILTRO DE ENTRADA DE AIRE		•	o		
PREPARACIÓN DE AIRE					
CONDICIONES DE OPERACIÓN	•				
OPERACIÓN DE PURGAS		•			
DESECANTE					o
CARTUCHOS DE FILTROS				o	
CALANDRIA					
OBSERVAR CORONA	•				
LIMPIEZA INTERNA				•	
TANQUE DE REACCION					
MEDIR OZONO RESIDUAL	•				

- Inspección, limpieza o medición
- o Cambio

## FILTRACION

Con la filtración a presión, se reduce la concentración de sólidos disueltos totales, turbiedad, color, a demás de funcionar como un pre-tratamiento a adsorción y ósmosis inversa. Dicho proceso está dentro de los parámetros de diseño, por lo que se propone lo siguiente:

- Rehabilitación del medio: cambio del medio filtrante.
- Colocación de manómetros con escala de 0-7 kg/cm<sup>2</sup> con tubo "cola de cochino" a la salida del efluente, para el control adecuado del retrolavado.
- Lavado del medio filtrante con hidróxido de sodio.

## RECOMENDACIONES

- No operar un solo filtro con todo el caudal del pozo, ya que operaría con una C.H.S. del doble, lo cual reducirá notablemente la carrera de filtración y calidad del efluente hacia adsorción.
- Realizar los retrolavados de los filtros cada 80 a 90 horas de operación o bien cuando haya una caída de presión de 0.7 kg / cm<sup>2</sup>. Se recomienda un retrolavado de 10 a 15 minutos con agua filtrada.

## ADSORCION

Para la eliminación de color, olor, sabor, compuestos nitrogenados, se aplica el proceso de adsorción con carbón activado, asimismo también funciona como un pre-tratamiento a ósmosis inversa. Dicho proceso está dentro de los parámetros de diseño en lo que respecta a carga hidráulica, sin embargo en cuanto a expansión de lecho está limitado. Se propone la rehabilitación del empaque de carbón activado así como algunas recomendaciones:

- Rehabilitación del empaque: cambio del empaque del carbón activado con una porosidad adsorbente del 85%, con la cual se aumentará el área de contacto, así también se debe inspeccionar el recubrimiento interno y en caso de existir puntos de oxidación o ampollas se deben reparar.
- Colocación de medidores de presión de 0 a 7 kg / cm<sup>2</sup> con tubo "cola de cochino" a la salida del efluente, para el control adecuado del retrolavado.
- Se propone disminuir la altura del lecho de carbón activado a 4.5 m. en lugar de 5.0 m., para que exista una mayor expansión del lecho en el orden del 33 %.

## RECOMENDACIONES

- Retrolavar las torres de adsorción por un período de tiempo de 10 a 15 minutos, cada 2 ½ días según la EPA, para evitar:

La formación de canalizaciones

Cimentación o petrificación de la cama de carbón

Si la caída de presión alcanza un valor de 0.7 kg/cm<sup>2</sup>, iniciar el retrolavado, antes de iniciar el retrolavado la cama de carbón debe estar completamente inundada.

## OSMOSIS INVERSA

La ósmosis inversa se emplea en este tren de tratamiento para la remoción del sodio y potasio y por ende la conductividad eléctrica. El equipo de ósmosis inversa está sobre diseñado al 100%, por lo que se recomienda lo siguiente:

- Cambio del equipo de ósmosis inversa, por un equipo diseñado a la capacidad de la planta (29 l/s o 366 gpm). Reaprovechar el equipo existente en otra planta de la misma Dependencia.

- En caso de utilizar el mismo equipo, se propone trabajar con el primer paso, es decir únicamente con seis tubos de presión, debido al sobrediseño y por ende bloquear el segundo paso.
- Rehabilitación de membranas: reemplazo de membranas de poliamida, por presentar alta conductividad del permeado y bajo rechazo de sales, el cual, se presenta como una de las causas probables de ataque químico a las membranas así como precipitación de sales de calcio y magnesio en la superficie de las membranas, además de que la vida media de las membranas son de tres años (tiempo reportado por el fabricante; Fluid Systems Division). Las membranas siguen operando desde el año de 1996, además el fabricante reporta que para membranas de poliamida, el paso de sales se incrementa entre un 5% a 17% por año.

