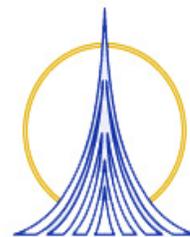




UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"ZARAGOZA"

AGUA POTABLE PARA LA CIUDAD DE
PACHUCA DE SOTO A PARTIR DE UNA FUENTE
ALTERNATIVA.
MINA "EL ÁLAMO"

T E S I N A

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A :

RIVERA ZAVALA LUIS ALBERTO

ASESOR: I. Q. MARIANO RAMOS OLMOS



MÉXICO D. F.

2007



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.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA
JEFATURA DE LA CARRERA DE INGENIERÍA
QUÍMICA

OFICIO: FESZ/JCIQ/008/07

ASUNTO: Asignación de Jurado

ALUMNO: RIVERA ZAVALA LUÍS ALBERTO
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:

PRESIDENTE	I. B. Q. Lorenzo Rojas Hernández
VOCAL	I. Q. José Mariano Ramos Olmos
SECRETARIO	Biol. Eloisa Adriana Guerra Hernández
SUPLENTE	I. Q. Zula Genny Sandoval Villanueva
SUPLENTE	I. Q. Ana Lilia Maldonado Arellano

Sin más por el momento, reciba un cordial saludo.

A T E N T A M E N T E
“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”

México D. F., a 22 de Marzo de 2007

JEFE DE LA CARRERA


I. Q. RAÚL RAMÓN MORA HERNÁNDEZ

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por el don de la vida, el amor, la comprensión y el apoyo que de manera incondicional me han brindado.

A mis hermanos, quienes estuvieron conmigo en los buenos y malos momentos.

A mi esposa, por su amor y apoyo incondicional que no conoce fronteras

A mi hija, simplemente una nueva razón de ser y de vivir.

A la familia Valentino Buendía, en quienes he encontrado verdaderos amigos.

ÍNDICE

	CONTENIDO	Página
	Resumen	4
	Introducción	6
	Objetivos	7
1	GENERALIDADES	
1.1.	Localización de la fuente de abastecimiento	9
1.2.	Caracterización de la calidad del agua	10
1.2.1.	Normas y criterios de calidad	10
1.2.2.	Evaluación de la calidad del agua	13
2.	DISPONIBILIDAD, DOTACIÓN Y ABASTECIMIENTO DEL AGUA DE LA MINA "EL ÁLAMO"	
2.1.	Destino final del agua potabilizada	19
2.2.	Determinación de la demanda de agua	22
2.2.1.	Población	22
2.2.2.	Proyección de la población	23
2.2.2.1.	Determinación de la población	24
2.3.	Horizonte del proyecto	26
2.3.1.	Periodo de diseño	26
2.3.2.	Vida útil	27
2.4.	Dotación	28
2.5.	Línea de conducción	30
2.6.	Tanque regulador	31
2.7.	Red de distribución	31
2.8.	Tomas domiciliarias	31
3.	SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN TEÓRICA DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA EXTRAÍDA DE LA MINA "EL ÁLAMO"	
3.1.	Selección del tren de potabilización	33
3.1.1.	Estructuración del tren de potabilización	35
3.2.	Diagrama de flujo de proceso	39
3.2.1.	Descripción teórica de las operaciones unitarias	40
3.2.1.1.	Proceso de extracción desde el nivel 370 de la mina "El Álamo"	40
3.2.1.2.	<i>Torres empacadas de aireación</i>	41
3.2.1.2.1.	Química del agua.	42
3.2.1.2.2.	Otros factores	42
3.2.1.2.3.	Formulas.	42
3.2.1.2.4.	Relaciones	43
3.2.1.2.5.	Residual de oxígeno	43
3.2.1.3.	<i>Ozonación.</i>	44
3.2.1.3.1.	Usos del ozono	44
3.2.1.3.1.1.	Desinfección	44
3.2.1.3.1.2.	Oxidación	45
3.2.1.3.1.3.	Mejora de la coagulación.	46
3.2.1.3.2.	Ventajas y desventajas del uso de ozono	47
3.2.1.3.3.	Generadores de ozono	47
3.2.1.3.3.1.	Por corona de descarga	48
3.2.1.4.	<i>Coagulación -floculación</i>	50
3.2.1.4.1.	Los coloides	50
3.2.1.4.2.	Antecedentes importantes sobre coagulantes	54
3.2.1.4.3.	Productos de la hidrólisis	54
3.2.1.4.4.	Floculación y tipos de floculadores	56
3.2.1.4.5.	Consideraciones de diseño	57
3.2.1.5.	<i>Hidrociclones</i>	58
3.2.1.5.1.	Aspectos teóricos	59

3.2.1.5.2.	Aplicaciones de los hidrociclones	61
3.2.1.6.	<i>Filtración a presión con lecho de arena</i>	63
3.2.1.6.1.	Operación de los filtros	68
3.2.1.6.2.	Tipo de medio filtrante	69
3.2.1.6.3.	Filtros de gravedad	71
3.2.1.7.	<i>Osmosis inversa</i>	73
3.2.1.7.1.	Presión osmótica	74
3.2.1.7.2.	Características de las membranas	76
3.2.1.7.3.	Tipos de membrana	78
3.2.1.7.4.	Factor de rechazo de las membranas	80
3.2.1.7.5.	Consideraciones de diseño	80
3.2.1.7.6.	Recuperación	81
3.2.1.7.7.	Calidad del agua producto	82
3.2.1.8.	<i>Desinfección</i>	84
3.2.1.8.1.	Propiedades de los productos de cloro y descripción del método	87
3.2.1.8.2.	Mecanismos de la desinfección con cloro	92
3.2.1.8.3.	Mezclador estático	94
4.	CONCLUSIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA	97

RESUMEN

En el presente trabajo se ha impreso parte de la experiencia obtenida en la actividad profesional y los datos recabados que aquí se muestran fueron parte de una búsqueda, recopilación y análisis que en su oportunidad se realizaron acerca de la calidad del agua de una probable fuente para el abastecimiento de un sector de la población de la Capital del Estado de Hidalgo, Pachuca de Soto, y que se ha retomado con la intención de ampliar dicha información hacia una propuesta de tren de tratamiento, como complemento de los temas abarcados en el Modulo II del Diplomado en Protección Ambiental, “Prevención y control de la contaminación del agua” esperando que esta información sea útil a las generaciones venideras.

El trabajo se basa, como se menciona líneas arriba, en la intención de proponer un proceso de potabilización del agua de una probable fuente de abastecimiento que se muestra como una alternativa a la perforación de nuevos pozos en las zonas aledañas al centro de la ciudad de Pachuca y que ésta agua al final tenga la calidad que marca nuestra normatividad vigente para consumo humano.

En la Ciudad de Pachuca ha intervenido la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) para evitar la perforación de nuevos pozos hasta no encontrar una nueva alternativa de abastecimiento que permita dar “un descanso temporal” al manto acuífero sobreexplotado de la región así como dejar de utilizar aquellos que se encuentran contaminados que de acuerdo a esta entidad son más del 60%. La alternativa mencionada es la Mina “El Álamo”, que a su vez cuenta con problemas serios de inundación, por lo tanto se convirtió desde hace algunos años en una mina abandonada y sin servicio de mantenimiento, a la vez que a sido blanco del desmantelamiento de su maquinaria por parte de sus propietarios, la cual ha sido utilizada para rehabilitar otras minas.

Cabe mencionar que existen diferentes factores que permitieron la realización de este estudio y son las siguientes:

Primero: La gran demanda de agua potable por parte de una población con crecimiento acelerado en la Ciudad de Pachuca y la falta de nuevas fuentes de abastecimiento seguras y no contaminadas que permitan cubrir dicha demanda.

Segunda: La necesidad del organismo operador de la región de satisfacer tal demanda en cumplimiento de las tareas que le han sido asignadas como tal.

Tercera: La compañía minera concesionada para la extracción de los minerales es quien tiene a su resguardo las instalaciones donde se encuentra la mina "El Álamo", y es uno de los principales interesados y beneficiados si se llevase a cabo la extracción del agua ahí almacenada.

El trabajo que a continuación se redacta es entonces la búsqueda de una propuesta que pueda ser la solución a un problema tangible y actual que se vive en esta comunidad y que involucra las necesidades de diferentes organismos y sectores de la población.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Pachuca de Soto, a lo largo de la historia se caracterizó por basar su desarrollo económico en la explotación de minerales como el oro y la plata., siendo este último el mineral que se extrae en mayor cantidad. La capital del Estado de Hidalgo cuenta con una tradición de más de 500 años de minería, aunque en las últimas décadas la producción de este ramo de la industria a decaído notablemente en esta región debido a los elevados costos de mantenimiento y renovación de equipos, a lo que se suma el costo de nuevas exploraciones, pruebas de laboratorio, explosivos, consumibles, combustibles, energía eléctrica, reactivos para la extracción, herramientas, recursos humanos, etc. El problema radica en que la inversión necesaria es de magnitud considerable y el periodo de recuperación de la misma es muy largo. Aunado a esto, existe una grave problemática ocasionada por la infiltración grandes cantidades de agua y hasta la fecha no se ha instalado equipo suficiente para su extracción, lo que ha generado pérdidas parciales o totales (en algunos casos) en la mayoría de las minas de la región, dado que gran parte de los socavones (laboríos o túneles de trabajo) y tiros (excavación vertical por la cual se desciende) han quedado anegados completamente, trayendo esto consigo la pérdida de maquinaria y equipo electromecánico, así como subestaciones y todo tipo de herramientas propias de esta industria. Lo anterior ha ocasionado que la Compañía minera concesionada decidiera dejar de bombear en las minas donde lo estaba haciendo, pues los costos por el uso de energía eléctrica para el equipo de bombeo eran demasiado altos en contraste con las ganancias reportadas por la extracción de minerales.

Por otra parte, el municipio de Pachuca de Soto cuenta con una población actual de 275,578 habitantes según el Censo de Población y Vivienda de 2005 realizado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), población que en los últimos años ha incrementado la demanda de agua potable, agotando así las pocas fuentes de abasto no contaminadas que se encuentran a lo largo del acceso a la ciudad en la zona baja de la misma, generando una problemática social de importante magnitud por lo que la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) se ha visto en la necesidad de de

vedar la perforación y explotación de nuevos pozos y a propuesto por medio del organismo operador de agua potable local, la Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales (CAASIM) la búsqueda de fuentes de abastecimiento alternas así como las obras complementarias necesarias para llevar agua a la población de la zona centro-oriente de la ciudad en el corto plazo. El problema del desabasto de agua, sumado a la alta contaminación de los mantos freáticos, se convierten en dos de los principales retos que deberá enfrentar el gobierno para atender la creciente demanda del vital líquido tanto para consumo humano, como para uso industrial y agrícola.

OBJETIVOS

- Definir un caudal óptimo de distribución con base en la demanda de agua de la población de la zona centro-oriente de la ciudad de Pachuca.
- Establecer un proceso de potabilización adecuado de acuerdo a lo establecido por 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*, así como los lineamientos y metodologías establecidos por el organismo operador de agua potable de la Región (CAASIM) y la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

CAPITULO I
GENERALIDADES

1.1. LOCALIZACIÓN DE LA FUENTE DE ABASTECIMIENTO



■ Mina El Álamo

FIG. 1.1. UBICACIÓN DE LA MINA EL ALAMO

Las instalaciones de la mina “El Álamo”, propiedad de la Compañía Real del Monte, se ubican en la colonia Felipe Ángeles 2ª Sección, en la zona conocida como Cerro de Cubitos, entre las calles Monterrey y Javier Rojo Gómez, al final del callejón Jesús Carranza. El acceso general se localiza al inicio de la calle Monterrey. De ella se pretende extraer agua desde una profundidad de -370 m que es la profundidad total del tiro. Actualmente el nivel estático se encuentra alrededor del nivel -190 m, lo que representa un almacenamiento o columna de agua de 180 metros aproximadamente. Cabe mencionar que esta mina no cuenta con la calesa (o elevador de servicio) pues debido a la inundación que sufre y al deterioro de la maquinaria, guías y soportes de la misma, esta fue puesta fuera de operación hace más de una década, por lo tanto el acceso al interior de la mina se ve obstaculizado por lo que todas las exploraciones y muestreos de la calidad del agua fueron llevados a cabo desde la superficie, haciendo uso de dispositivos especiales de muestreo.

1. 2. CARACTERIZACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

La necesidad de establecer una secuencia de procesos y operaciones unitarias adecuadas y suficientes para la potabilización del agua de la mina “El Álamo”, orilló a la recopilación de la documentación histórica en materia de la calidad y volumen de agua extraída y disponible, así como la infraestructura existente que pertenece a la Compañía Real del Monte. A partir de lo anterior, se consideró oportuno realizar la caracterización del agua a tratar en diversos puntos del tiro de la mina antes mencionada, obteniendo como resultado un tren de proceso que generará agua de calidad para la comunidad de la Ciudad de Pachuca, conforme a los parámetros establecidos en la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 y de acuerdo a los requerimientos de la Comisión de Aguas y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales (CAASIM).

1.2.1. NORMAS Y CRITERIOS DE CALIDAD

El abastecimiento de agua para uso y consumo humano con calidad adecuada es indispensable para la prevención de la transmisión de enfermedades (gastrointestinales y otras), esto lleva a la necesidad de establecer límites permisibles en cuanto a sus características físicas, químicas y organolépticas.

Teniendo en cuenta que el control de la calidad del agua es la clave para reducir el riesgo de enfermedades transmitidas por este medio, las instituciones de salud y de abastecimiento de agua han asumido la responsabilidad de establecer normas de calidad apropiadas.

Los criterios de calidad representan el nivel (concentración o cantidad) de un componente que garantiza que el agua será agradable para los sentidos y no causará riesgo significativo alguno para la salud del consumidor. La calidad de agua definida por los valores guía es tal que resulta adecuada para el consumo humano y para todo uso doméstico habitual, incluyendo la higiene personal. Cuando se sobrepasa un valor guía debe investigarse la causa para poder proponer una solución adecuada.

La normatividad es fijada por cada país que hace su propia selección de parámetros y fija sus propias normas, para esto es necesario tomar en cuenta una variedad de condiciones geográficas, socioeconómicas, industriales y de hábitos alimentarios. Se debe poner énfasis en primer lugar en la seguridad microbiológica de los abastecimientos de agua potable, seguida de los parámetros físico-químicos donde se considera que son pocos los que tienen relevancia general.

En México la Secretaría de Salud ha establecido 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.* (Ver **TABLA 1.1**)

TABLA 1.1. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994 Y CRITERIOS DE CALIDAD.

PARÁMETRO REGULADO	UNIDADES	NOM 127- SSA1-1994
Sabor		agradable
Color	U Pt/Co	20.0
Turbiedad	UTN	5.0
Conductividad	μmhos/cm	
pH	U pH	6.5 - 8.5
Olor		agradable
Dureza Total	mg/l	500
Alcalinidad Total	mg/l	
OCMA	mg/l	
CRL en aguas cloradas	mg/l	0.2
CRL en aguas sobrecloradas	mg/l	1.5
Aluminio	mg/l	0.2
Arsénico	mg/l	0.05
Boro	mg/l	
Cloruros	mg/l	250
Cromo Total	mg/l	0.05
Cobre	mg/l	2
DQO soluble	mg/l	
Fenoles	mg/l	0.001
Hierro	mg/l	0.3
Fósforo	mg/l	
Fluoruros (como F)	mg/l	1.5
Manganeso	mg/l	0.15
Mercurio	mg/l	0.001
Nitratos (como N)	mg/l	10.0
Nitritos (como N)	mg/l	0.05
Nitrógeno Amoniacal	mg/l	0.5
Nitrógeno Proteico	mg/l	
Plomo	mg/l	0.025
Potasio	mg/l	
S.A.A.M.	mg/l	0.5
Sodio	mg/l	200
Sólidos dis. tot.	mg/l	1000
Sulfatos (como SO ₄ ⁻)	mg/l	400
Trihalometanos tot.	mg/l	0.2
Zinc	mg/l	5
Coliformes Totales	NPM/100 ml	2
Coliformes Fecales	NPM/100 ml	0
Aldrín	μg/l	0.03
Dieldrín	μg/l	0.03
Heptacloro y epóxido de heptacloro	μg/l	0.03
Metoxicloro	μg/l	20
2, 4 Dieldrín	μg/l	50
Gamma - HCH (lindano)	μg/l	2
DDT (total de isómeros)	μg/l	1
Clordano (total de isómeros)	μg/l	0.3
Endosulfan	μg/l	74
Radiactividad alfa global	Bq/l	0.1
Radiactividad beta global	Bq/l	1

1.2.2. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA

La Comisión de Agua y Alcantarillado de Sistemas Intermunicipales (CAASIM) realizó un programa de muestreo en el tiro de la mina “El Álamo” a través de su laboratorio. La **TABLA 1.2** muestra los resultados y las fechas de los análisis de laboratorio realizado a las muestras sustraídas del punto de muestreo antes citado, resaltando los parámetros fuera de norma.

Las muestras que se extrajeron para llevar a cabo el análisis proceden de una profundidad de 230 metros por debajo del nivel de superficie, y están 40 metros por debajo del nivel estático actual del agua en la mina. Debido a la dificultad que presenta el extraer una muestra *in situ* se optó por utilizar un dispositivo de muestreo de presión diferencial proporcionado por el Laboratorio de Control de la Calidad del Agua de la CAASIM, el cual permite extraer la muestra “a larga distancia” no sin antes tener que librar los obstáculos existentes en el tiro de la mina.

Las muestras fueron colectadas en 3 días del mes de junio (05, 12 y 19) de 2006 y fueron 3 en cada ocasión (para análisis Físicoquímicos, Bacteriológicos y de Metales) de acuerdo a los lineamientos y técnicas establecidas por el laboratorio certificado encargado del muestreo.

Éste análisis nos muestra en los recuadros resaltados, los parámetros que rebasan lo establecido por la norma y que generan problemas de calidad del agua proveniente de la mina “El Álamo”. Estos parámetros son: alta dureza por calcio, dureza total, alto contenido de manganeso y fierro, sólidos disueltos, sulfatos, presencia de coliformes y conductividad eléctrica.

