

660-2
U14

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA QUIMICA**



**“DISEÑO DE UN PROCESO PARA LA
DESALINIZACIÓN DE AGUA SALOBRE
SUBTERRANEA EMPLEANDO TECNOLOGÍA DE
ÓSMOSIS INVERSA”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO QUÍMICO**

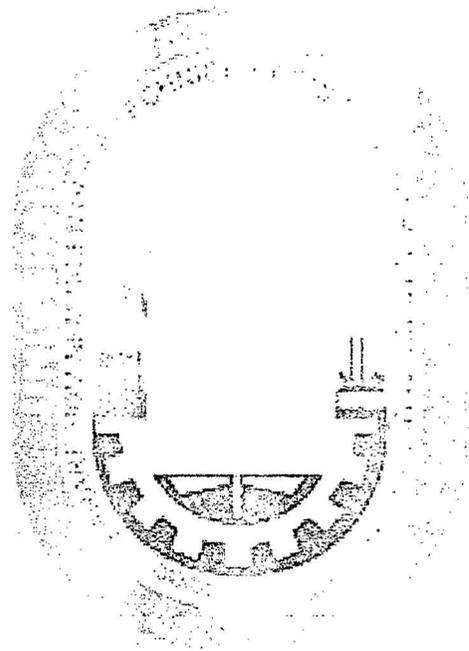
AUTOR: Bach. UBILLUS BORJA MIGUEL ÁNGEL

**CALLAO - PERÚ
2011**

La presente Tesis fue Sustentada ante el **JURADO DE SUSTENTACION** conformado por los siguientes Profesores Ordinarios

Dr. CARRASCO VENEGAS, LUIS AMÉRICO	:	PRESIDENTE
Ing. ÁNGELES QUEIROLO, CARLOS ERNESTO	:	SECRETARIO
Mg. GUTIERREZ CUBA, CESAR	:	VOCAL
MS. MEDINA COLLANA, JUAN TAUMATURGO	:	ASESOR

Según figura en el Libro de Actas N° 2 Folio N° 39 asentado en el Acta N° 222 de fecha **CUATRO DE MARZO DEL DOS MIL ONCE**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico en la modalidad de **Titulación con Sustentación de Tesis**, de acuerdo a lo normado por el Reglamento de Grados y Títulos vigente.



DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres por la formación recibida, a mis abuelos por los valores inculcados y a todas aquellas personas que me dieron aliento para continuar y confiaron en mí; a todos ellos gracias; mi éxito también es el ustedes.

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo es fruto de mi experiencia tanto académica como profesional como tal es necesario agradecer a aquellas personas que me brindaron la oportunidad de seguir esta carrera y así mismo a las empresas que me brindaron su experiencia y confianza.

Además de manera muy especial un agradecimiento a mi asesor el Ing. Juan Medina Collana, el cual me brindó las pautas necesarias para poder concluir lo que empezó con unos cuantos párrafos, a la vez que me brindó su apoyo, respaldo e interés en el desarrollo y culminación del trabajo.

También quiero agradecer a mis padres Néstor y Noemí por el sacrificio realizado para que pueda culminar una etapa en más en vida, también a mis hermanos lo cuales me dieron la motivación necesaria en los momentos difíciles.

No quisiera terminar estas líneas sin dejar de agradecer a mis compañeros de la universidad los cuales me proporcionaron palabras de aliento e inspiración, además de brindarme su tiempo y amistad.

A todos Ustedes
Muchas gracias.

Miguel Angel Ubillus Borja

RESUMEN

El presente trabajo realiza el diseño de un proceso de desalinización de agua salobre subterránea por tecnología de ósmosis inversa, aplicado para dos tipos de procesos, la primera para uso de producción de concreto premezclado y la segunda para producción de pinturas acrílicas con una misma fuente de agua localizada en el distrito de Villa El Salvador, provincia de Lima, Latitud S 12° 12.3493' y longitud W 76° 58.4812' y una producción de agua de 200 metros cúbicos por día en cada caso.

En el desarrollo del diseño del proceso se estableció los valores óptimos de operación de membranas tales como pH 6.2 y recuperación máxima de 64% de agua osmotizada; previo a la simulación se ha seleccionado la marca de membranas Toray y sus modelos TM720-430 y TMG20-430 para alta y baja presión. Así mismo y siguiendo los lineamientos de diseño de Toray se obtuvo un total de 10 membranas de medidas 8" de diámetro x 40" de longitud para cada aplicación, considerándose el modelo TM720-430 para la aplicación de pinturas acrílicas y el modelo TMG-430 para la aplicación de concreto premezclado; también se ha empleado el software Advisor 2 de la empresa Avista Technologies para calcular la cantidad en mg/L de anti-incrustante, obteniendo un valor de 2 ppm independiente de la aplicación seleccionada.

Además se realizó un estudio económico para hallar el valor del costo unitario del agua osmotizada, obteniendo los valores de 0.54 US\$/m³ para la aplicación de sistemas de baja presión y 0.57 US\$/m³ para sistemas de alta presión.

INDICE

	Pág.
Índice de Tablas.....	1
Índice de Figuras.....	3
INTRODUCCIÓN.....	5
1.1 Presentación del Problema.....	6
1.2 Objetivos.....	7
1.3 Enunciado del Problema.....	8
1.4 Justificación de la Investigación.....	9
1.5 Antecedentes.....	9
I. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1 PROPIEDADES, CARACTERÍSTICAS Y CLASIFICACIÓN DE LAS AGUAS.....	13
2.1.1 Clasificación de los tipos de agua.....	18
2.1.2 Calidad de agua para la Industria.....	22
A. Calidad de agua para la producción de concreto premezclado.....	23
B. Calidad de agua para la producción de pinturas acrílicas.....	24
2.2 ALTERNATIVAS DE MÉTODOS PARA LA DESALINIZACIÓN DE AGUAS SALOBRES.....	25
2.2.1 Métodos de cambio de fase.....	26
A. Destilación efecto flash multietapa.....	26
B. Destilación por múltiple efecto.....	28
C. Destilación por compresión de vapor.....	29
D. Destilación Solar.....	30
E. Congelación.....	31
2.2.2 Métodos de membranas selectivas.....	32
A. Tecnología de membranas de ósmosis inversa.....	33

B. Tecnología de membranas de electrodiálisis.....	36
2.3 CLASIFICACIONES Y CONFIGURACIONES DE LAS OPERACIONES DE MEMBRANAS DE ÓSMOSIS INVERSA.....	38
2.3.1 Tipos de Membranas.....	38
A. Membranas de inversión de fase.....	40
B. Membranas mixtas o compuestas.....	40
2.3.2 Características de las membranas.....	42
A. Bioensuciamiento.....	43
B. Resistencia a los oxidantes.....	44
C. Concentración de polarización.....	44
2.3.3 Configuración modular de las membranas.....	46
A. Módulos de placas.....	47
B. Módulos tubulares.....	48
C. Módulos de fibras huecas.....	48
D. Módulos espirales.....	49
2.4 FUNDAMENTOS DE LA SEPARACIÓN POR MEMBRANAS EMPLEANDO ÓSMOSIS INVERSA.....	50
2.4.1 Principios de operación.....	50
2.4.2 Operación con membranas.....	52
A. Flujo de permeado.....	52
B. Efectos de la temperatura.....	52
2.5 MODELOS DE TRANSPORTE TEÓRICO DE LAS MEMBRANAS.....	53
2.5.1 Membranas Homogéneas o no porosas.....	54
A. Modelo de Solución – Difusión.....	57
B. Modelo de Solución – Difusión – Imperfecciones.....	57
2.5.2 Membranas basadas en Poros.....	58
A. Adsorción preferencial - flujo Capilar.....	58

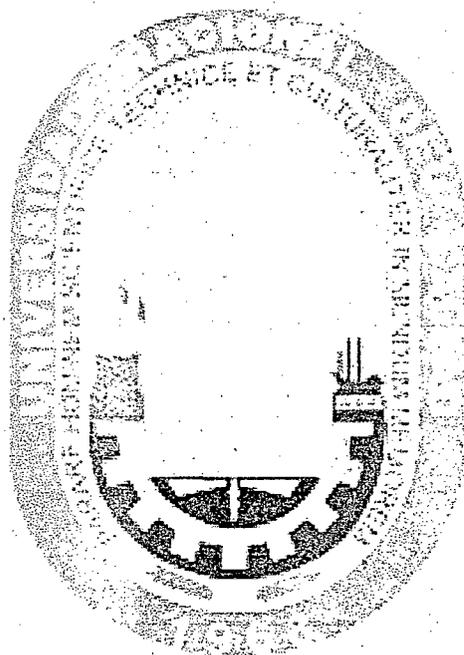
2.5.3	Modelo Basado en la termodinámica irreversible.....	59
2.5.4	Disposición de Arreglos.....	61
2.6	PRE Y POST-TRATAMIENTO EN UN PROCESO DE TECNOLOGÍA DE ÓSMOSIS INVERSA.....	67
2.6.1	Cálculos de precipitación.....	67
	A. Cálculo de la sal limitante.....	67
	B. Determinación del pH óptimo.....	72
2.6.2	Pre-tratamiento.....	74
	A. Pre-tratamiento físico.....	74
	B. Pre-tratamiento químico.....	82
2.6.3	Post – Tratamiento.....	89
	A. Regulación de pH.....	89
	B. Desgasificación.....	90
	C. Alcalinización.....	91
	D. Post-cloración.....	92
2.7	SIMULADORES DE OPERACIÓN DE MEMBRANAS.....	92
2.7.1	Desarrollo del diseño asistido por el software TorayRO.....	96
	A. Ingreso de datos generales.....	97
	B. Ingreso de datos específicos.....	98
	MATERIALES Y METODOS.....	100
3.1	EQUIPOS.....	100
3.2	METODOLOGÍA.....	100
3.2.1	Análisis del agua fuente.....	103
	C. Identificación de procedencia de la muestra.....	103
	D. Análisis fisicoquímico y microbiológico.....	103
3.2.2.	Desarrollo de cálculos Anti incrustantes.....	105

A. Cálculo de potencial de incrustación de sulfato.....	105
B. Cálculo del pH óptimo.....	105
3.2.3. Desarrollo del Pre – tratamiento.....	105
A. Dosificación de cloro.....	105
B. Dosificación de ácido.....	106
C. Filtración con lecho multimedia.....	106
D. Dosificación de bisulfito de sodio.....	108
E. Dosificación de anti escalante.....	108
F. Microfiltración.....	109
3.2.4. Desarrollo de la simulación de membranas por el Toray RO.....	109
3.2.5. Desarrollo del post – tratamiento.....	109
3.2.6. Resumen de resultados de la simulación.....	109
3.2.7. Diagramas de flujo de procesos.....	109
CÁLCULOS Y RESULTADOS DEL PROCESO.....	110
4.1 IDENTIFICACIÓN DE PROCEDENCIA DE LA MUESTRA.....	110
4.2 ANALISIS FISICOQUÍMICOS.....	110
4.3 DESARROLLO DE CÁLCULOS ANTI-INCRUSTANTES.....	112
4.3.1 Cálculo del Potencial de incrustación de Sulfato.....	112
4.3.2 Cálculo del pH óptimo.....	113
4.4 DESARROLLO DEL PRE – TRATAMIENTO.....	116
4.4.1 Desinfección por Cloro.....	116
4.4.2 Filtración con lecho multimedia.....	117
4.4.3 Dosificación de anti escalante.....	122
4.4.4 Dosificación de meta bisulfito de sodio.....	124
4.4.5 Microfiltración.....	125
4.5 DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN TORAYRO.....	126

4.5.1	Ingreso de datos generales.....	126
4.5.2	Ingreso de datos específicos.....	130
4.5.3	Reporte de resultados de la simulación – Proceso A.....	140
4.5.4	Reporte de resultados de la simulación – Proceso B.....	141
4.6	DESARROLLO DEL POST – TRATAMIENTO.....	142
4.6.1	Post-tratamiento proceso A.....	142
4.6.2	Post-tratamiento proceso B.....	142
4.7	RESUMEN DE RESULTADOS	147
4.8	DIAGRAMAS DE FLUJO DE PROCESOS.....	148
	ESTUDIO ECONÓMICO.....	152
5.1	COSTO DE CAPITAL ANUALIZADO.....	152
5.1.1	Costos Directos.....	152
5.1.2	Costos Indirectos.....	153
5.1.3	Determinación del VAN.....	153
5.2	COSTO DE RECURSOS, ENERGIA Y CONSUMIBLES.....	154
5.2.1	Costo de Recursos Humanos.....	154
5.2.2	Costo de Energía.....	155
5.2.3	Costo de Consumibles.....	156
5.3	CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS.....	157
	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	160
	CONCLUSIONES.....	164
	RECOMENDACIONES.....	166



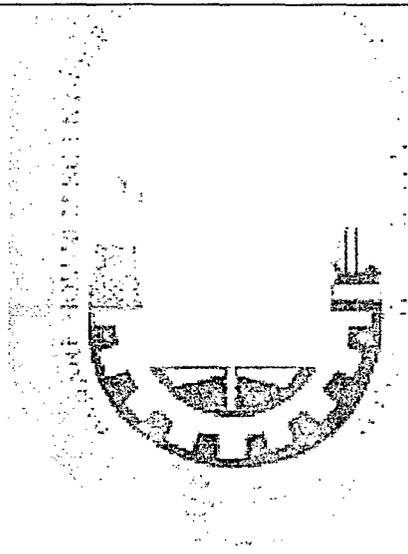
FUENTES DE INFORMACIÓN CONSULTADAS.....	168
APÉNDICES.....	171
ANEXOS.....	180



INDICE DE TABLAS

1	Viscosidad versus temperatura	16
2	Coefficiente de viscosidad versus salinidad	16
3	Conductividad – STD	18
4	Clasificación de aguas según fuente	19
5	Clasificación de agua por su salobridad	20
6	Clasificación de agua según la Ley Peruana	21
7	Calidad de agua para concreto premezclado	23
8	Calidad de agua para pinturas acrílicas	24
9	Resumen de métodos de desalinización	26
10	Rechazo de elementos por membranas de ósmosis inversa	34
11	Tipos de membranas poliamida por su aplicación	42
12	Bioensuciamiento (Efecto – Descripción)	43
13	Resumen de modelos de transporte	54
14	Datos generales de medios filtrantes	76
15	Orden de medios filtrantes (desde el top hasta el soporte)	76
16	Norma para Filtros Multimedia	80
17	Constante de ionización del ácido hipocloroso vs Temperatura	83
18	Terminología en simuladores de ósmosis inversa	93
19	Normas Estandarizadas de Análisis Físicoquímico – Microbiológico	103
20	Resultado de Análisis Físicoquímico – Microbiológico	110
21	Datos para el cálculo del potencial de incrustación de sulfato	112
22	Cuadro resumen – datos reemplazados	112
23	Resultados del cálculo del potencial de incrustación de sulfato	113
24	Datos para el cálculo del pH óptimo	113
25	Orden y altura de medios filtrantes	118
26	Datos para la Ecuación de pérdida de carga	119
27	Resumen de resultados de la pérdida de carga	121
28	Productos químicos en la descloración	124
29	Tipo de Microfiltro seleccionado	126
30	Resultados de selección del microfiltro	126
31	Datos generales – Desarrollo de simulación	126
32	Denominación de los procesos a evaluar	126
33	Resultados de selección del tipo de membrana	131
34	Cuadro de cálculo del número de membranas	132

35	Selección de datos específicos	132
36	Resultados de la simulación de arreglos	139
37	Cuadro Comparativo – Resultados del Proceso A	142
38	Cuadro Comparativo – Resultados del Proceso B	142
39	Cuadro Comparativo – Resultados del Proceso B – Post-tratamiento	146
40	Cuadro Resumen de Resultados	147
41	Cuadro de Precios FOB – CIF	152
42	Resumen de Costos de Capital	153
43	Calculo del VAN	153
44	Resumen de Datos de operación	154
45	Costos de Recursos Humanos	154
46	Calculo de Energía	155
47	Calculo de costo de la energía	157
48	Calculo de consumibles	157
49	Cuadro comparativo de costos	158



INDICE DE FIGURAS

Número	Figura	Página
1	Grafica Densidad versus Temperatura	14
2	Calor Especifico versus Temperatura	15
3	Esquema de formación del agua salobre subterránea	22
4	Destilación Efecto Flash Multietapa (MSF)	27
5	Destilación por Múltiple Efecto	29
6	Destilación por Compresión de Vapor	30
7	Destilación Solar	31
8	Espectro de filtración	33
9	Membrana Semi-Permeable	35
10	Esquema de electrodiálisis	37
11	Evolución de la clasificación de las membranas	39
12	Perfil de Concentraciones estacionarios en la polarización por concentración	45
13	Módulos de Placas	47
14	Módulos Tubulares	48
15	Módulos de Fibras Huecos	49
16	Modulo Espiral	49
17	Elemento de un módulo espiral	50
18	Diagrama de operación de un sistema de ósmosis inversa	55
19	Módulos en Paralelo	62
20	Módulos en Serie	63
21	Diagrama básico de transporte de masa en una membrana	63
22	Diagrama de operación en modelo multietapa	66
23	Filtro multimedia	81
24	Distribución del HOCL y OCL ⁻ en función del pH	84
25	Etapas de cristalización	86
26	Esquema del efecto umbral	87
27	Dosificación de NaHSO ₃ para la eliminación de cloro libre	88
28	Constante de ionización del HCO ₃ ⁻ en la línea de permeado	89
29	Relación entre la [H] y el valor del pH	90
30	Desgasificador	91
31	Aplicación del desgasificador	91
32	Lineamiento de Diseño del proveedor Toray	95
33	Metodología de desarrollo de la simulación de operación de	96

	membranas	
34	Pantalla Inicial del programa TORAYRO	97
35	Pantalla de ingreso de valores del análisis químico	98
36	Pantalla de ingreso de arreglo de membranas	98
37	Flujograma de la metodología	102
38	Metodología de cálculo de filtración multimedia	106
39	Metodología de Cálculo de Dosificación de Anti-Escalante	108
40	Pantalla de Resultados del programa Advisor 2	122
41	Pantalla del Potencial de Incrustación	123
42	Diferencial de presión vs Flujo de agua - Microfiltración	125
43	Pantalla inicial cargado con los datos generales	127
44	Pantalla del pH optimo ingresado	128
45	Cantidad de ácido clorhídrico al 30% requerido	129
46	Pantalla de Ingreso de Valores del Análisis Químico	130
47	Arreglo de membranas – Arreglo 1	133
48	Arreglo de membranas – Arreglo 2	134
49	Ingreso del arreglo 2-2-1 Proceso A	135
50	Impresión del arreglo 2-2-1 Proceso A	135
51	Ingreso del arreglo 3-1-1 simulado Proceso A	136
52	Impresión del arreglo 3-1-1 Proceso A	136
53	Ingreso del arreglo 2-2-1 Proceso B	137
54	Impresión del arreglo 2-2-1 Proceso B	137
55	Ingreso del arreglo 3-1-1 simulado Proceso B	138
56	Impresión del arreglo 3-1-1 simulado Proceso B	138
57	Reporte de resultados de la simulación – Proceso A	140
58	Reporte de resultados de la simulación – Proceso B	141
59	Adición de base para corregir el pH – Post tratamiento	144
60	Reporte de resultados de la simulación – Proceso B – Post-tratamiento	145
61	PFD – Proceso A	150
62	PFD – Proceso B	151
63	Costos Proceso A	159
64	Costos Proceso B	160

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de desalinización en el país se encuentran en una etapa en donde la viabilidad tanto técnica como económica es positiva, esto en parte a la reducción de los costos de los equipos así como el espectro de tecnologías disponibles para esta función.

Además es clave entender que debido a los efectos del cambio climático que actualmente vivimos es fundamental conocer diversas técnicas de desalinización que nos permitan aprovechar mejor el agua en la naturaleza, mejor aún si es un proceso que ofrezca un bajo costo de producción así como también que sea ecológicamente amigable.

El proceso de membranas y específicamente la tecnología de ósmosis inversa es la pionera en ofrecer un sistema comercial de desalinización de aguas que no genera altos grados de polución y además es compacta en volumen. Así mismo esta tecnología se puede complementar con generadores para utilizar la energía eólica o solar y así ofrecer una mejor solución ambiental.

Cabe mencionar que este proceso es cada vez más común en la separación de sales tanto de agua salobre como de agua de mar, tanto así que las empresas privadas como estatales que se encuentran en una zona costera en el Perú y que requieran como insumo agua de baja carga mineral ya lo vienen aplicando.

Por lo anteriormente expuesto, se fundamenta la importancia de conocer este proceso, tanto sus variables de diseño como sus características de operación. El enfoque que se brinda en el presente trabajo es la remoción de sales de aguas salobres subterráneas empleando la tecnología de ósmosis inversa, en donde mencionamos tanto las consideraciones que debe tener el agua de entrada (pre-tratamiento) como procedimientos de tratamiento a la descarga de agua desalinizada (post-tratamiento) empleando conceptos fisicoquímicos.

Las aplicaciones industriales que se mencionan en el presente trabajo las emplearemos para poder brindar una explicación clara de los fundamentos del proceso así como una evaluación de costos con los precios a la fecha.

1.1 Presentación del problema

El desarrollo de las técnicas de desalinización, y especialmente aquellas que requieren un menor consumo energético y mayor eficacia, han contribuido a la rápida expansión de esta tecnología y a su vez el menor costo de producción. Ha incidido en considerar las aguas desalinizadas como una alternativa más en todos los procesos que requieren agua con baja carga mineral.

Existen básicamente tres tipos de procesos de desalinización: destilación, electrodiálisis y ósmosis inversa. Las dos últimas técnicas son similares por el hecho de que ambas usan membranas que permiten el paso de moléculas de agua pero excluyen las sales y otros contaminantes, las cuales son descargadas como residuo concentrado o salmuera, mientras que la primera emplea la energía para evaporar el agua y condensarla originando generalmente un costo de energía significativamente mayor a los otros dos procesos.

En nuestro país debido a su condición de país costero se ha observado un incremento en la implementación de la tecnología de ósmosis inversa en diversos campos, tanto para consumo humano, producción de agua ultra pura clase USP, elaboración de productos químicos, producción de concreto, producción de agua para hemodiálisis, producción de pinturas etc.

El empleo diverso de esta tecnología hace necesario tener un conocimiento claro del proceso para poder adecuarla a las diferentes necesidades de las industrias sin incurrir en sobrecostos innecesarios.

Por lo que el presente trabajo se enfoca en desarrollar metodologías de diseño eficientes para dos aplicaciones específicas, considerando una misma fuente en el mismo emplazamiento (latitud S 12° 12.3493' y longitud W 76° 58.4812') y con el fin de obtener un comparativo entre estos procesos. Las aplicaciones son de producción de agua para concreto premezclado y la producción de pinturas acrílicas con una producción de 200 metros cúbicos por día (8.33 m³/h).

En vista al párrafo anterior consideraremos como dato inicial el análisis del agua de pozo, el dato de producción de agua requerida para cada proceso, la norma del departamento del control de calidad de producción de concreto y la norma de calidad de agua requerida para pinturas acrílicas.

1.2 Objetivos

Objetivo general

Diseñar un proceso para la desalinización de agua salobre empleando tecnología de ósmosis inversa para la aplicación de concreto premezclado y para pinturas acrílicas

Objetivos específicos

- a) Analizar los valores físico – químicos del agua subterránea empleando metodologías normadas
- b) Seleccionar el pre-tratamiento en función del análisis de agua y la producción de agua requerida.
- c) Determinar el dimensionamiento de las membranas y sus condiciones de operación con la ayuda del software simulador TorayRO.
- d) Obtener un reporte de la simulación de membranas

- e) Seleccionar el post-tratamiento adecuado en función de su calidad de agua requerida.

1.3 Enunciado del problema

Problema general

¿Cuál debería ser la estructura del diseño del proceso para la desalinización de agua salobre y cumplir con las normas específicas para cada aplicación?

Problemas particulares

- ¿El diseño de un proceso de desalinización de agua por ósmosis inversa depende de las características físicas y químicas del agua o es posible establecer una metodología general de diseño?
- ¿El pre-tratamiento difiere para las diversas aplicaciones del agua osmotizada o uso final?
- ¿Es posible utilizar un software simulador para realizar el dimensionamiento de las membranas y condiciones de operación?
- ¿Los reportes de los simuladores de membranas son suficientes para elaborar un diseño de procesos?
- ¿Es que momento podemos considerar un post-tratamiento?
- ¿El costo unitario actual del agua osmotizada difiere si se emplea membranas de baja o alta presión?

1.4 Justificación de la investigación

La presente investigación se justifica por las siguientes razones:

- A. El alto grado de salobridad de los pozos en la zona costera de nuestro país es significativo, por lo que es necesario evaluar las posibilidades tecnológicas de desalinización entre las cuales, y la más importante por su bajo consumo de energía a comparación de otros procesos, es la de ósmosis inversa, de esta manera las industrias de estas zonas se verán beneficiadas, en este caso la industria concretera y la de pinturas.
- B. La contribución del presente trabajo además está orientada a la presentación de la estructura de diseño aplicado al proceso de desalinización de agua salobre subterránea por ósmosis inversa, lo cual puede ser utilizado como referencia para los investigadores en el campo de tratamiento de aguas por procesos de membranas en diferentes aplicaciones.
- C. También tiene una importancia económica, ya que al tener un conocimiento claro del proceso de desalinización por membranas de ósmosis inversa, esto permite obtener costos reales en el proyecto, reduciendo el factor de corrección o ajuste cuando el proyecto está encaminado.

1.5 Antecedentes

La desalinización o desalación ha estado en la curiosidad del hombre desde tiempos antiguos, como se menciona en el tratado "Metereologica" de Aristóteles (384–322 a.C.), posteriormente se tuvo que esperar hasta la edad media para posteriores estudios, uno de estos fue. John Gaddesden (1280-1361), que en su obra Rosa medicine describe métodos para la desalación del agua de mar.¹

A partir de la segunda mitad del siglo XIX, la aplicación práctica de la máquina de vapor y los continuos avances en termodinámica, química e

ingeniería coadyuvaron a mejorar este proceso. La primera patente de desalación se registra en 1869 en Gran Bretaña y la primera planta desaladora se pone en marcha aquel mismo año en Adén.

A mediados del siglo XX se experimentan grandes avances con nuevas técnicas basadas en el cambio de fase. Es cuando surge parte de los sistemas actuales, como el de evaporación súbita de múltiples efectos (Destilación multiefecto MED) y compresión a vapor (CV).

A comienzos de los años 70', se constituye la primera membrana sintética semipermeable a escala industrial, lo que desarrolla la técnica de desalación por ósmosis inversa la cual cuenta con las mejores perspectivas de desarrollo. Entre sus principales ventajas cabe destacar el mayor volumen de agua tratada y su coste más reducido. La evolución de las plantas desaladoras de ósmosis inversa va estrechamente ligada al de las membranas. Así, las primeras membranas tenían un diámetro de 4 pulgadas y una capacidad de producción próxima a los 7 m³/día; en la década del 80 comenzaron a desarrollarse plantas potabilizadoras con una capacidad en torno a 500 m³/día. Este tamaño ha ido creciendo con el tiempo, superándose actualmente los 100.000 m³/día.²

En nuestro país la desalinización por ósmosis inversa se ha venido aplicando desde hace más de 15 años, enfrentando primero paradigmas sobre la eficiencia de la tecnología a comparación de los procesos de cambio de fase, en respuesta a estos se realizaron estudios comparativos de costos entre los diferentes procesos de desalinización teniendo un mayor beneficio a largo plazo la tecnología de membranas, lo que permitió su crecimiento en el mercado nacional.

¹ "Las aguas salobres, una alternativa al abastecimiento en regiones semiáridas". Revista del Instituto geológico y minero de España. Consulta el 04 de marzo del 2010
<http://aguas.igme.es/igme/publica/pdfs/arttycon21.pdf>

² *Técnicas innovativas de desalinización de aguas salobres y del mar*. Consulta 20 de octubre del 2009
<http://www.cepis.org.pe/bvsaidis/caliagua/mexiconal/R-0038.pdf>

Cabe destacar que aún dada la importancia tanto tecnológica como económica, no existan trabajos de desalinización de agua salobre subterránea por ósmosis inversa en la Facultad de Ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao por lo que esta tesis pretende servir como referencia para investigadores posteriores en el área, ya sea de nuestra facultad o externos.

Entre los principales trabajos podemos mencionar el libro, "Calidad y Tratamiento de agua" de la American Water Works Association en 2002, así como el "Tratamiento del agua por procesos de membrana" también de la American Water Works Association en 1998, los cuales presentan modelos matemáticos básicos para entender el proceso de desalinización por membranas.

Entre las investigaciones podemos mencionar:

- ✓ "Estudio técnico para la obtención de agua pura por ósmosis inversa", el cual nos brinda los principios teóricos aplicados a la desalinización por ósmosis inversa, el cual fue desarrollado por el Ing. Estanislao Bellodas Arboleda, en la Universidad Nacional del Callao.
- ✓ La Tesis "Estudio de aplicación del sistema ósmosis inversa – intercambio iónico en la producción de agua al reactor nuclear RP-10 del IPEN" para la obtención de grado de Ingeniero Químico de la Ing. Giovanna Maldonado Panduro de la Universidad Nacional del Centro, donde se realizó un estudio comparativo de la operación de separación por ósmosis inversa y el método de intercambio iónico con el fin de seleccionar el mejor proceso para el reactor del IPEN.
- ✓ "Aplicación de la ósmosis inversa y la nano filtración en el acondicionamiento de aguas para calderas" por Carlos Francisco García Olmos par obtención del grado de Doctor en Ingeniería Química en la Universidad de Oviedo en España; esta tesis contribuirá como fuente de apoyo debido a su extensa investigación en los diversos modelos que

explican y predicen los fenómenos que ocurren en la operación de ósmosis inversa.

- ✓ “Tecnologías sostenibles sobre la gestión del agua: la desalación. estudio del caso en la zona costera del mediterráneo” por Beatriz Escribano. Este documento se centra en el estudio de los impactos causados por las desaladoras, analizando los aspectos más importantes: económicos, sociales, ambientales e institucionales. Se menciona una visión global de éstos aspectos resaltándolos para la zona costera española del Mediterráneo.
- ✓ “Diseño de una unidad desaladora de agua de mar mediante el proceso de ósmosis inversa” por Rafael Andrade y Massimiliano Moradei para la obtención del grado de Ingeniero Industrial del año 1990 en la Universidad de Católica de Andrés Bello en Caracas, Venezuela; la importancia de este trabajo es su desarrollo de una estructura de diseño de proceso para la desalinización de agua marina, la cual servirá como una referencia para realizar el presente trabajo considerando la fuente de agua salobre subterránea, un diferente pre y post – tratamiento y otras condiciones de operación en la simulación.
- ✓ “The study for pretreatment for composite fouling of reverse ósmosis membranes used in water treatment and production” por Ghulam M. Mustafa para obtener el grado de Doctor en la University of New South Wales en Sidney, Australia en el 2007; esta investigación proporciona un estudio completo del pre-tratamiento requerido para evitar ensuciamiento tanto orgánico como inorgánico de las membranas para la operación de ósmosis inversa.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Propiedades, características y clasificación de las aguas

En el desarrollo de las civilizaciones el agua ha sido un factor determinante en su crecimiento, apogeo e incluso declive; debido a sus propiedades y características, las cuales se han aprovechado desde hace milenios.

El agua tal como la encontramos en la naturaleza no es utilizable, en la mayoría de los casos, directamente para el consumo humano ni para la industria, porque requiere cumplir ciertas características.

Químicamente el agua es una sustancia que se formula como H_2O ; es decir, que una molécula de agua se compone de dos átomos de hidrógeno enlazados covalentemente a un átomo de oxígeno. Fue Henry Cavendish quien descubrió en 1781 que el agua es una sustancia compuesta y no un elemento, como se pensaba desde la antigüedad. Los resultados de dicho descubrimiento fueron desarrollados por Antoine Laurent de Lavoisier dando a conocer que el agua estaba formada por oxígeno e hidrógeno. En 1804, el químico francés Joseph Louis Gay-Lussac y el naturalista y geógrafo alemán Alexander von Humboldt demostraron que el agua estaba formada por dos volúmenes de hidrógeno por cada volumen de oxígeno (H_2O).

Entre las propiedades físicas más importantes para el tratamiento del agua son las siguientes:

➤ **Densidad**

La densidad es la relación entre la masa y el volumen de una determinada sustancia o elemento, debido a propiedades fisicoquímicas el volumen se encuentra en función de la presión y temperatura por compresión molecular, por lo que en el caso del agua se observa diferentes valores de la densidad a un cambio de temperatura (figura 1).

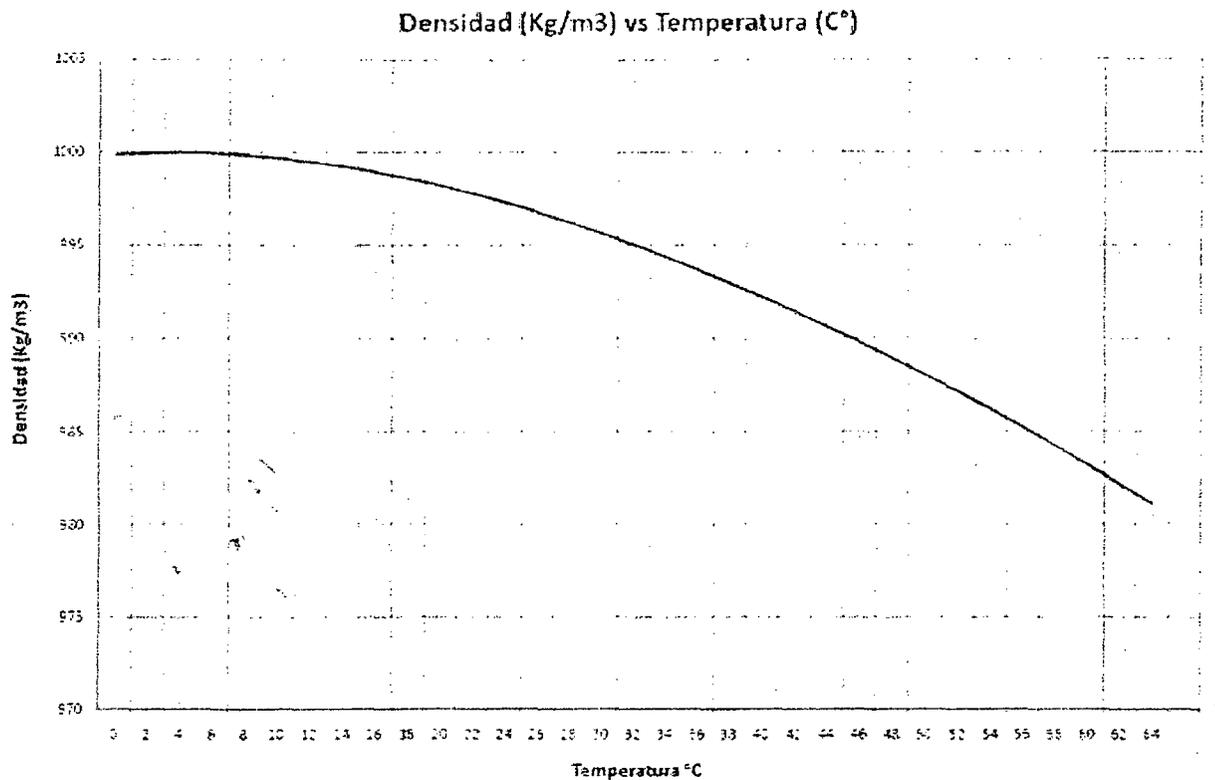


Fig. (1) *Grafica Densidad vs Temperatura*
 Fuente: "Perry's Chemical Engineer's Handbook" - 2005

➤ **Propiedades térmicas**

Calor Específico

Esta magnitud física se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa del sistema considerado para elevar la temperatura en una unidad (Kelvin o grado Celsius) a partir de una temperatura dada.

Por tablas sabemos que el calor específico del agua a 25°C es 4,180 J/kg °C, para otras de temperaturas podemos emplear la figura 2.

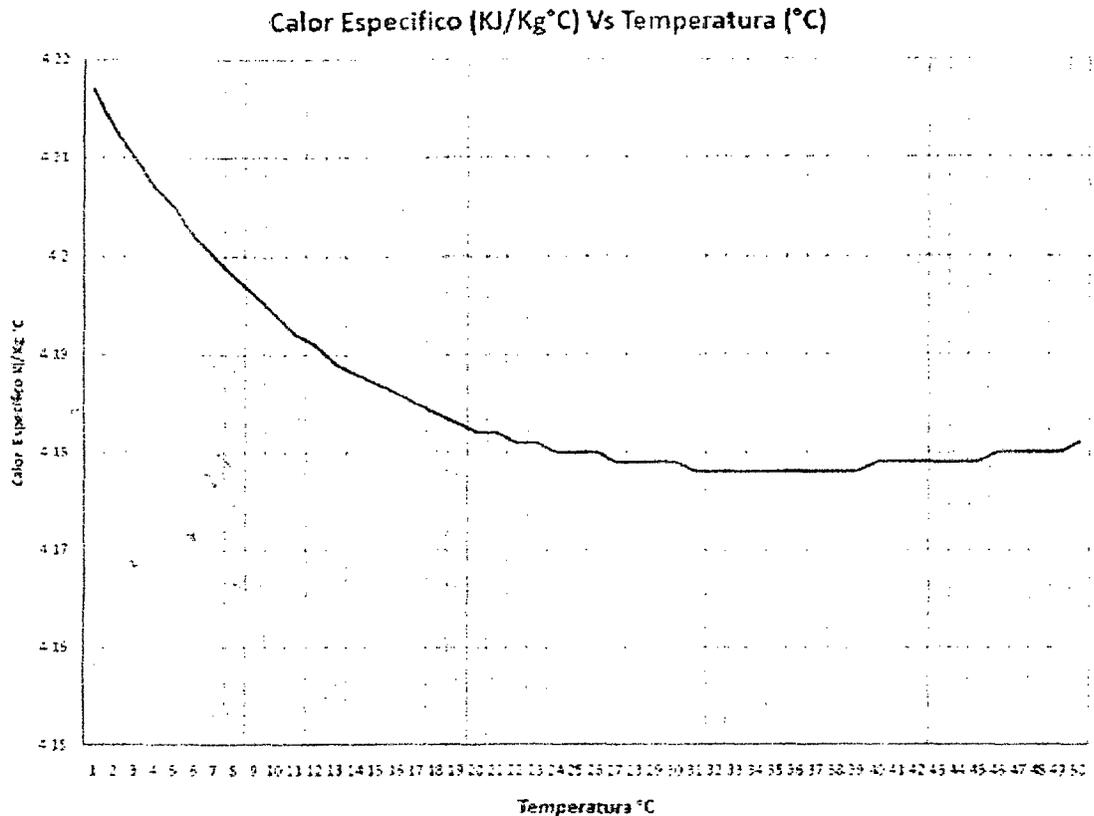
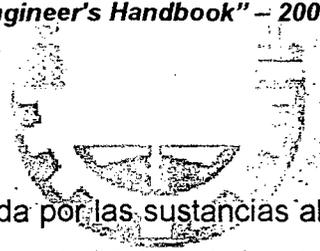


Fig. (2) Grafica Calor especifico vs Temperatura
 Fuente: "Perry's Chemical Engineer's Handbook" – 2005

Calor latente



Es la energía absorbida por las sustancias al cambiar de estado, de sólido a líquido (calor latente de fusión) o de líquido a gaseoso (calor latente de vaporización).

Para el agua, los calores latentes de transformación para la fusión son 330 KJ/Kg o 79 Kcal/Kg considerando presión normal y temperatura a 0°C; mientras que para la vaporización es 2,250 KJ/Kg o 539 Kcal/Kg a la presión normal y temperatura a 100 °C.

La utilización del agua en la industria como fluido portador de calor se debe precisamente a estos altos valores de calor específico y calor latente además de su facilidad para encontrarla en la naturaleza

➤ **Viscosidad**

Es la propiedad que tiene un líquido de oponer resistencia a todo movimiento, ya sea interno o global como flujo. Es un factor fundamental de las pérdidas de carga y, por lo tanto, desempeña un importante papel en el tratamiento del agua.

Disminuye cuando aumenta la temperatura:

Temperatura (°C)	Viscosidad
0	1,797
5	1,523
10	1,301
15	1,118
20	1,007
25	0,895
30	0,800
35	0,723

Fuente: "Manual Técnico del Agua" – Degremont 1979

Por el contrario aumenta con el contenido de sales disueltas.

Salinidad en partes C	Coeficiente de viscosidad
0	1,007
4	1,021
8	1,035
12	1,052
16	1,068
20	1,085

Fuente: "Manual Técnico del agua" – Degremont 1979

➤ **Tensión Superficial**

Caracteriza una propiedad de las superficies que limitan dos fases. Se define como una fuerza de tracción que se ejerce en la superficie del líquido y tiende siempre a reducir lo más posible la extensión de dicha superficie. La tensión superficial del agua es 73×10^{-3} N/m a 18°C , es tal que provoca una ascensión capilar de 15 cm en un tubo de 0.1 mm de diámetro.

La adición de sales disueltas aumentan generalmente la tensión superficial, La presencia en el agua de algunos cuerpos (denominados tenso activos) disminuyen la tensión superficial.

➤ **Propiedades Eléctricas del agua**

Constante dieléctrica:

La constante dieléctrica del agua (E) del orden de 80, es una de las más elevadas que se conocen, por lo que el agua posee un alto poder ionizante, al ser así la mayoría de los sólidos iónicos se disuelven y disocian completamente.

Conductividad eléctrica del agua:

Definimos la conductividad eléctrica como la capacidad de un cuerpo de permitir el paso de la corriente eléctrica a través de sí.

En el caso específico de las aguas, existe una relación entre su conductividad y la cantidad de sólidos totales disueltos (STD), expresados en ppm, normalmente el factor es de 0.5 – 0.7; en un caso genérico podemos aplicar la tabla 3:

Tabla 3 Conductividad y STD

Conductividad a 25 °C ($\mu\text{S/cm}$)	partes sólidas disueltas (ppm)	TR (cm)
84	55.12	0.6563
447	300	0.6712
1,413	1,000	0.7078
1,500	1,050	0.70
8,974	7,608	0.8478
12,880	11,367	0.8825
15,000	13,455	0.8970
80,000	79,688	0.9961

Fuente: "Eutech Instruments" 2007

➤ Propiedades Ópticas

La transparencia del agua depende de la longitud de onda de la luz que la atraviesa. Los rayos ultravioletas pasan bien, pero los infrarrojos, tan útiles desde el punto de vista físico y biológico, apenas penetran en ella. El agua absorbe fuertemente el anaranjado y el rojo en el espectro visible, debiéndose a ello el color azul de la luz transmitida, así mismo esta propiedad se emplea para poder medir la turbidez del agua.

2.1.1 Tipos de Clasificación de aguas

Existen diferentes tipos de clasificación de aguas, ya sea esta por su naturaleza, por su grado de salobridad, según estándares o normas por cada país, según los usos, según la calidad microbiológica, etc.

Debido a la naturaleza universal del agua, la clasificación es bastante compleja, en vista de la materia del estudio podemos tratar de resumirla en los siguientes:

➤ **Clasificación de las aguas según su Fuente**

Según la naturaleza del agua podemos clasificarla en las siguientes:

Tabla 4 Clasificación de aguas según tipo de fuente	
Agua Superficial	Son las que proceden de los ríos, los lagos y los pantanos. Estas aguas para que resulten potables, deben someterse a un tratamiento que elimina los elementos no deseados, tanto las partículas en suspensión como los microorganismos patógenos. Estas partículas son fundamentalmente arcillas que el río arrastra y restos de plantas o animales que flotan en ella, a todo ello hay que sumar los vertidos que realizan las fábricas y las poblaciones.
Agua Subterránea	Son aquellas que proceden un manantial que surge del interior de la tierra o la que se obtiene de los pozos. Estas aguas presentan normalmente un grado de contaminación inferior a las superficiales, pero, en la mayoría de los casos, deben tener un tratamiento previo antes de ser aptas para el consumo humano o incluso industrial.
Agua de Mar	El agua de mar es la que se puede encontrar en los océanos y mares de la Tierra. Es salada por la concentración de sales minerales disueltas que contiene, entre las que predomina el cloruro sódico.
Agua de Nevados	Este tipo de agua parte de los glaciares, los cuales son una gruesa masa de hielo que se origina en la superficie terrestre por acumulación, compactación y re cristalización de la nieve, mostrando evidencias de flujo en el pasado o en la actualidad. Su existencia es posible cuando la precipitación anual de nieve supera la evaporada en verano, por lo cual la mayoría se encuentra en zonas cercanas a los polos, aunque existen en otras zonas montañosas.

Fuente: Elaboración propia

➤ **Clasificación de las aguas según su grado de salobridad**

La salobridad se puede expresar como su carga mineral y esta a su vez en sólidos Totales Disueltos (ppm) o en conductividad (us/cm).

Podemos clasificarlas en el siguiente rango:

Tabla 5 Clasificación del agua por su salobridad		
Agua Dulce	1,000	Este tipo de agua podemos encontrar en el agua proveniente de nevados o ríos.
Agua Ligeramente salobre	1,000 – 5,000	Este tipo de agua podemos encontrar principalmente en aguas subterráneas relativamente no cercanas a la costa.
Agua moderadamente salobre	5,000 – 15,000	Este tipo de agua es la confluencia de agua de mar y la que proviene de los ríos mediante infiltraciones.
Fuertemente salada	15,000 – 35,000	Este tipo de agua es el agua de mar filtrada en zonas costeras (pozo tipo playero)
Agua de mar	35,000	Este tipo de agua es el más abundante en la tierra, se encuentra en los océanos

Fuente: "Tecnologías alternas de desalinización del acuífero del bolsón del Hueco para el abastecimiento de agua potable a ciudad de Juárez, Chih., Mexico"

Autor: Ramiro Luján y Victoriano Garza Almanza

La salobridad también la podemos expresar según la conductividad (sea esta en us/cm o ms/cm), los factores de conversión de conductividad a sólidos totales disueltos (STD), son los expresados en la tabla 3

➤ **Clasificación de las aguas según los estándares nacionales**

En nuestro país la existente Ley de Recursos Hídricos 29338 promulgada el 31 de marzo del 2009 clasifica las aguas en diez clases, tal como se muestra en la tabla 6:

Tabla 6: Clasificación de agua según la Ley Peruana

Clases de agua según la Ley de Recursos Hídricos	
1	La de ríos y sus afluentes, desde su origen
2	La que discurre por cauces artificiales
3	La que se encuentra en las ensenadas y esteros
4	La que se encuentra en los humedales y manglares
5	La residual
6	La subterránea
7	La de origen minero medicinal
8	La geotermal
9	La atmosférica
10	La proveniente de la desalación

Fuente: Ley de Recursos Hídricos 29338 - Ver Anexo A

En nuestro caso particular de estudio, es clave identificar la clase de agua a tratar de acuerdo a la Ley 29338; por lo que emplearemos la figura 3 para un detalle más claro:

2119

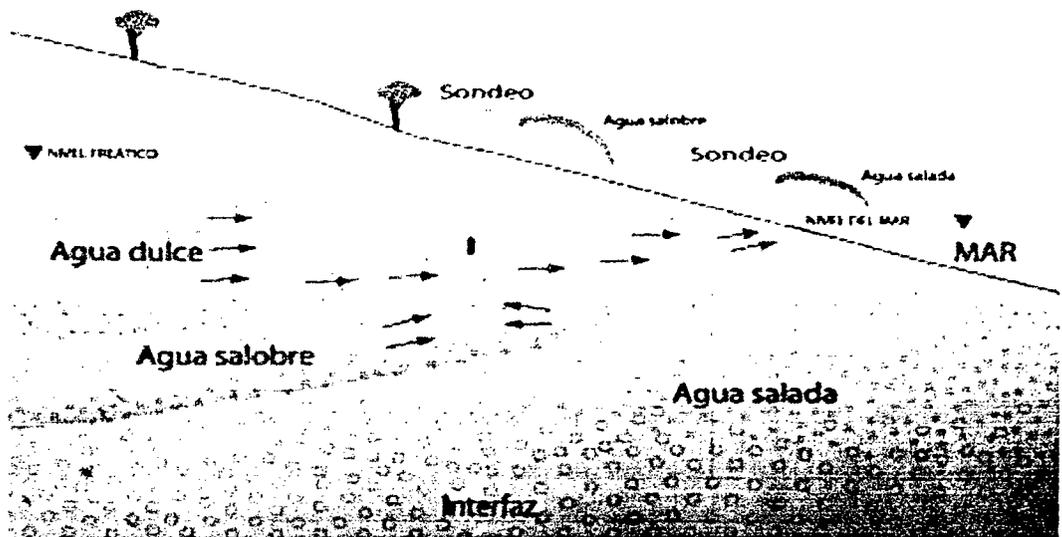


Fig. (3) **Esquema de formación del agua salobre subterránea**
 Fuente: "Las aguas salobres. Una alternativa al abastecimiento en regiones semiáridas – Autor: Instituto Geológico y Minero de España

La figura (3) nos muestra que el agua salobre subterránea es la mezcla de agua dulce (proveniente de glaciares) con el agua salada (proveniente de la filtración de agua de mar), aquí se entrelazan tanto la gravedad, como fuerza actuante en el desplazamiento de agua dulce, así como la operación de filtración del agua en la napa freática.

Por lo expuesto podemos concluir que al mencionar agua salobre subterránea nos referimos a un tipo de agua con un STD entre 1,000 – 15,000 ppm, que proviene de un acuífero subterráneo cercano a la costa y está reconocida en la Ley de Recursos Hídricos 29338 como agua de la clase 10.

2.1.2 Calidad de agua para la Industria

Además de las clasificaciones anteriores aún es posible separar los tipos de agua en función de su aplicación industrial. En nuestro caso particular nos interesa conocer las calidades de agua tanto para el concreto premezclado como para las pinturas acrílicas.

A. Calidad de agua para la producción de Concreto Premezclado

La calidad de agua requerida para este uso está amparado en las normas nacionales NTP 339.008:2006, el cual se detalla en la tabla 7:

Concentración máxima en el agua de mezcla combinada, ppm ^A		
A. Cloruro como Cl⁻, ppm		NTP 339.076
1. En concreto pretensado, tableros de puentes o designados de otra manera	500	
2. Otros Concretos reforzados en ambientes húmedos o que contengan aluminio embebido o metales diversos o con formas metálicas.	1000	
B. Sulfatos como SO₄, ppm	3000	NTP 339.077
C. Alcalis como (Na₂O + 0.658 K₂O), ppm	600	ASTM C 114
D. Sólidos Totales por masa, ppm	50 000	ASTM C 1603

^A es la abreviación de partes por millón

Fuente: Norma técnica INDECOPI 339.008:2006

B. Calidad de agua para producción de pinturas acrílicas

La calidad de agua para producción de pinturas acrílicas, depende directamente de la formulación necesaria para la producción de ésta, aunque en general se requiere un agua de baja carga mineral o baja conductividad. Para esta aplicación se ha considerado un requerimiento general de este tipo de industrias.

En nuestro caso la calidad solicitada es la siguiente:

Aspecto	Requerimiento	Unidad
Color	Límpido, libre de óxido, sarro, tierra y/o materia extraña	NA
Color	Translucido no debe presentar turbidez	NA
Olor	Inodoro	NA
Turbidez	< 1	NTU
Sólidos Suspendidos	< 5	ppm
Hierro	< 0.05	ppm
Zinc	< 0.3	ppm
Manganeso	< 0.05	ppm
Aluminio	< 0.05	ppm
Calcio	< 2	ppm
Cobre	< 0.1	
Silice Coloidal (como SiO ₂)	< 1	ppm
pH	5.5 – 7.0	
STD	<100	ppm

Fuente: Dpto. Control de calidad – Pinturas Anypsa

2.2 Alternativas de métodos para la desalinización de aguas salobres

La desalinización al ser una necesidad desde la antigüedad, el hombre ha realizado experimentos y pruebas para conseguir este objetivo, conforme a la tecnología y al entendimiento que tenía.

Las aplicaciones industriales de este proceso se realizaron recién a partir del siglo XIX, con la revolución industrial; empleando la tecnología de destilación por diferentes métodos, entre ellos la térmica, la solar y compresión de vapor. A comienzos del siglo XX se realizaron investigaciones en procesos de separación por membranas, entre ellos la ósmosis inversa y la electrodiálisis; estos últimos no tuvieron buena recepción en la época debido a que obtenían bajas recuperaciones y necesitaban una alta cantidad de energía, además la ciencia de tecnología de materiales aún no estaba plenamente desarrollada para la fabricación de membranas.

La energía tanto térmica como eléctrica era el insumo principal en la desalinización; En vista de ello, la subida importante de los precios del petróleo de 1973, marcó una evolución tecnológica, dentro del mismo proceso de destilación. El diseño de evaporadores de mayor rendimiento obligó a modificaciones técnicas que permiten elevar la temperatura de operación a la vez que se aumenta la superficie de transferencia, dando origen a evaporadores de mayor costo de inversión inicial pero de menor consumo energético. Puede decirse que hacia 1980, los procesos de destilación alcanzan su techo tecnológico.

En la búsqueda de métodos más rentables de desalinización, que no fueran empleando la quema de combustible para generar vapor, resurgió la separación por ósmosis inversa y electrodiálisis, aplicando la tecnología de polímeros en la búsqueda de materiales de membranas semipermeables que permitan la separación de sales.

En la tabla 9 se presentan los métodos de desalinización más estudiados a nivel mundial.

Tabla 9		Métodos de desalinización	
➤	Destilación efecto flash multietapa MSF	➤	Ósmosis inversa
➤	Destilación por múltiple efecto	➤	Electrodialisis
➤	Destilación por compresión de vapor		
➤	Destilación solar		
➤	Congelación		

Fuente: Elaboración propia – Datos de Avances Técnicos en la desalación de aguas. Revista Ambiente – Centro de Estudios Hidrográficos (CEDEX)

2.2.1. Métodos de cambio de fase

En los procesos de desalinización térmicos, la energía que se utiliza es la calorífica. Dentro de este grupo de mecanismos de desalinización diferenciamos, los que en el curso de su tratamiento, el agua cambia su estado pasando por una fase gaseosa (los de evaporación o destilación) y en los que el agua cambia de estado pasando por una fase sólida (cristalización). Los métodos se pueden clasificar en los siguientes:

A. Destilación efecto flash multietapa (MSF)

En este proceso el agua es introducida en una cámara a baja presión donde es calentada produciendo vapor mediante una evaporación súbita, que luego es condensada dando agua desalada. El agua residual que queda se introduce en otras cámaras con una presión más baja que la primera donde se repite el mismo proceso. Este proceso se repite durante una serie de etapas en las que se va disminuyendo la presión

En este proceso el agua salobre que se alimenta a la planta es precalentada a una temperatura de casi 100 C° en una cámara de vacío denominada "sector de calentamiento". Este calentamiento se efectúa con vapor de

calefacción que ingresa a dicha cámara y condensa sobre los tubos que conducen el agua salobre de alimentación a la planta.

La temperatura alcanzada por el agua salobre en esta primera etapa del proceso es llamada temperatura TOP, es normalmente de 90 a 110 C°.

El agua salobre así calentada pasa luego hacia otra cámara denominada primera etapa. La presión en esta cámara es menor que en la anterior, siendo la correspondiente a la de saturación del agua de alimentación que inicia inmediatamente el proceso de ebullición. El vapor generado condensa sobre los tubos que conducen el agua salobre de alimentación a la planta y que atraviesan esta cámara.

El condensado es colectado y enviado a la etapa siguiente donde se repite el proceso de evaporación – condensación. Este proceso se repite en varias etapas más, con menor presión relativa entre cada una de ellas, obteniéndose el agua desalinizada como condensado de la última etapa.

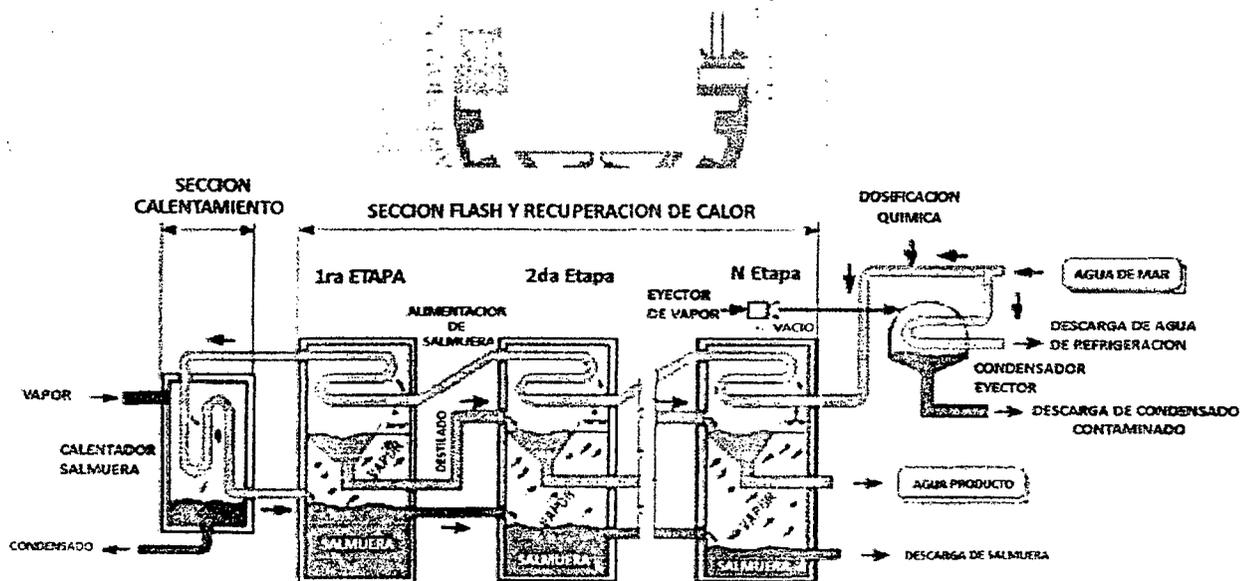


Fig. (4)

Destilación efecto Flash Multietapa (MSF)

Fuente: "Evolución global de la capacidad instalada de plantas desaladoras"-
Autor: Francisco Urrutia

B. Destilación por múltiple efecto

La destilación por múltiple efecto (MED) utiliza el mismo principio que el proceso MSF, la diferencia principal entre el proceso MED y el MSF radica en la forma en que se lleva a cabo la evaporación. En las plantas de MED se utilizan varios evaporadores del tipo de película delgada, con los cuales se logran mejor coeficientes de transferencia de calor que los que se pueden obtener en las plantas de MSF donde se produce la evaporación súbita en forma directa.

En el proceso MED, el agua salobre ingresa al primer efecto; el cual es en sí una cámara de vacío, necesaria para disminuir la temperatura de ebullición.

Se hace ingresar a esta cámara vapor de agua en un serpentín, de modo tal que el agua salobre o marina que ingresa al primer efecto se calienta hasta su punto de ebullición, produciéndose su evaporación parcial, la cual luego es llevada a través de tuberías a la segunda cámara con la finalidad de aprovechar este calor.

Mientras que la salmuera del primer efecto que se quedó en el fondo, es bombeada a la segunda cámara en donde se aplica un intercambio de calor con las tuberías que contienen el vapor de la primera cámara.

Tal cesión de calor hace que el citado vapor se condense, pasando a formar parte del agua producto o desalinizada; y el nuevo vapor producido en la segunda cámara se desplaza a la siguiente, en donde prosigue el ciclo de desalinización.

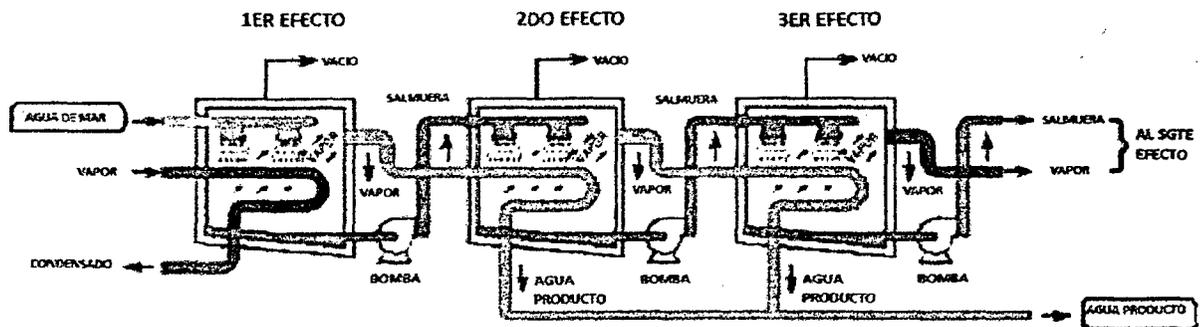


Fig. (5) Destilación por Múltiple Efecto (MED)

Fuente: "Evolución global de la capacidad instalada de plantas desaladoras"-
 Autor: Francisco Urrutia

C. Destilación por compresión de vapor

En la destilación con compresión de vapor (CV) el calor necesario para llevar el agua salobre a ebullición se obtiene directamente del vapor que es removido del evaporador y reinyectado en la primera etapa, luego de ser comprimido para elevar su temperatura de saturación. La compresión del vapor puede ser efectuada por un compresor mecánico o por un termocompresor. (CMV-CTV).

La compresión mecánica de vapor o CMV trabaja empleando la energía que se entrega al sistema, a través del compresor, determina la magnitud del aumento de temperatura y la eficiencia de la planta. En una planta eficiente, con bajo ingreso de energía, la diferencia de temperatura para la evaporación es pequeña, lo cual requiere una gran área superficial para la evaporación y por tanto altos costos de capital. Como con la mayoría de los otros procesos, los costos de capital y los costos operacionales deben equilibrarse.

Durante la puesta en marcha de la planta se requiere energía adicional para llevar el agua salobre a la temperatura de ebullición. Esto normalmente se efectúa utilizando vapor externo de baja presión. No obstante, una vez alcanzada la temperatura de operación, el mayor ingreso de energía al

sistema es a través del compresor y solamente se requiere vapor para reposición de pérdidas (make-up). El consumo de energía del compresor depende del caudal de vapor, la diferencia de temperatura en el evaporador y la temperatura de evaporación.

El proceso de compresión térmica de vapor (CTV) es similar al CMV. Las plantas incluyen evaporadores con tubos verticales, tubos horizontales y de platos, y mejoran la evaporación a través de uso de las configuraciones del tipo de película delgada ascendente y rociado. Dado que el eyector de vapor es menos eficiente que un compresor centrífugo, las plantas de CTV casi siempre se construyen con muchos efectos para lograr eficacias globales razonables.

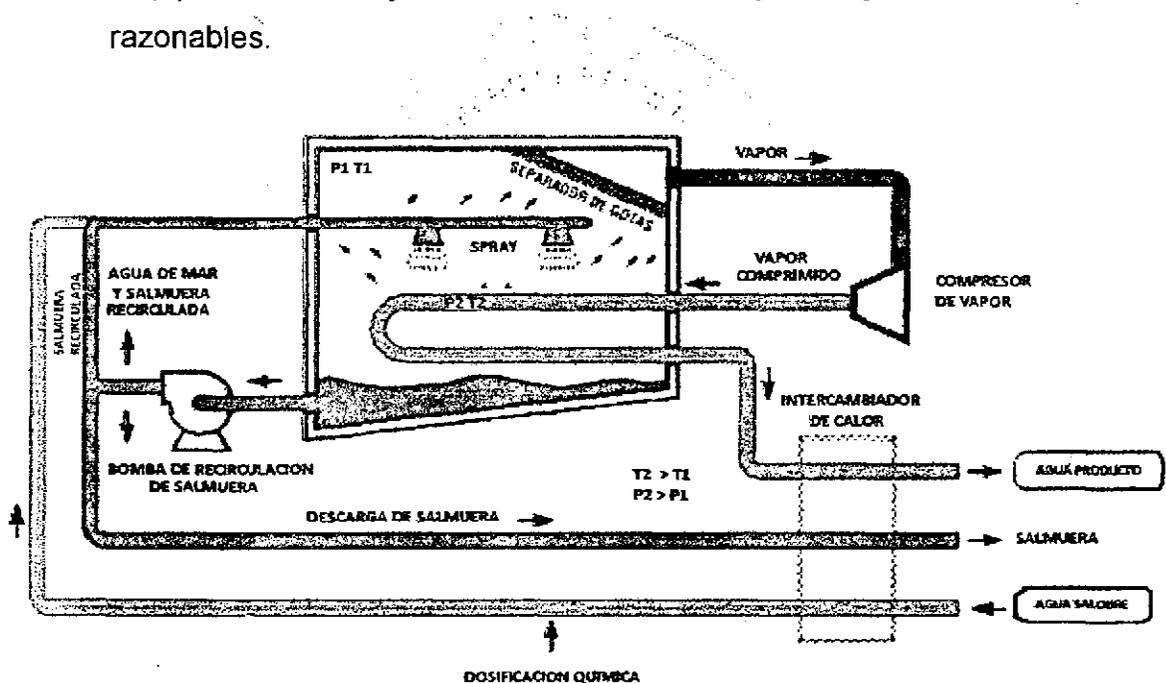


Fig. (6) Destilación por compresión de vapor

Fuente: "Evolución global de la capacidad instalada de plantas desaladoras"-
 Autor: Francisco Urrutia

D. Destilación solar

Se basa en la duplicación del proceso hidrológico natural, el sol calienta recipientes llenos de agua salina que están cubiertos por una lámina transparente, que permite el paso del calor que irradia al sol. El sol calienta

al agua que llega a la lámina donde se condensa y es dirigida mediante canales a un depósito de agua desalinizada.

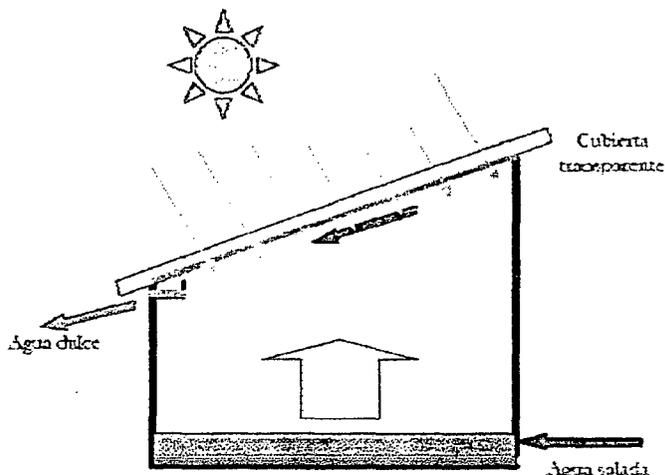


Fig. (7) Destilación solar

Fuente: "Destilador de agua solar. Alternativa para potabilizar agua en zonas rurales"
Autor: Italia Chinappi Ciccólella

E. CONGELACIÓN

Este proceso consiste en congelar el agua y recoger los cristales de agua pura formados para fundirlos y obtener agua dulce independientemente de la concentración del agua inicial. Aunque pueda parecer un proceso sencillo, los problemas de adaptación hacen que su implantación gran escala sea complicada, debido al aislamiento térmico necesario para mantener el frío.

Además los mecanismos de separación de los cristales de hielo deben mejorarse, esta tecnología aún se encuentra en estudio.

La congelación tiene la ventaja del bajo calor latente de congelación comparado al de la vaporización:

Congelación: 80 cal/g a 0°C;

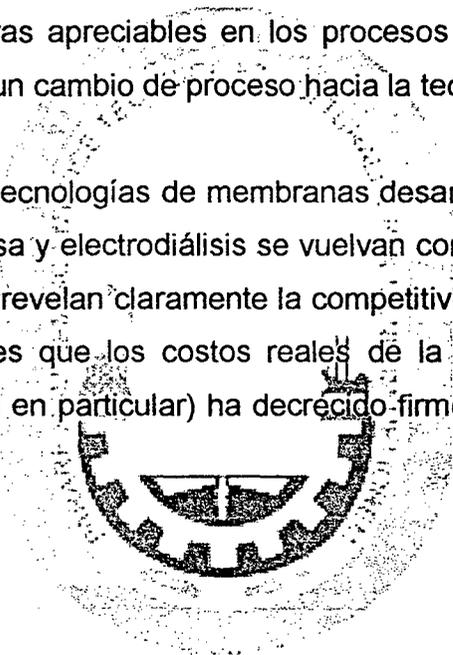
Vaporización: 540 cal/g a 100 °C.

2.2.2. Métodos de membranas selectivas

El desarrollo comercial de los métodos de membranas selectivas para la retención de solutos se desarrolló desde hace más de 50 años, aunque existían limitantes tecnológicos como la selección adecuada del material semipermeable. En la figura 8 se observa los procesos de membranas y su tamaño de remoción de partículas.

La crisis energética originó una respuesta de distintas industrias en las mejoras de todos sus procesos. Específicamente, en la desalinización se buscó reducir costos en la tecnología MSF. Pero a este tipo de tecnología ya no cabían mejoras apreciables en los procesos de evaporación, es por lo que se produce un cambio de proceso hacia la tecnología de membranas.

Las mejoras en tecnologías de membranas desarrolladas hacen posible que la ósmosis inversa y electrodiálisis se vuelvan comercialmente rentables, las cifras mundiales revelan claramente la competitividad creciente. La razón de esta tendencia es que los costos reales de la tecnología de membranas (ósmosis inversa en particular) ha decrecido firmemente durante las últimas dos décadas.