## RECOMENDACIONES

- Capacitación del personal en el aspecto operativo- técnico del equipo de ósmosis inversa.
- Fluid Systems , recomienda una frecuencia de limpieza de membranas cada tres meses, o bien cuando el flujo de permeado disminuye más del 10% o cuando la caída de presión aumenta más de un 15%, y cuando la conductividad del permeado aumente considerablemente, tomando como valor base el inicio de operación.
- Fluid Systems, recomienda una frecuencia de reemplazo de filtros cartucho, cada dos o tres semanas. Se recomienda no reutilizar los filtros cartucho.
- No operar el equipo de ósmosis inversa sin los cartuchos filtrantes.
- No usar el equipo de ósmosis inversa si no existe la dosificación constante de ácido sulfúrico y hexametáfosfato de sodio.
- No operar a temperaturas mayores a 30 °C.
- Utilizar equipo de seguridad en el manejo de reactivos químicos

- En resumen, de acuerdo al análisis de datos normalizados, se puede concluir lo siguiente:

#### TABLA DE ANALISIS DE DATOS NORMALIZADOS

OBSERVACION	CONCLUSION
Flujo de permeado constante sin cambios significativos.	Buen funcionamiento, no tome ninguna acción
Flujo de permeado normalizado, se reduce lentamente	Indica ensuciamiento de las membranas. Si el flujo ha bajado el 10%, debe considerarse limpieza de membranas
Baja recuperación de permeado, sube lentamente.	Ajustar el flujo de rechazo para obtener la recuperación a la presión de operación de diseño.
La unidad de ósmosis inversa no arranca en automático al imprimir el push boton	Verifique la presión de suministro sea mayor de 30 psig.

#### DESINFECCION

La eficiencia de desinfección depende de la relación entre el tiempo de contacto y la cantidad de desinfectante dosificado, por lo que el tiempo de contacto es de 10 a 20 minutos, el tanque está diseñado con un tiempo de contacto de 10 minutos, por lo que está dentro de los parámetros de diseño. Se utiliza hipoclorito de sodio como desinfectante.

#### RECOMENDACIONES:

- Checar continuamente el residual de cloro libre en línea de distribución
- Mantenimiento preventivo de los dosificadores

## CONCLUSIONES

Con los resultados de calidad del efluente de la planta potabilizadora San Sebastián Tecoloxtitla, se realizó una evaluación del tren de tratamiento en la potabilización del agua del pozo, determinando que los parámetros: conductividad eléctrica, alcalinidad total, sólidos disueltos totales, nitrógeno amoniacal, nitrógeno proteico, D.Q.O. y sodio, no cumplen con la Norma NOM-127-SSA1-1994, cuya problemática dio origen a una revisión bibliográfica de los parámetros que deben ser removidos por las operaciones unitarias; oxidación con ozono, filtración, adsorción con carbón activado, ósmosis inversa y desinfección con hipoclorito de sodio, determinando que el tren de tratamiento con la que cuenta la planta es la ideal para la remoción de los parámetros críticos. Sin embargo, la planta no remueve eficientemente los parámetros críticos, motivo primordial que dio origen a la revisión del diseño de los equipos de las operaciones unitarias (oxidación con ozono, filtración, adsorción, ósmosis inversa y desinfección), considerando los parámetros (carga hidráulica superficial, medio filtrante y tiempo de retención hidráulico), verificando que dichos parámetros, cumplan con los valores recomendados por la bibliografía. Con la revisión del diseño se concluye lo siguiente:

- La planta fue diseñada con un caudal teórico-práctico de 29 l/s, es decir, la planta no es capaz de tratar un caudal mayor, por lo que se encuentra operando a su máxima capacidad.
- El proceso de oxidación, no cumple con el tiempo de retención hidráulico, debido a la mala colocación de los difusores y por ende una mala eficiencia en la transferencia de masa, provocando una deficiencia en la oxidación.
- El proceso de filtración esta diseñado de acuerdo a la bibliografía.
- Las torres de adsorción están diseñadas con una altura mínima para la expansión del lecho de carbón activado.

- La ósmosis inversa está sobre diseñada al 100%.
- Desinfección, cuenta con un tiempo de retención hidráulico en el límite de diez minutos por la bibliografía.

Por lo anterior, es necesario implementar la adecuación y rehabilitación del tren de tratamiento de la planta potabilizadora, dando prioridad al proceso de oxidación considerando el tiempo de retención hidráulica, rehabilitación de los lechos de filtración, adsorción y membranas del equipo de ósmosis inversa, con las cuales se soluciona de manera inmediata, los principales problemas de calidad, garantizando un efluente con características adecuadas para el consumo humano.

Por ello, es importante que en el diseño de una planta potabilizadora se realice un estudio de ingeniería basado en la calidad de la fuente de suministro y en la selección apropiada de los procesos, ya que la purificación del agua es uno de los problemas más urgentes de solución, siendo el objetivo inmediato de proveer a toda la sociedad de agua potable, porque de esta manera la comunidad satisface un requerimiento fundamental para su bienestar y comodidad.