TABLA 1.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS FISCOQUÍMICOS, BACTERIOLÓGICOS Y METALES

ANÁLISIS	PARÁMETRO	UNIDADES	NORMA Y/O CRITERIO	05/JUN/06	12/JUN/06	19/JUN/06
FISCOQUÍMICOS	pH	U pH	6.5 - 8.5	7.42	7.12	7.76
	TURBIEDAD	UTN	5	12.3	11.4	7.2
	CONDUCTIVIDAD	μSiemens /cm	*	2350	2321	2422
	COLOR	U Pt/Co	20	10	15	7.5
	ALC. TOTAL	mg/l	*	176.4	366.6	364.9
	CLORUROS	mg/l	250	29.8	55.3	51.2
	CLORO LIBRE	mg/l	0,2-1,5			
	DQO	mg/l	*	15	24	13.2
	FLUORUROS	mg/l	1.5	1.7	1.7	1.7
	SÓLIDOS TOTALES	mg/l	*	1950	2000	1972
	SÓLIDOS TOT VOLÁTILES	mg/l	*	130	148	140
	SÓLIDOS TOT FIJOS	mg/l	*	1820	1852	1832
	SÓLIDOS SUSP. TOTALES	mg/l	*	20	32	4.0
	SÓLIDOS SUSP. VOLÁTILES	mg/l	*	10	16	0.0
	SÓLIDOS SUSP. FIJOS	mg/l	*	10	16	4.0
	SÓLIDOS DIS. TOTALES	mg/l	1000	1966	1968	1968
	SÓLIDOS DIS. VOLÁTILES	mg/l	*	138	132	140
	SÓLIDOS DIS. FIJOS	mg/l	*	1826	1836	1828
	DUREZA TOTAL	mg/l	500	646	707.0	630
	DUREZA DE CALCIO	mg/l	*	598	609.79	594.1
	DUREZA DE MAGNESIO	mg/l	*	48	97.3	35.9
	NITRÓGENO DE NITRATO	mg/l	10	1.65	1.8	1.59
	NITRÓGENO DE NITRITO	mg/l	1	0.020	0.029	0.019
	NITRÓGENO AMONIACAL	mg/l	0.5	<0.10	<0.10	<0.10
	NITRÓGENO PROTEICO	mg/l	*			
SULFATOS	mg/l	400	862.42	964	816.95	
SAAM	mg/l	*	<0.035	<0.035	<0.035	

ANÁLISIS	PARÁMETRO	UNIDADES	NORMA Y/O CRITERIO	05/JUN/06	12/JUN/06	19/JUN/06
BACTERIOLÓGICOS	COLIFORME TOTAL	col/100 ml	0	50	100	31
	COLIFORME FECAL	col/100 ml	0	POSITIVO	POSITIVO	POSITIVO
	CUENTA ESTÁNDAR	col/ml	*	>6500	975	>6500
METALES	ALUMINIO	mg/l	0.2	0.358	<0.358	<0.358
	ARSÉNICO	mg/l	0.05	0.00240	0.00239	0.00248
	BARIO	mg/l	0.7	0.020	0.016	0.026
	CADMIO	mg/l	0.005	0.00036	0.00047	0.00032
	CALCIO	mg/l	*	224.2	232.0	201.7
	CINC	mg/l	5	0.060	0.078	0.054
	COBRE	mg/l	2	<0.028	<0.028	<0.028
	CROMO	mg/l	0.05	<0.028	<0.028	<0.028
	FIERRO TOTAL	mg/l	0.3	0.686	0.956	0.546
	MAGNESIO	mg/l	*	30.5	31.0	30.7
	MANGANESO TOTAL	mg/l	0.15	0.981	0.983	0.978
	MERCURIO	mg/l	0.001	<0.00035	<0.00035	<0.00035
	PLOMO	mg/l	0.01	0.00130	0.00141	0.00128
	POTASIO	mg/l	*	26.4	25.8	28.9
	SILICIO	mg/l	*	15.4	19.1	11.8
	SODIO	mg/l	200	281.7	286.8	273.3
BORO	mg/l	200				

*No existe criterio o valor alguno que se pueda tomar como referencia

El Calcio no es un parámetro que se encuentre normado, el valor que se toma como referencia de calidad es el criterio establecido es de 30 mg/l (**OMS, 2007**), pero este ión tiene influencia directa en otro parámetro que si se encuentra regulado por la Norma, la Dureza Total.

La dureza total es la suma de la dureza de Calcio y la dureza de Magnesio, los resultados de calidad del agua permiten ver que el incremento de concentración de Magnesio no es considerable, y que el valor máximo se encuentra muy por debajo del criterio establecido.

La presencia de estos compuestos salinos está estrechamente ligada a lecturas de alta conductividad eléctrica, es por ello que este parámetro cobra importancia, pues nos ayuda a determinar la existencia, y en su caso, el exceso de sales presentes en una muestra de agua.

Otro parámetro que actualmente se encuentra fuera de norma y con tendencia a aumentar es el Manganeseo (Mn). Éste es un metal que se encuentra de manera abundante en rocas y debido a las condiciones anaerobias del subsuelo aparece siempre en el agua de pozo en su forma soluble. La presencia de manganeseo en las fuentes de abastecimiento de agua potable es objetable por razones que no guardan relación directa con la salud. Cuando las concentraciones exceden 0.15 mg/l, el Manganeseo imparte un sabor muy desagradable a las bebidas y mancha las prendas de vestir; al oxidarse los compuestos manganosos, este compuesto se precipita y origina graves problemas de incrustación.

El fierro, el manganeseo y los gases disueltos presentes deben eliminarse de las aguas de consumo, por diversas razones:

- Causas de corrosión o de obstrucción de las tuberías (directamente. Por precipitación y formación de depósitos, o indirectamente, favoreciendo el desarrollo de bacterias específicas);
- Aspecto del agua (afectación de las características organolépticas del agua);
- Sabor metálico;
- Inconveniente en el lavado de la ropa, etc.

Igualmente, son indeseables estos elementos en numerosas aguas de fabricación, en especial en industrias lecheras, papeleras o textiles.

En cuanto a la presencia de Calcio y Magnesio (Ca y Mg), cabe mencionar que existe cierta evidencia toxicológica que indica una correlación inversa entre la dureza del agua y las enfermedades cardiovasculares. La presencia excedida

de cationes solubles como el Calcio y el Magnesio reduce al absorción del agua durante el escaldado de frutas y vegetales, modificando su textura.

Los sulfatos (SO_4) a su vez se encuentran en casi todas las aguas naturales. La mayor parte de los compuestos sulfatados se originan a partir de la oxidación de las menas de sulfato, la presencia de esquistos, y la existencia de residuos industriales. El sulfato es uno de los principales constituyentes disueltos de la lluvia. Una alta concentración de sulfato en agua potable tiene un efecto laxativo cuando se combina con calcio y magnesio, los dos componentes más comunes de la dureza del agua. El nivel máximo de sulfatos sugerido por la organización Mundial de la Salud (OMS) en las Directrices para la Calidad del Agua Potable, establecidas en Génova, 1993, es de 500 mg/l (por lo tanto, la SSA toma este valor como parámetro de calidad). Las directrices de la Unión Europea son más recientes, (1998), completas y estrictas que las de la OMS, sugiriendo un máximo de 250 mg/l de sulfato en el agua destinada al consumo humano.

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

CAPITULO II

DISPONIBILIDAD, DOTACIÓN Y ABASTECIMIENTO DEL AGUA DE LA MINA “EL ÁLAMO”

El ingeniero de diseño debe preocuparse no sólo de determinar cual será el tren de tratamiento del agua en cuestión, sino que además deberá tomar en cuenta la fuente de extracción y del destino final del agua tratada, así como la duración u horizonte del proyecto. Por lo tanto, en el presente capítulo se plantea una alternativa para llevar el agua y distribuirla a un sector de la población de la Ciudad de Pachuca, mencionando los tiempos de duración de los equipos y de la planta en general, estableciendo así un periodo de operación óptimo de la planta potabilizadora.

2.1. DESTINO FINAL DEL AGUA POTABILIZADA

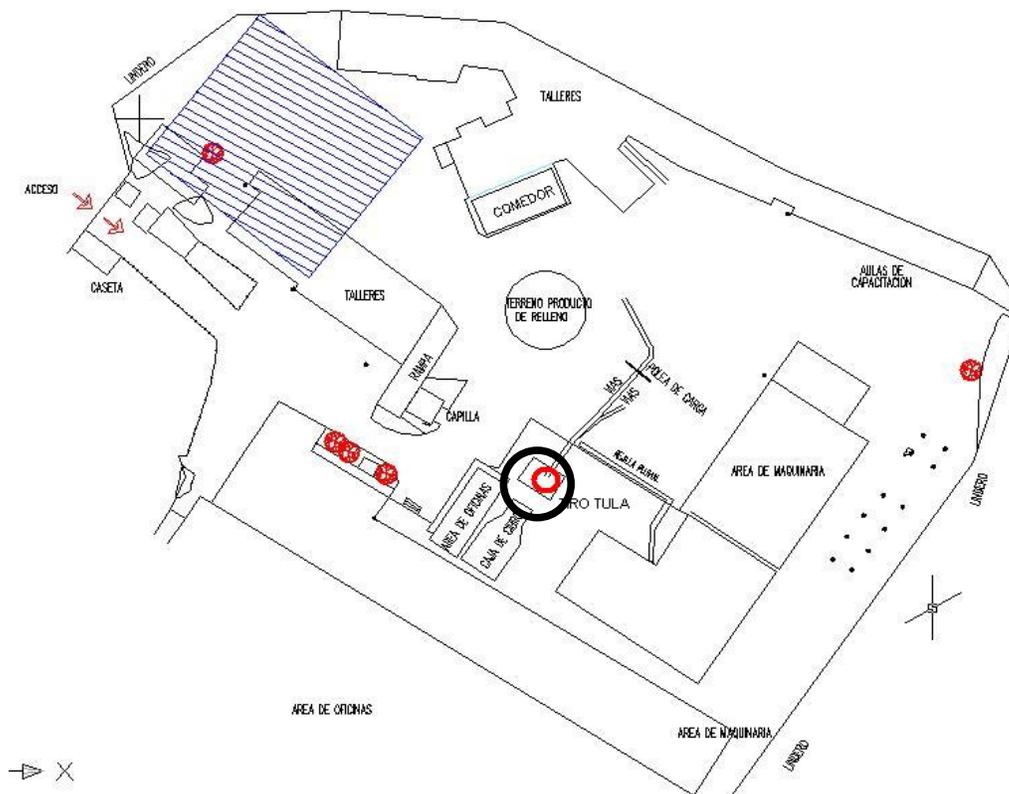


FIGURA 2.1. CROQUIS DE LOCALIZACIÓN DEL TIRO DE LA MINA

En el círculo que se muestra en la **FIGURA 2.1**, se indica la ubicación del tiro de la mina “El Álamo” y en el área sombreada se muestra la propuesta de ubicación de la planta potabilizadora que se sugirió durante el capítulo anterior. El tiro tiene un ancho aproximado de 2.80 m por 2.80 m de largo, quedando libre aproximadamente 1.10 m para la instalación del equipo de bombeo,

accesorios y arreglos de tuberías por el espacio demandado por la calesa, contrapeso y guías.

El agua tratada en esta planta, pudiera ser enviada al Tanque de regulación llamado “Cubitos 1”, que de acuerdo a la Oficina de Operación Hidráulica de la CAASIM, se encuentra a una distancia aproximada de 1, 100 m con una pendiente de 40 m; es la opción más próxima y viable, pues no existe otro más cercano y este tanque puede distribuir agua a las siguientes 10 colonias:

- 1) Privadas de Miguel Ángel
- 2) Fracc. Rosales
- 3) Col. Céspedes
- 4) Col. Doctores
- 5) Fracc. 11 de julio 1ª y 2ª sección
- 6) Ciudad de los Niños
- 7) Col. Cerro de Cubitos
- 8) Blvd. San Francisco
- 9) Col. La Raza
- 10) Col Felipe Ángeles

Estas colonias cuentan con el servicio de agua potable pero actualmente no se cubre el gran déficit existente, pues de acuerdo con el organismo operador, estas colonias son surtidas de agua mediante “tandeo”, es decir, reciben agua cada tres días en determinados horarios (generalmente en la noche).

El recorrido de la línea de conducción posterior a la planta potabilizadora sería por la calle Monterrey hasta el cruce con la calle Pino Suárez siguiendo por esta hasta el Tanque “Cubitos 1”. A continuación se muestra el croquis de ubicación de la línea de conducción y del tanque regulador. (Ver **FIGURA 2.2.**)

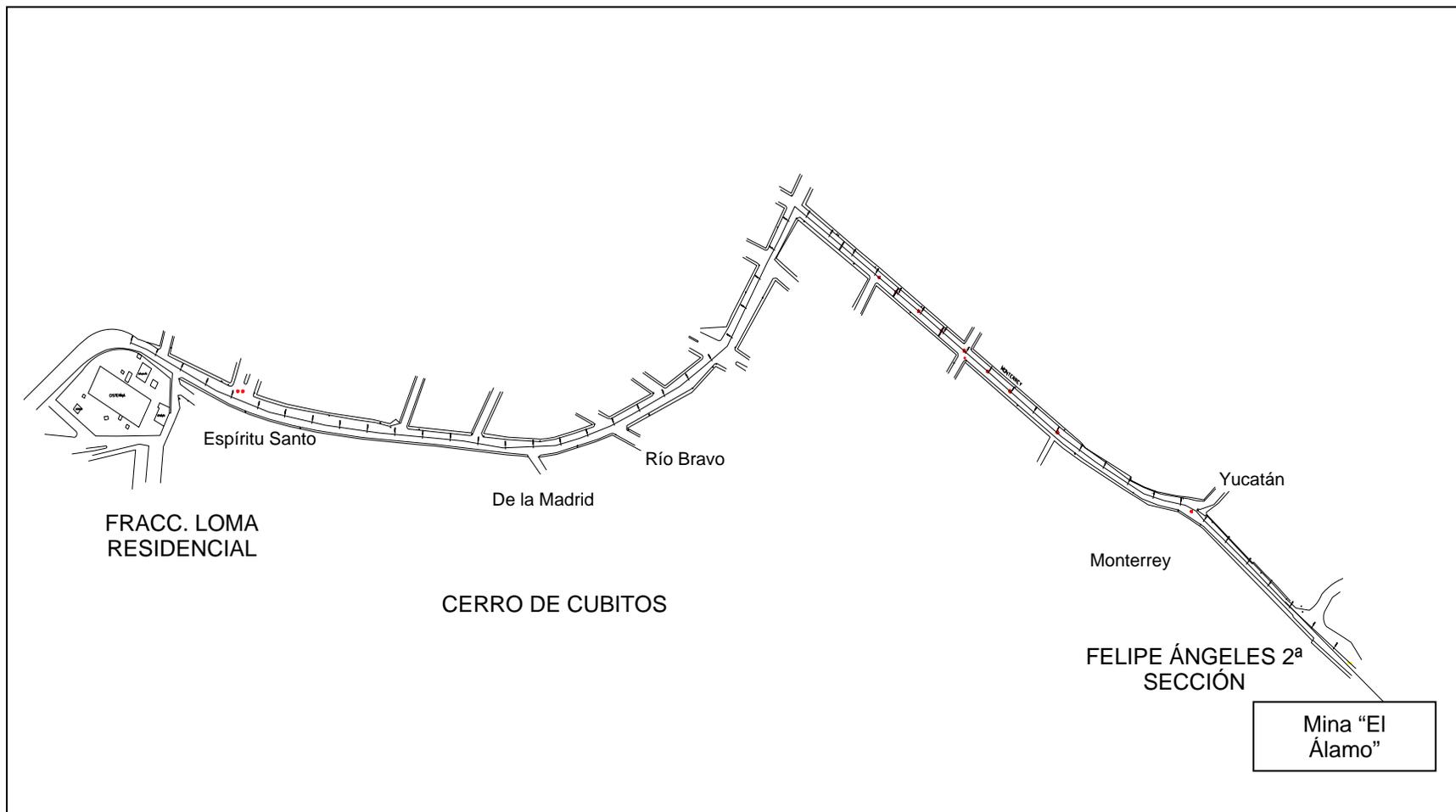


FIGURA 2.2. CROQUIS DE RUTA DE LA LÍNEA DE CONDUCCIÓN

2.2. DETERMINACIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA

Como parte de los resultados del estudio de diagnóstico y planeación integral del sistema de agua potable, alcantarillado y saneamiento del municipio de Pachuca, se estimó la población por localidad sin agua entubada y se estimó la población que tiene déficit en la dotación del servicio de agua potable, calculada como viviendas particulares habitadas con y sin agua entubada en la vivienda con un promedio de 4.5 ocupantes en viviendas particulares.

Como resultado de lo anterior se observa que la zona de influencia del tanque de regulación "Cubitos 1" comprendida por las colonias ubicadas en la **TABLA 2.1** que se muestra más abajo, mantiene un nivel de servicio bajo o por tandas.

TABLA 2.1. ZONA DE INFLUENCIA DEL TANQUE CUBITOS 1

COLONIA	NO. DE TOMAS	NO. DE HABITANTES
Privadas de Miguel Ángel	200	900
Fracc. Rosales	500	2250
Col. Céspedes	542	2439
Col. Doctores	707	3182
Fracc. 11 de julio 1ª y 2ª sección	592	2665
Ciudad de los Niños	666	2300
Col. Cerro de Cubitos	1945	8755
Bld. San Francisco	216	975
Col. La Raza	1365	6145
Col Felipe Ángeles	445	2010
TOTAL	7180	32310

Fuente: Oficina de Atención a Usuarios (CAASIM, Pachuca)

2.2.1. POBLACIÓN

Los datos arrojados por el II Censo de población y Vivienda 2005 realizado por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), muestran que el municipio cuenta con 275,578 habitantes distribuidos en sus 16 localidades, lo que representa el 11.75 % de población relativa estatal.

En relación con el censo de 2000, el municipio creció a una tasa de 3.1 % anual, siendo esta una de las tasas mas bajas del estado de Hidalgo, todo esto

como resultado de los programas nacionales y estatales a favor de la Planificación Familiar.

Su densidad poblacional es de 1,411 habitantes por kilómetro cuadrado. Es importante resaltar que del total de la población 131,065 son hombres y 144,513 son mujeres. Éstas últimas son quienes juegan un papel determinante en el manejo y administración de los recursos hídricos.

2.2.2. PROYECCIÓN DE LA POBLACIÓN

Con la proyección de población determinamos el número de habitantes que se espera tener en la zona a corto y largo plazo. Esta información servirá para determinar las necesidades de infraestructura de agua potable, y posteriormente de alcantarillado y saneamiento al horizonte de planeación.

Con la finalidad de determinar la población de proyecto en la zona del municipio de Pachuca de Soto, se realizó un análisis histórico de las características demográficas utilizando la información que proporciona el *INEGI*.

La proyección de la población es fundamental para planear la prestación de los servicios de agua potable, alcantarillado y saneamiento que debe proporcionar, ya sea el Comité y/o la formación de un grupo de personas responsables para operar el sistema que se proyecta y construya.

Para las zonas de proyecto se observa que la población en el último lustro tendió crecer por lo que se recomienda usar la tasa mayor positiva de la zona, ya que para las zonas de influencia la tasa de crecimiento que se presenta en los últimos 5 años es de 3.1 %.

Con base en lo anterior, se efectuó un análisis para determinar que crecimiento puede tener la localidad en los próximos años. A continuación se muestra la **TABLA 2.2** con los incrementos de población en la zona.

TABLA 2.2. CRECIMIENTO DE LA POBLACIÓN EN ZONA DE INFLUENCIA.

Año	No. de habitantes <i>Pachuca</i>	No. de viviendas <i>Pachuca</i>	Hacinamiento (Hab/viv.)	No. De Hab. zona de estudio
1970	83,892	14,864	5.64	9,836
1980	110,351	21,085	5.23	12,938
1990	174,013	37,559	4.63	20,402
2000	245,208	56,387	4.11	28,749
2005	275,578	71,321	3.86	32,310

2.2.2.1. DETERMINACIÓN DE LA POBLACIÓN

Con el propósito de establecer el método de proyección que mejor refleje las características demográficas de crecimiento de la localidad, se baso el estudio en la zona de influencia que abarca el tanque Cubitos 1 y el área de la Zona Centro que será beneficiada con la interconexión, se realizó la estimación de la población actual mediante los métodos matemáticos de proyección Aritmético, Geométrico y logarítmico los cuales se describen a continuación:

Método aritmético.