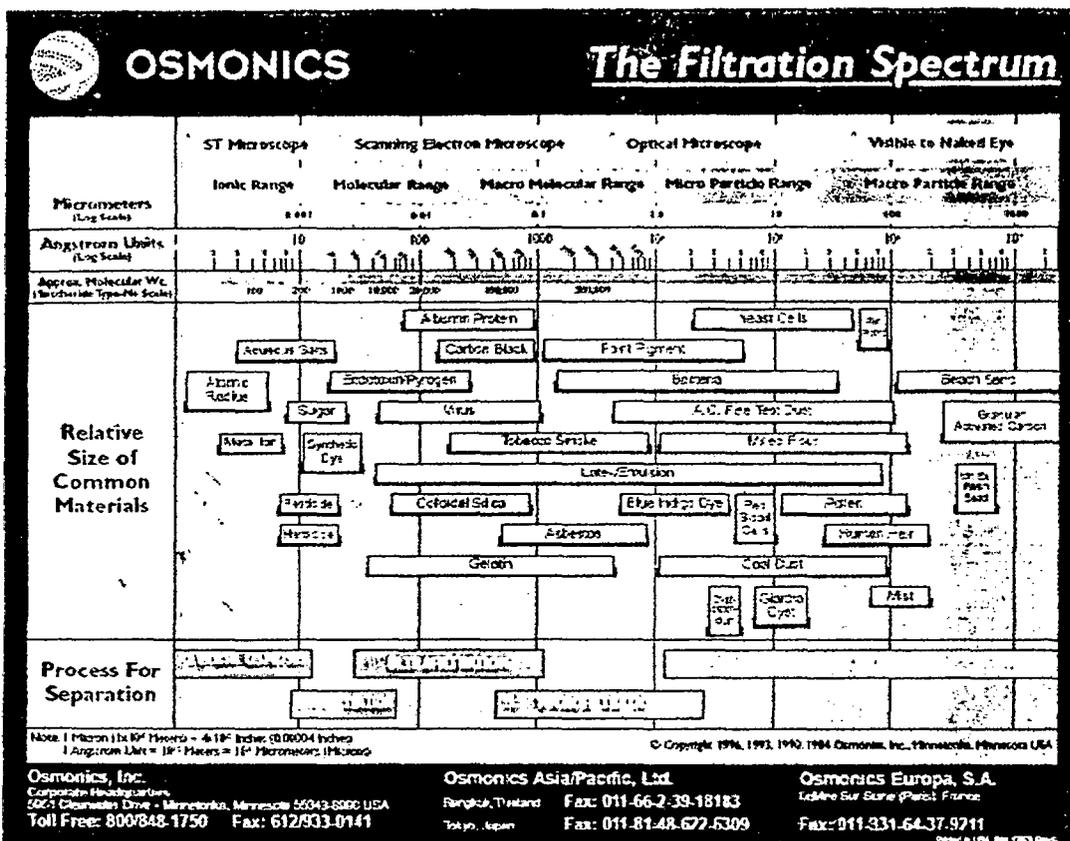


Fig. (8)

Espectro de filtración

Fuente: Osmonics



A. Tecnología de membranas de ósmosis inversa.

El objetivo principal de un sistema de ósmosis inversa es la separación de sales y bacterias del agua, entre otras sustancias contaminantes. La ventaja más importante de esta técnica frente a un intercambio iónico o electrodiálisis, es su capacidad de eliminar un 99.9% de las sales, tal como se muestra en la tabla 10. También rechaza el 99.9 % de los virus y bacterias presentes en el agua.

Tabla 10**Rechazo de elementos por membranas de ósmosis inversa**

Elemento	Símbolo	Rechazo (%)	Elemento	Símbolo	Rechazo (%)
Sodio	Na ⁺	94 - 96	Cloruro	Cl ⁻	94 - 95
Calcio	Ca ⁺⁺	96 - 98	Bicarbonato	HCO ₃ ⁻	95 - 96
Magnesio	Mg ⁺⁺	96 - 98	Sulfato	SO ₄ ⁻²	95
Potasio	K ⁺	94 - 96	Nitrato	NO ₃ ⁺	85 - 95
Hierro	Fe ⁺⁺	98 - 99	Fluoruro	F ⁻	94 - 96
Manganeso	Mn ⁺⁺	98 - 99	Silicato	SiO ₂ ^{-2 *}	80 - 95
Aluminio	Al ⁺⁺⁺	99	Fosfato	PO ₄ ⁻³	99
Amonio	NH ₄ ⁺ *	88 - 95	Bromuro	Br ⁻	94 - 96
Cobre	Cu ⁺⁺	98 - 99	Borato	B ₄ O ₇ ⁻²	35 - 70
Niquel	Ni ⁺⁺	98 - 99	Cromato	CrO ₄ ^{-2 *}	90 - 98
Zinc	Zn ⁺	98 - 99	Cianuro	CN ^{-4 *}	90 - 95
Estroncio	Sr ⁺⁺	96 - 99	Sulfito	SO ₃ ⁻²	98 - 99
Cadmio	Cd ⁺⁺	96 - 98	Tiosulfato	S ₂ O ₃ ⁻²	99
Plata	Ag ⁺	94 - 96	Ferrocianuro	Fe(CN) ₆ ⁻³	99
Mercurio	Hg ⁺⁺	96 - 98			
Arsenico	As ⁺⁺⁺	90 - 95			
Bario	Ba ⁺⁺	92 - 95			

*Dependiente del pH

Fuente: "Tratamiento de aguas industriales"

Autor: Francisco Vergara Yayon 1976

Sus membranas tienen un tamaño de poro más pequeño que cualquier otro proceso de filtración por membranas, esto permite a los sistemas de ósmosis inversa la retención de micro solutos, iones incluidos, con un tamaño inferior a 10 Å.

La presión de trabajo para agua poco salobre es de unos 6 bar y puede llegar a unos 80 bar para el tratamiento de agua de mar.

El proceso de desalinización por ósmosis inversa es un proceso dirigido por presión, su fundamento es desarrollar la presión mínima (Presión Osmótica) necesaria para poder separar el solvente del soluto a través de una membrana semipermeable, ver figura 9.

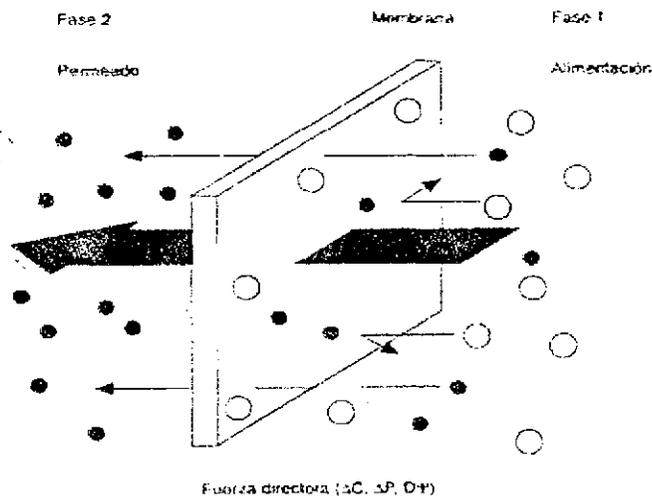


Fig. (9) Membrana semi-permeable

Fuente: [APTEL, P., BUCKLEY, C, 1998]

En el proceso de la separación de solutos por ósmosis inversa es necesario definir antes un pre-tratamiento, es decir operaciones previas antes de pasar a las membranas. Para el agua salobre se requiere las operaciones de desinfección, filtración, dosificación de anti-escalante, dosificación de metabisulfito de sodio. El tipo de pre tratamiento se determina luego del análisis del agua fuente y realizando ciertos cálculos de precipitación, que señalaremos más adelante.

Luego que el agua ha sido pre-tratada, se eleva la presión lo suficiente para vencer la presión osmótica de la solución a tratar (agua salobre o agua de mar) y atraviesa las membranas, estas separan la línea de entrada en dos flujos, la línea de permeado o agua osmotizada y la línea de rechazo o agua concentrada.

La línea de permeado contiene entre 2 – 3 % de la carga mineral que entró a la membrana, si el requerimiento de agua es más exigente en la carga mineral podemos considerar post-tratamientos, el cual como se menciono depende del requerimiento de la calidad de agua final

B. Tecnología de membranas de electrodiálisis.

La electrodiálisis (ED) se introdujo comercialmente a principios de los años sesenta, unos diez años antes que la ósmosis inversa. Su desarrollo supuso la disponibilidad de desalar el agua salobre a costos razonables y se implantó rápidamente. La electrodiálisis depende de los siguientes principios generales:

- La mayoría de las sales disueltas en el agua son iónicas, cargadas positivamente (cationes) o negativamente (aniones)
- Estos iones son atraídos hacia electrodos con carga eléctrica contraria.
- Las membranas se diseñan y construyen para permitir el paso selectivo bien de aniones o de cationes

Proceso de electrodiálisis (ED)

La electrodiálisis es una técnica basada en el transporte de iones a través de membranas selectivas bajo la influencia de un campo eléctrico. Esta técnica ha probado su viabilidad en la desalinización de agua salobre, la desalinización de aminoácidos y otras disoluciones orgánicas, en el tratamiento de efluentes y/o en el reciclado de flujos de procesos industriales y en la producción de sal.

En una pila de electrodiálisis convencional, se sitúan alternativamente membranas de intercambio catiónico y aniónico entre el cátodo y el ánodo. Cuando se aplica una diferencia de potencial entre ambos

electrodos, los cationes se mueven hacia el cátodo y los aniones hacia el ánodo. Los cationes migran a través de las membranas de intercambio catiónico (que tienen grupos negativos fijados) y son retenidos por las membranas de intercambio aniónico. Por otra parte, los aniones migran a través de las membranas de intercambio aniónico (que tienen grupos positivos fijados) y son retenidos por las membranas de intercambio catiónico. Estos movimientos producen el aumento en la concentración de iones en algunos compartimentos (celda de concentración) y la disminución en los adyacentes (celda de dilución).

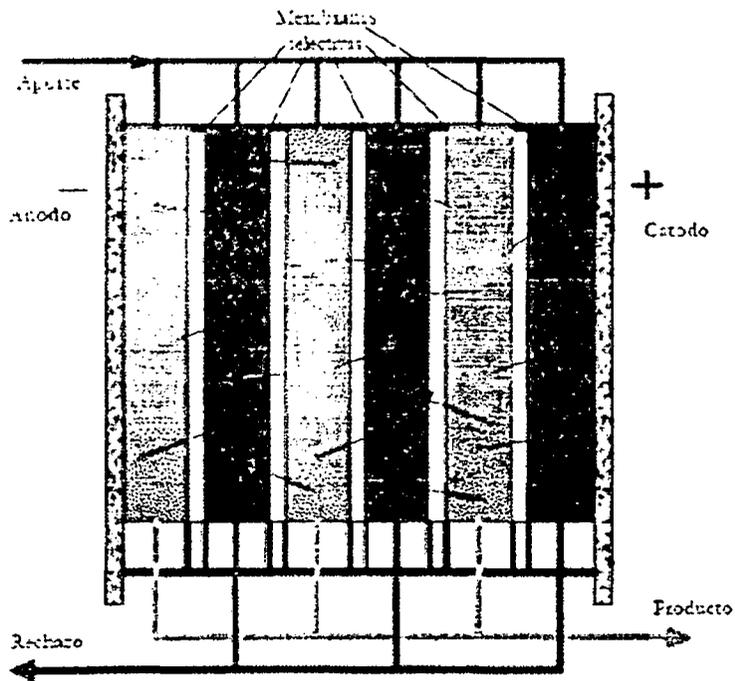


Fig. (10)

Esquema de la electrodiálisis

Fuente: "Curso de desalación de aguas, nuevas tecnologías y uso de energías renovables" – Diapositiva 16

Características de los módulos de electrodiálisis

Una unidad de electrodiálisis debe contener los siguientes elementos básicos:

- Pre tratamiento.
- Pilas de membranas.

- Bomba para circulación a baja presión.
- Potencia eléctrica para corriente continua (con rectificador).
- Sistema de limpieza de las membranas.

Ventajas de la Electrodialisis:

- Alta recuperación (más producto y menos salmuera)
- Consumo energético proporcional a la concentración de sales.
- Capacidad para tratar agua con mayor concentración de sólidos en suspensión que la ósmosis inversa.
- Bajo consumo de productos químicos.

Inconvenientes de la electrodialisis

- La electrodialisis **sólo puede separar sustancias que están ionizadas.**
- Su utilidad y rentabilidad está sólo especialmente indicada en el tratamiento de aguas salobres o reutilización de aguas residuales.
- Su consumo específico y de mantenimiento es comparable en muchos casos a la ósmosis inversa.

2.3 Clasificaciones y configuraciones de las operaciones de membranas de ósmosis inversa.

2.3.1 Tipos de membranas

Las membranas semipermeables se han conocido desde hace mucho tiempo, las biológicas fueron las primeras en ser reconocidas como tal, durante la industrialización se procedió a desarrollar membranas sintéticas para diferentes aplicaciones.

Así mismo, las membranas comenzaron a estudiarse desde el punto de vista científico a finales del siglo XIX. Sin embargo los comienzos de su fabricación industrial y utilización como técnica debemos situarlos a

mediados del siglo XX. También a partir de mediados de siglo comienza la comprensión de los mecanismos de transporte de las membranas y su formación. Se observa además que el desarrollo de la fabricación de membranas ha estado ligado al desarrollo de los conocimientos sobre materiales.

En la figura 11 se observa el desarrollo para poder llegar a la clasificación de tipo de membranas por preparación.

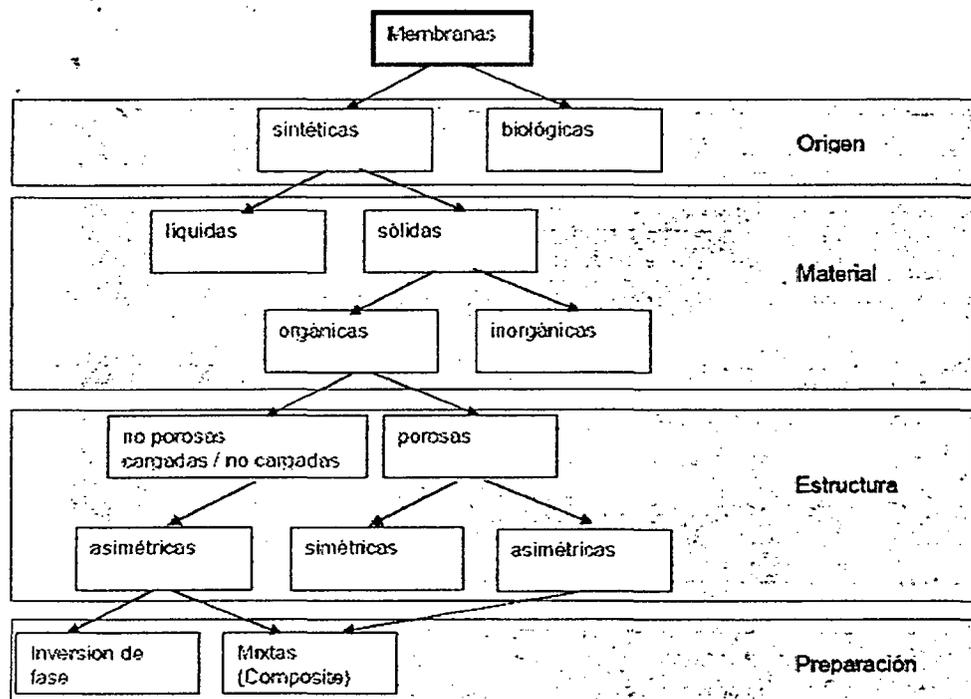


Fig. (11) Evolución de la clasificación de las membranas

Fuente: "Curso de desalación de aguas, nuevas tecnologías y uso de energías renovables 2004"

Las membranas de desalación cuya fuerza actuante principal es la presión pueden agruparse en dos clases según su preparación: las membranas asimétricas (producidas por técnicas de inversión húmeda) y las membranas de capa delgada compuestas.

A. Membranas de inversión de fase.

Se obtienen estructuras porosas especiales cuando en el vertido de soluciones de polímeros se dan separaciones de fase, como en el caso de los sistemas de masa con un vacío de mezcla, que son posibles en el diagrama de fase. Pero con ello se sintetizan membranas de un solo material con una capa separadora relativamente gruesa y una capa inferior de porosidad gruesa. La representante más conocida es la membrana de acetato de celulosa.

En un proceso de inversión de fase, una disolución de polímero en un disolvente orgánico (colodión), que ha sido depositada sobre un soporte, sufre una precipitación para dar lugar a dos fases, una fase sólida y una líquida. La fase sólida constituye la membrana con sus poros rellenos por la fase líquida. La precipitación puede ser inducida por varias maneras.

Las membranas de ósmosis inversa asimétrica de acetato de celulosa han estado en uso desde el comienzo de la tecnología de membranas en los setenta, están todavía comercializándose a pesar de ciertas limitaciones. Este tipo de membranas puede tolerar una exposición continua a bajos niveles de concentración residual de cloro (0.1 – 0.5 ppm a 25 °C), lo que es importante en ciertas aplicaciones. Son, sin embargo, muy susceptibles a la hidrólisis, un proceso que se acelera cuando se trabaja a un rango de pH de 4 – 6.5. El material tiene un bajo umbral de temperatura (Max. 30°C), principalmente debido a la hidrólisis y flujo visco elástico. El acetato de celulosa es también susceptible de degradación biológica.

B. Membranas mixtas o “compuestas”

En estas membranas los materiales que componen la superficie activa son distintos de los del material de soporte. Estas membranas se producen por laminación de la capa superficial activa sobre la capa soporte (ej. Polisulfona).

La capa activa o película de membrana es un polímero o combinación de polímeros formando una capa compuesta de variadas y diversas películas o una capa única delgada pelicular.

Las membranas compuestas poseen una estructura asimétrica constituida por un soporte poroso, que puede haber sido fabricado por inversión de fase, junto una capa superficial densa de otro material. La gran ventaja de este tipo de membranas sobre las anteriores es que cada capa puede ser optimizada por separada especialmente la capa densa que se puede realizar más uniforme y con menos imperfección.

Esta clase de membranas se considera generalmente como una mejora de diseño de los materiales de membranas, en los que una capa soporte superficial activa puede ser aparejada con una caja soporte de óptima porosidad. Esta combinación mejora la productividad de la membrana, al mismo tiempo que mantiene las propiedades deseables de rechazo presentadas por la activa y densa capa superficial.

Entre las membranas asimétricas fabricadas a partir de polímeros sintéticos la poliamida ha resultado la más adecuada debido a que su capacidad de rechazo de sales es superior al del acetato de celulosa (95%-98%). Además se logró obtener mayores productividades, ya que este tipo de membranas pueden ser mucho más delgadas, debido a la mayor resistencia mecánica de las poliamidas. Este factor es vital en la durabilidad de las membranas porque se reduce también el efecto de compactación de las mismas.

Las poliamidas tampoco son susceptibles a la degradación biológica y a la hidrólisis, aunque presentan el mismo problema que el acetato de celulosa con los oxidantes fuertes.

Comercialmente podemos encontrar membranas de poliamida para dos aplicaciones, alta y baja presión, la diferencia principal es el requerimiento de energía y la calidad agua producto. Se resume en la tabla 11:

Tabla 11		Tipos de membranas poliamida por su aplicación	
Membrana de Alta Presión	Poliamida	Relativamente Superior	Superior al promedio
Membrana de Baja presión	Poliamida	Relativamente Inferior	Promedio

Fuente: "Elaboración propia"

La selección de las membranas de alta o baja presión está relación a la calidad de agua fuente, calidad de agua requerida y costo de energía.

En forma aplicativa las membranas de alta presión se emplean para obtener la menor conductividad posible en el permeado debido a que posee como característica un mayor porcentaje de rechazo por elemento que las membranas de baja presión, aún cuando esto signifique un costo superior de la energía, debido a la presión de trabajo requerida.

Las membranas de baja presión como su nombre lo indica operan a una menor presión de trabajo, pero poseen un menor porcentaje de rechazo por elemento así también su costo energético es inferior. La importancia del tipo de selección adecuada de membrana radica en el costo energético que se requiere para la presión de trabajo.

En el Anexo C se muestra se muestra los tipos de membranas comerciales de la marca Toray.

2.3.2 Características de las membranas

Las características ideales de una membrana para desalinización por ósmosis inversa, sean de alta presión o baja presión, son una alta resistencia mecánica con un excelente rechazo de sales, estas características son ampliamente evaluadas, así mismo como características de operación tenemos el bioensuciamiento, resistencia a los oxidantes y la concentración – polarización. A continuación se detalla cada una.

A. Bioensuciamiento

El bioensuciamiento es esencialmente un ensuciamiento orgánico originado por el crecimiento de bacterias y microorganismos en el borde de la membrana. (Ver tabla 12).

Tabla 12/ Bioensuciamiento (Efecto – Descripción)	
Disminución de caudal de membrana	Pérdida gradual de agua debido a la acumulación de biocapa.
Reducción del rechazo de soluto *	Resulta del aumento de oportunidad para la concentración – polarización en el interior de la biocapa de la membrana, que tiene una consistencia de hidrogel; puede también resultar de la biodegradación de la membrana.
Aumento de la incrustación mineral	La formación de biocapa aumenta la oportunidad de incrustación mineral, debido al incremento de concentración de polarización o por proporcionar puntos de nucleación para el crecimiento de precipitado.
Incremento de la presión diferencial a través del módulo	Resulta del aumento del tiro fraccional del fluido (perdidas de energía) asociado con la formación de biocapa superficial, también está causado por el bloqueo de espacios del canal de alimentación debido al crecimiento biológico, el efecto puede ser severo; el efecto puede ser o no reversible.
Contaminación del permeado	Causado por desprendimiento celular y/o de biomasa de la superficies del permeado de las membranas, incluyendo fibras de poliéster, líneas de aglutinado, materiales de colección de permeado, etc.
Biodegradación de la membrana	Causada por hidrólisis enzimática directa de los polímeros de la membrana o por pH extremos asociados con micro colonias sobre la superficie de las membranas; puede ocurrir rápidamente bajo circunstancias fisiológicamente favorables (por ejemplo Temperaturas cálidas, nutrientes adecuados) el efecto
Biodeterioro de los componentes del modulo	Normalmente resulta de la biodegradación de la línea de aglutinado
Reducción de tiempo de vida de la membrana	Resulta de una combinación de todos los factores anteriores; aplicaciones inadecuadas o excesivas de biocida y excesiva frecuencia de limpieza contribuyen a acortar la vida de las membranas

Fuente: "Tratamiento del agua por procesos de membrana"

Autor: Peter Odendaal

B. Resistencia a los oxidantes

Debido a la naturaleza de las membranas éstas presentan poca o nula resistencia a oxidantes fuertes, ejm: cloro, permanganato de potasio, etc. Como se mencionó las membranas de acetato de celulosa por inversión de fase presentan mayor resistencia a los oxidantes pero es muy susceptible a la hidrólisis y al bioensuciamiento; con las membranas de poliamidas, actualmente las más comerciales, se tiene menor resistencia a los oxidantes pero no presenta el fenómeno de la hidrólisis.

C. Concentración de polarización

En un proceso de membrana donde tenga lugar cierta separación, el soluto es llevado hacia la membrana en mayor grado y por tanto aumenta la concentración de soluto cerca de la membrana. En zonas con turbulencia el soluto es homogenizado rápidamente a la concentración del seno del fluido (mezcla completa), mientras que en zonas incluidas en la capa límite, el aumento de concentración de soluto cerca de la membrana origina un flujo difusivo de soluto en sentido contrario al flujo convectivo buscando disminuir la concentración.

Cuando parte el proceso de una situación estática predomina el flujo convectivo, pero transcurrido un cierto tiempo se habrá acercado a las condiciones estacionarias en las que el flujo convectivo y el difusivo de soluto se habrán igualado; se tendrá entonces una concentración estacionaria de soluto en las cercanías de la membrana C_{am} superior a la existente en el seno del fluido C_a . Este fenómeno es conocido como concentración por polarización y la relación C_{am}/C_a es el módulo de concentración por polarización que llamaremos factor Beta.

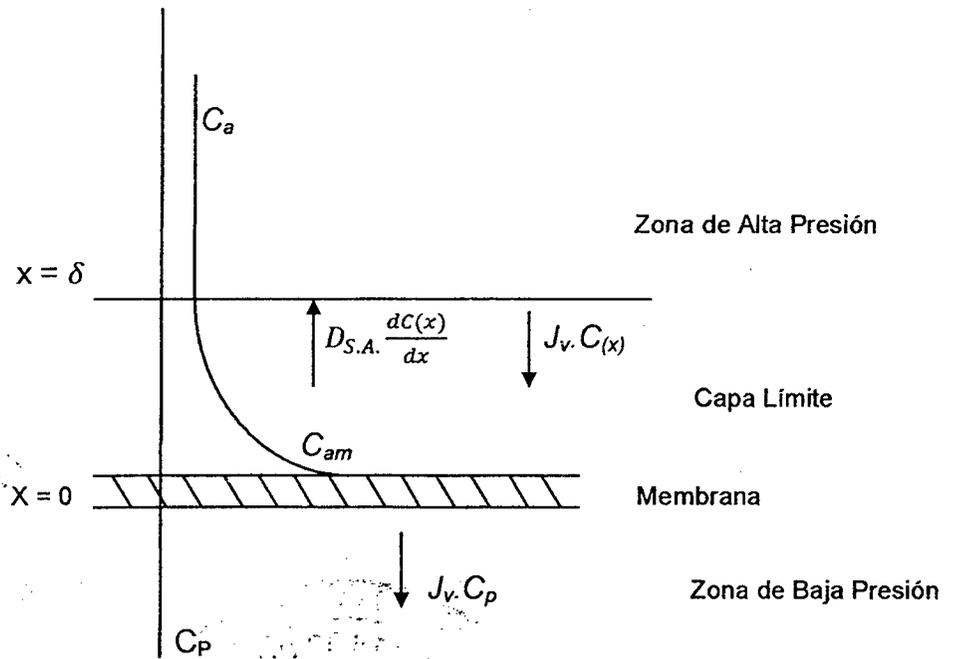


Fig. (12)

Perfil de Concentraciones estacionario en la polarización por concentración

Fuente: "Tratamiento del agua por procesos de membrana"
 Autor: Peter Odendaal

Mediante la figura 12 podemos establecer la siguiente relación:

$$J_v \cdot C_p = J_v \cdot C(x) = D_{sa} \cdot \frac{dC(x)}{dx} \quad Ec(1)$$

Condiciones Límite:

$$X = 0 \rightarrow C(x) = C_{am}$$

$$X = \delta \rightarrow C(x) = C_a$$

Resolviendo:

$$k_i = \frac{D_{sa}}{\delta} \quad Ec(2)$$

$$\frac{C_{am} - C_p}{C_a - C_p} = \exp\left(\frac{J_v}{k}\right) \quad Ec(3)$$

El rechazo de soluto de la membrana puede expresarse:

$$R = \frac{C_{am} - C_p}{C_{am}} = 1 - \frac{C_p}{C_{am}} \quad \text{Ec. (4)}$$

Desarrollando la ecuación (3) y (4) obtenemos:

$$\frac{C_{am}}{C_a} = \frac{\exp\left(\frac{J_v}{K}\right)}{R + (1 - R) \cdot \exp\left(\frac{J_v}{K}\right)} \quad \text{Ec. (5)}$$

- J_v = Flujo de agua
- R = Rechazo de soluto de la membrana
- C_a = Concentración en el rechazo
- C_{am} = Concentración en la capa limite
- C_p = Concentración en el permeado
- D_{sa} = Coeficiente de difusión
- δ = Espesor de la capa limite
- K = Coeficiente de transferencia de masa

2.3.3. Configuración modular de las membranas

Los módulos son la unidad de operación en la que se disponen las membranas, los tipos de módulos están basados en el adecuado soporte, la mayor área de membrana posible por unidad de volumen y el menor espesor posible.

Los cuatro tipos principales de módulos que se encuentran en el mercado son los siguientes:

A. Módulos de placas

Fueron desarrollados tomando como referencia los denominados filtros prensa, en los cuales la membrana es soportada por un plato poroso y liso. Estos están alternados con marcos espaciadores provistos de los respectivos canales para los flujos de alimentación, permeado y salmuera. Su principal fortaleza es la facilidad para poder desmontar la unidad y poder realizar su limpieza o cambio manual de membranas.

Las desventajas iniciales que presentó este tipo de modulo son:

- ✓ Las membranas debido al manipuleo excesivo en el montaje y desmontaje fallaban con frecuencia debido a su delicada naturaleza.
- ✓ Altos costos de mantenimiento al ocurrir fallas en éstas.
- ✓ La relación entre el área de la membrana y el volumen ocupado es baja, ocasionando que los equipos fueran voluminosos.

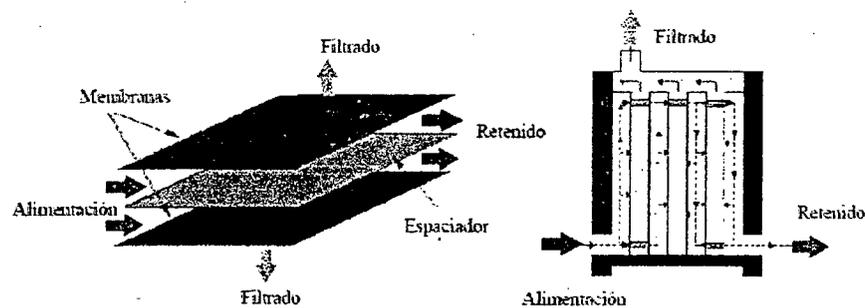


Fig. (13) Módulos de placas

*Fuente: "Estudio de la ultrafiltración de proteínas con membranas cerámicas
Autor: Rubén Ibañez Lorente*

B. Módulos tubulares

Para esta clase de módulos se tiene la membrana moldeada alrededor de la pared interna de un tubo soporte poroso, estos tubos pueden colocarse en el interior de mangas de acero inoxidable o PVC denominados "Housings", se considera que el agua de alimentación entra por el interior

del tubo y el permeado se obtiene en la pared externa de este y el concentrado se recoge en la parte final del tubo.

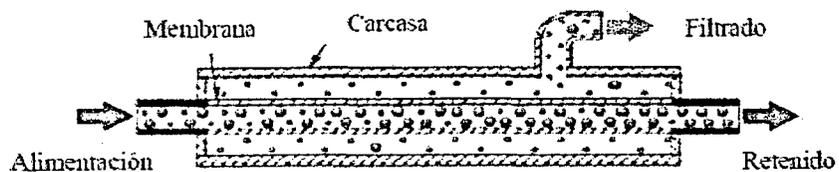


Fig (14) Módulos tubulares

Fuente: "Estudio de la ultrafiltración de proteínas con membranas cerámicas"
Autor: Rubén Ibañez Lorente

C. MÓDULOS DE FIBRAS HUECAS

La configuración de fibra fina hueca usa la membrana en la forma de fibras huecas que son extrusadas del material celulósico o del material polimérico. La unidad del módulo de membrana del tipo de fibra hueca ofrece un área mayor de membrana por unidad de volumen, lo cual hace que los sistemas resulten más compactos.

No obstante, en esta configuración el flujo específico de agua por unidad de área de membrana es relativamente bajo (debido a la muy alta área superficial de las fibras) pudiendo resultar laminar. Por lo tanto, la polarización de la concentración en la superficie de la membrana es alta y debe cuidarse la formación de incrustaciones y/o ensuciamiento frecuente en la membrana. Las membranas del tipo de fibra hueca requieren que el agua de alimentación tenga muy baja concentración de sólidos totales en suspensión (STS).

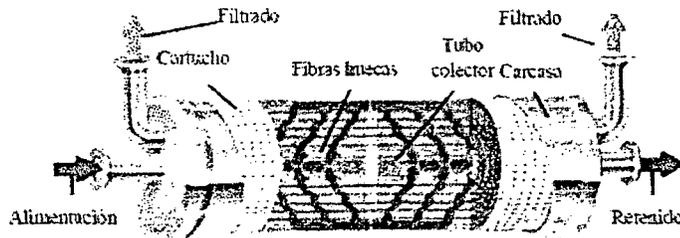


Fig. (15) Módulo de fibras huecas

Fuente: "Estudio de la ultrafiltración de proteínas con membranas cerámicas"
 Autor: Rubén Ibañez Lorente

D. MODULOS ESPIRALES

Los elementos en arrollamiento espiral se fabrican en membranas de hoja plana. Un elemento típico de espiral consta de una serie de envolventes agregadas sobre un tubo central que recolecta la corriente de permeado.

Un envolvente está formado por arrollamiento de membrana plana sobre un espaciador o separador de la corriente de permeado. La hoja misma, consta de, al menos, dos capas de una película de membrana activa no porosa y una membrana de soporte porosa. La capa activa está en la parte exterior de la película. El espaciador mencionado puede ser una malla o bien un separador corrugado. La alimentación fluye paralela al eje del tubo de permeado. Este espaciador no solo mantiene abierto un canal de flujo para alimentación, sino que también cumple la muy importante función de inducir turbulencias y reducir la concentración de polarización.

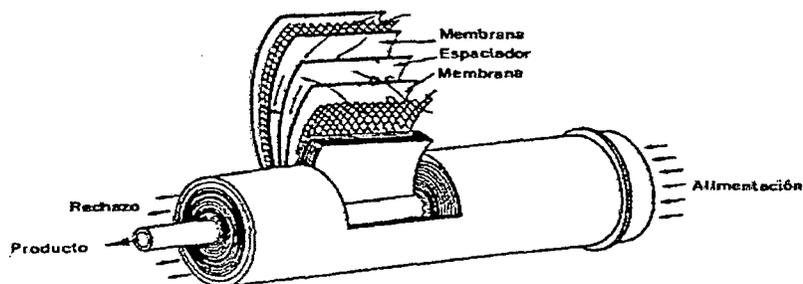


Fig. (16) Módulo espiral

Fuente: "Estudio de la ultrafiltración de proteínas con membranas cerámicas"
 Autor: Rubén Ibañez Lorente

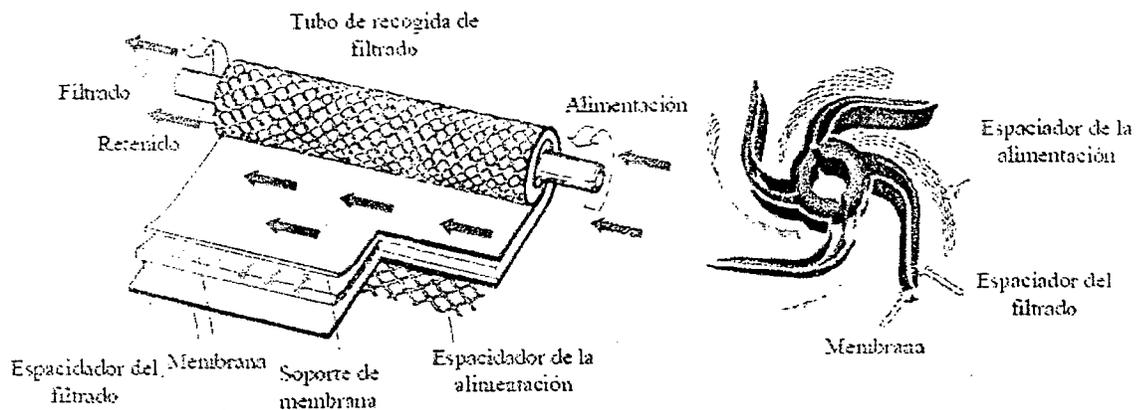


Fig (17) Elementos de un módulo espiral

Fuente: "Estudio de la ultrafiltración de proteínas con membranas cerámicas"
 Autor: Rubén Ibañez Lorente

2.4 Fundamentos de la separación por membranas empleando ósmosis inversa

2.4.1 Principios de operación

Como se describió anteriormente, la operación de ósmosis inversa es una operación utilizando como fuerza actuante la presión, en este caso se puede considerar la membrana como una barrera selectiva que hay entre dos fases homogéneas.

El potencial químico es el que propicia la separación, este puede ser expresado en función de los parámetros de presión, concentración o actividad, incluso temperatura.

$$\mu = f(T, P, C) \quad \text{Ec. (6)}$$

Consideramos que al tener dos soluciones, agua salobre (1) y agua pura (2), podemos expresar el comportamiento del potencial químico de la siguiente manera:

$$\mu_1 = \mu_2 + RT \ln \frac{a_1}{a_2} + \int_{P_1}^{P_2} V_w dP - \int_{T_1}^{T_2} S dT \quad \text{Ec. (7)}$$

Dónde:

μ_1 Potencial químico del agua salobre

μ_2 Potencial químico del agua pura

R: Constante universal de los gases.

T: Temperatura de la solución (la consideramos constante).

P_1 Presión en el agua salobre.

P_2 Presión en el agua pura.

T_1 Temperatura en el agua salobre.

T_2 Temperatura en el agua pura.

a_1 Actividad química del agua salobre

a_2 Actividad química del agua pura

V_w Volumen molar de la solución (lo consideramos incompresible)

En el equilibrio se cumple que los potenciales químicos son iguales:



Ec. (8)

Además la actividad química del agua pura es igual a 1, por lo que obtenemos:

$$(P_2 - P_1) = \frac{RT \ln a_1}{V_w} \quad \text{Ec. (9)}$$

Esta diferencia de presiones es la que denominamos presión osmótica

$$\pi = \frac{RT \ln a_1}{V_w} \quad \text{Ec. (10)}$$

También podemos expresarlo de la siguiente manera:

$$\pi = \frac{RT \ln(\gamma_1 \cdot x_1)}{V_w} \quad \text{Ec. (11)}$$

γ_1 = Coeficiente de actividad

x_1 = Fracción molar

2.4.2 Operación con membranas

A. Flujo de permeado

Considerando la presión como fuerza actuante en el proceso de membranas de ósmosis inversa y partiendo de la ecuación 12.

$$J = \frac{\Delta P}{\mu R_m} \quad \text{Ec. (12)}$$

El diferencial de presión es denominado Presión transmembrana o TMP, la cual es la caída de presión a través de la membrana. μ es la viscosidad absoluta (agua) y R_m es la resistencia hidráulica de la membrana limpia.

Se requiere hacer modificaciones a la fórmula anterior para considerar el efecto de la presión osmótica determinada anteriormente.

$$J = \frac{(\Delta P - \sigma_k \Delta \pi)}{\mu R_m} \quad \text{Ec. (13)}$$

Así el caudal del permeado a través de una membrana limpia se predice que no tendrá lugar hasta que la presión a través de la membrana ΔP exceda a la diferencia con la presión osmótica a través de la membrana.

B. Efectos de la Temperatura

Como conclusión de las ecuaciones anteriores podemos decir que existe una relación entre la temperatura y el flujo de permeado J.

En vista de ello, el efecto de la temperatura en el caudal de permeado se describe a menudo utilizando una expresión en forma de ecuación de Arrhenius.

$$J_T = J_{20} e^{\frac{S}{T}} \quad \text{Ec. (14)}$$

J_T = Flujo de Permeado a una determinada temperatura

J_{20} = Flujo de Permeado a 20°C

S = Constante empírica que debe evaluarse para cada membrana.

T = Temperatura en grados Kelvin

Además podemos emplear la tabla de corrección de temperatura de la GE Water & Process Technologies (Anexo D) además del factor de temperatura en la cual se emplea la siguiente fórmula:

$$\text{Flujo a la temperatura deseada} = \frac{\text{Flujo por membrana a } 25^\circ\text{C}}{\text{Factor de temperatura}} \quad \text{Ec. (15)}$$

2.5 Modelos de transporte teórico de las membranas

El propósito general de los modelos de transporte aplicados a membranas es relacionar las características de comportamiento (flux y selectividad) con las condiciones operativas. Las condiciones operativas incluidas en la modelización suelen ser términos de fuerza impulsora del transporte, presión y concentración de soluto en el caso de ósmosis inversa, aunque también pueden incluirse en modelos más completos parámetros influyentes sobre las propiedades de permeabilidad selectivas de la membrana, tales como la temperatura o el pH.

Hay que tener en cuenta que un modelo es siempre una simplificación y por tanto no va a reproducir exactamente el funcionamiento de la membrana. El modelo será tanto más poderoso cuanto mejor prediga el comportamiento de la membrana bajo diferentes condiciones operativas. El elevar la complejidad

del modelo para lograr una mayor exactitud no siempre es eficaz pues los datos de los parámetros que lo ajusten pueden ser de obtención dificultosa y poco exacta. Muchas veces son preferibles modelos sencillos y de fácil interpretación.

Entre la clasificación de los modelos de transporte los podemos dividir en tres bloques:

Tabla 13 Modelos de transporte		
Modelo de transporte en membranas no porosas	Modelo de transporte en membranas porosas	Modelo de transporte en membranas no porosas
<ul style="list-style-type: none"> • Solución – Difusión 	<ul style="list-style-type: none"> • Sorción Preferencial - Flujo Capilar 	<ul style="list-style-type: none"> • Modelo de termodinámica irreversible.
<ul style="list-style-type: none"> • Solución – Difusión - Imperfecciones 		

Fuente: Elaboración Propia

2.5.1 Modelo de transporte en membranas no porosas

Asumen una naturaleza no porosa para la membrana, por lo que explican el transporte a través de mecanismos de disolución y difusión. Sin embargo algunos modelos pueden considerar un transporte no difusivo a través de imperfecciones.

A. Modelo Solución – Difusión

Este modelo considera un mecanismo tipo difusivo en el que todas las especies (solutos y disolvente) se disuelven en la membrana y difunden a través de ella de manera similar a como la harían a través de un sólido o de un líquido bajo la acción de un gradiente de concentración o presión.

Cuando las concentraciones de soluto son bajas el coeficiente de difusión termodinámico tiende al valor del coeficiente de difusión observado y se considera independiente de la concentración. Adicionalmente se considera que las propiedades de la membrana se consideran independientes de la presión. Las ecuaciones básicas de transporte por difusión usadas para el flujo de agua han sido dadas por Merten et al., 1964; Lonsdale et al., 1965; Rosenfeld y Loeb, 1967

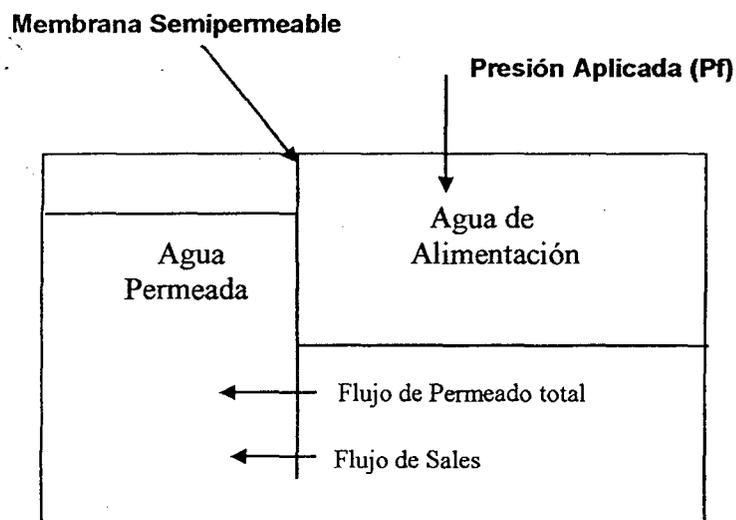


Fig. (18) Diagramas de operación de un sistema de ósmosis inversa
 Fuente: "Calidad de agua y tratamiento" - Autor: Mark Wiesner,

Formulación Matemática

Flujo de permeado Total (J_v)

$$J_v = A(\Delta P - \pi) \quad \text{Ec. (16)}$$

$$A = \frac{D_{Am} \cdot C_{Am} \cdot v_A}{R \cdot T \cdot \Delta x} \quad \text{Ec. (17)}$$

Para el coeficiente A

$D_{A,m}$:	Difusividad del disolvente en la membrana
$C_{A,m}$:	Concentración del disolvente en la membrana
ΔX :	Espesor efectivo de la membrana
v_A :	Volumen molar parcial de agua en la disolución
π :	Presión Osmótica
ΔP :	Diferencial de presión
A :	Coficiente del permeado total

Flujo de Sales (J_s)

$$J_s = B(C_{S,am} - C_{S,p}) \quad \text{Ec. (18)}$$

$$B = \frac{D_{S,m} K}{\Delta x} \quad \text{Ec. (19)}$$

Siendo en las anteriores ecuaciones $C_{S,am} - C_{S,p}$ la diferencia de concentraciones de soluto entre la cara del alimento y la del permeado a través de la membrana.

$D_{S,m}$:	Difusividad del soluto en la membrana
ΔX :	Espesor efectivo de la membrana
K :	Coficiente de partición entre la membrana y la disolución.
B :	Coficiente de permeabilidad del soluto

Las hipótesis empleadas en el modelo le restan capacidad de predicción. Por ejemplo, de la ecuación anterior se desprende que un aumento de la presión aumentaría siempre el flux y con ello el índice de rechazo tendería a valer 1.0 (100%). La experiencia demuestra, sin embargo que esto no es exacto y que el índice de rechazo tiene hacia un valor inferior a 1.0, eso es debido a que los términos A y B en realidad dependen de la presión y la presencia de imperfecciones.

De las ecuaciones también se deduce que el flux de soluto es prácticamente independiente de la presión y que solo depende de la diferencia de

concentración de la membrana. Por tanto para conseguir una separación eficaz a una presión de trabajo establecida, nos interesa tener una membrana que posea un coeficiente A lo más alto posible (alta afinidad por el disolvente) mientras que el coeficiente B debe ser lo mas bajo posible (poca afinidad por el soluto a separar). Esto implica que la elección del material es muy importante porque determina las propiedades intrínsecas de la membrana.

B. Modelo de Solución – Difusión – Imperfecciones

Este modelo considera la existencia de imperfecciones en la capa no porosa de una membrana. En la estructura densa el transporte sería por Solución – Difusión mientras que las imperfecciones se comportarían como pequeños caudales en los que el flujo sería predominantemente convectivo. Estas imperfecciones se producen en el proceso de fabricación y se corresponden con poros que ya no son de orden molecular.

Formulación Matemática

Se considera que las imperfecciones transportan disolución desde la cara del alimento a la del permeado sin modificar su composición (C_{sa}) y que este flujo tal y como se detalla en los modelos para membranas porosas es proporcional a la fuerza impulsora de presión aplicada. Por ello, el modelo corrige las ecuaciones del anterior modelo de disolución – difusión con dos términos dependientes de la presión:

Flujo de permeado Total (J_v)

$$J_v = A' \cdot (\Delta P - \Delta \pi) + C' \cdot \Delta P \quad \text{Ec. (20)}$$

Flujo de Sales (J_s)

$$J_s = B' \cdot \Delta \pi + C' \cdot \Delta P \cdot C_{sa} \quad \text{Ec. (21)}$$

Los parámetros A' y B' tienen significados análogos a los del modelo de disolución – difusión, mientras que el parámetro C' es representativo del flujo a través de las imperfecciones asimiladas a poros.

2.5.2 Membranas basadas en poros

Asumen una naturaleza porosa para la membrana, por lo que los mecanismos de transporte son los de flujo convectivo a través de capilares en el caso del solvente. Sin embargo, en algún caso se puede suponer una naturaleza difusiva para el transporte de algún componente.

A. Sorción Preferencial - Flujo Capilar

Está basado en el modelo de flujo capilar generalizado para el transporte del solvente, difusión para el transporte de soluto y la teoría laminar para capas límites. Debido a la aplicación de presión, el soluto y el solvente (agua) tienden a pasar a través de los microporos de la membrana, sin embargo, el agua es preferencialmente absorbida y la sal rechazada en la superficie de la pared porosa por razones físico – químicas.

Cuando el material de la membrana presenta una atracción preferente hacia el agua se produce una capa de agua pura absorbida en los poros. La aplicación de presión como fuerza impulsora fuerza al agua a pasar a través de los poros. La separación resultante es consecuencia, pues, de la interacción físico-química entre el soluto, el disolvente y la membrana, así como del tamaño, número y distribución de los poros.

Cabe mencionar que el flujo del disolvente al ser de tipo convectivo es por lo tanto proporcional a la fuerza impulsora. Sin embargo el flujo de soluto se considera difusivo y dado por el gradiente de concentración.

Flujo de Permeado

$$J_v = L_p \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \quad \text{Ec. (22)}$$

L_p : Permeabilidad del agua

Flujo de Soluto

$$J_S = B \cdot (C_{S,am} - C_{S,p}) \quad \text{Ec. (23)}$$

$$B = \frac{D_{S,pm} \cdot K_p}{\lambda} \quad \text{Ec. (24)}$$

$D_{S,pm}$: Difusividad del soluto en la estructura porosa de la membrana

λ : Longitud efectiva de poro

K_p : Coeficiente de partición basado en los poros

2.5.3 Modelo basado en la termodinámica irreversible

El modelo de termodinámica irreversible representa el transporte, tanto de flujo como de disolvente, mediante las ecuaciones desarrolladas por Spiegler y Kadem-Katchalsky (Hyung y col., 2006). Estos fueron los primeros en desarrollar ecuaciones basadas en esta teoría y aplicables a membranas. Obtuvieron, para soluciones acuosas no electrolíticas de un único soluto y a temperatura constante, las siguientes ecuaciones (Urama y col., 1997, Taniguchi y col., 2004, Hyng y col., 2006):

$$J_v = J_w = L_p \left[\frac{dP}{dx} - \sigma \frac{d\pi}{dx} \right] \quad \text{Ec.25}$$

$$J_S = J_v C_p = P_S \frac{dC}{dx} + (1 - \sigma) \cdot J_v \bar{C} \quad \text{Ec 26}$$

Donde J_v es el flujo de la solución (m/s) y aproximadamente es igual al flujo de agua a través de la membrana J_w (m/s), J_S es el volumen molar de soluto (mol/(m²s)).

$$L_p = \frac{K_w D_w^{mV}}{RT} \left(\frac{m}{Pa.s} \right) \quad \text{Ec 27}$$

Así mismo L_p es la permeabilidad de agua, $P_s = K_s \cdot D_s^m$ (m/s) es el coeficiente de permeado de soluto; σ es el coeficiente de reflexión de Staverman (indica el grado de penetración del soluto a través de la membrana, varía entre 0 y 1); $\bar{C} = K_s \cdot C_m \left(\frac{mol}{m^3}\right)$ es una relación entre la concentración de soluto en la disolución acuosa ideal en equilibrio y la concentración real del soluto C_m en la superficie de la membrana; $C_p \left(\frac{mol}{m^3}\right)$ es la concentración de soluto en el agua producto; P (Pa) es la presión hidráulica, π (Pa) es la presión osmótica correspondiente a un soluto de concentración \bar{C} ; K_w y K_s son adimensionales y representan los coeficientes de reparto del agua y del soluto entre la solución acuosa y la fase de la membrana; D_w^m (m^2/s) y D_s^m (m^2/s) son la difusividad molecular del agua y del soluto en la fase de la membrana. R : 8.312 ($Pa \cdot m^3 / (mol \cdot K)$) es la constante de los gases ideales $T(K)$ es la temperatura absoluta y V_w (m^3/mol) es el volumen molar del agua, el subíndice m se refiere a la fase de la membrana.

Para la ecuación del flujo de soluto a través de la membrana, se considera que el primer término de la ecuación corresponde al flujo debido a la difusión, mientras que el segundo corresponde al transporte de soluto debido a la convección (Ballet y col. 2004). El transporte de soluto por difusión es debido al gradiente de concentraciones a un lado y otro de la membrana. El transporte por convección tiene lugar debido al gradiente de presión, asociándose por tanto al flujo de permeado a través de la membrana (del Castillo 1997)¹.

Las ecuaciones anteriores, se basan en la suposición de que K_w , K_s , D_w^m , D_s^m son constantes respecto a la concentración del soluto.

¹ Tesis Doctoral "Reducción de boro en aguas procedentes de la desalación" presentado por María Fernanda Chillón Arias por el grado de Doctor en ingeniería química, Universidad de Alicante, España 2009 – pag. 52.

Este modelo trata la separación por membrana como un proceso espontáneo e irreversible lo que implica un incremento en la entropía del sistema y una disipación de energía libre.

Una desventaja es que, al considerar la membrana como una caja negra, no describen el mecanismo de transporte, sin embargo, esto le confiere una gran generalidad pudiéndose usar en ósmosis inversa, u otros procesos de membrana.

2.5.4 Disposición de arreglos

Definimos los arreglos como las disposiciones de los elementos de las membranas, los cuales se pueden dividir en bancos, porta-membranas y número de membranas.

En estos sistemas la unidad básica es la membrana, el siguiente grupo es la porta-membrana o también denominado módulo, el cual puede estar compuesto entre 1 – 6 membranas instaladas en forma lineal (actúan en forma conjunta como si fueran una sola membrana). La siguiente agrupación son los bancos o etapas, los cuales pueden ser desde uno a más módulos, en el que la descarga de agua de concentrado de sales (alta presión) de un módulo es la alimentación del siguiente.

En este tipo de montaje, las alimentaciones y las salidas tanto de permeado como de rechazo de cada módulo se conectan con cada una de las correspondientes tuberías generales. Esta disposición se usa para producir un caudal "n" veces superior al suministrado por un módulo, siendo "n" el número de módulos instalados en paralelo.

Módulos en Paralelo

Cuando los módulos trabajan en paralelo, la pérdida de carga entre el colector de aporte y el de rechazo es la misma para todos ellos, lo que quiere decir que el caudal de aporte que llega a cada uno dependerá de su grado de atascamiento y del caudal de permeado que produzca. Es muy importante que, cuando varios módulos trabajen en paralelo, el grado de envejecimiento de sus membranas sea similar ya que en caso contrario se producirán desequilibrios en los flujos individuales que harán que las membranas menos deterioradas trabajen con conversiones elevadas y se atasque rápidamente.

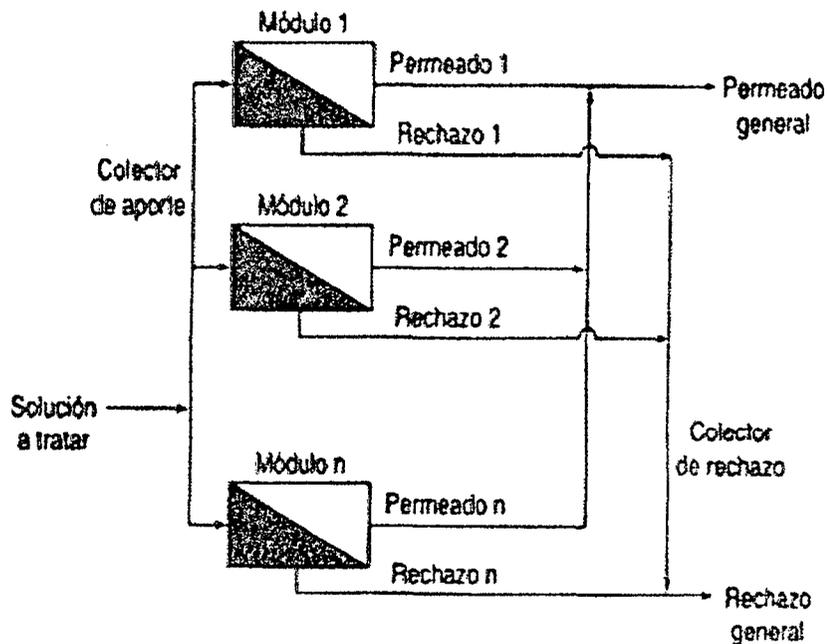


Fig. (19) Módulos en paralelo

Fuente: "Tratamiento del agua por procesos de membrana"
Autor: Peter Odendaal

Módulos en Serie

Cuando los módulos se montan en serie, el caudal de rechazo de cada módulo pasa a ser el aporte del siguiente y así sucesivamente. El permeado de los distintos módulos se recoge en un colector común a todos ellos donde se van mezclando los distintos flujos. Esta agrupación se utiliza,

consecuentemente, para reducir los fenómenos de polarización cuando los flujos de permeado de las membranas son altos o cuando se trabaja con elevadas conversiones.

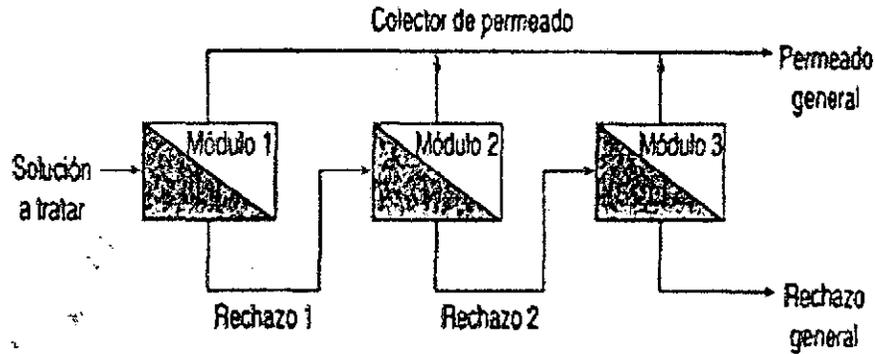


Fig. (20) Módulos en serie

Fuente: "Tratamiento del agua por procesos de membrana"
 Autor: Peter Odendaal

En vista a los modelos de transporte presentados anteriormente se empleará el modelo de difusión de solución lineal para desarrollar la disposición de arreglos además de los valores de los coeficientes A y B mostrados para este modelo.

MODELO PARA UNA MEMBRANA

A continuación en la figura 21 se muestra el esquema de funcionamiento básico de una membrana y su posterior modelamiento matemático resultado de la resolución de las ecuaciones de balance de materia y transferencia de masa.

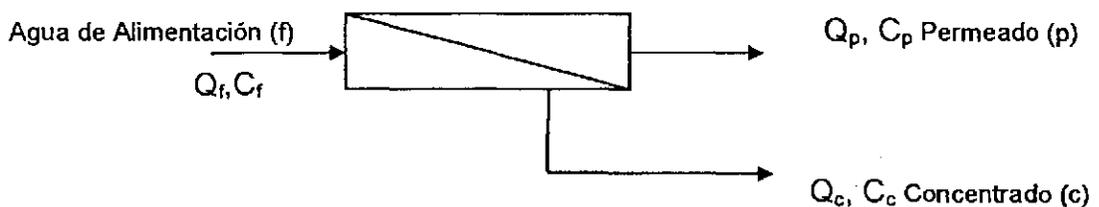


Fig. (21) Diagrama básico de transporte de masa en una membrana

Fuente: "Calidad del agua y tratamiento"
 Autor: Mark Wiesner

Las ecuaciones empleadas utilizan los conceptos vistos en el modelo de difusión – solución.

Flujo de Solvente

$$J_v = A(\Delta P - \Delta \pi) = \frac{Q_p}{a} \quad \text{Ec. (28)}$$

Flujo de Soluto

$$J_s = B(\Delta C) = \frac{Q_p \cdot C_p}{a} \quad \text{Ec. (29)}$$

Recuperación

$$r = \frac{Q_p}{Q_f} \quad \text{Ec. (30)}$$

Caudal

$$Q_f = Q_c + Q_p \quad \text{Ec. (31)}$$

Balance de Masa

$$Q_f \cdot C_f = Q_c \cdot C_c + Q_p \cdot C_p \quad \text{Ec. (32)}$$

Dónde:

J_v = Caudal de agua, L^3/L^2t

J_s = Caudal de soluto, M/L^2t

A = Coeficiente de transferencia de masa del solvente, L^2/tM

B = Coeficiente de transferencia de masa del soluto, L/t

ΔP = Gradiente de presión, $L, \left[\frac{P_f - P_c}{2 - P_p} \right]$

$\Delta \pi$ = Gradiente presión osmótica, $L, \left[\frac{\pi_f - \pi_c}{2 - \pi_p} \right]$

ΔC = Gradiente de concentración, $M/L^3, \left[\frac{C_f - C_c}{2 - C_p} \right]$

Q_f = Caudal de la corriente de alimentación L^3/t

Q_c = Caudal de la corriente de concentrado L^3/t

Q_p = Caudal de la corriente de permeado L^3/t

C_f = Concentración de soluto en la corriente de alimentación, M/L³

C_c = Concentración de soluto en la corriente de concentrado, M/L³

C_p = Concentración de soluto en la corriente de permeado, M/L³

r = Recuperación

a = Área de la membrana L²

Z = Terminado combinado de transferencia de masa

Despejando y resolviendo en conjunto todas las ecuaciones desde Ec. (28) hasta Ec.(32) podemos obtener:

$$C_p = \frac{B \cdot C_f}{A \cdot (\Delta P - \Delta \pi) \left[\frac{(2 - 2r)}{2 - r} \right] + B} = Z_i \cdot C_f \quad \text{Ec. (33)}$$

Donde Z_i es un coeficiente de transferencia de masa modificado, que representa el efecto de la transferencia de masa del solvente, transferencia de masa del soluto, recuperación y presión en la corriente del permeado para una membrana.

La importancia de este modelo es que permite considerar el efecto las variables independientes sobre la calidad de agua de permeado. Este modelo es el que se aplica en los simuladores de separación por membranas, debido a la relativa simplicidad.

Modelo multietapa

Los modelos multietapa corresponden a arreglos tanto en serie como paralelo en forma conjunta.

En la figura (22) se observa un sistema de 3 bancos con un arreglo 2-2-1 es decir el concentrado de los dos primeros módulos alimenta a los dos siguientes y el concentrado de estos alimenta al último módulo.

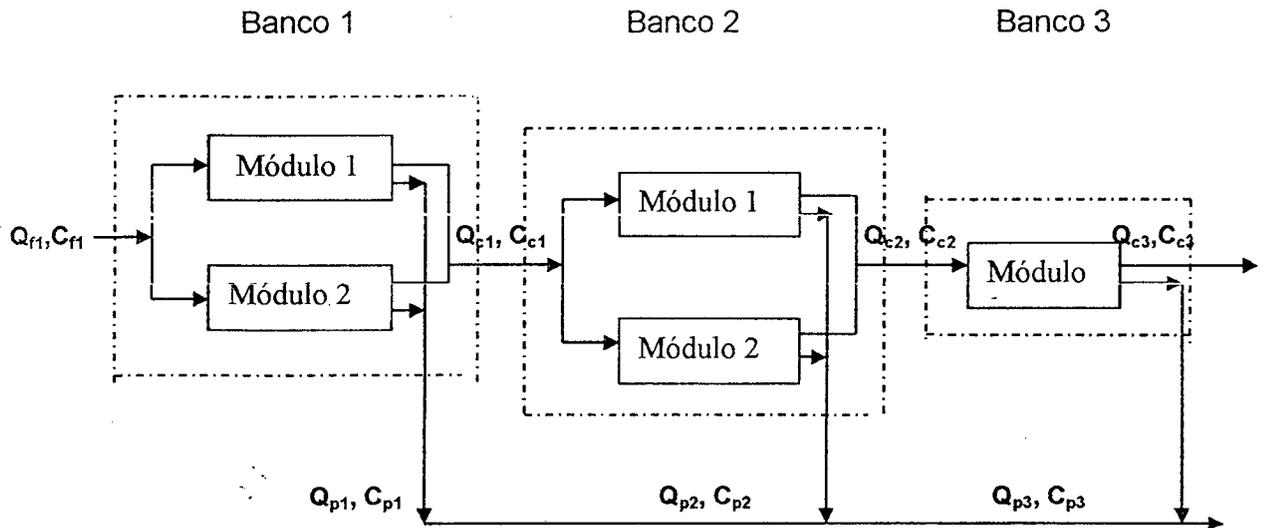


Fig. (22) Diagrama de operación en modelo multietapa

Fuente: "Calidad y tratamiento del agua".

Autor : Mark Wiesner

Partiendo de la ecuación 32 del balance de masa para una sola etapa, lo extendemos a un sistema multietapa de la siguiente forma:

$$C_{c,i} = \frac{Q_{f,i} \cdot C_{f,i} - Q_{p,i} \cdot C_{p,i}}{Q_{c,i}} = \frac{C_{f,i} - r_i \cdot C_{p,i}}{1 - r_i} \quad \text{Ec. (34)}$$

$$C_{c,i} = C_{f,i+1} = C_{f,i} \left(\frac{1 - Z_i \cdot r_i}{1 - r_i} \right) \quad \text{Ec. (35)}$$

$$C_{c,i} = X_i \cdot C_{f,i} \quad \text{Ec. (36)}$$

Por lo tanto:

$$X_i = \left(\frac{1 - Z_i \cdot r_i}{1 - r_i} \right) \quad \text{Ec. (37)}$$

Despejando y desarrollando para todo el sistema

$$C_{p,sistema} = C_f \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (a_i \cdot K_{i,i} \Delta P_i Z_i \prod_{j=0}^{i-1} X_j)}{\sum_{i=1}^n a_i \cdot K_{i,i} \cdot \Delta P_i} \quad \text{Ec. (38)}$$

a_i = Área superficial de filtración por banco

El subíndice j , como el i , denota el número de etapas en una disposición multietapa de membrana, como se muestra en la ecuación 58

Como se puede observar el grado de complejidad se incrementa desarrollando modelos multietapas, en esta clase de modelos se hace práctico desarrollarlo mediante programas computacionales.

2.6 Pre y post-tratamiento en un proceso de tecnología de ósmosis inversa

El tratamiento previo a un sistema de ósmosis inversa se denomina pre-tratamiento así mismo el tratamiento posterior se denomina post-tratamiento. El pre-tratamiento está en función principalmente de la calidad del agua fuente, éste a su vez divide en físico y químico,

Pero previo a los pre-tratamientos es necesario considerar cálculos anti-incrustantes para evitar la precipitación tanto de sulfatos como de carbonatos.

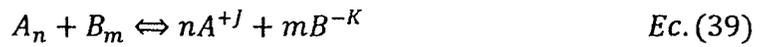
2.6.1. Cálculos de precipitación

A. Cálculo de la sal limitante

El método de cálculo de la sal limitante permite determinar la máxima cantidad de sal que puede existir en el flujo de concentrado antes de precipitar, para esto se emplea tanto el K_{ps} como la tensión iónica.

Como hemos definido el proceso de membrana y difusión controlada concentra sales naturalmente sobre el lado de alimentación de la membrana (línea de rechazo), siendo este proceso de concentración continuo.

La sal limitante puede determinarse a partir de los productos de solubilidad de las sales potencialmente limitantes y de la calidad de corriente de agua de alimentación (STD). La tensión iónica debe considerarse en estos cálculos ya que la concentración natural del agua de alimentación durante el proceso de membrana incrementa ésta.



La constante de concentración K_c se puede expresar de la siguiente manera:

$$K_c = (A^{+J})^n \cdot (B^{-K})^m \quad \text{Ec. (40)}$$

A su vez, el producto de solubilidad K_{ps} se expresa de la siguiente manera, (ver Anexo E):

$$K_{ps} = K_c \cdot \gamma^m \cdot \gamma^n \quad \text{Ec. (41)}$$

Dónde:

K_{ps} = Constante del producto de solubilidad

m = Coeficiente estequiométrico de [B]

n = Coeficiente estequiométrico de [A]

J = Carga del Elemento [A]

K = Carga del Elemento [B]

γ = Coeficiente de Actividad

Tanto los valores de K_c y K_{ps} los calculamos en la línea de concentrado de la siguiente forma:

$$K_c = [A]_c^{+J} \cdot [B]_c^{-K} \quad \text{Ec. (42)}$$

Adicionalmente realizamos un balance de materia en el sistema de ósmosis inversa.

A partir de la ecuación (32) y Figura (21) obtenemos:

$$Q_c = X \cdot Q_F \quad ; \quad Q_P = (1 - X) \cdot Q_F; \quad [C]_P = (1 - s) \cdot [C]_F$$

Despejando:

$$Q_C \cdot [C]_C = Q_F \cdot [C]_F - Q_P \cdot [C]_P \quad \text{Ec. (43)}$$

$$X \cdot Q_F \cdot [C]_C = Q_F \cdot [C]_F - (1 - X) \cdot Q_F \cdot [C]_P \quad \text{Ec. (44)}$$

$$X \cdot [C]_C = [C]_F - (1 - X) \cdot (1 - s) \cdot [C]_F \quad \text{Ec. (45)}$$

$$[C]_C = \frac{[C]_F(1 - (1 - X) \cdot (1 - s))}{X} \quad \text{Ec. (46)}$$

Dónde:

Q_P = Caudal de Permeado

Q_C = Caudal de Concentrado

Q_F = Caudal de Alimentación

$[C]_P$ = Concentración de un elemento en la línea de permeado

$[C]_C$ = Concentración de un elemento en la línea de concentrado

$[C]_F$ = Concentración de un elemento en la línea de alimentación

X = Fracción remanente en el concentrado

s = Fracción retenida de iones

Aplicamos la ecuación 46 y obtenemos el valor de $[A]_c^{+j}$ y $[B]_c^{-k}$ (concentración de los elementos en la línea de concentrado) como se observa a continuación:

$$[A]_c^{+j} = \frac{[A] \cdot (1 - (1 - X) \cdot (1 - a))}{X} \quad \text{Ec. (47)}$$

$$[B]_c^{-k} = \frac{[B] \cdot (1 - (1 - X) \cdot (1 - b))}{X} \quad \text{Ec. (48)}$$

Además para cada elemento también tenemos los valores de fracción retenida de cationes y aniones respecto a cada elemento; a = fracción

retenida de cationes en el concentrado y b = fracción retenida de aniones en el concentrado.