## BIBLIOGRAFIA:

1. AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. MANUAL ON DISPOSAL OF REFINERY WASTES. VOLUME ON LIQUID WASTES. 2101 STREET, NORTH WEST, WASHINGTON. 1969.
2. ARBOLEDA VALENCIA J. TEORIA Y PRACTICA DE LA PURIFICACION DEL AGUA. ASOCIACION COLOMBIANA DE INGENIERIA SANITARIA Y AMBIENTAL (ACODAL). 1992.
3. BRAGOS – SEDO R. PROCESOS Y SISTEMAS: ALREDEDOR DE LA FILTRACION. TECNOLOGIA DEL AGUA, NUMERO CINCO, 1982.
4. BRETT ELIAS AND JABEZ VAN CLEEF. HIGH-SHEAR MEMBRANE SEPARATION FOR PROCESS AND WASTEWATER TREATMENT. CHEMICAL ENGINEERING, SEPTEMBER 1998.
5. CHEREMISINOFF N. P. AND P. N. CHEREMISINOFF. WATER TREATMENT AND WASTE RECOVERY ADVANCED TECHNOLOGY AND APPLICATIONS. PTR PRENTIC HALL. 1993.
6. COMISION NACIONAL DEL AGUA. MANUAL DE DISEÑO DE AGUA POTABLE, ALCANTARILLADO Y SANEAMIENTO. LIBRO V, 3.3.1 PERFORACIÓN DE POZOS, MEXICO D.F. 1994.
7. DEGREMONT. MANUAL TECNICO DEL AGUA. CUARTA EDICION. 1979.
8. DEPARTAMENTO DE SANIDAD DEL ESTADO DE NUEVA YORK. MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS. LIMUSA, MEXICO, D.F. 1980.

9. DEPARTAMENTO TECNICO DE IDAGUA, S.A. OSMOSIS INVERSA. TECNONOGIA DEL AGUA, NUMERO 5, 1982.
10. ESKEL NORDEL. TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA Y OTROS USOS. EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. DE C.V., MEXICO 1984.
11. FAIR, G.M., GEYER J.C. PURIFICACION DE AGUAS TRATAMIENTO Y REMOCION DE AGUAS RESIDUALES. JOHN WILEY AND SONS, INC, NEW YORK, 1968.
12. FLUID SYSTEMS DIVISION. OSMOSIS INVERSA; AGUA POTABLE Y EFLUENTES MUNICIPALES. 2980 NORTH HARBOR DRIVE. SAN DIEGO CALIFORNIA 92101.
13. FRIEDLANDER, H.F AND RICKLES, R.N., MEMBRANE SEPARATION PROCESS. CHEMICAL ENGINEERING, 73, 111, FEB 28, 1966.
14. GERENCIA TECNICA DE ACUAMEN S.A. DE C.V. OSMOSIS INVERSA, TRATAMIENTO DE AGUA Y EFLUENTES. REVISTA DEL AGUA N° 10. 1976.
15. GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL. SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE, SISTEMA DE AGUAS DE LA CIUDAD DE MEXICO. AVENIDA VIADUCTO RIO DE LA PIEDAD N° 507, COLONIA GRANJAS MEXICO. DELEGACION IZTACALCO, MEXICO D.F. 2000 - 2004
16. HILLEBOE, H. E., MANUAL DE TRATAMIENTO DE AGUAS, EDITORIAL LIMUSA-WILEY, MEXICO, 1964.
17. METCALF & EDDY. INGENIERIA DE AGUAS RESIDUALES, TRATAMIENTO, VERTIDO Y REUTILIZACION, VOLUMEN 1 Y 2. MC GRAW. HILL, ESPAÑA 1996.

18. MONTGOMERY J. WATER TREATMENT PRINCIPLES AND DESIGN. NEW YORK. EDITED BY J. WILEY. 1985.
19. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994. SALUD AMBIENTAL AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO- LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION. "DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACION, ENERO 18 DE 1996".
20. ORTA M. T. OZONACIÓN. INFORME INTERNO ELABORADO PARA EL INSITUTO DE INGENIERIA. UNAM.
21. PALACIOS A. Y J. PALACIOS ROJI GARCIA. GUIA ROJI CIUDAD DE MEXICO FORMATO 2001. GUIA ROJI, S.A. DE C.V. . 2000.
22. RAMALHO R.S. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. EDITORIAL REVERTE S.A., BARCELONA 1991.
23. RAMIREZ ZAMORA R. M. PROCESOS DE ADSORCIÓN CON CARBON ACTIVADO PARA EL TRATAMIENTO DE AGUAS. INFORME INTERNO ELABORADO PARA EL INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM. 2000.
24. REYNOLDS AND RICHARDS. UNIT OPERATIONS AND PROCES IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING. PWS PUBLISHING COMPANY SECOND EDITION. 1982.
25. RILEY R. L. Y G. PIQUE. MANUAL PRACTICO DE OSMOSIS INVERSA. INOVA S.A. DE C.V. 1999.

26. ROMERO ROJAS J. A. POTABILIZACION DEL AGUA. EDITORIAL ALFAOMEGA, TERCERA EDICION. 1978.
27. TERBUH, T. H. Y. FUNDAMENTOS DE CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA. EDITORIAL LIMUSA, 1994.
28. WEBER W. J. CONTROL DE LA CALIDAD DEL AGUA, PROCESOS FISICOQUIMICOS. EDITORIAL REVERTE, ESPAÑA 1979.
29. WHITE, G.C. HAND BOOK OF CLORINATION AND ALTERNATIVES DISINFECTON. VAN NOSTRAND REINHOLD CO., NEW YORK, 1972.