El método aritmético tiene como característico, un incremento de población constante para incrementos de tiempos iguales y, en consecuencia, la velocidad de crecimiento, es decir, la relación del incremento de habitantes y el periodo de tiempo es una constante. Lo anterior queda expresado por la ecuación siguiente:

$$P_f = P_o + K_a (T_f - T_o)$$

Donde:

P_f = Población futura.

P_o = Población actual

K_a = Constante que significa el incremento de población en la unidad de

tiempo (año, decenio, etc.)

T_f = Año de la población futura.

T_o = Año de la población actual.

y :

$$Ka = \frac{P_f - P_o}{T_f - T_o}$$

Método geométrico.

El método geométrico, se caracteriza por tener una velocidad de crecimiento directamente proporcional al valor de la población en cada instante de tiempo.

Su expresión matemática es la siguiente:

$$P_f = P_o (1+i)^t$$

Donde:

P_f = Población futura.

P_o = Población actual.

i = Tasa de crecimiento promedio anual para el periodo considerado.

t = Periodo de tiempo considerado.

Para el empleo del método geométrico, se debe contar con información censal de dos periodos distintos.

Método logarítmico.

El método logarítmico al igual que el geométrico, se caracteriza por tener una velocidad de crecimiento directamente proporcional al valor de la población en cada instante de tiempo. Su expresión matemática es la siguiente:

$$Pd = 10^A$$

$$A = \log Pf + K(td-tf)$$

$$K = \frac{\log Pf - \log Po}{tf - to}$$

Donde:

Pf = Población del último censo.

Po = Población del penúltimo censo.

to = Fecha del penúltimo censo.

tf = Fecha del último censo.

K = Tasa de crecimiento promedio anual para el periodo considerado.

td = Fecha a la cual se desea la población.

Pd = Población en la fecha deseada.

Para el empleo del método logarítmico al igual que el geométrico, se debe contar con información censal de dos periodos distintos.

2.3. HORIZONTE DEL PROYECTO

2.3.1. PERIODO DE DISEÑO

Se entiende por periodo de diseño, el intervalo de tiempo durante el cual la obra llega a su nivel de saturación. Para este caso nos hemos basado en los aspectos económicos, los cuales están en función del costo del dinero, esto es, a mayores tasas de interés menor periodo de diseño no dejando fuera del alcance, los aspectos financieros.

Por lo anterior, el dimensionamiento de la obra se ha llevado a cabo considerando periodos de corto plazo, sin dejar de lado aquellas acciones específicas en que se puede requerir un periodo de diseño mayor por economía de escala.

Se ha considerado factible generar un proceso de extracción-potabilización-conducción modular, lo que ha permitido diferir las inversiones el mayor tiempo posible buscando el máximo rendimiento de la inversión al disponer de infraestructura con bajos niveles de capacidad ociosa en el corto plazo.

A continuación se muestra la **TABLA 2.3** publicada por la Comisión Nacional del Agua (CNA) la cual contienen los periodos de diseño recomendables para los diferentes sistemas de agua potable y alcantarillado.

TABLA 2.3. PERIODOS DE DISEÑO

Elemento	Periodo de diseño (años)
Fuente	
Pozo	5
Embalse	Hasta 5
Línea de conducción	De 5 a 20
Planta potabilizadora	De 5 a 10
Estación de bombeo	De 5 a 10
Tanque	De 5 a 20
Distribución primaria	De 5 a 20
Distribución secundaria	A saturación (*)
Red de atarjeas	A saturación (*)
Colector y emisor	De 5 a 20
Planta de tratamiento	De 5 a 10

(*) En el caso de distribución secundaria y red de atarjeas, por condiciones de construcción difícilmente se podría diferir la inversión.

Fuente: CNA

2.3.2. VIDA ÚTIL.

La vida útil es el tiempo que se espera que la obra sirva a los propósitos de diseño sin que los gastos de operación y mantenimiento en este tiempo sean tan elevados y hagan antieconómico su uso o que por ello la obra requiera ser eliminada por insuficiente.

En la **TABLA 2.4** publicada por la Comisión nacional del Agua (CNA) se indica la vida útil de algunos elementos de un sistema de agua potable, considerando una buena operación y mantenimiento.

TABLA 2.4. VIDA ÚTIL

Elemento	Vida útil (años)
Pozo	
Civil	De 10 a 30
Electromecánica*	De 2 a 20
Línea de conducción	De 20 a 40
Planta potabilizadora	
Civil	40
Electromecánica*	De 5 a 20
Estación de bombeo	
Civil	40
Electromecánica*	De 5 a 20
Tanque	
Superficial	40
Elevado	20
Distribución primaria	De 20 a 40
Distribución secundaria	De 15 a 30
Red de atarjeas	De 15 a 30
Colector y emisor	De 20 a 40
Planta de tratamiento	
Civil	40
Electromecánica	De 15 a 20

(*) La vida útil del equipo electromecánico presenta variaciones muy considerables, principalmente en las partes mecánicas, como son cuerpo de tazones, impulsores, columnas, flechas, portachumaceras, estoperos, etc., la cual se ve disminuida notablemente debido a la calidad del agua que se maneja (contenido de hierro y manganeso) y a sus capacidades de operación. *Fuente: (CNA)*

Considerando los datos anteriores, se observa que dada las características del proyecto, que es completamente modular con la menor cantidad de equipo mecánico posible, se ha establecido un **periodo de diseño de 20 años**, con **una vida útil de 15 años**, que se considera un promedio aceptable para las condiciones de operación y mantenimiento esperadas.

2.4. DOTACIÓN

De acuerdo a la proyección de población, y a las tasas de crecimiento que fueron obtenidas, los gastos que demandará la población en el horizonte de proyecto, son los que se indican en las tablas a continuación mostradas, es necesario aclarar que las dotaciones tomadas corresponden a las indicadas en los manuales de la CNA, específicamente en el tomo de Datos Básicos, quedando de la siguiente manera:

Consumos por tipo de usuario según el clima predominante y a la temperatura media anual presentada. (TABLAS 2.5 Y 2.6)

TABLA 2.5. CONSUMOS DOMÉSTICOS PER CÁPITA (INEGI, 2006)

CLIMA	CONSUMO POR CLASE SOCIOECONÓMICA (LPD)		
	<i>Residencial</i>	<i>Media</i>	<i>Popular</i>
Cálido	400	230	185
Semicálido	300	205	130
Templado	250	195	100

TABLA 2.6. CLASIFICACIÓN DE CLIMAS POR SU TEMPERATURA (INEGI, 2006)

TEMPERATURA MEDIA ANUAL (°C)	TIPO DE CLIMA
Mayor que 22	Cálido
De 18 a 22	Semicálido
De 12 a 17.9	Templado
De 5 a 11.9	Semifrío
Menor que 5	Frío

La temperatura promedio anual del municipio des de 14.2 °C, y considerando un tipo de usuario de clase popular y clima semicálido, el consumo que se propone es de 125 l/habitante/día, para garantizar la suficiencia del recurso para esta zona del municipio. Según datos obtenidos de la Oficina de Atención a Usuarios de la CAASIM, aproximadamente el 80% de la población de la zona se encuentra en viviendas del tipo popular ya que gran parte de esta población habita en fraccionamientos de casas de interés social no existiendo actividad industrial y comercial que represente un consumo importante. Se propone además que se considere un hacinamiento de 4.5 habitantes por vivienda con el objetivo de mantener una dotación constante y suficiente.

Los coeficientes que se utilizarán para determinar el gasto máximo diario y el gasto máximo horario serán los siguientes:

El Coeficiente de variación diaria (CVD) es de 1.2 para esta región, según las recomendaciones de la CAASIM de acuerdo a lo dictado por la Comisión Nacional del Agua.

En el caso del coeficiente de variación horaria (CVH) es de 1.5 para esta región, según las recomendaciones de la CAASIM de acuerdo a lo dictado por la Comisión Nacional del Agua.

TABLA 2.7. CÁLCULO DE LOS GASTOS MÁXIMOS ANUALES, DIARIOS Y HORARIOS.

DOTACIÓN: 125 L por habitante al día
COEFICIENTE DE VARIACIÓN DIARIA (CVD): 1.20
COEFICIENTE DE VARIACIÓN HORARIA (CVH): 1.50

AÑO	INCREMENTO PROMEDIO	N	MÉTODO ARITMÉTICO	MÉTODO GEOMÉTRICO	MÉTODO LOGARÍTMICO	DOTACIÓN (LHD)	QMA (LPS)	QMD (LPS)	QMH (LPS)
1970	9,836	-	9,836	9,836	9,836	125	14.23	17.08	25.61
1980	12,938	-	12,938	12,938	12,938	125	18.72	22.46	33.69
1990	20,402	-	20,402	20,402	20,402	125	29.52	35.42	53.13
2000	28,749	-	28,749	28,749	28,749	125	41.59	49.91	74.87
2005	32,310	-	32,310	32,310	32,310	125	46.74	56.09	84.14
2006	33,056	-	33,022	33,073	33,073	125	47.82	57.39	86.08
2007	33,815	1	33,734	33,855	33,855	125	48.92	58.71	88.06
2008	34,586	2	34,447	34,655	34,655	125	50.04	60.04	90.07
2009	35,369	3	35,159	35,474	35,474	125	51.17	61.40	92.11
2010	36,165	4	35,871	36,312	36,312	125	52.32	62.79	94.18
2011	36,974	5	36,583	37,170	37,170	125	53.49	64.19	96.29
2012	37,797	6	37,295	38,048	38,048	125	54.68	65.62	98.43
2013	38,634	7	38,008	38,948	38,948	125	55.89	67.07	100.61
2014	39,485	8	38,720	39,868	39,868	125	57.13	68.55	102.83
2015	40,351	9	39,432	40,810	40,810	125	58.38	70.05	105.08
2016	41,231	10	40,144	41,774	41,774	125	59.65	71.58	107.37
2017	42,126	11	40,856	42,761	42,761	125	60.95	73.14	109.70
2018	43,037	12	41,569	43,772	43,772	125	62.26	74.72	112.08
2019	43,964	13	42,281	44,806	44,806	125	63.61	76.33	114.49
2020	44,908	14	42,993	45,865	45,865	125	64.97	77.96	116.95
2021	45,867	15	43,705	46,949	46,949	125	66.36	79.63	119.45

De la tabla anterior se puede observar que después de 15 años (iniciando en 2007 y terminando en 2021), que sería el periodo de vida útil de la planta potabilizadora, se tiene un gasto máximo horario de 119.45 lps, con lo que podríamos concluir que el gasto de diseño de la planta sería de **120 LPS**

2.5. LÍNEA DE CONDUCCIÓN

La línea de conducción de los 120 lps que produciría la planta potabilizadora serían enviados desde el nivel del efluente de la misma hasta el influente del tanque "Cubitos 1". Para el diseño habrá de considerarse una pendiente aproximada de 40 metros y una distancia entre la planta y el tanque de aproximadamente 1,100 m. estos datos son de gran importancia pues son el

fundamento de la memoria de cálculo del diámetro más económico para la línea de conducción. Cabe mencionar que aunque la memoria de cálculo del diámetro más económico arrojará un material de tubería óptimo para la línea, habría que consultar con el organismo operador acerca de sus preferencias y experiencias en el manejo de materiales tales como el acero al carbón, el PEAD o el asbesto-cemento, pues ya que serían ellos quienes se harían cargo de la revisión y reparación de la línea cuando se requiera y de acuerdo a su plan de mantenimiento.

2.6. TANQUE REGULADOR

La regulación del gasto máximo diario de proyecto del sistema de la localidad, sería mediante el tanque superficial tipo atmosférico existente (Tanque “Cubitos 1”), que cuenta con una capacidad de regulación de 200,000 litros. El tanque se ubica en la colonia Fraccionamiento Loma Residencial, en la zona conocida como Cerro de Cubitos, bajo resguardo de personal de la CAASIM.

2.7. RED DE DISTRIBUCIÓN

La red de distribución no sería modificada, por lo tanto la CAASIM determinaría las ruta y redes de distribución que mejor convengan para el suministro del servicio a la población de la ciudad de Pachuca.

2.8. TOMAS DOMICILIARIAS

El suministro de agua potable se haría llegar a la población por medio de las tomas domiciliarias existentes. Las tomas a instalar para nuevos y futuros usuarios, quedaría bajo criterio y administración de la CAASIM.

CAPITULO III

SELECCIÓN Y DESCRIPCIÓN TEÓRICA DEL PROCESO DE POTABILIZACIÓN DEL AGUA EXTRAÍDA DE LA MINA “EL ÁLAMO”

3.1 SELECCIÓN DEL TREN DE POTABILIZACIÓN

El objetivo básico de la selección y diseño de una planta potabilizadora 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. Por lo tanto la planta potabilizadora debe contar con la máxima confiabilidad y flexibilidad, mínima operación y mantenimiento y solamente los controles e instrumentación indispensables.

Las condiciones locales predominantes determinan la importancia de los factores previamente mencionados y su incidencia en cada diseño particular. En general se recomienda tener en cuenta, entre otros, los siguientes preceptos de diseño.

- No existe un problema típico de diseño de una planta potabilizadora. En la práctica, los proyectos varían desde una pequeña adición a un sistema existente hasta el diseño de un sistema completo.
- Aunque la planta de tratamiento juega, en muchos casos, el papel primordial en el mejoramiento de la calidad del agua, en el diseño debe considerarse además la fuente y sistema de distribución, si se quiere lograr la “producción económica” de un agua de buena calidad.
- El ingeniero diseñador debe familiarizarse con todas las normas y requerimientos oficiales aplicables al proyecto.
- El tipo de tratamiento depende de la calidad deseada en el agua producida. Por lo tanto, una información adecuada sobre la fuente es requisito de diseño. Esto supone un análisis completo del agua cruda y, cuando la fuente no es de características uniformes, el conocimiento de las variaciones de sus características y una evaluación de los cambios posibles de la calidad durante la vida útil de la planta.
- Cuando no existe información suficiente sobre la calidad de la fuente, además de un programa de muestras y análisis, debe recogerse

información proveniente de las plantas en operación de fuentes semejantes en el área.

- La capacidad nominal de diseño de una planta es generalmente mayor que la demanda máxima proyectada para el periodo de diseño.
- En la selección del periodo de diseño de los componentes de la planta se debe tener en cuenta la vida útil de la estructura y del equipo, la facilidad de expansión, la tasa de crecimiento del área de servicio, la tasa de interés sobre los préstamos, los cambios de poder adquisitivo de la moneda durante el periodo de deuda y la operación de las estructuras y los equipos en los años iniciales. En general, se proveen desde el principio aquellas estructuras que no pueden construirse económicamente por etapas, ejemplo: edificios y estaciones de bombeo.
- Es necesario que la planta potabilizadora pueda operar continuamente con uno o más equipos fuera de servicio por mantenimiento. Esto supone un mínimo de dos unidades de tratamiento. Solamente debe utilizarse la instrumentación esencial, y la utilización de equipo automático debe restringirse para prevenir que una falla del mismo pueda dejar sin suministro de agua potable a la población.
- Para la localización de la planta se debe tener en cuenta los siguientes aspectos: área futura de servicio, costo bajo del terreno, ubicación con respecto a la fuente de distribución, topografía, disponibilidad de energía eléctrica, facilidades de acceso, facilidad de disposición de residuos, actitud de la comunidad, defensa civil, belleza natural y paisajística.

Para la selección del proceso de tratamiento de agua proveniente de la mina “El Álamo”, se consideró la siguiente tabla que hace mención acerca de los procesos propuestos por la NOM-127-SSA1-1997 así como la bibliografía especializada en materia. (Ver **TABLA 3.1.**). Cabe mencionar que para definir el tren de tratamiento, también se han considerado factores como el espacio disponible, la capacidad de carga del suelo actual, el costo por operación, la imposibilidad por parte de la CAASIM de adquirir una gran variedad de productos químicos, entre otros, que son determinantes al momento de tomar una decisión sobre un proceso de tratamiento en específico.

TABLA 3.1. PROCESOS PROPUESTOS POR LA NORMA NOM-127-SSA1-1997

CONTAMINANTES	PROCESO PROPUESTO POR LA NORMA 127
Fierro y manganeso	Oxidación con aire u ozono
Sólidos disueltos totales	La coagulación-floculación, sedimentación-filtración y o intercambio iónico
Sulfatos	Intercambio iónico u osmosis inversa
Dureza calcio	Ablandamiento químico o intercambio iónico
Dureza magnesio	Ablandamiento químico o intercambio iónico
Conductividad eléctrica	Osmosis inversa
Contaminación microbiológica	Deben desinfectarse con cloro, compuestos de cloro, yodo, ozono, luz ultravioleta; plata iónica o coloidal; coagulación-sedimentación-filtración; filtración en múltiples etapas.

3.1. ESTRUCTURACIÓN DEL TREN DE POTABILIZACIÓN

A continuación se en listan cada una de las unidades y operaciones unitarias que conforman el sistema de tratamiento siguiendo las recomendaciones de la norma 127.

a) Proceso de extracción desde el nivel 370 de la mina “El Álamo”

El objetivo de esta etapa inicial del proceso es la extracción de agua de la mina de la cual ya se han mostrado los resultados de laboratorio para conducirla hacia las instalaciones de la planta potabilizadora y alimentar así la primera etapa de tratamiento.

b) Torres empacadas de aireación

Estos equipos suponen un ahorro importante por concepto de energía y equipamiento, así como costos por mantenimiento y operación de la unidad de ozono que le sigue. Tienen el objetivo de pre-oxidar el fierro y manganeso y remover gases como el ácido sulfhídrico, el bióxido de carbono, metano, compuestos orgánicos volátiles entre otras. Estos equipos son torres empacadas con materiales plásticos de gran área superficial que permite un amplio contacto entre la interfase agua aire a contracorriente. Aunque su costo

inicial puede ser elevado, a largo plazo ofrece grandes beneficios, pues sólo consume la energía de un ventilador y no requiere de la adición de ningún reactivo químico.

c) Ozonación.

El objetivo de esta etapa de proceso es oxidar completamente el fierro y el manganeso remanentes después del proceso de aireación. El generador de ozono tomará aire de la atmósfera, lo secará, lo filtrará y le hará pasar una descarga eléctrica para generar éste agente altamente oxidante, que a la vez dará al agua un tratamiento de pre-desinfección y coadyuvará a la coagulación de los dos metales. El ozono se pondrá en contacto con el agua directamente en un cárcamo o cámara de contacto mediante difusores porosos de burbuja fina.

d) Coagulación-Floculación

Esta etapa del proceso tiene por objetivo remover sólidos suspendidos del agua al formar flóculos o partículas grandes que sean más fáciles de retirar del agua por un equipo de filtrado posterior.