Reemplazamos las ecuaciones (47) y (48) en la ecuación. (42), obtenemos

$$K_c = \left[\frac{((1 - (1 - X) \cdot (1 - a)) \cdot [A])^n}{X} \right] \cdot \left[\frac{((1 - (1 - X) \cdot (1 - b)) \cdot [B])^m}{X} \right] \quad \text{Ec. (49)}$$

Sabemos que la relación entre la carga de STD de concentrado y alimentación está en función de la recuperación.

$$STD_c = \frac{R}{X} \cdot STD \text{ alimentación} \quad \text{Ec. (50)}$$

Empleando el concepto de tensión o fuerza iónica (ver Anexo F)

$$I = 0.5 \sum_i C_i \cdot Z_i^2 \approx (2.5 \times 10^{-5}) \cdot STD_c \quad \text{Ec. (51)}$$

- STD_c = Sólidos Totales Disueltos (ppm) en el concentrado
 R = Porcentaje de rechazo de STD
 I = Tensión iónica de la solución
 Z_i = Carga iónica
 C_i = Molalidad

Empleando la teoría de Debye – Huckel

$$\log \gamma = -A \cdot Z^2 \frac{\sqrt{I}}{1 + B \cdot a \cdot \sqrt{I}} \quad \text{Ec. (52)}$$

Dónde:

- A y B : Constantes de Debye – Huckel para el agua como solvente
 a : Diámetro iónico promedio

A su vez considerando una temperatura de 25 C° a una presión de 1 atm podemos obtener los siguientes valores de las variables:

$$A = 0.5091$$

$$B = 0.3286$$

$\alpha =$ Se conoce que el valor de α está en el intervalo de 3 Å a 9 Å los cuales son valores razonables para iones hidratados. Debido a la dificultad de la determinación empírica exacta del valor de α , este se considera igual a 3 Å por lo que reemplazando tenemos que $0.3286 * \alpha = 1$.

Reemplazando en la ecuación obtenemos:

$$\log \gamma \approx -0.51Z^2 \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} \quad \text{Ec. (53)}$$

A su vez tenemos hemos expresado el producto de solubilidad K_{ps} en función de la constante de concentración y los coeficientes de actividad:

$$K_{ps} = [A]_c^m [B]_c^n \gamma^m \cdot \gamma^n \quad \text{Ec. (54)}$$

Relaciones las ecuaciones (53) y (54) y calculamos la recuperación máxima del sistema antes de que precipiten las sales.

En forma práctica se determina la recuperación máxima empleando el Sulfato de Bario (BaSO_4). Reemplazamos las especies iónicas en la Ec (40)

$$K_{ps} = K_c \cdot \gamma^{\text{Ba}^{+2}} \cdot \gamma^{\text{SO}_4^{-2}} \quad \text{Ec. (55)}$$

Debido a que tanto como Ba^{+2} y SO_4^{-2} poseen el mismo valor absoluto de carga ($|Z| = 2$) podemos decir lo siguiente:

⁷ Físicoquímica Volumen 1. Autor: Ira N. Levine. Editorial McGraw-Hill Edición 5ta. Año 2004 pag. 368.

$$\gamma^{Ba^{+2}} = \gamma^{SO_4^{-2}} = \gamma_{Z=2} \quad Ec (56)$$

$$K_{ps} = K_c \cdot \gamma_{Z=2}^2 \quad Ec(57)$$

Además reemplazando las especies iones Ba^{+2} y SO_4^{-2} en la ecuación (42) obtenemos:

$$K_c \cong \left[\frac{(1 - (1 - X) \cdot (1 - a)) \cdot Ba^{+2}}{X} \right] \cdot \left[\frac{(1 - (1 - X) \cdot (1 - b)) \cdot SO_4^{-2}}{X} \right] \quad Ec(58)$$

A continuación reemplazamos la ecuación (58) en la ecuación (55)

$$K_{ps} = \left[\frac{(1 - (1 - X) \cdot (1 - a)) \cdot Ba^{+2}}{X} \right] \cdot \left[\frac{(1 - (1 - X) \cdot (1 - b)) \cdot SO_4^{-2}}{X} \right] \cdot \gamma^{Ba^{+2}} \cdot \gamma^{SO_4^{-2}} \quad Ec. (59)$$

Las ecuaciones anteriores pueden resolverse en simultáneo empleando métodos numéricos o software de computadora.

B. Determinación del pH óptimo

El pH óptimo se define como el valor de potencial de hidrogeno en el cual no ocurre la precipitación del carbonato de calcio. Para la determinación del pH utilizaremos la constante de ionización del bicarbonato así como el K_{ps} del carbonato de calcio, además de emplear la tensión iónica:

Empleando la solubilidad de $CaCO_3$



Empleamos la ecuación (42) reemplazando las especies iónicas Ca y CO_3 ; obtenemos:

$$K_c = \left[\frac{((1 - (1 - X) \cdot (1 - a)) \cdot Ca^{+2})}{X} \right] \cdot \left[\frac{((1 - (1 - X) \cdot (1 - b)) \cdot CO_3^{2-})}{X} \right] \quad Ec. (61)$$

Seguido empleamos la constante de ionización del bicarbonato



Podemos expresar la constante de ionización del $K_{i(HCO_3^-)}$ de la siguiente manera

$$K_{i(HCO_3^-)} = \frac{[H^+] \gamma_{CO_3^{2-}} [CO_3^{2-}]}{\gamma_{HCO_3^-} [HCO_3^-]} \quad Ec. (63)$$

Despejando $[CO_3^{2-}]$:

$$[CO_3^{2-}] = \frac{K_{i(HCO_3^-)} \cdot \gamma_{HCO_3^-} [HCO_3^-]}{[H^+] \cdot \gamma_{CO_3^{2-}}} \quad Ec. (64)$$

Reemplazando la ecuación (64) en la ecuación (61)

$$K_c = \left[\frac{((1 - (1 - X) \cdot (1 - a)) \cdot Ca^{+2})}{X} \right] \cdot \left[\frac{((1 - (1 - X) \cdot (1 - b)) \cdot \frac{K_{i(HCO_3^-)} \cdot \gamma_{HCO_3^-} [HCO_3^-]}{[H^+] \cdot \gamma_{CO_3^{2-}}})}{X} \right] \quad Ec. (65)$$

Despejamos $[H]$ de la ecuación (65)

$$[H^+] = \left[\frac{((1 - (1 - X) \cdot (1 - a)) \cdot Ca^{+2})}{X} \right] \cdot \left[\frac{((1 - (1 - X) \cdot (1 - b)) \cdot K_{i(HCO_3^-)} \cdot \gamma_{HCO_3^-} [HCO_3^-])}{X \cdot \gamma_{CO_3^{2-}} \cdot K_c} \right] \quad Ec. (66)$$

Al resolver esta ecuación podemos determinar la concentración de iones hidrógeno requerido para que no precipite carbonato de calcio, con este valor a su vez determinamos el potencial de hidrogeno.

$$pH = -\log[H^+] \quad Ec. (67)$$

2.6.2 Pre-tratamiento

El pre-tratamiento es la primera etapa para controlar el ensuciamiento de la membrana, el procedimiento de pre-tratamiento puede ser complejo e incluir ajuste de pH, cloración, sedimentación, clarificación, decoloración (Meta bisulfito de sodio), adsorción en carbón activado, adición de agentes complejos (EDTA, SHMP).

Los podemos dividir en dos tipos, físicos y químicos.

A. Pre-tratamiento físico

➤ Filtración multimedia

La filtración es uno de los procesos unitarios más usados para remover la materia particulada del agua.

Los filtros empleados como pre-tratamiento para un sistema de ósmosis inversa son los llamados filtros a presión, los cuales utilizan un recipiente para contener el medio filtrante. El agua se entrega a presión y abandona el tanque a una presión ligeramente menor debido tanto a la pérdida de carga por el medio filtrante como la tobera dentro del filtro.

La denominación de filtros multicapa o multimedia se debe a las diversas capas de medios filtrantes que poseen; siendo la grava, arena, carbón de antracita y granate los medios más comunes; la distribución y el orden de estos está en función tanto de la densidad como del diámetro medio.

Un factor de diseño para un filtro de múltiples medios es la tasa de filtrado o ratio de filtración, la cual se puede obtener de dividir el caudal sobre el área del filtro. El rango de trabajo figura entre 5 – 15 gpm/pie² tomándose en cuenta tanto la fuente de agua como la aplicación final de esta.

Así mismo cabe mencionar que la definición del lavado de medios o retro lavado es que el agua fluya en sentido contrario al flujo de filtración

(usualmente se realiza de manera ascendente) para poder remover los sólidos en suspensión. De manera general, se tiene que para el retro lavado se emplea entre 3 a 4 veces el flujo de agua que se filtra.

Diámetro equivalente de una partícula (D_p)

El diámetro equivalente de una partícula no esférica se define como el diámetro de una esfera que tiene el mismo volumen que la partícula. La esfericidad es la relación entre la superficie de esta esfera y la superficie real de la partícula. Puesto que para una esfera $A = \pi D_p^2$ y el $V = \frac{\pi D_p^3}{6}$ resulta que, para una partícula ¹:

$$\frac{A}{V} = \frac{6}{\varphi \cdot D_p} \quad \text{Ec. (68)}$$

Dónde:

A = Área superficial de la partícula

V = Volumen de la partícula

φ = Esfericidad

Esfericidad (φ)

El coeficiente de esfericidad de una partícula se define como el resultado de la división del área superficial de la esfera de igual volumen a la del grano por el área superficial de la partícula considerada.

Como es obvio, este valor resulta igual a la unidad para las partículas esféricas y menor de uno para las irregulares.

En la práctica este dato es muy útil debido a que los granos (del medio filtrante) no son esféricos.

¹ "Operaciones unitarias en ingeniería química". Warren L McCabe - Julian C. Smith - Peter Harriot. pag. 159

Porosidad (ϵ_0)

La porosidad o denominado en algunos textos como densidad de lecho perdido, se define como la relación matemática entre el volumen de espacios sobre el volumen total del medio filtrante.

Tabla 14 Datos generales de medios filtrantes comunes					
Medio filtrante	Densidad (g/cm ³)	Densidad aparente (g/cm ³)	Porosidad	Gravimetría (%)	Alto (pulgadas)
Antracita	0.8	0.56 – 0.6	0.46 – 0.6	0.65 – 0.95	10" – 18"
Arena Silicia	1.6	0.42 – 0.47	0.7 – 0.8	0.5 – 3	15" – 30"
Garnet 8 x12	2.24	0.45 – 0.55	0.6	1.5	8" – 9"
Garnet 30 x40	2.24	0.45 – 0.55	0.6	0.30 – 0.46	8" – 9"
Grava	1.6	0.42 – 0.47	0.7 – 0.8	6.00 – 25.00	Hasta que cubra el distribuidor inferior (1" – 2")

Fuente: Filter media reference guide – Pure water products – Enting wáter conditioning – 2009 – Anexo G

El orden usual de estos medios en un filtro multimedia, de arriba hacia abajo, es el siguiente:

Tabla 15		Orden de medios filtrantes (desde el top hasta el soporte)	
Antracita	1/27" pulg. (0.95 mm)	0.8	
Arena Silicica	1/64" pulg. (0.40 mm)	1.6	
	1/32" pulg. (0.78 mm)	1.6	
	1/16" pulg. (1.59 mm)	1.6	
	1/8" pulg. (3.18 mm)	1.6	
Gamet	1/64" pulg. (0.35 mm)	2.24	
	1/16" pulg. (1.50 mm)	2.24	
Grava de soporte	¼" pulg. (6.14 mm)	1.6	
	½" pulg. (12.7 mm)	1.6	
	1" pulg. (25.4 mm)	1.6	

Fuente: Elaboración propia

La estratificación previa se justifica por las siguientes razones:

- ✓ La grava de soporte debe cubrir totalmente las toberas, comúnmente se empieza con una medida de 1" o ½" (en función del distribuidor inferior). Es necesario verificar que la abertura de la tobera o distribuidor sea inferior a este valor, de esta forma evitaremos que pase grava a la línea de agua filtrada. Además en el momento de retro lavado (cuando el agua ingresa por la parte inferior), este material no debe flotar sino mantenerse firme en la posición en la capa inferior del filtro.
- ✓ Luego de la grava de soporte el orden de medios filtrantes es según su densidad ya que en el momento de retro lavado es necesario que los medios de filtración (sin incluir la grava) se puedan mantener en suspensión o flotando para que los sólidos en suspensión retenidos por los filtros puedan liberarse y enviarse a una línea de drenaje.
- ✓ Luego de que hemos definido el orden de medios según su densidad, cada medio lo ordenamos según su diámetro, por ejemplo para el gamet ($\rho = 2.24 \text{ Kg/L}$) colocamos luego de la grava el gamet de 1.5

mm y luego el de 0.35 mm; este ordenamiento se realiza para que cada medio tenga su propio soporte.

Altura de medios Filtrantes

Las alturas de los medios en un filtro multimedia está determinada según un rango de altura (ver tabla 15). Esta tabla se ha generado empleando referencias de proveedores y guías de materiales para cada medio filtrante empleado.

Espacio libre o “Free Board”

Como hemos mencionado en la operación de retro lavado el agua al ingresar por la parte inferior mantiene en suspensión o flotando los medios filtrantes excepto la grava de soporte. Para poder realizar esta operación se deja un espacio libre entre 30 – 40 % de la altura de medios calculada.

Cálculos de la pérdida de carga

Las primeras ecuaciones para calcular la pérdida de carga inicial h fueron establecidas en 1904 por Hazen y en 1927 por Carman. En 199, GM. Fair y L.P .Hatch propusieron otra expresión matemática que parte de la conocida fórmula de Hagen Poiseville para fluidos laminares ($Re \leq 2000$) que dice:

$$h = 32. \frac{L. \mu. vi}{D^2} \quad Ec. (69)$$

En forma general lo consideraremos de la siguiente manera:

$$h = K. \frac{L. \mu. vi}{D^2. g} \quad Ec. (70)$$

- h = Perdida de carga (m)
- vi = Velocidad de flujo en el conducto
- K = Coeficiente de fricción
- L = Longitud del conducto
- g = Gravedad (m/s^2)
- μ = Viscosidad cinemática (m^2/s)

Para el caso de un medio filtrante se consideró que los poros actuaban como pequeños conductos a presión y se adoptó la formula con las siguientes suposiciones:

- (a) Diámetro D se hizo igual al radio medio hidráulico. Como para un tubo $R = D/4$ entonces $D = 4R$
- (b) Definiendo V como el volumen de los granos, el volumen del lecho será $V/(1-\epsilon_o)$ en donde ϵ_o es la porosidad del lecho. El volumen de poros será entonces $\frac{\epsilon_o \cdot V}{1-\epsilon_o}$ y el radio medio hidráulico será:

$$R = \frac{\text{Volumen de poros del lecho}}{\text{Area granos del lecho}} = \frac{\frac{\epsilon_o \cdot V}{1-\epsilon_o}}{A} \quad \text{Ec. (71)}$$

- (c) La velocidad intersticial del flujo en el lecho, es igual a la velocidad de aproximación del flujo dividida por la porosidad.

$$vi = \frac{v}{\epsilon_o} \quad \text{Ec. (72)}$$

- (d) La longitud L se hizo igual a la profundidad del lecho, reemplazando estos valores en la formula :

$$h = \frac{k \cdot L \cdot \mu \cdot v}{\left[4 \cdot \left(\frac{\epsilon_o \cdot V}{1-\epsilon_o} \right) \frac{1}{A} \right]^2 \cdot \epsilon_o \cdot g} \quad \text{Ec. (73)}$$

Ordenando:

$$h = \frac{k.L.\mu.v}{16.\epsilon_o.g} \cdot \left[\frac{(1 - \epsilon_o).A}{\epsilon_o.V} \right]^2 \quad \text{Ec. (74)}$$

$$h = \frac{k.L.\mu.v}{16.\epsilon_o.^3.g} \cdot (1 - \epsilon_o)^2 \left[\frac{A}{V} \right]^2 \quad \text{Ec. (75)}$$

Reemplazando la ecuación 68 en la ecuación 75 obtenemos:

$$h = \frac{k.L.\mu.v}{16.\epsilon_o.^3.g} \cdot (1 - \epsilon_o)^2 \left[\frac{6}{\phi.D_p} \right]^2 \quad \text{Ec. (76)}$$

Si el modelo fuera exacto el valor de k/16 sería igual a 2, pero a esta ecuación se aplican resultados experimentales los cuales indican que el valor adimensional a obtener es de 5 el cual lo expresaremos como K'.¹

$$h = \frac{k'.L.\mu.v}{\epsilon_o.^3.g} \cdot (1 - \epsilon_o)^2 \left[\frac{6}{\phi.D_p} \right]^2 \quad \text{Ec. (77)}$$

Parámetro	Límite máximo de ingreso
Turbidez	50 NTU
Sólidos totales en suspensión	50 mg/L
Operación	
Carga máxima de flujo	4-7 gpm/pie ²
Máxima caída de presión	15 psi
Caída de presión en un lecho limpio	5 psi
Retrolavado del filtro	
Ratio de retrolavado	15-20 gpm/pie ²
Fuente de retrolavado	Alimentación o salmuera filtrada del ósmosis inversa
Fuente de enjuague	Alimentación
Frecuencia de retrolavado	Delta de presión o exceso de turbidez

Tabla 16 – Normas para Filtros Multimedia

**Fuente: RO Systems Operation Best Practice Guidelines
Norma de la General Electric Water & Process Technologies – Anexo I**

¹ "Teoría y práctica de la purificación del agua". Tomo II. Año 2000. Autor: Jorge Arboleda Valencia.

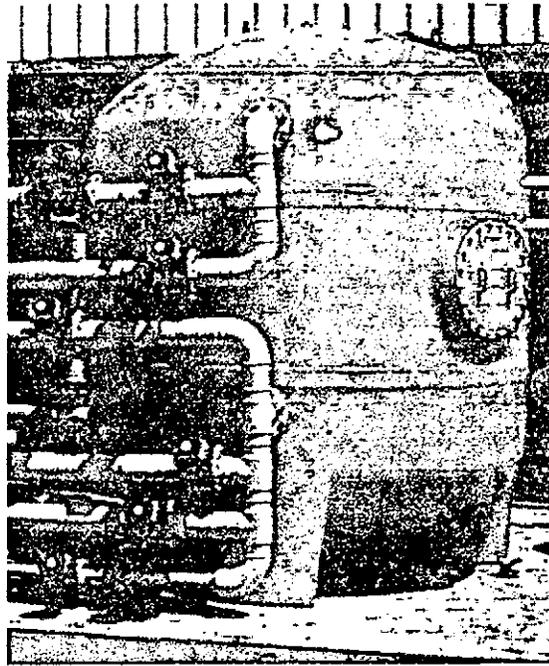


Fig. (23) Filtro multimedia

Fuente: Autoría propia.

➤ Micro filtración

En el espectro de la filtración, la micro filtración se define como la operación capaz de separar 5 – 10 micras. Normalmente se coloca antes de entrar al sistema de separación de ósmosis inversa. En estos equipos la operación se aplica en forma de filtros de cartucho, estos son filtros poseen un diámetros de poro que va desde 5 – 20 micras para ósmosis inversa.

La caída de presión a través de un cartucho microfiltro no suele exceder de 10 lb/in². En el mercado existen diversos tipos, como característica general es necesario verificar la curva de diferencial de presión y flujo (gpm) para seleccionar el que más nos convenga para nuestro sistema. Este tipo de tecnología no ofrece protección contra la incrustación, al igual que la filtración multimedia

➤ Ultrafiltración

La ultrafiltración actualmente se presenta como una solución en el pre-tratamiento de los sistemas de membranas, compitiendo directamente con los equipos de filtración multimedia.

La ultrafiltración es un proceso conducido por presión, por el cual los coloides, las partículas y las especies solubles de elevada masa molecular son retenidas por un mecanismo de exclusión por tamaño, y como tal, suministra medios para concentrar, fraccionar o filtrar especies disueltas o en suspensión. La ultrafiltración permite pasar a la mayoría de especies iónicas inorgánicas y retiene partículas discretas de materia y especies orgánicas iónicas y no iónicas, dependiendo del peso molecular de estas.

La decisión para optar ultrafiltración en vez de filtración multimedia se basa en la calidad de agua de entrada y la calidad requerida de agua de salida. Para agua de pozo, la cual normalmente contiene poca carga microbiológica, se emplean los filtros multimedia pero en fuentes de alta carga microbiológica se considera la ultrafiltración.

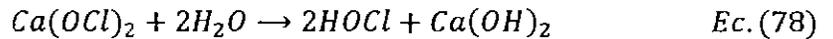
B. Pre tratamientos químicos

➤ Desinfección

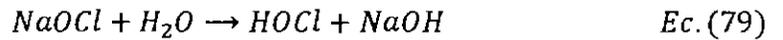
La desinfección previa a un sistema de ósmosis inversa es mayormente empleando cloro en sus distintas formas, entre estas puede utilizarse en forma de gas comprimido a presión que se disuelve en agua en el punto o lugar de aplicación, soluciones de hipoclorito sódico (NaOCl) o hipoclorito cálcico [$\text{Ca}(\text{OCl})_2$]. Estas tres formas son químicamente equivalentes a causa del rápido equilibrio que existe entre el gas molecular disuelto y los productos de la disociación de los compuestos del hipoclorito.

Las reacciones correspondientes a la adición de sales de hipoclorito son las siguientes:

Hipoclorito de Calcio



Hipoclorito de sodio



Así mismo la ionización del ácido hipocloroso se puede describir mediante la siguiente expresión:



La constante de ionización se expresa de la siguiente manera

$$K_i = \frac{[H^+][OCl^-]}{[HOCl]} \quad Ec. (81)$$

El valor de K_i se encuentra en función de la temperatura,

Tabla 17 Constante de ionización del ácido hipocloroso vs temperatura

0	1.49
5	1.75
10	2.03
15	2.32
20	2.62
25	2.90

Fuente "Ingeniería de aguas residuales"
Autor: METCALF & EDDY 1995

La cantidad de HOCl y del OCl que se halla presente en el agua se denomina cloro libre disponible. La distribución relativa de estas dos especies químicas (véase Fig. (24)) es muy importante, puesto que la

capacidad de destrucción del HOCl es entre 40 y 80 veces superior a la del OCl⁻.

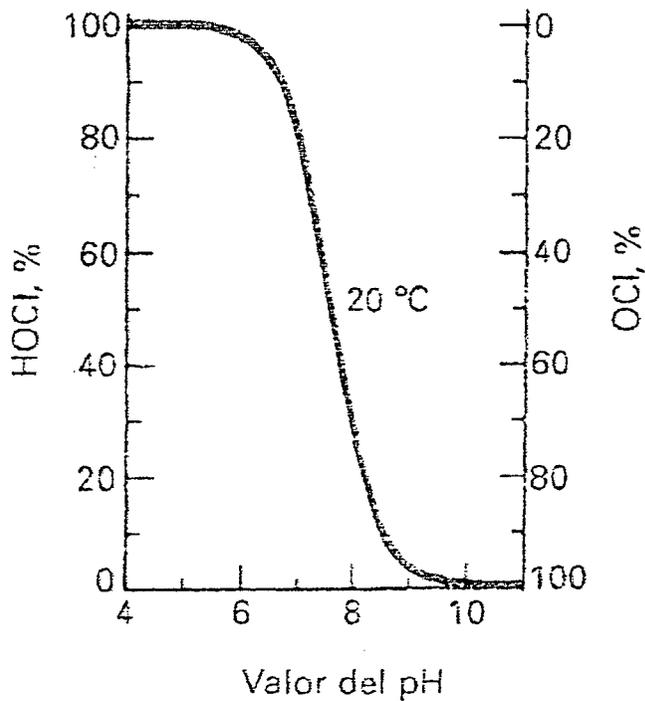


Fig. (24) Distribución del HOCl y OCl⁻ en función del pH
Fuente: "Ingeniería de las aguas residuales" – Autor: METCALF & EDDY 1995

La cloración como pre-tratamiento tiene la finalidad de reducir la carga microbiológica creadora del bio-fouling o ensuciamiento orgánico de la membrana. Este ensuciamiento es uno de los principales causantes de pérdida de eficiencia de la membrana, sus efectos van desde el aumento de la presión necesaria de trabajo hasta una disminución significativa del flujo de permeado.

Para aplicaciones de ósmosis inversa de pequeña y mediana capacidad (1 – 80 m³/h) es recomendable utilizar el cloro como solución de hipoclorito sódico debido a que su manipulación no es tan delicada como el cloro gas y no forma precipitados en corto tiempo en su tanque de almacenamiento, como el hipoclorito de calcio, lo que facilita su inyección a través de una bomba dosificadora de químicos en solución.

El tiempo mínimo de contacto es de 30 minutos, con este dato podemos calcular el volumen del tanque de residencia aplicando la siguiente ecuación:

$$V = V_0 + (F_E - F_S) * T \quad \text{Ec (82)}$$

- V = Volumen del tanque de residencia
- V₀ = Volumen Inicial
- F_E = Flujo de entrada
- F_S = Flujo de salida
- T = Tiempo de contacto

➤ **Acidificación**

La dosificación de ácido se añade para permitir que al valor de recuperación que se obtiene empleando los cálculos de sal limitante, no precipite CaCO₃. Así mismo también podemos definirlo como la cantidad de ácido necesario para llegar a un pH óptimo considerando un determinado porcentaje de recuperación en el cual no precipiten los iones carbonatos.

Entre los principales ácidos que se inyectan a la línea de alimentación figura el ácido sulfúrico y el ácido clorhídrico, ambos son buenas opciones al momento de dosificar.

➤ **Adición de anti incrustante**

Los anti-incrustantes son productos químicos acomplejantes, el principio se basa en la formación de precipitados en la superficie de la membrana en la sección de rechazo, a medida que el agua va atravesando la membrana los iones se van concentrando sobre la superficie de la misma especialmente en la capa límite donde se produce el proceso osmótico.

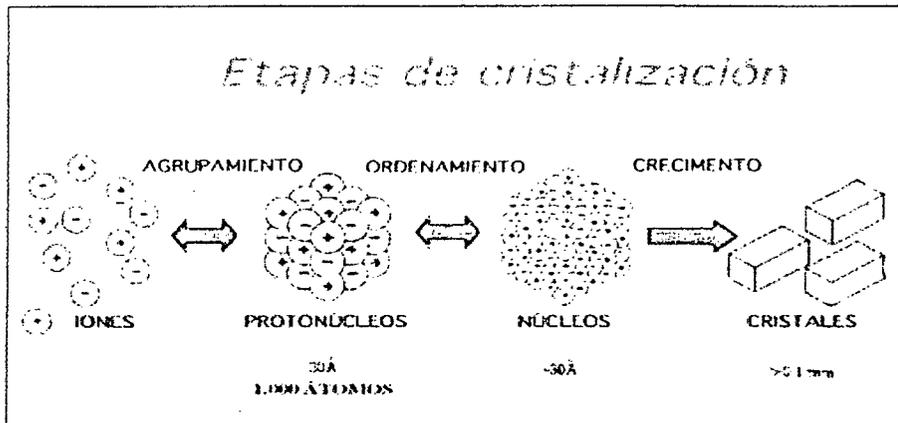


Fig. (25) *Etapas de cristalización*

Fuente: <http://www.scribd.com/doc/4024057/noticias5-Antiincrustantes-en-membranas>

Se empieza a formar pequeños agregados en equilibrio inestable, el crecimiento de estos agregados da lugar a la ordenación de átomos para formar núcleos de crecimiento estables en un proceso todavía reversible, por últimos estas aglomeraciones dan lugar a cristales que se depositaran sobre la membrana.

La primera opción viable fue el uso del hexametáfosfato sódico, luego fue reemplazado por el ácido poliacrílico, más la última generación de estos productos son los basados en fosfonatos.

Dependiendo de su peso molecular los polímeros, en este caso el ácido poliacrílico, actúan en menor o mayor medida mediante una combinación de efectos de distorsión de cristales, efecto dispersante y efecto complejante o quelante. Su acción principal se centra en la fase de crecimiento una vez formado el núcleo del cristal y en su efecto dispersante que disminuye el riesgo de deposición sobre la membrana al mantenerlos en suspensión en la fase líquida. Es decir este tipo de producto no evita la formación de núcleos del cristal, tan solo impide su posterior crecimiento.

En cambio los productos basados en fosfonatos, actúan fundamentalmente mediante el denominado efecto "umbral" (Threshlod) en la etapa de

ordenamiento de los protonucleos impidiendo realmente la formación de núcleos del cristal, aunque también tienen ciertas propiedades de distorsión y dispersión de cristales.

La dosificación de estos productos corresponde a un valor mínimo (2 – 10 ppm), el valor se determina en función de la calidad de agua y en la recuperación de agua del equipo de ósmosis inversa.

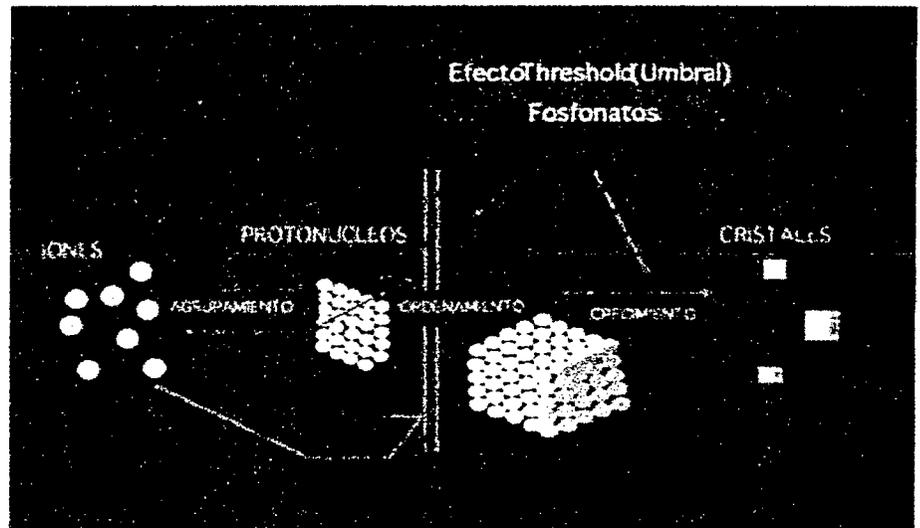


Fig. (26)

Esquema del efecto umbral

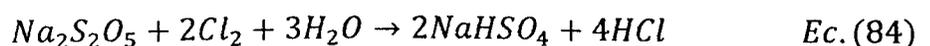
Fuente: <http://www.scribd.com/doc/4024057/noticias5-Antiincrustantes-en-membranas>

➤ Decloración

El químico más ampliamente usado para la decloración en los sistemas de ósmosis inversa es el meta bisulfito de sodio y el bisulfito de sodio (ver Anexo H). La reacción del bisulfito de sodio con el cloro libre es según la reacción:



La reacción del meta bisulfito de sodio con el cloro libre es según la reacción:



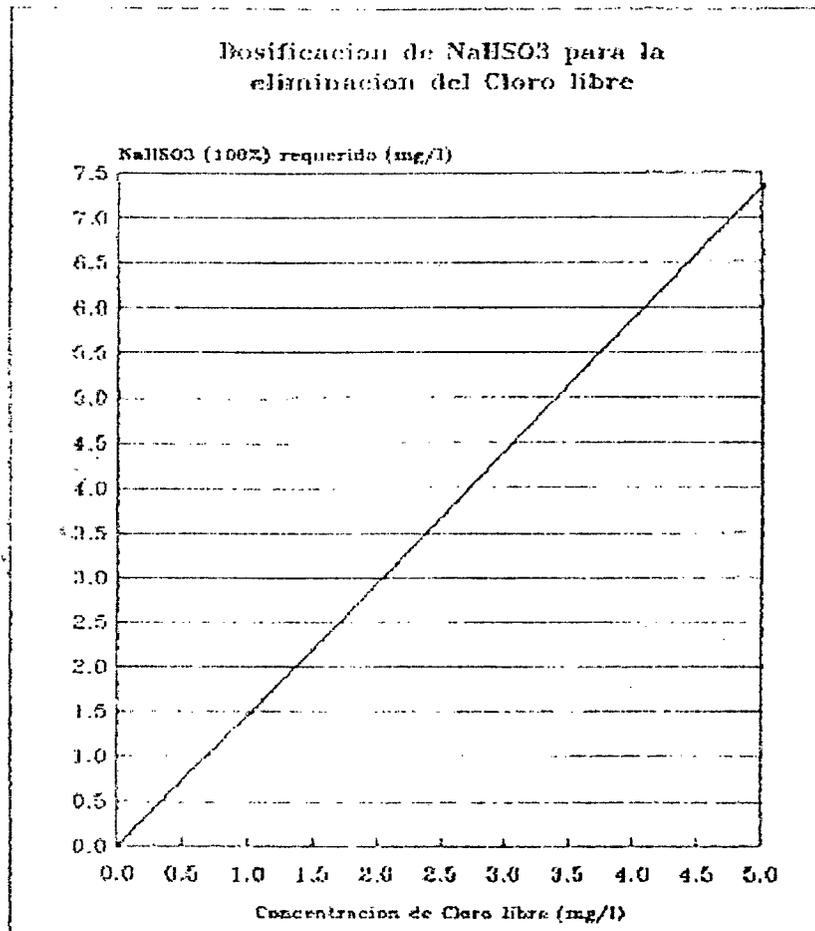


Fig. (27)

Relación de cloro libre vs dosificación de NaHSO₃

Fuente: Tesis : "Diseño de una unidad desaladora de agua de mar mediante el proceso de ósmosis inversa" – Autor: Rafael Andrade 1990

Como se mencionó, el bisulfito de sodio y el meta bisulfito son pretratamientos comúnmente usados como una alternativa paralela al uso del filtro de carbón para la neutralización de cloro.

Cuando el meta bisulfito de sodio o el sulfito de sodio entran en contacto con cloro, se forman sulfato de sodio NaHSO₄ y trazas de ácido clorhídrico. Una variedad de bacterias incluyendo las bacterias reductoras de sulfatos, son alimentadas por el sulfato de sodio (NaSO₄) y continúan multiplicándose, dando como resultado una gran cantidad de colonias y un ensuciamiento en la membrana ocasionada por organismos y desperdicios celulares conocidos como sulfuros, por lo que no es recomendable dosificar cantidades mayores a las estrictamente necesarias, como medio de control se utiliza un control

ORP (oxido – reducción) o medición de cloro en línea post dosificación de agente reductor.

En la figura 27 podemos observar la relación entre la concentración de cloro y la cantidad de bisulfito de sodio para neutralizar el efecto del primero.

2.6.3 Post-tratamiento

El post-tratamiento se define como las operaciones unitarias que modifican la calidad de agua osmotizada para cumplir con los parámetros requeridos. Estas operaciones pueden ser regulación de pH, desgasificación, alcalinización, post-cloración, entre otras.

A. Regulación de pH

Debido al rechazo ocasionado por la membrana de ósmosis inversa, ocasionamos una variación en los equilibrios de las especies iónicas, en el caso del bicarbonato este cambio afecta el pH.

Se fundamenta en que el rechazo del bicarbonato CO_3^{2-} es superior al carbonato (HCO_3^-) debido a que en la operación de ósmosis inversa se rechaza el rechazo es mayor en las especies iónicas de mayor valencia, como podemos observar en la tabla 10 y expresado en la Fig. 28

En la línea de Permeado

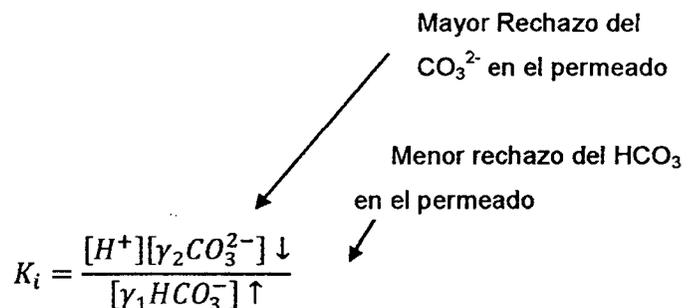


Fig. (28) Constante de ionización del HCO_3^- en la línea de permeado

Fuente: Físicoquímica 5^a Edición – Iran Levine

Además para mantener el equilibrio se incrementa la concentración de hidrogeno $[H]^+$ lo que ocasiona una disminución en el pH según la siguiente ilustración basada en la relación $pH = -\log([H]^+)$:



Fig. (29)

Relación entre $[H]$ y el pH

Fuente: Físicoquímica 5^a Edición – Iran Levine

B. Desgasificación

Como característica un sistema de membranas para ósmosis inversa, permite atravesar los gases disueltos en el agua sin ningún tipo de restricción.

La desgasificación se realiza principalmente para remover el CO_2 del agua, como es el caso de aplicaciones farmacéuticas en donde es necesario remover este gas para evitar que entre en unidades de electrodesionización (EDI).

La desgasificación del CO_2 antes se realizaba dosificando soda caustica a la alimentación del ósmosis inversa a fin de que el gas pase a ser carbonatos CO_3^{-2} y pueda ser removida por el ósmosis inversa.

Esta técnica contradice las buenas prácticas de operación de un desalinizador convencional por lo que se ideó emplear una membrana de separación de gases a la descarga del equipo de ósmosis inversa como se muestra a continuación en la figura 30.



Fig. (30) Desgasificador

Fuente: <http://www.liqui-cel.com/>

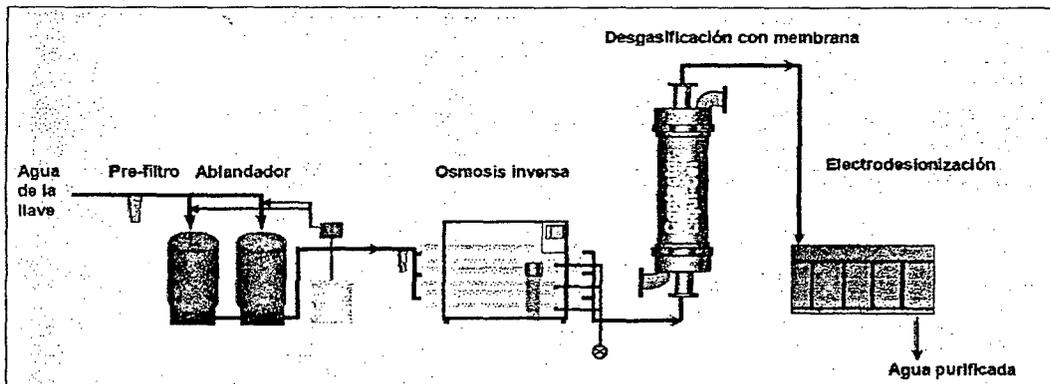


Diagrama de flujo del diseño de planta para producir agua purificada de calidad farmacéutica de acuerdo a los requisitos de la farmacopea estadounidense y europea

Fig. (31) Aplicación del desgasificador

Fuente: <http://www.liqui-cel.com/>

C. Alcalinización

De la misma manera en que hemos indicado que el CO_2 es perjudicial en un sistema electrodesionizador para sistemas farmacéuticos también se presenta el caso en que para otro tipo de aplicaciones industriales es necesario re-alcalinizar el agua osmotizada. Es decir volverla a cargar de HCO_3^- y CO_3^{2-} para evitar su alta corrosividad, la manera más práctica es dosificando una base para que el CO_2 remanente (igual que en caso anterior

se mantuvo inmutable a través de la membrana) se asocia y forman los iones antes mencionados.

D. Post-cloración

En el caso que la aplicación de la desalinización para consumo humano es necesario agregar un agente desinfectante con carácter residual. El más común es el cloro en sus distintas formas: gas, hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio. El rango de dosificación se encuentra entre 0.5 a 1 ppm, en este caso el cloro inyectado es muy próximo al cloro residual debido a que las membranas también han rechazado gran parte de los contaminantes microbiológicos.

Como se ha podido apreciar existen distintos tipos de post-tratamientos en función de la aplicación, inclusive para aplicaciones específicas se puede mencionar la desmineralización por intercambio iónico, la remoción de sulfuro de hidrógeno, etc.

2.7 Simuladores de operación de membranas

Los simuladores de operación de membranas es esencialmente un simulador de procesos. La simulación de operación de membranas puede ser definida como una técnica para evaluar en forma rápida el proceso de separación empleando modelos matemáticos descritos anteriormente, además de considerar el equilibrio iónico de solución y el equilibrio de precipitación. La solución de estos modelos se llevan a cabo por medio de programas de computadoras, los cuales permiten tener un mejor conocimiento del comportamiento de dicho proceso.

La mayoría de los simuladores comerciales emplean el modelo de difusión – solución para simplificar el cálculo, por lo que podemos hallar el valor A y B que se emplean en este modelo.

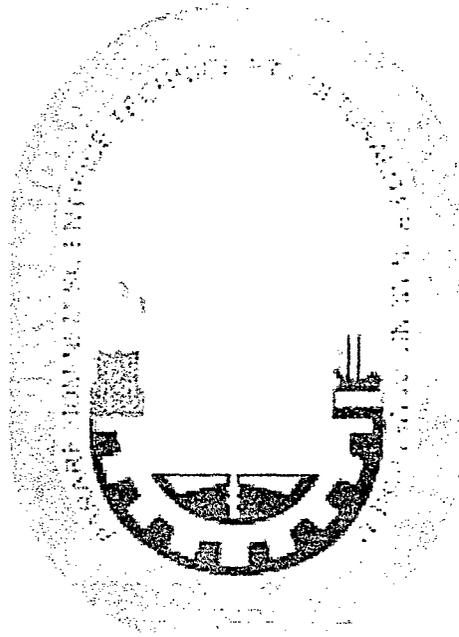
La aplicación de los simuladores se centra en el cálculo de la presión de operación, el cual está en función de la carga mineral del agua (conductividad) así como la temperatura, debido a que afecta el coeficiente de actividad iónica de la solución, así como la calidad de agua a obtener a una determinada recuperación y presión.

Definiciones Comunes en los simuladores comerciales:

Tabla 18	Terminología en simuladores de ósmosis inversa
Terminología instalación simuladores	
Presión de Trabajo	Presión de operación del sistema de membranas, es superior a la presión osmótica para permitir la operación de separación por ósmosis inversa.
Factor beta	Relación de cantidad de sales tanto en la línea de concentrado como en la línea de alimentación. También es llamado factor concentración-polarización
Flujo de Permeado	Flujo de permeado por unidad de área de membrana, usualmente se expresa como el flujo en GPD (galones por día) sobre el área de la membrana, así mismo también es considerado un factor de diseño que debe estar dentro de ciertos rangos definidos por el proveedor.
Caudal de alimentación	Caudal de agua salobre que ingresa al sistema.
Dosificación de químicos	Como su nombre lo indica permite el ingreso de diversos químicos según el diseño, ácidos, bases o sales
Array	Arreglo o Disposición de bancos, también considera el número de membranas por vessel.

Back Pressure	Presión de retorno, se aplica usualmente para simular un estrangulamiento en la línea de permeado.
Salt Passage Increase per year	Se entiende como el incremento de las sales que pasan a través de la membrana en un año, usualmente es un porcentaje (3 - 10%)
By-Pass	Es una línea auxiliar que comunica la alimentación con el agua de producción (permeado), en algunos simuladores se denomina línea de blending.

Así mismo cada proveedor de membranas tiene una tabla de diseño recomendado, en la marca Toray esta es:



Parámetros TORAY			Fuente original de agua de alimentación								
Lineamiento de diseño			Permeado de OI	Permeado de OI (alto pH)	Pozo salobre	Superficial Salobre MF/UF	Superficial Salobre	Pozo playero	Mar Abierto	Desperdicio terciario	Desperdicio terciario (MF/UF)
Parámetro	Condición	Dimensión									
Alimentación SDI* @ 15 min	Rango	%/min	>1	>1	1-2	1-2	1-2	1-2	>3	3-4	2-3
	Limite	%/min	>1	>1	>3	>3	>4	>3	>4	>5	>3
Flux del sistema promedio	Rango	gfd	17.5 23	17.5 23	15 19	13.5 17	10.5 13.5	9 11	7 9.5	5.5 7.5	7.5 11
	Limite	l/m ² /h	<26.5	<26.5	<20	<17.5	<14.5	<12	<10	<8	<12.5
Máx. flux por elemento	Limite	l/m ² /d	28.5	28.5	25.5	23	18.5	20.5	16.5	11	14.5
Máx. flujo de alimentación	8" (Diámetro membrana)	m ³ /h	17	17	16	15	13	15	13	12	13
Concentración-Polarización			1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2

*SDI : Índice de ensuciamiento

Fig. (32)

Lineamiento de diseño del proveedor Toray

Fuente: <http://www.toray.com/>

Entre los simuladores comerciales que más se emplea en nuestro medio tenemos:

- ✓ WinFlow de la empresa DESAL - GE
- ✓ TorayRO, de la empresa Toray
- ✓ Rosa de la empresa Filmtec
- ✓ Hidranautics, de la empresa del mismo nombre

Emplearemos el software TorayRO debido a que nos permite mayor flexibilidad y nos muestra los valores de A, B y el factor de concentración – polarización (factor Beta).

2.7.1 Desarrollo del diseño asistido por el software TorayRO

A continuación se presenta la metodología de desarrollo del programa a fin de describir a detalle cada etapa.

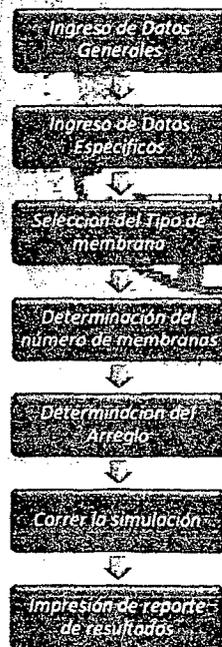


Fig. (33)

Metodología de desarrollo de la simulación de operación de membranas

Fuente: Elaboración propia

A. Ingreso de datos generales

Los datos generales son valores que corresponden a la producción de agua requerida, la recuperación, dosificación de químicos (pretratamiento). En nuestro caso son iguales para ambos procesos a simular.

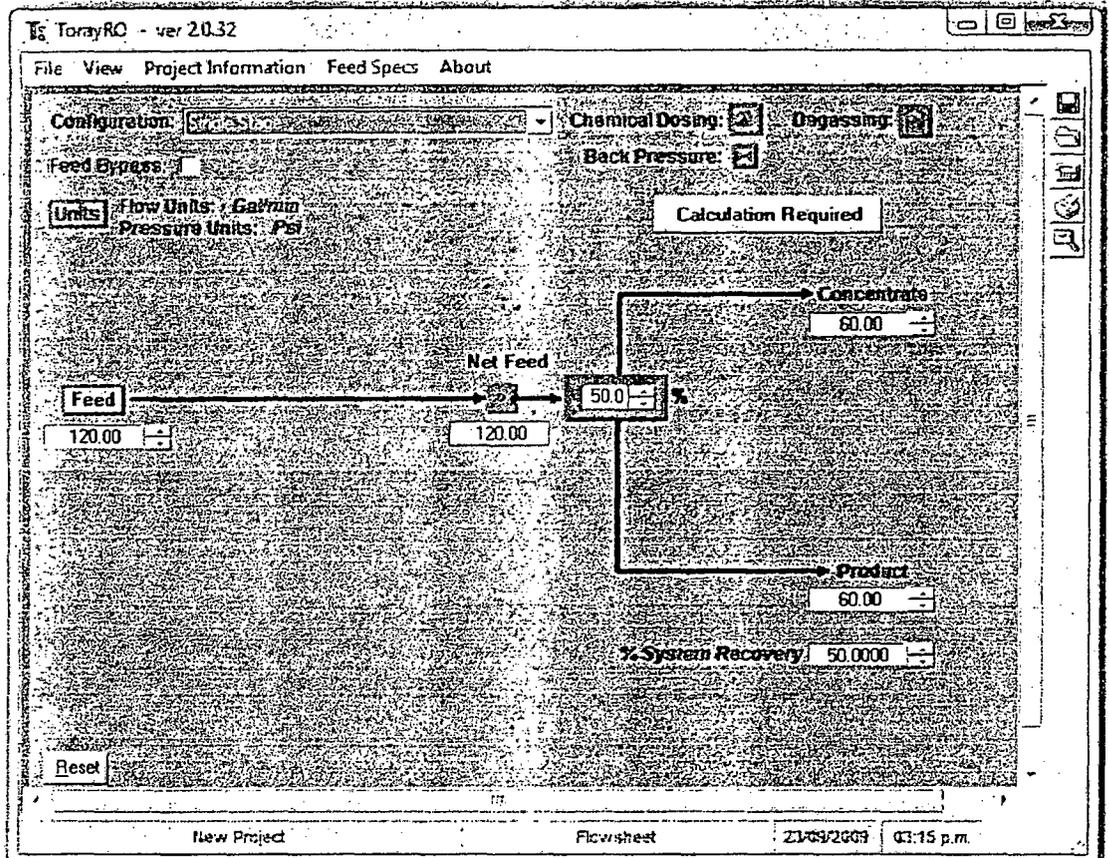


Fig. (34) Pantalla Inicial del programa TorayRO

Fuente: Elaboración propia

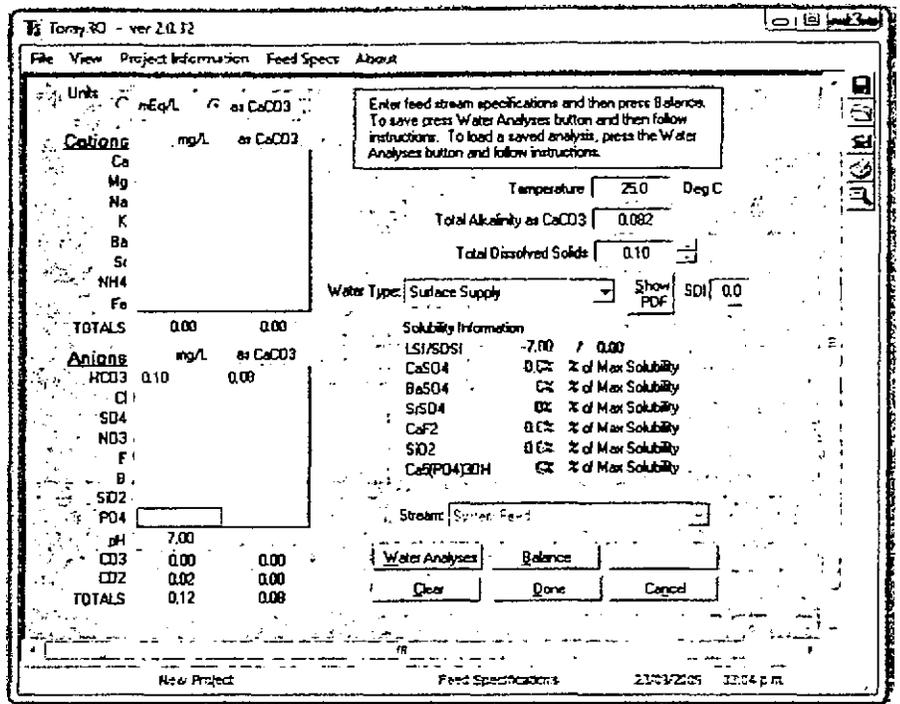


Fig. (35) Pantalla de ingreso de valores del análisis químico
 Fuente: Elaboración propia

B. Ingreso de datos específicos

Los datos específicos son valores únicos y específicos para cada proceso, estos son agrupación, arreglo y tipos de membranas

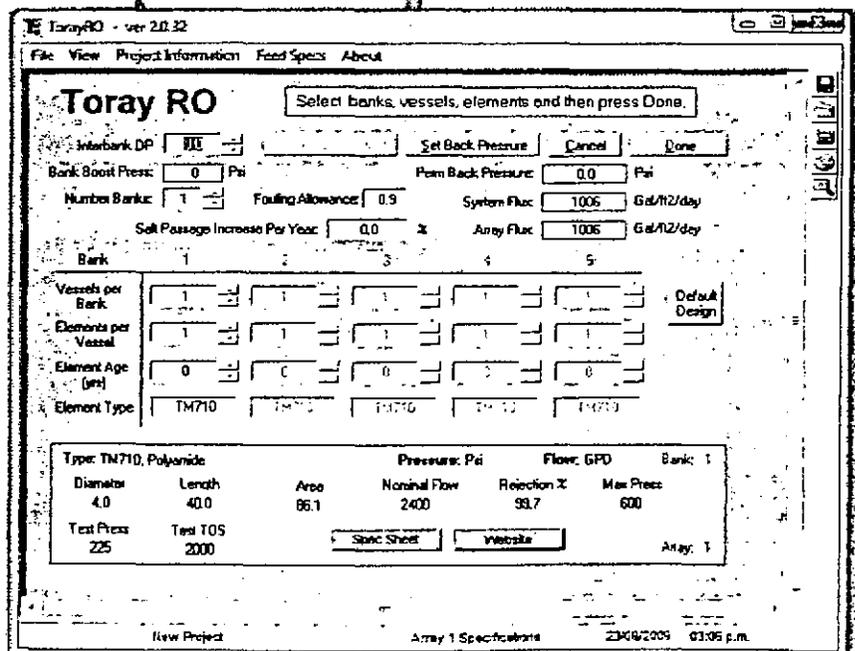


Fig. (36) Pantalla de ingreso de arreglo de membranas
 Fuente: Elaboración propia

✓ Selección del tipo de membrana

Emplearemos membranas de poliamida por ser resistentes a la hidrólisis, dentro de esta categoría deberemos seleccionar el tipo de membrana en función de la calidad de agua requerida, para esto emplearemos el anexo C.

✓ Determinación del número de membranas

El número de membranas está en función de la cantidad de agua a producir, y al flux de alimentación recomendado; para producciones superiores a $2 \text{ m}^3/\text{h}$ la empresa Toray recomienda emplear membranas de la medida de 8" de diámetro y 40" de altura, las cuales son comercialmente disponibles.

Emplearemos el flux de diseño recomendado por el fabricante (ver fig. 30)

✓ Disposición de arreglos

Luego de determinar el tipo de membrana, el número de membranas, se determina el arreglo de estas para esto usaremos el concepto de la concentración – polarización, por diseño se considera el valor máximo de 1.2 (este valor se encuentra en la tabla de diseño Figura 32)

El arreglo se verifica considerando que el valor de concentración – polarización no debe exceder lo mencionado en los lineamientos de diseño del proveedor.

III. MATERIALES Y METODOS

3.1 Equipos

Los equipos requeridos para el presente estudio e investigación han sido un computador cargado con software para resolución de ecuación multi-variables no lineales además del programa Advisor y Toray RO.

Software empleados para la simulación.

Advisor

Software para determinar la dosis de producto químico anti-escalante como pre-tratamiento al sistema de ósmosis inversa.

Toray RO

Permite el ingreso de los valores hallados externamente (recuperación del sistema y pH óptimo), además con este software se obtienen los parámetros de operación de separación por membranas de ósmosis inversa.

3.2 Metodología

La metodología de diseño comienza con un análisis fisicoquímico - microbiológico del agua salobre subterránea, posterior calculamos la recuperación máxima para que no precipite sulfato de bario en la membrana para esto empleamos el concepto de sal limitante, posteriormente con el dato de recuperación hallado determinamos el pH óptimo que no permita la precipitación de carbonato de calcio en la membrana.

Seguido determinamos la dosificación de cloro a inyectar, luego de obtener estos datos, los ingresamos en el software Advisor de la empresa Avista para obtener la dosificación de antiescalante y el producto requerido; seguido con el dato de cloro residual procedemos a calcular la cantidad de metabisulfito de sodio.

Posteriormente con la recuperación hallamos el flujo total de alimentación al sistema, este dato es empleado para calcular el filtro multimedia específicamente el área de filtración, la altura de los medios filtrantes y su pérdida de presión

Luego de definir el pre-tratamiento tanto físico como químico, obtendremos los parámetros de operación de membranas a través del software TorayRO, en el cual introduciremos las variables independientes (caudal de agua requerido y análisis del agua salobre subterránea), al obtener los parámetros también conseguiremos la calidad de agua osmotizada, esta se compara con la calidad de agua requerida, si esta última es distinta de la obtenida, por medio del post-tratamiento modificaremos los valores obtenidos hasta estar de acorde a lo requerido.

En vista que estamos efectuando un desarrollo comparativo entre dos procesos de producción de agua desalinizada para diferentes aplicaciones pero con una misma fuente de agua, se considera el desarrollo de cálculos anti-incrustantes y pre tratamiento igual para ambos tipos, sus diferencias serán observadas en la simulación y pos-tratamiento.

Así mismo se elaborará un diagrama de flujo de proceso (PFD) con una descripción a detalle, para esto emplearemos los datos obtenidos en los puntos anteriores. A continuación se muestra un flujograma de la metodología en la figura 37:

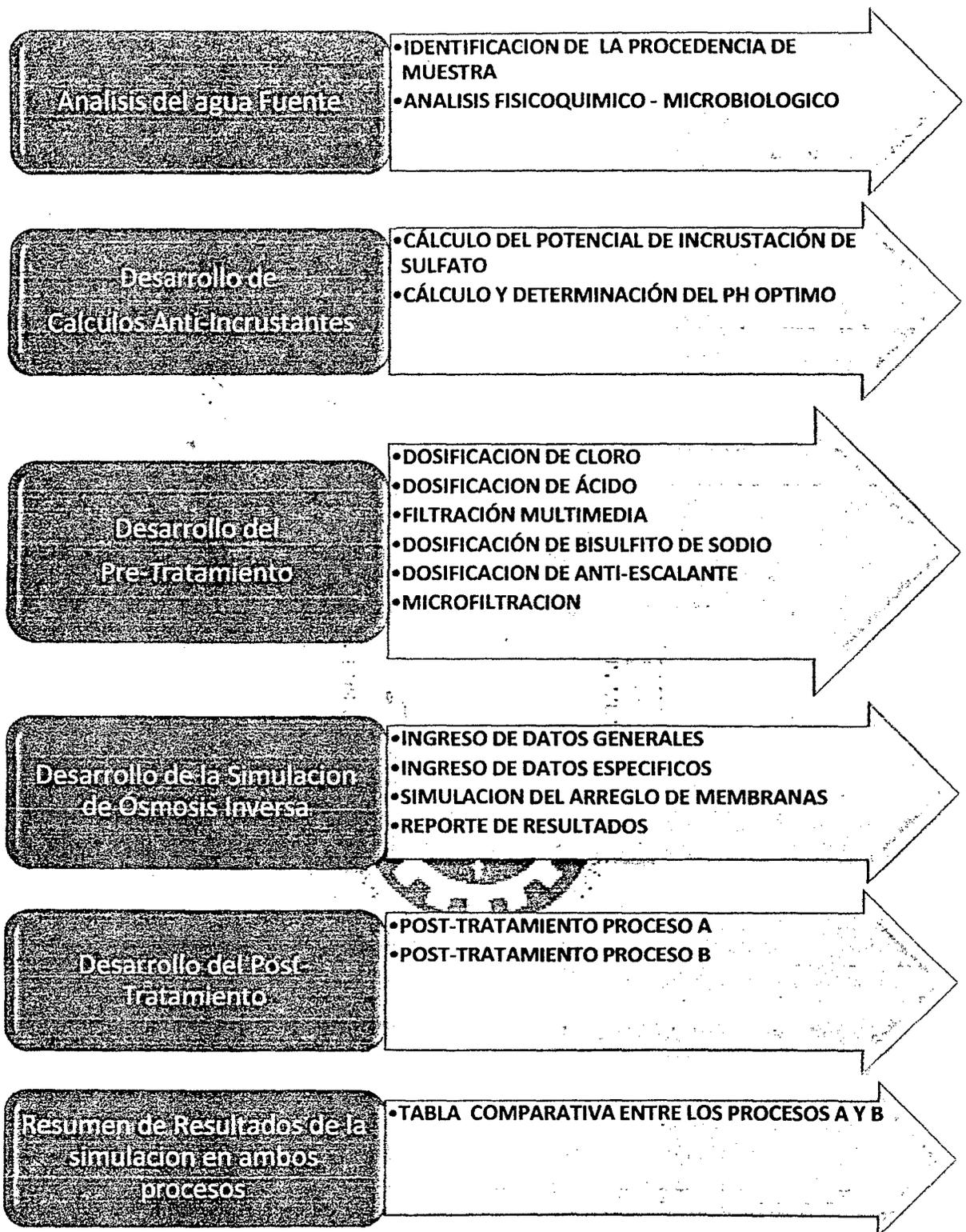


Fig. (37) Flujograma de la metodología

Fuente: Elaboración propia

3.2.1 Análisis del agua fuente

A. Identificación de la procedencia de la muestra

Determinamos el tipo de muestra, fuente y localización de la procedencia y fecha de muestreo.

B. Análisis fisicoquímico - microbiológico

Empleamos métodos normados para los análisis respectivos, según como se observa en la tabla 19

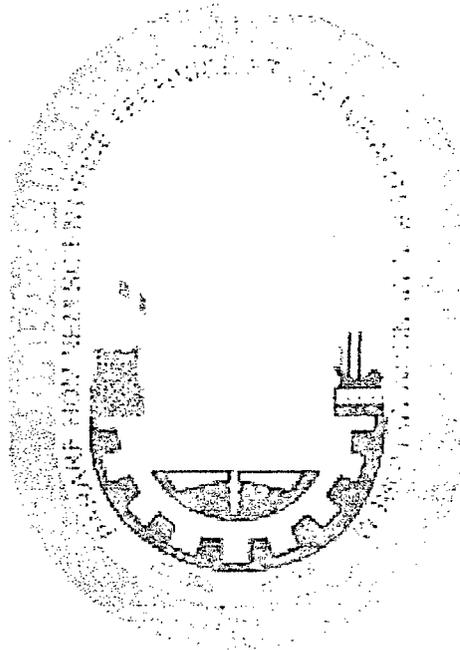


Tabla 19	Normas Estandarizadas de análisis fisicoquímico – microbiológico
Potencial de Hidrogeno	APHA-AWWA-WEF 4500-H+-B, 2005 21 st Ed. pH Value. Electrometric Method
Cloruros	APHA-AWWA-WEF 4500-Cl-B, 2005 21 st Ed. Chloride, Argentometric Method
Sulfatos	APHA-AWWA-WEF 4500-SO4-E, 2005 21 st Ed. Sulfate, Turbidimetric Method
Dureza Calcica	APHA-AWWA-WEF 3500-Ca-B, 2005 21 st Ed. Calcium: EDTA Titrimetric Method
ICP Total	EPA – 200.7 :1994 Rev 4.4 Determination of metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry
Conductividad	APHA-AWWA-WEF 2510-B, 2005 21 st Ed. Conductivity: Laboratory Method
Turbidez	APHA-AWWA-WEF 2130-B, 2005 21 st Ed. Turbidity. Nephelometric Method
Nitrogeno - Nitratos	APHA-AWWA-WEF 4500- NO3-B, 2005 21 st Ed. Nitrogen (nitrate) : Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method
Bicarbonatos	AOAC 973.43:2005; 18 th Edition. Carbonate and Bicarbonate in wáter. Titrimetric Method
Alcalinidad	AOAC 973.43 : 2005; 18 th Edition. Alkalinity of water. Titrimetric Method
Dureza Magnésica	APHA-AWWA-WEF 3500-Mg B, 2005 21 st Ed. Magnesium. Calculation Method
Fosforo (como fosfato)	APHA-AWWA-WEF 4500-P-E, 2005 21 st ED. Phosphorus: Ascorbic Acid Method
Sílice	APHA-AWWA.WEF 4500-SIO2-C, 2005 21 st Ed. Molybdosilicate Method
Numeración de Coliformes Fecales	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 9221 E, 21 st Edition.2005
Numeración de Coliformes Totales	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 9221 B, 21 st Edition 2005

Fuente: Elaboración propia – Datos de SGS

3.2.2 Desarrollo de cálculos anti-incrustantes

A. Cálculo del potencial de incrustación de sulfato

Emplearemos el cálculo del potencial de incrustación de sulfatos de bario para calcular la máxima recuperación del sistema de ósmosis inversa sin que precipite esta sal, este procedimiento también se llama cálculo de la sal limitante, el cual se ha visto en el capítulo 2.6.1 del presente trabajo.

Como se mencionó, estas ecuaciones se pueden resolver en forma simultánea empleando diferentes métodos numéricos o por resolución empleando software de computadora.

B. Determinación del pH óptimo

El cálculo del pH óptimo está sujeto a la ecuación (67), los datos requeridos para su desarrollo pueden obtenerse del "Handbook of chemistry and Physics", Anexo J y Anexo K

3.2.3 Desarrollo del pretratamiento

A. Dosificación de cloro

Para la dosificación de cloro partiremos que un agua subterránea que por su naturaleza no presente alta carga bacteriológica debido a la protección superficial que presenta, esto se verifica con el análisis de coliformes totales.

El rango de cloro residual que se debe tener en el agua considerada de consumo humano oscila entre 0.5 a 1 ppm, en nuestro caso al considerarse poca carga de microorganismo dosificaremos 1.5 ppm de cloro activo a fin de llegar a los niveles estándar de residual. Además al ser un sistema de producción mediana (200m³/día) consideraremos Hipoclorito de sodio al 10% como químico a inyectar. Además es necesario calcular el volumen del tanque de contacto por lo que emplearemos la Ec.(82)

B. Dosificación de ácido

La dosificación de ácido se realiza para poder establecer el pH óptimo según lo calculado en el desarrollo de cálculos anti-incrustantes. En nuestro caso la dosificación de ácido se simulará en el software TorayRO en donde nos calculara la cantidad requerida de ácido clorhídrico a emplear.

C. Filtración multimedia

Para realizar el respectivo cálculo para la filtración multimedia es necesario seguir la siguiente metodología:

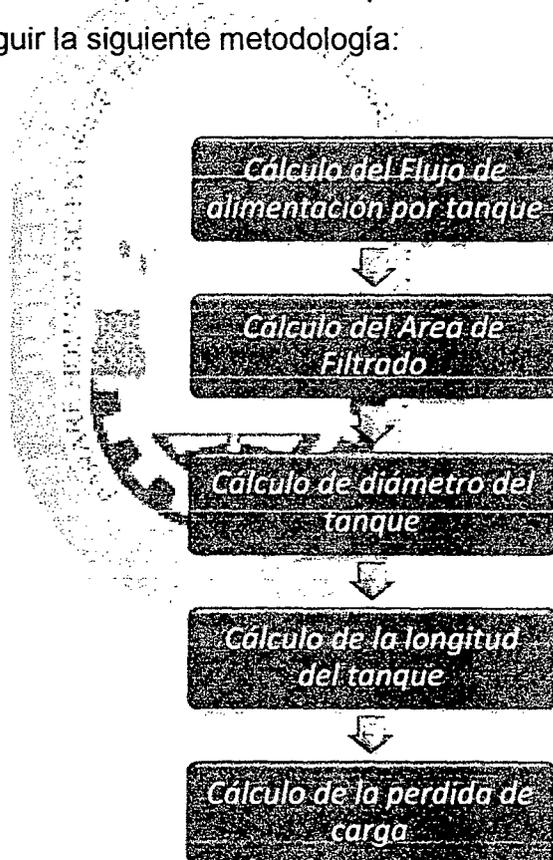


Fig. (38) Metodología de cálculo de filtración multimedia
Fuente: Elaboración propia

➤ **Cálculo del flujo de alimentación por tanque**

Debido a que requerimos un aproximado de tres veces el flujo de alimentación para poder realizar un buen retrolavado, por lo que emplearemos tres tanques que trabajan en forma paralela, este concepto corresponde al sistema tipo Triplex de la compañía General Electric.

$$F_{at} = \frac{F_a}{3} \quad Ec (85)$$

$F_a =$ Flujo de Alimentación

$F_{at} =$ Flujo por tanque de filtración

➤ **Cálculo del área de filtrado**

$$A = \frac{F_{at}}{V} \quad Ec (86)$$

➤ **Cálculo del diámetro de tanque**



$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad Ec (87)$$

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot A}{\pi}} \quad Ec (88)$$

A = Área de filtrado

V = Velocidad de Filtración

D = Diámetro del Tanque de Filtración

➤ **Cálculo de la longitud del tanque**

Empleamos la tabla 15 del capítulo filtración multimedia en donde hemos definido el rango de alturas por cada medio.

➤ **Cálculo de la pérdida de carga**

Se emplea la ecuación de Kozeny para cada medio filtrante y luego se realiza una sumatoria total, ver la Ec.(86)

D. Dosificación de bisulfito de sodio

Para la dosificación de bisulfito de sodio empleamos la relación definida anteriormente de 1.5 ppm por cada 1 ppm de cloro residual.

$$\text{Cantidad de dosificación NaHSO}_3(\text{ppm}) = \text{Cloro Residual (ppm)} \times 1.5 \quad \text{Ec(89)}$$

E. Dosificación de anti-escalante

Los anti-escalantes para ósmosis inversa son formulas reservadas por cada proveedor, estos proporcionan softwares para realizar cálculos de precipitación, entre ellos ubicamos el programa Advisor, con el que determinaremos los potenciales de incrustación y determinamos la cantidad exacta de dosificación.

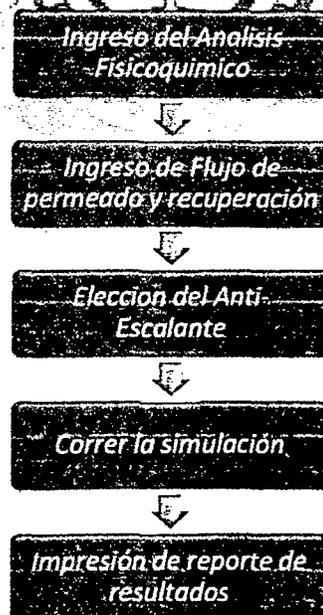


Fig. (39) Metodología de Cálculo de Dosificación de Anti-Escalante

Fuente: Elaboración propia

F. Microfiltración

El empleo de filtros de cartuchos para equipos de ósmosis inversa se dimensionan en función de sus curvas Caudal (gpm) vs DP (Diferencial de presión), en nuestro caso se empleará la curva para el elemento

3.2.4 Desarrollo de la simulación de ósmosis inversa – torayro

Se siguen los procedimientos planteados en la metodología de simulación (Figura 33)

3.2.5. Desarrollo del post – tratamiento.

El post-tratamiento se definió como un paso posterior a la separación realizada por la operación de ósmosis inversa, en nuestro caso identificaremos las diferencias entre la calidad requerida y obtenida por el proceso de membranas y con este dato determinaremos el post-tratamiento necesario.

3.2.6 Resumen de resultados.

Se presenta una tabla presentado los resultados de cada etapa de la metodología; así mismo esto nos permite observar y analizar el comportamiento de las variables independientes y su consecuencia en las variables dependientes como presión, STD, concentración – polarización.