En la etapa de coagulación se lleva a cabo la desestabilización de las cargas eléctricas de los elementos que se hallan presentes en forma coloidal mediante una agente coagulante, permitiendo así que en una segunda etapa puedan aglomerarse en flóculos de mayor tamaño y cargas eléctricas relativamente estables que pueden ser removidos en una etapa posterior con mayor facilidad, mejorando así el aspecto del agua al disminuir la cantidad de sólidos suspendidos en el agua. La bibliografía especializada indica que hay una remoción paralela de fierro y manganeso por coagulación-floculación.

e) Hidrociclones

Estos equipos ofrecen un gran ahorro de espacio en comparación con los sedimentadores convencionales y permiten remover con eficiencia, los flóculos generados por el proceso de coagulación-floculación sólo con el uso de las

fuerzas centrífuga y centrípeta. No requieren de equipo electromecánico ni tienen partes móviles, lo que representa poco gasto en mantenimiento.

f) Filtración a presión con lecho de arena

El proceso de filtrado en lecho de arena permite un pulimento y mejora de la calidad del agua que se ve reflejado en las características organolépticas de la misma, pues al pasar por esta etapa, el agua estará libre de sólidos suspendidos y materiales que le den un color y sabor desagradable.

g) Osmosis inversa

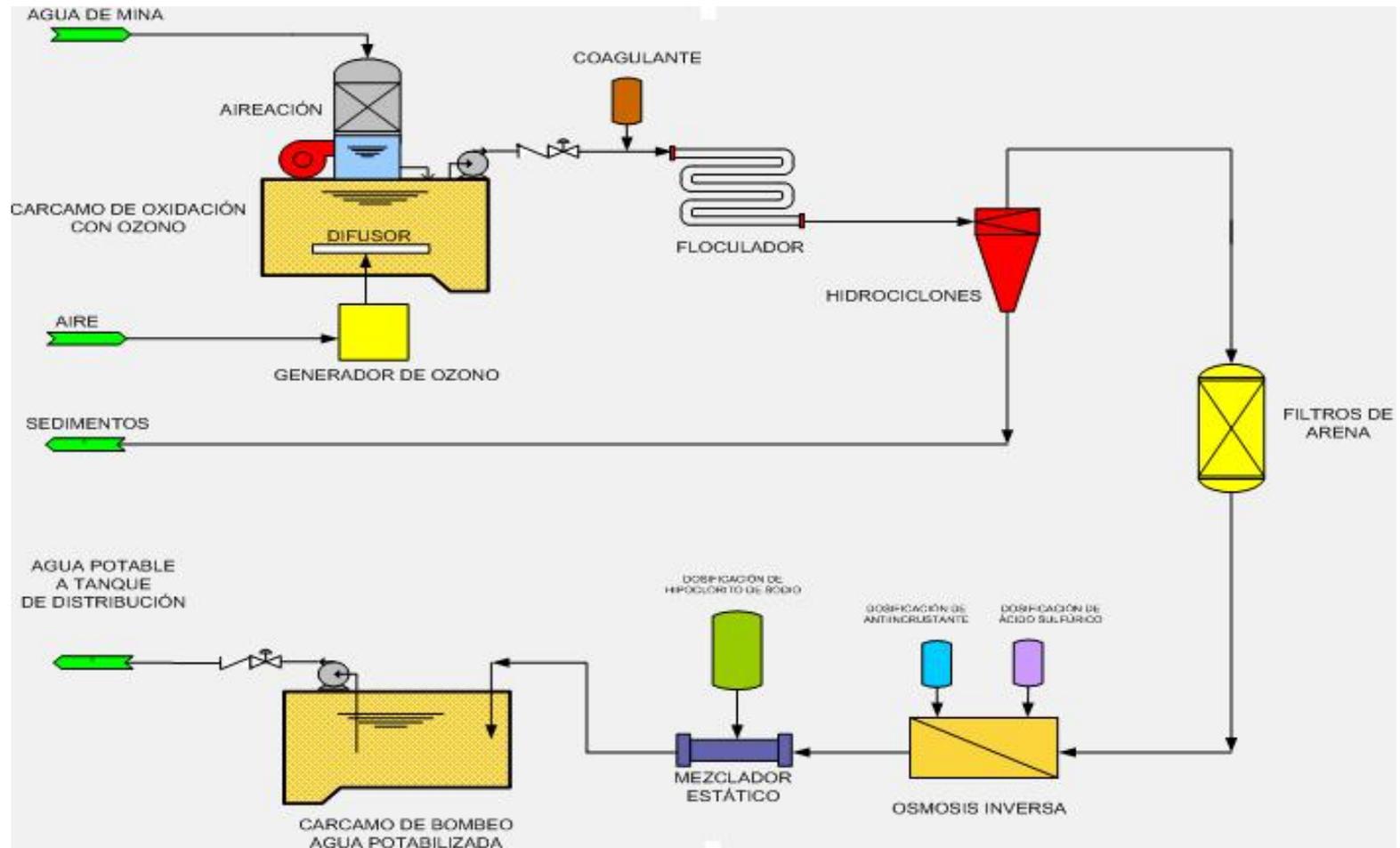
Constituye la etapa más importante de todo el proceso, pues en la operación unitaria de mayor costo, pero que brinda un permeado con alta calidad, pues el agua que es generada por este equipo estará libre de sales, sulfatos, fierro, manganeso, grasas, etc. Es el equipo más delicado, por lo tanto requiere consideraciones especiales desde su diseño, como lo son el tipo adecuado de membranas y de filtros cartucho, que el manejo de las variables de proceso (flujo y presión) sean siempre constantes y/o estén dentro del factor de seguridad considerado para su diseño; el manejo correcto de los reactivos químicos necesarios (ácido sulfúrico y antiincrustante), pero sobre todo, un constante mantenimiento preventivo y vigilancia permanente de las condiciones de operación del equipo así como del pretratamiento que está conformado por todas las etapas anteriores y que sin duda es la mejor protección para un equipo de éstas características.

h) Desinfección

Es la etapa final del tren de tratamiento. Existen diversas metodologías y reactivos para llevar a cabo la desinfección como son el cloro gas, los compuestos derivados del cloro (hipocloritos), el yodo, la luz ultravioleta, la plata iónica, el ozono, entre otros. Se ha demostrado que dado su bajo costo y relativa estabilidad, el hipoclorito de sodio es una buena alternativa para la desinfección para este tipo de sistemas en donde la adquisición de otro tipo de reactivos se vuelve prohibitiva.

Existen diversas formas de garantizar un tiempo de contacto y mezclado entre el agente desinfectante y el agua, una de ellas es la construcción de una cámara o cárcamo de contacto en el que se garantice tanto el tiempo como la agitación suficientes por métodos hidráulicos para permitir una mezcla y reacción completa y homogénea. Sin embargo, existen metodologías más eficientes para obtener dicha homogeneidad, como lo son los mezcladores en línea o mezcladores estáticos, que son dispositivos de bajo costo, larga duración, alta eficiencia en mezclado, no requieren un gran espacio y no requieren mantenimiento al no tener partes mecánicas o móviles. Por lo tanto se consideran como una buena opción para llevar a cabo el proceso de desinfección.

3.2. DIAGRAMA DE FLUJO DE PROCESO



3.2.1. DESCRIPCIÓN TEÓRICA DE LAS OPERACIONES UNITARIAS

3.2.1.1. PROCESO DE EXTRACCIÓN DESDE EL NIVEL 370 DE LA MINA “EL ÁLAMO”

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.

La extracción del agua de la mina se realizaría por medio de una bomba sumergible (con relevo) con impulsores y cuerpo de tazones en acero inoxidable, la cual estaría controlada por un variador de frecuencia para regulación del caudal y este se dirigirá hasta las torres de aireación. Para la selección de estas bombas habrá de tomarse en cuenta la carga dinámica total (CDT) para una altura de 370 m más el recorrido desde el tiro hasta el ingreso a las torres de oxidación. Habrá de tomarse en cuenta las pérdidas por fricción en la tubería, la temperatura del agua (alrededor de 34 °C), los sólidos suspendidos, el pH ligeramente alcalino y sobre todo será necesario considerar el cálculo del diámetro más económico y el cálculo de golpe de ariete para la adecuada selección del espesor de la tubería así como el diseño de los arreglos de válvulas contra golpe de ariete.

Se propone el uso de bombas sumergibles dado el espacio disponible en la parte superior del tiro, pues de colocarse una bomba vertical de pozo convencional, esta ocuparía espacio que requeriría la calesa para descender y

ascender debido a las dimensiones que tendría el motor. Es de suma importancia el diseño de la tubería y de los arreglos hidráulicos contra golpe de ariete, pues se sabe que el acero tiende a alongarse por efectos de la temperatura, pero principalmente por efectos del peso, el cual se ve incrementado por la altura y la fuerza gravitacional, además de que se tendría una columna de agua sobre la bomba considerablemente grande para que se considere el uso de un variador de frecuencia que permita el paro lento programado de el equipo de bombeo. En el caso de una falla eléctrica, el equipo de bombeo debe protegerse mediante arreglos hidráulicos que incluyan la cantidad necesaria de válvulas contra golpe de ariete.

3.2.1.2. TORRES EMPACADAS DE AIREACIÓN

Se entiende por aireación el proceso mediante el cual el agua es puesta en contacto íntimo con el aire con el propósito de modificar las concentraciones de sustancias volátiles o disueltas en ella. En resumen y en palabras burdas, es el proceso de introducir aire al agua.

Las funciones más importantes de la aireación son:

- ***Oxidar fierro y manganeso.***
- Transferir oxígeno al agua para incrementar la tasa de oxígeno disuelto.
- Disminuir las concentraciones de ácido sulfhídrico (H_2S).
- Disminuir la concentración de bióxido de carbono (CO_2)
- Remover gases como metano, cloro y amoníaco.
- Remover compuestos orgánicos volátiles (VOC's)

La aireación representa una de las operaciones de uso más intensivo de energía en los sistemas de tratamiento, mediante los equipos de aireación difusa, equipos de turbina y aireadores mecánicos. Para nuestro caso, los contaminantes a eliminar son el fierro y el manganeso, por lo tanto se le dedican los siguientes párrafos a la remoción de los mismos por aireación.

Determinar la cantidad teórica de aire que se necesita para oxidar y precipitar el fierro y el manganeso del agua es tarea sencilla. La cantidad real de aire podrá luego estimarse con bastante exactitud para poder determinar el tipo correcto de equipo de aireación a utilizar y las condiciones de operación recomendadas para este equipo.

3.2.1.2.1. QUÍMICA DEL AGUA.

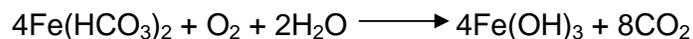
El pH del agua es un parámetro crítico para el proceso de oxidación y precipitación del hierro y manganeso. Para la oxidación del fierro por aireación, el pH del agua deberá ser de por lo menos 7.2 e idealmente deberá mantenerse entre 7.5 y 8.0. Si hay manganeso presente, el pH mínimo recomendado es de 9.5 por debajo de ese nivel de pH, la oxidación del manganeso por aireación se vuelve bastante lenta. En aguas de reducido pH o con bajos niveles de alcalinidad, podrá ser necesario agregar materiales alcalinos suplementarios, tal como el hidróxido de sodio a fin de elevar el pH del agua.

3.2.1.2.2. OTROS FACTORES

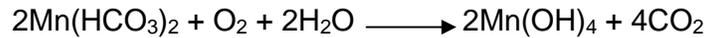
La oxidación del fierro y el manganeso por aireación no es instantánea. Por este motivo se aconseja emplear un tanque de retención o contacto que permita suficiente tiempo de permanencia para que la oxidación y precipitación sean completas. Dependiendo de cuales sean las condiciones reales, los tiempos de contacto pueden variar entre 5 y 15 minutos.

3.2.1.2.3. FORMULAS.

La siguiente reacción describe la oxidación del hierro ferroso por el oxígeno:



La siguiente reacción describe el proceso de oxidación del manganeso manganesoso por el oxígeno:



3.2.1.2.4. RELACIONES

1. Hierro.

El peso atómico del hierro es 55.847. Cuando una molécula de oxígeno reacciona con cuatro átomos de hierro, el peso de la reacción del hierro es cuatro veces ese peso, o sea 223.39. El peso molecular del oxígeno es 31.999. La relación de reacción es entonces $(31.999)/(223.39) = 0.1432$. Esto significa que se requieren 0.1432 mg/L de oxígeno por cada mg/L de hierro (expresado como hierro).

2. Manganeso

El peso atómico del manganeso es 54.938. Cuando dos átomos de manganeso reaccionan con una molécula de oxígeno, el peso de la reacción del manganeso es el doble de ese valor, o sea 109.88. El peso molecular del oxígeno es 31.999. La relación de la reacción es entonces $(31.999)/(109.88) = 0.2912$. Esto significa que se requieren 0.2912 mg/L de oxígeno por cada mg/L de manganeso (expresado como manganeso).

3.2.2.5. RESIDUAL DE OXÍGENO

Deberá inyectarse suficiente aire para poder mantener el residual de oxígeno requerido. Mantener un residual de oxígeno sirve varios propósitos. Primero, suministra un "Bufere" de oxígeno para reaccionar con aumentos repentinos de fierro o manganeso. Segundo, produce un agua de mejor sabor. En tercer lugar, el aire requerido para mantener el residual de oxígeno, facilita el mezclado para que el fierro y el manganeso reaccionen rápida y eficazmente con el oxígeno.

Un valor de oxígeno residual aceptado es de 5.0 mg/L. se deberá inyectar suficiente aire para mantener este nivel. El nivel inicial de oxígeno en aguas

que contienen fiero y/o manganeso es generalmente cero. Si hubiera un residual inicial de oxígeno presente éste deberá restarse del nivel deseado de 5.0 mg/L para determinar la cantidad de oxígeno requerida.

3.2.1.3. OZONACIÓN.

El ozono, proveniente de la palabra griega *ozein*, que significa oler, cuya fórmula molecular es O₃, 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.

En México, el ozono se ha comenzado a aplicar como oxidante en pequeñas plantas potabilizadoras con problema de altas concentraciones de fiero y manganeso, así como para aguas con altos contenidos orgánicos y de color.

3.2.1.3.1. USOS DEL OZONO

3.2.1.3.1.1. DESINFECCIÓN

El ozono es considerado uno de los agentes microbicidas más rápido y eficaz. Su acción posee un amplio espectro y elimina:

- a) Bacterias. Actúa como bactericida y bacteriostático en concentraciones tan bajas como 0.01 ppm, con periodos muy bajos de exposición. Se ha demostrado que a 12 °C y con concentraciones de 0.6 mg/L de ozono se reduce 4 unidades log de *E. Coli*, *Staphylococcus* sp, y *Pseudomonas fluorescens* en menos de un minuto. Los *Streptococcus fecalis* requieren el doble de tiempo y *Mycobacterium tuberculosis*, seis veces más con la misma concentración.
- b) Virus. El ozono oxida las proteínas de la capa y modifica la estructura tridimensional interna, de forma tal, que el virus no puede anclarse a

ninguna célula huésped, no se reproduce y muere. La acción se observa en concentraciones menores a la bactericida pues la capa de los virus es menos compleja que la de la pared bacteriana. Para la destrucción total del virus se requieren 30 segundos a concentración baja de ozono residual (0.05 mg/L). Sin embargo, la OMS recomienda incluir un coeficiente de seguridad importante para la dosis.

- c) Hongos. El ozono genera un daño celular irreversible.
- d) Esporas. A concentraciones ligeramente mayores a las usadas para el resto de las bacterias, el ozono es capaz de destruir esporas producidas por hongos y bacterias.

Los quistes de protozoarios son más resistentes que las esporas de virus y bacterias, actualmente, la inactivación de quistes de *Giardia lamblia*, es un criterio de desinfección que se propuso como directriz por la EPA por ser uno de los gérmenes más difíciles de eliminar

3.2.1.3.1.2. OXIDACIÓN

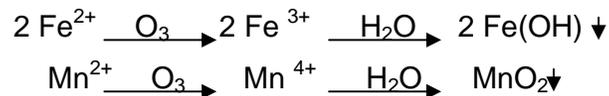
Los problemas más críticos en tratamiento de agua subterránea o agua de pozo son el hierro (Fe), el manganeso (Mn) y el ácido sulfhídrico (H₂S), los cuales están contenidos en muchas fuentes de agua subterránea en grandes cantidades causando así graves problemas de olor y sabor que pueden ser asociados 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.

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, aldehídos y ácidos carboxílicos
- Oxidación de compuestos aromáticos

El hierro y el manganeso pueden ser eliminados de agua por oxidación con ozono de acuerdo a lo siguiente:



Se requieren 0.43 mg de O₃/mg de Fe²⁺ y 0.87 mg de O₃/mg de Mn²⁺ siendo la reacción con hierro la más rápida. Además el manganeso es más difícil de eliminar en presencia de materia orgánica pues esta se oxida primero.

3.2.1.3.1.3. MEJORA DE LA COAGULACIÓN.

En los años sesenta se observó que al utilizar ozono para la oxidación de hierro y manganeso ocurría una floculación espontánea. Ello condujo al desarrollo del proceso de "miscelación-desmicelación", donde las partículas resultantes son fácilmente removidas por filtración rápida en arena con la ayuda de un polímero o un coagulante. Este efecto microfloculante ha sido usado con éxito en plantas potabilizadoras para reducir las dosis de reactivos durante la coagulación y floculación así como para facilitar la remoción de sólidos suspendidos.

3.2.1.3.2. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL USO DE OZONO

El ozono tiene una serie de características que lo hacen atractivo, como son:

- Ser un fuerte oxidante que reacciona rápidamente con la mayoría de los compuestos orgánicos y microorganismos (incluyendo esporas, quistes y algas) presentes en las aguas naturales y residuales.
- No impartir sabor ni olor al agua.
- Poseer mayor poder desinfectante que el cloro y sus derivados.

Sus desventajas se refieren a:

- Los costos.
- El rendimiento del equipo generador de ozono.
- La calidad de los métodos de inyección del gas.

Para remediar los dos últimos factores tecnológicos, las plantas convencionales están diseñadas para aplicar el ozono a presión (0.7 Kg/cm^2) justo después de generarlo con el fin de evitar pérdidas.

3.2.1.3.3. GENERADORES DE OZONO

El ozono puede ser producido por tres métodos:

- Fotoquímico.
- Electrólisis de ácido sulfúrico.
- Corona de descarga.

- Fotoquímico. Se basa en la ionización de aire o del oxígeno con luz ultravioleta. Es muy económico y se utiliza para tratar pequeñas cantidades de agua que no demanden mucho ozono con el fin de desinfectar y evitar malos olores. Consume gran cantidad de energía y su eficiencia depende de la humedad del aire y la durabilidad de la lámpara. Su desventaja es la baja concentración de ozono que produce

(0.5% en peso) pues éste se forma en una longitud de onda de 185 nm y se destruye a 254 nm; longitudes de onda que desafortunadamente, coexisten en el sistema.

- **Electrólisis del ácido sulfúrico.** La producción sintética del ozono fue descubierta por Schönbein en 1840. el principio es muy simple y tiene muchas ventajas, como son el uso de corriente directa de bajo voltaje, el no necesitar gas de alimentación, el reducido tamaño del equipo y generar altas concentraciones de ozono. Sin embargo, presenta corrosión, erosión e incrustaciones en los electrodos, requiere electrolitos especiales o agua con baja conductividad y, si existen iones de cloruro en el agua, genera cloro libre, lo que afecta considerablemente la producción de ozono y disminuye el rendimiento. Se emplea únicamente en pequeñas plantas.
- **Corona de descarga.** Consiste en hacer pasar una corriente de aire u oxígeno libre de humedad a través de una descarga eléctrica producida al aplicar un alto voltaje entre dos electrodos con un dieléctrico para distribuir la carga. Tiene la desventaja de que solo el 10% de la energía suministrada es usada, y el resto se pierde como luz, calor y sonido.

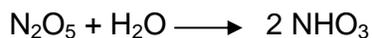
3.2.1.3.3.1. POR CORONA DE DESCARGA

Actualmente, es el método más usado para producir ozono en grandes cantidades. En la mayoría de las instalaciones, el ozono es producido eléctricamente a partir de aire o aire enriquecido con oxígeno. En ambos casos, el aire debe estar libre de partículas y humedad. El equipo de generación de ozono esta formado por:

- Sistema para preparar gas de alimentación
- Generador de ozono
- Cámara de contacto y sistema de distribución
- Sistema para destruir el ozono residual.

Preparación del gas de alimentación.

Esta actividad es fundamental pues afecta el rendimiento de producción. Durante la descarga eléctrica, el N₂ del aire se oxida y forma N₂O₅, el cual si hay agua en el ambiente se hidroliza y forma ácido nítrico.



Este último es altamente corrosivo por lo que el aire debe ser previamente secado.

La calidad y la concentración del ozono producido dependen directamente del secado del aire de alimentación. Los proveedores recomiendan que esta operación se realice a por lo menos -60 °C para evitar que el agua se condense.

El sistema de secado consiste, generalmente, en dos columnas en paralelo que trabajan de forma alternada pues se regenera cada una cada 96 horas. Se recomienda, que las columnas estén aisladas para conservar energía y rellenas con cualquiera de los materiales de la **TABLA 3.3**. La sílica gel es el mejor de ellos.

TABLA 3.3 MEDIOS DESECANTES

<i>MEDIO</i>	<i>CARACTERÍSTICAS</i>				
	<i>Densidad (Kg/m³)</i>	<i>Temperatura de regeneración (°C)</i>	<i>Área superficial (m²/g)</i>	<i>Gravedad específica aparente</i>	<i>Forma</i>
Sílica gel	609 a 721	149-232	650	1.2	Granular
Alúmina activada	721 a 801	177-260	325	1.6	Cuentas
Silicato de aluminio	480 a 721	480-721	-	1.1	Píldoras metálicas cristalinas

Por ello, los sistemas de preparación incluyen compresor, enfriador, secador y filtro de partículas. El sistema de compresión está relacionado con la producción diaria de ozono, la presión de descarga y el tipo de operación (de volumen constante o variable).

La cantidad de ozono generado en Kg/h depende del gasto de aire alimentado su calidad (seco y libre de impurezas). Estos parámetros son de mayor importancia que la variación de voltaje o amperaje. En especial, la pureza del aire importa, pues la presencia de hidrocarburos a concentraciones mayores al 1% en volumen inhiben la formación de ozono.

3.2.1.4. COAGULACIÓN -FLOCULACIÓN

La Coagulación y Floculación son dos procesos dentro de la etapa de clarificación del agua. Ambos procesos se pueden resumir como una etapa en la cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas llamadas flocs tal que su peso específico supere a la del agua y puedan precipitar.

La coagulación se refiere al proceso de desestabilización de las partículas coloidales suspendidas de modo que se reduzcan las fuerzas de separación entre ellas.

La floculación tiene relación con los fenómenos de transporte dentro del líquido para que las partículas hagan contacto. Esto implica la formación de puentes químicos entre partículas de modo que se forme una malla de coágulos, la cual sería tridimensional y porosa. Así se formaría, mediante el crecimiento de partículas coaguladas, un flóculo suficientemente grande y pesado como para sedimentar.

El término coágulo se refiere a las reacciones que suceden al agregar un reactivo químico (coagulante) en agua, originando productos insolubles. La coagulación comienza al agregar el coagulante al agua y dura fracciones de segundo.

3.2.1.4.1. LOS COLOIDES

La clave para una adecuada coagulación y floculación es el entendimiento de cómo los coloides individuales interactúan unos con otros. Las partículas que causan turbidez en el agua se encuentran en un rango de tamaños que va de

0.01 a 100 micras. Las fracciones más grandes son las más fáciles de sedimentar y filtrar, mientras que las más pequeñas, las partículas coloidales, (que van de 0.01 a 5 micras), representan un verdadero reto. Sus tiempos de sedimentación son inacatablemente altos y pueden escapar fácilmente a una filtración convencional.

El comportamiento de los coloides en el agua esta fuertemente influenciado por su carga electrocinética. Cada partícula coloidal tiene su propia carga, la cual en la naturaleza es usualmente negativa. El que estas partículas tengan el mismo tipo de carga genera una repulsión de la partículas adyacentes y no permite por lo tanto una adecuada aglomeración y floculación. Como resultado, los coloides con carga permanecen dispersos y en suspensión.

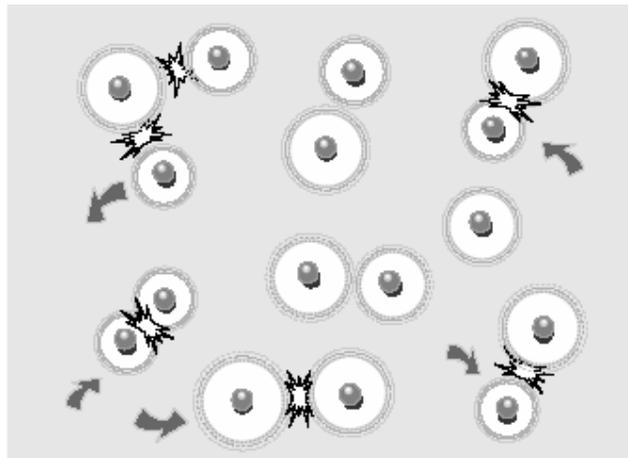


FIGURA 3.1. PARTÍCULAS COLOIDALES CON LA MISMA CARGA ELECTROKINÉTICA

Por otro lado, si la carga fuera significativamente reducida o eliminada, entonces las partículas coloidales podrían unirse. En una primera etapa, formarían pequeños grupos, después grandes agregados para finalmente convertirse en un floculo sedimentable y que podrías filtrarse fácilmente.

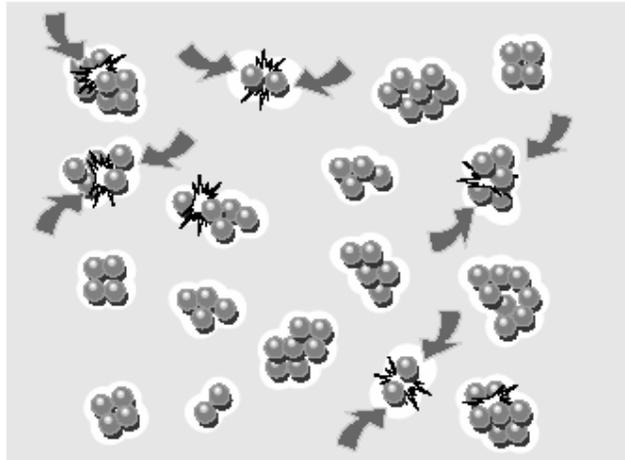


FIGURA 3.2. PARTÍCULAS COLOIDALES SIN CARGA FORMADO UN AGREGADO

Los coloides se pueden clasificar según varios aspectos. Pueden considerarse liofílicos si se estabilizan con capas de hidratación o bien liofóbicos si presentan repulsión por el solvente y por tanto son más inestables.

También pueden clasificarse según sea su duración en Caduco (cambian rápidamente) o Diuturno (larga duración). Del punto de vista de la química hay dos clases: orgánicos o inorgánicos. Según sea el tipo de aglomerado que conforman se clasifican en moleculares (polímeros) y en miscelares. Por último bajo un punto de vista de su forma, se puede decir que los cilíndricos son más propensos a aglutinarse que los esféricos o poliedricos.

Los coloides pueden estudiarse bajo una serie de propiedades. Las principales se presentan a continuación:

Propiedades cinéticas:

- **Movimiento Browniano:** movimiento constante e irregular de los coloides.
- **Difusión:** dispersión por alta energía cinética. Responde a la ley de Fick.
- **Presión Osmótica:** Presión hidrostática que iguala dos medios (agua y sistema coloidal). El paso de agua iguala las concentraciones en ambos medios separados por una membrana semipermeable.

Propiedades ópticas:

- **Dispersión de la luz (efecto de Tyndall – Faraday):** La dispersión de la luz es proporcional al tamaño de las partículas.
- **Opalescencia:** Las soluciones coloidales son incoloras generalmente. Sin embargo algunas pueden ser coloreadas. Esto depende de la diseminación de la luz y a la adsorción selectiva bajo cierta longitud de onda.

Propiedades de Superficie:

La superficie específica de los coloides en general es muy alta ya que las partículas son muy pequeñas. Esto permite que tengan una gran capacidad de adsorción de sustancias.

Propiedades electrocinéticas:

En este sentido se dice que los coloides en general tienen carga eléctrica y por tanto pueden ser afectados por campos eléctricos. Estas cargas pueden explicarse por la presencia de imperfecciones en la superficie de la estructura reticular. Puede también existir ionización y por tanto la superficie de los coloides puede ionizarse (los grupos funcionales probables de sufrir ionización son: -OH, -COOH, -OPO₃H₂ y -SH) y por último puede haber adsorción preferencial de iones en la superficie de los coloides o bien haber ligandos de coordinación. A bajos pH una carga positiva superficial prevalece. A altos pH prevalece la negativa y a pH intermedios podría haber un valor cero.

Estabilidad de los coloides:

Los coloides son normalmente estables en solución. En general priman los factores estabilizantes por sobre los desestabilizantes. Entre los factores estabilizantes se cuentan a todas las fuerzas o fenómenos que generan repulsión entre ellos y por tanto, las fuerzas electrostáticas y la hidratación son favorables. Las fuerzas de atracción, en cambio, cumplen un papel opuesto y desestabilizan. Entre ellas la gravedad, el movimiento Browniano y las fuerzas de Van der Waals. Obviamente algunos fenómenos afectan el sistema mucho más que otros. Por ejemplo la influencia de la gravedad es despreciable.

3.2.1.4.2. ANTECEDENTES IMPORTANTES SOBRE COAGULANTES

En general los coloides hidrofílicos requieren mayor cantidad de coagulante que los hidrofóbicos, que no reaccionan químicamente con el coagulante. Entre los coagulantes, el más usado es el sulfato de aluminio (o alumbre). Esta sustancia presenta las siguientes reacciones:

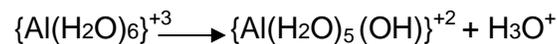


Esta reacción va disminuyendo su pH a medida que la reacción se lleva a cabo hasta un punto en que se detiene. Si el agua contiene bicarbonatos, el pH puede mantenerse relativamente constante, ya que estos actúan como amortiguadores. La reacción se puede ver a continuación:

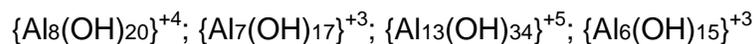


3.2.4.3. PRODUCTOS DE LA HIDRÓLISIS

Se pueden obtener producto de la hidrólisis iones hidratados con un pH inferior a 4 los que son del tipo: $\{\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6\}^{+3}$. También es posible generar monómeros y productos poliméricos con un pH entre 4 y 7. Los monómeros se forman según la reacción:



Los cuales son inestables. Estas reaccionan entre sí y forman las siguientes especies:



En cuanto a la velocidad de formación de las sustancias, el hidróxido de Aluminio se forma lentamente. Su importancia en el proceso es que genera un barrido al sedimentar. Los iones hidratados se forman muy rápido. Su efecto más importante es que comprimen y neutralizan la doble capa. Esto está muy ligado a lo que se explicó bajo la perspectiva de un modelo físico. Por su parte, las moléculas poliméricas se forman rápidamente y su efecto más importante

es la formación de puentes químicos haciendo adsorción de coloides, lo cual se explicó bajo un enfoque químico. Una agitación lenta favorece este proceso.

La impureza liofoba es más fácil de precipitar que una liofílica. En cuanto al número de impurezas se obtiene una mejor coagulación con un número mayor de impurezas.

Respecto al tipo de coagulante se pueden encontrar además de las sales de aluminio, las de hierro y los polielectrolitos. En general los coagulantes con mayor valencia actúan mejor debido a su mayor capacidad de intercambio de carga. El Al^{+3} es muy efectivo. Según el tipo de agua que se tenga es tipo de mecanismo de coagulación que más influye. En aguas poco turbias, la coagulación es principalmente por hidróxidos metálicos. Su efecto es el del barrido. En aguas muy turbias en cambio se tiene gran participación también de los otros mecanismos y las relaciones de dosis de coagulante y coloides son prácticamente estequiométricas.

Otros coagulantes comerciales son el sulfato de aluminio, aluminato de sodio, sales de hierro, cloruro férrico y el sulfato ferroso. Los coagulantes metálicos se polimerizan en solución. Los polielectrolitos (poliacrilamida, alginate de sodio) son polímeros en sí. Actúan ambos de igual forma.

Respecto de la dosificación de los coagulantes está puede ser en seco o en solución. Si se desea dispersar los coagulantes es conveniente una mezcla rápida. Si lo que se desea es la aglutinación de partículas es adecuada una mezcla lenta. Los polielectrolitos pueden ser de tres tipos: no iónicos, aniónicos y catiónicos. En el primer grupo está el polivinil alcohol, las poliacrilamidas y el óxido de polietileno. En el segundo grupo se encuentra el sulfonato de poliestireno, la parcialmente ionizada poliacrilamida y el poliacrilato. En el tercer grupo se encuentra la polivinil piridina y la polietilenimina.

La dosis de coagulante tiene gran relación con el intervalo de pH sobre el cual se maneja la dosis y por supuesto según el nivel de turbidez. En general a mayor dosis, mayor es el rango de pH donde tiene efecto el coagulante El caso

de la turbidez marca un comportamiento parabólico respecto a pH. Sin embargo el valor óptimo de pH permanece casi constante.

3.2.1.4.4. FLOCULACIÓN Y TIPOS DE FLOCULADORES.

Teniendo en cuenta que la influencia y magnitud del efecto de cada uno de los factores que participan en la floculación no están aún definidas exactamente, es importante conocer el comportamiento del agua mediante ensayos de jarras o experiencias previas en las plantas de tratamiento.

En la floculación, una vez introducido y mezclado el coagulante, las partículas diminutas coaguladas son puestas en contacto una con otra y con las demás partículas presentes, mediante la agitación lenta prolongada, floculación durante la cual las partículas se aglomeran, incrementan su tamaño y adquieren mayor densidad. El floculador es, por lo tanto, un tanque con algún medio de mezcla suave y lenta, con un tiempo de retención relativamente prolongado

La mezcla lenta para floculación puede efectuarse mecánicamente, usando rotores de paletas, o hidráulicamente, como resultado del movimiento del agua.

Floculadores hidráulicos.

Los más comunes son los de flujo horizontal y los de flujo vertical. El floculador de flujo horizontal consiste en un tanque de concreto dividido por tabiques, baffles o pantallas de concreto u otro material adecuado, dispuestos en tal forma que el agua haga un recorrido de ida y vuelta alrededor de los extremos libres de los tabiques. En el floculador de flujo vertical, el agua fluye hacia arriba y hacia abajo por encima y por debajo de los tabiques, pantalla o baffles que dividen el tanque. En general, los floculadores hidráulicos, con una velocidad de flujo apropiada y con un número adecuado de baffles para asegurar suficientes curvas, proveen una floculación efectiva.

En la práctica los floculadores hidráulicos de flujo horizontal se usan para plantas pequeñas, con caudales menores de 50 LPS; los de flujo vertical, que se construyen más profundos (2-3 m), para plantas grandes.

En comparación con los floculadores mecánicos, se pueden señalar como desventajas de los floculadores hidráulicos la alta pérdida de carga (30-150 cm) y la poca flexibilidad de control en el grado de mezcla para caudales variables. Entre las ventajas se hace notar la inexistencia de equipamiento mecánico y el mantenimiento mínimo.

Floculadores mecánicos

En este tipo de floculadores, se introduce potencia al agua para asegurar una mezcla lenta mediante agitadores mecánicos. El tipo de agitador mecánico más usado es el de paletas, ya sean de eje horizontal o vertical, los cuales imparte un movimiento rotatorio al agua así como cierta turbulencia interna. También existen impulsores de turbina y de flujo axial. Como el grado de mezcla óptimo es variable, según la calidad del agua, se recomienda que el equipo agitador mecánico sea de velocidad variable.

3.2.1.4.5. CONSIDERACIONES DE DISEÑO

La agitación del agua mediante la mezcla hidráulica o mecánica produce gradientes de velocidad cuya intensidad controla el grado de floculación producido. El número de colisión entre partículas está directamente relacionado con el gradiente de velocidad. Se puede determinar la potencia introducida al agua, necesaria para obtener un grado particular de floculación, según un gradiente de velocidad específico. El periodo de floculación debe ser inmediato al de mezcla rápida; en algunas aguas, periodos largos tienden a aumentar la rotura del flóculo y producir características pobres de sedimentación; por el contrario, periodos cortos pueden ser suficientes para la formación completa del flóculo. Aunque la floculación no siempre es necesaria, por ejemplo en plantas de floculación por contacto, en donde el coagulante se aplica directamente a la entrada del agua a los filtros de lecho dual, se reconoce su importancia en aguas turbias y con color.

El flóculo puede romperse en puntos de agitación fuerte, como tuberías u otros tipos de flujo restringido, o en filtros donde la agitación sea suficiente para producir paso completo del flóculo a través de ellos. Por esta razón es conveniente poder cambiar la intensidad de la floculación para mejorar la resistencia del flóculo, así como modificar los caudales de tratamiento; aunque el método más común para incrementar la resistencia del flóculo es el de utilizar ayudas de coagulación, como la sílice activado y otros polielectrolitos.

Tanto en los floculadores hidráulicos como en los mecánicos se usa frecuentemente la floculación gradual; es decir que el grado de mezcla se reduce progresivamente, de tal manera que al final del periodo de floculación el esfuerzo cortante sobre el flóculo preformado sea mínimo y se facilite la formación de partículas más grandes con mejor sedimentabilidad.

3.2.1.5. HIDROCICLONES

La separación por sedimentación de partículas se da en la naturaleza en cualquier lago o estanque donde se introduce agua turbia. Las partículas se posan en el fondo, formando un sedimento que posee un grado de espesado en relación con la concentración de la alimentación, mientras que el agua sobrante es clarificada y eliminada como flujo superior.