3.2.7 Diagrama de flujo de procesos

Tomando en consideración los valores que se observan en el resumen de resultados, elaboramos un diagrama de flujo de procesos y una descripción de este tomando en referencia las líneas de proceso.

IV. CALCULOS Y RESULTADOS

4.1 Identificación de procedencia de la muestra

Fuente : Pozo
 Tipo : Agua Salobre Subterránea
 Posición : Latitud S 12° 12.3493' y Longitud W 76° 58.4812'
 Ubicación : Distrito de Villa El Salvador – Provincia de Lima –
 Departamento de Lima

4.2 Análisis fisicoquímicos

El análisis fisicoquímico - microbiológico del agua, realizadas según las normas mencionadas nos brinda los siguientes resultados:

Tabla 20		Resultado de análisis fisicoquímico - microbiológico	
	Análisis	Valor	Unidad
	Potencial de Hidrogeno	9.3	
	Cloruros	1249	ppm
	Sulfatos	386	ppm
	Dureza Cálcica	22	ppm
	Fluoruro	0.54	ppm
	Conductividad	5,930	us/cm
ICP	Aluminio	<0.01	ppm
	Antimonio	<0.005	ppm
	Arsénico	0.015	ppm
	Bario	0.009	ppm
	Berilio	<0.0003	ppm
	Bismuto	<0.005	ppm
	Boro	2.1	ppm
	Cadmio	<0.001	ppm
	Calcio	6.2	ppm
	Cerio	<0.05	ppm

Circonio	<0.003	ppm
Cobalto	<0.001	ppm
Cobre	0.003	ppm
Cromo	0.007	ppm
Escandio	<0.003	ppm
Estaño	<0.01	ppm
Estroncio	0.280	ppm
Fosforo	<0.1	ppm
Hierro	0.2	ppm
Itrio	<0.005	ppm
Lantano	<0.0005	ppm
Litio	0.03	ppm
Magnesio	3.86	ppm
Manganeso	0.004	ppm
Molibdeno	0.014	ppm
Níquel	<0.001	ppm
Plata	<0.001	ppm
Plomo	<0.004	ppm
Potasio	52.2	ppm
Selenio	<0.05	ppm
Silicio (SiO ₂)	13.6	ppm
Sodio	>70	ppm
Talio	<0.03	ppm
Titanio	<0.003	ppm
Vanadio	0.012	ppm
Wolframio	<0.005	ppm
Zinc	<0.005	ppm
Turbidez	4.57	ppm
Nitrógeno – Nitratos	65.276	ppm
Bicarbonatos	158	ppm
Alcalinidad	217	ppm
Dureza Magnésica	14	ppm
Fosfatos	<0.1	ppm

	Sílice	28.1	ppm
	Coliformes Totales	100	UFC
	Coliformes fecales	0	UFC

Fuente: Informe de ensayo con valor oficial SGS – MA807111

4.3 Desarrollo de cálculos anti-incrustantes

4.3.1 Cálculo del potencial de incrustación de sulfato

Datos:

Tabla 21 Datos para el cálculo de potencial de incrustación de sulfato

Dato	Valor	Dato	Valor Molaridad
$K_{ps} BaSO_4^{**}$	1.08×10^{-10}	[Ba]	$6.55 \times 10^{-8} M$
$a^{**} (Ba)$	0.95	[SO ₄]	$4.02 \times 10^{-3} M$
$b^{**} (SO_4)$	0.95	STD alimentación	2,965 ppm
%Rechazo(STD)	98%		
Z (carga iónica)	2		

*Fuente: Handbook of Chemistry and Physics - 2005

**Fuente: "Tratamiento de aguas industriales"

Tabla 22 Cuadro resumen – datos reemplazados

$STD_c = \frac{0.98}{2} * 2965$
$I = (2.5 * 10^{-5}) * STD_c$
$\log \gamma = -0.51 * 2^2 * \frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}}$
$1.08 * 10^{-10} = K_c * \gamma^2$
$K_c = \left[\frac{(1 - (1 - X) * (1 - 0.95)) * 6.55 * 10^{-8}}{X} \right] * \left[\frac{(1 - (1 - X) * (1 - 0.95)) * 4.02 * 10^{-3}}{X} \right]$

Fuente: Elaboración propia

Resolviendo esas ecuaciones en forma simultánea obtenemos los valores siguientes:

Tabla 23 Resultados del cálculo del potencial de incrustación de sulfato		
Símbolo	Definición	Valor
Kc	Constante de Concentración	2.077×10^{-9}
STD_c (ppm)	Sólidos Totales Disueltos	8,439.13
X	Fracción en el permeado	0.3523
I	Intensidad Iónica	0.21097
γ	Coefficiente de Actividad	0.2279

Fuente: *Elaboración propia*

La recuperación es la siguiente:

$$\text{Recuperación} = 1 - X$$

$$\text{Recuperación Máxima} = 0.647 = 64.7\%$$

4.3.2 Determinación del pH

Datos:

Tabla 24 Datos para el cálculo del pH óptimo

Valores de constantes		Valores de concentración	
Dato	Valor	Dato	Valor
$K_{ps} \text{ CaCO}_3^*$	3.36×10^{-9}	$[\text{Ca}]$	$1.55 \times 10^{-4} \text{ M}$
$K_i \text{ HCO}_3^{**}$	4.688×10^{-11}	$[\text{HCO}_3]$	$2.59 \times 10^{-3} \text{ M}$
a^{***}	0.95		
b^{***}	0.95		

*Fuente: "Handbook of Chemistry and Physics – 2005"- Anexo J

** Fuente: "Handbook of Chemistry and Physics – 2005"- Anexo K

*** De la Tabla 10 – Rechazo de elementos por membrana de ósmosis inversa

Obtenemos los valores de $\gamma_{Ca^{+2}}$

$$\log \gamma_{Ca^{+2}} = -0.51 * 2^2 \frac{\sqrt{0.2109}}{1 + \sqrt{0.2109}} \quad \text{Ec. (90)}$$

$$\log \gamma_{Ca^{+2}} = -0.6334 \quad \text{Ec. (91)}$$

$$\gamma_{Ca^{+2}} = -0.2279 \quad \text{Ec. (92)}$$

Obtenemos los valores de $\gamma_{CO_3^{-2}}$

$$\log \gamma_{CO_3^{-2}} = -0.51 * 2^2 \frac{\sqrt{0.2109}}{1 + \sqrt{0.2109}} \quad \text{Ec. (93)}$$

$$\log \gamma_{CO_3^{-2}} = -0.6334 \quad \text{Ec. (94)}$$

$$\gamma_{CO_3^{-2}} = -0.2279 \quad \text{Ec. (95)}$$

Obtenemos los valores de $\gamma_{HCO_3^{-1}}$

$$\log \gamma_{HCO_3^{-1}} = -0.51 * 1 \frac{\sqrt{0.2109}}{1 + \sqrt{0.2109}} \quad \text{Ec. (96)}$$

$$\log \gamma_{HCO_3^{-1}} = -0.1447 \quad \text{Ec. (97)}$$

$$\gamma_{HCO_3^{-1}} = -0.691 \quad \text{Ec. (98)}$$

Empleamos la ecuación 66

$$[H^+] = \left[\frac{((1 - (1 - X) \cdot (1 - a)) \cdot Ca^{+2})}{X} \right] \left[\frac{((1 - (1 - X) \cdot (1 - b)) \cdot K_{i(HCO_3^-)} \cdot \gamma_{HCO_3^-} \cdot [HCO_3^-])}{X \cdot \gamma_{CO_3^{-2}} \cdot K_c} \right] \quad \text{Ec. (66)}$$

Y obtenemos:

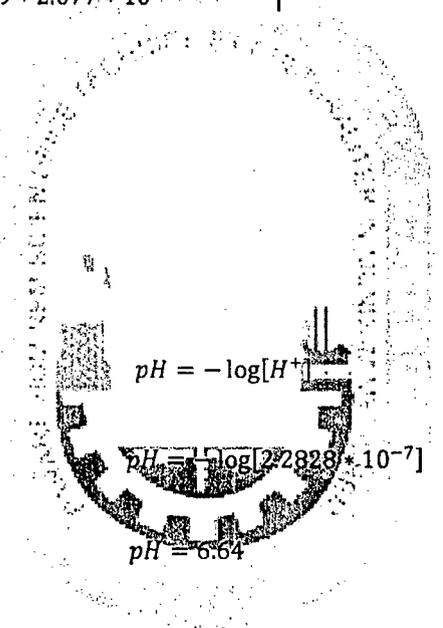
$$[H^+] = \left[\frac{((1 - (1 - 0.3523) \cdot (1 - 0.95)) \cdot 1.55 \cdot 10^{-4})}{0.3523} \right] \left[\frac{((1 - (1 - 0.3523) \cdot (1 - 0.95)) \cdot 4.688 \cdot 10^{-11} \cdot 0.691 \cdot 2.59 \cdot 10^{-3})}{0.3523 \cdot 0.2279 \cdot 2.077 \cdot 10^{-9}} \right] \quad \text{Ec. 99}$$

$$[H^+] = \left[\frac{(0.967615 \cdot 1.55 \cdot 10^{-4})}{0.3523} \right] \left[\frac{(0.967615 \cdot 4.688 \cdot 10^{-11} \cdot 0.691 \cdot 2.59 \cdot 10^{-3})}{0.3523 \cdot 0.2279 \cdot 2.077 \cdot 10^{-9}} \right] \quad \text{Ec. 100}$$

$$[H^+] = [4.25717 \cdot 10^{-4}] [5.362 \cdot 10^{-4}] \quad \text{Ec. 101}$$

$$[H^+] = 2.2828 \cdot 10^{-7} \quad \text{Ec. 102}$$

Entonces el pH conforme a la ecuación 67 es:



$$pH = -\log[H^+]$$

Ec. 67

$$pH = -\log[2.2828 \cdot 10^{-7}]$$

Ec. 103

$$pH = 6.64$$

4.4 Desarrollo del pre-tratamiento

4.4.1 Dosificación de cloro

La dosificación requerida de cloro es de 1.5 ppm y usaremos hipoclorito de sodio comercial (al 10%) (concentración estimada: 100g/L)

$$\text{Consumo de Cloro} = \frac{Q_F * D}{R * 1000} \quad \text{Ec (105)}$$

Q_F = Caudal de alimentación en la línea (L/h)

D = Dosis (mg/L)

R = Concentración de Cloro activo del Hipoclorito de sodio (g/L)

$$\text{Consumo de NaOHCl comercial} = \frac{8,330 \frac{m^3}{h} \cdot 1.5 \frac{mg}{L} \cdot \left(\frac{1,000L}{1m^3}\right)}{100 \frac{g}{L} \cdot \left(\frac{1000mg}{1g}\right)} = 0.193 \frac{L}{h} \quad \text{Ec (106)}$$

Si consideramos a su vez una dilución del 15%, la inyección resultante sería:

$$\text{Inyección de producto} = \frac{0.193 \frac{L}{h}}{0.15} = 1.29 \frac{L}{h} \quad \text{Ec (107)}$$

➤ Cálculo del Volumen del Tanque de Contacto

Se considera un tiempo de residencia de 30 minutos, aplicando la ecuación 82

$$V = 12.9 \left(\frac{m^3}{h}\right) \times 0.5(h) = 6.45 m^3 \quad \text{Ec(108)}$$

4.4.2 Filtro multimedia

A. Calculo del flujo de alimentación por tanque

Dividimos el flujo de alimentación en 3 tanques, resolviendo la Ec (93)

$$F_{at} = \frac{F_a}{3} = \frac{56.76 \text{ gpm}}{3} = 18.92 \text{ gpm} \quad \text{Ec (109)}$$

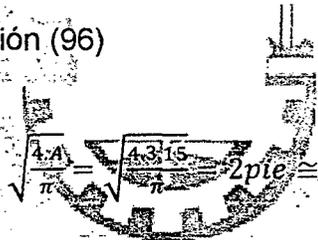
B. Calculo del área de filtrado

Empleamos una velocidad de filtración de 6 gpm/pie², resolviendo la Ec (94)

$$A = \frac{F_{at}}{V} = \frac{18.92 \text{ gpm}}{6 \text{ gpm/pie}^2} = 3.15 \text{ pie}^2 \quad \text{Ec (110)}$$

C. Calculo del diámetro requerido

Resolviendo la ecuación (96)


$$D = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3.15}{\pi}} \cdot 2 \text{ pie} \approx 24 \text{ pulgadas} \quad \text{Ec(111)}$$

F_a = Flujo de Alimentación

F_{at} = Flujo de Alimentación por tanque

A = Área de filtrado

V = Velocidad de Filtración

D = Diámetro del Tanque de Filtración

D. Calculo de la Altura del tanque de filtración

Empleamos la tabla 15 y 16 del capítulo filtración multimedia en donde hemos definido el rango de alturas por cada medio además del espacio libre o "free board" mínimo para el retro lavado.

Tabla 25		Orden y altura de medios filtrantes			
Medio	Altura (ft)	Altura (in)	Altura (ft)	Altura (in)	Altura (ft)
Antracita	0.95	10"	3.15	74.29	59.43
Arena Silícica	0.40	8"	3.15	59.43	95.10
	0.78	8"	3.15	59.43	95.10
	1.59	8"	3.15	59.43	95.10
	3.18	8"	3.15	59.43	95.10
Gamet	0.3	4.5"	3.15	33.45	74.93
	1.5	4.5"	3.15	33.45	74.93
Grava de soporte*	6.14	1"	3.15	7.43	11.89
	12.7	1"	3.15	7.43	11.89
Altura de medios		53"			
Altura Libre (35%)		18.6"			
Altura Total		71.6"			

*En nuestro caso de estudio la tobera tiene una abertura de 3 mm y una altura de 2"

Fuente: Elaboración propia

E. Calculo de la diferencial de presión por el medio filtrante

Emplearemos la velocidad de filtración promedio aceptada para sistema de ósmosis inversa, 6 gpm/ft², (ver tabla 16)

Empleamos la ecuación de Kozeny para cada altura del lecho:

Tabla 26		Datos para la ecuación de pérdida de carga							
Material	Nº de hilos	Diámetro de la partícula (mm)	Altura (m)	Porosidad	ϵ_o	ϕ	D_p	ϵ_o	ϕ
Antracita	1	0.95	10"	1.004×10^{-6}	9.8	5	6	0.5	0.56
Arena Silícica	2	0.40	8"	1.004×10^{-6}	9.8	5	6	0.75	0.42
	3	0.78	8"	1.004×10^{-6}	9.8	5	6	0.75	0.42
	4	1.59	8"	1.004×10^{-6}	9.8	5	6	0.75	0.42
Garnet	5	3.18	8"	1.004×10^{-6}	9.8	5	6	0.75	0.42
	6	0.3	4.5"	1.004×10^{-6}	9.8	5	6	0.6	0.45
Grava de soporte*	7	1.5	4.5"	1.004×10^{-6}	9.8	5	6	0.6	0.45
	8	6.14	1"	1.004×10^{-6}	9.8	5	6	0.75	0.42
	9	12.7	1"	1.004×10^{-6}	9.8	5	6	0.75	0.42

Fuente: Elaboración propia

Empleamos la ecuación 77

$$h = \frac{k' \cdot L \cdot \mu \cdot v}{\epsilon_o^3 \cdot g} \cdot (1 - \epsilon_o)^2 \left[\frac{6}{\phi \cdot D_p} \right]^2 \quad \text{Ec. (77)}$$

- Reemplazando datos el lecho de antracita ($D_p = 0.95\text{mm}$):

$$h = \frac{5 \cdot \left(\frac{10 \cdot 2.54}{100} m \right) \cdot 1.004 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \cdot 4.071 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}}{0.56^3 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}} \cdot (1 - 0.56)^2 \left[\frac{6}{0.5 \cdot \frac{0.95}{1000} m} \right]^2 \quad \text{Ec. (112)}$$

$$h = 9.30735 \cdot 10^{-2} m$$

- Reemplazando datos el lecho de arena silícica ($D_p = 0.40\text{mm}$):

$$h = \frac{5 \cdot \left(\frac{8 \cdot 2.54}{100} m \right) \cdot 1.004 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \cdot 4.071 \cdot 10^{-3} \frac{m}{s}}{0.42^3 \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}} \cdot (1 - 0.42)^2 \left[\frac{6}{0.75 \cdot \frac{0.40}{1000} m} \right]^2 \quad \text{Ec. (113)}$$

$$h = 76.88 \cdot 10^{-2} m$$

- Reemplazando datos el lecho de arena silícica ($D_p = 0.78\text{mm}$):

$$h = \frac{5 * \left(\frac{8 * 2.54}{100} m\right) * 1.004 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} * 4.071 * 10^{-3} \frac{m}{s}}{0.42^3 * 9.81 \frac{m}{s^2}} * (1 - 0.42)^2 \left[\frac{6}{0.75 * \frac{0.78}{1000} m} \right]^2 \quad \text{Ec. (114)}$$

$$h = 1.2164 * 10^{-2} m$$

- Reemplazando datos el lecho de arena silícica ($D_p = 1.59\text{mm}$):

$$h = \frac{5 * \left(\frac{8 * 2.54}{100} m\right) * 1.004 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} * 4.071 * 10^{-3} \frac{m}{s}}{0.42^3 * 9.81 \frac{m}{s^2}} * (1 - 0.42)^2 \left[\frac{6}{0.75 * \frac{1.59}{1000} m} \right]^2 \quad \text{Ec. (115)}$$

$$h = 1.2164 * 10^{-2} m$$

- Reemplazando datos el lecho de arena silícica ($D_p = 3.18\text{mm}$):

$$h = \frac{5 * \left(\frac{8 * 2.54}{100} m\right) * 1.004 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} * 4.071 * 10^{-3} \frac{m}{s}}{0.42^3 * 9.81 \frac{m}{s^2}} * (1 - 0.42)^2 \left[\frac{6}{0.75 * \frac{3.18}{1000} m} \right]^2 \quad \text{Ec. (116)}$$

$$h = 1.2164 * 10^{-2} m$$

- Reemplazando datos el lecho de garnet ($D_p = 0.3 \text{ mm}$):

$$h = \frac{5 * \left(\frac{4.5 * 2.54}{100} m\right) * 1.004 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} * 4.071 * 10^{-3} \frac{m}{s}}{0.45^3 * 9.81 \frac{m}{s^2}} * (1 - 0.45)^2 \left[\frac{6}{0.6 * \frac{0.3}{1000} m} \right]^2 \quad \text{Ec. (117)}$$

$$h = 87.82 * 10^{-2} m$$

- Reemplazando datos el lecho de garnet ($D_p = 1.5 \text{ mm}$):

$$h = \frac{5 * \left(\frac{4.5 * 2.54}{100} m\right) * 1.004 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} * 4.071 * 10^{-3} \frac{m}{s}}{0.45^3 * 9.81 \frac{m}{s^2}} * (1 - 0.45)^2 \left[\frac{6}{0.6 * \frac{0.15}{1000} m} \right]^2 \quad \text{Ec. (118)}$$

$$h = 3.51 * 10^{-2} m$$

- Reemplazando datos el lecho de grava ($D_p = 6.14 \text{ mm}$):

$$h = \frac{5 * \left(\frac{1 * 2.54}{100} m\right) * 1.004 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} * 4.071 * 10^{-3} \frac{m}{s}}{0.42^3 * 9.81 \frac{m}{s^2}} * (1 - 0.42)^2 \left[\frac{6}{0.75 * \frac{6.14}{1000} m} \right]^2 \quad \text{Ec. (119)}$$

$$h = 4.0787 * 10^{-2} m$$

- Reemplazando datos el lecho de grava ($D_p = 12.7 \text{ mm}$):

$$h = \frac{5 * \left(\frac{1 * 2.54}{100} m\right) * 1.004 * 10^{-6} \frac{m^2}{s} * 4.071 * 10^{-3} \frac{m}{s}}{0.42^3 * 9.81 \frac{m}{s^2}} * (1 - 0.42)^2 \left[\frac{6}{0.75 * \frac{12.7}{1000} m} \right]^2 \quad \text{Ec. (120)}$$

$$h = 9.5334 * 10^{-5} m$$

Tabla 27		Resumen de resultados de la perdida de carga	
Antracita	1		9.3×10^{-2} (0.0655)
Arena Silicica	2		76.8×10^{-2} (0.541)
	2		20.2×10^{-2} (0.142)
	3		4.86×10^{-2} (0.034)
	4		1.21×10^{-2} (0.085)
Garnet	5		87.8×10^{-2} (0.620)
	6		3.51×10^{-2} (0.025)
Grava de soporte	7		4.07×10^{-4} (0.0003)
	8		9.42×10^{-5} (0.00006)
TOTAL			203.73×10^{-2} (1.44)

Fuente: Elaboración propia

4.4.3 Dosificación de anti-escalante

Los datos hallados previamente (recuperación y pH) son introducidos en el software a fin de obtener la dosificación necesaria para evitar la precipitación de sales.

The screenshot shows the 'Advisor 2' software interface. The title bar reads 'Advisor 2'. The menu bar includes 'File', 'Design', 'Calculate', 'Cleaning', 'User Data', and 'Help'. The toolbar contains icons for file operations and a help icon. The main window is divided into several sections:

- Project Settings:**
 - Project Title: Proyecto Desalinizacion
 - Permeate Flowrate: 8.3m3/hour
 - Water Source: Well Water
 - pH Correction: Hydrochloric acid (with a 'Change' button)
 - Membrane Type: High Rejection Brackish Elements
- Design Recovery:** 65% (with a 'Change' button)
- Water Analysis Tabs:** 'Raw Water' is selected, with 'Feed Water', 'Dosed Water', and 'Concentrate' also visible.
- Analysis Results:**

Calcium	6.20	Silica	13.39	LSI	0.43
Magnesium	3.86	CO2	0.16	CaSO4	0.17%
Sodium	1072.43	pH	9.30	BaSO4	0.00%
Potassium	52.20	Chloride	1389.89	SiSO4	0.43%
Iron	0.20	Sulphate	189.47	CaF	0.00%
Manganese	0.00	Bicarbonate	189.47	CaPO4	0.0%
Barium	0.00	Nitrate	42.75	TDS	2960.9
Strontium	0.28	Fluoride	0.54	Ionic Strength	0.03
Aluminum	0.00	Phosphate	0.00		

Fig. (40) Pantalla de resultados del programa Advisor 2

Fuente: Elaboración propia

Cantidad de Anti-Escalante requerido

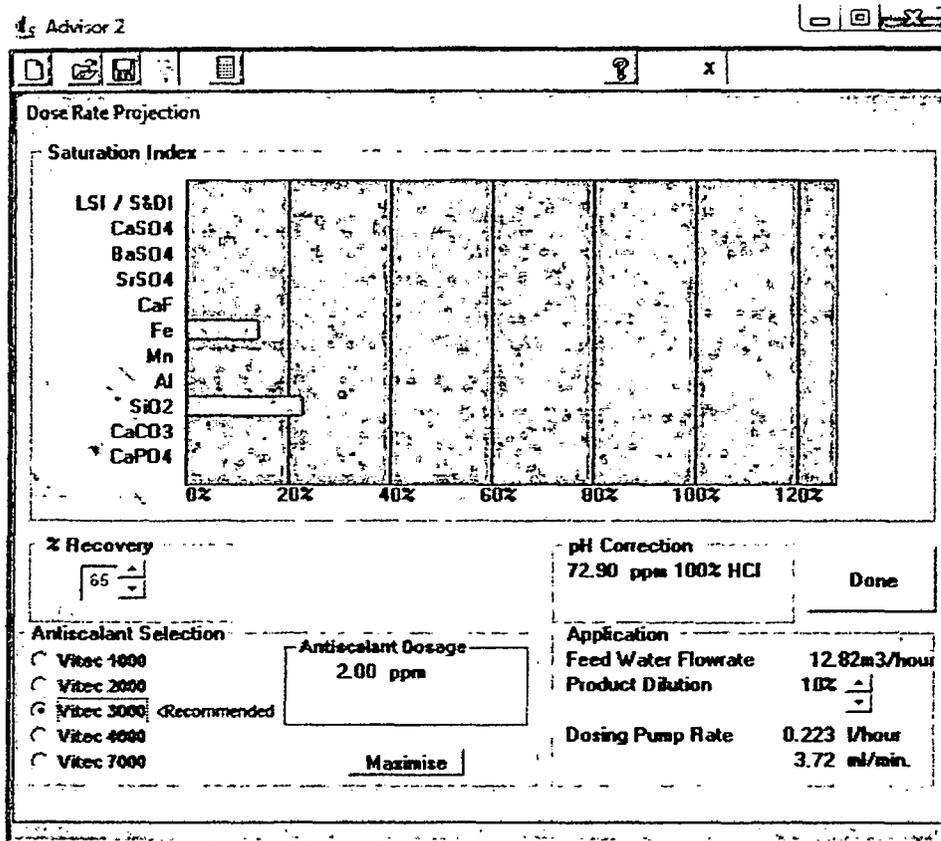


FIG. (4)

Reporte de Resultados del Software Advisor 2

Fuente: Elaboración propia



Según el cuadro previo, se considera el químico Vitec 3000 con una dosificación de 2ppm, además nos brinda la capacidad de la bomba de dosificación 3.72 ml/min con una dilución de 10% del producto.

Inyección de químico: 3.72 ml/min = 0.223 L/h

4.4.4 Dosificación de meta bisulfito de sodio

Empleando la estequiometria obtenemos los siguientes resultados:

Tabla 28	Productos químicos en la deoloración
$NaHSO_3$	1.49 ppm
$Na_2S_2O_5$	1.34 ppm

Fuente: Elaboración propia

Cálculo de la cantidad de $NaHSO_3$

$$\text{Dosificación de } NaHSO_3 = 1.5 \text{ ppm} \cdot 1.5 = 2.25 \text{ ppm} \quad Ec(121)$$

La dosificación requerida es 2.25 ppm según lo expuesto líneas arriba.

$$\text{Consumo de Meta Bisulfito de Sodio} = \frac{Q_p}{R} \cdot D \quad Ec(122)$$

Q_p = Caudal de permeado

R = % Recuperación

D = Dosis ppm (mg/L ó g/m^3)

$$\text{Consumo de } NaHSO_3 = \frac{8,330 \text{ m}^3}{0.647 \text{ h}} \cdot 2.25 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \left(\frac{1000\text{L}}{1\text{m}^3}\right) \cdot \left(\frac{1\text{Kg}}{10^6\text{mg}}\right) = 0.029 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \quad Ec(123)$$

Si consideramos en el tanque de preparación una dilución del 15%, la inyección resultante sería:

$$\text{Consumo de Dilucion} = \frac{\text{Consumo } NaHSO_3 \times \text{Masa total}}{\text{Masa de } NaHSO_3} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{solucion}}}\right) \quad Ec(124)$$

$$\text{Consumo de Dilucion} = \frac{\text{Consumo } NaHSO_3}{\text{Factor de Dilucion}} \cdot \left(\frac{1}{\rho_{\text{solucion}}}\right) \quad Ec(125)$$

*La densidad de la solución según la tabla del Anexo H

Desarrollando la ecuación anterior:

$$\text{Consumo de Dilucon} = \frac{0.029 \frac{\text{Kg}}{\text{h}} \cdot \left(\frac{1 \text{ L}}{11.111 \text{ Kg}} \right)}{0.15} = 0.145 \frac{\text{L}}{\text{h}} \quad \text{Ec(126)}$$

$$\text{Consumo anual (Kg)} = \frac{Q_p(\text{anual}) * \text{Dosis (ppm)}}{\text{Recuperación} * 1000} \quad \text{Ec (127)}$$

Resolviendo la ecuación 127 obtenemos que el consumo anual de MBS es de 233.60 Kg

4.4.5 Microfiltración

Empleamos la siguiente grafica para estimar las unidades filtrantes requeridas para el proceso.

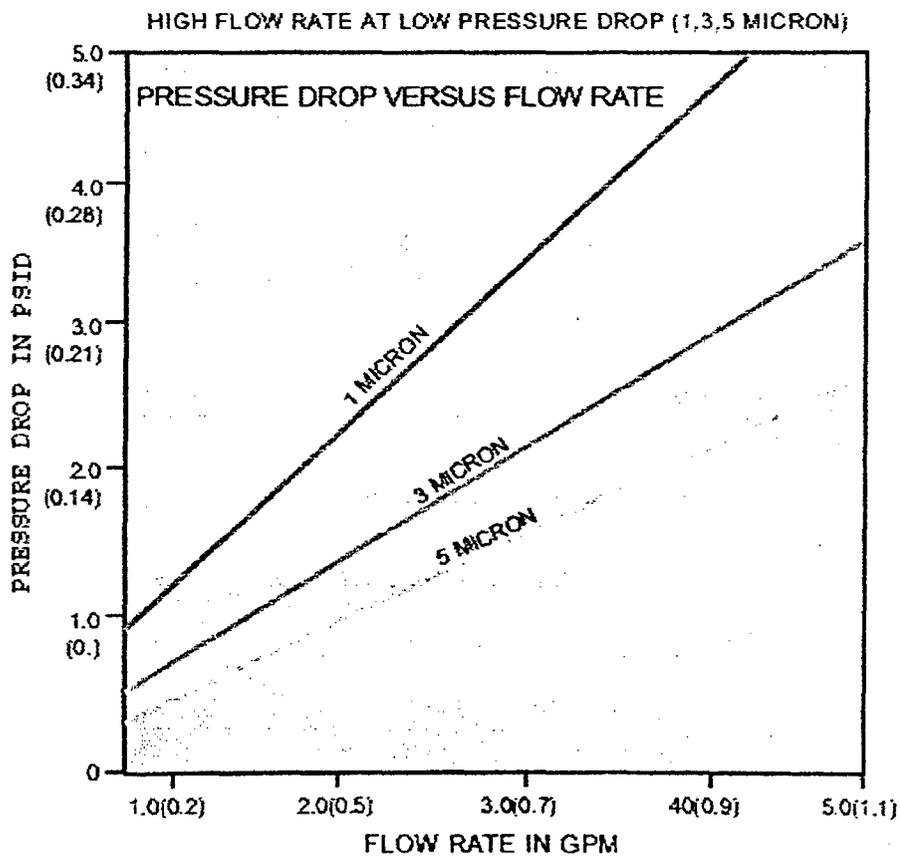


Fig. (42) Diferencial de presión vs Flujo de agua – Microfiltración

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29	Tipo de microfiltro seleccionado	
LX-25-1005	2.5 x 9 7/8"	5

Fuente: Elaboración propia

Tabla 30	Resultados de selección del microfiltro	
Flujo Global	56.76	
Flujo max. Por filtro	5 GPM	
Modelo Seleccionado	LX-25-1005	
Número de unidades	12	
Perdida de presión*	2.5 psi	

*No se considera ensuciamiento por operación

Fuente: Elaboración propia

4.5 Desarrollo de la simulación – Torayro

En vista que se van a evaluar dos procesos para diferentes aplicaciones el desarrollo del simulador se ha dividido en datos generales y específicos; el primero corresponde a ambos procesos mientras que el segundo involucra a cada proceso por separado.

4.5.1 Ingreso de datos generales

Tabla 31	Datos generales	
Producción de agua osmotizada (m ³ /h)*	8.33	
Recuperación (%)**	64.7	
pH**	6.06	

*Dato del requerimiento de agua

**Obtenidos por los resultados de los cálculos anti-incrustantes

Fuente : Elaboración propia

Reemplazamos datos y obtenemos la figura (43) y obtenemos:

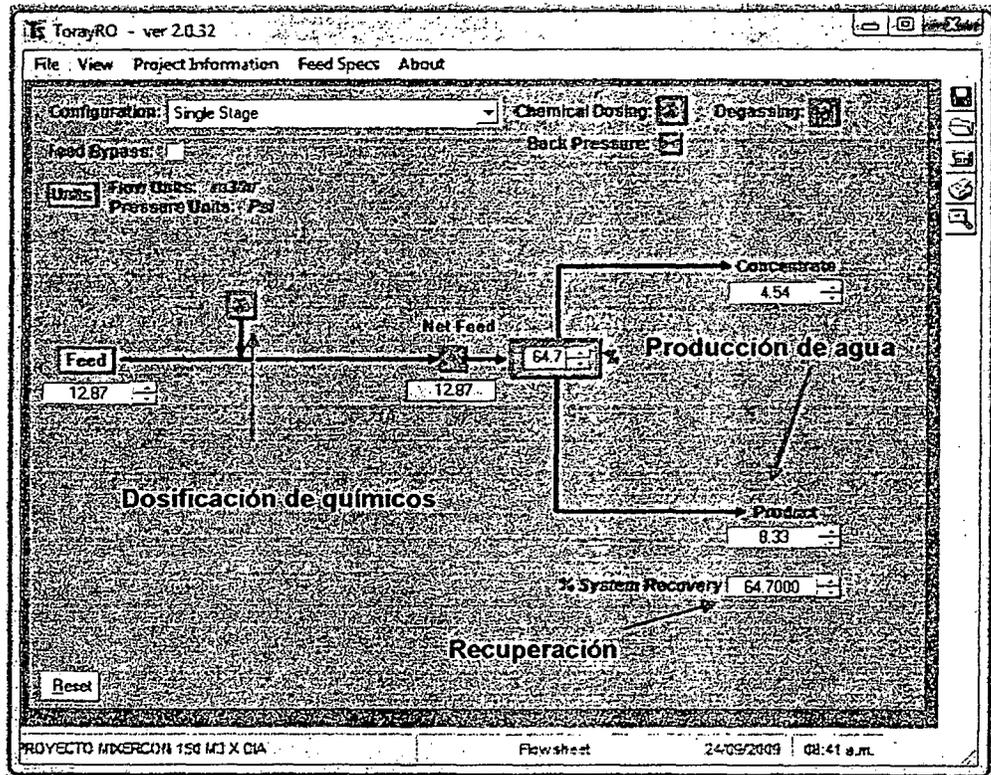


Fig. (43) Pantalla Inicial cargada con los Datos Generales

Fuente: Elaboración propia

Ingresamos el pH óptimo obtenido en el siguiente cuadro

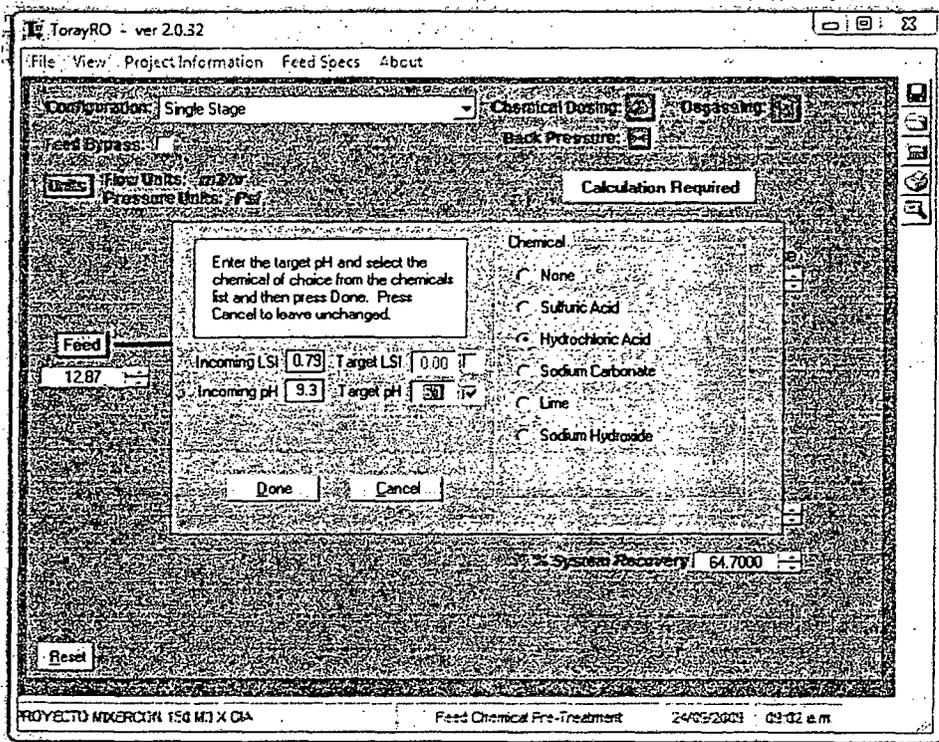


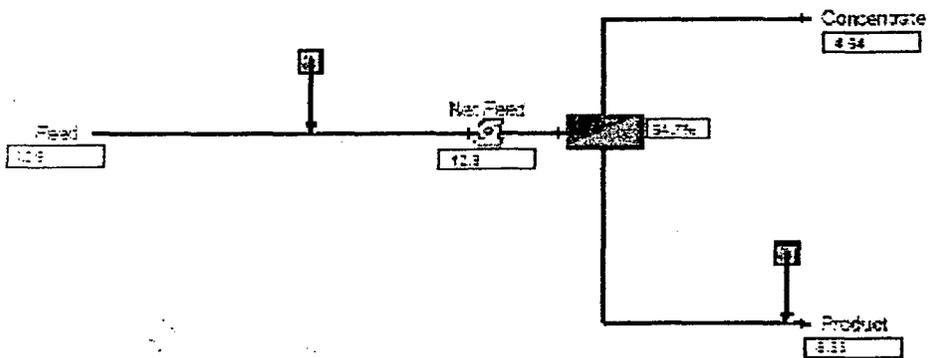
Fig. (44) Pantalla del pH óptimo ingresado

Fuente: Elaboración propia



Process Data

Flow Units: m³/hr
Pressure Units: psi



System Recovery: 64.7%

Flow Rates	m ³ /hr	Concentrations	mg/l
RO Feed	12.8	RO Feed TDS	3000
Permeate	8.33	Permeate TDS	52.3
Concentrate	4.54	Concentrate TDS	8437
Total Feed	12.8	Total Feed TDS	3028
Total Product	8.33	Total Product TDS	52.3

System Data Single Stage Design
Temperature: 25.0 Deg C

Stage 1	
Fouling Allowance	90.0 %
Salt Passage Increase Per Year	0.0 %
Feed Pressure	179 Psi
Interbank Loss	0.0 Psi
Element Age	0.0 Years

Interbank Boost Pressure		Stage 1	
Banks 1-2		0.0 Psi	
Banks 2-2		0.0 Psi	

Chemical Usage	Chemical	lb/day	kg/day	Target pH
Feed Post-Treat:	Hydrochloric Acid	58.4	26.6	6.1

Fig. (45) Cantidad de Ácido Clorhídrico al 30% requerido
Fuente: Elaboración propia

En la figura 46 se muestran los valores de los elementos químicos ingresados en el software:

TorayRO - ver 2.0.32

File View Project Information Feed Specs About

Units: mEq/L as CaCO3

Enter feed stream specifications and then press Balance. To save press Water Analyses button and then follow instructions. To load a saved analysis, press the Water Analyses button and follow instructions.

Cations		mg/L	as CaCO3
Ca	6.20		15.48
Mg	3.86		15.90
Na	1072.43		2334.48
K	52.20		66.82
Ba	0.0090		0.01
Si	0.2800		0.32
NH4			
Fe	0.20		0.36
TOTALS	.1135.18		2433.36

Temperature: 25.0 Deg C

Total Alkalinity as CaCO3: 216.473

Total Dissolved Solids: 3008.01

Water Type: Surface Supply SDI: 0.0

Anions		mg/L	as CaCO3
HCO3	189.47		155.42
Cl	1398.89		1974.82
SO4	189.47		197.42
NO3	42.75		34.50
F	0.54		1.42
B	2.10		9.72
SiO2	13.60		11.33
PO4			
pH	9.30		
CO3	36.01		60.06
CO2	0.13		0.00
TOTALS	1872.96		2433.36

Solubility Information

LSI/SDSI	0.79 / 0.82
CaSO4	0.2% % of Max Solubility
BaSO4	23% % of Max Solubility
SrSO4	0% % of Max Solubility
CaF2	0.0% % of Max Solubility
SiO2	4.7% % of Max Solubility
Ca5(PO4)3OH	0% % of Max Solubility

Stream: System Feed

Fig. (46) Pantalla de Ingreso de Valores del Análisis Químico

Fuente: Elaboración propia



4.5.2 Ingreso de datos específicos

Los datos específicos están en relación directa a la calidad requerida de agua osmotizada, estos son: tipo de membrana y arreglos de membranas.

En nuestro caso todo el tratamiento previo ha sido igual para ambos tipos de procesos requeridos, en esta sección es donde se diferenciarán ambos:

En este punto denominaremos los procesos que estamos diseñando de la siguiente manera:

Tabla 32 Denominación de los procesos a evaluar	
Proceso de agua para concreto premezclado	Proceso A
Proceso de agua para pinturas acrílicas	Proceso B

Fuente: Elaboración propia

➤ Selección del Tipo de membrana

Debido a que las condiciones que se requiere para el agua osmotizada en la producción de concreto premezclado no es necesario que tenga una calidad cercana a la desmineralizada podemos emplear membranas de baja presión.

En el caso de las pinturas acrílicas debido a la calidad requerida es necesario considerar que el agua osmotizada posea la mínima carga de minerales posibles, en este caso empleamos membranas de alta presión.

En vista de que emplearemos más adelante el software TorayRO, usaremos su clasificación de membranas de alta y baja presión para agua salobre con membranas de 8" x 40" la cual se aprecia en el Anexo C

Tabla 33 Resultado de selección del tipo de membrana	
Proceso A	TMG20-430*
Proceso B	TM720-430*

Fuente: Elaboración propia

➤ Selección del número de membranas

Flux de alimentación

En la figura (32) se observa el flux recomendado para agua salobre (brackish water) el cual debe estar entre 15 a 19 GFD @ 25°C, para conseguir esto aplicamos la siguiente ecuación:

$$Flux = \frac{Flujo\ de\ agua\ (GPD)}{Area\ de\ la\ membrana\ (ft^2) * Numero\ de\ membranas} \quad Ec\ (128)$$

Despejando:

$$Numero\ de\ membranas = \frac{Flujo\ de\ agua\ (GPD)}{Area\ de\ la\ membrana\ (ft^2) * Flux} \quad Ec\ (129)$$

Tabla 34 Cuadro de cálculo del número de membranas

Proceso	Membrana seleccionada	Flujo de agua Alimentación m ³ /h (GPD)	Flujo empleado	Área de la membrana	Número de membranas
Proceso A	TMG20-430	12.87 (81,681.2)	19	430*	10
Proceso B	TM720-430	12.87 (81,681.2)	19	430*	10

Fuente: Elaboración propia

➤ Selección del arreglo

Como hemos mencionado el arreglo se emplea para poder optimizar tanto la operación de membranas como para evitar la concentración – polarización. En este caso vamos a emplear dos arreglos, los arreglos seleccionados son el 2-2-1 y 3-1-1.

Elegiremos el que presente un valor de concentración – polarización en todos los bancos menores a 1.2, según lineamientos de diseño.

Tabla 35 Selección de datos específicos

Tipo de Proceso	Tipo de membrana	Número de Membranas	Arreglo 1	Arreglo 2	Número de Bancos	Membranas por Vessel
Proceso A	TMG20-430	10	2-2-1	3-1-1	3	2
Proceso B	TM720-430	10	2-2-1	3-1-1	3	2

ARREGLO DE MEMBRANAS
ARREGLO 1
2-2-1

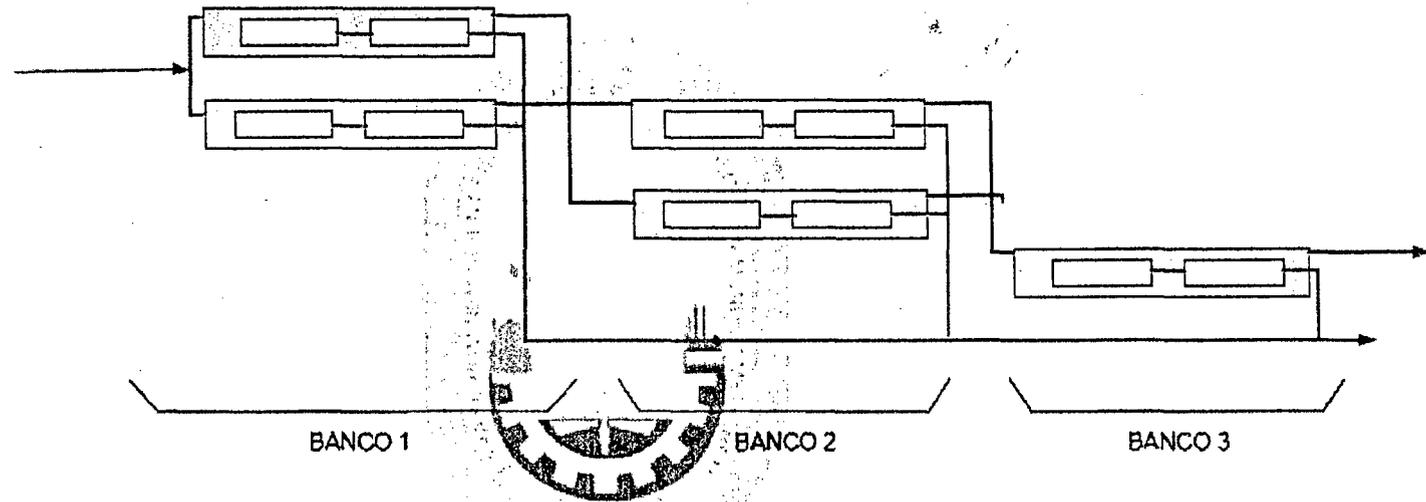


Fig. (47) Arreglo de membranas 2-2-1

Fuente: Elaboración propia

LEYENDA	
	Agua de Alimentación
	Agua permeada
	Agua concentrada

ARREGLO DE MEMBRANAS
ARREGLO 2
3-1-1

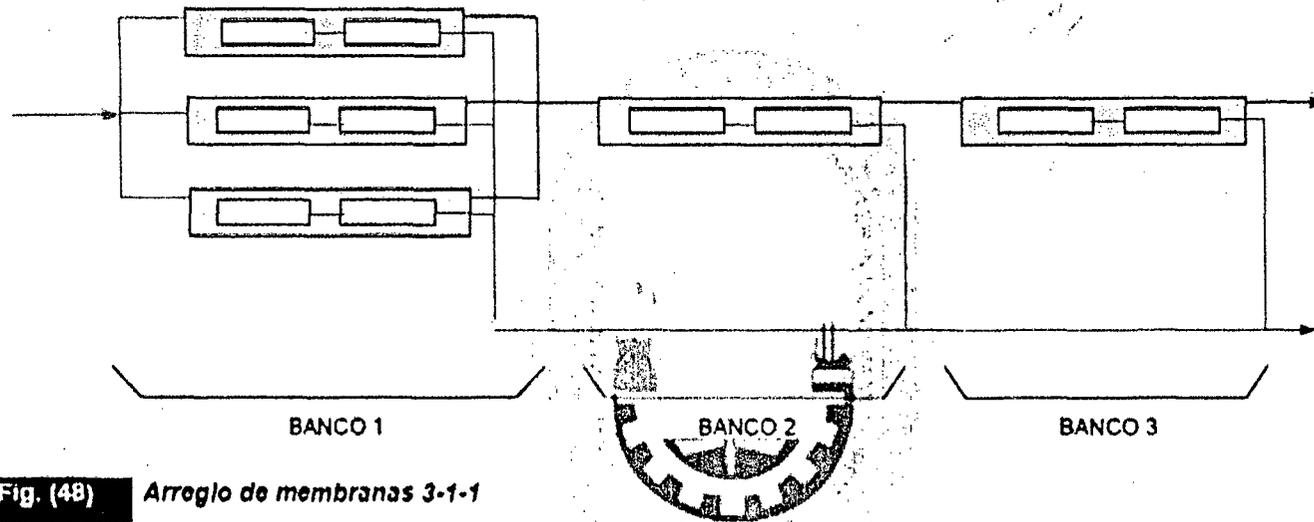


Fig. (48) Arreglo de membranas 3-1-1

Fuente: Elaboración propia

LEYENDA	
	Agua de Alimentación
	Agua permeada
	Agua concentrada

• SIMULACION DE ARREGLOS - PROCESO A

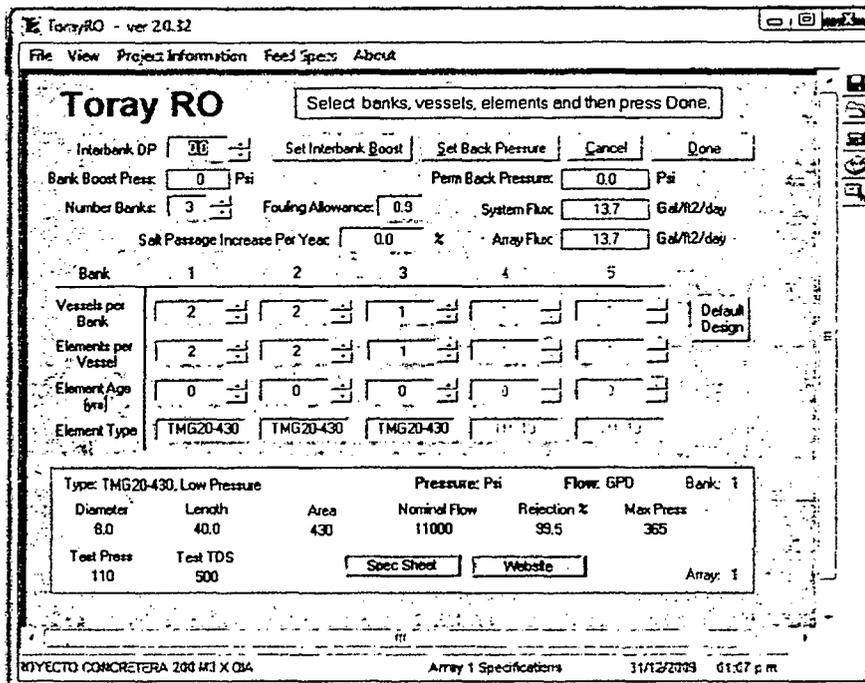


Fig. (49) Ingreso del arreglo 2-2-1 Proceso A
Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

Flux: Sys. P1		123	123	%		Recovery: Sys. P1		64.7	64.7	
Pass #:	1	2	3	4	5	6	7	8		
Fouling Factor:	0.9		Element Age:		0		Average Flux:		12.3	
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/(sec-atm)	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux
Bank 1	12.9	4.43	34.4	121	2.25	77.9	15.614	1.137	1.17	16.4
Element 1	6.44	1.19	18.5	121	1.28	77.9	15.608	1.101	1.17	17.6

Flux: Sys. P1		123	123	%		Recovery: Sys. P1		64.7	64.7	
Pass #:	1	2	3	4	5	6	7	8		
Fouling Factor:	0.9		Element Age:		0		Average Flux:		12.3	
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/(sec-atm)	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux
Bank 2	8.44	2.93	34.7	119	1.3	54.6	15.633	1.285	1.17	10.8
Element 1	4.22	0.83	19.8	119	0.74	54.6	15.630	1.247	1.17	12.3

Flux: Sys. P1		123	123	%		Recovery: Sys. P1		64.7	64.7	
Pass #:	1	2	3	4	5	6	7	8		
Fouling Factor:	0.9		Element Age:		0		Average Flux:		12.3	
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/(sec-atm)	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux
Bank 3	5.51	0.96	17.5	117	2.1	35.0	15.643	1.411	1.03	7.12
Element 1	5.51	0.54	9.7	117	1.12	35.0	15.642	1.394	1.03	7.91

Fig. (50) Impresión del arreglo 2-2-1 simulado Proceso A
Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

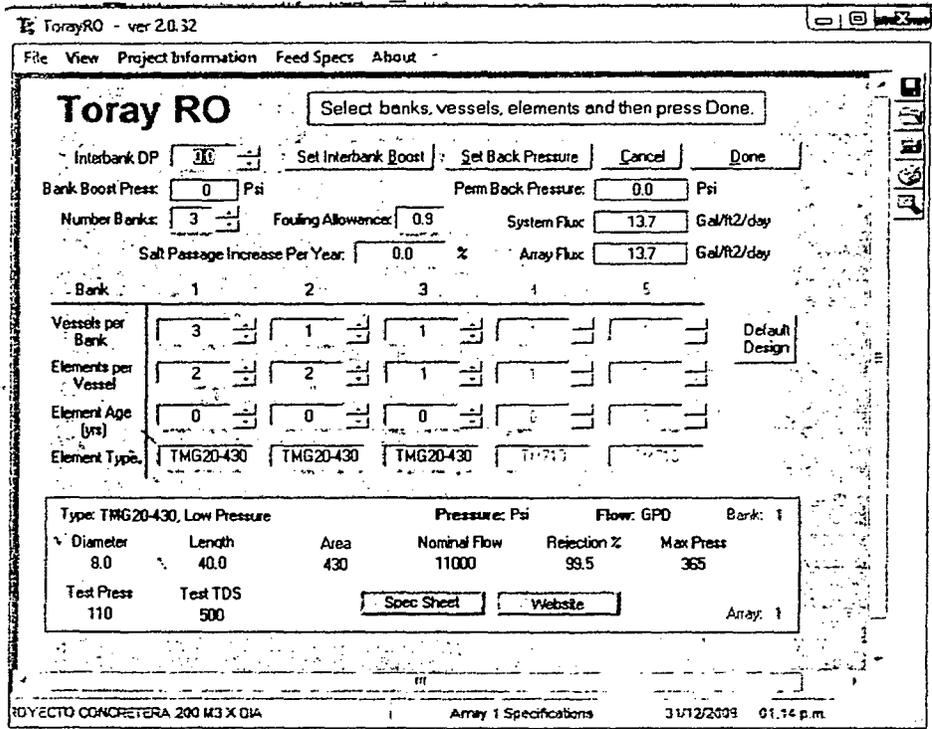


Fig. (51) Ingreso del arreglo 3-1-1 Proceso A
 Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

Flux Sys, P1	123	123	Σ Recovery: Sys, P1		64.7	64.7							
Pass #: 1	2	Bank: 1	2	3	4	Element 1	2	3	4	5	6	7	8
Fouling Factor : 0.9	Element Age : 0				Average Flux : 12.3								
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/ (sec-atm)	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux			
Bank 1	12.9	5.94	46.2	121	1.2	73.2	15.611	1.155	1.24	14.6			
Element 1	4.29	1.12	26.1	121	0.72	73.2	15.698	1.101	1.24	16.5			

Flux Sys, P1	123	123	Σ Recovery: Sys, P1		64.7	64.7							
Pass #: 1	2	Bank: 1	2	3	4	Element 1	2	3	4	5	6	7	8
Fouling Factor : 0.9	Element Age : 0				Average Flux : 12.3								
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/ (sec-atm)	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux			
Bank 2	6.93	1.43	20.6	120	2.78	50.9	15.626	1.338	1.1	10.5			
Element 1	6.93	0.78	11.2	120	1.48	50.9	15.619	1.319	1.1	11.5			

Flux Sys, P1	123	123	Σ Recovery: Sys, P1		64.7	64.7							
Pass #: 1	2	Bank: 1	2	3	4	Element 1	2	3	4	5	6	7	8
Fouling Factor : 0.9	Element Age : 0				Average Flux : 12.3								
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/ (sec-atm)	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux			
Bank 3	5.5	0.99	17.4	117	2.1	34.8	15.652	1.410	1.08	7.08			
Element 1	5.5	0.53	9.7	117	1.11	34.8	15.648	1.393	1.08	7.86			

Fig. (52) Impresión del arreglo 3-1-1 simulado Proceso A
 Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

• SIMULACION DE ARREGLOS - PROCESO B

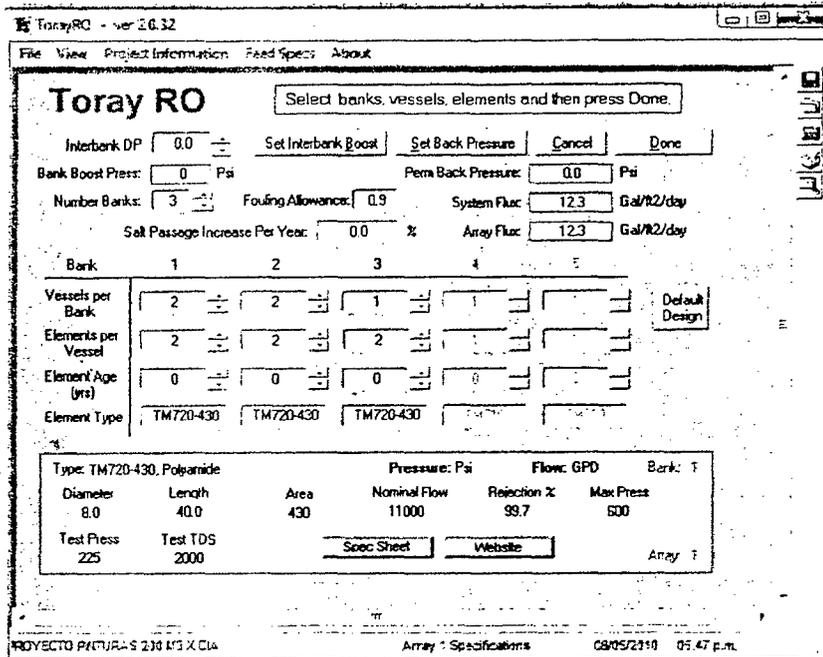


Fig. (53) Ingreso del arreglo 2-2-1 Proceso B

Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

Flux: Sys, P1		123	123	%		Recovery: Sys, P1		64.7	64.7	
Pass #:	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2	Bank:	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3	Element	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5					
Fouling Factor : 0.9		Element Age : 0		Average Flux : 12.3						
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/ [sec-atm]	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux
Bank 1	12.9	3.97	30.8	168	2.33	126	8.365	0.330	1.14	14.7
Element 1	6.44	1.03	16.0	168	1.3	126	8.363	0.326	1.14	15.3

Flux: Sys, P1		123	123	%		Recovery: Sys, P1		64.7	64.7	
Pass #:	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2	Bank:	<input type="radio"/> 1 <input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3	Element	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5					
Fouling Factor : 0.9		Element Age : 0		Average Flux : 12.3						
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/ [sec-atm]	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux
Bank 2	8.9	3.14	35.3	166	1.39	104	8.370	0.349	1.17	11.6
Element 1	4.45	0.85	19.1	166	0.79	104	8.369	0.344	1.17	12.6

Flux: Sys, P1		123	123	%		Recovery: Sys, P1		64.7	64.7	
Pass #:	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2	Bank:	<input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3	Element	<input checked="" type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5					
Fouling Factor : 0.9		Element Age : 0		Average Flux : 12.3						
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/ [sec-atm]	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux
Bank 3	5.76	1.22	21.1	164	2.17	79.8	8.375	0.369	1.1	8.99
Element 1	5.76	0.95	11.3	164	1.17	79.8	8.373	0.366	1.1	9.64

Fig. (54) Impresión del arreglo 2-2-1 simulado Proceso A

Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

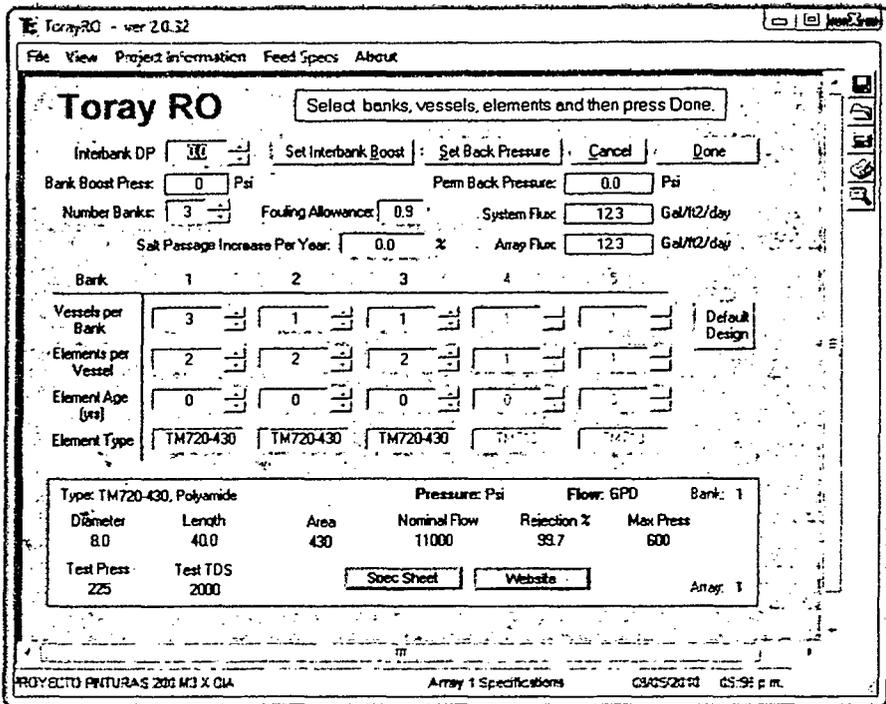


Fig. (55) Ingreso del arreglo 3-1-1 Proceso B

Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

Flux: Sys. P1		12.3	12.3	%		Recovery: Sys. P1		64.7	64.7					
Pass #:	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	Element	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8
Fouling Factor :		0.9		Element Age :		0		Average Flux :		12.3				
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/ (sec-atm)	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux				
Bank 1	12.9	5.57	43.3	168	1.24	122	8.364	0.333	1.21	13.7				
Element 1	4.29	1.0	23.2	168	0.73	122	8.363	0.326	1.21	14.7				

Flux: Sys. P1		12.3	12.3	%		Recovery: Sys. P1		64.7	64.7					
Pass #:	<input type="radio"/> 1	<input checked="" type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	Element	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8
Fouling Factor :		0.9		Element Age :		0		Average Flux :		12.3				
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/ (sec-atm)	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux				
Bank 2	7.3	1.54	21.2	167	2.94	99.2	8.368	0.358	1.1	11.4				
Element 1	7.3	0.81	11.1	167	1.58	99.2	8.366	0.355	1.1	12.0				

Flux: Sys. P1		12.3	12.3	%		Recovery: Sys. P1		64.7	64.7					
Pass #:	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	Element	<input checked="" type="radio"/> 1	<input type="radio"/> 2	<input type="radio"/> 3	<input type="radio"/> 4	<input type="radio"/> 5	<input type="radio"/> 6	<input type="radio"/> 7	<input type="radio"/> 8
Fouling Factor :		0.9		Element Age :		0		Average Flux :		12.3				
	Feed Flow	Perm Flow	% Recov	Feed Press	DP	Transmem Press	A - cm/ (sec-atm)	B cm/sec	Conc Pol	Avg Flux				
Bank 3	5.75	1.21	21.0	164	2.17	79.3	8.376	0.369	1.1	8.93				
Element 1	5.75	0.65	11.3	164	1.17	79.3	8.374	0.366	1.1	9.58				

Fig. (56) Impresión del arreglo 3-1-1 simulado Proceso B

Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

Tabla 36 Resultados de la simulación de arreglos												
Tipo de arreglo	Arreglo 1 (2-2-1)			Arreglo 2 (3-1-1)			Arreglo 1 (2-2-1)			Arreglo 2 (3-1-1)		
	Banco 1	Banco 2	Banco 3	Banco 1	Banco 2	Banco 3	Banco 1	Banco 2	Banco 3	Banco 1	Banco 2	Banco 3
Número de banco												
Tipo de membrana	TMG20-430	TMG20-430	TMG20-430	TMG20-430	TMG20-430	TMG20-430	TM720-430	TM720-430	TM720-430	TM720-430	TM720-430	TM720-430
Concentración – Polarización	1.17	1.17	1.08	1.27	1.11	1.09	1.14	1.17	1.1	1.21	1.1	1.1
Coefficiente A (cm/s-atm)	15.614	15.633	15.648	15.554	15.569	15.587	8.365	8.370	8.375	8.364	8.368	8.376
Coefficiente B (cm/s)	1.137	1.285	1.411	1.199	1.398	1.462	0.320	0.349	0.369	0.333	0.358	0.369

**Los valores en rojo exceden el valor de límite de diseño recomendado por el fabricante*

Fuente: Elaboración propia

Según el cuadro anterior se observa que al simular el arreglo 2 (3-1-1) el valor de concentración – polarización en el banco 1 (en ambos procesos) excede el límite de diseño por lo que se selecciona el arreglo 1 (2-2-1).

4.5.3 REPORTE DE RESULTADOS DE LA SIMULACION – PROCESO A

TorayRO v 2.0.32 File: CONCRETERA.tro

08 may 2010



Project: PROYECTO CONCRETERA 200 M3 X DIA
Comments:

Prepared For:
Location: VILLA EL SALVADOR
Prepared By: BACH MIGUEL UBILLUS BORJA
Date Prepared: 27 noviembre 2009

System Results

Flow Rates-	m3/hr	Concentrations	mg/l
RO Feed	12.9	RO Feed TDS	3001
Permeate	8.33	Permeate TDS	133
Concentrate	4.54	Concentrate TDS	8258
Total Feed	12.9	Total Feed TDS	3008
Total Product	8.33	Total Product TDS	133

System Details

Temperature: 25.0 Deg C
System Recovery: 64.7 %

Single Stage Design

Water Type: Surface Supply

Pass 1	Units: Pressure - Psi	Flow - m3/hr	TDS - mg/l					
Array 1 Recovery:	64.7%	Concentrate TDS:	8258	Concentrate Flow:	4.54			
Bank	Total Vessels	Total Elements	Element Model	Feed Flow	Perm Flow	Feed Press	Delta Press	Perm TDS
1	2	4	TMG20-430	12.9	4.43	121	2.25	66.3
2	2	4	TMG20-430	8.44	2.93	119	1.3	167
3	1	2	TMG20-430	5.51	0.96	117	2.1	336
Total	5	10		12.9	8.33			133

Concentration, Saturation and pH Data

Ion	Permeate	Treated Feed	Feed	Concentrate
Ca	0.0761	6.2	6.2	17.4
Mg	0.0474	3.86	3.86	10.8
Na	46.6	1072	1072	2952
K	2.55	52.2	52.2	143
Ba	0.0001	0.009	0.009	0.0253
Sr	0.0034	0.28	0.28	0.79
NH4	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe	0.0025	0.2	0.2	0.56
HCO3	10.7	158	189	428
Cl	62.6	1460	1399	4020
SO4	3.38	189	189	530
NO3	5.05	42.8	42.8	112
F	0.0159	0.54	0.54	1.5
B	1.15	2.1	2.1	3.84
SiO2	0.27	13.6	13.6	38.0
PO4	0.0	0.0	0.0	0.0
CO3	1.21E-05	0.0658	36.0	0.67
CO2	49.1	49.1	0.13	49.1
TDS	35.1	3001	3008	8438
pH	4.96	6.64	9.3	7.05
Saturation Data (%)				
CaSO4	5.92E-06	0.17	0.17	0.65
CaPO4	0.0	0.0	0.0	0.0
CaF2	3.80E-11	0.0017	0.0017	0.0559
BaSO4	0.0013	23.1	22.9	78.3
SiO2	0.2	12.9	4.74	30.4
SrSO4	3.27E-05	0.44	0.44	1.5
LSI	-7.73	-2.03	0.79	-0.88
SDSI	-7.69	-1.99	0.82	-1.04

Fig. (57) Reporte de resultados de la simulación – Proceso A

Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

4.5.4 REPORTE DE RESULTADOS DE LA SIMULACION – PROCESO B

TorayRO v 2.0.32 File: PINTURAS.tro

06 may 2010



Project: PROYECTO PINTURAS 200 M3 X DIA
Comments:

Prepared For:
Location: VILLA EL SALVADOR
Prepared By: BACH MIGUEL UBILLUS BORJA
Date Prepared: 27 noviembre 2009

System Results

Flow Rates	m3/hr	Concentrations	mg/l
RO Feed	12.9	RO Feed TDS	3001
Permeate	8.33	Permeate TDS	35.1
Concentrate	4.54	Concentrate TDS	8438
Total Feed	12.9	Total Feed TDS	3008
Total Product	8.33	Total Product TDS	35.1

System Details

Temperature:	25.0 Deg C	Water Type:	Surface Supply
System Recovery:	64.7 %		

Single Stage Design

Pass 1	Units: Pressure - Psi	Flow - m3/hr	TDS - mg/l					
Array 1 Recovery:	64.7%	Concentrate TDS:	8438	Concentrate Flow:	4.54			
Bank	Total Vessels	Total Elements	Element Model	Feed Flow	Perm Flow	Feed Press	Delta Press	Perm TDS
1	2	4	TM720-430	12.9	4.32	181	2.28	20.9
2	2	4	TM720-430	8.55	3.34	179	1.28	45.6
3	1	1	TM720-430	5.21	0.67	177	1.02	74.4
Total	5	9		12.9	8.33			35.1

Concentration, Saturation and pH Data

Ion	Permeate	Treated Feed	Feed	Concentrate
Ca	0.0192	6.2	6.2	17.5
Mg	0.012	3.86	3.86	10.9
Na	12.1	1072	1072	3016
K	0.66	52.2	52.2	147
Ba	2.78E-05	0.009	0.009	0.0254
Sr	0.0009	0.28	0.28	0.79
NH4	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe	0.0006	0.2	0.2	0.57
HCO3	2.78	158	189	442
Cl	15.9	1460	1399	4105
SO4	0.84	189	189	535
NO3	1.37	42.8	42.8	119
F	0.004	0.54	0.54	1.52
B	1.15	2.1	2.1	3.84
SiO2	0.27	13.6	13.8	38.0
PO4	0.0	0.0	0.0	0.0
CO3	1.21E-05	0.0658	36.0	0.67
CO2	49.1	49.1	0.13	49.1
TDS	35.1	3001	3008	8438
pH	4.96	6.64	9.3	7.05
Saturation Data (%)				
CaSO4	5.92E-06	0.17	0.17	0.85
CaPO4	0.0	0.0	0.0	0.0
CaF2	3.80E-11	0.0017	0.0017	0.0559
BaSO4	0.0013	23.1	22.9	78.3
SiO2	0.2	12.9	4.74	30.4
SrSO4	3.27E-05	0.44	0.44	1.5
LSI	-7.73	-2.03	0.79	-0.88
SDSI	-7.89	-1.99	0.82	-1.04

Fig. (58) Reporte de resultados de la simulación – Proceso B

Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

4.6 DESARROLLO DEL POST-TRATAMIENTO

4.6.1 Post-Tratamiento proceso A

Procedemos a elaborar un cuadro comparativo entre la calidad de agua requerida y la calidad obtenida

Tabla 37 Cuadro comparativo – Resultados del proceso A

Cloruros ppm	500	1,499	62.60
Sulfatos ppm	250	189	3.38
STD ppm	50,000	3,000	133.00

*Los valores en rojo indican que exceden el valor requerido en la Tabla 3

Del cuadro anterior se desprende que no es necesario un post-tratamiento debido a que los valores de agua permeada se encuentran dentro de los límites requeridos.