Las balsas artificiales que realizan esta misma función son denominadas espesadores o clarificadores. Si el caudal de agua que atraviesa la balsa o estanque es tan grande que las partículas más finas no tienen suficiente tiempo para su sedimentación, éstas son evacuadas junto con el flujo superior, originándose una clasificación en dos fracciones: gruesa y fina. Este tipo de clasificación en húmedo se llama clasificación por corriente; la fuerza que genera este tipo de separación es la gravedad.

Los mismos fenómenos ocurren en una suspensión en rotación, donde fuerzas centrífugas mucho mayores producen los efectos de separación por aumento del grado de sedimentación. Los equipos que se emplean normalmente para

este propósito, son las centrífugas con camisa rígida, y los hidrociclones pueden ser considerados como una centrífuga de camisa rígida, en la cual ésta permanece fija, mientras que la rotación de la suspensión es producida por la propia alimentación al ciclón tangencialmente ya presión.

Dependiendo del grado de recuperación de sólidos deseado en el flujo inferior, el hidrociclón puede actuar como clarificador o clasificador. Los rechazos son espesados en cualquier caso.

3.2.1.5.1. ASPECTOS TEÓRICOS

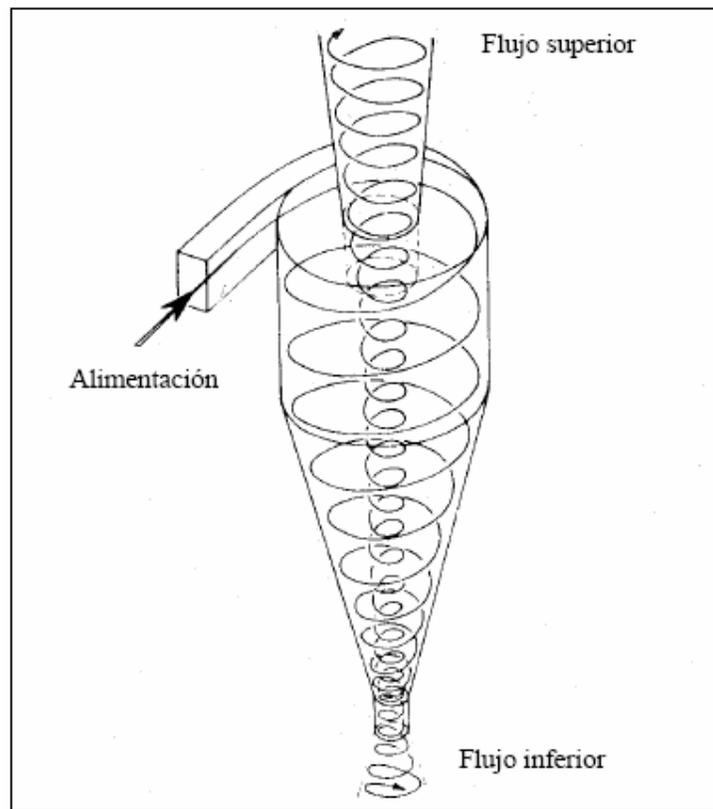


FIGURA 3.3. DIAGRAMA DE FLUJO EN UN HIDROCIKLÓN

La **FIGURA 3.3** demuestra, esquemáticamente, el trabajo de un hidrociclón. La suspensión de alimentación forma un torbellino primario a lo largo de la superficie interior de la pared de las partes cilíndrica y cónica, dirigiéndose al exterior a través del vértice cónico. Al ser éste estrecho, solamente una parte de la corriente es evacuada como flujo inferior (underflow), transportando las partículas gruesas o inclusive todos los sólidos con ella. La mayoría del líquido

(que ha sido limpiado por la sedimentación de los sólidos en el torbellino primario, o bien que transporta las partículas finas sobrantes con él), es forzado a abandonar el ciclón a través de la tobera del flujo superior (overflow) formando un torbellino secundario ascendente alrededor del núcleo de la carcasa. En el interior del núcleo se crea una depresión, que recoge todo el aire que ha sido transportado como burbujas o disuelto en el agua de alimentación. También el vapor creará esta visible columna central de aire. Debido al incremento de la velocidad tangencial en el torbellino secundario, las altas fuerzas centrífugas generadas traen consigo una eficientísima separación secundaria. Las partículas finas rechazadas sedimentan radialmente y se unen al torbellino primario; la mayoría de estas partículas son evacuadas finalmente a través de la boquilla formada por el vértice del cono. Por consiguiente, la separación dentro de un hidrociclón tiene lugar como resultado de estos dos procesos, y el punto de corte final será determinado principalmente por la aceleración centrífuga del torbellino secundario interior.

Se supone que las partículas en un hidrociclón alcanzan rápidamente sus velocidades terminales. La separación de sólidos y fluidos en un hidrociclón generalmente envuelve tamaños de partículas suficientemente pequeñas para poder suponer válida la ley de Stokes, respectiva a la velocidad del fluido.

Teóricamente podemos calcular el tamaño de la partícula menor que puede ser retenida por el hidrociclón; sin embargo, la experiencia indica que la aglomeración de partículas tiende a introducir desviaciones de estos cálculos. Si se diseña un hidrociclón para separar un tamaño definido de partículas, la eficiencia del mismo puede definirse como la fracción de masa de las partículas de ese tamaño que se separan en el hidrociclón. La eficiencia de un hidrociclón aumenta conforme crece el tamaño de las partículas.

Generalmente los ciclones se diseñan para operar con una caída de presión especificada. La caída de presión a través de los ciclones, puede ser entre 1 y 20 veces la carga de velocidad de entrada.

A través del uso de hidrociclones hechos con plástico, varios investigadores han estudiado los efectos del tamaño, la forma y la velocidad del fluido. Las dimensiones significativas de un hidrociclón son la altura, el diámetro, el diámetro del ducto de salida y la relación entre los diámetros del cilindro y del ducto de salida.

3.2.1.5.2. APLICACIONES DE LOS HIDROCICLONES

A continuación se enlistan algunas de las aplicaciones más comunes para los equipos arriba mencionados.

1) Espesado

Esta denominación se refiere a la eliminación de la mayor cantidad de agua para producir un escurrido de los sólidos. El verdadero espesado apunta a la recuperación de todos los sólidos, resultando una clarificación del líquido.

2) Deslamado

Esta denominación se refiere a la eliminación de la mayor cantidad de agua para producir un escurrido de los sólidos. El verdadero espesado apunta a la recuperación de todos los sólidos, resultando una clarificación del líquido.

3) Refinado

En el refinado, el flujo superior es el producto final y pequeñas cantidades de partículas superiores al tamaño deseado son evacuadas con el flujo inferior.

4) Circuitos cerrados de molienda

Los ciclones de deslamado y refinado se usan a menudo juntos con procesos de molienda. Ambos flujos superiores son entonces "producto" y los flujos inferiores son introducidos en el molino.

5) Clasificación selectiva

La separación de una alimentación heterogénea en sus componentes minerales puede basarse en las diferentes características de los minerales: por ejemplo: el peso específico (separación por medios densos, mesas, espirales); forma de partículas (mesas, espirales); tensión superficial (flotación);

propiedades eléctricas y magnéticas (separadores); solubilidad (proceso de lixiviación); y otras. Algunas veces, tan sólo la diferencia en el tamaño del grano permite la separación por un simple proceso mecánico.

6) Recuperación de sólidos

Los equipos de lavado y escurrido, a menudo, generan efluentes turbios (flujos superiores o filtrados) que transportan con ellos fracciones finas, las cuales causan pérdidas de producto. La recuperación de estas fracciones finas de: tornillos lavadores de arenas, desenlodadores, escurridores, cribas, escurridoras centrífugas, es una aplicación atractiva para los hidrociclones.

7) Fraccionamiento

Otra aplicación interesante en el tratamiento por hidrociclones, es la clasificación en dos fracciones para un tratamiento posterior en diferentes procesos. Un ejemplo típico, es el fraccionado de un concentrado de hierro para alimentación sinter (gruesos) y pellet (finos).

8) Pre-concentración

Si hay grandes diferencias en el peso específico de los componentes minerales, el producto bruto puede ser enriquecido en hidrociclones. Esto es un proceso de concentración por gravedad, o quizás, mejor dicho, un proceso de concentración centrífuga. En estos hidrociclones no se usan medios densos. Un ejemplo típico es la separación de componentes pesados, tales como sulfuros metálicos (pirita, blenda), óxidos metálicos, metales preciosos (plata, platino), etc., de gangas. Los ciclones para esta operación difieren de los tipos normales, ya que su fondo plano y su larga parte cilíndrica se han proyectado para aumentar la eficacia.

9) Recuperación de líquido

Si las aguas de procesos o soluciones madres deben reciclarse, con hidrociclones puede obtenerse a menudo una clarificación satisfactoria. En las plantas de lavado de carbón, este es uno de los problemas más importantes, especialmente cuando los espesadores existentes están sobrecargados; en estos casos, los hidrociclones se instalan frecuentemente en paralelo para

mantener el nivel de turbiedad del agua de reciclado dentro de valores admisibles.

10) Lavado a contracorriente

La eliminación de ácidos adherentes, lejías o partículas finas de un producto en particular, es realizada por diluciones y espesados periódicos en etapas múltiples de ciclones.

3.2.6. FILTRACIÓN A PRESIÓN CON LECHO DE ARENA

La filtración es un proceso fisicoquímico que permite la separación de la fase líquida de la fase sólida (sólidos suspendidos) que se genera por la acción oxidante del aire y el ozono así como los flóculos, por medio de un material poroso.

Entre otros aspectos la filtración:

- Remueve partículas y material coloidal no sedimentable.
- Incrementa la remoción de sólidos suspendidos, turbiedad, DQO, metales pesados, bacterias, virus y otras sustancias.
- Mejora la eficiencia y reduce el costo del proceso de desinfección a través de la remoción de materia suspendida.
- Asegura una calidad constante hacia el proceso de desinfección.

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.

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/ft² 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/ft².

Actualmente, se utiliza el filtro rápido o americano. La velocidad de filtración por este tipo de filtros es de 3 gpm/pie² para uso municipal se diseñan con 2 gpm/pie². 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.

Los filtros de presión se fabrican en el tipo vertical y horizontal como se puede apreciar en la **FIGURA 3.4**. 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 por la presión de un bombeo. Los filtros a presión están equipados con los accesorios necesarios para llevar a efecto las siguientes operaciones.

1. Filtración.
2. Retrolavado
3. Enjuague

Los filtros verticales varían de 30 cm a 3 m de diámetro, y tienen velocidades de filtración de 2 a 10 gpm/pie² 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.

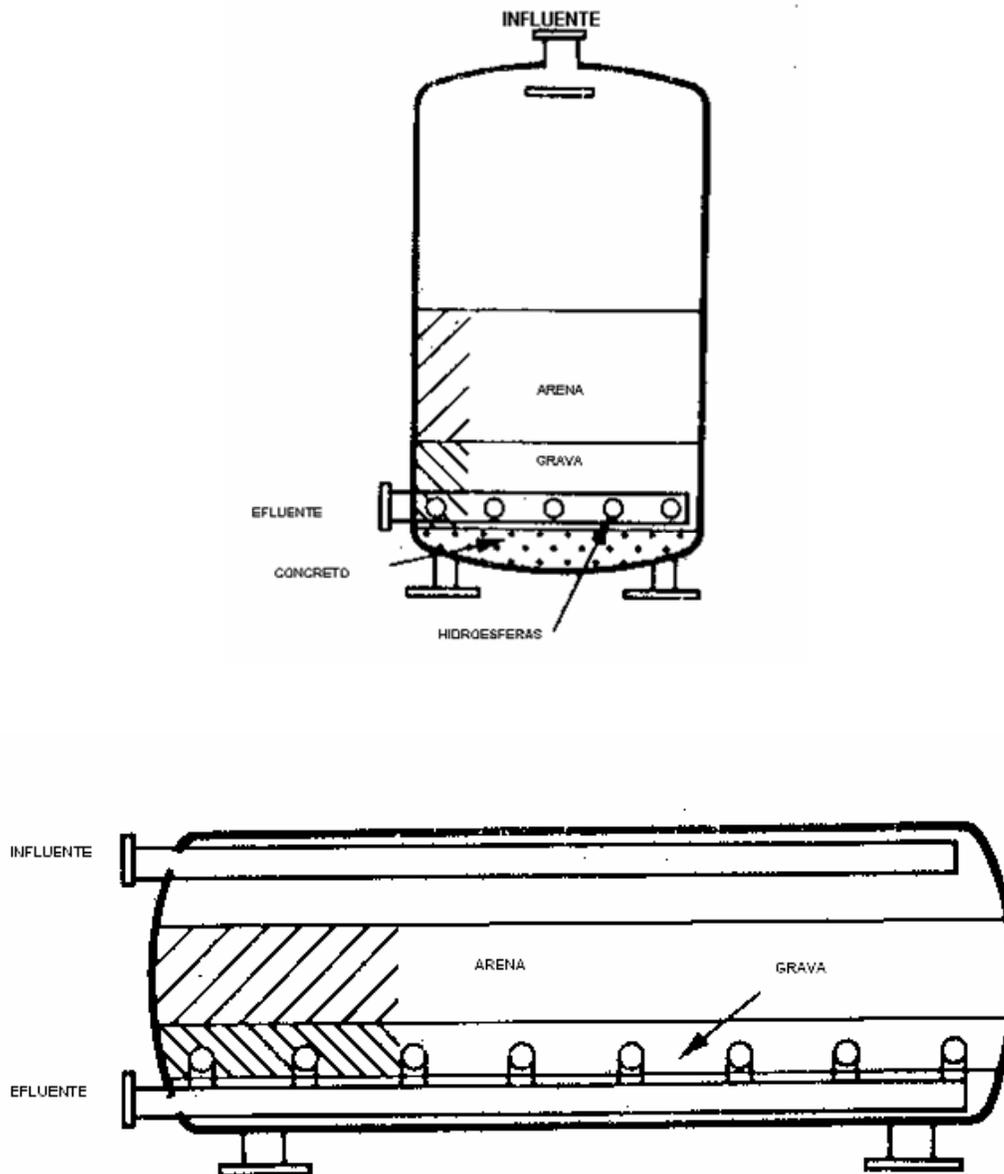


FIGURA 3.4. FILTROS A PRESIÓN: TIPO VERTICAL Y HORIZONTAL

Dependiendo de los requerimientos, las instalaciones pueden contar con una o más unidades. La **TABLA 3.5** enlista las capacidades, a 3 gpm/pie² de unidades simples y baterías de 2 a 6 unidades de filtros verticales de 75 cm a 3 m. de diámetro. La **TABLA 3.6** 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 3.5. FILTROS VERTICALES: ÁREAS, RETROLAVADO Y VELOCIDADES DE FILTRACIÓN DE UNIDADES SIMPLES Y BATERÍAS DE 2 A 6 UNIDADES, CON UNA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN DE 3 GPM/PIE²

<i>Diámetro plg</i>	<i>UNIDADES SIMPLES</i>			<i>FLUJO TOTAL POR BATERÍA (GPM)</i>				
	<i>Área (pies²)</i>	<i>Retrola vado (gpm)</i>	<i>Flujo (gpm)</i>	<i>2 unidades</i>	<i>3 unidades</i>	<i>4 unidades</i>	<i>5 unidades</i>	<i>6 unidades</i>
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 3.6. FILTROS HORIZONTALES: ÁREAS, RETROLAVADO Y VELOCIDADES DE FILTRACIÓN DE UNIDADES SIMPLES Y BATERÍAS DE 2 A 6 UNIDADES, DE 2.5 M DE DIÁMETRO A UNA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN DE 3 GPM/PIE²

Longitud	UNIDADES SIMPLES			FLUJO TOTAL POR BATERÍA (GPM)				
	Área (pies ²)	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

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.

3.2.1.6.1. OPERACIÓN DE LOS FILTROS.

Cuando un filtro se pone en operación, 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/pie² de área de filtración, es buena práctica no exceder este límite excepto en períodos 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/plg², y raramente se continúan operando más allá de las 8 lb/plg². El flujo mínimo para retrolavar un filtro de presión son 10 gpm/pie² 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 3.7**, estas variables permiten:

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

TABLA 3.7. VARIABLES GENERALES DE OPERACIÓN Y DISEÑO

<ol style="list-style-type: none">1. Tamaño del medio filtrante, densidad y composición2. Porosidad3. Pérdida de carga producida por el lecho limpio4. Profundidad del medio filtrante5. Tasa de filtración6. Pérdida de carga permisible7. Características del influente<ol style="list-style-type: none">a).- Concentración de sólidos suspendidosb).- Distribución y tamaño del flóculoc).- Estabilidad del flóculod).- Carga eléctrica del flóculo

3.2.1.6.2. 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 3.8** se muestran granulometrías típicas de arena y antracita para filtros duales y en la **TABLA 3.9** resume algunas de las principales características de los filtros más utilizados en el tratamiento de agua potable.

TABLA 3.8. FILTRO TIPO DE MEDIO DUAL

CARACTERÍSTICA	INTERVALO TÍPICO	VALOR
ANTRACITA		
Profundidad, cm	20-60	46
TE, mm	0.8-2.0	1.2
CU	1.4-1.8	1.5
ARENA		
Profundidad, cm	25-60	30
TE, mm	0.3-0.8	0.5
CU	1.2-1.6	1.4
Tasa de filtración, m/d	120-600	350

TABLA 3.9. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE FILTROS

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

3.2.1.6.3. 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 3.5.**). Para las aplicaciones industriales generalmente se operan a 3 gpm/pie^2 ; en la práctica municipal se emplea una velocidad de filtración de 2 gpm/pie^2 .

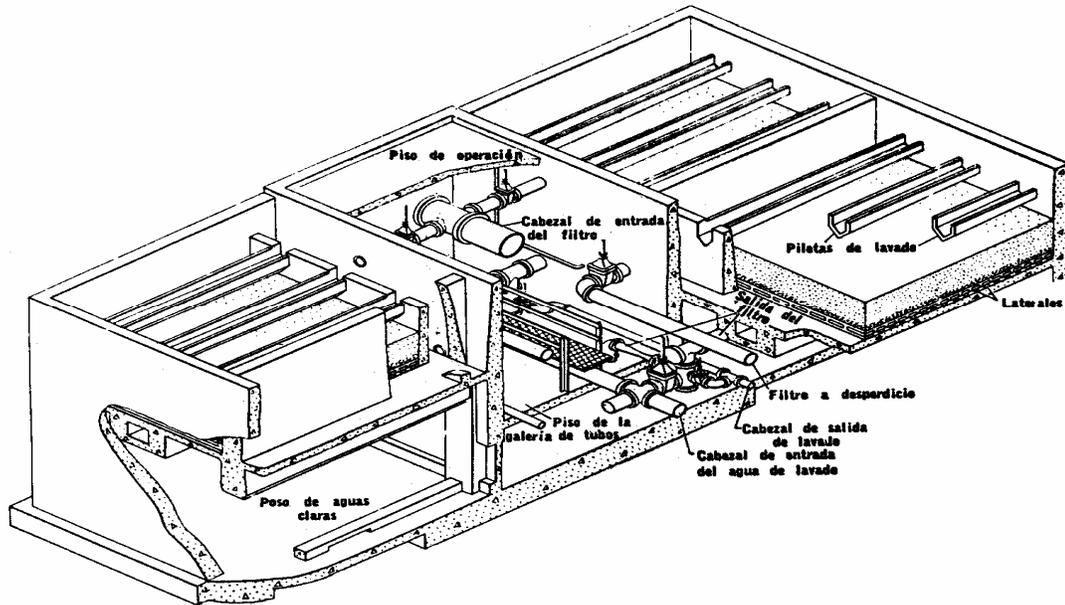


FIGURA 3.5. FILTRO DE GRAVEDAD DE ACCIÓN RÁPIDA

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 3.10** se incluyen tamaños de filtros para plantas de filtración por gravedad, basados en flujos de 2 y 3 gpm/pie^2 .