4.6.2 Post-Tratamiento proceso B

Procedemos a elaborar un cuadro comparativo entre la calidad de agua requerida y la calidad obtenida (Ver tabla 38).

Tabla 38

Cuadro comparativo – Resultados del proceso B

Aspecto	Límpido, libre de óxido, sarro, tierra y/o materia extraña			NA
Color	Translucido no debe presentar turbidez			NA
Olor	Inodoro			NA
Turbidez	< 1	0.2		NTU
Solidos Suspendidos	< 5			ppm
Hierro	< 0.05	0.2	0.0007	ppm
Zinc	< 0.3	<0.005		ppm
Manganeso	< 0.05	0.004		ppm
Aluminio	< 0.05	<0.01		ppm
Calcio	< 2	6.2	0.02	ppm
Cobre	< 0.1	0.003		
Sílice Coloidal (como SiO ₂)	< 1	13.6	0.27	ppm
pH	5.5 – 7.0	9.3	4.44	
STD	<100	2,968.00	35.1	ppm

*Los valores en rojo indican que exceden el valor requerido en la tabla 4

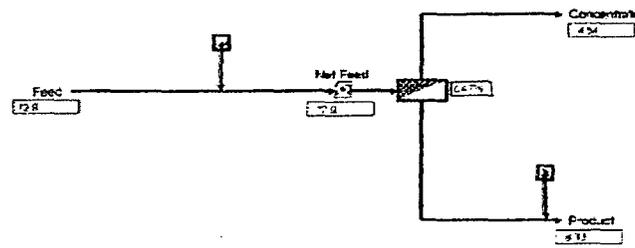


Aun después de la separación por ósmosis inversa se puede observar que tenemos valores fuera del rango de trabajo aceptado, por lo que procedemos a ajustar el pH como post-tratamiento

En este caso podemos emplear el post-tratamiento del programa Toray para calcular la cantidad de soda caustica requerida para elevar el pH a 5.5 (valor mínimo admisible) además de cuantificar el cambio en la conductividad por la adición de químicos.

Process Data

Flow Units: m3/hr
Pressure Units: psi



System Recovery 64.7%

Flow Rates	m3/hr	Concentrations	mg/l
RO Feed	12.9	RO Feed TDS	3001
Permeate	8.33	Permeate TDS	45.4
Concentrate	4.54	Concentrate TDS	8434
Total Feed	12.9	Total Feed TDS	3308
Total Product	8.33	Total Product TDS	45.4

System Data Single Stage Design

Temperature: 25.0 Deg C

	Stage 1
Fouling Allowance	90.0 %
Salt Passage Increase Per Year	0.0 %
Feed Pressure	168 Psi
Interbank Loss	0.0 Psi
Element Age	0.0 Years

	Stage 1
Interbank Boost Pressure	
Banks 1-2	0.0 Psi
Banks 2-3	0.0 Psi

Chemical Usage	Chemical	lb/day	kg/day	Target pH
Feed Post-Treat	Hydrochloric Acid	42.5	19.3	6.64
Product	Sodium Hydroxide	1.69	0.77	5.5



Fig. (59)

Adición de Base para corregir el pH – Post-tratamiento

Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO



Project: PROYECTO PINTURAS 200 M3 X DIA
Comments:

Prepared For:
Location: VILLA EL SALVADOR
Prepared By: BACH MIGUEL UBILLUS BORJA
Date Prepared: 27 noviembre 2009

System Results

Flow Rates	m3/hr	Concentrations	mg/l
RO Feed	12.9	RO Feed TDS	3001
Permeate	8.33	Permeate TDS	45.4
Concentrate	4.54	Concentrate TDS	8434
Total Feed	12.9	Total Feed TDS	3008
Total Product	8.33	Total Product TDS	45.4

System Details		Single Stage Design
Temperature:	25.0 Deg C	Water Type: Surface Supply
System Recovery:	64.7 %	

Pass 1	Units: Pressure - Psi	Flow - m3/hr	TDS - mg/l					
Array 1 Recovery:	64.7%	Concentrate TDS:	8434	Concentrate Flow:	4.54			
Bank	Total Vessels	Total Elements	Element Model	Feed Flow	Perm Flow	Feed Press	Delta Press	Perm TDS
1	2	4	TM720-430	12.9	3.97	168	2.33	21.5
2	2	4	TM720-430	8.9	3.14	168	1.39	42.9
3	1	2	TM720-430	5.76	1.22	164	2.17	74.9
Total	5	10		12.9	8.33			45.4

Concentration, Saturation and pH Data

Ion	Permeate	Treated Feed	Feed	Concentrate
Ca	0.0204	6.2	6.2	17.5
Mg	0.0127	3.86	3.86	10.9
Na	15.1	1072	1072	3015
K	0.71	52.2	52.2	147
Ba	2.97E-05	0.009	0.009	0.0254
Sr	0.0009	0.28	0.28	0.79
NH4	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe	0.0007	0.2	0.2	0.57
HCO3	8.83	158	189	442
Cl	17.0	1460	1399	4104
SO4	0.9	189	189	535
NO3	1.46	42.8	42.8	118
F	0.0043	0.54	0.54	1.52
B	1.19	2.1	2.1	3.77
SiO2	0.29	13.6	13.6	38.0
PO4	0.0	0.0	0.0	0.0
CO3	0.0001	0.0658	36.0	0.67
CO2	44.9	49.1	0.13	49.1
TDS	45.4	3001	3008	8434
pH	5.5	6.64	9.3	7.05
Saturation Data (%)				
CaSO4	6.69E-06	0.17	0.17	0.65
CaPO4	0.0	0.0	0.0	0.0
CaF2	5.11E-11	0.0017	0.0017	0.0559
BaSO4	0.0014	23.1	22.9	78.3
SiO2	0.24	12.9	4.74	30.4
SrSO4	3.68E-05	0.44	0.44	1.5
LSI	-6.56	-2.03	0.79	-0.88
SDSI	-6.62	-1.99	0.82	-1.04

Fig. (60)

Reporte de Resultados de la Simulación – Proceso B – Post Tratamiento

Fuente: Elaboración propia – Datos del software TorayRO

En vista a la figura 60 podemos establecer otro cuadro comparativo para el proceso B.

Tabla 39 **Resultados post-tratamiento proceso B**

Característica	Especificación o Requisito	Calidad Inicial	Calidad Permeado Líquido del Post-tratamiento	Unidades
Aspecto	Límpido, libre de óxido, sarro, tierra y/o materia extraña			NA
Color	Translucido no debe presentar turbidez			NA
Olor	Inodoro			NA
Turbidez	< 1	0.2		NTU
Sólidos Suspendidos	< 5			ppm
Hierro	< 0.05	0.2	0.0007	ppm
Zinc	< 0.3	<0.005		ppm
Manganeso	< 0.05	0.004		ppm
Aluminio	< 0.05	<0.01		ppm
Calcio	< 2	6.2	0.02	ppm
Cobre	< 0.1	0.003		ppm
Sílice Coloidal (como SiO ₂)	< 1	13.6	0.29	ppm
pH	5.5 – 7.0	9.3	5.5	
STD	<100	2,968.00	45.4	ppm

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la tabla 39, luego del post-tratamiento se consigue obtener que todos los valores se encuentren dentro del rango del requisito.

4.7 RESUMEN DE RESULTADOS EN AMBOS PROCESOS

Tabla 40 Cuadro resumen de resultados		PROCESO A	PROCESO B
	Dosificación de hipoclorito de sodio(10%) con una dilución al 15% (L/h)	1.29	1.29
	Volumen del tanque de contacto (m ³)	6.45	6.45
	Dosificación de metabisulfito con una dilución al 15% (L/h)	0.145	0.145
	Numero de Tanques de Filtración Multimedia	3	3
	Diámetro de los Filtros	24"	24"
	Altura de los Filtros	72"	72"
	Perdida de carga por los medios filtrantes	1.44 psi	1.44 psi
	Número de Unidades de microfiltración	12	12
	Perdida de carga	3 psi	3 psi
	Dosificación de Anti-Escalante – Vitec 3000 – 2ppm (L/h) – diluido al 10% (L/h)	0.223	0.223
	Porcentaje de recuperación %	64	64
	Valor de pH requerido de alimentación	6.64	6.64
	Tipo de membrana	TMG20-430	TM720-430
	Número de membranas	10	10
	Arreglo de membranas	2-2-1	2-2-1
	Presión de alimentación (psi)	121	168
	STD Permeado (ppm) – Sin post-tratamiento	133	35.1
	STD Permeado (ppm) – Con post-tratamiento	133	45.4

	Concentración-Polarización (Promedio de los bancos)	1.15	1.15
	Coeficiente A (cm/s-atm) (Promedio de los bancos)	15.574	8.333
	Coeficiente B (cm/s) (Promedio de los bancos)	1.329	0.352
	Dosificación de ácido clorhídrico al 30% (Kg/día)	26.6	26.6
	Dosificación de soda caustica al 99% (escañas) (Kg/día)	—	1.68

Fuente: Elaboración propia

4.8 Diagrama de flujo de proceso

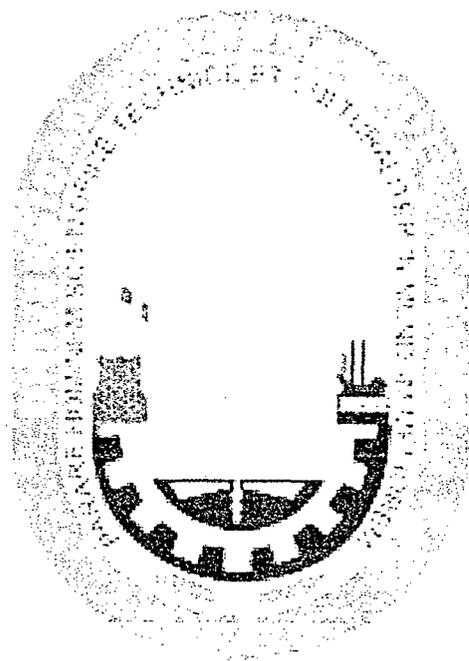
Proceso A

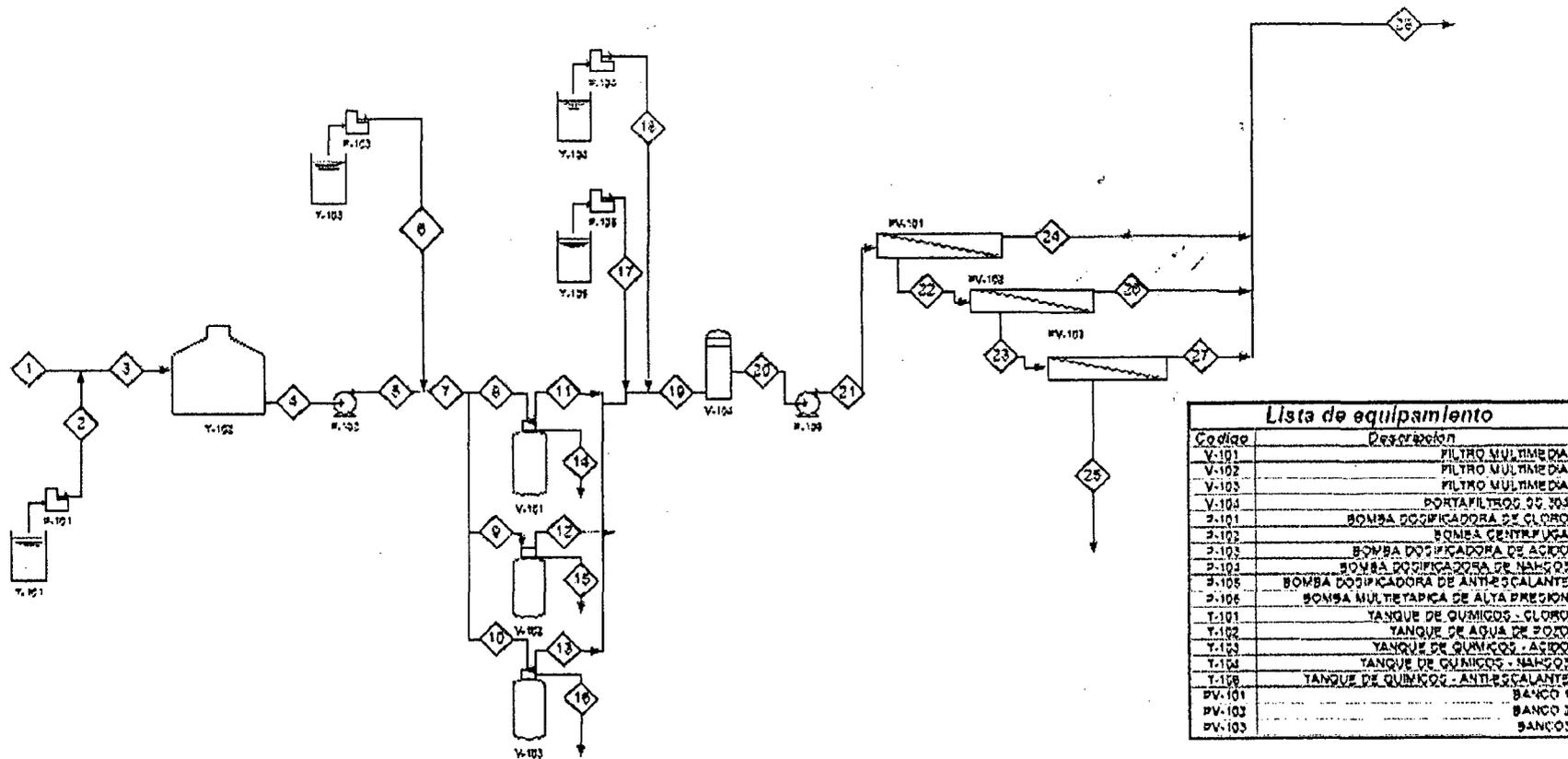
El proceso parte bajo la premisa que el agua subterránea es bombeada a las condiciones de flujo y presión indicados en la línea 1 (ver figura 61); en el trayecto hacia el tanque T-102 se dosifica Hipoclorito de sodio; posteriormente en el tanque el agua mantiene un tiempo de residencia para que el cloro reaccione, posteriormente el agua es bombeada y en su trayecto hacia los filtros multimedia, se le dosifica el ácido clorhídrico, luego que el agua es filtrada se le dosifica tanto el anti-incrustante como el Metabisulfito de sodio, para luego pasar a través de un banco de filtros de 5 micras; seguidamente el agua es enviada con una bomba de alta presión a 121 psi a través de los bancos del equipo de ósmosis inversa en el orden determinado, cada banco envía su línea de permeado hacia una línea colectora, obteniendo agua de baja carga mineral según como se indican las condiciones de la línea 28.

Proceso B

El proceso parte bajo la premisa que el agua subterránea es bombeada a las condiciones de flujo y presión indicados en la línea 1 (ver figura 62); en el trayecto hacia el tanque T-102 se dosifica Hipoclorito de sodio; posteriormente en el tanque el agua mantiene un tiempo de residencia para que el cloro reaccione, posteriormente el agua es bombeada y en su trayecto hacia los filtros multimedia, se le dosifica el ácido clorhídrico, luego que el

agua es filtrada se le dosifica tanto el anti-incrustante como el metabisulfito de sodio, para luego pasar a través de un banco de filtros de 5 micras; seguidamente el agua es enviada con una bomba de alta presión a 168 psi a través de los bancos del equipo de ósmosis inversa en el orden determinado, es importante mencionar que cada banco envía su línea de permeado hacia una línea colectora, obteniendo agua de baja carga mineral según como se indican las características de la línea 28, luego en post-tratamiento dosificamos soda caustica para regular el pH con lo cual obtenemos las condiciones de la línea 29.

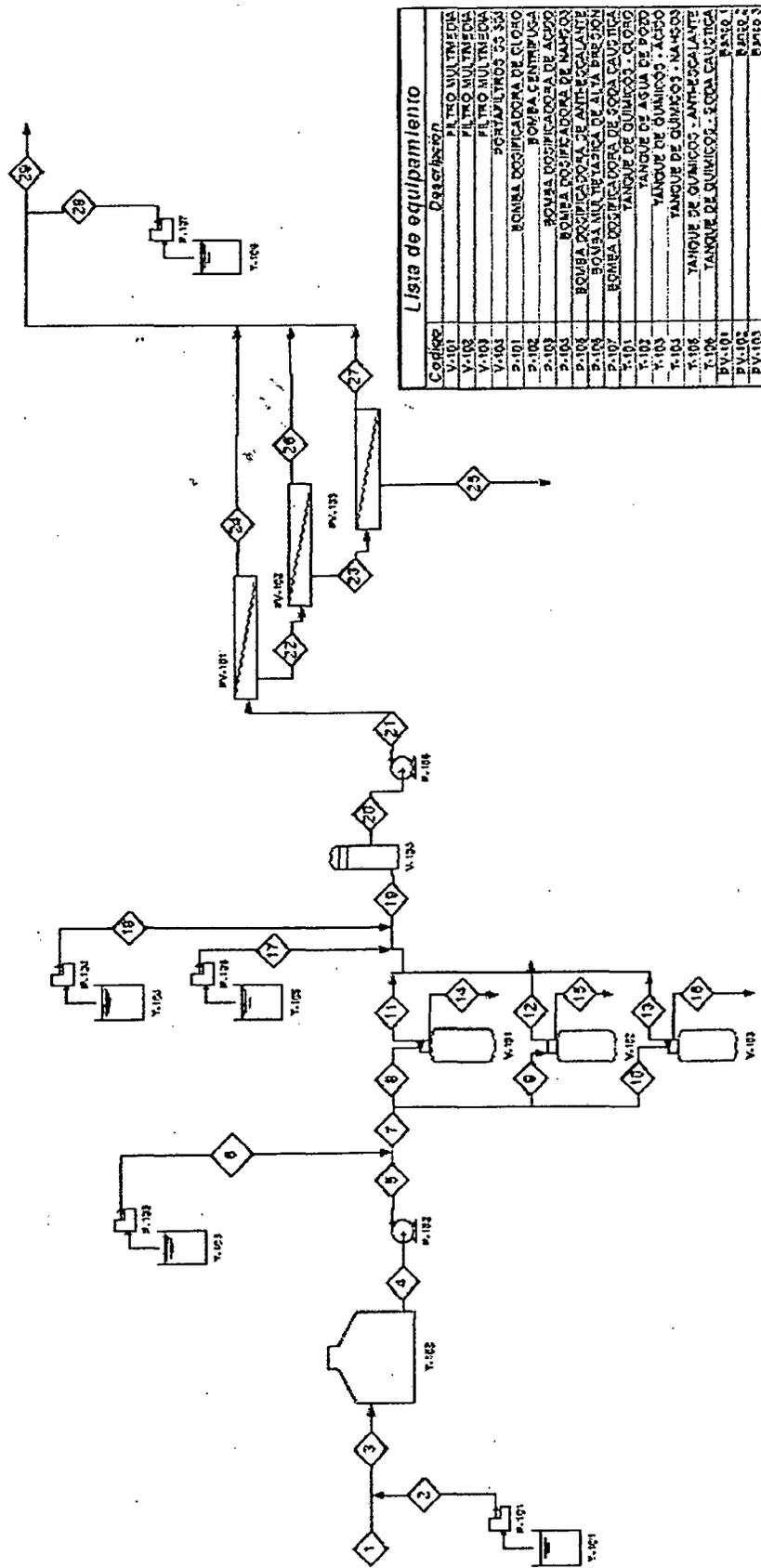




	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	
LINEA DE FLUJO	Conversiones	(L/HR)				(Kg/HR)								Drpm MM	Drpm MM	Drpm MM	(L/HR)	(L/HR)											
Flujo	12.878	0.246	12.878	12.878	12.878	1.328	12.878	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	4.29	12.878	12.878	12.878	0.223	0.148	12.878	12.878	12.878	8.11	8.11	4.77	4.649	3.00	0.86	8.33	
Temperatura (°C)	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00	23.00
Presión (atm)	30.00		30.00	30.00	30.00		30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00			30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00	30.00

Fig. (61) Diagrama PFD – proceso A – concreto premezclado

Fuente: Elaboración propia



Código	Descripción
V-101	FILTRO MULTIMEDIA
V-102	FILTRO MULTIMEDIA
V-103	FILTRO MULTIMEDIA
V-104	FILTRO MULTIMEDIA
P-101	BOMBA DOSIFICADORA DE CLORO
P-102	BOMBA DOSIFICADORA DE AGUO
P-103	BOMBA DOSIFICADORA DE TAMPOO
P-104	BOMBA DOSIFICADORA DE ANTI-ESCALANTE
T-101	BOMBA DOSIFICADORA DE SODA CAUSTICA
T-102	TANQUE DE AGUA DE FORTO
T-103	TANQUE DE QUIMICOS - AGUO
T-104	TANQUE DE QUIMICOS - NANSO
PV-101	TANQUE DE QUIMICOS - ANTI-ESCALANTE
PV-102	TANQUE DE QUIMICOS - SODA CAUSTICA
PV-103	RESERVA
PV-104	RESERVA

LÍNEA DE ALIMENTACIÓN		Lista de equipamiento																												
Alimentación	FLPA	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													
FLPA	FLPA																													

V. ESTUDIO ECONOMICO

En el presente estudio consideramos como base los costos globales de los equipos para ambos tipos de procesos.

5.1 Costo de capital anualizado

Relación simplificada a emplear para equipos de ósmosis inversa con destino Lima - Perú:

$$CIF = FOB \times F \quad \text{Ec. (130)}$$

FOB (Free on Board) = Libre a Bordo o Costo en lugar de origen

F = Factor (Para nuestro caso empleamos el valor práctico de 1.5)

CIF (Cost, Insurance, Freight) = Costo, Seguro y Flete ó Costo en el lugar de destino

Tabla 41		Cuadro de precios FOB - CIF	
		PRECIO FOB - US\$	PRECIO CIF - US\$
Proceso Concreto Premezclado	Proceso A	56,763.00	85,144.50
Proceso Pinturas Acrílicas	Proceso B	57,763.00**	86,644.50

*Fuente "Lista de Precios Equipos e Insumos - Anexo L"

**El incremento de precio se debe a que se anexa una bomba dosificadora para aumentar el pH, el precio de la bomba dosificadora se encuentra en el Anexo L

5.1.1 Costos directos

$$\text{Costo Obra Civil} = \text{Precio CIF} \times 0.2^2 \quad \text{Ec. (131)}$$

$$\text{Costo directo} = \text{Precio CIF} + \text{Costo Obra Civil} \quad \text{Ec. (132)}$$

(1) El factor *F* fue determinado por el operador logístico Ransa en función al peso y volumen del equipo y la procedencia del equipo desde Miami - USA.

(2) El factor 0.2 fue determinado para costos directos según el libro de Turton "Analysis, synthesis, and design of chemical processes" tercera edición.

5.1.2 Costos indirectos

Entre los costos indirectos podemos considerar lo siguiente:

- Supervisión de la construcción
- Costo de la propiedad
- Contingencia e imprevistos

$$\text{Costo Indirecto} = 0.4^1 \text{ Costo Directo} \quad \text{Ec. (133)}$$

$$\text{Costo Total} = \text{Costo Directo} + \text{Costo Indirecto} \quad \text{Ec. (134)}$$

Tabla 42		Resumen de costos de capital	
	Proceso A	Proceso B	
Costos de obra civil US\$	17,028.90	17,328.90	
Costo directo US\$	102,173.40	103,973.40	
Costo indirecto US\$	40,869.36	41,589.36	
Costo total US\$	143,042.76	145,562.76	

Fuente: Elaboración propia

5.1.3 Determinación del Valor Actual Neto (VAN)

Tabla 43		Cálculo del VAN	
	Proceso A	Proceso B	
Vida útil (años)	15	15	
Tasa de interés %	10 ²	10	
Costo total US\$	143,042.76	145,562.76	
-VAN	18,806.37	19,137.69	
Producción de agua m ³ /año	67,173.12	67,173.12	
Costo anual del capital US\$/ m ³	0.28	0.285	

Fuente: Elaboración propia

(1) El factor 0.4 fue determinado para costos indirectos según el libro de Turton "Analysis, synthesis, and design of chemical processes" tercera edición.

(2) La tasa de interés de 10% es referencial para estos montos según la operación de compra por leasing. Fuente BCP

5.2 Costos de recursos, consumibles y energía anual

Para realizar los cálculos de los consumibles necesitamos primero los datos del performance del sistema de ósmosis inversa.

Performance del sistema de Ósmosis Inversa	Consumibles por año
Producción del agua tratada	Energía (Kw-hr/año)
Horas de operación	Horas Hombre
Porcentaje de recuperación	Insumo Anti-incrustante
	Insumo metabisulfito
	Filtros Cartuchos

Tabla 44 Resumen de datos de operación

Producción del agua osmotizada (m ³ x año)	67,173.12	67,173.12
Horas de Operación x año.*	8,064	8,064
Porcentaje de recuperación	64.7%	64,7%

Fuente: Elaboración propia

*Las horas de operación se calculan a partir de la base de operación de 24 horas por día, 28 días al mes, por 12 meses.

5.2.1 Costos de recursos humanos

Tabla 45 Costos de recursos humanos

# Operarios calificados	2	2
Costo US\$/hora ¹	0.5	0.5
Horas totales anuales	8,064	8,064
Costo US\$/m ³	0.06	0.06

(1) Este monto está en función del sueldo mínimo de 550 soles por mes con una carga laboral de 12 horas por día considerando 30 días por mes

5.2.2 Costo de energía

Se calcula el costo de energía de la bomba de alta presión para llegar a la presión y flujo de trabajo; para esto se emplean las siguientes formulas:

$$\Delta h = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad Ec (135)$$

$$Potencia = \frac{\Delta h \cdot \rho \cdot g \cdot Q}{E} \quad Ec (136)$$

ΔP = Diferencial de presión

Q = Caudal de alimentación

ρ = Densidad del agua (25C°)

Δh = Altura manométrica

g = Gravedad

E = Eficiencia de la bomba

	PROCESO A Bomba de alimentación	PROCESO B Bomba de alimentación	PROCESO A Bomba de alta presión	PROCESO B Bomba de alta presión
Presión (psi)	50	50	121	168
h (m)	33.33	33.33	85.1	118
P (Kg/m ³)	1,000	1,000	1,000	1,000
g (m/s ²)	9.8	9.8	9.8	9.8
Q (m ³ /s)	0.00231	0.00231	0.00231	0.00231
Eficiencia de la bomba %	35	35	45	45
Potencia Hp	2.9	2.9	5.9	8.3
Energía Kw-h/año	17,384.21	17,384.21	34,522.77	47,869.41

Fuente: Elaboración propia

	PROCESO A	PROCESO B
Energía Kw-h/año	51,906.98	63,253.62
Costo US\$/Kw-h ⁽¹⁾	0.1	0.1
Costo anual US\$/año	5,190.70	6,525.362
Costo anual de energía US\$ m ³ /h	0.077	0.097

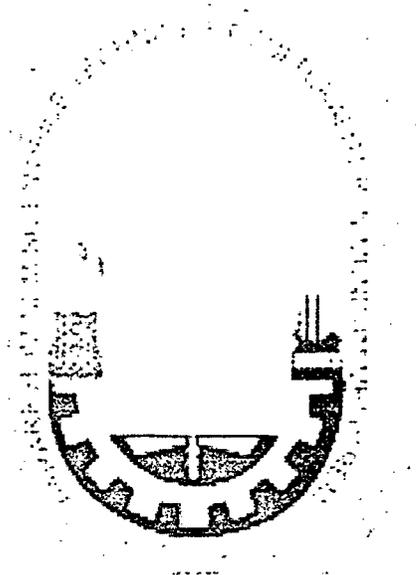
Fuente: Elaboración propia

5.2.3 Costos de Consumibles

Tabla 48		Calculo de consumibles	
		REGISRA	INDICADOR
Fertilizante (L)	Dosificación (ppm)	1.5	1.5
	Consumo L/h	0.193	0.193
	Consumo anual L	1,556.352	1,556.352
	Costo US\$/L ⁽²⁾	0.785	0.785
	Costo US\$/año	1,221.73	1,221.73
	Costo unitario US\$/m³	0.0182	0.0182
Fertilizante (galón)	Dosificación (ppm)	2	2
	Consumo anual (galones)	45.72	45.72
	Costo US\$/galón ⁽³⁾	34.80	34.80
	Costo anual US\$/año	1,591.00	1,591.00
	Costo unitario US\$/m³	0.0237	0.0237
Fertilizante (Kg)	Dosificación (ppm)	2.25	2.25
	Consumo Kg/h	0.029	0.029
	Consumo anual (Kg)	233.60	233.60
	Costo US\$/Kg ⁽⁴⁾	3.90	3.90
	Costo anual US\$/año	911.04	911.04
	Costo unitario US\$/m³	0.0136	0.0136
Fertilizante (Kg/día)	Dosificación (Kg/día)	19.3	19.3
	Consumo anual (Kg)	6,484.8	6,484.8
	Costo US\$/Kg ⁽⁶⁾	0.35 *	0.35 *
	Costo anual US\$/año	2,269.68	2,269.68
	Costo unitario US\$/m³	0.034	0.034
Fertilizante (Kg/día)	Dosificación (Kg/día)	-----	0.77
	Consumo anual (Kg)	-----	258.72
	Costo US\$/Kg ⁽⁶⁾	-----	0.7021
	Costo anual US\$/año	-----	181.65
	Costo unitario US\$/m³	-----	0.0027
Cambios	Número de unidades por cambio	12	12
	Número de cambios anuales	4	4

	Consumo anual (unid)	48	48
	Costo unitario US\$/unid ⁽⁷⁾	5	5
	Costo anual US\$	240	240
	Costo unitario US\$/m³	0.0036	0.0036
	Vida útil de la membrana (años)	5	5
	Número de membranas (unid)	10	10
	Costo por membranas US\$ ⁽⁸⁾	952.00	952.00
	Valor por cambio de membranas cada 5 años US\$	9,520.00	9,520.00
	Valor anual US\$	1,904.00	1,904.00
	Costo unitario US\$/m³	0.028	0.028

Fuente: Elaboración propia



- (1) Fuente recibo de luz de Electrosur periodo abril 2009
(2) Fuente Quimpac
(3) Fuente Mercantil Interamericana S.A.C (distribuidora de componentes GE)
(4) Fuente Químicos Goycochea
(5) Fuente Quimpac
(6) Fuente Quimpac
(7) Fuente Mercantil Interamericana S.A.C (distribuidora de componentes GE)
(8) Fuente Mercantil Interamericana S.A.C (distribuidora de componentes GE)

5.3 CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS

Tabla 49	Resultados de la evaluación de costos	
Costo de capital anualizado (US\$/m ³)	0.28	0.285
Costo de energía (US\$/m ³)	0.077	0.097
Costos de recursos humanos (US\$/m ³)	0.06	0.06
Costo de hipoclorito de sodio (US\$/m ³)	0.0182	0.0182
Costo de anti-escalante (US\$/m ³)	0.0237	0.0237
Costo de metabisulfito de sodio (US\$/m ³)	0.0136	0.0136
Costo de ácido clorhídrico (US\$/m ³)	0.034	0.034
Costo de soda caustica (US\$/m ³)	—	0.0027
Costo de cartuchos de micro filtración (US\$/m ³)	0.0036	0.0036
Costo de membranas (US\$/m ³)	0.028	0.028
	0.54	0.57

Fuente: Elaboración propia



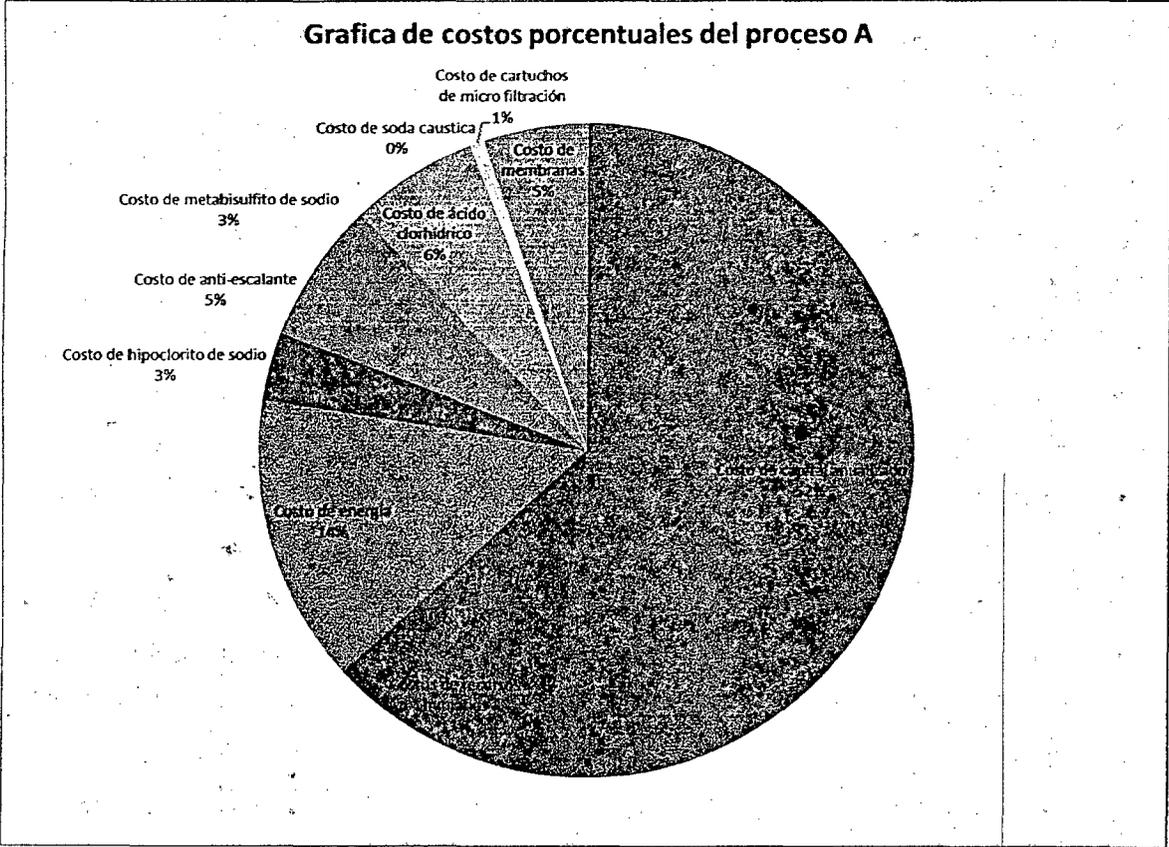


Fig (63) Grafica porcentual de costos del proceso A

Fuente: Elaboración propia



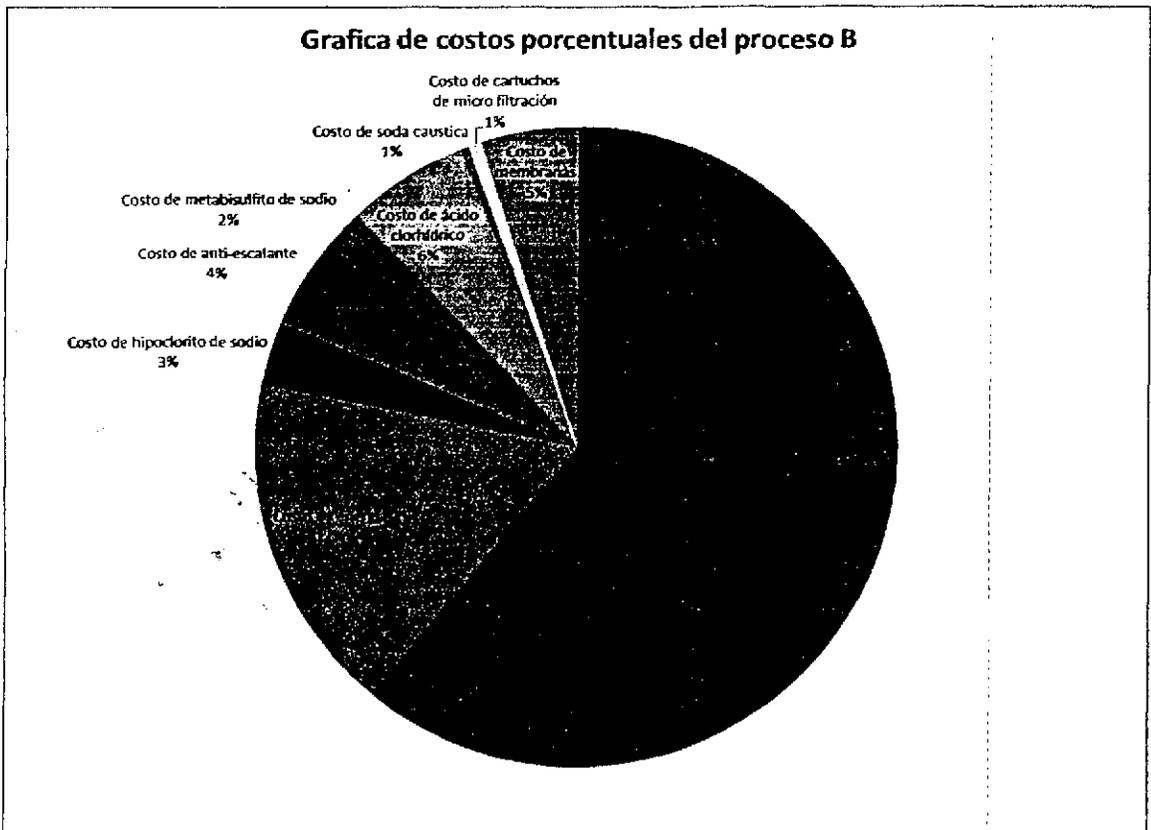


Fig. (64) Grafica porcentual de costos del proceso B
 Fuente: Elaboración propia



VI. DISCUSION DE RESULTADOS

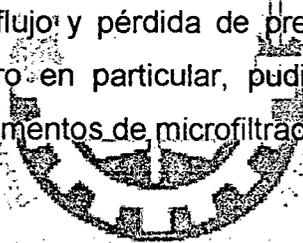
Desarrollo de cálculos anti-incrustantes

- En el desarrollo del cálculo de porcentaje de recuperación máxima, se observa que este valor es independiente del flujo de agua a producir, interesando únicamente los valores del análisis del agua y la fuerza iónica de la solución.
- El pH óptimo calculado es bastante alejado del pH de alimentación de la fuente, por lo que es necesario una dosificación de algún tipo de ácido.

Desarrollo del pre-tratamiento

- En la dosificación de cloro el valor de 1 ppm se considera una dosificación estándar para pozos tubulares pudiendo esta fluctuar en relación a la localización y contaminación superficial de este.
- En la dosificación de MBS (Meta bisulfito de sodio), se ha considerado un factor de 1.5 para eliminar estequiométricamente el nivel de cloro residual del agua, como se ha explicado este valor es teórico; es necesario verificar esto con un medidor de potencial de redox y medir el nivel de cloro residual antes de la alimentación a los filtros de microfiltración
- En la dosificación del agente químico anti-escalante, se observa en el gráfico del simulador Advisor, que los valores de precipitación se encuentran en la zona verde, indicando que se encuentran en un rango de mínima precipitación o precipitación aceptable.
- El número de unidades de filtro multimedia responde a la necesidad para poder realizar un mantenimiento independiente de cada tanque sin afectar la producción del agua osmotizada.

- Con los valores calculados de pérdida de presión por cada medio filtrante, nos permite calcular esta para otros medios no tan comunes (greensand, turbidex, corosex, etc) siempre y cuando se tengan los valores siguientes:
 - ✦ Porosidad
 - ✦ Esfericidad
 - ✦ Altura de medio
 - ✦ Diámetro medio
- Se observa que cuanto más pequeño es el diámetro de la partícula y más la elevada la altura de este elemento filtrante en el filtro, la caída de presión es superior, comparar la tabla 26 con la tabla 27.
- El número de elementos de microfiltración está en función a la capacidad de flujo y pérdida de presión por cada unidad para este modelo de filtro en particular, pudiendo variar considerando otros modelos de elementos de microfiltración.



Desarrollo de la simulación de ósmosis inversa

- El arreglo 2-2-1 para ambas aplicaciones de producción, cumple con la norma de no exceder el valor de 1.2 en la concentración – polarización.
- Como se ha visto aparte de emplear el software Toray Ro también se ha empleado el software Advisor para el cálculo y dosificación del agente químico anti-escalante; las fórmulas para estos químicos están protegidas por lo que solo se ha empleado el software para calcular la precipitación, mas no para conocer la composición exacta del agente químico.

- En la simulación también se muestra en alto valor de sólidos totales disueltos (STD) en la línea de concentrado o rechazo, el cual debe ser eliminado siguiendo las pautas ambientales dictadas en el reglamento de recursos hídricos promulgado en el 2010
- El software no menciona referentes en cuanto a limitaciones en sus cálculos debido a alta cantidad de sólidos totales disueltos (ppm), pero por nuestro conocimiento a detalle del modelo de simulación, solución difusión, sabemos que una alta cantidad de STD (ppm) afecta el modelamiento debido a que cambia la tensión iónica e involucra otras constantes.
- El software tiene limitaciones en predecir el comportamiento de las membranas con aguas compuestas por componentes bacteriológicos o virales, ya que estos no participan en el modelamiento matemático de solución difusión, por lo que es de vital importancia tener un análisis previo y considerar los pretratamientos necesarios, ejm: desinfección con cloro u otro oxidante.

Desarrollo del post-tratamiento

- En la simulación del proceso B se observa que debido a la dosificación de soda caustica se incrementa el valor de STD, es necesario considerar esta relación para evitar problemas en la operación o resultados fuera de lo esperado.

Diagramas de flujos de procesos

- El PFD facilita la observación de todos los equipos así también como las líneas de procesos que estamos empleando, pudiendo identificar claramente la calidad (ppm de STD) y cantidad (m^3/h) que alimenta al sistema, así como sus características tanto de permeado como de concentrado.

Estudio económico

- La diferencia de los costos unitarios tanto del proceso A como del proceso B se explica por las siguientes razones:
 - ✦ Inversión inicial, distinta en ambos casos.
 - ✦ Ahorro energético, ocasionado por emplear menos presión en el proceso A.
 - ✦ Empleo de soda caustica en el proceso B
- Se observa un elevado costo de inversión ocasionado por el hecho de la importación de equipos, actualmente en el país existen empresas capacitadas que pueden realizar el ensamblado de estos equipos de ósmosis inversa en el Perú, lo que reduciría el costo de inversión y el precio unitario.
- El siguiente costo importante es el de energía ocasionado principalmente por las bombas de alta presión, en este punto destaca la aplicación de membranas de alta y baja presión en función de la aplicación.
- Los costos unitarios de producción de agua para cada aplicación se encuentran dentro de los valores estándar a nivel mundial para agua desalinizada producto de ósmosis inversa.

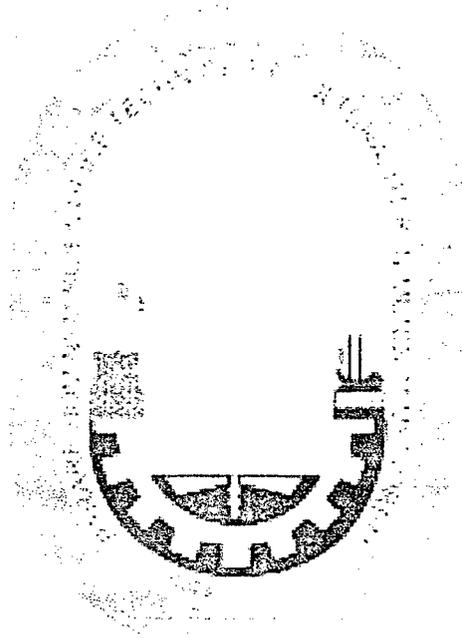
VII. CONCLUSIONES

- Se ha considerado un requerimiento de agua osmotizada de 200m^3 por día ($8.33\text{ m}^3/\text{h}$) para ambas aplicaciones de la tecnología de ósmosis inversa, con el fin de estandarizar variables y estudiar su comportamiento siendo diferenciadas únicamente por el requerimiento de calidad de agua de la aplicación mas no así por su requerimiento real de flujo según capacidad a instalar.
- El pretratamiento es igual para ambas aplicaciones (pinturas acrílicas y concreto premezclado), debido a que ingresa una misma calidad de agua de alimentación a las membranas, siendo los resultados los siguientes:

pH	6.2
Recuperación máxima del sistema	64%
Dosificación de antincrustante	2 ppm
Dosificación de hipoclorito de sodio	1.5 ppm
Dosificación de NaHSO_3	2.25 ppm

- Con la simulación del software TorayRO se obtuvo que las membranas TM720-430 son las mejores para la aplicación de pinturas acrílicas y las membranas TMG20-430 son las mejores para la aplicación de concreto pre-mezclado, así mismo la cantidad de membranas obtenidas han sido 10 unidades de medidas de 8" de diámetro x 40" de longitud con un arreglo 2-2-1.
- El reporte que proporciona el simulador TorayRO es insuficiente, por lo que es necesario complementarlo con una tabla de resultados y un diagrama PFD.
- Es resaltante que en el caso de la aplicación de pinturas acrílicas fue necesario una regulación de pH de 4.4 (originalmente) a 5.5 (modificado) la que se realizó con soda caustica, lo que ocasionó un incremento de los sólidos totales disueltos (STD) de 34.6 ppm a 45.4 ppm, concluyendo que una dosificación de soda caustica incrementa la cantidad de STD en el permeado.

- El estudio económico nos indica que para sistemas de baja y alta presión con la fuente de agua estudiada obtenemos valores de costos unitarios de agua osmotizada de 0.54 US\$/m³ y 0.57 US\$/m³. respectivamente

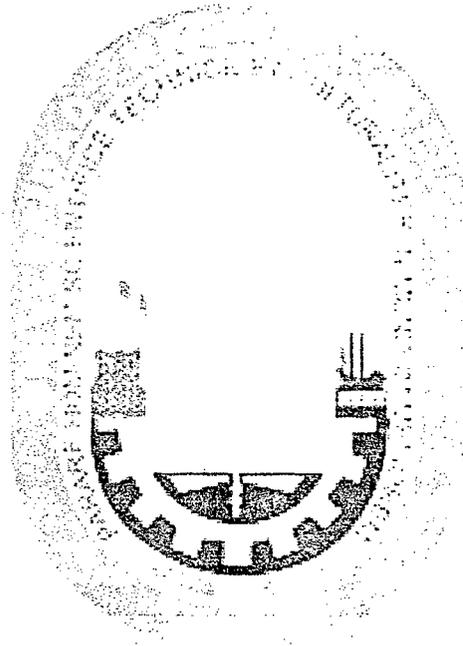


VIII. RECOMENDACIONES

- Para estudios posteriores emplear el requerimiento exacto de agua según aplicación y capacidad instalada de planta, ya que si bien en este trabajo se estandarizaron los flujos ($8.33\text{m}^3/\text{h}$), también hubiera sido interesante considerar diferentes requerimientos de agua en función de las diferentes aplicaciones.
- Realizar estudios de operación y mantenimiento de estas plantas que sean de corte general, es decir que tenga una aplicación universal en fuentes de agua salobre según las definiciones mencionadas.
- Realizar seguimientos continuos a la plantas desalinizadoras por ósmosis inversa, especialmente en los valores de flujo de permeado, presión primaria, conductividad de permeado y temperatura para evaluar su rendimiento.
- Es necesario que en futuros trabajos se proceda a evaluar los procesos y costos del tratamiento de la salmuera o agua de rechazo a fin de establecer formas seguras y rentables de manejarlo.
- Realizar otros estudios de desalinización con diferentes marcas de membranas y evaluar su rendimiento bajo condiciones semejantes con el fin de caracterizar las membranas según el agua fuente
- En lo correspondiente a la instalación y puesta en marcha de plantas de este tipo se recomienda la automatización del proceso a fin de evitar errores de operación, el diagrama P&ID para ambas aplicaciones sirve para tal utilidad, teniendo en cuenta particularidades de cada sistema que puedan estar en función a parámetros no mencionados en el presente trabajo como condiciones geográficas entre otras.

- Debido a los costos siempre variantes de este tipo de sistemas y que en función del tiempo han ido disminuyendo tanto el costo del equipo como sus insumos es recomendable siempre actualizar el costo por metro cúbico de agua desalinizada para manejar valores reales de inversión en el tiempo.

- El cálculo de caída de presión de los filtros multimedia y microfiltros, los cuales está en función de los medios filtrantes y número de unidades respectivamente, es importante para un correcto dimensionamiento de la bomba que se va a emplear en el sistema de ósmosis inversa.



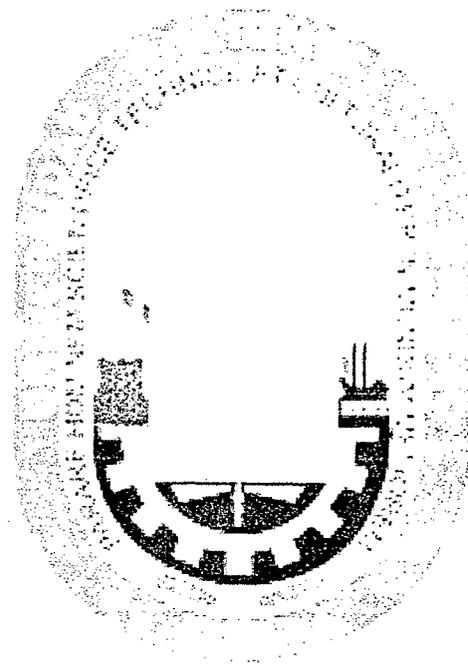
IX. FUENTES DE INFORMACION CONSULTADAS

1. ANDRADE, RAFAEL. *Diseño de una unidad desaladora de agua de mar, mediante el proceso de ósmosis inversa*. Tesis para obtener el grado de Ingeniero Industrial. Caracas. Universidad Católica de Andrés Bello, 1990.
2. ARBOLEDA VALENCIA, JORGE. *Teoría y Práctica de la purificación del agua*, Colombia: Editorial Nomos S.A, tercera edición, 1995.
3. AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA "*Ley 29338. Recursos Hídricos*". Promulgada el 31 de marzo del 2009.
4. DÉGREMONT GILBERT. *Manual Técnico del agua*. Mexico: Editorial Limusa, cuarta edición. 1979.
5. FARIÑAS IGLESIAS, MANUEL. *Ósmosis Inversa. Fundamentos, Tecnología y Aplicaciones*. Madrid, España: Editorial Mc Graw Hill, primera edición, 1999.
6. GARCÍA OLMOS CARLOS FRANCISCO. *Aplicación de la ósmosis inversa y la nanofiltración en el acondicionamiento de aguas para calderas*. Tesis para obtener el grado de Doctor en Ingeniería Industrial. España: Universidad de Oviedo, 2004.
7. HUNT, JAMES. Filtration media: Making the Right Choise for Dealers". Water Conditioning & Purification Magazine, 2001, volumen 43, número 5, paginas 32- 35.
8. LEVINE, IRAN. *Fisicoquímica*. España: Editorial Mc Graw Hill, quinta edición, primer volumen, 2004.

9. LÓPEZ GETA, J.A. *Las aguas salobres, una alternativa al abastecimiento en regiones semiáridas*. Revista del Instituto geológico y minero de España. 2004, paginas 1- 18.
10. METCALF & EDDY, Inc. *Ingeniería de Aguas Residuales; Tratamiento, vertido y reutilización*. México: Editorial Mc Graw Hill, tercera edición, dos volúmenes, 1995.
11. MICHAUD. C.F. *Industrial water treatment*. Water Conditioning & Purification Magazine, 2009, volumen 51, número 2, paginas 50 – 52.
12. ODENDAAL, PETER. *Tratamiento del agua por procesos de Membrana*. American Water Works Association. España: Editorial Mc Graw Hill, 1998
13. RAMIRO LUJÁN. *Tecnologías alternas de desalinización del acuífero del Bolsón del Huevo para el abastecimiento de agua potable a ciudad de Juarez, Chih*. Cultura científica y tecnológica, 2005, volumen 2, número 8.
14. TAYLOR J.S. *Calidad y Tratamiento del agua, Manual de suministros de agua comunitaria*. España: Editorial Mc Graw Hill , 1998.
15. TORRES CORRAL, M.. *Avances Técnicos en la desalación de aguas*. Revista Ambienta, 2004, paginas. 17 - 26.
16. URRUTIA FRANCISCO. *Evolución global de la capacidad instalada de plantas desaladoras*. Drace, 2005, número 72, paginas 68 – 73.
17. VERGARA FRANCISCO. *Tratamiento de aguas industriales*. Perú: Editorial Kavi, primera edición, 1976.

X. APENDICES

A.1	Diagrama de Bloques	–	Proceso A
A.2	Diagrama P%ID	–	Proceso A
A.3	Diagrama de Bloques	–	Proceso B
A.4	Diagrama P%ID	–	Proceso B



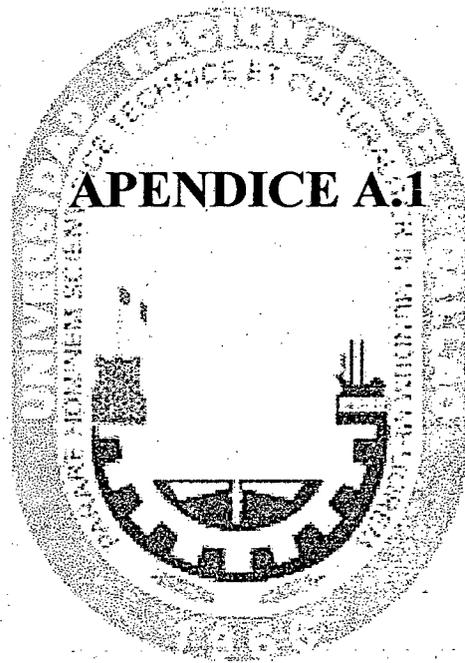
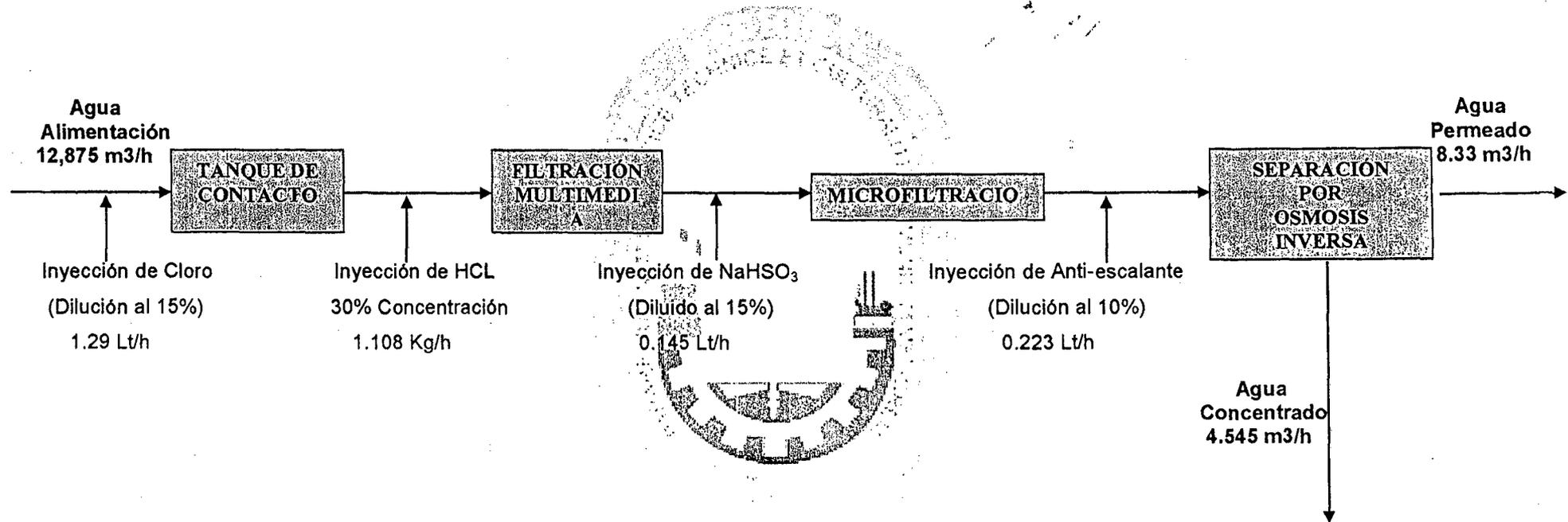


DIAGRAMA DE BLOQUE – PROCESO A



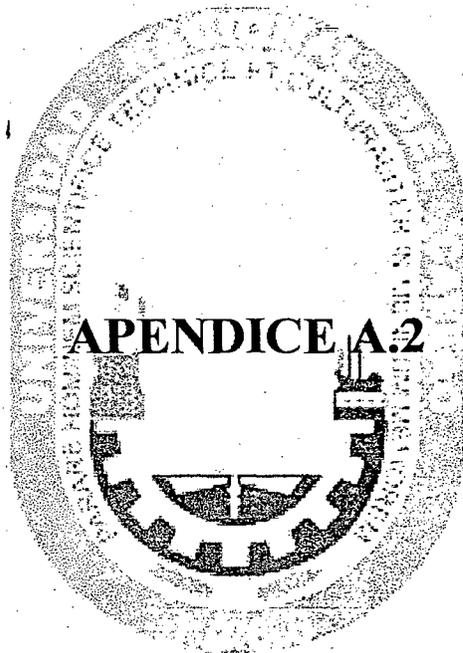
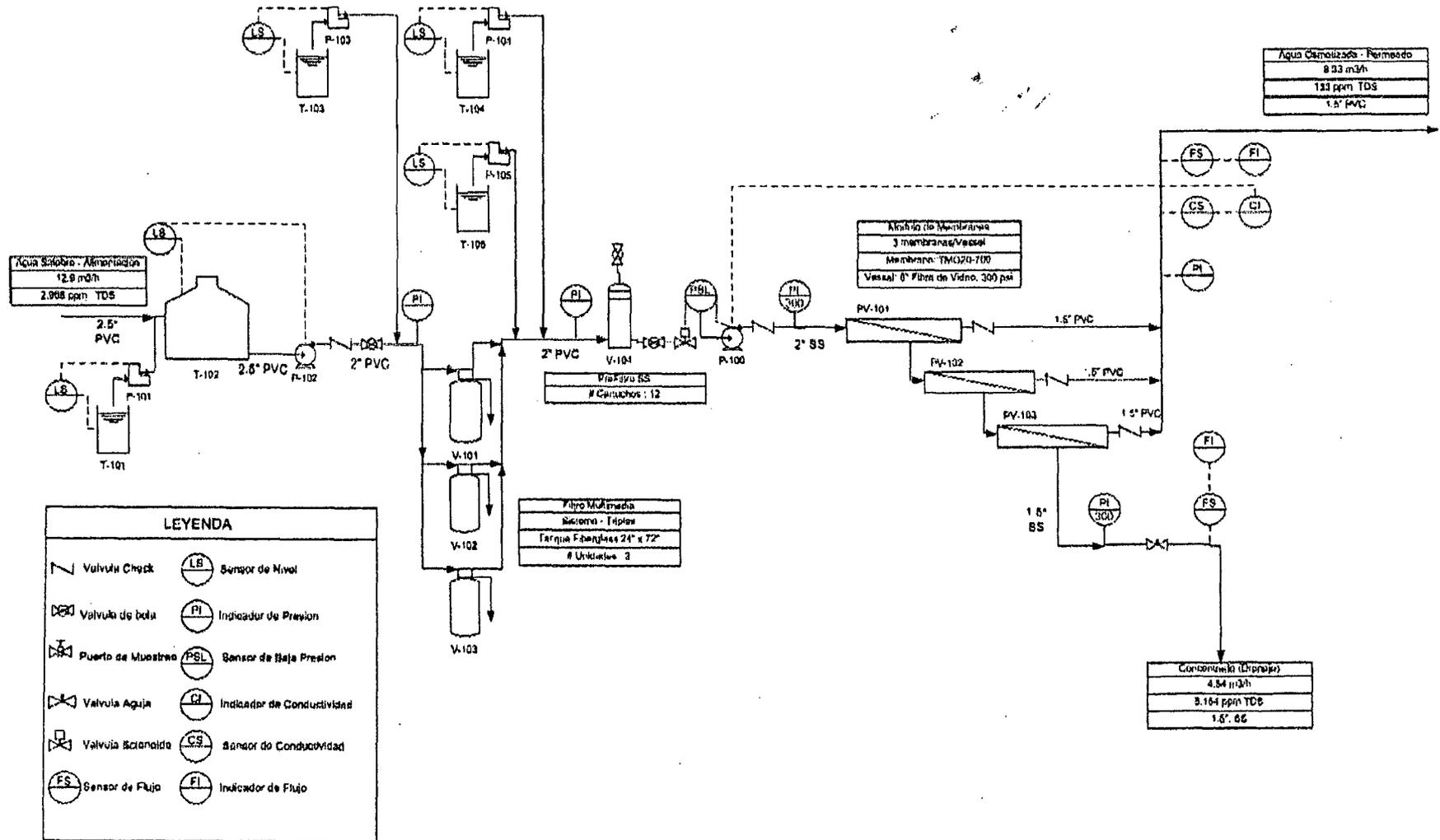


DIAGRAMA P&ID – PROCESO A APLICACIÓN – CONCRETO PREMEZCLADO



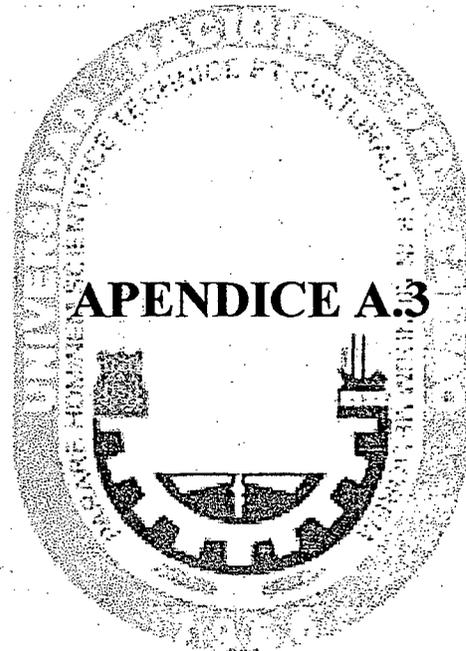
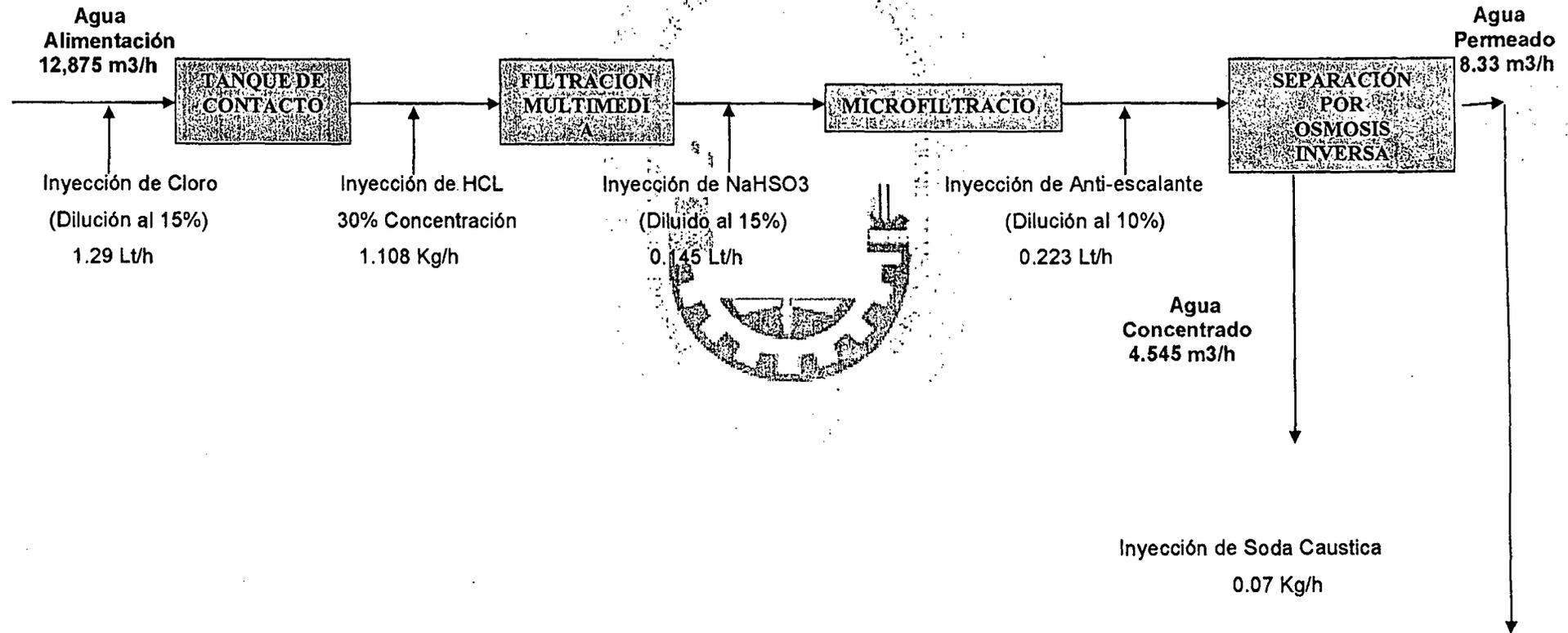


DIAGRAMA DE BLOQUE – PROCESO B



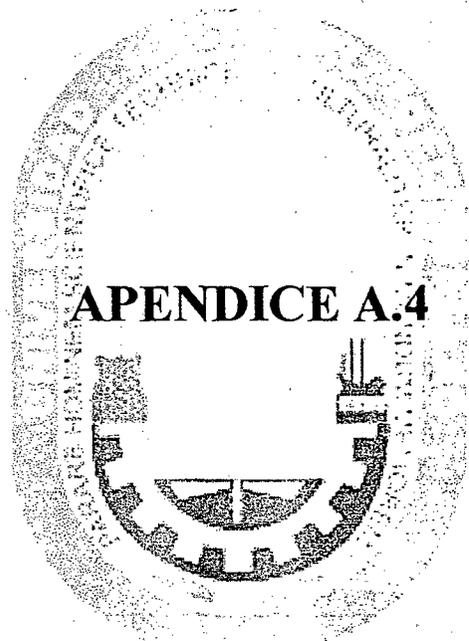
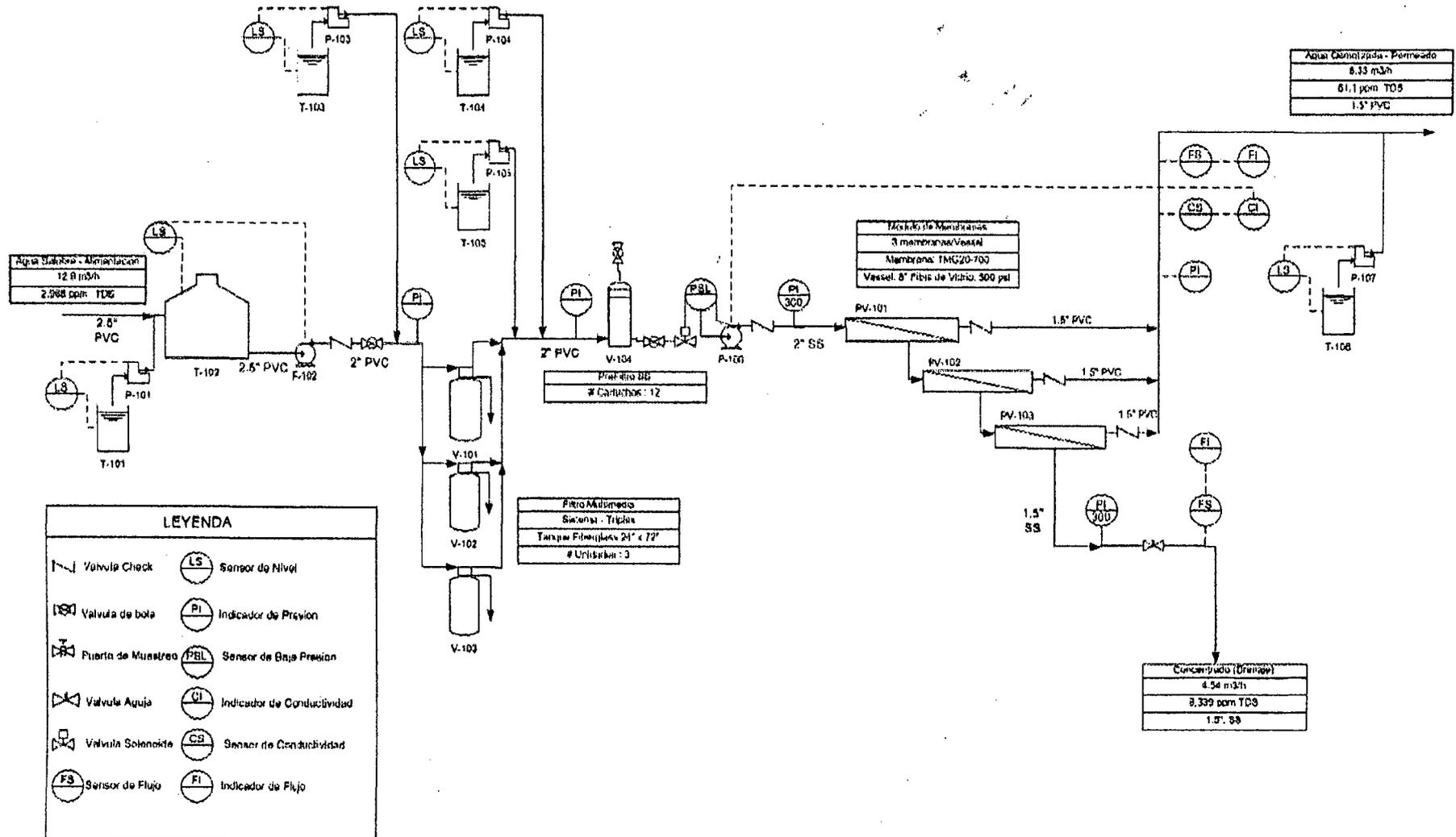


DIAGRAMA P&ID – PROCESO B APLICACIÓN – PINTURAS ACRILICAS



XI. ANEXOS

- A Ley de Recursos Hídricos 29338
- B Norma NTP 339.008:2006 INDECOPI
- C Tabla de membrana comerciales – Toray Fichas técnicas de membranas Toray TM720-430, TMG20430
- D Factor corrección de temperatura GE
- E Producto de solubilidad Kps
- F Concepto de Fuerza iónica – Teoría de Debye - Huckel
- G Filter media reference guide - pure water products - Enting water conditioning
- H Ficha técnica del Meta.bisulfito de sodio
- I RO Best Practice Guidelines – GE – Plano de construcción de un filtro multimedia
- J Tabla constantes de producto de solubilidad
- K Tablas de constantes de ionización para soluciones buffer
- L Lista de precios de equipos
- M Desinfección de agua potable con cloro
- N Información de Desgasificador
- O Información de alcalinización
- P Costo Unitario de Producción de agua desalinizada
- Q Análisis de agua fuente - SGS

ANEXO A

PODER LEGISLATIVO

CONGRESO DE LA REPUBLICA

LEY Nº 29338

EL PRESIDENTE DE LA REPUBLICA

POR CUANTO:

El Congreso de la República
Ha dado la Ley siguiente:

EL CONGRESO DE LA REPUBLICA;
Ha dado la Ley siguiente:

LEY DE RECURSOS HÍDRICOS

TÍTULO PRELIMINAR

Artículo I.- Contenido

La presente Ley regula el uso y gestión de los recursos hídricos. Comprende el agua superficial, subterránea, continental y los bienes asociados a esta. Se extiende al agua marítima y atmosférica en lo que resulte aplicable.