TABLA 3.10. TAMAÑOS DE FILTROS DE GRAVEDAD CON UNA VELOCIDAD DE FILTRACIÓN DE 2 GPM/PIE² Y 3 GPM/PIE²

CAPACIDAD DE LA PLANTA		DATOS GENERALES				
(gpm)	(mgd)	Número de filtros	Tamaño	Área (pie ²)	Velocidad de filt.(gpm/pie ²)	Retrolavado (gpm)
2 gpm/pie²						
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/pie²						
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

Dadas las características de los sólidos suspendidos que se eliminarán, la filtración que se utilizará para la planta será del tipo a presión. En esta modalidad, el medio poroso se encontrará confinado en un tanque metálico cerrado con tapas toriesféricas, donde la fuerza impulsora necesaria es ejercida por la acción de un bombeo. La selección del tamaño efectivo del

medio poroso y su altura dependerá de la velocidad de filtración o carga hidráulica superficial (CHS), de la pérdida de carga hidrostática (ΔP) y el tamaño de la partícula que será filtrada.

3.2.1.7. 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. 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.

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:

- 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.

Los mecanismos de separación del agua y de las sales por osmosis inversa es un tema que aún no está del todo comprendido. Actualmente los científicos sugieren dos modelos de transporte: porosidad y difusión. Esto es, el transporte del agua a través de la membrana puede ser por medio de los poros físicos presentes en la membrana (porosidad), o por difusión de un lugar a otro dentro de la membrana. Esta teoría sugiere que la naturaleza química de la membrana es tal que dejará pasar agua preferencialmente para disolver las sales en una interfase sólido/líquido.

3.2.1.7.1. 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 3.11**, presenta las presiones osmóticas de algunas soluciones típicas.

TABLA 3.11. PRESIONES OSMÓTICAS TÍPICAS

COMPUESTO	CONCENTRACIÓN		PRESIÓN OSMÓTICA (ATM. A 25°C)
	mg/litro	moles/litro	
NaCl	35000	0.6	27.07
NaCl	1000	0.0171	0.77
Na HCO ₃	1000	0.0119	0.87
Na ₂ SO ₄	1000	0.00705	0.41
Mg SO ₄	1000	0.00831	0.24
Mg Cl ₂	1000	0.0105	0.66
Ca Cl ₂	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, π^o , varía con la concentración y temperatura de la misma forma que la presión de un gas ideal. Por ejemplo, para el agua;

$$\pi^o = \frac{nRT}{V}$$

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, π^o 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, ϕ_c ,

$$\pi^o = \Phi_c \frac{nRT}{V}$$

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

3.2.1.7.2. CARACTERÍSTICAS 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 3.6**). 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.

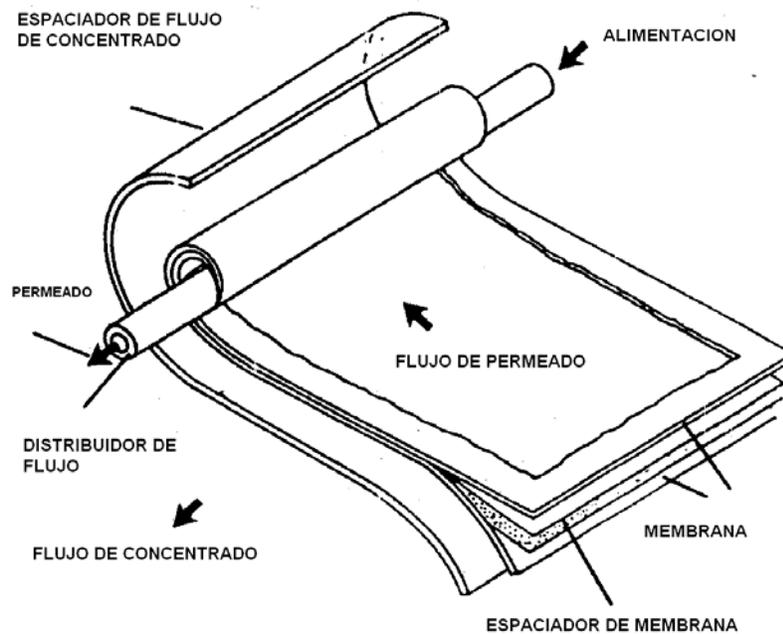


FIGURA 3.6. ESQUEMA DE UNA MEMBRANA

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 3.12**).

TABLA 3.12. CARACTERÍSTICAS DE LOS PROCESOS DE MEMBRANA

	OSMOSIS INVERSA	NANOFILTRACION.	ULTRAFILTRACION	MICROFILTRACION
Membranas	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica	Asimétrica Simétrica
Grueso Capa superficial	150 m 1 m	150 m 1 m	150 – 250 m 1 m	10 – 150 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

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.

3.2.1.7.3. 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 3.7.**).

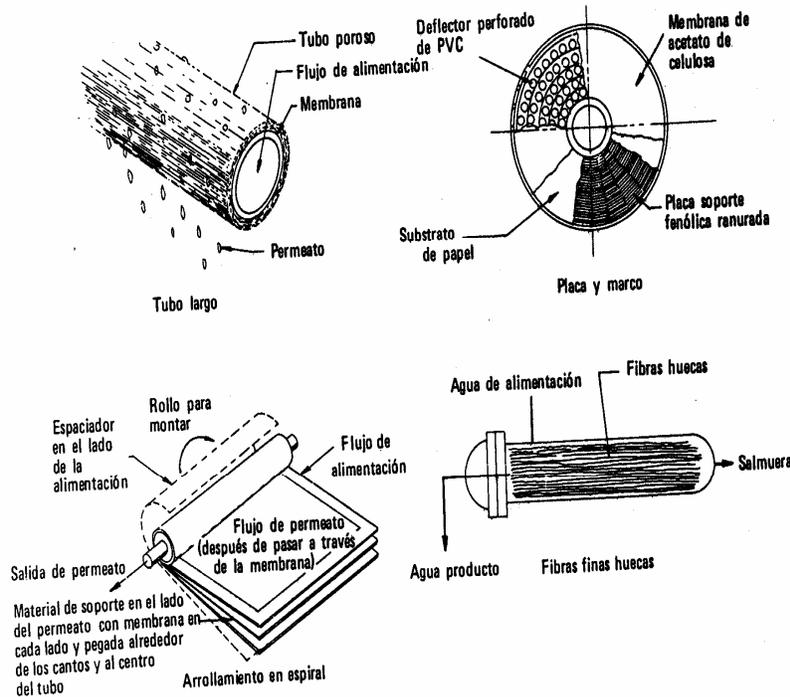


FIGURA 3.7. DISEÑO DE MÓDULOS DE OSMOSIS INVERSA.

Más del 60% de los sistemas instalados en el mundo trabajan con elementos en espiral (**FIGURAS 3.8 Y 3.9**), 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.

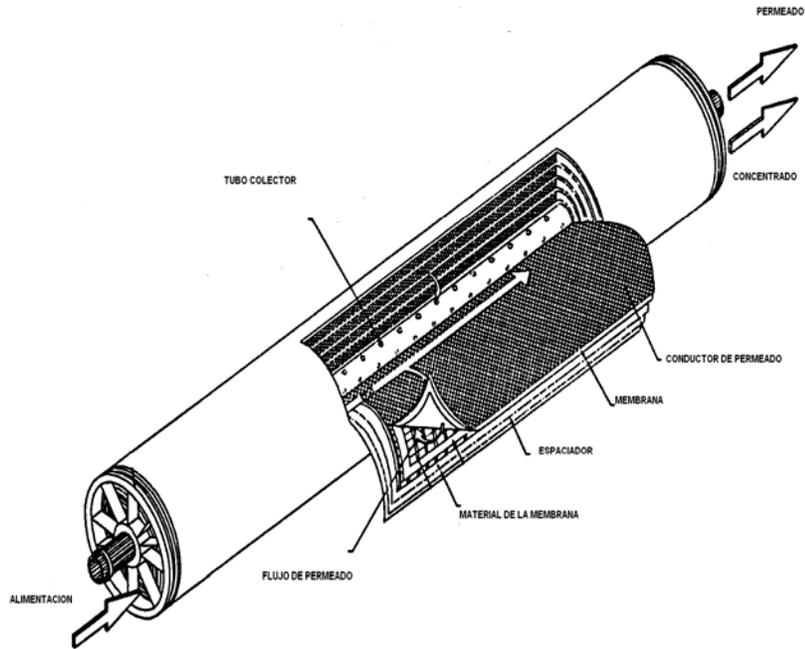


FIGURA 3.8. ELEMENTO EN ESPIRAL (SPIRAL WOUND)

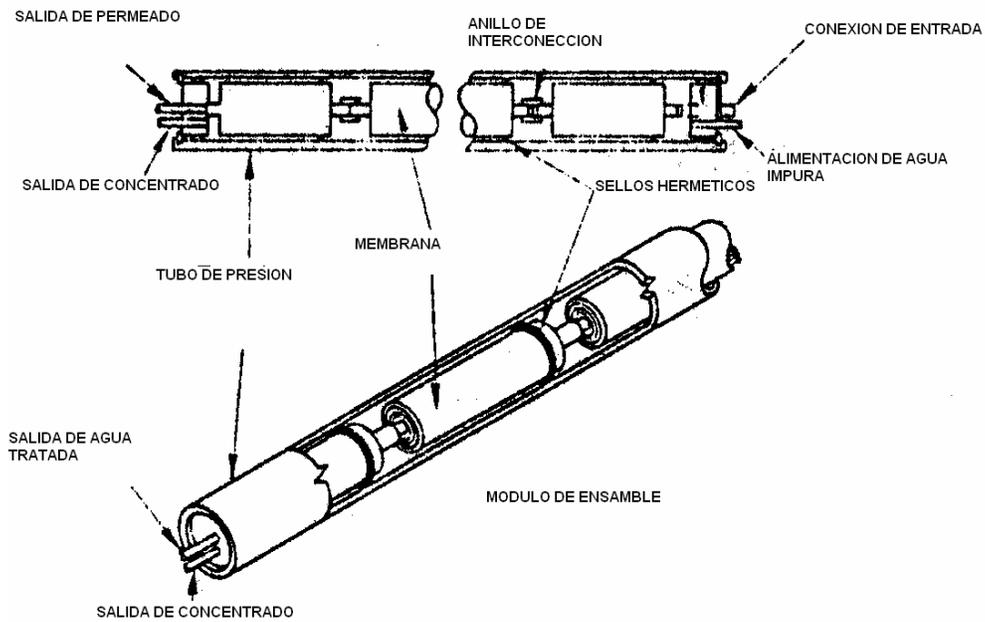


FIGURA 3.9. DISPOSICIÓN EN SERIE DENTRO DE UN TUBO DE PRESIÓN

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

3.2.1.7.4. 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:

$$Ri^o = \frac{Cic - Cip}{Cic}$$

Donde:

Cic = concentración de las especies i en la corriente de concentrado.

Cip = concentración de i en el permeado o producto

La capacidad de una membrana para rechazar sales disminuye con el tiempo de operación. 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

3.2.1.7.5. 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

3.2.1.7.6. 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:

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

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.

3.2.1.7.7. 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 anti-incrustante.

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.

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 agentes anti-incrustantes. 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, y una desinfección si queremos utilizarla como agua potable.

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.

3.2.1.8. DESINFECCIÓN.

En todo el mundo, el mecanismo de desinfección más aplicado en los sistemas de abastecimiento de agua es el que emplea el cloro y sus compuestos derivados como agentes desinfectantes. Fue introducido masivamente a principios del siglo XX y constituyó una revolución tecnológica, que complementó el proceso de filtración que ya era conocido y utilizado para el tratamiento del agua. La cloración incrementó en 50% la esperanza de vida de los países desarrollados.

La clave de su éxito es su accesibilidad en casi todos los países del mundo, su razonable costo, su alta capacidad oxidante, que es el mecanismo de destrucción de la materia orgánica, y su efecto residual. Todo ello permite en forma bastante simple, asegurar la inocuidad del agua desde que se produce hasta el momento que se usa, lo que resulta muy beneficioso, tanto en sistemas pequeños como en grandes ciudades con redes de distribución extendidas.

Aunque el cloro y sus derivados no son los desinfectantes perfectos, muestran las siguientes características que los hacen sumamente valiosos:

- Tienen una acción germicida de espectro amplio.

- Muestran una buena persistencia en los sistemas de distribución de agua, pues presentan propiedades residuales que pueden medirse fácilmente y vigilarse en las redes después que el agua ha sido tratada o entregada a los usuarios.
- El equipo para la dosificación es sencillo, confiable y de bajo costo. Además, para las pequeñas comunidades hay dosificadores de “tecnología apropiada” que son fáciles de usar por los operadores locales.
- El cloro y sus derivados se consiguen fácilmente, aun en lugares remotos de los países en desarrollo.
- Es económico y eficaz en relación con sus costos.

Los productos de la familia del cloro disponibles en el mercado para realizar la desinfección del agua son:

- Cloro gaseoso
- Cal clorada
- Hipoclorito de sodio
- Hipoclorito de calcio.

Para elegir cuál de estos productos se ha de emplear, así como el mecanismo para suministrarlo, el(los) responsable(s) de esta selección deberá(n) basar su decisión en la respuesta a las siguientes interrogantes:

- ¿Qué cantidad de desinfectante se necesita?
- ¿Cuáles son las posibilidades de abastecimiento del producto?
- ¿Con qué capacidad técnica se cuenta para el uso, la operación y mantenimiento de los equipos?
- ¿Existen los recursos necesarios para evitar que los trabajadores estén expuestos a riesgos a la salud durante el almacenamiento y manipuleo?
- ¿Se dispone de la capacidad económica y financiera para asumir los costos de inversión, operación y mantenimiento?

Para responder estas preguntas será necesario realizar un diagnóstico de las condiciones técnicas, económicas y sociales de la localidad.

La cantidad necesaria de desinfectante está en función del caudal de agua a tratar, la dosis requerida según la calidad del agua y las normas de calidad de agua de bebida del país. Existe, sin embargo, una regla no escrita que establece un límite entre el uso de cloro gas y otras formas. Tal frontera la marca el caudal de 500 m³/día. El uso de cloro gas no es recomendable para caudales menores de 500 m³/día, lo que a una dotación de 100 litros por habitante por día, típica del medio rural, significa que el cloro gas solo es recomendable para poblaciones mayores de 5.000 habitantes.

El abastecimiento del producto es un factor que condiciona la selección del mismo, ya que en muchos casos las zonas rurales se encuentran alejadas de las ciudades y son de difícil acceso, lo cual podría sugerir la necesidad de emplear otro desinfectante o bien preparar hipoclorito de sodio en la localidad.

La capacidad técnica disponible debe ser considerada para la selección, ya que operar instalaciones de cloro gaseoso requiere personal capacitado y competente, lo que es difícil de encontrar y remunerar en zonas rurales. Así mismo, el acceso a energía eléctrica de manera continua y estable es requisito indispensable para el empleo de bombas.

Dado que el cloro gaseoso es extremadamente peligroso, es importante disponer de medios técnicos y personal capacitado para minimizar y controlar los riesgos inherentes a las instalaciones de este tipo, ya que una fuga no detectada y controlada a tiempo podría ocasionar serios accidentes que podían poner en peligro vidas humanas.

Por último, en lo que se refiere a los costos de la desinfección, se habrá de tener en cuenta las circunstancias, por ejemplo, podría convenir una solución más costosa si la fiabilidad, durabilidad, sencillez de la operación y disponibilidad de los repuestos y suministros fueran mejores que los del sistema menos costoso. Generalmente, conviene pagar un poco más si la inversión adicional asegura el éxito; a la larga puede que inclusive resulte más

económico. Dado que las concentraciones de cloro activo en los diferentes productos varían, el volumen requerido del mismo también variará, por lo que se deberán considerar los costos de transporte que serán distintos al ser distintos esos volúmenes. En todo caso, la salud debe ser la consideración principal al momento de seleccionar la alternativa más adecuada.

3.2.1.8.1. PROPIEDADES DE LOS PRODUCTOS DE CLORO Y DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO

Las variedades comerciales del cloro se obtienen por métodos diferentes y de ellos dependen la concentración de cloro activo, su presentación y estabilidad. En la **TABLA 3.13** se listan las principales propiedades de cada una de estas variedades en un cuadro comparativo.

TABLA 3.13. PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL CLORO Y SUS DERIVADOS

Nombre y fórmula	Nombre comercial o común	Características	% Cloro activo	Estabilidad en el tiempo	Seguridad	Envase usual
<i>Cloro gas</i> Cl_2	Cloro licuado Cloro gaseoso	Gas licuado a presión	99.5%	Muy buena.	Gas altamente tóxico	Cilindros de 40 a 70 kg. Recipientes de 1 a 5 toneladas
<i>Cal clorada</i> $CaO \cdot 2CaCl_2 \cdot 3H_2O$	Cal clorada, polvo blanqueador, hipoclorito de cal, cloruro de cal	Polvo blanco seco	15 a 35%	Media. Se deteriora rápidamente cuando se expone a temperatura alta, humedad y/o luz solar. Pérdida de 1% al mes.	Corrosivo	Latas de 1.5 kg Tambores de 45 - 135 kg Bolsas plásticas o de papel de 25 - 40 kg, otros.
<i>Hipoclorito de sodio</i> $NaClO$	Hipoclorito de sodio, blanqueador líquido, lejía, agua lavandina, agua sanitaria	Solución líquida amarillenta	1 a 15% como máximo. Concentraciones mayores a 10% son inestables.	Baja. Pérdida de 2-4% por mes; mayor si la temperatura excede los 30°C	Corrosivo	Diversos tamaños de botellas de plástico y vidrio, y garrafones
	Hipoclorito de sodio por electrólisis <i>in situ</i>	Solución líquida amarillenta	0.1 - 0.6 %	Baja	Oxidante	Cualquier volumen
<i>Hipoclorito de calcio</i> $Ca(ClO)_2 \cdot 4H_2O$	HTH, Perclorón	Polvo, gránulos y tabletas. Sólido blanco	Polvo: 20 - 35% Granulado: 65 - 70% Tabletas: 65 - 70%	Buena. Pérdida de 2 a 2.5% por año	Corrosivo. Inflamación posible al entrar en contacto con ciertos materiales ácidos.	Latas de 1.5 kg, tambores 45 - 135 kg, Baldes de plástico

“Cloro activo” significa el porcentaje en peso de cloro molecular que aporta un determinado compuesto en cualquier estado; lo que quiere decir que si una solución tiene 10% de cloro activo, ello se debe a que se han burbujeado 10 gramos de cloro gas en 100 ml de agua y que el gas se ha absorbido totalmente y sin pérdida en ella. La solución tiene entonces 10 g de cloro en 100 g de agua (ya que 100 ml son prácticamente 100 gramos) y de allí el “10%”. La palabra “activo” significa que ese cloro está listo para entrar en acción; está pronto y “esperando” para atacar la materia orgánica o cualquier otra sustancia que sea oxidable por él.

El método de desinfección con cloro y sus derivados se deberá implementar en tres pasos sucesivos, cada uno de los cuales variará, en mayor o menor grado, según el producto que se va a utilizar:

Paso 1: Evaluación de la cantidad de cloro que se va a dosificar en la red

Paso 2: Preparación de las soluciones de los productos no gaseosos

Paso 3: Calibración del dosificador.

Evaluación de la cantidad de cloro a dosificar en la red

La cantidad de cloro que se va a dosificar equivale a la demanda total de cloro (la cual está estrechamente ligada a la calidad química y microbiológica del agua) a la que debe adicionarse la cantidad de cloro residual esperada en el extremo de la red. Por tanto, antes de llevar a cabo el proceso de desinfección es conveniente realizar ensayos de consumo instantáneo de cloro. Este ensayo se denomina “ensayo de demanda de cloro”. (Ver **FIGURA 3.10**).

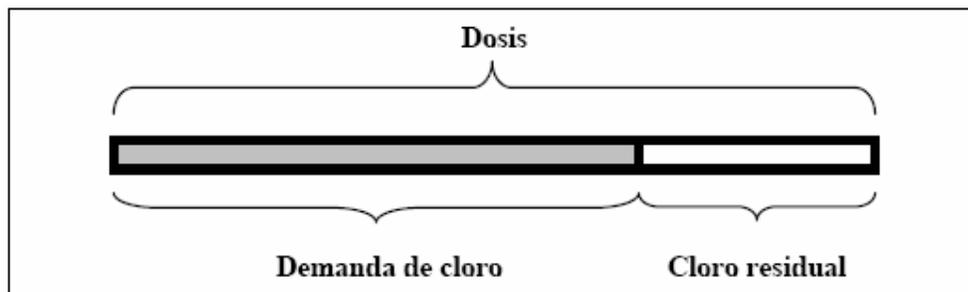


FIGURA 3.10. RELACIÓN DOSIS-DEMANDA-RESIDUAL

Si no se lleva a cabo la prueba de demanda y si la desinfección no reviste un carácter de urgencia (cloración preventiva), la cantidad de compuesto de cloro a introducir se puede regular mediante la aplicación directa de cantidades crecientes de cloro hasta obtener la concentración residual requerida en el extremo de la red. Se puede necesitar varios días hasta que la dosis se ajuste al valor ideal. Para este efecto, entre dosis sucesivas, debe transcurrir un intervalo de tiempo, en atención al tiempo que demora el agua desde el punto de aplicación del cloro hasta el extremo más alejado de la red.

En situaciones de emergencia, una primera estimación de la cantidad de cloro que se debe aplicar se puede calcular con un ensayo “rápido” de la demanda. Este método consiste en introducir cantidades crecientes de cloro (por ejemplo, entre 1 y 10 mg/l) en muestras del agua a tratar. Al final de 30 minutos se mide, en cada muestra, la concentración de cloro residual. La dosis de cloro se determina por la muestra que contiene la concentración de cloro residual más próxima a la pretendida. No obstante, cuando se inicia el proceso de desinfección y el agua es enviada a la red de distribución, es necesario hacer un ajuste posterior de las concentraciones debido a que siempre existe la posibilidad de contaminación por infiltración en la red o por otros factores.

Preparación de soluciones para productos no gaseosos

Cuando se emplea el cloro gaseoso, este se aplica directamente a través del dosificador. Lo mismo no ocurre cuando se trata de otros productos de cloro que se comercializan en forma de sólidos o se encuentran en concentraciones que no se adaptan a los requerimientos necesarios. En estos casos, se debe proceder a su disolución, de acuerdo con el mecanismo de dosificación del equipo que se va a emplear.

Las fórmulas que rigen la cantidad de agua de disolución requerida para obtener una solución de hipoclorito con una concentración de cloro activo que permita su fácil manejo y control por el dosificador, son las siguientes (**TABLA 3.14**):

TABLA 3.14. SOLUCIONES DESINFECTANTES CON HIPOCLORITOS

A PARTIR DE	HIPOCLORITO DE SODIO	HIPOCLORITO DE CALCIO
Descripción	Es comercializado en forma líquida en concentraciones variables de cloro activo, la presentación de 10% la más común.	Se comercializa en forma de sólido. El contenido de cloro activo es variable según su presentación, siendo la de 60% una de las más comunes.
Agua de disolución requerida	<p>Definida la concentración final de la solución de cloro (Cf) a ser empleada por el dosificador, se aplica la siguiente ecuación para obtener el volumen del agua de disolución (Vd) que será agregada a la solución matriz:</p> $Vd = (Co \cdot Vo / Cf) - Vo$ <p>Donde: Co = Concentración inicial de la sol. Matriz (g/L) Vo = Volumen de la sol. Matriz (L) Cf = Concentración esperada de la sol. Diluida (g/L)</p>	<p>Definida la concentración final (Cf) a ser empleada por el dosificador, se aplica la siguiente ecuación para obtener el volumen del agua de disolución (Vd) en litros que será agregada a la masa de hipoclorito de calcio sólido:</p> $Vd = \% \times P / Cf$ <p>Donde: % = Porcentaje de cloro activo en el producto P = Peso del sólido de hipoclorito de calcio (Kg) Cf = Concentración esperada en la sol. diluida (g/L)</p>
Ejemplo	<p>Se tienen 40 litros de una solución de hipoclorito de sodio al 10% (0.1) y se quiere preparar con ella otra solución de concentración 2% (0.02), ¿cuánta agua se debe agregar?</p> $Vd = \frac{0.1 \times 40}{0.02} - 40 = 160 \text{ L}$	<p>Si se dispone de 1,2 Kg de hipoclorito de calcio de concentración 60% (0,6) y se desea obtener una solución para dosificar de concentración 2% (0,02), ¿cuánta agua se deberá usar?</p> $Vd = \frac{0.6 \times 1.2}{0.02} = 36 \text{ L}$

Debe recordarse que la capacidad de los tanques de disolución (dos como mínimo) debe corresponder a un período de 24 horas de tal manera que facilite su operación. Asimismo, se debe asegurar la completa disolución del producto en el agua. El empleo de un agitador eléctrico puede facilitar tal tarea. Por otro lado, es común encontrar partículas o impurezas por lo que el dosificador deberá contar con un filtro que las retenga para evitar su obstrucción. Asimismo, la alcalinidad del hipoclorito de sodio concentrado precipita la dureza

del agua de dilución, lo cual también puede producir incrustaciones en los dosificadores y tuberías. Por ello se recomienda preparar la solución con 24 horas de anticipación, de tal manera que los precipitados tengan tiempo de sedimentar.

Calibración del dosificador

La calibración del dosificador para aplicar la cantidad óptima de producto depende de tres factores:

- Las características físicas del producto a emplear: gaseoso, líquido o sólido.
- La dosis de cloro necesaria para obtener la concentración de cloro residual esperada en el extremo de la red.
- El caudal de agua a desinfectar. En caso de que no sea factible controlar las variaciones de caudal, por ejemplo en manantiales, se deberá considerar el caudal máximo de la fuente.

La dosis de cloro se obtendrá a través del estudio de la demanda de cloro (Paso I) y de la concentración de cloro residual esperada, la cual está usualmente definida por las normas de calidad del agua que rigen en cada país. Al respecto y como referencia, la OMS considera que una concentración de 0,5 mg/l en cloro residual libre en el agua, luego de un período de contacto de 30 minutos, garantiza una desinfección satisfactoria.

En cuanto al caudal de agua a tratar, este no solo condiciona la cantidad de cloro a dosificar, sino también el tipo de equipo que se adapte mejor a esta necesidad. Por ejemplo, no es lo mismo un equipo de inyección de gas cloro para desinfectar 10 m³/s, que un tanque dosificador de hipoclorito de sodio a carga constante para desinfectar 1 l/s. Por consiguiente, el procedimiento de calibración varía según el dosificador y éste a su vez, depende del caudal de agua a desinfectar.

Tomando en cuenta estos factores, los dosificadores que se encuentran disponibles en el mercado se pueden clasificar en cloradores para gas y

dosificadores mecánicos y bombas dosificadoras para solución líquida. La calibración de estos equipos puede realizarse manualmente y automáticamente en los sistemas más sofisticados, siendo el primero el más empleado para ciudades de porte medio y pequeñas comunidades.

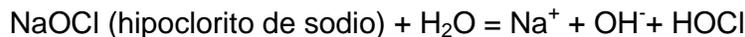
3.2.1.8.2. MECANISMOS DE LA DESINFECCIÓN CON CLORO

La cloración del agua potable se lleva a cabo mediante el burbujeo del cloro gaseoso o mediante la disolución de los compuestos de cloro y su posterior dosificación. El cloro en cualquiera de sus formas, se hidroliza al entrar en contacto con el agua, y forma ácido hipocloroso (HOCl) de la siguiente forma:

En el caso del *cloro gaseoso*, la reacción que tiene lugar es:



En el caso del *hipoclorito de sodio*, la reacción que tiene lugar es:

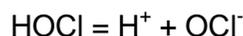


En el caso del *hipoclorito de calcio* y la porción activa de la cal clorada, la reacción es:



Durante el proceso químico de la desinfección se producen compuestos tales como cloraminas, dicloraminas y tricloraminas en presencia de amoníaco en el agua. Las cloraminas sirven igualmente como desinfectantes aunque reaccionen de una manera sumamente lenta. Asimismo, se forman el ácido clorhídrico (HCl) y los hidróxidos de calcio y sodio, los cuales no participan en el proceso de desinfección.

La especie desinfectante es el ácido hipocloroso (HOCl), el cual se disocia en iones hidrogenios (H^+) e hipoclorito (OCl^-) y adquiere sus propiedades oxidantes:



Ambas fracciones de la especie son microbicidas y actúan inhibiendo la actividad enzimática de las bacterias y virus y produciendo su inactivación.

Tanto el ácido hipocloroso (HOCl) como el ión hipoclorito (OCl-) están presentes hasta cierto punto cuando el pH varía entre 6 y 9 (el rango usual para el agua natural y potable). Cuando el valor de pH del agua clorada es 7,5, el 50% de la concentración de cloro presente será ácido hipocloroso no disociado y el otro 50% será ión hipoclorito.

Los diferentes porcentajes de HOCl y OCl- a diferentes valores de pH pueden verse en la **FIGURA 3.11**.

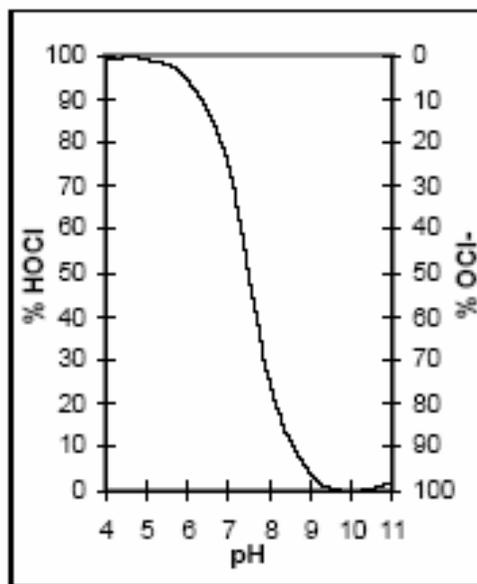


FIGURA 3.11. COMPORTAMIENTO DE LAS FRACCIONES DEL ÁCIDO HIPOCLOROSO RESPECTO A VARIACIONES DE PH

Las diferentes concentraciones de las dos especies significan una considerable diferencia en la propiedad bactericida del cloro, ya que estos dos compuestos presentan diferentes propiedades germicidas. En realidad, la eficiencia de HOCl es por lo menos 80 veces mayor que la del OCl-.

3.2.1.8.3. MEZCLADOR ESTÁTICO

Un desarrollo bastante reciente en el mezclado continuo de sustancias líquidas incluye el empleo de placas desviadoras estacionarias dentro de conductos, que fuerzan los medios fluidos a mezclarse entre sí, mediante una progresión de divisiones y recombinaciones que formen estrías de espesor decreciente hasta lograr la uniformidad.

La potencia consumida por un mezclador estático para producir la acción de mezclado es la suministrada al fluido por una bomba que se mueve contra la resistencia del conducto desviador. Para una velocidad de bombeo determinada, dicha potencia es sustancialmente proporcional a la resistencia. Cuando el desviador cuenta con varios pasajes, el número de capas (y por consiguiente, la velocidad de mezclado) por desviador se incrementa, pero a expensas de una mayor caída de presión que, por lo general se expresa como múltiplo del valor de K (constante de mezclado) respecto al ducto vacío y depende considerablemente del radio hidráulico del pasaje del fluido dividido. El valor de K , que se obtiene del proveedor de los mezcladores, puede variar desde 6 hasta varios cientos, dependiendo del número de Reynolds y la geometría del mezclador.

Los mezcladores estáticos intercambian en forma continua, elementos de fluido entre las paredes y el centro del conducto y, por consiguiente, proporcionan una mezcla mejorada y tiempos relativamente uniformes de residencia.

Este tipo de equipos se han convertido en una opción viable para la dosificación y mezcla de líquidos desinfectantes, como el hipoclorito de sodio, logrando eficiencias altas de mezclado y reacción, lo que contribuye al ahorro en la construcción de grandes tanques o cámaras de contacto de concreto.

5. CONCLUSIONES

En la actualidad el agua es un recurso estratégico por el cual se han iniciado ya en varias partes del mundo campañas a favor del cuidado y mejor aprovechamiento de la misma. Desafortunadamente en México estas campañas no han tenido el éxito deseado debido a los deficientes programas lanzados por el gobierno y la iniciativa privada. Existen avances pero no han sido suficientes como para cambiar de manera significativa la manera de pensar y actuar de la población. Aunque se debe aclarar que un cambio radical en nuestra actitud no solo depende de cuan fuertes e imaginativas sean las campañas publicitarias a favor del agua, sino que dependen más aún que cualquier otra cosa del empeño, conciencia y autocrítica que cada individuo posea de acuerdo a su formación. Es por ello que lo más importante para lograr una sociedad ambientalmente responsable es la educación con un enfoque de respeto por la vida y que tenga claramente establecido y entendido el concepto de *Desarrollo Sustentable*.

En este trabajo se ha llevado a cabo el análisis para determinar un proceso de potabilización de agua a partir de una mina en desuso y representa una propuesta para solucionar el problema de desabasto de una región de la ciudad de Pachuca, desabasto que no solo se debe a la sobreexplotación de los mantos freáticos, sino a la contaminación severa de algunos de ellos y que han puesto en aprietos a la autoridad de la región, que aún no ha podido satisfacer la demanda de agua.

Dicho análisis fue realizado para conocer en primera instancia la calidad del agua existente en la mina “El Álamo” y arrojó datos o parámetros fuera de norma, los cuales fueron los indicadores que hicieron patente la necesidad de plantear un tren de tratamiento para obtener un producto con calidad apto para el consumo humano. Por otro lado, se logró seleccionar un proceso de potabilización de acuerdo a la legislación vigente, pero también de acuerdo a lo aprendido en mi corta trayectoria profesional. Esto es, se eligieron operaciones unitarias con base a la norma, pero también que de acuerdo a la experiencia,

han demostrado ser las más prácticas, económicas y eficientes. En la toma de decisión sobre la selección de cualquier equipo de proceso se han considerado factores tales como ubicación de la fuente de abastecimiento, la facilidad de acceso al sitio, el área disponible, el tipo de suelo, etc. y que en ocasiones no están todos escritos, pero que en la práctica son fundamentales para determinar el rumbo de un proyecto.

Previamente fue determinada la cantidad de agua necesaria para satisfacer la demanda de un sector previamente establecido y delimitado de la población de la ciudad de Pachuca. Se detectó que no es posible dar agua a todo el municipio solo a partir de esta fuente de abastecimiento, pero si se lograría irrigar un sector de la población con gran necesidad del recurso y que actualmente presiona de manera importante al organismo operador de agua potable local para que encuentre alternativas o soluciones a los problemas que son ya añejos. La posible solución radica en el aprovechamiento del agua que actualmente se encuentra almacenada en varias minas cercanas al centro de la ciudad, que de ser aprovechada dotaría de agua a casi la totalidad de la población de la capital del Estado de Hidalgo por un periodo razonable de tiempo. Para lograrlo se necesita la participación conjunta del gobierno, población, el sector privado y la compañía minera pensando siempre en la estrategia ganar-ganar.

Como es sabido el extraer agua de una mina y tratarla no es un procedimiento nuevo, pero si es evidencia de que el hombre esta siendo orillado por si mismo a buscar nuevas fuentes de abastecimiento que reemplacen a las que ya agotó o contaminó. Por eso este trabajo ha buscado de manera implícita mostrar la dificultad y el costo que implica esta nueva búsqueda de un recurso tan valioso como el agua en nuestro tiempo además de la importancia que tiene el involucramiento de todos los sectores de la población y el gobierno en el cuidado de la misma.

BIBLIOGRAFÍA

- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Lineamientos técnicos para la elaboración de estudios y proyectos de agua potable y alcantarillado sanitario*. Gerencia de ingeniería básica y normas técnicas. México, octubre de 1994.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Datos básicos*. Gerencia de ingeniería básica y normas técnicas. México, 1994.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Conducción*. Gerencia de ingeniería básica y normas técnicas. México, noviembre de 1997.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Guía para el manejo, estabilización y disposición de lodos químicos*. Gerencia de ingeniería básica y normas técnicas. México, septiembre de 1999.
- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA. *Desinfección para sistemas de agua potable y saneamiento*. Gerencia de ingeniería básica y normas técnicas. México, junio de 2000.
- FOUST S, ALAN (et. al). *Principios de operaciones unitarias*. Compañía Editorial Continental SA. 3ª impresión, México DF, 1969.
- JORGEN, WAGNER, B. *Membrane Filtration Handbook. Practical Tips and Hints*. Osmonics, Second edition, November 2001.
- METCALF & EDDY, *Ingeniería de aguas residuales. Tratamiento de aguas residuales. Tratamiento, vertido y reutilización*. McGraw-Hill, México, 1996.
- MONTGOMERY J. *Water treatment. Principles and design*. New York. Edited by J. Wiley. 1985.
- NALCO Manual del Agua. McGraw-Hill, México, 1989.
- 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*. Diario Oficial de la Federación, Enero 18 de 1996.
- OSMONICS. *Osmonics Pure Water Handbook. Edited by Osmonics, second edition, 1997*.
- PERRY, ROBERT H. (et. al.). *Manual del ingeniero químico*. Editorial McGraw-Hill, sexta edición (tercera edición en español), Tomo 2, México, 2000
- ROMERO ROJAS J. A. *Potabilización del agua*. Editorial Alfaomega, tercera edición. Colombia, 1978.