Artículo II.- Finalidad

La presente Ley tiene por finalidad regular el uso y gestión integrada del agua, la actuación del Estado y los particulares en dicha gestión, así como en los bienes asociados a esta.

Artículo III.- Principios

Los principios que rigen el uso y gestión integrada de los recursos hídricos son:

1. **Principio de valoración del agua y de gestión integrada del agua**
El agua tiene valor sociocultural, valor económico y valor ambiental, por lo que su uso debe basarse en la gestión integrada y en el equilibrio entre estos. El agua es parte integrante de los ecosistemas y renovable a través del ciclo hidrológico.
2. **Principio de prioridad en el acceso al agua**
El acceso al agua para la satisfacción de las necesidades primarias de la persona humana es prioritario por ser un derecho fundamental sobre cualquier uso, inclusive en épocas de escasez.
3. **Principio de participación de la población y cultura del agua**
El Estado crea mecanismos para la participación de los usuarios y de la población organizada en la toma de decisiones que afectan al agua en cuanto a calidad, cantidad, oportunidad u otro atributo del recurso. Fomenta el fortalecimiento institucional y el desarrollo técnico de las organizaciones de usuarios de agua. Promueve programas de educación, difusión y sensibilización, mediante las autoridades del sistema educativo y la sociedad civil, sobre la importancia del agua para la humanidad y los sistemas ecológicos, generando conciencia y actitudes que propicien su buen uso y valoración.
4. **Principio de seguridad jurídica**
El Estado consagra un régimen de derechos para el uso del agua. Promueve y vela por el respeto de las condiciones que otorgan seguridad jurídica a la inversión relacionada con su uso, sea pública o privada o en coparticipación.
5. **Principio de respeto de los usos del agua por las comunidades campesinas y comunidades nativas**
El Estado respeta los usos y costumbres de las comunidades campesinas y comunidades nativas, así como su derecho de utilizar las aguas que discurren por sus tierras, en tanto no se oponga a la Ley. Promueve el conocimiento y tecnología ancestral del agua.

6. **Principio de sostenibilidad**
El Estado promueve y controla el aprovechamiento y conservación sostenible de los recursos hídricos previniendo la afectación de su calidad ambiental y de las condiciones naturales de su entorno, como parte del ecosistema donde se encuentran. El uso y gestión sostenible del agua implica la integración equilibrada de los aspectos socioculturales, ambientales y económicos en el desarrollo nacional, así como la satisfacción de las necesidades de las actuales y futuras generaciones.
7. **Principio de descentralización de la gestión pública del agua y de autoridad única**
Para una efectiva gestión pública del agua, la conducción del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos es de responsabilidad de una autoridad única y desconcentrada. La gestión pública del agua comprende también la de sus bienes asociados, naturales o artificiales.
8. **Principio precautorio**
La ausencia de certeza absoluta sobre el peligro de daño grave o irreversible que amenace las fuentes de agua no constituye impedimento para adoptar medidas que impidan su degradación o extinción.
9. **Principio de eficiencia**
La gestión integrada de los recursos hídricos se sustenta en el aprovechamiento eficiente y su conservación, incentivando el desarrollo de una cultura de uso eficiente entre los usuarios y operadores.
10. **Principio de gestión integrada participativa por cuenca hidrográfica**
El uso del agua debe ser óptimo y equitativo, basado en su valor social, económico y ambiental, y su gestión debe ser integrada por cuenca hidrográfica y con participación activa de la población organizada. El agua constituye parte de los ecosistemas y es renovable a través de los procesos del ciclo hidrológico.
11. **Principio de tutela jurídica**
El Estado protege, supervisa y fiscaliza el agua en sus fuentes naturales o artificiales y en el estado en que se encuentre: líquido, sólido o gaseoso, y en cualquier etapa del ciclo hidrológico.

**TÍTULO I
DISPOSICIONES GENERALES**

- Artículo 1°.- El agua**
El agua es un recurso natural renovable, indispensable para la vida, vulnerable y estratégico para el desarrollo sostenible, el mantenimiento de los sistemas y ciclos naturales que la sustentan, y la seguridad de la Nación.
- Artículo 2°.- Dominio y uso público sobre el agua**
El agua constituye patrimonio de la Nación. El dominio sobre ella es inalienable e imprescriptible. Es un bien de uso público y su administración solo puede ser otorgada y ejercida en armonía con el bien común, la protección ambiental y el interés de la Nación. No hay propiedad privada sobre el agua.
- Artículo 3°.- Declaratoria de interés nacional y necesidad pública**
Declárase de interés nacional y necesidad pública la gestión integrada de los recursos hídricos con el propósito de lograr eficiencia y sostenibilidad en el manejo de las cuencas hidrográficas y los acuíferos para la conservación e incremento del agua, así como asegurar su calidad fomentando una nueva cultura del agua, para garantizar la satisfacción de la demanda de las actuales y futuras generaciones.
- Artículo 4°.- Denominaciones**
Cuando se haga referencia a "la Ley" o "al Reglamento", se entiende que se trata de la presente Ley o de su Reglamento. La Autoridad Nacional debe entenderse como Autoridad Nacional del Agua (ANA) y el Consejo de Cuenca como Consejo de Recursos Hídricos de Cuenca.

Artículo 5°.- El agua comprendida en la Ley El agua cuya regulación es materia de la presente Ley comprende lo siguiente:

1. La de los ríos y sus afluentes, desde su origen natural;
2. La que discurre por cauces artificiales;
3. La acumulada en forma natural o artificial;
4. La que se encuentra en las ensenadas y esteros;
5. La que se encuentra en los humedales y manglares.
6. La que se encuentra en los manantiales;
7. La de los nevados y glaciares;
8. La residual;
9. La subterránea;
10. La de origen minero medicinal;
11. La geotermal;
12. La atmosférica; y
13. La proveniente de la desalación.

Artículo 6°.- Bienes asociados al agua
Son bienes asociados al agua los siguientes:

1. Bienes naturales:
 - a. La extensión comprendida entre la baja y la alta marea, más una franja paralela a la línea de la alta marea en la extensión que determine la autoridad competente;
 - b. los cauces o álveos, lechos y riberas de los cuerpos de agua, incluyendo las playas, bermas, restingas y bajarras, en el caso de la amazonia, así como la vegetación de protección;
 - c. los materiales que acarrea y deposita el agua en los cauces;
 - d. las áreas ocupadas por los nevados y los glaciares;
 - e. los estratos o depósitos por donde corre o se encuentra el agua subterránea;
 - f. las islas existentes y las que se formen en los mares, lagos, lagunas o esteros o en los ríos, siempre que no procedan de una bifurcación del curso del agua al cruzar las tierras de particulares;
 - g. los terrenos ganados por causas naturales o por obras artificiales al mar, a los ríos, lagos, lagunas y otros cursos o embalses de agua;
 - h. la vegetación ribereña y de las cabeceras de cuenca;
 - i. las fajas marginales a que se refiere esta Ley; y
 - j. otros que señale la Ley.

2. Bienes artificiales:

Los bienes usados para:

- a. La captación, extracción, desalación, almacenamiento, regulación, conducción, medición, control y uso del agua;
- b. el saneamiento, depuración, tratamiento y reutilización del recurso;
- c. la recarga artificial de acuíferos;
- d. el encauzamiento de ríos y defensa contra inundaciones;
- e. la protección de los bienes que integran el dominio público hidráulico; y
- f. los caminos de vigilancia y mantenimiento que sirven para el uso del agua con arreglo a ley.

Artículo 7°.- Bienes de dominio público hidráulico
Constituyen bienes de dominio público hidráulico, sujetos a las disposiciones de la presente Ley, el agua enunciada en el artículo 5° y los bienes naturales asociados a esta señalados en el numeral 1 del artículo 6°. Toda intervención de los particulares que afecte o altere las características de estos bienes debe ser previamente autorizada por la Autoridad Administrativa del Agua, con excepción del uso primario del agua y las referentes a la navegación.

Artículo 8°.- Bienes artificiales de propiedad del Estado asociados al agua
Son de propiedad del Estado los bienes artificiales asociados al agua, ejecutados con fondos públicos

TÍTULO II
SISTEMA NACIONAL DE GESTIÓN
DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

CAPÍTULO I
FINALIDAD E INTEGRANTES

Artículo 9°.- Creación del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos

Crease el Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos con el objeto de articular el accionar del Estado, para conducir los procesos de gestión integrada y de conservación de los recursos hídricos en los ámbitos de cuencas, de los ecosistemas que lo conforman y de los bienes asociados, así como, para establecer espacios de coordinación y concertación entre las entidades de la administración pública y los actores involucrados en dicha gestión con arreglo a la presente Ley

Artículo 10°.- Finalidad del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos

El Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos es parte del Sistema Nacional de Gestión Ambiental y tiene por finalidad el aprovechamiento sostenible, la conservación y el incremento de los recursos hídricos, así como el cumplimiento de la política y estrategia nacional de recursos hídricos y el plan nacional de recursos hídricos en todos los niveles de gobierno y con la participación de los distintos usuarios del recurso.

Artículo 11°.- Conformación e integrantes del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos

El Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos está conformado por el conjunto de instituciones, principios, normas, procedimientos, técnicas e instrumentos mediante los cuales el Estado desarrolla y asegura la gestión integrada, participativa y multisectorial, el aprovechamiento sostenible, la conservación, la preservación de la calidad y el incremento de los recursos hídricos.

Integran el Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos:

1. La Autoridad Nacional;
2. los Ministerios del Ambiente; de Agricultura; de Vivienda, Construcción y Saneamiento; de Salud; de la Producción; y de Energía y Minas;
3. los gobiernos regionales y gobiernos locales a través de sus órganos competentes;
4. las organizaciones de usuarios agrarios y no agrarios;
5. las entidades operadoras de los sectores hidráulicos, de carácter sectorial y multisectorial;
6. las comunidades campesinas y comunidades nativas; y
7. las entidades públicas vinculadas con la gestión de los recursos hídricos

Artículo 12°.- Objetivos del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos

Son objetivos del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos los siguientes:

- a. Coordinar y asegurar la gestión integrada y multisectorial, el aprovechamiento sostenible, la conservación, el uso eficiente y el incremento de los recursos hídricos, con estándares de calidad en función al uso respectivo.
- b. Promover la elaboración de estudios y la ejecución de proyectos y programas de investigación y capacitación en materia de gestión de recursos hídricos.

Artículo 13°.- Alcances del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos

El Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos desarrolla sus políticas en coordinación con el Ministerio del Ambiente, el Ministerio de Agricultura, el Ministerio de Energía y Minas, el Ministerio de Salud, el Ministerio de la Producción y el Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento, así como con los gobiernos regionales y gobiernos locales, dentro del marco de la política y estrategia nacional de recursos hídricos.

**CAPÍTULO II
AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA**

Artículo 14°.- La Autoridad Nacional como ente rector

La Autoridad Nacional es el ente rector y la máxima autoridad técnico-normativa del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos. Es responsable del funcionamiento de dicho sistema en el marco de lo establecido en la Ley.

Artículo 15°.- Funciones de la Autoridad Nacional
Son funciones de la Autoridad Nacional las siguientes:

1. Elaborar la política y estrategia nacional de los recursos hídricos y el plan nacional de gestión de los recursos hídricos, conduciendo, supervisando y evaluando su ejecución, los que deberán ser aprobados por decreto supremo, refrendado por el Presidente del Consejo de Ministros;
2. establecer los lineamientos para la formulación y actualización de los planes de gestión de los recursos hídricos de las cuencas, aprobarlos y supervisar su implementación;
3. proponer normas legales en materia de su competencia, así como dictar normas y establecer procedimientos para asegurar la gestión integral y sostenible de los recursos hídricos;
4. autorizar el método y determinar el valor de las retribuciones económicas por el derecho de uso de agua y por el vertimiento de aguas residuales en fuentes naturales de agua, valores que deben ser aprobados por decreto supremo, así como, aprobar las tarifas por uso de la infraestructura hidráulica, propuestas por los operadores hidráulicos;
5. aprobar, previo estudio técnico, reservas de agua por un tiempo determinado cuando así lo requiera el interés de la Nación y, como último recurso, el interés de agua de cuenca;
6. declarar, previo estudio técnico, el agotamiento de las fuentes naturales de agua, zonas de veda y zonas de protección, así como los estados de emergencia por escasez, superávit hídrico, contaminación de las fuentes naturales de agua o cualquier conflicto relacionado con la gestión sostenible de los recursos hídricos, dictando las medidas pertinentes;
7. otorgar, modificar y extinguir, previo estudio técnico, derechos de uso de agua, así como aprobar la implementación, modificación y extinción de servidumbres de uso de agua, a través de los órganos desconcentrados de la Autoridad Nacional;
8. conducir, organizar y administrar el Sistema Nacional de Información de Recursos Hídricos, el Registro Administrativo de Derechos de Agua, el Registro Nacional de Organizaciones de Usuarios y los demás que correspondan;
9. emitir opinión técnica previa vinculante para el otorgamiento de autorizaciones de extracción de material de acarreo en los cauces naturales de agua;
10. supervisar y evaluar las actividades, impacto y cumplimiento de los objetivos del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos;
11. emitir opinión técnica vinculante respecto a la disponibilidad de los recursos hídricos para la viabilidad de proyectos de infraestructura hidráulica que involucren su utilización;
12. ejercer jurisdicción administrativa exclusiva en materia de aguas, desarrollando acciones de administración, fiscalización, control y vigilancia, para asegurar la preservación y conservación de las fuentes naturales de agua, de los bienes naturales asociados a estas y de la infraestructura hidráulica, ejerciendo para tal efecto, la facultad sancionadora y coactiva;
13. establecer los parámetros de eficiencia aplicables al aprovechamiento de dichos recursos, en concordancia con la política nacional del ambiente;
14. reforzar las acciones para una gestión integrada del agua en las cuencas menos favorecidas y la preservación del recurso en las cabeceras de cuencas;
15. aprobar la demarcación territorial de las cuencas hidrográficas; y
16. otras que señale la Ley.

Artículo 16°.- Recursos económicos de la Autoridad Nacional
Constituyen recursos económicos de la Autoridad Nacional los siguientes:

1. Los asignados en el Presupuesto de la República, incluyendo las transferencias de entidades del sector público;
2. los pagos que efectúan los usuarios de agua por concepto de retribuciones económicas por el uso de agua y por el vertimiento de aguas residuales, incluyendo lo que se recaude por concepto de intereses compensatorios y moratorios;
3. los aportes, asignaciones, donaciones, legados o transferencias por cualquier título proveniente de personas naturales o jurídicas, nacionales o extranjeras, incluyendo los que provengan de la cooperación internacional;
4. los ingresos financieros que generen sus recursos;
5. la retribución única a que se refiere el artículo 107° del Decreto Ley N° 25844, Ley de Concesiones Eléctricas;
6. los que se recauden por concepto de multas;
7. los derechos por la tramitación de procedimientos administrativos que le correspondan resolver conforme a sus funciones y competencias; y
8. los demás que se le asigne.

**CAPÍTULO III
ESTRUCTURA ORGÁNICA DE LA AUTORIDAD NACIONAL DEL AGUA**

Artículo 17°.- Organización de la Autoridad Nacional

La organización de la Autoridad Nacional se rige por la presente Ley y su Reglamento. Su estructura básica está compuesta por los órganos siguientes:

- a. Consejo Directivo;
- b. Jefatura;
- c. Tribunal Nacional de Resolución de Controversias Hídricas;
- d. órganos de apoyo, asesoramiento y línea;
- e. órganos desconcentrados, denominados Autoridades Administrativas del Agua;
- f. Administraciones Locales de Agua que dependen de las Autoridades Administrativas del Agua.

Artículo 18°.- Información en materia de recursos hídricos

Los integrantes del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos proporcionan la información que, en materia de recursos hídricos, sea solicitada por el ente rector en el ámbito de su competencia, para el cumplimiento de sus funciones al amparo de lo establecido en la presente norma.

La Autoridad Nacional dispone la difusión de la información en materia de recursos hídricos a fin de asegurar el aprovechamiento eficiente de dichos recursos y su inclusión en el Sistema Nacional de Información Ambiental.

**SUBCAPÍTULO I
CONSEJO DIRECTIVO**

Artículo 19°.- Conformación del Consejo Directivo
El Consejo Directivo es la máxima instancia de la Autoridad Nacional. Está conformado por los siguientes miembros:

1. Un (1) representante del Ministerio de Agricultura, quien asume la presidencia del Consejo Directivo.
2. Un (1) representante del Ministerio del Ambiente.
3. Un (1) representante del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
4. Un (1) representante del Ministerio de Energía y Minas.
5. Un (1) representante de los sectores públicos productivos.
6. Un (1) representante de los sectores públicos de salud y de saneamiento.
7. Un (1) representante de los gobiernos regionales, elegido entre los presidentes regionales.
8. Un (1) representante de las municipalidades rurales.

Los comités de usuarios son el nivel mínimo de organización. Se integran a las comisiones de usuarios y estas a la vez a las juntas de usuarios.

Los usuarios que cuentan con sistemas de abastecimiento de agua propio pueden organizarse en asociaciones de nivel regional y nacional conforme a las disposiciones del Código Civil.

Las entidades prestadoras de servicios de saneamiento se integran al sector hidráulico y a la cuenca hidráulica que corresponda según la fuente de abastecimiento de agua de la cual se sirve.

Artículo 27°.- Naturaleza y finalidad de las organizaciones de usuarios

Las organizaciones de usuarios son asociaciones civiles que tienen por finalidad la participación organizada de los usuarios en la gestión multisectorial y uso sostenible de los recursos hídricos.

El Estado garantiza la autonomía de las organizaciones de usuarios de agua y la elección democrática de sus directivos, con arreglo al Reglamento.

La Autoridad Nacional lleva un registro de todas las organizaciones de usuarios establecidas conforme a ley.

Artículo 28°.- La junta de usuarios

La junta de usuarios se organiza sobre la base de un sistema hidráulico común, de acuerdo con los criterios técnicos de la Autoridad Nacional.

La junta de usuarios tiene las siguientes funciones:

- Operación y mantenimiento de la infraestructura hidráulica.
- Distribución del agua.
- Cobro y administración de las tarifas de agua.

El ejercicio de las funciones asignadas a las juntas de usuarios, por realizarse respecto a recursos de carácter público, es evaluado conforme a las normas aplicables del Sistema Nacional de Control.

Artículo 29°.- Las comisiones de usuarios

Las comisiones de usuarios constituyen las juntas de usuarios y se organizan de acuerdo con los criterios técnicos de la Autoridad Nacional.

Artículo 30°.- Los comités de usuarios

Los comités de usuarios pueden ser de aguas superficiales, de aguas subterráneas y de aguas de filtración.

Los comités de usuarios de aguas superficiales se organizan a nivel de canales menores, los de aguas subterráneas a nivel de pozo, y los de aguas de filtraciones a nivel de área de afloramiento superficial.

Su estructura y funciones son determinadas en el Reglamento.

Artículo 31°.- Reconocimiento de las organizaciones de usuarios

La Autoridad Nacional reconoce mediante resolución administrativa a las organizaciones de usuarios.

Artículo 32°.- Las comunidades campesinas y comunidades nativas

Las comunidades campesinas y comunidades nativas se organizan en torno a sus fuentes naturales, microcuencas y subcuencas de acuerdo con sus usos y costumbres. Las organizaciones tradicionales de estas comunidades tienen los mismos derechos que las organizaciones de usuarios.

CAPÍTULO VI CUENCAS Y ENTIDADES MULTINACIONALES

Artículo 33°.- Acuerdos multinacionales

La Autoridad Nacional coordina con el Ministerio de Relaciones Exteriores la suscripción de acuerdos multinacionales que tengan por finalidad la gestión integrada del agua en las cuencas transfronterizas.

TÍTULO III USOS DE LOS RECURSOS HÍDRICOS

Artículo 34°.- Condiciones generales para el uso de los recursos hídricos

El uso de los recursos hídricos se encuentra condicionado a su disponibilidad. El uso del agua debe realizarse en forma eficiente y con respeto a los

derechos de terceros, de acuerdo con lo establecido en la Ley, promoviendo que se mantengan o mejoren las características físico-químicas del agua, el régimen hidrológico en beneficio del ambiente, la salud pública y la seguridad nacional.

Artículo 35°.- Clases de usos de agua y orden de prioridad

La Ley reconoce las siguientes clases de uso de agua:

- Uso primario.
- Uso poblacional.
- Uso productivo.

La prioridad para el otorgamiento y el ejercicio de los usos anteriormente señalados sigue el orden en que han sido enunciados.

Artículo 36°.- Uso primario del agua

El uso primario consiste en la utilización directa y efectiva de la misma en las fuentes naturales y cauces públicos de agua, con el fin de satisfacer necesidades humanas primarias. Comprende el uso de agua para la preparación de alimentos, el consumo directo y el aseo personal, así como su uso en ceremonias culturales, religiosas y rituales.

Artículo 37°.- Características del uso primario

El uso primario del agua no requiere autorización administrativa y se ejerce por la sola disposición de la Ley. Es inocuo al ambiente y a terceros, no tiene fin lucrativo y se ejerce en forma gratuita por las personas, bajo su propia responsabilidad, restringido solo a medios manuales y condicionado a que:

- No altera las fuentes de agua en su cantidad y calidad, y
- no afecta los bienes asociados al agua.

Artículo 38°.- Zonas de libre acceso para el uso primario

El Estado garantiza el libre acceso a las fuentes naturales y cauces artificiales públicos, sin alterarlos y evitando su contaminación, para satisfacer directamente las necesidades primarias de la población. La Autoridad Nacional fija, cuando sea necesario, lugares o zonas de libre acceso.

Artículo 39°.- Uso poblacional del agua

El uso poblacional consiste en la captación del agua de una fuente o red pública, debidamente tratada, con el fin de satisfacer las necesidades humanas básicas: preparación de alimentos y hábitos de aseo personal. Se ejerce mediante derechos de uso de agua otorgados por la Autoridad Nacional.

Artículo 40°.- Acceso de la población a las redes de agua potable

El Estado garantiza a todas las personas el derecho de acceso a los servicios de agua potable, en cantidad suficiente y en condiciones de seguridad y calidad para satisfacer necesidades personales y domésticas.

Artículo 41°.- Restricciones de uso del agua poblacional

En estados de escasez hídrica, las autoridades locales, regionales y nacionales responsables de la regulación de servicios de suministro de agua potable deben dictar medidas de racionamiento para restringir el uso del agua que no está destinado para satisfacer las necesidades personales.

Artículo 42°.- Uso productivo del agua

El uso productivo del agua consiste en la utilización de la misma en procesos de producción o previos a los mismos. Se ejerce mediante derechos de uso de agua otorgados por la Autoridad Nacional.

Artículo 43°.- Tipos de uso productivo del agua

Son tipos de uso productivo los siguientes:

- Agrario: pecuario y agrícola;
- Acuícola y pesquero;
- Energético;
- Industrial;

5. Medicinal,
6. Minero,
7. Recreativo
8. Turístico, y
9. de transporte

Se podrá otorgar agua para usos no previstos, respetando las disposiciones de la presente Ley.

TÍTULO IV DERECHOS DE USO DE AGUA

CAPÍTULO I DISPOSICIONES GENERALES

Artículo 44.- Derechos de uso de agua

Para usar el recurso agua, salvo el uso primario, se requiere contar con un derecho de uso otorgado por la Autoridad Administrativa del Agua con participación del Consejo de Cuenca Regional o Interregional, según corresponda.

Los derechos de uso de agua se otorgan, suspenden, modifican o extinguen por resolución administrativa de la Autoridad Nacional, conforme a ley.

Artículo 45.- Clases de derechos de uso de agua

Los derechos de uso de agua son los siguientes:

1. Licencia de uso.
2. Permiso de uso.
3. Autorización de uso de agua.

Artículo 46.- Garantía en el ejercicio de los derechos de uso

Se encuentra prohibido alterar, modificar, perturbar o impedir el uso legítimo del agua. El Estado garantiza el cumplimiento de los derechos de uso otorgados.

CAPÍTULO II LICENCIA DE USO DE AGUA

Artículo 47.- Definición

La licencia de uso del agua es un derecho de uso mediante el cual la Autoridad Nacional, con opinión del Consejo de Cuenca respectivo, otorga a su titular la facultad de usar este recurso natural, con un fin y en un lugar determinado, en los términos y condiciones previstos en los dispositivos legales vigentes y en la correspondiente resolución administrativa que la otorga.

Artículo 48.- Clases de licencia de uso

La licencia de uso del agua puede ser otorgada para uso consuntivo y no consuntivo.

Artículo 49.- Reversión de recursos hídricos

La Autoridad Nacional, con opinión del Consejo de Cuenca, promueve la reversión de los excedentes de recursos hídricos que se obtengan en virtud del cumplimiento de la presente norma, considerando para ello la normativa establecida por el Ministerio del Ambiente en la materia de su competencia.

Los usuarios u operadores de infraestructura hidráulica que generen excedentes de recursos hídricos y que cuenten con un certificado de eficiencia tienen preferencia en el otorgamiento de nuevos derechos de uso de agua que se otorguen sobre los recursos excedentes.

El Reglamento establece las condiciones para la aplicación de lo establecido en el presente artículo.

Artículo 50.- Características de la licencia de uso

Son características de la licencia de uso las siguientes:

1. Otorgar a su titular facultades para usar y registrar una dotación anual de agua expresada en metros cúbicos, extraída de una fuente, pudiendo ejercer las acciones legales para su defensa,
2. se extingue por las causales previstas en la Ley,
3. su plazo es indeterminado mientras subsista la actividad para la que fue otorgada,
4. atribuye al titular la potestad de efectuar directamente o en coparticipación, según el caso, inversiones en tratamiento, transformación y reutilización para el uso otorgado. El agua excedente se entrega a la Autoridad Nacional para su distribución;

5. faculta a ejercer las servidumbres previstas en esta Ley y de acuerdo con las actividades y tipo de uso del agua que realice el titular;
6. es inherente al objeto para el cual fue otorgado; y,
7. las licencias de uso no son transferibles. Si el titular no desea continuar usándola debe revertirla al Estado, a través de la Autoridad Nacional.

Artículo 51.- Licencia de uso en bloque

Se puede otorgar licencia de uso de agua en bloque para una organización de usuarios de agua reconocida, integrada por una pluralidad de personas naturales o jurídicas que usen una fuente de agua con punto de captación común.

Las organizaciones titulares de licencias de uso de agua en bloque emiten certificados nominativos que representen la parte que corresponde de la licencia a cada uno de sus integrantes.

Artículo 52.- Licencias provisionales

La Autoridad Nacional, con opinión del Consejo de Cuenca, a solicitud de parte, siempre y cuando existan recursos hídricos excedentes y no se afecten derechos de uso de terceros, otorga licencias provisionales a los titulares de concesiones otorgadas por las entidades públicas competentes que tengan como fin la realización de estudios en cualquier actividad.

La licencia provisional es de plazo determinado y no puede superar el de las concesiones que la originan. Se otorga de conformidad con las condiciones, actos y requisitos previstos en la Ley, el Reglamento y en la propia resolución de otorgamiento.

Cumplidas las condiciones bajo las cuales se otorgó la licencia provisional se procede, a solicitud de parte, al otorgamiento de la licencia de uso que faculta a su titular para hacer uso efectivo del agua.

Artículo 53.- Otorgamiento y modificación de la licencia de uso

El otorgamiento, suspensión o modificación de una licencia de uso de agua se tramita conforme al procedimiento establecido en el Reglamento.

Para ser otorgada se requiere lo siguiente:

1. Que exista la disponibilidad del agua solicitada y que ésta sea apropiada en calidad, cantidad y oportunidad para el uso al que se destine;
2. que la fuente de agua a la que se contrae la solicitud tenga un volumen de agua disponible que asegure los caudales ecológicos, los niveles mínimos de reservas o seguridad de almacenamiento y las condiciones de navegabilidad, cuando corresponda y según el régimen hidroológico;
3. que no ponga en riesgo la salud pública y el ambiente;
4. que no se afecte derechos de terceros;
5. que guarde relación con el plan de gestión del agua de la cuenca;
6. que el interesado presente el instrumento ambiental pertinente aprobado por la autoridad ambiental sectorial competente; y
7. que hayan sido aprobadas las servidumbres, así como las obras de captación, alumbramiento, producción o regeneración, conducción, utilización, avenamiento, medición y las demás que fuesen necesarias.

Artículo 54.- Requisitos de la solicitud de licencia de uso

La solicitud es presentada ante la Autoridad Nacional, conteniendo además de los requisitos indicados en el artículo 113° de la Ley N° 27444, Ley del Procedimiento Administrativo General, los siguientes:

1. El uso al que se destine el agua;
2. la fuente de captación, curso o cuerpo de agua a usar, señalando la cuenca hidrográfica a la que pertenece, su ubicación política y geográfica y principales características de interés,
3. la ubicación de los lugares de captación, devolución o la delimitación del área de la fuente de uso, según corresponda, con los planos correspondientes,
4. el volumen anualizado requerido y el estimado de descarga, cuando corresponda y otras características, de acuerdo con la licencia solicitada;

5. certificación ambiental emitida conforme a la legislación respectiva, cuando corresponda;
 6. la especificación de las servidumbres que se requieran; y
 7. acreditación de la propiedad o posesión legítima del predio donde se utilizará el agua solicitada, cuando corresponda.
- A las solicitudes de uso de agua se aplica el silencio administrativo negativo.

Artículo 55.- Prioridad para el otorgamiento en el uso del agua

Existe concurrencia de solicitudes cuando en cualquier etapa del procedimiento administrativo de otorgamiento de un derecho de uso de agua se presenta más de una solicitud sobre una misma fuente de agua.

Cuando la disponibilidad del recurso no sea suficiente para atender todas las solicitudes concurrentes, el otorgamiento debe realizarse conforme a las siguientes reglas:

1. El orden de prioridad general establecido en la Ley;
2. el orden de preferencias de los usos productivos, establecido por la Autoridad Nacional, tomando en cuenta lo establecido en los artículos 35° y 43°, y, tratándose de un mismo uso productivo, la que sea de mayor interés público, conforme a los siguientes criterios:
 - a) La mayor eficiencia en la utilización del agua;
 - b) la mayor generación de empleo; y
 - c) el menor impacto ambiental.

En igualdad de condiciones, tiene derecho de preferencia la solicitud que tenga mayor antigüedad en su presentación.

Cuando se presenten dos (2) o más solicitudes para un mismo uso y el recurso no fuera suficiente, la Autoridad Nacional, con la opinión del Consejo de Cuenca respectivo, define la prioridad para el otorgamiento y/o el uso o usos de agua que sirvan mejor al interés de la Nación, el desarrollo del país y al bien común, dentro de los límites y principios establecidos en la Ley.

Artículo 56.- Derechos que confiere la licencia de uso

Los titulares de licencias de uso tienen derecho a lo siguiente:

1. Utilizar el agua, los bienes de dominio público hidráulico, así como los bienes artificiales asociados al agua de acuerdo con las disposiciones de la Ley, el Reglamento y la respectiva resolución administrativa que lo otorga;
2. solicitar la modificación, suspensión o extinción de la licencia;
3. realizar estudios, obras e instalaciones hidráulicas para ejercitar su derecho de uso;
4. ejercer las servidumbres que correspondan, indispensables para el uso del agua y la evacuación de sus sobrantes; y
5. los demás derechos previstos en la Ley.

Artículo 57.- Obligaciones de los titulares de licencia de uso

Los titulares de licencia de uso tienen las siguientes obligaciones:

1. Utilizar el agua con la mayor eficiencia técnica y económica, en la cantidad, lugar y para el uso otorgado, garantizando el mantenimiento de los procesos ecológicos esenciales, y evitando su contaminación;
2. cumplir oportunamente con el pago de la retribución económica por el uso del agua y las tarifas, cuando corresponda;
3. mantener en buenas condiciones la infraestructura necesaria para el uso del agua que le fue otorgada en los términos y condiciones que establece la Ley y el Reglamento, sin afectar a terceros, ni desarrollo hidráulico, a las fuentes de agua, ni a la cuenca;
4. permitir las inspecciones que realice o disponga la Autoridad Nacional, en cumplimiento de sus funciones;

5. instalar los dispositivos de control y medición de agua, conservándolos y manteniéndolos en buen estado;
6. dar aviso oportuno a la Autoridad Nacional cuando, por causa justificada, no utilice transitoria, parcial o totalmente las aguas; situación que no acarrea la pérdida del derecho otorgado;
7. contribuir a la conservación, mantenimiento y desarrollo de la cuenca;
8. participar en las organizaciones de usuarios de agua correspondientes; y
9. las demás previstas en la Ley.

CAPITULO III

OTROS DERECHOS DE USO DE AGUA

Artículo 58.- Permiso de uso de agua para épocas de superávit hídrico

El permiso de uso de agua para épocas de superávit hídrico es un derecho de duración indeterminada y de ejercicio eventual, mediante el cual la Autoridad Nacional, con opinión del Consejo de Cuenca, otorga a su titular la facultad de usar una determinada cantidad de agua variable proveniente de una fuente natural. El estado de superávit hídrico es declarado por la Autoridad Nacional cuando se han cubierto los requerimientos de los titulares de licencias de uso del sector o distrito hidráulico.

Artículo 59.- Permiso de uso sobre aguas residuales

El permiso de uso sobre aguas residuales, otorgado por la Autoridad Nacional, es un derecho de uso de duración indeterminada, mediante el cual se otorga a su titular la facultad de usar una determinada cantidad de agua variable, proveniente de filtraciones resultantes del ejercicio del derecho de los titulares de licencias de uso.

Los titulares de licencias que producen las filtraciones no son responsables de las consecuencias o de los perjuicios que puedan sobrevenir si varía la calidad, el caudal o volumen, u oportunidad o si dejara de haber sobrantes de agua en cualquier momento o por cualquier motivo.

Artículo 60.- Requisitos del permiso de uso

Son requisitos para obtener un permiso de uso de agua los siguientes:

1. Que el solicitante acredite ser propietario o poseedor legítimo del predio en el que hará uso eventual del recurso; y
2. que el predio cuente con las obras autorizadas de captación, conducción, utilización, avenamiento, medición y las demás que fuesen necesarias para el uso eventual del recurso.

Artículo 61.- Otorgamiento, modificación y extinción del permiso de uso de agua

Al otorgamiento, modificación y extinción del permiso de uso se le aplican las disposiciones sobre licencia de uso, en lo que corresponda. La solicitud y resolución administrativa de otorgamiento de permiso de uso confiere los mismos datos que los establecidos para la licencia de uso, cuando corresponda.

Artículo 62.- Autorización de uso de agua

La autorización de uso de agua es de plazo determinado, no mayor a dos (2) años, mediante el cual la Autoridad Nacional otorga a su titular la facultad de usar una cantidad anual de agua para cubrir exclusivamente las necesidades de aguas derivadas o relacionadas directamente con lo siguiente:

1. Ejecución de estudios.
2. Ejecución de obras.
3. Lavado de suelos.

La autorización de uso puede ser prorrogada por una única vez, por un plazo similar, siempre que subsistan las condiciones que dieron origen a su otorgamiento.

Los requisitos son determinados en el Reglamento.

Artículo 63.- Otorgamiento, modificación y extinción de la autorización de uso de agua

El otorgamiento, la modificación y la extinción de la autorización de uso se rigen por las disposiciones sobre licencia de uso. La solicitud y la resolución administrativa

de otorgamiento de autorización de uso de agua contienen los mismos requisitos establecidos para la licencia de uso de agua.

Artículo 64°.- Derechos de comunidades campesinas y de comunidades nativas

El Estado reconoce y respeta el derecho de las comunidades campesinas y comunidades nativas de utilizar las aguas existentes o que discuten por sus tierras, así como sobre las cuencas de donde nacen dichas aguas, tanto para fines económicos, de transporte, de supervivencia y culturales, en el marco de lo establecido en la Constitución Política del Perú la normativa sobre comunidades y la Ley.

Este derecho es imprescriptible, prevalente y se ejerce de acuerdo con los usos y costumbres ancestrales de cada comunidad.

Ningún artículo de la Ley debe interpretarse de modo que menoscabe los derechos reconocidos a los pueblos indígenas en el Convenio 169 de la Organización Internacional de Trabajo.

Artículo 65°.- Definición de servidumbre de agua
La servidumbre de agua es el gravamen que recae sobre un predio para el uso del agua. Se sujeta a los plazos y formalidades establecidas en la Ley.

Puede ser:

1. Natural.- Obliga al titular de un predio a permitir el paso del agua que discurre en forma natural. Tiene duración indefinida.
2. Voluntaria.- Se constituye por acuerdo con el propietario del predio sirviente para hacer efectivo el derecho de uso de agua pudiendo pactarse a título gratuito u oneroso. Tiene la duración que hayan acordado las partes.
3. Forzosa.- Se constituye mediante resolución de la Autoridad Nacional. Tiene una duración igual al plazo previsto por el derecho de uso de agua.

Artículo 66°.- Compensación e indemnización

La servidumbre de agua forzosa y la servidumbre de agua voluntaria a título oneroso obliga a su titular a pagar una compensación por el uso del bien gravado y, de ser el caso, a indemnizar por el perjuicio que ella cause. El monto de la compensación y de la indemnización es determinado por acuerdo entre las partes o, en su defecto, lo fija la Autoridad Nacional.

Artículo 67°.- Obligaciones y derechos del titular de la servidumbre de agua

El titular de la servidumbre de agua está obligado a construir y conservar las obras que fueren necesarias para el ejercicio de la misma y tiene derecho de paso con fines de vigilancia y conservación de las referidas obras.

Artículo 68°.- Extinción de la servidumbre forzosa de agua

La Autoridad Nacional, a pedido de parte o de oficio, declara la extinción de la servidumbre forzosa cuando:

1. Quien solicitó la servidumbre no lleve a cabo las obras respectivas dentro del plazo otorgado.
2. se demuestre que la servidumbre permanece sin uso por más de dos (2) años consecutivos;
3. concluya la finalidad para la cual se constituyó la servidumbre;
4. se destine la servidumbre, sin autorización previa, a fin distinto al solicitado, y
5. cuando vence el plazo de la servidumbre.

Artículo 69°.- Servidumbres reguladas por leyes especiales

Las servidumbres de agua con fines energéticos y de saneamiento se regulan por sus leyes especiales.

**CAPÍTULO IV
EXTINCIÓN DE LOS DERECHOS
DE USO DE AGUA**

Artículo 70°.- Causales de extinción de los derechos de uso de agua

Los derechos de uso de agua previstos en la Ley se extinguen por lo siguiente:

1. Renuncia del titular;

2. nulidad del acto administrativo que lo otorgó;
3. caducidad;
4. revocación; y
5. resolución judicial consentida o ejecutoriada que disponga la extinción del derecho.

La declaración de extinción de los derechos de uso de agua determina la reversión al dominio del Estado de los volúmenes otorgados.

Artículo 71°.- Caducidad de los derechos de uso

Son causales de caducidad de los derechos de uso las siguientes:

1. La muerte del titular del derecho;
2. el vencimiento del plazo del derecho de uso de agua;
3. conclusión del objeto para el que se otorgó el derecho; y
4. falta de ejercicio del derecho durante dos (2) años consecutivos o acumulados en un período de cinco (5) años sin justificación, siempre que esta causal sea imputable al titular.

Artículo 72°.- Revocación de los derechos de uso de agua

Son causales de revocación de los derechos de uso las siguientes:

1. La falta de pago de dos (2) cuotas consecutivas de la retribución económica del agua por uso o del derecho de vertimiento, de las tarifas de agua o de cualquier otra obligación económica con la Autoridad Nacional;
2. cuando se destina el agua, sin autorización previa de la Autoridad Nacional, a un fin distinto para el cual fue otorgado;
3. cuando el titular del derecho de uso de agua haya sido sancionado dos (2) veces por infracciones graves; y
4. la escasez del recurso declarada formalmente por la Autoridad Nacional, o problemas de calidad que impidan su uso.

Las sanciones deben haber sido establecidas por resolución administrativa firme.

La caducidad y la revocación son declaradas en primera instancia por la Autoridad Administrativa del Agua. Para aplicar las causales de revocación se debe seguir previamente el procedimiento sancionador establecido en el Reglamento.

**TÍTULO V
PROTECCIÓN DEL AGUA**

Artículo 73°.- Clasificación de los cuerpos de agua

Los cuerpos de agua pueden ser clasificados por la Autoridad Nacional teniendo en cuenta la cantidad y calidad del agua, consideraciones hidrográficas, las necesidades de las poblaciones locales y otras razones técnicas que establezca.

Artículo 74°.- Faja marginal

En los terrenos adyacentes a los cauces naturales o artificiales, se mantiene una faja marginal de terreno necesaria para la protección, el uso primario del agua, el libre tránsito, la pesca, caminos de vigilancia u otros servicios. El Reglamento determina su extensión.

Artículo 75°.- Protección del agua

La Autoridad Nacional, con opinión del Consejo de Cuenca, debe velar por la protección del agua, que incluye la conservación y protección de sus fuentes, de los ecosistemas y de los bienes naturales asociados a ésta en el marco de la Ley y demás normas aplicables. Para dicho fin, puede coordinar con las instituciones públicas competentes y los diferentes usuarios.

La Autoridad Nacional, a través del Consejo de Cuenca correspondiente, ejerce funciones de vigilancia y fiscalización con el fin de prevenir y combatir los efectos de la contaminación del mar, ríos y lagos en lo que le corresponde. Puede coordinar, para tal efecto, con los sectores de la administración pública, los gobiernos regionales y los gobiernos locales.

El Estado reconoce como zonas ambientalmente vulnerables las cabeceras de cuencas donde se originan las aguas. La Autoridad Nacional, con opinión del Ministerio

del Ambiente, puede declarar zonas intangibles en las que no se otorga ningún derecho para uso, disposición o vertimiento de agua.

Artículo 76° - Vigilancia y fiscalización del agua

La Autoridad Nacional en coordinación con el Consejo de Cuenca, en el lugar y el estado físico en que se encuentre el agua, sea en sus cauces naturales o artificiales, controla, supervisa, fiscaliza el cumplimiento de las normas de calidad ambiental del agua sobre la base de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y las disposiciones y programas para su implementación establecidos por autoridad del ambiente. También establece medidas para prevenir, controlar y remediar la contaminación del agua y los bienes asociados a esta. Asimismo, implementa actividades de vigilancia y monitoreo, sobre todo en las cuencas donde existen actividades que pongan en riesgo la calidad o cantidad del recurso.

Artículo 77° - Agotamiento de la fuente

Una fuente de agua puede ser declarada agotada por la Autoridad Nacional, previo estudio técnico. A partir de dicha declaración no se puede otorgar derechos de uso de agua adicionales, salvo extinción de alguno de los derechos de uso previamente existentes.

Artículo 78° - Zonas de veda y zonas de protección

La Autoridad Nacional puede declarar zonas de veda y zonas de protección del agua para proteger o restaurar el ecosistema y para preservar fuentes y cuerpos de agua, así como los bienes asociados al agua.

En estos casos se puede limitar o suspender de manera temporal los derechos de uso de agua. Cuando el riesgo invocado para la declaratoria señalada afecte la salud de la población, se debe contar con la opinión sustentada y favorable de la Autoridad de Salud.

Artículo 79° - Vertimiento de agua residual

La Autoridad Nacional autoriza el vertimiento del agua residual tratada a un cuerpo natural de agua continental o marina, previa opinión técnica favorable de las Autoridades Ambiental y de Salud sobre el cumplimiento de los Estándares de Calidad Ambiental del Agua (ECA-Agua) y Límites Máximos Permisibles (LMP). Queda prohibido el vertimiento directo o indirecto de agua residual sin dicha autorización.

En caso de que el vertimiento del agua residual tratada pueda afectar la calidad del cuerpo receptor, la vida acuática asociada a este o sus bienes asociados, según los estándares de calidad establecidos o estudios específicos realizados y sustentados científicamente, la Autoridad Nacional debe disponer las medidas adicionales que hagan desaparecer o disminuyan el riesgo de la calidad del agua, que puedan incluir tecnologías superiores, pudiendo inclusive suspender las autorizaciones que se hubieran otorgado al efecto. En caso de que el vertimiento afecte la salud o modo de vida de la población local, la Autoridad Nacional suspende inmediatamente las autorizaciones otorgadas.

Corresponde a la autoridad sectorial competente la autorización y el control de las descargas de agua residual a los sistemas de drenaje urbano o alcantarillado.

Artículo 80° - Autorización de vertimiento

Todo vertimiento de agua residual en una fuente natural de agua requiere de autorización de vertimiento, para cuyo efecto debe presentar el instrumento ambiental pertinente aprobado por la autoridad ambiental respectiva, el cual debe contemplar los siguientes aspectos respecto de las emisiones:

1. Someter los residuos a los necesarios tratamientos previos.
2. Comprobar que las condiciones del receptor permitan los procesos naturales de purificación.

La autorización de vertimiento se otorga por un plazo determinado y prorrogable, de acuerdo con la duración de la actividad principal en la que se usa el agua y está sujeta a la legislación en la Ley y en el Reglamento.

Artículo 81° - Evaluación de impacto ambiental

Sin perjuicio de lo establecido en la Ley N° 27446, Ley del Sistema Nacional de Evaluación del Impacto Ambiental, para la aprobación de los estudios de impacto ambiental

relacionados con el recurso hídrico se debe contar con la opinión favorable de la Autoridad Nacional.

Artículo 82° - Reutilización de agua residual

La Autoridad Nacional, a través del Consejo de Cuenca, autoriza el reúso del agua residual tratada, según el fin para el que se destine la misma, en coordinación con la autoridad sectorial competente y, cuando corresponda, con la Autoridad Ambiental Nacional.

El titular de una licencia de uso de agua está facultado para reutilizar el agua residual que genera siempre que se trate de los mismos fines para los cuales fue otorgada la licencia. Para actividades distintas, se requiere autorización.

La distribución de las aguas residuales tratadas debe considerar la oferta hídrica de la cuenca.

Artículo 83° - Prohibición de vertimiento de algunas sustancias

Está prohibido verter sustancias contaminantes y residuos de cualquier tipo en el agua y en los bienes asociados a esta, que representen riesgos significativos según los criterios de toxicidad, persistencia o bioacumulación. La Autoridad Ambiental respectiva en coordinación con la Autoridad Nacional establece los criterios y la relación de sustancias prohibidas.

Artículo 84° - Régimen de incentivos

La Autoridad Nacional, en coordinación con el Consejo de Cuenca, otorga reconocimientos e incentivos a favor de quienes desarrollen acciones de prevención de la contaminación del agua y de desastres, forestación, reforestación o de inversión en tecnología y utilización de prácticas, métodos o procesos que coadyuven a la protección del agua y la gestión integrada del agua en las cuencas.

La Autoridad Nacional, en coordinación con el Consejo de Cuenca y el Ministerio del Ambiente, promueve los mecanismos de protección de la cuenca a fin de contribuir a la conservación y protección del agua y bienes asociados, así como el diseño de los mecanismos para que los usuarios de agua participen activamente en dichas actividades.

Los titulares de derechos de uso de agua que invierten en trabajos destinados al uso eficiente, a la protección y conservación del agua y sus bienes asociados y al mantenimiento y desarrollo de la cuenca hidrográfica pueden deducir las inversiones que efectúen para tales fines de los pagos por concepto de retribución económica o tarifas de agua, de acuerdo con los criterios y porcentajes que son fijados en el Reglamento. Este beneficio no es aplicable a quienes hayan percibido otro beneficio de parte del Estado por el mismo trabajo ni cuando resulte del cumplimiento de una obligación de la normativa sectorial.

Artículo 85° - Certificación de aprovechamiento eficiente

1. El certificado de eficiencia es el instrumento mediante el cual la Autoridad Nacional certifica el aprovechamiento eficiente de los recursos hídricos por parte de los usuarios y operadores de infraestructura hidráulica.
2. La Autoridad Nacional otorga "certificados de eficiencia" a los usuarios y operadores de infraestructura hidráulica que cumplan con los parámetros de eficiencia.
3. La Autoridad Nacional otorga "certificados de creatividad, innovación e implementación para la eficiencia del uso del agua" a los usuarios y operadores de infraestructura hidráulica que diseñen, desarrollen o implementen equipos, procedimientos o tecnologías que incrementen la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos hídricos, así como la conservación de bienes naturales y el mantenimiento adecuado y oportuno de la infraestructura hidráulica.

Artículo 86° - Incentivos institucionales

Para promover el aprovechamiento eficiente y la conservación de los recursos hídricos, la Autoridad Nacional puede organizar concursos de mejores prácticas, realizar pasantías, otorgar premios, difundir experiencias exitosas y promover el uso de equipos y tecnologías innovadoras.

Pueden ser beneficiarios de los incentivos mencionados en el primer párrafo los usuarios y operadores de infraestructura hidráulica, que cuenten con uno de los certificados señalados en el artículo 85°.

El Reglamento establece los requisitos, procedimientos y criterios para la obtención de los incentivos.

Artículo 87°.- Aguas desalinizadas

El recurso hídrico que se obtenga por desalinización puede ser utilizado por el titular en beneficio propio o para otorgarlo a terceros, y le es aplicable lo establecido en el artículo 119° en lo referente al otorgamiento del derecho de uso.

Artículo 88°.- Currícula educativa

La Autoridad Nacional promueve la inclusión en el plan de estudios regular del Sector Educación de asignaturas respecto a la cultura y valoración de los recursos hídricos, su aprovechamiento eficiente así como su conservación e incremento.

Artículo 89°.- Prevención ante efectos de cambio climático

La Autoridad Nacional, en coordinación con la Autoridad del Ambiente, debe desarrollar estrategias y planes para la prevención y adaptación a los efectos del cambio climático y sus efectos sobre la cantidad de agua y variaciones climáticas de orden local, regional y nacional.

Asimismo, realiza el análisis de vulnerabilidad del recurso hídrico, glaciares, lagunas y flujo hídrico frente a este fenómeno.

TÍTULO VI

RÉGIMEN ECONÓMICO POR EL USO DEL AGUA

Artículo 90°.- Retribuciones económicas y tarifas
Los planes de los derechos de uso de agua están obligados a garantizar el uso sostenible y eficiente del recurso mediante el pago de lo siguiente:

1. Retribución económica por el uso del agua;
2. Retribución económica por el vertimiento de uso de agua residual;
3. Tarifa por el servicio de distribución del agua en los usos sectoriales;
4. Tarifa por la utilización de la infraestructura hidráulica mayor y menor; y
5. Tarifa por monitoreo y gestión de uso de aguas subterráneas.

El Reglamento establece la oportunidad y periodicidad de las retribuciones económicas, las cuales constituyen recursos económicos de la Autoridad Nacional.

Los impuestos por los diferentes usos del agua se administran por la Autoridad Nacional de Aguas y se distribuyen de acuerdo con el Reglamento, respetando los porcentajes y derechos señalados en esta Ley.

Artículo 91°.- Retribución por el uso de agua

La retribución económica por el uso del agua es el pago que en forma obligatoria deben abonar al Estado todos los usuarios de agua como contraprestación por el uso del recurso sea cual fuere su origen. Se fija por metro cúbico de agua utilizada cualquiera sea la forma del derecho de uso otorgado y es establecida por la Autoridad Nacional en función de criterios sociales, ambientales y económicos.

Artículo 92°.- Retribución económica por el vertimiento de agua residual

La retribución por el vertimiento de agua residual es el pago que el titular del derecho efectúa por verter agua residual en un cuerpo de agua receptor. Este pago debe realizarse en función de la calidad y volumen del vertimiento y no sustituye el cumplimiento de lo dispuesto en la Ley y en otras normas referidas a la protección y conservación del agua.

Artículo 93°.- Tarifa por la utilización de infraestructura hidráulica mayor y menor

La tarifa por la utilización de infraestructura hidráulica mayor y menor es el pago que el titular del derecho efectúa a la entidad pública a cargo de la infraestructura o la entidad que lo realice por delegación expresa de la primera por concepto de operación, mantenimiento, reposición, administración y la recuperación de la inversión pública aprobada conforme a ley.

Artículo 94°.- Tarifa por el servicio de monitoreo y gestión de las aguas subterráneas

La tarifa por el servicio de monitoreo y gestión de las aguas subterráneas es el pago que hacen los usuarios de aguas subterráneas con fines productivos y cuyos fondos se destinan a monitorear el uso de esta agua y el nivel freático, así como para gestionar el uso de esta agua para hacer sostenible su disponibilidad.

Artículo 95°.- Criterios de autosostenibilidad

1. El valor de las retribuciones económicas se fija bajo criterios que permitan lo siguiente:
 - a. Cubrir los costos de la gestión integrada del agua a cargo de la Autoridad Nacional, el Consejo de Cuenca, incluyendo los vinculados con el manejo del correspondiente sistema de información; y
 - b. Cubrir los costos de recuperación o remediación del recurso y los daños ambientales que cause el vertimiento.
2. Los valores de las tarifas se fijan bajo criterios que permitan lo siguiente:
 - a. Cubrir los costos de operación, mantenimiento, rehabilitación, mejoramiento y reposición de la infraestructura existente y el desarrollo de nueva infraestructura;
 - b. Mejorar la situación socioeconómica de la cuenca hidrográfica; y
 - c. Establecer su monto según rentabilidad de la actividad económica.

Artículo 96°.- Del financiamiento y cofinanciamiento

El Estado, a través de sus entidades públicas en los diferentes niveles de gobierno, prioriza el financiamiento o cofinanciamiento de estudios y la ejecución, rehabilitación y equipamiento de obras de infraestructura hidráulica que tengan por objeto lograr la reducción de pérdidas volumétricas de agua, el aprovechamiento eficiente y la conservación de los recursos hídricos en la infraestructura hidráulica pública.

Pueden beneficiarse con financiamiento o cofinanciamiento establecido en el primer párrafo los usuarios y los operadores de infraestructura hidráulica que cuenten con un certificado de eficiencia o certificado de creatividad, innovación e implementación para la eficiencia del uso del agua.

Los requisitos, procedimiento y criterios para la selección de los proyectos se establecen en el Reglamento.

TÍTULO VII

PLANIFICACIÓN DE LA GESTIÓN DEL AGUA

Artículo 97°.- Objetivo de la planificación de la gestión del agua

La planificación de la gestión del agua tiene por objetivo equilibrar y armonizar la oferta y demanda de agua, protegiendo su cantidad y calidad, propiciando su utilización eficiente y contribuyendo con el desarrollo local, regional y nacional.

Artículo 98°.- Demarcación de las cuencas hidrográficas

La Autoridad Nacional aprueba la demarcación territorial de las cuencas hidrográficas.

Artículo 99°.- Instrumentos de planificación del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos

Son instrumentos de planificación del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos los siguientes:

- a. La Política Nacional Ambiental;
- b. La Política y Estrategia Nacional de Recursos Hídricos;
- c. El Plan Nacional de los Recursos Hídricos; y
- d. Los Planes de Gestión de Recursos Hídricos en las Cuencas.

La elaboración, implementación y trámite de aprobación son de responsabilidad de la Autoridad Nacional y el Consejo de Cuenca, detallados en el Reglamento.

Artículo 100.- Plan Nacional de los Recursos Hídricos

El Plan Nacional de los Recursos Hídricos contiene la programación de proyectos y actividades estableciendo sus costos, fuentes de financiamiento, criterios de recuperación de inversiones, entidades responsables y otra información relevante relacionada con la política nacional de gestión de los recursos hídricos.

El Plan Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos es aprobado por decreto supremo a propuesta del Consejo Directivo de la Autoridad Nacional.

Artículo 101.- Plan de adecuación para el aprovechamiento eficiente de recursos hídricos

Los usuarios y operadores de infraestructura hidráulica que no cumplan los parámetros de eficiencia establecidos por la Autoridad Nacional deben presentar un plan de adecuación para el aprovechamiento eficiente de recursos hídricos, a fin de reducir sus consumos anuales hasta cumplir, en un periodo no mayor de cinco (5) años, con los parámetros de eficiencia.

El plan de adecuación debe contener, como mínimo, las metas anuales de reducción de pérdidas volumétricas de agua, los procesos que se implementan para lograr dichas metas. Así como los parámetros de eficiencia, acceso al financiamiento o cofinanciamiento.

Los costos que se generen en virtud de la elaboración y ejecución del plan de adecuación para el aprovechamiento eficiente de recursos hídricos son de cargo de los usuarios y operadores de infraestructura hidráulica.

La Autoridad Nacional aprueba y supervisa la ejecución del plan de adecuación para el aprovechamiento eficiente de recursos hídricos y sanciona su incumplimiento, de conformidad con lo previsto en el Reglamento, considerando para ello la normativa establecida por el Ministerio del Ambiente en materia de su competencia.

Artículo 102.- Política y estrategia nacional de recursos hídricos

La política y estrategia nacional de recursos hídricos está conformada por el conjunto de principios, lineamientos, estrategias e instrumentos de carácter público, que definen y orientan el accionar de las entidades del sector público y privado para garantizar la atención de la demanda y el mejor uso del agua del país en el corto, mediano y largo plazo, en el marco de la política nacional ambiental.

La política y estrategia nacional de recursos hídricos es aprobada por decreto supremo a propuesta del Consejo Directivo de la Autoridad Nacional.

**TÍTULO VIII
INFRAESTRUCTURA HIDRAULICA**

Artículo 103.- Reserva de recursos hídricos

La reserva de recursos hídricos es un derecho especial intransferible que se otorga por resolución de la Autoridad Nacional para el desarrollo de proyectos, que reserva un volumen de agua para su uso consuntivo o no consuntivo, en el marco del plan de gestión de recursos hídricos de la cuenca.

Se otorga por el periodo de elaboración de estudios y ejecución del proyecto separadamente y no faculta al uso del agua. La solicitud de prórroga puede aprobarse por causas debidamente justificadas.

Los requisitos para solicitar la reserva de agua son establecidos en el Reglamento y deben incluir la capacidad técnica y financiera del solicitante.

Este derecho puede ser revocado por el incumplimiento injustificado del cronograma de elaboración de estudios y ejecución del proyecto y por lo dispuesto en el Título IV de la Ley, en lo que corresponda.

Artículo 104.- Aprobación de obras de infraestructura hidráulica

La Autoridad Nacional, en concordancia con el Consejo de Cuenca, aprueba la ejecución de obras de infraestructura pública o privada que se proyecten en los cauces y cuencos de agua naturales y artificiales, así como en los bienes asociados al agua correspondiente. En el caso de grandes obras hidráulicas y de trasvase entre cuencas, la Autoridad Nacional aprueba su ejecución. La aprobación está sujeta a la presentación de la certificación ambiental de la autoridad competente, según corresponda.

Artículo 105.- Participación del sector privado en la infraestructura hidráulica

El Estado promueve la participación del sector privado en la construcción y mejoramiento de la infraestructura hidráulica, así como en la prestación de los servicios de operación y mantenimiento de la misma.

En la ejecución de proyectos de infraestructura hidráulica en tierras de las comunidades campesinas y comunidades nativas, el Estado establece el mecanismo para hacerlas partícipes de los beneficios una vez que opere el proyecto.

Artículo 106.- Seguridad de la Infraestructura Hidráulica Mayor

La Autoridad Nacional, en materia de seguridad de la Infraestructura Hidráulica Mayor, tiene a cargo las siguientes funciones:

1. Coordina con el Consejo de Cuenca los planes de prevención y atención de desastres de la infraestructura hidráulica;
2. elabora, controla y supervisa la aplicación de las normas de seguridad de las grandes presas públicas y privadas; y
3. elabora y controla la aplicación de las normas de seguridad para los demás componentes del sistema hidráulico público.

Artículo 107.- Derechos de uso de agua de las comunidades campesinas y comunidades nativas

Los derechos de uso de agua inherentes a las comunidades campesinas y comunidades nativas, cuando se llevan a cabo proyectos de infraestructura hidráulica, no deben ser afectados, de conformidad con lo establecido en el artículo 64° de la Ley.

**TÍTULO IX
AGUA SUBTERRÁNEA**

Artículo 108.- Disposiciones generales

La exploración y el uso del agua subterránea están sujetos a las disposiciones del presente Título y las demás que les sean aplicables.

El uso del agua subterránea se efectúa respetando el principio de sostenibilidad del agua de la cuenca.

Artículo 109.- Exploración del agua subterránea

Toda exploración del agua subterránea que implique perforaciones requiere de la autorización previa de la Autoridad Nacional y, cuando corresponda, de los propietarios del área a explorar, debiéndose tomar en cuenta la explotación sostenible del acuífero.

Artículo 110.- Otorgamiento del derecho de uso del agua subterránea

El otorgamiento del derecho de uso de un determinado volumen de agua subterránea está sujeto a las condiciones establecidas en el Título IV y, cuando corresponda, al respectivo instrumento de gestión ambiental que establece la legislación vigente. En el caso de cese temporal o permanente del uso, los titulares de estos derechos están obligados, bajo responsabilidad, a tomar las medidas de seguridad necesarias que eviten daños a terceros.

Adicionalmente, los usuarios de agua subterránea deben instalar y mantener piezómetros en cantidad y separación determinados por la autoridad respectiva, donde registren la variación mensual de los niveles freáticos, información que deben comunicar a la Autoridad Nacional.

Artículo 111.- Obligación de informar

Todo aquel que, con ocasión de efectuar estudios, exploraciones, explotaciones o cualquier obra, descubriese agua está obligado a informar a la Autoridad Nacional, proporcionando la información técnica que disponga. En estos casos no se puede usar el agua sin permiso, autorización o licencia.

Asimismo, debe mantener actualizado un inventario de pozos y otras fuentes de agua subterránea.

Artículo 112.- Uso conjunto de agua superficial y agua subterránea

La Autoridad Nacional promueve la constitución de bloques de uso del agua subterránea que tenga por objeto el uso conjunto del agua superficial y subterránea, cuando así lo aconseje el mejor uso de los recursos de una misma zona, así como la recarga artificial de acuíferos.

El Estado promueve la inversión privada para el uso colectivo del agua subterránea, así como la prestación de los servicios respectivos.

Artículo 113.- Zonas de veda y zonas de restricción

La Autoridad Nacional puede declarar lo siguiente:

- Zonas de veda permanente o temporal, para exploraciones, perforaciones de pozos y otorgamiento de nuevos derechos de uso de agua subterránea en ellas. Esta declaratoria debe fundarse en estudios técnicos que confirmen que la extracción del agua del acuífero perjudica su sostenibilidad.
- Zonas de restricción a la totalidad o parte de un acuífero en caso de notorio riesgo de agotamiento. Esta declaratoria debe fundarse en estudios técnicos que confirmen que la extracción del agua del acuífero perjudica su sostenibilidad. En este caso se dispone una reducción temporal de extracción de agua subterránea en partes alicuotas entre los derechos de uso de agua subterránea que existan.

**TÍTULO X
AGUAS AMAZÓNICAS**

Artículo 114.- Aguas amazónicas

El agua amazónica, en el marco del desarrollo sostenible de la amazonía peruana, es un bien de uso público vertebrador de la biodiversidad, fauna, flora y de la vida humana en la amazonía.

Artículo 115.- La gestión integrada del agua amazónica

El agua amazónica, por su asociación con la biodiversidad y uso para la alimentación humana, requiere de herramientas que orienten la gestión integrada hacia metas de sostenibilidad de la biodiversidad, protección de ecosistemas de agua dulce, inclusión social y desarrollo local.

Artículo 116.- Objetivo de la planificación de la gestión del agua en la amazonía

La planificación de la gestión del agua en la amazonía tiene como principal objetivo proteger, preservar y recuperar las fuentes de agua (cochas, manantiales, humedales y ríos) y de sus bienes asociados (islas, barrizales y restingas), por lo que el deterioro en la calidad de dichas fuentes producido por actividades públicas o privadas es considerado falta muy grave por los daños que causa a la población, el ambiente y el desarrollo de la amazonía.

Artículo 117.- Comités de subcuenca en la amazonía

Los comités de subcuenca en la amazonía se organizan en torno a los ríos menores o grandes quebradas, conforme a la zonificación que realiza la Autoridad Nacional.

Los comités de subcuenca tienen facultad para administrar los usos del agua, otorgando prioridad al consumo humano y garantizando su protección según los principios y mandatos de la Ley. Resuelven cualquier conflicto en su interior por consenso.

Artículo 118.- Las comunidades nativas amazónicas y pueblos indígenas

Las comunidades nativas amazónicas organizan sus comités de subcuenca de acuerdo a sus usos y costumbres para toda actividad cultural, social o económica y se encargan de la protección de las cochas, humedales y restingas de selva.

La Autoridad Nacional, en concordancia con los consejos de cuenca de la amazonía, vela por que, en las aguas existentes o que discurren por las áreas habitadas por pueblos indígenas en aislamiento voluntario o contacto inicial no se otorgue ningún derecho que implique uso, disposición o vertimientos en las mianias.

**TÍTULO XI
LOS FENÓMENOS NATURALES**

Artículo 119.- Programas de control de avenidas, desastres e inundaciones

La Autoridad Nacional, conjuntamente con los Consejos de Cuenca respectivos, fomenta programas integrales de control

de avenidas, desastres naturales o artificiales y prevención de daños por inundaciones o por otros impactos del agua y sus bienes asociados, promoviendo la coordinación de acciones estructurales, institucionales y operativas necesarias.

Dentro de la planificación hidráulica se fomenta el desarrollo de proyectos de infraestructura para aprovechamientos multisectoriales en los cuales se considera el control de avenidas, la protección contra inundaciones y otras medidas preventivas.

**TÍTULO XII
LAS INFRACCIONES Y SANCIONES**

Artículo 120.- Infracción en materia de agua

Constituye infracción en materia de agua, toda acción u omisión tipificada en la presente Ley. El Reglamento establece el procedimiento para hacer efectivas las sanciones.

Constituyen infracciones las siguientes:

- Utilizar el agua sin el correspondiente derecho de uso;
- el incumplimiento de alguna de las obligaciones establecidas en el artículo 57° de la Ley;
- la ejecución o modificación de obras hidráulicas sin autorización de la Autoridad Nacional;
- afectar o impedir el ejercicio de un derecho de uso de agua;
- dañar o obstruir los cauces o cuerpos de agua y los correspondientes bienes asociados;
- ocupar o desviar los cauces de agua sin la autorización correspondiente;
- impedir las inspecciones, actividades de vigilancia y supervisión que realice la autoridad de agua competente directamente o a través de terceros;
- contaminar el agua transgrediendo los parámetros de calidad ambiental vigentes;
- realizar vertimientos sin autorización;
- arrojar residuos sólidos en cauces o cuerpos de agua naturales o artificiales;
- contaminar el agua subterránea por infiltración de elementos o sustancias en los suelos;
- dañar obras de infraestructura pública;
- contravenir cualquiera de las disposiciones previstas en la Ley o en el Reglamento.

Artículo 121.- Calificación de las infracciones

Las infracciones en materia de agua son calificadas como leves, graves y muy graves, teniendo en cuenta los siguientes criterios:

- Afectación o riesgo a la salud de la población;
- beneficios económicos obtenidos por el infractor;
- gravidad de los daños generados;
- circunstancias de la comisión de la infracción;
- impactos ambientales negativos, de acuerdo con la legislación vigente;
- reincidencia; y
- costos en que incurra el Estado para atender los daños generados.

La calificación e imposición de sanciones en primera instancia corresponde a la Autoridad Administrativa del Agua.

Artículo 122.- Tipos de sanciones

Concluido el procedimiento sancionador, la autoridad de aguas competente puede imponer, según la gravedad de la infracción cometida y las correspondientes escalas que se fijan en el Reglamento, las siguientes sanciones administrativas:

- Trabajo comunitario en la cuenca en materia de agua o
- multa no menor de cero coma cinco (0.5) Unidades Impositivas Tributarias (UIT) ni mayor de diez mil (10 000) UIT.

Artículo 123.- Medidas complementarias

Sin perjuicio de la sanción a que se refiere el artículo 122°, la autoridad de aguas respectiva puede imponer a los infractores, de ser necesario con el apoyo de la fuerza pública, las siguientes medidas complementarias:

- Acciones orientadas a restaurar la situación al estado anterior a la infracción o pagar los costos que demande su reposición;

- 2. decomiso de los bienes utilizados para cometer la infracción;
- 3. disponer el retiro, demolición, modificación, reubicación o suspensión de las obras en los cauces o cuencos de agua y los bienes asociados a estas, que no hayan sido autorizados por la Autoridad Nacional; y
- 4. suspensión o revocación de los derechos de agua, incluyendo el cese de la utilización ilegal de este recurso, de ser el caso.

Artículo 124º.- Ejecución coactiva

Para toda deuda impaga o ejecución incumplida de una obligación de hacer o no hacer a favor del Estado en virtud de la Ley, se utiliza el procedimiento de ejecución coactiva, de acuerdo con las normas especiales vigentes.

Artículo 125º.- Responsabilidad civil y penal

Las sanciones administrativas que la Autoridad Nacional impone son independientes de la responsabilidad de naturaleza civil o penal correspondiente.

La Autoridad Nacional puede promover las acciones civiles y penales según correspondan.

**DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS
FINALES**

PRIMERA.- Seguridad de los bienes del dominio público

Declarase de preferente interés nacional la seguridad de los bienes del dominio público integrados por las fuentes naturales de agua, los bienes asociados a éstas y la infraestructura hidráulica mayor pública.

Mediante decreto supremo, el Poder Ejecutivo, a propuesta de la Autoridad Nacional, establece aquellos que requieren resguardo especial permanente.

Los Ministerios de Defensa y del Interior disponen, según corresponda, la asignación de personal necesario para los fines señalados en el segundo párrafo.

SEGUNDA.- Reconocimiento de los derechos de uso de agua

Los usuarios que no cuenten con derechos de uso de agua pero que estén usando el recurso natural de manera pacífica, pacífica y continua durante cinco (5) años o más, deben acreditar a la Autoridad Nacional el otorgamiento de su correspondiente derecho de uso de agua, para lo cual deben acreditar dicho uso de acuerdo con las condiciones establecidas en el Reglamento, siempre que no afecte el derecho de terceros. Caso contrario, deben tramitar su pedido conforme lo establece la Ley y el Reglamento como nuevo derecho de agua.

TERCERA.- Navegación, flotación, uso y actividades con agua de mar

El agua como medio de transporte marítimo, fluvial, lacustre y de flotación, así como el uso y actividad con agua de mar, se rigen por la legislación especial de la materia y de conformidad con las disposiciones de la presente Ley.

CUARTA.- Otras entidades que forman parte del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos

Forman parte del Sistema Nacional de Gestión de los Recursos Hídricos los proyectos especiales; los proyectos especiales hidráulicos e hidroenergéticos regionales, nacionales y binacionales; las autoridades ambientales competentes; las entidades prestadoras de servicios de saneamiento; el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología; y la Autoridad Marítima del Perú. Estas entidades deben articular sus acciones conforme a las normas de la presente Ley y del Reglamento.

QUINTA.- Reglamento de la Ley de Recursos Hídricos

El Poder Ejecutivo, con refrendo del Presidente del Consejo de Ministros y del Ministro de Agricultura, aprueba el Reglamento de la presente Ley, y adecua el Reglamento de Organización y Funciones de la Autoridad Nacional, en un plazo no mayor de sesenta (60) días calendario.

SEXTA.- Adscripción al Ministerio del Ambiente
La Autoridad Nacional puede adscribirse al Ministerio del Ambiente una vez culminado el proceso de implementación y operatividad de dicho Ministerio.

SÉTIMA.- Infraestructura hidráulica mayor pública
Los gobiernos regionales a los cuales se les transfiera la operación y mantenimiento de la infraestructura hidráulica mayor pública desarrollan sus actividades con estricto cumplimiento de la política y estrategia nacional de los recursos hídricos, así como del Plan Nacional de Gestión de Recursos Hídricos, y se sujetan a las normas, lineamientos, directivas y procedimientos que emita la Autoridad Nacional en el ámbito de su competencia.

OCTAVA.- Entidades prestadoras de saneamiento
Las aguas subterráneas reservadas a favor de las entidades prestadoras de saneamiento se rigen en cada caso por la ley que autoriza la reserva correspondiente.

NOVENA.- Mecanismos de promoción
Mediante el Reglamento se establecen los mecanismos de promoción de la inversión privada en infraestructura hidráulica, diferentes a los contemplados en el artículo 8º de la Ley.

DÉCIMA.- Excepción del uso del agua
Exceptuase de esta Ley el uso del agua para los fines de la defensa nacional, aprobados por la Autoridad Nacional del Agua y el Consejo de Cuenca como órgano descentralizado.

UNDÉCIMA.- Responsabilidad social
Los beneficiarios del agua, agrupados en empresas y asociaciones, en el marco de la responsabilidad social de la empresa, elaboran proyectos para el establecimiento de programas de forestación, mejora de riego, mejora de semillas y otros, a fin de mantener el equilibrio ecológico.

DÉCIMA SEGUNDA.- Programa de adecuación y manejo ambiental

Las entidades públicas y privadas que no cuenten con un Programa de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA), en el caso del vertimiento de aguas residuales, y que incumplan con lo señalado en el Título V de la Ley, deben presentar su PAMA a la Autoridad Ambiental competente, estableciendo los plazos de remediación, mitigación y control ambiental.

**DISPOSICIONES COMPLEMENTARIAS
TRANSITORIAS**

PRIMERA.- Instancias administrativas en materia de aguas

Para los procedimientos que se inician a partir de la entrada en vigencia de la presente Ley y en tanto se implementen las Autoridades Administrativas del Agua y el Tribunal Nacional de Resolución de Controversias Hídricas, las funciones de primera instancia son asumidas por las administraciones locales de agua y la segunda instancia por la Jefatura de la Autoridad Nacional.

Los procedimientos iniciados antes de la entrada en vigencia de la presente Ley se rigen por la normativa vigente a esa fecha hasta su conclusión, salvo las funciones de segunda instancia ejercidas por las autoridades autónomas de cuenca hidrográfica, las cuales son asumidas por la Autoridad Nacional.

SEGUNDA.- Disposiciones necesarias para implementación de la Ley

En tanto se apruebe el Reglamento, facilítase a la Autoridad Nacional para dictar las disposiciones que sean requeridas para la implementación de la presente Ley.

**DISPOSICIÓN COMPLEMENTARIA
DEROGATORIA**

ÚNICA.- Disposición derogatoria
Deróganse el Decreto Ley N° 17752, la tercera disposición complementaria y transitoria del Decreto Legislativo N° 1007, el Decreto Legislativo N° 1081 y el

Decreto Legislativo N° 1003, así como todas las demás disposiciones que se opongan a la presente Ley.

Comunicase al señor Presidente de la República para su promulgación.

En Lima, a los veintitrés días del mes de marzo de dos mil nueve.

JAMIER VELÁSQUEZ QUESQUÉN
Presidente del Congreso de la República

ALEJANDRO AGUINAGA RECUENCO
Primer Vicepresidente del Congreso de la República

AL SEÑOR PRESIDENTE CONSTITUCIONAL DE
LA REPÚBLICA

POR TANTO:

Mando se publique y cumpla.

Dado en la Casa de Gobierno, en Lima, a los treinta días del mes de marzo del año dos mil nueve.

ALAN GARCÍA PÉREZ
Presidente Constitucional de la República

YEHUDE SIMON MUNARO
Presidente del Consejo de Ministros

338631-1

LEY N° 29339

EL PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA

POR CUANTO:

El Congreso de la República
Ha dado la Ley siguiente:

EL CONGRESO DE LA REPÚBLICA;

Ha dado la Ley siguiente:

LEY QUE DECLARA DE NECESIDAD PÚBLICA LA EXPROPIACIÓN DE INMUEBLES NECESARIOS PARA LA EJECUCIÓN DE PROYECTOS DE INVERSIÓN DURANTE EL BIENIO 2009-2010

Artículo 1°.- Del objeto de la Ley.

Declárase de necesidad pública la expropiación de los bienes inmuebles de dominio privado adyacentes o necesarios para la ejecución de los proyectos de inversión que se realicen durante el Bienio 2009-2010 que, en la fecha de publicación de la presente Ley, se encuentren determinadas en el Decreto de Urgencia N° 047-2008 y en el Decreto de Urgencia N° 010-2009, que declara de necesidad nacional y ejecución prioritaria diversos proyectos de inversión pública en el contexto de la crisis financiera internacional.

Artículo 2°.- De los bienes materia de la expropiación

La ubicación, linderos y medidas perimétricas de las memorias descriptivas de las áreas necesarias para la ejecución de los proyectos de inversión a que se refiere el artículo 1°, así como los inmuebles que están comprendidos en el área de expropiación en cada caso, son establecidos por cada sector dentro de un plazo máximo de sesenta (60) días calendario, contados a partir de la publicación de la presente Ley. Para tal efecto, se debe cumplir con indicar las coordenadas UTM de validez universal, de conformidad con la Ley N° 27117, Ley General de Expropiaciones.

Artículo 3°.- De las razones que justifican la expropiación

La razón de la necesidad pública declarada en la presente Ley es la ejecución de la inversión a que se refieren los proyectos comprendidos en el artículo 1°, como parte de la necesaria implementación de medidas

económicas para la reactivación del aparato económico productivo.

La expropiación materia de esta Ley es indispensable para la realización de las obras de gran envergadura de servicios públicos a que se refieren los proyectos de inversión comprendidos en el Decreto de Urgencia N° 047-2008 y en el Decreto de Urgencia N° 010-2009, por lo que en tales casos es de aplicación el procedimiento regulado en el artículo 5°.

Asimismo, por mérito de la presente Ley, comprendese dentro de los alcances de lo establecido en el artículo 5° a los proyectos de inversión que, sin ser de gran envergadura, hayan sido declarados de necesidad pública en el Decreto de Urgencia N° 047-2008 y en el Decreto de Urgencia N° 010-2009.

Artículo 4°.- Del sujeto activo para el trámite de expropiación

Los ministerios a los que compete la ejecución de los proyectos de inversión objeto de la presente Ley son considerados los sujetos activos responsables de iniciar los trámites de los procesos de expropiación correspondientes, conforme a lo establecido en el artículo 5°.

Artículo 5°.- De la expropiación

El siguiente procedimiento solo es aplicable para los proyectos de inversión comprendidos en el artículo 3°:

- Autorízase al sujeto activo para que, mediante la dación de múltiples resoluciones, realice la ejecución de la expropiación de los bienes necesarios, de tal modo que dentro de un plazo de tres (3) meses, contados a partir de la finalización del plazo a que se refiere el artículo 2°, se hayan iniciado todos los procesos de expropiación requeridos.
- El sujeto activo debe indemnizar al sujeto pasivo de la expropiación con un monto adicional al justiprecio, equivalente a los intereses correspondientes a los meses en que se retrase la expedición de la resolución para la ejecución de la expropiación. Para tal efecto, el retraso se computa a partir del quinto día de emitida la resolución a que se refiere el artículo 2°. La tasa de interés es la Tasa Activa en Moneda Nacional (TAN).
- Si, al vencimiento del plazo de tres (3) meses a que se refiere el inciso a) del presente artículo, el sujeto activo no dicta las resoluciones correspondientes a algún inmueble comprendido en el área señalada en la resolución provisional, su propietario puede exigir, adicionalmente a lo establecido en el inciso b), el pago de un monto equivalente al diez por ciento (10%) del valor comercial del inmueble.

Artículo 6°.- Del pago de la indemnización justipreciada

El pago de la indemnización justipreciada que se establece como consecuencia del título directo, de los procesos judiciales o arbitrales correspondientes es asumido por los ministerios a cargo de la ejecución del proyecto de inversión a que se refiere la presente Ley, con cargo a los recursos de la Reserva de Contingencia del Pliego Ministerio de Economía y Finanzas.

Es de aplicación el artículo 3° de la Ley N° 27628, Ley que Facilita la Ejecución de Obras Públicas Viales, para el caso del trato directo.

Artículo 7°.- De la posesión provisoria

Comprendese dentro de los alcances de lo establecido en el artículo 24° de la Ley N° 27117, Ley General de Expropiaciones, los proyectos de inversión que, sin ser de gran envergadura, hayan sido declarados de necesidad pública en el Decreto de Urgencia N° 047-2008 y en el Decreto de Urgencia N° 010-2009.

Artículo 8°.- De la reubicación de asentamientos humanos

Facúltase a los ministerios a cargo de la ejecución de los proyectos de inversión a que se refiere la presente Ley para que, a través del Organismo de Formalización de la Propiedad Informal (Cofapi) en coordinación con la Superintendencia Nacional de Bienes Estatales (SBN) y los gobiernos regionales donde se lleven a cabo dichos proyectos, efectúen un programa de reubicación de los asentamientos humanos ubicados en las áreas indicadas en las memorias descriptivas referidas en el artículo 2°.

ANEXO B

**NORMA TÉCNICA
PERUANA**

**NTP 339.088
2006**

Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - INDECOPI
Calle de La Prosa 138, San Borja (Lima 41) Apartado 145

Lima, Perú

**HORMIGÓN (CONCRETO). Agua de mezcla utilizada
en la producción de concreto de cemento Portland.
Requisitos**

CONCRETE. Mixing water used in the production of Portland cement concrete. Requirements

2006-02-16
2ª Edición

R.0013-2006/INDECOPI-CRT. Publicada el 2006-03-06

Precio basado en 13 páginas

I.C.S.: 91.100.30

ESTA NORMA ES RECOMENDABLE

Descriptor: Agua combinada, densidad, aditivos estabilizantes de hidratación, agua de mezcla, agua reciclada

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE	i
PREFACIO	ii
1. OBJETO	1
2. REFERENCIAS NORMATIVAS	1
3. CAMPO DE APLICACIÓN	3
4. DEFINICIONES	3
5. REQUISITOS PARA EL USO	4
6. REQUISITOS Y ENSAYOS	5
7. ANTECEDENTE	8
ANEXOS	
ANEXO A	10
ANEXO B	11
ANEXO C	12
ANEXO D	13

PREFACIO

A. RESEÑA HISTÓRICA

A.1 La presente Norma Técnica Peruana ha sido elaborada por el Comité Técnico de Normalización de Agregados, Hormigón (Concreto), Hormigón Armado y Hormigón Pretensado, mediante el Sistema 2 u Ordinario, durante el mes de marzo del 2005, utilizando como antecedente la ASTM 1602/C 1602M-2004 Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete.

A.2 El Comité Técnico de Normalización de Agregados, Hormigón (Concreto), Hormigón Armado y Hormigón Pretensado, presentó a la Comisión de Reglamentos Técnicos y Comerciales - CRT -, con fecha 2005-10-26, el PNTP 339.088:2005, para su revisión y aprobación, siendo sometido a la etapa de Discusión Pública el 2005-12-12. No habiéndose presentado observaciones fue oficializado como Norma Técnica Peruana NTP 339.088:2006 HORMIGÓN (CONCRETO). Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland. Requisitos, 2ª Edición, el 06 de marzo de 2006.

A.3 Esta Norma Técnica Peruana reemplaza a la NTP 339.088:1982 y tomó en su totalidad a la ASTM 1602/C 1602M-2004. Esta Norma Técnica Peruana presenta cambios editoriales referidos principalmente a terminología empleada propia del idioma español y ha sido estructurada de acuerdo a las Guías Peruanas GP 001:1995 y GP 002:1995.

B. INSTITUCIONES QUE PARTICIPARON EN LA ELABORACIÓN DE LA NORMA TÉCNICA PERUANA

Secretaría	Asociación de Productores de Cemento -ASOCEM-
Presidente	Manuel Gonzáles de la Cotera Schreimüller
Secretaría	Vanna Guffanti Parra
ENTIDAD	REPRESENTANTE
Aceros Arequipa S.A.	Victor Granados

Cementos Pacasmayo S.A.A.	Rosaura Vásquez Carlos Tapia
Duracreto S.A	Manuel Tami Puell Manuel Tami Olivares
Firth Industries Perú S.A.	Violeta Noriega Juan Harman Canalle
Mixercon S.A.	Eduardo Miyashiro
Premix S.A.	Carlos Forero
Química Suiza S.A.	Milan Pejnovic
Unicon	Enrique Pasquel José Alvarez
Consultor	Juan Avalo
Ministerio de Transportes y Comunicaciones Oficina de Apoyo Tecnológico	Mario Gamarra
Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento - MVCS	Carlos Carbajal
ARPL Tecnología Industrial S.A.	Wilfredo Quintana
Asociación de Productores de Cemento ASOCEM	Manuel Gonzáles de la Cotera
Colegio de Ingenieros del Perú - Capítulo de Civiles	Ana Biondi
Pontificia Universidad Católica del Perú	Julia Mendoza
Universidad Nacional de Ingeniería	Ana Torre Rafael Cachay
Universidad Ricardo Palma	Enriqueta Pereyra Liliana Chavarra

—oooOooo—

HORMIGÓN (CONCRETO). Agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland. Requisitos

1. OBJETO

Esta Norma Técnica Peruana establece los requisitos de composición y performance para el agua utilizada como agua de mezcla en la producción del concreto de cemento Portland. Esta Norma Técnica Peruana define las fuentes de agua y estipula los requisitos y las frecuencias de ensayo para la calificación de las fuentes de agua inminerales o combinadas. En los casos donde los requisitos del comprador difieran de los establecidos en esta especificación, regirá la especificación del comprador bajo su responsabilidad.

Esta Norma Técnica Peruana no tiene como propósito abarcar los métodos de almacenamiento, transporte, o mezcla del agua; ni dirigir el desarrollo y mantenimiento de los programas de control de calidad propuestos o dirigidos por el productor.

El texto de esta especificación, referencias, notas y notas al pie de página proporcionan material explicatorio. Estas notas y notas al pie de página (excluyendo las de las tablas y figuras) no deberán ser consideradas como requisitos de esta NTP.

Esta NTP no tiene como propósito lo que concierne a la seguridad, asociada con su uso. Es responsabilidad del usuario de esta NTP establecer las medidas de seguridad y salud apropiadas y determinar la aplicabilidad de las limitaciones regulatorias previas a su uso.

2. REFERENCIAS NORMATIVAS

Las siguientes normas contienen disposiciones que al ser citadas en este texto, constituyen requisitos de esta Norma Técnica Peruana. Las ediciones indicadas estaban en vigencia en el momento de esta publicación. Como toda Norma está sujeta a revisión, se recomienda a aquellos que realicen acuerdos en base a ellas, que analicen la conveniencia de usar las ediciones recientes de las normas citadas seguidamente. El Organismo Peruano de

Normalización posee la información de las Normas Técnicas Peruanas en vigencia en todo momento.

2.1 Normas Técnicas Peruanas

- | | | |
|-------|------------------|---|
| 2.1.1 | NTP 339.033:1999 | HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para la elaboración y curado de probetas cilíndricas de concreto en obra |
| 2.1.2 | NTP 339.034:1999 | HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para el esfuerzo a la compresión de muestras cilíndricas de concreto |
| 2.1.3 | NTP 339.082:2001 | HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para la determinación del tiempo de fraguado de mezclas por medio de su resistencia a la penetración |
| 2.1.4 | NTP 339.114:1999 | HORMIGÓN (CONCRETO). Concreto premezclado |
| 2.1.5 | NTP 339.183:2003 | HORMIGÓN (CONCRETO). Práctica normalizada para la elaboración y curado de especímenes de hormigón (concreto) en el laboratorio |
| 2.1.6 | NTP 339.074:1982 | HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para determinar el contenido de sulfatos en las aguas usadas en la elaboración de hormigones y morteros |

- 2.1.7 NTP 339.076:1982 HORMIGÓN (CONCRETO). Método de ensayo para determinar el contenido de cloruros en las aguas usadas en la elaboración de hormigones y morteros
- 2.1.8 PNTP 339.047:2005 HORMIGÓN (CONCRETO). Definiciones y terminología relativas al hormigón
- 2.2 Normas Técnicas de Asociación
- 2.2.1 ASTM C 114:2005 Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement
- 2.2.2 ASTM C 1603:2005 Standard Test Method for Measurement of Solids in Water
- 2.3 Otros documentos
- ACI 318-2005 Building code requirements for structural concrete and commentary

3. CAMPO DE APLICACIÓN

Esta Norma Técnica Peruana se aplica al agua de mezcla utilizada en la producción de concreto de cemento Portland.

4. DEFINICIONES

Para los propósitos de esta Norma Técnica Peruana se aplican las siguientes definiciones, además de las contenidas en el PNTP 339.047.

4.1 **agua combinada:** Mezcla de dos o más fuentes de agua combinadas a la vez, antes o durante su introducción en la mezcla, para utilizarla como agua de mezcla en la producción de concreto.

4.2 **aditivos estabilizantes de la hidratación:** Aditivos retardadores de fraguado prolongado que controlan la hidratación del cemento en aplicaciones de concreto.

4.3 **agua no potable:** Fuentes de agua que no son aptas para el consumo humano, o si esta contiene cantidades de sustancias que la decoloran o hacen que huelga o tenga un sabor objetable pero no contiene agua de las operaciones de producción de concreto.

4.4 **agua potable:** Agua que es apta para el consumo humano.

4.5 **agua de las operaciones de producción de concreto:** Agua recuperada de los procesos de producción de concreto de cemento Portland que incluye el agua de lavado del camión mezclador (mixer) o la que fue parte de una mezcla de concreto; agua de lluvia colectada en un recipiente en una planta de producción de concreto; o agua que contiene cantidades de los ingredientes del concreto.

5. REQUISITOS PARA EL USO

5.1 El agua de mezcla consistirá de:

5.1.1 Agua de la tanda (agua pesada o medida en la planta de dosificación),

5.1.2 Hielo.

5.1.3 Agua adicionada por el operador del camión mezclador,

5.1.4 Humedad libre de los agregados, y

5.1.5 Agua introducida con los aditivos cuando esta agua incrementa la relación agua/materiales cementosos por más de 0,01.

5.2 Se permitirá el uso de agua potable como agua de mezcla en el concreto sin ensayarla para evaluar su conformidad con los requisitos de esta NTP.

5.3 Se permitirá que el agua de mezcla que está compuesta total o parcialmente de fuentes de agua que no son potables o son provenientes de las operaciones de producción de concreto, sea utilizada en algunas proporciones para alcanzar los límites calificados y cumplir los requisitos de la Tabla 1. A opción del comprador y cuando sea apropiado para la construcción, serán especificados algunos de los límites opcionales encontrados en la Tabla 2, al momento de solicitar el concreto en conformidad con la NTP 339.114.

5.3.1 Las fuentes de agua no potable serán calificadas para su uso en conformidad con el apartado 6.1. Cuando la fuente de agua no potable es mezclada con una fuente potable, la calificación del agua de mezcla deberá ser al más alto porcentaje de la fuente no potable en el agua de mezcla combinada prevista durante la producción.

5.3.2 El agua combinada mezclada de dos o más fuentes, donde una de las fuentes incluye la que proviene de la producción de concreto, será calificada para su uso en conformidad con el apartado 6.2. El agua combinada será calificada al más alto contenido de sólidos en el agua de mezcla total prevista durante la producción. Se permitirá que el agua de mezcla contenga igual o menos sólidos totales que el nivel calificado por el ensayo.

6. REQUISITOS Y ENSAYOS

6.1 Para fuentes de agua de mezcla no potable (como está definido en el apartado 4.3) propuestas para su uso como agua de mezcla total o en el agua de mezcla combinada (como está definido en el apartado 4.1), se aplicará lo siguiente al agua de mezcla combinada total:

6.1.1 El agua será ensayada en conformidad con la Tabla 1 antes del primer uso y a partir de entonces cada tres meses o con mayor frecuencia cuando haya razón para creer

que ha ocurrido un cambio en las características de la fuente. Cuando los resultados de cuatro ensayos consecutivos indican conformidad con la Tabla 1, se permitirá ensayar con una frecuencia menor, pero no menor que anualmente.

6.1.2 El productor mantendrá evidencia documentada de que las características del agua de mezcla combinada están en conformidad con la Tabla 2. Estos ensayos deberán ser llevados a cabo antes del primer uso y a partir de entonces cada seis meses o con mayor frecuencia cuando haya razón para creer que ha ocurrido un cambio en las características de la fuente. Estos registros serán proporcionados a solicitud del comprador.

6.2 Para fuentes de agua de las operaciones de producción de concreto (como está definido en el apartado 4.3) propuestas para su uso como agua de mezcla total o en el agua de mezcla combinada (como está definido en el apartado 4.1), se aplicará lo siguiente al agua de mezcla combinada total:

6.2.1 La densidad de la fuente de agua del concreto premezclado será ensayada por lo menos diariamente en conformidad con la norma ASTM C 1603 o monitoreada con un hidrómetro que ha sido verificado en conformidad con la norma ASTM C 1603. Los productores que utilicen dispositivos automatizados deberán mantener en la planta de producción la documentación de los procedimientos y la calibración de los sistemas, según sea necesario (Véase Nota 1).

NOTA 1: Para alcanzar un contenido de sólidos específico, las proporciones de mezcla de las fuentes de agua pueden ser determinadas en conformidad con el Anexo de la norma ASTM C 1603.

6.2.2 El agua combinada será ensayada en conformidad con los requisitos de la Tabla 1 al más alto contenido de sólidos previsto para ser utilizada durante la producción en conformidad con las siguientes frecuencias de ensayo:

6.2.2.1 Cuando la densidad del agua combinada es menor que 1.01 g/ml., el agua deberá ser ensayada antes del primer uso y a partir de entonces cada seis meses. Se permitirá reducir la frecuencia de ensayo una vez cada doce meses cuando los resultados de dos ensayos consecutivos indican conformidad con los requisitos de la Tabla 1 (Véase Nota 2).

NOTA 2: Esta condición tiene la intención de abarcar el uso de agua de lavado clarificada que ha sido pasada a través de un sistema de pozas de decantación.

6.2.2.2 Cuando la densidad del agua combinada está entre 1,01 y 1,03, el agua será ensayada antes del primer uso y a partir de entonces mensualmente. Se permitirá que la frecuencia de ensayo sea reducida una vez cada tres meses cuando los resultados de cuatro ensayos consecutivos indican conformidad con los requisitos de la Tabla 1 (Véase Nota 3).

NOTA 3: La densidad del agua de aproximadamente 1,03 representa un contenido de sólidos totales de 50 000 ppm.

6.2.2.3 Cuando la densidad del agua combinada excede a 1,03, el agua será ensayada semanalmente o con mayor frecuencia cuando haya razón para creer que ha ocurrido un cambio en las características del agua para su conformidad con los requisitos de la Tabla 1. Se permitirá que la frecuencia de ensayo sea reducida una vez cada mes cuando los resultados de dos meses de ensayos consecutivos indican conformidad con los requisitos de la Tabla 1.

6.2.2.4 Los ensayos para el agua con densidad mayor a 1,05 deberán ser los mismos a los indicados en el apartado 6.2.2.3, sea que el agua incluya o no aditivos estabilizadores de hidratación (Véase Nota 4).

NOTA 4: La densidad del agua que excede aproximadamente a 1,05, donde los sólidos están esencialmente compuestos de materiales cementosos, podría requerir el uso de aditivos estabilizadores de hidratación para mantener su conformidad con los requisitos de la Tabla 1. El productor debería tener un proceso documentado en el lugar para verificar la actividad de los aditivos y las dosis empleadas.

6.2.5 El productor mantendrá documentación de las características del agua en conformidad con los requisitos de la Tabla 2, además del requisito de sólidos totales. Estos requisitos se aplicarán al agua combinada al más alto contenido de sólidos previstos para su uso. Estos ensayos deberán ser realizados antes del primer uso y desde entonces cada seis meses. Estos registros serán proporcionados a solicitud del comprador (Véase Nota 5).

6.3 Los ensayos del concreto para verificar su conformidad con los requisitos de la Tabla 1 serán realizados en muestras de concreto obtenidas de las tandas de producción o en tandas de laboratorio en conformidad con la NTP 339.083 (Véase Nota 5).

NOTA 5: El muestreo del agua combinada total en su forma final, tanto de la planta de dosificación o de la unidad de transporte, es poco viable. Por lo tanto, para el propósito de ensayo para su conformidad con los requisitos de la Tabla 1 y Tabla 2, es aceptable muestrear, proporcionar y

combinar las fuentes individuales de agua para obtener una muestra de ensayo que sea representativa del agua de mezcla combinada real utilizada en la producción.

7. ANTECEDENTE

ASTM C 1663/C 1602M-2004 Standard specification for mixing water used in the production of hydraulic cement concrete

ANEXO A
(NORMATIVO)

TABLA 1 - Requisitos de performance del concreto para el agua de mezcla

Ensayo	Límites	Métodos de Ensayo
Resistencia a compresión, mínimo, % del control a 7 días ^A	90	NTP 339.033 NTP 339.034
Tiempo de fraguado, desviación respecto al control, horas; minutos ^A	De 1:00 más temprano a 1:30 más tarde	NTP 339.082

^A Las comparaciones estarán basadas en proporciones fijas para un diseño de mezcla de concreto representativo con abastecimiento de agua cuestionable y una mezcla de control utilizando agua 100 % potable o agua destilada (Véase Anexo C).

ANEXO B
(NORMATIVO)

TABLA 2 - Límites químicos opcionales para el agua de mezcla combinada

	Límite	Métodos de Ensayo
Concentración máxima en el agua de mezcla combinada, ppm ^a		
A. Cloruro como Cl ⁻ , ppm		
1. En concreto pretensado, tableros de puentes, o designados de otra manera.	500 ^b	NTP 339.076
2. Otros concretos reforzados en ambientes húmedos o que contengan aluminio embebido o metales diversos o con formas metálicas galvanizadas permanentes	1 000 ^b	NTP 339.076
B. Sulfatos como SO ₄ , ppm	3000	NTP 339.074
C. Alcalis como (Na ₂ O + 0,658 K ₂ O), ppm	600	ASTM C 114
D. Sólidos totales por masa, ppm	50 000	ASTM C 1603

^a ppm es la abreviación de partes por millón.

^b Cuando el productor pueda demostrar que estos límites para el agua de mezcla pueden ser excedidos, los requerimientos para el concreto del Código ACI 318 regirán. Para condiciones que permitan utilizar cloruro de calcio (CaCl₂) como aditivo acelerador, se permitirá que el comprador pueda prescindir de la limitación del cloruro.

ANEXO C (NORMATIVO)

C.1 Guía para la comparación entre dos mezclas de concreto necesaria para la conformidad con la Tabla 1

Introducción

Para cumplir con los requisitos de performance de la Tabla 1, se requiere de la comparación entre dos mezclas de concreto: una como tanda de control utilizando una fuente de agua potable, y una segunda como tanda de ensayo utilizando la(s) fuente(s) de agua propuesta(s) para su uso. Deberá aplicarse lo siguiente:

C1.1 Agua para la tanda de ensayo como está definido en el capítulo 4 con una densidad mayor que 1.01 g/mL, o similar en aproximación a la densidad como es utilizada durante la producción real.

C1.2 El agua para la tanda de ensayo como está definido en el capítulo 4 será tan próxima como sea posible a la edad actual del agua utilizada durante la producción real.

C1.3 Los aditivos incorporadores de aire y reductores de agua son permitidos en las tandas de ensayo y de control. El aditivo incorporador de aire será ajustado para producir el contenido de aire específico con una tolerancia de $\pm 1.5\%$. La dosis del aditivo reductor de agua será la misma en ambas tandas.

C1.4 Aditivos estabilizadores de hidratación están permitidos para usarlos en el agua de mezcla para la tanda de ensayo. No están permitidos otros aditivos controladores de fraguado.

C1.5 El contenido de agua de mezcla en la tanda de ensayo no será menor contenido de agua de mezcla en la tanda de control.

C1.6 Las proporciones de mezcla estarán disponibles bajo pedido.

C1.7 Para propósitos de comparación del concreto y determinar su conformidad con la Tabla 1, cada tanda estará dentro de ± 1 °C al momento de la mezcla y estará acondicionada para la duración del ensayo.

ANEXO D
(INFORMATIVO)

DI. Guía para la frecuencia de ensayo con relación a la fuente de agua utilizada en el agua de mezcla

Fuentes de Agua	Residuos de agua contribuida (g/ml)	Densidad ASTM C 1602	Frecuencia de ensayo	
			TABLA 1	TABLA 2
Potable	N/A	N/A	N/A	N/A
No Potable ^A De la producción de Camerón ^B	N/A	N/A	Cada 3 meses; después de 4 ensayos anualmente (6.1.1)	6 meses (6.1.2)
	< 1.01	Diariamente (6.2.1)	Cada 6 meses; después de 2 ensayos anualmente (6.2.2.1)	6 meses (6.2.3)
	1.01 – 1.03	Diariamente (6.2.1)	Mensualmente; después de 4 ensayos cada 3 meses (6.2.2.2)	6 meses (6.2.3)
	> 1.03	Diariamente (6.2.1)	Semanalmente; después de 5 ensayos mensualmente (6.2.2.3)	6 meses (6.2.3)

^A La frecuencia de ensayo se aplica al agua de mezcla contribuida cuando esta total o parcialmente compensa de las fuentes de agua como está definido en el Capítulo 4.
N/A: No aplicable.

ANEXO C

MEMBRANE AD OSMOSI INVERSA E NANOFILTRAZIONE
Reverse osmosis and nanofiltration membrane

LISTA PRODOTTI - Products

		Codice - Code	Descrizione - Description	Flow m3/d	Raj. %	Press. bar	Test condition
MEMBRANE	BRACKISH WATER	Super Ultra Low Pressure					
		TOTMH20370	TMH20-370	43,5	99,3	5,00	11
		TOTMH20400	TMH20-400	45,5	99,3	5,00	11
		TOTMH20430	TMH20-430	48,0	99,3	5,00	11
		Ultra Low Pressure					
		TOTMG20400	TMG20-400	39,0	99,5	7,5	12
		TOTMG20430	TMG20-430	42,0	99,5	7,5	12
		Low Pressure					
		TOTM720L400	TM720L-400	30,0	99,5	10,00	16
		High rejection					
		TOTM720370	TM720-370	32,0	99,5	15,00	13
		TOTM720400	TM720-400	36,0	99,7	15,00	13
		TOTM720430	TM720-430	39,0	99,7	15,00	13
		Low Fouling					
	TOTML20370	TML20-370	36,0	99,7	15,00	13	
	TOTML20-400	TML20-400	39,0	99,7	15,00	13	
	Low pressure						
	TOTM820L370	TM820L-370	34,0	99,70	55	14	
	TOTM820L400	TM820L-400	38,0	99,70	55	14	
	High rejection						
	TOTM820370	TM820-370	23,0	99,75	55	14	
	TOTM820400	TM820-400	25,0	99,75	55	14	
	High Boron Rejection						
	TOTM820A370	TM820A-370	21,0	99,75	55,00	15	
TOTM820A400	TM820A-400	22,5	99,75	55,00	15		
Sea Water High Pressure							
TOTM820H370	TM820H-370	21,0	99,75	55,00	14		
TOTM820H400	TM820H-400	22,5	99,75	55,00	14		
Sea Water High Pressure - High rejection for system BSC (Brine System Conversion)							
TOTM820E400	TM820E-400	28,4	99,75	55,00	14		
Ultra Pure Water							
TOSULG20P	SUL-G20P	32,0	-	0,75	5		
TOSU720P	SU-720P	32,0	-	1,50	6		
Hot Water Sanitizable Elements							
TOSULG20TS	SUL-G20TS	26,0	99,50	0,75	3		
TOSULG20FTS	SUL-G20FTS	30,0	99,50	0,75	3		
TOSU720TS	SU-720TS	26,0	99,40	1,50	1		
Nanofiltration							
TOSU620	SU-620	18,0	55,00	0,35	7		
TOSU620F	SU-620F	22,0	55,00	0,35	7		
All Cellulose Acetate Elements							
	SC Series	Information available on request					
8"	SEA WATER						
SPECIAL							

Membrane ad osmosi inversa e nanofiltrazione - Reverse osmosis and nanofiltration membrane

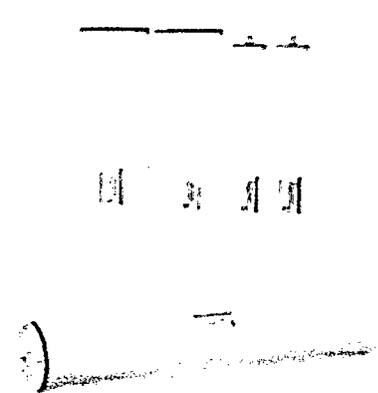
MEMBRANE AD OSMOSSI INVERSA E NANOFILTRAZIONE
Reverse osmosis and nanofiltration membrane

LISTA PRODOTTI - Products

		Modello	Dimensione	Flusso (l/min)	Pressione (bar)	Recupero (%)	Condizione
MEMBRANE 4")	BRACKISH WATER	Super Ultra Low Pressure					
		TOTMH10	TMH 10	10,5	99,30	5,00	11
		Ultra Low Pressure					
		TOTMG10	TMG10	9,10	99,50	7,50	12
	Low Pressure						
		TOTM710	TM710	9,10	99,70	15,00	13
	SEA WATER	Sea Water					
		TOTM810L	TM810L	7,00	99,70	55,00	14
		TOTM810	TM810	4,50	99,75	55,00	14
	SPECIAL	Ultra Pure Water					
		TOSULG10P	SUL-G10P	7,5	-	0,75	5
		TOSU710P	SU-710P	8,0	-	1,50	6
		Hot Water Sanitizable					
		TOSULG10TS	SUL-G10TS	5,0	99,50	0,75	1
		Nanofiltration					
	TOSU610	SU-610	4,5	55,00	0,35	7	

		Modello	Dimensione	Flusso (l/min)	Pressione (bar)	Recupero (%)	Condizione
MEMBRANE 4")	SPECIAL SIZE BRACKISH WATER	High rejection					
		TOTR704014F	TR70-4014-F	2,200	99,4	15,00	22
		TOTR704021F	TR70-4021-F	4,000	99,4	15,00	22
		Low pressure					
		TOTR704014HF	TR70-4014-HF	2,900	99,4	15,00	22
		TOTR704021HF	TR70-4021-HF	5,400	99,4	15,00	22
		Ultra Low Pressure					
		TOTRH4014	TRH-4014	2,400	99,0	7,50	23
	TOTRH4021	TRH-4021	4,700	99,0	7,50	23	

Modello	Pressione (bar)	Condizione	Flusso (l/min)	Recupero (%)	Temperatura (°C)
1	7,5 bar	NaCl 500 ppm; 80 l/min (8") / 20 l/min (4")	6,5	25°C	
3	15 bar	NaCl 1500 ppm; 80 l/min (8") / 20 l/min (4")	6,5	25°C	
5	7,5 bar	Ultra Pure Water; 12 l/min (8") / 3 l/min (4")	6,5	25°C	
6	15 bar	Ultra Pure Water; 12 l/min (8") / 3 l/min (4")	6,5	25°C	
7	3,5 bar	NaCl 500 ppm; 80 l/min (8") / 20 l/min (4")	6,5	25°C	
11	6,9 bar	NaCl 500 ppm; 15% recovery	7,0	25°C	
12	7,5 bar	NaCl 500 ppm; 15% recovery	7,0	25°C	
13	15,5 bar	NaCl 2000 ppm; 15% recovery	7,0	25°C	
14	55,2 bar	NaCl 32000 ppm; 8% recovery	7,0	25°C	
15	55,2 bar	NaCl 32000 ppm; 8% recovery	7,0	25°C	
16	10 bar	NaCl 2000 ppm; 15% recovery;	7,0	25°C	



Membrane ad osmosi inversa e nano filtrazione - Reverse osmosis and nanofiltration membrane

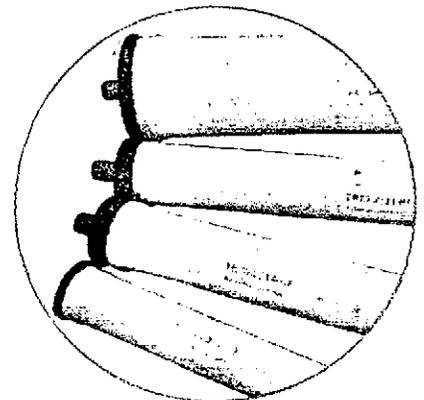
MEMBRANE AD OSMOSI INVERSA E NANOFILTRAZIONE
Reverse osmosis and nanofiltration membrane

LISTA PRODOTTI - Products

		Codice - Code	Descrizione - Description	Flow m ³ /d	Rej.	Press. bar	Test condition
MEMBRANE 2,5"	BRACKISH WATER	High rejection					
		TOTR702514F	TR70-2514-F	850	99,4	15,0	22
		TOTR702521F	TR70-2521-F	1.200	99,4	15,0	22
		TOTR702540F	TR70-2540-F	2.600	99,4	15,0	22
		Low pressure					
		TOTR702514HF	TR70-2514-HF	1.000	99,4	15,0	22
		TOTR702521HF	TR70-2521-HF	1.600	99,4	15,0	22
		TOTR702540HF	TR70-2540-HF	3.600	99,4	15,0	22
		Ultra Low Pressure					
	TOTRH2514	TRH-2514	700	99,0	7,50	23	
	TOTRH2521	TRH-2521	1.400	99,0	7,50	23	
	TOTRH2540	TRH-2540	3.200	99,0	7,50	23	
	SEA WATER	High rejection					
		TOFR802514	FR80-2514	500	99,6	55,00	24
		TOFR802521	FR80-2521	900	99,6	55,00	24
TOFR802540		FR80-2540	1.900	99,6	55,00	24	

		Codice - Code	Descrizione - Description	Flow m ³ /d	Rej.	Press. bar	Test condition
MEMBRANE 2"	TAP WATER	High rejection					
		TOTR2012035	TR-2012-35	130	98,0	4,50	21
		TOTR2012050	TR-2012-50	190	98,0	4,50	21
		TOTR2012060	TR-2012-60	230	98,0	4,50	21
		TOTR2012075	TR-2012-75	290	98,0	4,50	21
		TOTR2012110	TR-2012-110	416	96,0	4,50	21

Code	Pressure	Conductivity	Temp	Temp
21	4,5 bars	NaCl 500 ppm	7	25°C
22	15 bar	NaCl 1500 ppm	7	25°C
23	7,5 bar	NaCl 500 ppm	7	25°C
24	55 bar	NaCl 32800 ppm	7	25°C



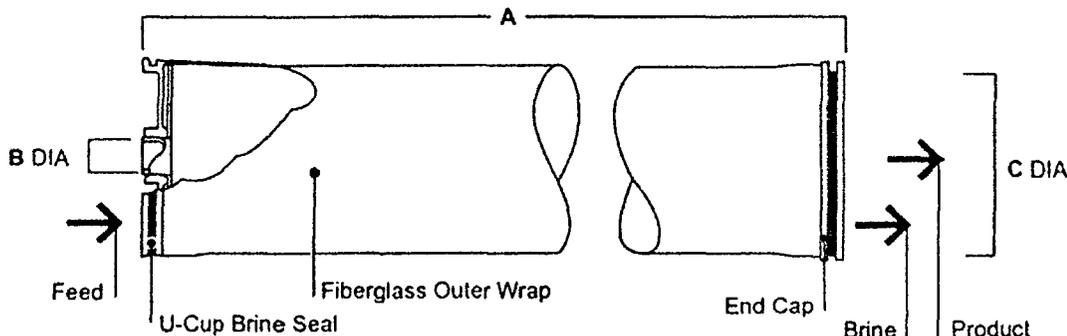
TORAY

Product	Active Surface Area	Permeate Flow Rate	Salt Rejection
	Ft ² (m ²)	gpd (m ³ /d)	%
M720-430	430(40)	11,000 (41.8)	99.5

Test Conditions:

1000 ppm NaCl , 225 PSI (1.6 mPa), 77°F (25°C), pH8.0, 15.0% Recovery
 Minimum salt rejection is 99.0%
 Minimum permeate flow is 8,700 (33.0)

Dimensions:



	A	B	C
M720-430	40 (1,016)	1.125 (29)	7.9 (201)

Operating Limits:

Membrane Type Cross Linked Fully Aromatic Polyamide Composite
 Maximum Operating Pressure 600 PSI (2.5 mPa)
 Maximum Feed Water Temperature 45°C
 Maximum Feed Water Silt Density Index SDI 4
 Free Chlorine Tolerance <.1 ppm
 Feed water pH Range, Continuous Operation 3-9
 Feed water pH Range, Chemical Cleaning 2-10

Toray Membrane America, Inc.
8-inch TM720-430 Brackish Water Elements

Operating Information:

-) For the recommended design range please consult the latest Toray technical bulletin, design guidelines, computer design program, and/or Call TMA and talk with an application specialist. If operating specifications given in this Product Information Bulletin are not strictly followed, the limited warranty will be null and void.
-) All elements are wet tested prior to shipment, storage solution is added and the elements are vacuum bagged in oxygen barrier bags. To prevent biological growth during short term storage, shipment, or system shutdown it is recommended that 'Toray' elements be immersed in a protective solution containing 1% (by weight) sodium metabisulfite (food grade) and permeate.
-) Permeate for the first hour of operation should be discarded.
-) The customer is fully responsible for the effects of chemicals, which are incompatible with the elements. Their use will void the element-limited warranty.

Toray Membranes:

Distributed By:

Applied Membranes, Inc.

2325 Cousteau Ct.
Vista, CA 92083-8346
USA

Phone: (760) 727-3711

Fax: (760) 727-4427

<http://www.AppliedMembranes.com>

Sales@AppliedMembranes.com

Notice: We accept no responsibility for results obtained by the application of this information or the safety or suitability of our products, either alone or in combination with other products. Users are advised to make their own tests to determine the safety and suitability of each product combination for their own purposes.

TORAY

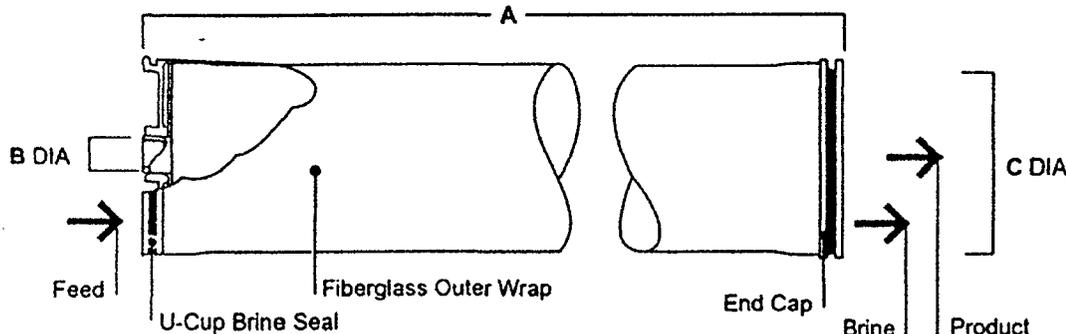
TORAY

Product	Active Surface Area	Permeate Flow Rate	Salt Rejection
	ft ² (m ²)	gpd (m ³ /d)	%
MG20-430	430(40)	9300 (35) or 13,950 (52.6)*	99.4

Test Conditions:

300 ppm NaCl, 100 PSI (5.5 mPa)/*150PSI (8.3 mPa), 77°F (25°C), pH8.0, 15.0% Recovery
 Minimum salt rejection is 99.0%
 Minimum permeate flow is 7,900 (18.5)

Dimensions:



	A	B	C
MG20-430	40 (1,016)	1.125 (29)	7.9 (201)

Operating Limits:

Membrane Type	Cross Linked Fully Aromatic Polyamide Composite
Maximum Operating Pressure	365 PSI (2.5 mPa)
Maximum Feed Water Temperature	40°C
Maximum Feed Water Silt Density Index	SDI 4
Free Chlorine Tolerance	<.1 ppm
Feed water pH Range, Continuous Operation	3-9
Feed water pH Range, Chemical Cleaning	2-10

Toray Membrane America, Inc.
8-inch TMG20-430 Low Pressure Brackish Water Elements

Operating Information:

-) For the recommended design range please consult the latest Toray technical bulletin, design guidelines, computer design program, and/or Call TMA and talk with an application specialist. If operating specifications given in this Product Information Bulletin are not strictly followed, the limited warranty will be null and void.
-) All elements are wet tested prior to shipment, storage solution is added and the elements are vacuum bagged in oxygen barrier bags. To prevent biological growth during short term storage, shipment, or system shutdown it is recommended that 'Toray' elements be immersed in a protective solution containing 1% (by weight) sodium metabisulfite (food grade) and permeate.
-) Permeate for the first hour of operation should be discarded.
-) The customer is fully responsible for the effects of chemicals, which are incompatible with the elements. Their use will void the element-limited warranty.

Toray Membranes:

Distributed By:

Applied Membranes, Inc.

2325 Cousteau Ct.
Vista, CA 92083-8346
USA

Phone: (760) 727-3711

Fax: (760) 727-4427

<http://www.AppliedMembranes.com>

Sales@AppliedMembranes.com

Notice: We accept no responsibility for results obtained by the application of this information or the safety or reliability of our products, either alone or in combination with other products. Users are advised to make their own tests to determine the safety and suitability of each product combination for their own purposes.

TORAY

ANEXO D



TEMPERATURE CORRECTION FACTOR

°F (°C)	TCF	°F (°C)	TCF
33 (0.5)	2.6711	72 (22.2)	1.0702
34 (1.1)	2.6043	73 (22.8)	1.0517
35 (1.7)	2.5395	74 (23.3)	1.0367
36 (2.2)	2.4765	75 (23.9)	1.0224
37 (2.8)	2.4154	76 (24.4)	1.0111
38 (3.3)	2.3560	77 (25.0)	1.000
39 (3.9)	2.2982	78 (25.5)	0.9891
40 (4.4)	2.2422	79 (26.1)	0.9783
41 (5.0)	2.1877	80 (26.7)	0.9677
42 (5.5)	2.1347	81 (27.2)	0.9572
43 (6.1)	2.0833	82 (27.8)	0.9469
44 (6.7)	2.0332	83 (28.3)	0.9367
45 (7.2)	1.9846	84 (28.9)	0.9267
46 (7.8)	1.9373	85 (29.4)	0.9168
47 (8.3)	1.8913	86 (30.0)	0.9071
48 (8.9)	1.8466	87 (30.5)	0.8975
49 (9.4)	1.8031	88 (31.1)	0.8880
50 (10.0)	1.7608	89 (31.7)	0.8787
51 (10.5)	1.7197	90 (32.2)	0.8695
52 (11.1)	1.6796	91 (32.8)	0.8604
53 (11.7)	1.6407	92 (33.3)	0.8515
54 (12.2)	1.6028	93 (33.9)	0.8427
55 (12.8)	1.5659	94 (34.4)	0.8340
56 (13.3)	1.5300	95 (35.0)	0.8254
57 (13.9)	1.4951	96 (35.5)	0.8170
58 (14.4)	1.4611	97 (36.1)	0.8086
59 (15.0)	1.4280	98 (36.7)	0.8004
60 (15.5)	1.3958	99 (37.2)	0.7923
61 (16.1)	1.3644	100 (37.8)	0.7843
62 (16.7)	2.3338	101 (38.3)	0.7784
63 (17.2)	1.3041	102 (38.9)	0.7686
64 (17.8)	1.2751	103 (39.4)	0.7534
65 (18.3)	1.2468	104 (40.0)	0.7459
66 (18.9)	1.2193	105 (40.5)	0.7459
67 (19.4)	1.1925	106 (41.1)	0.7385
68 (20.0)	1.1664	107 (41.7)	0.7313
69 (20.5)	1.1410	108 (42.2)	0.7241
70 (21.1)	1.1162	109 (42.8)	0.7170
71 (21.7)	1.0915	110 (43.3)	0.7100



A Temperature Correction Factor (TCF) is used to predict what a membrane element will produce at a temperature different from its specified temperature of 77°F (25°C). A TCF relates flow at a given temperature to flow at 77°F (25°C). A common use of the TCF is outlined below, it assumes 200 psig (13.7 barg) effective pressure.

Equation:

$$\text{Specified Flow @ 60°F (15.5°C)} = \frac{\text{TCF @ 60°F}}{\text{TCF (T*)}}$$

*T= temperature of water

Example:

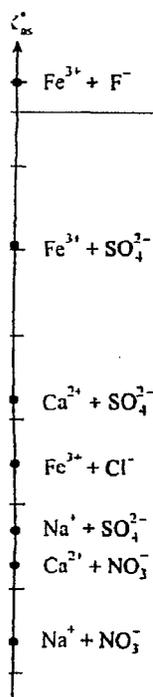
A GE Osmonics PRO 100 produces 100 gpm of product at 60°F (15.5°C). To determine what the machine will produce at 55°F, the equation above is applied. At 55°F (12.8°C), the TCF is 1.5659.

The machine will produce:

$$\frac{100 \text{ gpm} \times 1.3958 \text{ (TCF @ 60°F)}}{1.5659 \text{ (TCF @ 55°C)}} = 89 \text{ gpm}$$



ANEXO E

**A 11.4**

antes de equilibrio de
ción de iones para formar
iónicos en agua a 25 °C y
. La escala es logarítmica.

(Prob. 11.21), resulta que las constantes de equilibrio en la escala de molalidades y en la de concentraciones son casi iguales numéricamente, y las concentraciones molares y molales en el equilibrio también. Por tanto, hay poca diferencia si se emplea la escala de concentraciones molares o la de molalidad para disoluciones acuosas diluidas.

11.4**EQUILIBRIOS QUÍMICOS DE SÓLIDOS O LÍQUIDOS PUROS**

Hasta ahora en este capítulo solamente hemos tratado reacciones que transcurren en una sola fase. No obstante, muchas reacciones implican uno o más sólidos puros o líquidos puros. Un ejemplo es $\text{CaCO}_3(s) \rightleftharpoons \text{CaO}(s) + \text{CO}_2(g)$. La condición de equilibrio $\sum_i \nu_i \mu_{i,\text{eq}} = 0$ se cumple estén o no todas las especies en la misma fase. Para aplicar la relación de equilibrio $K^\circ = \prod_i (a_{i,\text{eq}})^{\nu_i}$ necesitamos una expresión para la actividad de un sólido o líquido puro. La actividad a_i satisface $\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln a_i$ [Ec. (11.2)], luego

$$RT \ln a_i = \mu_i - \mu_i^\circ \quad \text{sólido o líquido puro} \quad (11.20)$$

Al igual que en la Sección 5.1, escogemos el estado normal de un sólido o líquido puro como el estado con $P = 1 \text{ bar} \equiv P^\circ$ y T igual a la temperatura de la mezcla de reacción. Por tanto, μ_i° es función solamente de T . Para obtener $\ln a_i$ en (11.20) necesitamos conocer $\mu_i - \mu_i^\circ$. Para una sustancia pura, $\mu_i - \mu_i^\circ = \mu_i^*(T, P) - \mu_i^*(T, P^\circ)$, ya que el estado normal se encuentra a la misma temperatura que el sistema. La dependencia con la presión de μ en una sustancia pura se calcula de $d\mu = dG_m = -S_m dT + V_m dP$, por lo que $d\mu_i = V_{m,i} dP$ a T constante. Integrando desde la presión normal P° hasta una presión arbitraria P , resulta:

$$\mu_i(T, P) - \mu_i^\circ(T) = \int_{P^\circ}^P V_{m,i} dP' \quad T \text{ constante, sólido o líquido puro} \quad (11.21)$$

donde la prima ha sido añadida a la variable muda de integración para evitar el uso de P con dos significados diferentes en la misma ecuación. Sustituyendo (11.21) en (11.20), da

$$\ln a_i = \frac{1}{RT} \int_{P^\circ}^P V_{m,i} dP' \quad \text{sólido o líquido puro, } T \text{ constante} \quad (11.22)$$

donde $V_{m,i}$ es el volumen molar de i puro. Dado que los sólidos y líquidos son bastante incompresibles, es una buena aproximación tomar $V_{m,i}$ como independiente de P y sacarlo de la integral, resultando

$$\ln a_i \approx (P - P^\circ) V_{m,i} / RT \quad \text{sólido o líquido puro} \quad (11.23)$$

A la presión normal de 1 bar, la actividad de un sólido o líquido puro es 1 (dado que la sustancia se encuentra en su estado normal). G es relativamente insensible a la presión para fases condensadas (Sec. 4.5). Por lo tanto, esperamos

i , sea bastante insensible a la presión para sólidos y líquidos. Por ejemplo, uno de peso molecular 200 y densidad $2,00 \text{ g/cm}^3$ tiene un $V_{m,i} = 100 \text{ cm}^3/\text{mol}$. (11.23), encontramos que a $P = 20 \text{ bar}$ y $T = 300 \text{ K}$, $a_i = 1,08$, valor muy próximo a 1. Si P se mantiene moderado, digamos por debajo de 20 bar, podemos estimar razonablemente la actividad de la mayoría de los sólidos y líquidos a la 1. Esta aproximación no es válida para una sustancia con un V_m grande, tal como un polímero.

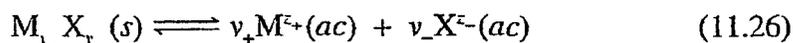
Como ejemplo, consideremos el equilibrio



La ecuación (11.6) da $K^\circ = a[\text{CaO}(s)]a[\text{CO}_2(g)]/a[\text{CaCO}_3(s)]$. Si P no es alta, podemos tomar la actividad de cada sólido como 1 y la actividad del gas (suponiendo que se trata de un gas ideal) como $P(\text{CO}_2)/P^\circ$ [Ec. (10.96) con la fugacidad sustituida por la presión]. Por tanto,

$$K^\circ \approx a[\text{CO}_2(g)] \approx P(\text{CO}_2)/P^\circ \quad \text{donde } P^\circ \equiv 1 \text{ bar} \quad (11.25)$$

Por tanto, a una T dada, la presión del CO_2 sobre el $\text{CaCO}_3(s)$ es constante. No obstante, nótese que en el cálculo de ΔG° empleando $\Delta G^\circ = \sum_i \nu_i \mu_i^\circ$, sería un error omitir G_m para los sólidos CaCO_3 y CaO . El hecho de que a para cada sólido sea 1 significa que $\mu - \mu^\circ (= RT \ln a)$ de cada sólido es casi 0. Sin embargo, μ° para cada sólido no es cercano a cero y debe ser incluido en el cálculo de ΔG° . Considere ahora el equilibrio entre una sal sólida $\text{M}_{\nu_+}\text{X}_{\nu_-}$ y una disolución saturada de la sal. La reacción es



donde z_+ y z_- son las cargas de los iones y ν_+ y ν_- son los números de iones positivos y negativos. Eligiendo la escala de molalidades para los solutos, la ecuación ante el equilibrio según (11.26) es

$$K^\circ = \frac{(a_+)^{\nu_+} (a_-)^{\nu_-}}{a[\text{M}_{\nu_+}\text{X}_{\nu_-}(s)]} = \frac{(\gamma_+ m_+/m^\circ)^{\nu_+} (\gamma_- m_-/m^\circ)^{\nu_-}}{a[\text{M}_{\nu_+}\text{X}_{\nu_-}(s)]}$$

donde a_+ , γ_+ y m_+ son la actividad, el coeficiente de actividad en la escala de molalidades y la molalidad del ion $\text{M}^{z_+}(ac)$. Si el sistema no se encuentra a una presión alta, podemos tomar $a = 1$ para la sal pura. Eliminando m° de K° y usando la definición $(\gamma_\pm)^{\nu_+ + \nu_-} \equiv (\gamma_+)^{\nu_+} (\gamma_-)^{\nu_-}$ [Ec. (10.43)], tenemos como constante de equilibrio el **producto de solubilidad** (p_s)

$$K_{ps} = (\gamma_\pm)^{\nu_+ + \nu_-} (m_+)^{\nu_+} (m_-)^{\nu_-} \quad (11.27)^*$$

La ecuación (11.27) es válida para cualquier sal, pero su principal aplicación es para sales poco solubles en agua. Para una sal altamente soluble, la fuerza iónica de la solución saturada es grande, el coeficiente de actividad iónico medio γ_\pm dista sustancialmente de 1 y no disponemos de un método adecuado para estimar γ_\pm . Además, la formación de pares iónicos puede ser importante en disoluciones saturadas de una sal.

ANEXO F

donde $\nu = \nu_+ + \nu_-$, m_i es la molalidad estequiométrica del electrólito (10.48) y M_A es la masa molar del disolvente. En (10.57), a_A es la actividad del disolvente en la escala de fracciones molares. La equivalencia de las dos formas de ϕ en (10.57) se deduce de $\mu_A = \mu_A^\dagger + RT \ln a_A$. Puesto que $a_A = P_A/P_A^\dagger$ [Ec. (10.56)], tenemos que

$$\phi = \frac{1}{M_A \nu m_i} \ln \frac{P_A^\dagger}{P_A} \quad \text{vapor ideal, } P \text{ no muy alta} \quad (10.58)$$

y ϕ puede determinarse a través de medidas de presiones de vapor. $\phi \rightarrow 1$ cuando $x_A \rightarrow 1$ (Prob. 10.33).

Reescribiendo (10.57), obtenemos la expresión del potencial químico del disolvente en función del coeficiente osmótico: $\mu_A = \mu_A^\dagger - \phi RT M_A \nu m_i$. Usando esta ecuación y (10.51) para μ_i en la ecuación de Gibbs-Duhem (10.55), se puede relacionar el coeficiente de actividad del electrólito γ_\pm con el coeficiente osmótico ϕ del disolvente. La deducción de dicha relación es similar a la de (10.22), y se deja como ejercicio (Prob. 10.33). Se obtiene:

$$\ln \gamma_\pm(m) = \phi(m) - 1 + \int_0^m \frac{\phi(m_i) - 1}{m_i} dm_i \quad \text{a } T \text{ y } P \text{ constantes} \quad (10.59)$$

Los valores de ϕ se obtienen de (10.58). Representando $(\phi - 1)/m_i$ frente a m_i y calculando el área bajo la curva, podemos evaluar la integral que aparece en (10.59) y obtener γ_\pm a la molalidad m del electrólito (véase el Problema 10.34)

La razón para usar ϕ en lugar del coeficiente de actividad del disolvente es que en disoluciones diluidas de electrólitos, el coeficiente de actividad del disolvente puede ser muy próximo a 1 a pesar de que el coeficiente de actividad del soluto se desvíe sustancialmente de 1 y el comportamiento de la disolución diste mucho del comportamiento de disolución diluida ideal. No resulta conveniente trabajar con coeficientes de actividad con valores tales como 1,0001.

Para una disolución de un solo no electrólito i , el coeficiente osmótico práctico ϕ se define por una ecuación similar a (10.57), salvo que ν no aparece. Un soluto no electrolítico puede interpretarse como un caso especial de soluto electrolítico para el cual $\nu = 1$ y $\nu_\pm = 1$; obsérvese que (10.51) con $\nu = \nu_\pm = 1$ se reduce a (10.25). Por tanto, la Ecuación (10.58) con ν igual a 1 es válida para una disolución de no electrólitos; la Ecuación (10.59), reemplazando γ_\pm por γ_i , también es válida para disoluciones de no electrólitos.

Para una disolución de no electrólitos, la teoría mecánico estadística de McMillan-Mayer para disoluciones muestra que ϕ puede ser expresado en términos de la molalidad del soluto de acuerdo con $\phi = 1 + c_1 m + c_2 m^2 + \dots$ [Pitzer (1995), pág. 250], donde los valores de c son funciones de T y P . Así pues, a altas diluciones, $\phi - 1 \propto m$ y el integrando en (10.59) permanece finito, ya que $m_i \rightarrow 0$ para un no electrólito [a diferencia del integrando en (10.22)]. Una vez que el coeficiente actividad en la escala de molalidad γ_m ha sido encontrado a partir de (10.59), γ_{II} puede ser obtenido a partir de (10.24). La forma más conveniente para evaluar la integral en (10.59) es ajustar varias series a ϕ (Prob. 10.32).

TEORÍA DE DEBYE-HÜCKEL EN DISOLUCIONES DE ELECTRÓLITOS

Debye y Hückel utilizaron un modelo muy simplificado de una disolución de electrólitos y la mecánica estadística para reducir expresiones teóricas los coeficientes de actividad iónicos en la escala de molalidades γ_+ y γ_- . En el modelo, los iones se consideran como esferas rígidas de diámetro a cargadas uniformemente. La diferencia de tamaño entre los iones positivos y negativos se

desprecia, y a se interpreta como el diámetro iónico medio. El disolvente A se considera un medio sin estructura con una constante dieléctrica $\epsilon_{r,A}$ (épsilon r , A). [Si F es la fuerza existente entre dos cargas en el vacío y F_A es la fuerza existente entre las mismas cargas situadas en el medio dieléctrico A, entonces $F_A/F = 1/\epsilon_{r,A}$; véase (14.89).]

El tratamiento de Debye-Hückel supone que la disolución es muy diluida. Esta restricción permite hacer varias simplificaciones matemáticas y aproximaciones físicas. A dilución alta, la desviación principal con respecto al comportamiento de la disolución diluida ideal se debe a las atracciones y repulsiones coulombianas de largo alcance entre los iones. Debye y Hückel supusieron que todas las desviaciones con respecto al comportamiento de la disolución diluida ideal se deben a fuerzas interiónicas coulombianas.

Un ion en disolución está rodeado por una atmósfera de moléculas de disolvente y otros iones. Por término medio, cada ion positivo tendrá más iones negativos que positivos en su vecindad inmediata. Debye y Hückel usaron la ley de distribución de Boltzmann de la mecánica estadística (Sec. 22.5) para calcular la distribución media de cargas en las proximidades de un ion.

A continuación, calcularon los coeficientes de actividad de la siguiente manera. Sea una disolución de electrólito a T y P constantes. Imaginemos que tenemos la habilidad mágica de variar las cargas de los iones en disolución. Primero reducimos las cargas de todos los iones a cero; las interacciones coulombianas entre los iones desaparecen y la disolución se convierte en diluida ideal. Después aumentamos de una forma lenta y reversible todas las cargas iónicas desde cero hasta su valor correspondiente en la disolución electrolítica. Sea w_{el} el trabajo eléctrico realizado sobre el sistema en este proceso de transporte de carga a T y P constantes. La Ecuación (4.24) muestra que para un proceso reversible a T y P constantes, $\Delta G = w_{no-P}$; en este caso, $w_{no-P} = w_{el}$. Debye y Hückel calcularon w_{el} a partir del potencial electrostático de interacción entre cada ion y la distribución de carga media en su entorno durante el proceso de transporte de carga. Dado que este proceso comienza con una disolución diluida ideal y acaba en la disolución electrolítica, ΔG es $G - G^{dil-id}$, donde G es la energía de Gibbs de la disolución y G^{dil-id} es la energía de Gibbs que tendría si fuera diluida ideal. Por tanto, $G - G^{dil-id} = w_{el}$.

G^{dil-id} se conoce a partir de $G^{dil-id} = \sum_j n_j \mu_j^{dil-id}$ y $G - G^{dil-id}$ es conocido mediante el cálculo de w_{el} . Por tanto, se conoce G de la disolución. Tomando $\partial G/\partial n_+$ y $\partial G/\partial n_-$, se obtienen los potenciales químicos μ_+ y μ_- , de tal forma que los coeficientes de actividad γ_+ y γ_- de (10.40) son conocidos. (Para una deducción completa, véanse *Bockris y Reddy*, sec. 3.3.)

El resultado final que Debye y Hückel obtienen es

$$\ln \gamma_+ = -\frac{z_+^2 A I_m^{1/2}}{1 + B a I_m^{1/2}}, \quad \ln \gamma_- = -\frac{z_-^2 A I_m^{1/2}}{1 + B a I_m^{1/2}} \quad (10.60)$$

donde A , B e I_m se definen como

$$A \equiv (2\pi N_A \rho_A)^{1/2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 \epsilon_{r,A} kT} \right)^{3/2}, \quad B \equiv e \left(\frac{2N_A \rho_A}{\epsilon_0 \epsilon_{r,A} kT} \right)^{1/2} \quad (10.61)$$

$$I_m \equiv \frac{1}{2} \sum_j z_j^2 m_j \quad (10.62)^*$$

En estas ecuaciones (escritas en unidades del SI), a es el diámetro iónico medio, γ_+ y γ_- son los coeficientes de actividad en la escala de molalidades de los iones M^{z+} y X^{z-} , respectivamente, N_A es el número de Avogadro, k es la constante de

mann [Ec. (3.57)], e es la carga del protón, ϵ_0 es la permitividad del vacío parece como una constante de proporcionalidad en la ley de Coulomb; véase ecuación 14.1), ρ_A es la densidad del disolvente, $\epsilon_{r,A}$ es la constante dieléctrica del disolvente y T es la temperatura absoluta. I_m se denomina **fuerza iónica (en la base de molalidades)**; la suma en (10.62) es sobre todos los iones en la disolución, siendo m_j la molalidad del ion j con carga z_j .

Aunque la teoría de Debye-Hückel nos da γ para cada ion, no podemos dar γ_+ o γ_- individualmente. Por tanto, expresamos el resultado obtenido en la ecuación 10.62 en términos del coeficiente de actividad iónico medio γ_{\pm} . Tomando el logaritmo de $(\gamma_{\pm})^{v_+v_-} \equiv (\gamma_+)^{v_+}(\gamma_-)^{v_-}$ [Ec. (10.43)], obtenemos

$$\ln \gamma_{\pm} = \frac{v_+ \ln \gamma_+ + v_- \ln \gamma_-}{v_+ + v_-} \quad (10.63)$$

Como que el electrólito $M_{v_+}X_{v_-}$ es eléctricamente neutro, tenemos que

$$v_+z_+ + v_-z_- = 0 \quad (10.64)$$

Al multiplicar (10.64) por z_+ se obtiene $v_+z_+^2 = -v_-z_+z_-$; si multiplicamos (10.64) por z_- , obtenemos $v_-z_-^2 = -v_+z_+z_-$. La suma de ambas ecuaciones da

$$v_+z_+^2 + v_-z_-^2 = -z_+z_-(v_+ + v_-) = z_+|z_-|(v_+ + v_-) \quad (10.65)$$

Como que z_- es negativo. Sustituyendo las ecuaciones de Debye-Hückel (10.60) y (10.63) y empleando a continuación (10.65), obtenemos

$$\ln \gamma_{\pm} = -z_+|z_-| \frac{A I_m^{1/2}}{1 + B a I_m^{1/2}} \quad (10.66)$$

Usando los valores del SI para N_A , k , e y ϵ_0 , y $\epsilon_r = 78,38$, $\rho = 997,05 \text{ kg/m}^3$ del H_2O a 25°C y 1 atm, tenemos para (10.61)

$$A = 1,1744 \text{ (kg/mol)}^{1/2}, \quad B = 3,285 \times 10^9 \text{ (kg/mol)}^{1/2} \text{ m}^{-1}$$

Usando los valores numéricos de B y A en (10.66) y dividiendo A por B para pasar a logaritmos decimales, obtenemos

$$\log_{10} \gamma_{\pm} = -0,510 z_+ |z_-| \frac{(I_m/m^\circ)^{1/2}}{1 + 0,328(a/A)(I_m/m^\circ)^{1/2}} \quad \begin{array}{l} \text{en disolución acuosa} \\ \text{diluida a } 25^\circ\text{C} \end{array} \quad (10.67)$$

donde $1 \text{ \AA} \equiv 10^{-10} \text{ m}$ y $m^\circ \equiv 1 \text{ mol/kg}$. I_m en (10.62) tiene unidades de mol/kg y el parámetro iónico a tiene dimensiones de longitud, con lo cual $\log \gamma_{\pm}$ es adimensional, como debe ser.

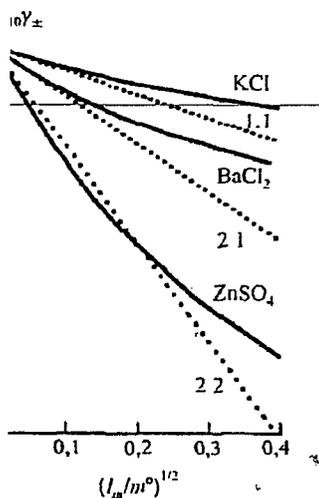
En disoluciones muy diluidas, I_m es muy pequeño, y el segundo término del denominador en (10.67) se puede despreciar frente a 1. Por tanto,

$$\ln \gamma_{\pm} = -z_+ |z_-| A I_m^{1/2} \quad \text{disolución muy diluida} \quad (10.68)$$

$$\log_{10} \gamma_{\pm} = -0,510 z_+ |z_-| (I_m/m^\circ)^{1/2} \quad \begin{array}{l} \text{disolución acuosa muy} \\ \text{diluida, a } 25^\circ\text{C} \end{array} \quad (10.69)$$

La ecuación (10.68) se conoce como la **ley límite de Debye-Hückel**, puesto que sólo es válida en el límite de dilución infinita. (Realmente, la mayoría de las leyes de actividad iónica son leyes límite.)

SECCIÓN 10.8



A 10.9

Representaciones de $\log_{10} \gamma_{\pm}$ a la raíz cuadrada de la fuerza iónica para disoluciones de electrolitos a 25 °C y

Las líneas punteadas representan las predicciones de la teoría de Debye-Hückel

)

¿Cómo funciona la teoría de Debye-Hückel? Los datos experimentales muestran que la Ecuación (10.69) proporciona el comportamiento límite correcto de disoluciones de electrolitos cuando $I_m \rightarrow 0$ (Fig. 10.9). La Ecuación (10.69) es generalmente exacta para disoluciones en las que $0,01 \text{ mol/kg} \geq I_m$. En un electrolito 2:2, esto corresponde a una molalidad $0,01/4 \approx 0,002$. (En ocasiones se ha dicho, un tanto descortésmente, que la teoría de Debye-Hückel sólo se aplica al agua destilada ligeramente contaminada.) La ecuación más completa (10.67) es razonablemente exacta en disoluciones acuosas donde $I_m \leq 0,1 \text{ mol/kg}$ si elegimos un diámetro iónico a que dé un buen ajuste a los datos experimentales. Para sales inorgánicas comunes, el valor de a está en el intervalo de 3 a 9 Å, los cuales son valores razonables para iones hidratados. A una fuerza iónica dada, la teoría funciona mejor cuanto menor es el valor de $z_+ |z_-|$; por ejemplo, para $I_m = 0,1 \text{ mol/kg}$, la teoría de Debye-Hückel es considerablemente más fiable para electrolitos 1:1 que para los 2:2. Esto se explica en parte teniendo en cuenta la asociación iónica (Sec. 10.9).

Para eliminar de (10.67) el diámetro iónico a determinado empíricamente, se observa que si $a \approx 3 \text{ Å}$, tenemos que $0,328(a/\text{Å}) \approx 1$. Por tanto, se acostumbra a simplificar (10.67) en la forma

$$\log_{10} \gamma_{\pm} = -0,510 z_+ |z_-| \frac{(I_m/m^0)^{1/2}}{1 + (I_m/m^0)^{1/2}} \quad \text{disol. acuosa diluida, 25 °C} \quad (10.70)$$

Con frecuencia, las propiedades de disoluciones de electrolitos muy diluidas no se pueden medir con la exactitud requerida. Por consiguiente, incluso aunque el intervalo de validez de la teoría de Debye-Hückel está limitado a disoluciones muy diluidas, es de gran importancia práctica, puesto que permite la extrapolación de las propiedades en la región de concentraciones muy bajas.

Conociendo los coeficientes de actividad γ_+ , γ_- y γ_{\pm} para la disolución diluida mediante la ecuación de Debye-Hückel, podemos calcular los potenciales químicos μ_+ , μ_- y μ_i [Ecs. (10.40) y (10.51)]. De estos potenciales químicos, podemos derivar leyes límite para todas las restantes propiedades termodinámicas de los iones y electrolitos, como por ejemplo \bar{V}_i , \bar{H}_i y \bar{S}_i .

La Figura 10.8 muestra que cuando la molalidad del electrolito m_i aumenta desde cero, su coeficiente de actividad γ_{\pm} primero disminuye con respecto a 1 el valor de la disolución diluida ideal y después aumenta. El hecho de que γ_{\pm} sea menor que 1 en disoluciones diluidas del electrolito significa que el potencial químico del electrolito μ_i es menor de lo que sería en una hipotética disolución diluida ideal (donde no hay interacciones soluto-soluto) de igual composición, y esto implica una menor contribución a G por parte del soluto que en la disolución diluida ideal [véanse las Ecuaciones (10.51) y (10.54)]. Cada ion en la disolución tiende a rodearse de iones de carga opuesta a la suya, y las atracciones electrostáticas entre iones de distinta carga tienden a estabilizar la disolución, disminuyendo su G .

El aumento de γ_{\pm} del electrolito a molalidades mayores puede ser debido a la hidratación de los iones. La hidratación hace que disminuya la cantidad de moléculas de agua libres, reduciendo así la concentración efectiva del agua en la disolución y aumentando la molalidad efectiva de electrolito, que se refleja en un aumento de γ_{\pm} . Por ejemplo, en el caso del NaCl, la evidencia experimental (Bockris y Reddy, sec. 2.8) muestra que el ion Na^+ arrastra aproximadamente cuatro moléculas de agua cuando se mueve a través de la disolución y el Cl^- arrastra cerca de dos moléculas de agua. Así, cada mol de NaCl en disolución fija unos 6 moles de agua. Un kilogramo de agua contiene 55,5 moles. En una disolución acuosa de NaCl 0,1 mol/kg hay $55,5 - 6(0,1) = 54,9$ moles de agua libres por kilogramo de disolvente,

o que el efecto de la hidratación es pequeño. Sin embargo, en una disolución de NaCl de 3 mol/kg hay solamente $55 - 18 = 37$ moles de agua libres por cada mol de soluto, lo cual es una disminución considerable.

Coefficientes de actividad de electrólitos a altas concentraciones. Algunos métodos han sido propuestos para calcular coeficientes de actividad de electrólitos a altas concentraciones en lugar de las disoluciones muy diluidas en las cuales se aplica la ecuación de Debye-Hückel.

Se ha visto empíricamente que la adición de un término lineal en I_m a la ecuación de Debye-Hückel (10.70) mejora la concordancia con los datos experimentales en disoluciones menos diluidas. Davies propuso la siguiente ecuación, la cual no contiene parámetros ajustables (Davies, págs. 39-43):

$$\log_{10} \gamma_{\pm} = -0,51 z_+ |z_-| \left[\frac{(I_m/m^\circ)^{1/2}}{1 + (I_m/m^\circ)^{1/2}} - 0,30(I_m/m^\circ) \right] \text{ en H}_2\text{O a 25 }^\circ\text{C} \quad (10.71)$$

La ecuación de Davies para $\log_{10} \gamma_{\pm}$ (o $\log_{10} \gamma_{\pm}$) se obtiene sustituyendo z_+^2 (o z_-^2) en (10.71). La modificación de Davies de la ecuación de Debye-Hückel tiene un error típico del 1,5 % para $I_m/m^\circ = 0,1$. El término de (10.71) hace que γ_{\pm} tenga un mínimo, aumentando luego con I_m de acuerdo con el comportamiento de la Figura 10.8. Cuando I_m/m° es mayor que 1, la concordancia de la ecuación de Davies con los datos experimentales disminuye; cuando $I_m/m^\circ = 0,5$, el error típico es del 5 al 10 %. Es mejor usar valores experimentales de γ_{\pm} , especialmente para las fuerzas iónicas inferiores a 0,1 mol/kg, pero si no se dispone de los datos experimentales, la ecuación de Davies puede servir para estimar γ_{\pm} . La ecuación de Davies dice que todo electrólito 1:1 tiene el mismo valor de γ_{\pm} a un valor dado de I_m . En realidad, los valores de γ_{\pm} para electrólitos 1:1 sólo son iguales en el límite de alta dilución.

Al usar la ecuación de Debye-Hückel o la de Davies en una disolución que contiene más de un electrólito, obsérvese que *todos* los iones de la disolución contribuyen a I_m en (10.62), pero que z_+ y $|z_-|$ en (10.70) y (10.71) se refieren a las fuerzas iónicas del electrólito para el cual se pretende calcular γ_{\pm} .

Para cierta información sobre la ecuación de Davies ha sido suprimida en esta sección. Para más información, véase la Sección 10.9.

EMPLO 10.3

Uso de la ecuación de Davies

Uso de la ecuación de Davies para estimar γ_{\pm} en disoluciones acuosas de CaCl_2 a 25 °C, con molalidades 0,001, 0,01 y 0,1 mol/kg.

Tenemos que $I_m \equiv \frac{1}{2} \sum_j z_j^2 m_j = \frac{1}{2}(z_+^2 m_+ + z_-^2 m_-) = \frac{1}{2}(4m_+ + m_-)$ [Ecuación (10.62)]. Por consiguiente, $m_+ = m_i$ y $m_- = 2m_i$, donde m_i es la molalidad equimétrica del CaCl_2 . La fuerza iónica es $I_m = \frac{1}{2}(4m_i + 2m_i) = 3m_i$. La ecuación de Davies (10.71) con $z_+ = 2$, $|z_-| = 1$, e $I_m = 3m_i$, se convierte en

$$\log_{10} \gamma_{\pm} = -1,02(3m_i/m^\circ)^{1/2} / [1 + (3m_i/m^\circ)^{1/2}] + 0,92m_i/m^\circ$$

Sustituyendo $m_i/m^\circ = 0,001$, 0,01 y 0,1, se obtienen los valores $\gamma_{\pm} = 0,887$, 0,822 y 0,538, respectivamente. Estos valores calculados se deben com-

ANEXO G

Filter Media Reference Guide

from

Pure Water Products, LLC

Box 2783, Denton, TX 76202 | (940) 382-3814 | pwp@pwgazette.com

This guide is provided as a reference only. It is not intended as a guarantee of performance.

[Go here to order filter media.](#)

Filtration Medium	Basic Characteristics	Discussion
Activated Alumina	Density (lb/ft ³): 43 Bed depth (inches): 36+ Service flow (gpm/ft ²): 1-2 Backwash flow (gpm/ft ²): 8-10	Activated Alumina is "a mixture of amorphous and gamma aluminum oxide" that is used for removal of arsenic, fluoride, selenium, silica and humic acids. For arsenic and fluoride treatment, low pH (5.5-6) is superior. It can be regenerated with sodium hydroxide.
Anthracite	Density (lb/ft ³): 50 Bed depth (inches): 24-36 Service flow (gpm/ft ²): 5 Backwash flow (gpm/ft ²): 12-18:	Crushed anthracite coal has long been a favorite medium-weight filter for sediment reduction. It is now most often used with sand and other media in multi-media filters.
Birm	Density (lb/ft ³): 46 Bed depth (inches): 30-36 Service flow (gpm/ft ²): 3.5-5 Backwash flow (gpm/ft ²): 10-12	Birm is a manufactured medium consisting of plastic coated with magnesium oxide. It is designed for iron and manganese reduction. It causes iron and manganese to precipitate (change from a dissolved state to a particulate), then filters out the particulate. It can be used with or without an oxidizer. Its success without an oxidizer depends a great deal on the amount of dissolved oxygen in the water. (Testing for dissolved oxygen isn't easy, so trial and error is often the best policy.)
Calcite (Crushed marble)	Density (lb/ft ³): 100 Bed depth (inches): 24-30 Service flow (gpm/ft ²): 2-6 Backwash flow (gpm/ft ²): 10-12	Calcite is crushed marble. It is naturally occurring calcium carbonate. It is used to raise the pH of acidic water. Since it is dissolved only in acidic water, it is self-limiting. When acidic water reaches neutral pH, no more calcite is dissolved.
ChemSorb (Natural Zeolite)	Density (lb/ft ³): 55 Bed depth (inches): 24-30 Service flow (gpm/ft ²): 12-18 Backwash flow (gpm/ft ²): 11-13	ChemSorb is a unique granular zeolite filter media. It is a natural product mined in the western U.S. It offers sediment filtration down to <5 microns and backwashes well and has an excellent service rate.
Corosex	Density (lb/ft ³): 100 Bed depth (inches): 24-30 Service flow (gpm/ft ²): 5-6 Backwash flow (gpm/ft ²): 10-12	Like calcite, Corosex, which is magnesium oxide, is used to correct low pH situations. Unlike calcite, it has a tendency to overcorrect, especially if the flow rate is low. It is preferred for very low pH and for very high flow rates.
Filter-Ag	Density (lb/ft ³): 25 Bed depth (inches): 24-36 Service flow (gpm/ft ²): 5	Filter Ag is a manufactured lightweight sand substitute, which weighs about 1/4 as much as sand. Its main function is removal of suspended solid but it is also used at times for iron reduction.

Filox-R	Backwash flow (gpm/ft ²): 8-10	Filox-R is a processed natural medium known for the purity of its active ingredient (it's 80% manganese dioxide), its durability, and its high oxidation/filtration capacity. It is used for iron, manganese, and hydrogen sulfide reduction. It has an extremely long life and high service flow rate capacity. It has a high pH range of operation and imparts no taste or odor to treated water.
	Density (lb/ft ³): 114 Bed depth (inches): 20 minimum Service flow (gpm/ft ²): 13.5-22 Backwash flow (gpm/ft ²): 16-23.5.	
Garnet	Density (lb/ft ³): 140 Bed depth (inches): 10+ Service flow (gpm/ft ²): 10 Backwash flow (gpm/ft ²): 25-30	Garnet is a natural medium used most often in multi-media filters. It is very fine and filters down to the 10-20 micron range.
Granular Activated Carbon (GAC)	Density (lb/ft ³): 25 Bed depth (inches): 24-36 Chlorine removal Service flow (gpm/ft ²): 3-5 Organic removal flow (gpm/ft ²): 1-3 Backwash flow (gpm/ft ²): 8-10	Granular carbon is the standard media for most chemical reduction situations. Its high surface area gives it massive adsorptive capacity. It can be manufactured from animal bones, wood, and petroleum, but most carbon is produced from anthracite coal or coconut shells. Go here for more information about filter carbon.
KDF55	Density (lb/ft ³): 171 Bed depth (inches): 10+ Service flow (gpm/ft ²): 30 Backwash flow (gpm/ft ²): 30	High purity copper/zinc granules that use redox (exchange of electrons) to remove chlorine and heavy metals. KDF55 is 50% copper and 50% zinc. This grade of KDF is most often used for chlorine and heavy metals reduction. It also has bacteriostatic properties. Has an unusually high flow rate, but also requires a strong backwash stream. Cannot be used in "aggressive" water and is often preceded by some form of neutralization.
KDF85	Density (lb/ft ³): 1741 Bed depth (inches): 10+ Service flow (gpm/ft ²): 15 Backwash flow (gpm/ft ²): 30	High purity copper/zinc granules that use redox (exchange of electrons) to remove chlorine and heavy metals. KDF85 is 85% copper and 15% zinc. This grade of KDF is most often used for iron, manganese and hydrogen sulfide reduction. It also has bacteriostatic properties. It has an unusually high flow rate, but also requires a strong backwash stream. Cannot be used in "aggressive" water and is often preceded by some form of neutralization.
Manganese Greensand	Density (lb/ft ³): 85 Bed depth (inches): 30-36 Service flow (gpm/ft ²): 2-5 Backwash flow (gpm/ft ²): 12-15	Manganese greensand is a purple-black filtration medium made from naturally occurring greensand coated with manganese. It serves as a catalyst to precipitate hydrogen sulfide, iron and manganese. It can be continuously regenerated with chlorine and/or a purple liquid called potassium permanganate, or it can be intermittently regenerated with potassium permanganate alone.
MTM	Density (lb/ft ³): 27 Bed depth (inches): 24-36 Service flow (gpm/ft ²): 3-5 Backwash flow (gpm/ft ²): 8-10	MTM is a granular manganese dioxide filtering medium that works in much the same way as manganese greensand and is regenerated also with chlorine and/or potassium permanganate. The main difference is that it is lighter and therefore can be backwashed more easily and has a higher service flow rate.

Multi-media (multi-layer)	Density (lb/ft ³): 92 Bed depth (inches): 36 Service flow (gpm/ft ²): 10 Backwash flow (gpm/ft ²): 15	Multi-media filters consist of several layers—usually three to five—of different media. The media are loaded by density—the most dense in the bottom of the tank, the least dense on top. This produces a filter with excellent flow rate and relatively easy backwash properties that will filter down to ten microns. <small>The most common media mix is (top to bottom): anthracite, filter sand, garnet 30 X 40, garnet 8 X 12, and gravel. This is a typical mix, though many others are common.</small>
Pyrolox	Density (lb/ft ³): 125 Bed depth (inches): 24+ Service flow (gpm/ft ²): 5 Backwash flow (gpm/ft ²): 25-30	Pyrolox is a mined ore—manganese dioxide—used for manganese, iron and hydrogen sulfide reduction. Like Birm, greensand, and MTM, it acts as a catalyst to oxidation. Waters low in dissolved oxygen can use the catalytic properties of Pyrolox. It must be backwashed aggressively, although no regenerant is needed. The leading causes of filter failure when using Pyrolox are inadequate backwashing and low dissolved oxygen.
Sand	Density (lb/ft ³): 100 Bed depth (inches): 18-30 Service flow (gpm/ft ²): 3-5 Backwash flow (gpm/ft ²): 15-50s	Filter sand is naturally occurring sand that is high in silica and low in calcium. It is graded and washed. It can be used independently or as part of a multi-media filter. Sand filters are believed to be the oldest man-made filters and they imitate a common natural filtration technique.

Information in this chart is taken largely from an excellent article by James A. Hunt: "Filtration Media: Making the Right Choice. A Reference Guide for Dealers" that can be found in the May 2001 issue of *Water Conditioning and Purification* magazine.

Links to Backwashing Filter Information on this Site

[Backwashing Filter Basics](#)

[General Media Guide](#) : Properties of the most common filter media.

[Backwash & Flow Characteristics of Filter Media](#).

[Simple 5600 Filters](#)

Our most popular backwashing filter in a convenient size that fits most residential situations.

[Backwashing Filter Selection Page for Fleck Filters](#).

Includes a variety of filter sizes. All filters have Fleck control valves.

[BACK TO MAIN PRODUCT INDEX PAGE](#)

[BACK TO BACKWASHING FILTER INTRODUCTION PAGE](#)

[BACK TO 5600 FILTER PAGE](#).

Copyright © Pure Water Products, LLC 1986-2008

Weak Base Macroporous Anion Resin - Weak base macroporous anion exchange resin has high total capacity, resistance to oxidation and outstanding chemical and mechanical stability. Weak base anion will not remove silica or CO₂ but is efficient in the adsorption of organic molecules while being resistant to organic fouling. Primarily used in separate bed systems with high levels of strong acid ions, such as sulfates and chlorides, where its tremendous regeneration efficiency is best utilized.

Ionic Form	Cl / Free Base	Appearance	Opaque Amber
Bead Size	16 - 50 mesh	Shipping Weight	42 lbs / ft ³
Water Retention	57 - 63%	Volume Chge FB>Cl	+35%
Temperature	to 158° F	pH Range	0 - 8
Bed Depth	24 inches (min)	Service Flow Rate	2 gpm / ft ²
Backwash	2.5 gpm / ft ²	Regen Flow	0.5 gpm / ft ²
Regen Time	30 min.	Slow Rinse Flow	0.5 gpm / ft ²
Fast Rinse Flow	2 gpm / ft ²	Rinse Volume	50 gal / ft ²
Bed Expansion	50%	Regen Level	3 lbs NaOH / ft ²

Tannin and Organic Selective Anion Resin - Acrylic macroporous strong base. Type I, anion exchange resin used in the treatment of water with high organic content. Its outstanding mechanical and chemical stability make it ideal to be used where standard resins are easily fouled. Utilized for the adsorption of humic acids and iron humate as well as the removal of color bodies associated with organic chemical products. High concentrations of organic substances can be adsorbed rapidly and readily desorbed by regeneration with sodium chloride.

Ionic Form	Cl	Appearance	Opaque White
Bead Size	16 - 40 mesh	Shipping Weight	45 lbs / ft ³
Water Retention	57 - 67%	Volume Chge OH>Cl	15%
Temperature	to 140° F	pH Range	0 - 14
Bed Depth	24 inches (min)	Service Flow Rate	5 gpm / ft ²
Backwash	2.5 gpm / ft ²	Regen Flow	1.0 gpm / ft ²
Regen Time	20-60 min.	Slow Rinse Flow	1.0 gpm / ft ²
Fast Rinse Flow	5 gpm / ft ²	Rinse Volume	25-75 gal / ft ²
Bed Expansion	50-80%	Regen Level	10 lbs NaCl / ft ²

Nitrate Selective Anion Resin - Strong base nitrate-selective anion resin is a macroporous styrene-divinylbenzene copolymer. The primary purpose of this resin is the removal of nitrates even if the water is high in sulfates. This resin can be utilized alone or as part of a mixed bed. High nitrate removal of 840,000 mg/l - 1,000,000 mg/l per cubic foot is normal, even with sulfate to nitrate ratios up to 6:1.

Ionic Form	Cl	Appearance	White
Bead Size	16 - 50 mesh	Shipping Weight	42 lbs / ft ³
Water Retention	40 - 45%	Temperature	to 170° F
pH Range	0 - 14	Bed Depth	24 inches (min)
Service Flow Rate	4 gpm / ft ²	Backwash	1.5-3.0 gpm / ft ²
Regen Flow	0.5 - 1 gpm / ft ²	Regen Time	30 min.
Rinse Flow	2 gpm / ft ²	Rinse Volume	50 gal / ft ²
Bed Expansion	50%	Regen Level	8-10 lbs NaCl / ft ²

Garnet - Garnet is naturally occurring mined material which is washed and graded to exacting specifications. Its chemical composition is $Fe_3Al_2(SiO_4)_3$, with Mg and Mn in partial substitution for Fe. Garnet can be used as an underbedding or as the bottom layer in a multi-media filter. Its high specific gravity and granular form make it an ideal media for filtration purposes.

Form	Granular	Appearance	Reddish Brown
Effective Size	0.30 - 0.46 mm	Temperature	1315° C (2335° F)
Bed Depth	8 - 9 inches	Service Flow Rate	15-20 gpm / ft ²
Backwash	15-20 gpm / ft ²	Bed Expansion	10 - 35%
Backwash Time	15 - 20 min.	Shipping Weight	135 lbs / ft ³
Acid Solubility	None	Specific Gravity	4.0 - 4.5
Hardness	7.5 - 8.0 (Moh's scale)		

Gravel Underbedding - The highly spherical shape of this uncrushed gravel promotes good flow and even distribution. Red Flint Gravel is a naturally occurring, river washed, glacial deposit product. It is high in silica content and low in soluble calcium, magnesium and iron compounds. Red Flint has been specified and used nationally and internationally because of its desirable chemical properties, color, and precision sizing. Red Flint Gravel meets American Water Works Association B100-89 specifications. Three (3) inch layers are recommended in graded support beds.

Form	Spherical Grains	Appearance	Light Tan to Reddish Brown
Effective Size	a) #20 (1/8" x 1/16") b) 1/4" x 1/8" c) 1/2" x 1/4"	Composition	Flint
		Service Flow Rate	20 gpm / ft ²
		Shipping Weight	100 lbs / ft ³
Acid Solubility	1.5% - 1.6%	Specific Gravity	2.65 - 2.75

KDF[®] 55 Medium - KDF[®] 55 medium is a versatile, specially formulated high purity, bimetal material. Key applications are chlorine removal, heavy metal removal, hydrogen sulfide removal (under 0.5 ppm), iron removal (under 0.5 ppm) and control of bacteria, fungus, algae and mold. This product can be used effectively in the pretreatment of reverse osmosis and ion exchange systems. It is not recommended for use on water systems containing Citric Acid, Acetate or any other weak acids. The dechlorination capacity exceeds 32,000 ppm per pound, demonstrated under test conditions. KDF[®] 55 medium is a US EPA ruled "pesticidal device" and NSF certified to ANSI / NSF Standard 61. The medium composition is atomized high purity copper/zinc alloy.

Form	Granular	Appearance	Golden
Particle Size	2.0 - 0.149 mm	Screen Size	10 - 100 mesh
Shipping Weight	1/3 ft ³ pails - 59 lbs	Temperature	35° to 212° F
pH Range	6.5 - 8.5	Bed Depth	10 inches (min)
Service Flow Rate	15 gpm / ft ²	Backwash	30 gpm / ft ²
Backwash Time	10 min.	Fast Rinse Flow	30 gpm / ft ²
Fast Rinse Time	3 min	Bed Expansion	10 - 15%

KDF[®] 85 Medium - KDF[®] 85 medium is a versatile, specially formulated high purity, bimetal material. Key applications are hydrogen sulfide removal up to 5 ppm, iron removal up to 5 ppm with air injection between the well and the pressure tank. KDF[®] 85 can also be utilized for the control of bacteria, fungus, algae and mold. It is not recommended for use on water systems containing Citric Acid, Acetate or any other weak acids. KDF[®] 85 medium is a US EPA ruled "pesticidal device" and NSF certified to ANSI / NSF Standard 61. The medium composition is atomized high purity copper/zinc alloy.

Form	Granular	Appearance	Reddish Brown
Particle Size	2.0 - 0.149 mm	Screen Size	10 - 100 mesh
Shipping Weight	1/3 ft ³ pails - 59 lbs	Temperature	35° to 212° F
pH Range	6.5 - 8.5	Bed Depth	15 inches (min)
Service Flow Rate	15 gpm / ft ²	Backwash	30 gpm / ft ²
Backwash Time	10 min.	Fast Rinse Flow	30 gpm / ft ²
Fast Rinse Time	3 min.	Bed Expansion	10 - 15%

Manganese Greensand - Manganese Greensand is formulated from a glauconite greensand which is capable of removing iron, manganese and hydrogen sulfide through oxidation and filtration. Soluble iron and manganese are oxidized and precipitated by contact with the higher oxides of manganese on the greensand granules. The hydrogen sulfide is oxidized to sulfate and an insoluble precipitate. These precipitates are then mechanically filtered out by the greensand bed. When the oxidizing capacity power is exhausted, the greensand has to be regenerated with potassium permanganate. Two (2) to four (4) ounces of potassium permanganate solution per cubic foot greensand is considered sufficient for a normal regeneration. Potassium permanganate crystals dissolve at the rate of 2 to 4 ounces per gallon of water, dependent on the temperature of the water. Therefore, one (1) gallon of solution is required for each cubic foot of greensand filter media. The maximum limit of iron or manganese is 15 ppm. The maximum limit for hydrogen sulfide is 5 ppm.

Form	Granular	Appearance	Black
Particle Size	0.30 - 0.35 mm	Screen Size	16 - 60 mesh
Shipping Weight	85 lbs / ft ³	Temperature	80° F (max)
pH Range	6.2 - 8.8	Bed Depth	30 inches (min)
Service Flow Rate	5 gpm / ft ²	Backwash	8-12 gpm / ft ²
Backwash Time	15 - 20 min.	Bed Expansion	35 - 50%

Removal Capacity per Cubic Foot:

- Iron alone 550 grains
(10,000 gallons of water with 1 ppm of iron / ft³)
- Iron and manganese 400 grains
(7,000 gallons of water with 0.5 ppm iron & 0.5 ppm manganese / ft³)
- Hydrogen Sulfide 175 grains
(3,000 gallons of water with 1 ppm H₂S / ft³)

ANEXO H

Sodium Metabisulfite

Technical Data Sheet

January 1997

Formula $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$
Molecular Weight 190.13
Product Numbers:
Sodium Metabisulfite
Photo Grade 012771
Food Grade 201278
CAS Registry Number: ... 7681-57-4

Description

Sodium Metabisulfite is a white, or off-white, finely crystalline powder with a faint sulfur dioxide odor. It has a bulk density between 1.0 and 1.15 kg/l and a tap density between 1.4 and 1.5 kg/l.

Both grades decompose at temperatures above 150°C. They absorb moisture and are oxidized if the containers are not kept tightly closed. They are readily soluble in water. Aqueous sodium bisulfite solutions are prepared by stirring Sodium Metabisulfite into water.

Sodium bisulfite solutions are oxidized upon extended contact with air.

The NaHSO_3 content and density of sodium bisulfite solutions of different concentrations at 40°C are listed in Table 1 on reverse side of this sheet.

Photo Grade meets the specifications of the American National Standard for Photographic Grade Sodium Metabisulfite. Food Grade meets the requirements of the Food Chemical Codex, 4th Edition.

Safety

Exposures to small amounts of sulfites have been reported to cause hypersensitivity reactions in certain susceptible individuals, especially asthmatics. The FDA has revoked the GRAS status of this product for use in: meats, foods recognized as a source of Vitamin B1, fruits and vegetables.

Sodium Metabisulfite – Photo Grade

Product Specifications	Value	Test Method
Assay $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, % w/w min.	98	ANSI PH 4.276-1980
Assay SO_2 , % w/w min.	66	calc.
pH value	4.0 – 4.5	ISO 3627-1976 (E)
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$, % w/w max.	0.04	RCA/Q-S-063
NaCl, ppm max.	30	RCA/Q-S-061
Heavy metals as Pb, ppm max.	10	AES - BASF M91/41
Iron, ppm max.	5	AAS - BASF M90/5
Insoluble matter, % w/w max.	0.5	ANSI PH 4.276-1980
Na_2SO_3 , % w/w max.	1.5	ISO 3627-1976 (E)

Sodium Metabisulfite – Food Grade

Product Specifications	Value	Test Method
Assay $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$, % w/w min.	97.2	acc. FCC IV p. 369
Assay SO_2 , % w/w min.	65.5	calc.
pH value	4.0 – 4.8	ISO 3627-1976 (E)
NaCl, ppm max.	50	RCA/Q-S-061
Heavy metals as Pb, ppm max.	10	AES - BASF M91/41
Iron, ppm max.	5	AAS - BASF M90/5
Arsenic, ppm max.	1	AAS - BASF M90/7
Lead, ppm max.	1	AAS - BASF M90/5
Copper, ppm max.	1	AAS - BASF M90/5
Manganese, ppm max.	1	AAS - BASF M90/5
Mercury, ppm max.	0.1	AAS - (cold vapor)
Selenium, ppm max.	1	AAS - BASF M90/8
Zinc, ppm max.	1	AAS - BASF M90/5

RCA/Q = BASF Test Method
AES = Atomic Emission Spectrometry
AAS = Atomic Absorption Spectrometry

Always refer to the Material Safety Data Sheet (MSDS) for detailed information on safety.

Applications

- Reducing agents - purification and isolation of aldehydes and ketones - destruction of bromine waste - preparation of dyes.
- For removing excess chlorine in the treatment of drinking water. In special cases, for removing oxygen from boiler feedwater.

- In effluent treatment, e.g., for detoxification of chromic acid in electroplating factories, for removing excess chlorine in the detoxification of chromic acid in electroplating factories, for removing excess chlorine in the detoxification of cyanide.

(continued on reverse side)

or cleaning and bleaching wool, cotton, and other vegetable fibers.

for the preparation of indigo vats and for solubilizing other dyes in textile dyeing and printing.

or solubilizing tannin extracts.

or bleaching groundwood in the paper and pulp industry.

in the photographic industry for the reduction of developer solutions, acidizing fixation baths, and clearing baths in reversal processing.

for the clarification of green fodder.

for the preservation and bactericidal purposes.

Packing

Standard containers are 110 lb and 50 lb clear plastic bags. "Big bags" are available upon request.

Storage & Handling

Sodium Metabisulfite has an almost indefinite shelf life when properly stored in original, unopened containers in a cool, dry warehouse.

Always refer to the Material Safety Data Sheet (MSDS) for detailed information on handling and disposal.

Table 1 – Aqueous Sodium Bisulfite Solutions

NaHSO ₃ Concentration %	NaHSO ₃ Content g/l	Density kg/m ³
10	106.9	1069
15	166.7	1111
20	230.8	1154
25	300.3	1201
30	375.0	1250
35	455.0	1300
40	541.6	1354

DISCLAIMER: While the descriptions, designs, data and information contained herein are presented in good faith and believed to be accurate, it is provided for your guidance only. Because many factors may affect processing or application/use, we recommend that you conduct your own tests to determine the suitability of a product for your particular purpose prior to use. NO WARRANTIES OF ANY KIND, EITHER EXPRESS OR IMPLIED, INCLUDING WARRANTIES OF MERCHANTABILITY OR FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE, ARE MADE REGARDING PRODUCTS DESCRIBED OR DESIGNS, DATA OR INFORMATION SET FORTH, OR THAT THE PRODUCTS, DESIGNS, DATA OR INFORMATION MAY BE USED WITHOUT INFRINGING THE INTELLECTUAL PROPERTY RIGHTS OF OTHERS. IN NO EVENT SHALL THE DESCRIPTIONS, INFORMATION, DATA OR DESIGNS PROVIDED BE CONSIDERED A PART OF OUR TERMS AND CONDITIONS OF SALE. Further, you expressly understand and agree that the descriptions, designs, data and information provided by BASF hereunder are given gratis and BASF assumes no obligation or liability for the description, designs, data and information given or results obtained, all such being provided as is and accepted at your risk.

© 1998 BASF Corporation

Customer Service: 1-800-426-8702

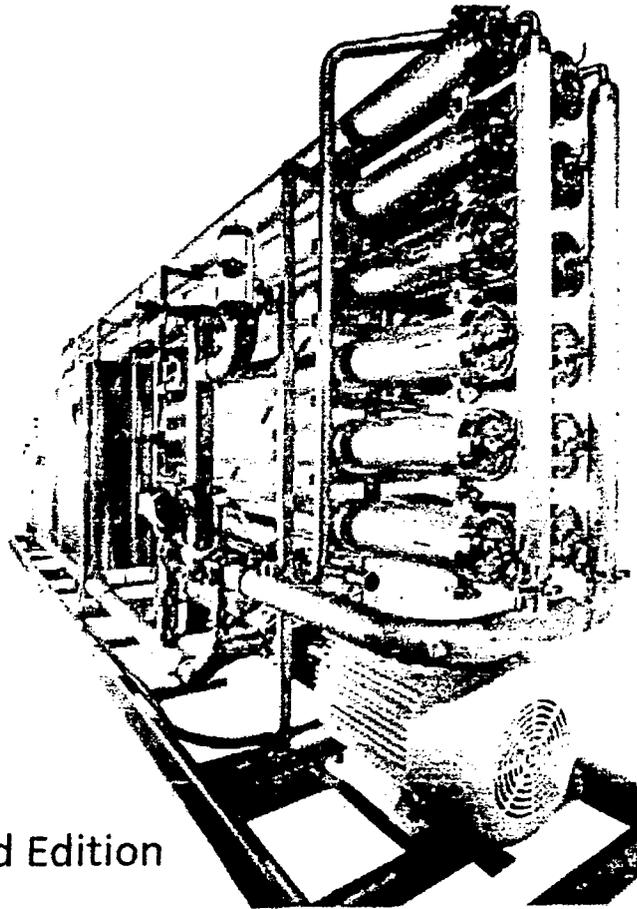
BASF Corporation
Chemicals Division
3000 Continental Drive - North
Mount Olive, New Jersey 07828-1234
World Wide Web: <http://www.basf.com>

ANEXO I

GE
Water & Process Technologies

RO Systems Operation

Best Practice Guidelines



Second Edition

CONFIDENTIAL INFORMATION

Multimedia Filters are a combination, in descending layer order, of anthracite, sand and garnet. The density of the material determines the position in the layer. The combination of the three layers acts to remove a wide range of incoming solid contaminant particle sizes as small as 10-15 micron.

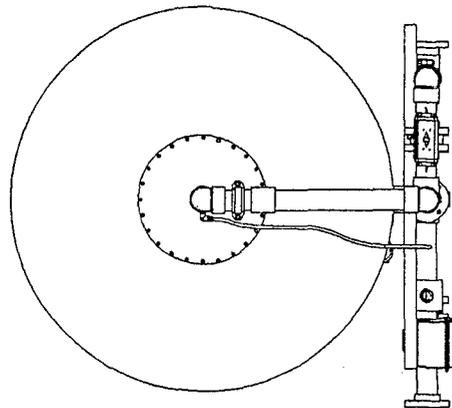
MMF – Multi Media (Anthracite, Sand, Garnet)

Parameter	Max Inlet Limit
Turbidity	50 NTU
TSS	50 mg/L
Operation	
Loading flow rate	4-7 gpm/ft ² (160-290 L/min/m ²)
Max allowable pressure drop	15 psi
Clean bed pressure drop	5 psi
Air scour (if equipped)	3 SCFM/ft ²
Filter Backwash	
Backwash rate	15-20 gpm/ft ² (610-820 L/min/m ²)
Backwash source	Feed or filtered RO brine
Rinse source	Feed
Backwash frequency	Delta P, Breakthrough on Turbidity

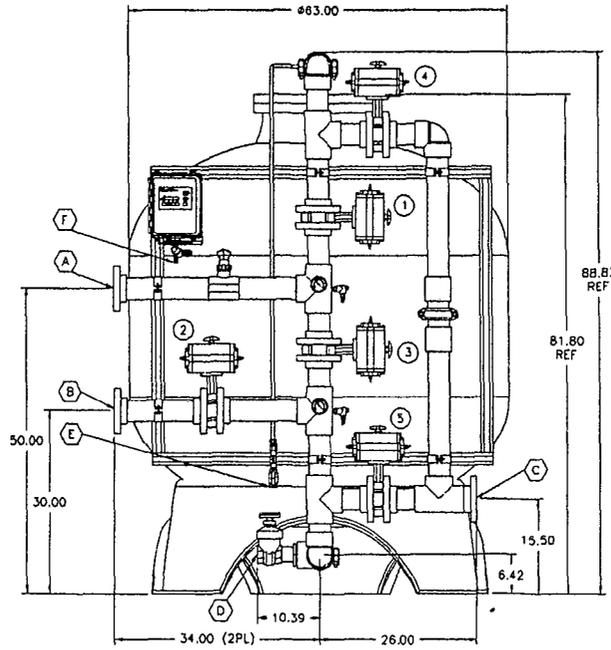
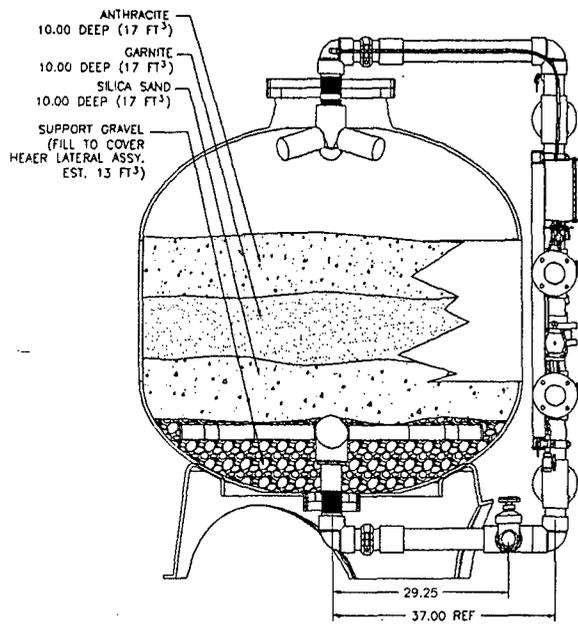
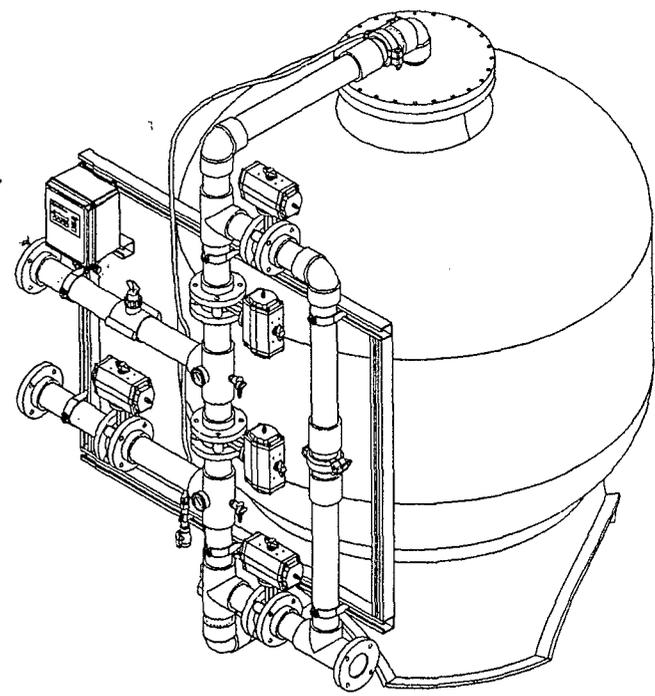
Multimedia filters can be used in concert with chlorine feed in front to oxidize and remove certain metals. Required chlorine dosages are in the following table:

	Chlorine required for oxidation (ppm Cl ₂)
Iron, Fe	0.6
Manganese, Mn	3.5
Hydrogen Sulfide, HS	8.5

Note: For polyamide (PA) membrane applications, all chlorine must be removed from RO feed water prior to contacting the membranes.



CONNECTION SCHEDULE				
HEX	DESCRIPTION	MATERIAL	TYPE	SIZE
(A)	SERVICE INLET	PVC	150# FLANGE	3.00
(B)	SERVICE OUTLET	PVC	150# FLANGE	3.00
(C)	BACKWASH/RINSE OUTLET	PVC	150# FLANGE	3.00
(D)	TANK DRAIN	PVC	FNPT	2.00
(E)	TANK VENT	PVC	FNPT	.50
(F)	AIR INLET (80PSIG MIN. REQ.)	ZINC	FNPT	0.25



VALVE NUMBER	DESCRIPTION
1	SERVICE INLET VALVE
2	SERVICE OUTLET VALVE
3	BACKWASH INLET VALVE
4	BACKWASH OUTLET VALVE W/RATE SET SCREWS
5	RINSE OUTLET VALVE W/RATE SET SCREWS

FILTER FUNCTION	VALVES OPEN
SERVICE	1 2
BACKWASH	3 4
SETTLE	---
RINSE	1 5

NOTICE ON REPRODUCTIONS
 THIS DRAWING, THE DESIGN AND THE PATENTS & COPIES ARE THE PROPERTY OF GENERAL ELECTRIC. THEY ARE LOANED TO YOU AND ON THE SIGNATURE OF YOUR APPROVED THAT THEY SHALL BE KEPT UNREPRODUCED, UNLESS EXPRESSLY NOTED OTHERWISE BY THE DESIGNER. ANY REPRODUCTION WITHOUT WRITTEN CONSENT GIVEN BY THE DESIGNER TO THE COMPANY IS PROHIBITED.

GE Infrastructure
 Water & Process Technologies
 3931 CLEARVIEW DRIVE, WATKINSON, VA 20150-2093
 (703) 933-2777; WWW.GEINFRASTRUCTURE.COM

GENERAL ARRANGEMENT
 FLT-MN, 63X67, FRP/PVC

MATERIAL	TOLERANCES UNLESS NOTED	DECIMALS	ANGLES
FRESH	FRACTION	1/16 & 1/32	30° & 45°
	DECIMALS	1/100	
	ANGLES		15° & 30°

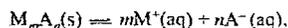
ORDER NO	DWN	PRM	DATE	12.24.05
CUSTOMER	CHRD	BRB	DATE	31.20.08
CUSTOMER LOC.	APVD	JSS	DATE	31.20.08
DO NOT SCALE	APVD	DATE		

TITLE: GENERAL ARRANGEMENT
 DWG NO/REV: FLT-MN, 63X67, FRP/PVC
 SCALE: 3/32
 FILE TYPE: ACP2004
 SHEET: 1 OF 1
 REV: A

ANEXO J

SOLUBILITY PRODUCT CONSTANTS

The solubility product constant K_{sp} is a useful parameter for calculating the aqueous solubility of sparingly soluble compounds under various conditions. It may be determined by direct measurement or calculated from the standard Gibbs energies of formation $\Delta_f G^\circ$ of the species involved at their standard states. Thus if $K_{sp} = [M^+]^m [A^-]^n$ is the equilibrium constant for the reaction



where $M_m A_n$ is the slightly soluble substance and M^+ and A^- are the ions produced in solution by the dissociation of $M_m A_n$, then the Gibbs energy change is

$$\Delta G^\circ = m \Delta_f G^\circ (M^+, aq) + n \Delta_f G^\circ (A^-, aq) - \Delta_f G^\circ (M_m A_n, s)$$

The solubility product constant is calculated from the equation

$$\ln K_{sp} = -\Delta G^\circ/RT$$

The first table below gives selected values of K_{sp} at 25°C. Many of these have been calculated from standard state thermodynamic data in References 1 and 2; other values are taken from publications of the IUPAC Solubility Data Project (References 3 to 7).

The above formulation is not convenient for treating sulfides because the S^{2-} ion is usually not present in significant concentrations (see Reference 8). This is due to the hydrolysis reaction



which is strongly shifted to the right except in very basic solutions. Furthermore, the equilibrium constant for this reaction, which depends on the second ionization constant of H_2S , is poorly known. Therefore it is more useful in the case of sulfides to define a different solubility product K_{spa} based on the reaction



Values of K_{spa} , taken from Reference 8, are given for several sulfides in the auxiliary table following the main table. Additional discussion of sulfide equilibria may be found in References 7 and 9.

REFERENCES

1. Wagman, D.D., Evans, W.H., Parker, V.B., Schumm, R.H., Halow, I., Bailey, S.M., Churney, K.L., and Nuttall, R.L., *The NBS Tables of Chemical Thermodynamic Properties*, *J. Phys. Chem. Ref. Data*, Vol. 11, Suppl. 2, 1982.
2. Garvin, D., Parker, V.B., and White, H.J., *CODATA Thermodynamic Tables*, Hemisphere, New York, 1987.
3. *Solubility Data Series* (53 Volumes), International Union of Pure and Applied Chemistry, Pergamon Press, Oxford, 1979–1992.
4. Clever, H.L., and Johnston, F.J., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 9, 751, 1980.
5. Marcus, Y., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 9, 1307, 1980.
6. Clever, H.L., Johnson, S.A., and Derrick, M.E., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 14, 631, 1985.
7. Clever, H.L., Johnson, S.A., and Derrick, M.E., *J. Phys. Chem. Ref. Data*, 21, 941, 1992.
8. Myers, R.J., *J. Chem. Educ.*, 63, 687, 1986.
9. Licht, S., *J. Electrochem. Soc.*, 135, 2971, 1988.

Compound	Formula	K_{sp}
Aluminum phosphate	$AlPO_4$	$9.84 \cdot 10^{-21}$
Barium bromate	$Ba(BrO_3)_2$	$2.43 \cdot 10^{-4}$
Barium carbonate	$BaCO_3$	$2.58 \cdot 10^{-9}$
Barium chromate	$BaCrO_4$	$1.17 \cdot 10^{-10}$
Barium fluoride	BaF_2	$1.84 \cdot 10^{-7}$
Barium hydroxide octahydrate	$Ba(OH)_2 \cdot 8H_2O$	$2.55 \cdot 10^{-4}$
Barium iodate	$Ba(IO_3)_2$	$4.01 \cdot 10^{-9}$
Barium iodate monohydrate	$Ba(IO_3)_2 \cdot H_2O$	$1.67 \cdot 10^{-9}$
Barium molybdate	$BaMoO_4$	$3.54 \cdot 10^{-8}$
Barium nitrate	$Ba(NO_3)_2$	$4.64 \cdot 10^{-3}$
Barium selenate	$BaSeO_4$	$3.40 \cdot 10^{-8}$
Barium sulfate	$BaSO_4$	$1.08 \cdot 10^{-10}$
Barium sulfite	$BaSO_3$	$5.0 \cdot 10^{-10}$
Beryllium hydroxide	$Be(OH)_2$	$6.92 \cdot 10^{-22}$
Bismuth arsenate	$BiAsO_4$	$4.43 \cdot 10^{-10}$

SOLUBILITY PRODUCT CONSTANTS (continued)

Compound	Formula	K_{sp}
Bismuth iodide	BiI_3	$7.71 \cdot 10^{-19}$
Cadmium arsenate	$\text{Cd}_3(\text{AsO}_4)_2$	$2.2 \cdot 10^{-33}$
Cadmium carbonate	CdCO_3	$1.0 \cdot 10^{-12}$
Cadmium fluoride	CdF_2	$6.44 \cdot 10^{-3}$
Cadmium hydroxide	$\text{Cd}(\text{OH})_2$	$7.2 \cdot 10^{-15}$
Cadmium iodate	$\text{Cd}(\text{IO}_3)_2$	$2.5 \cdot 10^{-8}$
Cadmium oxalate trihydrate	$\text{CdC}_2\text{O}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$1.42 \cdot 10^{-8}$
Cadmium phosphate	$\text{Cd}_3(\text{PO}_4)_2$	$2.53 \cdot 10^{-33}$
Calcium carbonate (calcite)	CaCO_3	$3.36 \cdot 10^{-9}$
Calcium fluoride	CaF_2	$3.45 \cdot 10^{-11}$
Calcium hydroxide	$\text{Ca}(\text{OH})_2$	$5.02 \cdot 10^{-6}$
Calcium iodate	$\text{Ca}(\text{IO}_3)_2$	$6.47 \cdot 10^{-6}$
Calcium iodate hexahydrate	$\text{Ca}(\text{IO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	$7.10 \cdot 10^{-7}$
Calcium molybdate	CaMoO_4	$1.46 \cdot 10^{-8}$
Calcium oxalate monohydrate	$\text{CaC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$2.32 \cdot 10^{-9}$
Calcium phosphate	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$2.07 \cdot 10^{-33}$
Calcium sulfate	CaSO_4	$4.93 \cdot 10^{-5}$
Calcium sulfate dihydrate	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$3.14 \cdot 10^{-5}$
Calcium sulfite hemihydrate	$\text{CaSO}_3 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$	$3.1 \cdot 10^{-7}$
Cesium perchlorate	CsClO_4	$3.95 \cdot 10^{-3}$
Cesium periodate	CsIO_4	$5.16 \cdot 10^{-6}$
Cobalt(II) arsenate	$\text{Co}_3(\text{AsO}_4)_2$	$6.80 \cdot 10^{-29}$
Cobalt(II) hydroxide (blue)	$\text{Co}(\text{OH})_2$	$5.92 \cdot 10^{-15}$
Cobalt(II) iodate dihydrate	$\text{Co}(\text{IO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$1.21 \cdot 10^{-2}$
Cobalt(II) phosphate	$\text{Co}_3(\text{PO}_4)_2$	$2.05 \cdot 10^{-25}$
Copper(I) bromide	CuBr	$6.27 \cdot 10^{-9}$
Copper(I) chloride	CuCl	$1.72 \cdot 10^{-7}$
Copper(I) cyanide	CuCN	$3.47 \cdot 10^{-20}$
Copper(I) iodide	CuI	$1.27 \cdot 10^{-12}$
Copper(I) thiocyanate	CuSCN	$1.77 \cdot 10^{-13}$
Copper(II) arsenate	$\text{Cu}_3(\text{AsO}_4)_2$	$7.95 \cdot 10^{-36}$
Copper(II) iodate monohydrate	$\text{Cu}(\text{IO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$6.94 \cdot 10^{-8}$
Copper(II) oxalate	CuC_2O_4	$4.43 \cdot 10^{-10}$
Copper(II) phosphate	$\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_2$	$1.40 \cdot 10^{-37}$
Europium(III) hydroxide	$\text{Eu}(\text{OH})_3$	$9.38 \cdot 10^{-27}$
Gallium(III) hydroxide	$\text{Ga}(\text{OH})_3$	$7.28 \cdot 10^{-36}$
Iron(II) carbonate	FeCO_3	$3.13 \cdot 10^{-11}$
Iron(II) fluoride	FeF_2	$2.36 \cdot 10^{-6}$
Iron(II) hydroxide	$\text{Fe}(\text{OH})_2$	$4.87 \cdot 10^{-17}$
Iron(III) hydroxide	$\text{Fe}(\text{OH})_3$	$2.79 \cdot 10^{-39}$
Iron(III) phosphate dihydrate	$\text{FePO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$9.91 \cdot 10^{-16}$
Lanthanum iodate	$\text{La}(\text{IO}_3)_3$	$7.50 \cdot 10^{-12}$
Lead(II) bromide	PbBr_2	$6.60 \cdot 10^{-6}$
Lead(II) carbonate	PbCO_3	$7.40 \cdot 10^{-14}$
Lead(II) chloride	PbCl_2	$1.70 \cdot 10^{-5}$
Lead(II) fluoride	PbF_2	$3.3 \cdot 10^{-5}$
Lead(II) hydroxide	$\text{Pb}(\text{OH})_2$	$1.43 \cdot 10^{-20}$
Lead(II) iodate	$\text{Pb}(\text{IO}_3)_2$	$3.69 \cdot 10^{-13}$
Lead(II) iodide	PbI_2	$9.8 \cdot 10^{-9}$
Lead(II) selenate	PbSeO_4	$1.37 \cdot 10^{-7}$
Lead(II) sulfate	PbSO_4	$2.53 \cdot 10^{-8}$
Lithium carbonate	Li_2CO_3	$8.15 \cdot 10^{-9}$
Lithium fluoride	LiF	$1.84 \cdot 10^{-3}$
Lithium phosphate	Li_3PO_4	$2.37 \cdot 10^{-11}$
Magnesium carbonate	MgCO_3	$6.82 \cdot 10^{-6}$
Magnesium carbonate trihydrate	$\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	$2.38 \cdot 10^{-6}$
Magnesium carbonate pentahydrate	$\text{MgCO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	$3.79 \cdot 10^{-6}$
Magnesium fluoride	MgF_2	$5.16 \cdot 10^{-11}$
Magnesium hydroxide	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	$5.61 \cdot 10^{-12}$
Magnesium oxalate dihydrate	$\text{MgC}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$4.83 \cdot 10^{-6}$

SOLUBILITY PRODUCT CONSTANTS (continued)

Compound	Formula	K_{sp}
Magnesium phosphate	$Mg_3(PO_4)_2$	$1.04 \cdot 10^{-24}$
Manganese(II) carbonate	$MnCO_3$	$2.24 \cdot 10^{-11}$
Manganese(II) iodate	$Mn(IO_3)_2$	$4.37 \cdot 10^{-7}$
Manganese(II) oxalate dihydrate	$MnC_2O_4 \cdot 2H_2O$	$1.70 \cdot 10^{-7}$
Mercury(I) bromide	Hg_2Br_2	$6.40 \cdot 10^{-23}$
Mercury(I) carbonate	Hg_2CO_3	$3.6 \cdot 10^{-17}$
Mercury(I) chloride	Hg_2Cl_2	$1.43 \cdot 10^{-18}$
Mercury(I) fluoride	Hg_2F_2	$3.10 \cdot 10^{-6}$
Mercury(I) iodide	Hg_2I_2	$5.2 \cdot 10^{-29}$
Mercury(I) oxalate	$Hg_2C_2O_4$	$1.75 \cdot 10^{-13}$
Mercury(I) sulfate	Hg_2SO_4	$6.5 \cdot 10^{-7}$
Mercury(I) thiocyanate	$Hg_2(SCN)_2$	$3.2 \cdot 10^{-20}$
Mercury(II) bromide	$HgBr_2$	$6.2 \cdot 10^{-20}$
Mercury(II) iodide	HgI_2	$2.9 \cdot 10^{-29}$
Neodymium carbonate	$Nd_2(CO_3)_3$	$1.08 \cdot 10^{-33}$
Nickel(II) carbonate	$NiCO_3$	$1.42 \cdot 10^{-7}$
Nickel(II) hydroxide	$Ni(OH)_2$	$5.48 \cdot 10^{-16}$
Nickel(II) iodate	$Ni(IO_3)_2$	$4.71 \cdot 10^{-5}$
Nickel(II) phosphate	$Ni_3(PO_4)_2$	$4.74 \cdot 10^{-32}$
Palladium(II) thiocyanate	$Pd(SCN)_2$	$4.39 \cdot 10^{-23}$
Potassium hexachloroplatinate	K_2PtCl_6	$7.48 \cdot 10^{-6}$
Potassium perchlorate	$KClO_4$	$1.05 \cdot 10^{-2}$
Potassium periodate	KIO_4	$3.71 \cdot 10^{-4}$
Praseodymium hydroxide	$Pr(OH)_3$	$3.39 \cdot 10^{-24}$
Radium iodate	$Ra(IO_3)_2$	$1.16 \cdot 10^{-9}$
Radium sulfate	$RaSO_4$	$3.66 \cdot 10^{-11}$
Rubidium perchlorate	$RbClO_4$	$3.00 \cdot 10^{-3}$
Scandium fluoride	ScF_3	$5.81 \cdot 10^{-24}$
Scandium hydroxide	$Sc(OH)_3$	$2.22 \cdot 10^{-31}$
Silver(I) acetate	$AgCH_3COO$	$1.94 \cdot 10^{-3}$
Silver(I) arsenate	Ag_3AsO_4	$1.03 \cdot 10^{-22}$
Silver(I) bromate	$AgBrO_3$	$5.38 \cdot 10^{-5}$
Silver(I) bromide	$AgBr$	$5.35 \cdot 10^{-13}$
Silver(I) carbonate	Ag_2CO_3	$8.46 \cdot 10^{-12}$
Silver(I) chloride	$AgCl$	$1.77 \cdot 10^{-10}$
Silver(I) chromate	Ag_2CrO_4	$1.12 \cdot 10^{-12}$
Silver(I) cyanide	$AgCN$	$5.97 \cdot 10^{-17}$
Silver(I) iodate	$AgIO_3$	$3.17 \cdot 10^{-6}$
Silver(I) iodide	AgI	$8.52 \cdot 10^{-17}$
Silver(I) oxalate	$Ag_2C_2O_4$	$5.40 \cdot 10^{-12}$
Silver(I) phosphate	Ag_3PO_4	$8.89 \cdot 10^{-17}$
Silver(I) sulfate	Ag_2SO_4	$1.20 \cdot 10^{-5}$
Silver(I) sulfite	Ag_2SO_3	$1.50 \cdot 10^{-14}$
Silver(I) thiocyanate	$AgSCN$	$1.03 \cdot 10^{-12}$
Strontium arsenate	$Sr_3(AsO_4)_2$	$4.29 \cdot 10^{-19}$
Strontium carbonate	$SrCO_3$	$5.60 \cdot 10^{-10}$
Strontium fluoride	SrF_2	$4.33 \cdot 10^{-9}$
Strontium iodate	$Sr(IO_3)_2$	$1.14 \cdot 10^{-7}$
Strontium iodate monohydrate	$Sr(IO_3)_2 \cdot H_2O$	$3.77 \cdot 10^{-7}$
Strontium iodate hexahydrate	$Sr(IO_3)_2 \cdot 6H_2O$	$4.55 \cdot 10^{-7}$
Strontium sulfate	$SrSO_4$	$3.44 \cdot 10^{-7}$
Thallium(I) bromate	$TlBrO_3$	$1.10 \cdot 10^{-4}$
Thallium(I) bromide	$TlBr$	$3.71 \cdot 10^{-6}$
Thallium(I) chloride	$TlCl$	$1.86 \cdot 10^{-4}$
Thallium(I) chromate	Tl_2CrO_4	$8.67 \cdot 10^{-13}$
Thallium(I) iodate	$TlIO_3$	$3.12 \cdot 10^{-6}$
Thallium(I) iodide	TlI	$5.54 \cdot 10^{-8}$
Thallium(I) thiocyanate	$TlSCN$	$1.57 \cdot 10^{-4}$
Thallium(III) hydroxide	$Tl(OH)_3$	$1.68 \cdot 10^{-44}$
Tin(II) hydroxide	$Sn(OH)_2$	$5.45 \cdot 10^{-27}$

SOLUBILITY PRODUCT CONSTANTS (continued)

Compound	Formula	K_{sp}
Yttrium carbonate	$Y_2(CO_3)_3$	$1.03 \cdot 10^{-31}$
Yttrium fluoride	YF_3	$8.62 \cdot 10^{-21}$
Yttrium hydroxide	$Y(OH)_3$	$1.00 \cdot 10^{-22}$
Yttrium iodate	$Y(IO_3)_3$	$1.12 \cdot 10^{-10}$
Zinc arsenate	$Zn_3(AsO_4)_2$	$2.8 \cdot 10^{-28}$
Zinc carbonate	$ZnCO_3$	$1.46 \cdot 10^{-10}$
Zinc carbonate monohydrate	$ZnCO_3 \cdot H_2O$	$5.42 \cdot 10^{-11}$
Zinc fluoride	ZnF_2	$3.04 \cdot 10^{-2}$
Zinc hydroxide	$Zn(OH)_2$	$3 \cdot 10^{-17}$
Zinc iodate dihydrate	$Zn(IO_3)_2 \cdot 2H_2O$	$4.1 \cdot 10^{-6}$
Zinc oxalate dihydrate	$ZnC_2O_4 \cdot 2H_2O$	$1.38 \cdot 10^{-9}$
Zinc selenide	$ZnSe$	$3.6 \cdot 10^{-26}$
Zinc selenite monohydrate	$ZnSeO_3 \cdot H_2O$	$1.59 \cdot 10^{-7}$

Sulfides

Compound	Formula	K_{spa}
Cadmium sulfide	CdS	$8 \cdot 10^{-7}$
Copper(II) sulfide	CuS	$6 \cdot 10^{-16}$
Iron(II) sulfide	FeS	$6 \cdot 10^2$
Lead(II) sulfide	PbS	$3 \cdot 10^{-7}$
Manganese(II) sulfide (green)	MnS	$3 \cdot 10^7$
Mercury(II) sulfide (red)	HgS	$4 \cdot 10^{-33}$
Mercury(II) sulfide (black)	HgS	$2 \cdot 10^{-32}$
Silver(I) sulfide	Ag_2S	$6 \cdot 10^{-30}$
Tin(II) sulfide	SnS	$1 \cdot 10^{-5}$
Zinc sulfide (sphalerite)	ZnS	$2 \cdot 10^{-4}$
Zinc sulfide (wurtzite)	ZnS	$3 \cdot 10^{-2}$

ANEXO K

THERMODYNAMIC QUANTITIES FOR THE IONIZATION REACTIONS OF BUFFERS IN WATER

Robert N. Goldberg, Nand Kishore, and Rebecca M. Lennen

This table contains selected values for the pK , standard molar enthalpy of reaction $\Delta_r H^\circ$, and standard molar heat-capacity change $\Delta_r C_p^\circ$ for the ionization reactions of 64 buffers many of which are relevant to biochemistry and to biology.¹ The values pertain to the temperature $T = 298.15$ K and the pressure $p = 0.1$ MPa. The standard state is the hypothetical ideal solution of unit molality. These data permit one to calculate values of the pK and of $\Delta_r H^\circ$ at temperatures in the vicinity $\{T = (274 \text{ K to } 350 \text{ K})\}$ of the reference temperature $\theta = 298.15$ K by using the following equations²

$$\Delta_r G_T^\circ = -RT \ln K_T = \ln(10) RT pK_T, \quad (1)$$

$$R \ln K_T = -(\Delta_r G_\theta^\circ / \theta) + \Delta_r H_\theta^\circ \{(1/\theta) - (1/T)\} + \Delta_r C_{p\theta}^\circ \{(\theta/T) - 1 + \ln(T/\theta)\}, \quad (2)$$

$$\Delta_r H_T^\circ = \Delta_r H_\theta^\circ + \Delta_r C_{p\theta}^\circ (T - \theta). \quad (3)$$

Here, $\Delta_r G^\circ$ is the standard molar Gibbs energy change and K is the equilibrium constant for a reaction; R is the gas constant ($8.314472 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$). The subscripts T and θ denote the temperature to which a quantity pertains, the subscript p denotes constant pressure, and the subscript r denotes that the quantity refers to a reaction. Combination of equations (1) and (2) yields the following equation that gives pK as a function of temperature:

$$pK_T = -\{R \ln(10)\}^{-1} [-\{\ln(10) RT pK_\theta\} / \theta + \Delta_r H_\theta^\circ \{(1/\theta) - (1/T)\} + \Delta_r C_{p\theta}^\circ \{(\theta/T) - 1 + \ln(T/\theta)\}]. \quad (4)$$

The above equations neglect higher order terms that involve temperature derivatives of $\Delta_r C_p^\circ$. Also, it is important to recognize that the values of pK and $\Delta_r H^\circ$ effectively pertain to ionic strength $I = 0$. However, the values of pK and $\Delta_r H^\circ$ are almost always dependent on the ionic strength and the actual composition of the solution. These issues are discussed in Reference 1 which also gives an approximate method for making appropriate corrections.

REFERENCES

1. Goldberg, R. N., Kishore, N., and Lennen, R. M., "Thermodynamic Quantities for the Ionization Reactions of Buffers," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, in press.
2. Clarke, E. C. W., and Glew, D. N., *Trans. Faraday Soc.*, 62, 539-547, 1966.

Selected Values of Thermodynamic Quantities for the Ionization Reactions of Buffers in Water at $T = 298.15$ K and $p = 0.1$ MPa

Buffer	Reaction	pK	$\Delta_r H^\circ$ kJ mol ⁻¹	$\Delta_r C_p^\circ$ J K ⁻¹ mol ⁻¹
ACES	$HL^{\pm} = H^+ + L^-$, (HL = C ₄ H ₁₀ N ₂ O ₄ S)	6.847	30.43	-49
Acetate	$HL = H^+ + L^-$, (HL = C ₂ H ₄ O ₂)	4.756	-0.41	-142
ADA	$H_2L^{\pm} = H^+ + HL^{\pm}$, (H ₂ L = C ₆ H ₁₀ N ₂ O ₅)	1.59		
	$H_2L^{\pm} = H^+ + HL^-$	2.48	16.7	
	$HL^- = H^+ + L^{2-}$	6.844	12.23	-144
2-Amino-2-methyl-1,3-propanediol	$HL^+ = H^+ + L^-$, (L = C ₄ H ₁₁ NO ₂)	8.801	49.85	-44
2-Amino-2-methyl-1-propanol	$HL^+ = H^+ + L^-$, (L = C ₄ H ₁₁ NO)	9.694	54.05	≈-21
3-Amino-1-propanesulfonic acid	$HL = H^+ + L^-$, (HL = C ₃ H ₉ NO ₃ S)	10.2		
Ammonia	$NH_4^+ = H^+ + NH_3$	9.245	51.95	8
AMPSO	$HL^{\pm} = H^+ + L^-$, (HL = C ₇ H ₁₇ NO ₅ S)	9.138	43.19	-61
Arsenate	$H_3AsO_4 = H^+ + H_2AsO_4^-$	2.31	-7.8	
	$H_2AsO_4^- = H^+ + HAsO_4^{2-}$	7.05	1.7	
	$HAsO_4^{2-} = H^+ + AsO_4^{3-}$	11.9	15.9	
Barbital	$H_2L = H^+ + HL^-$, (H ₂ L = C ₈ H ₁₂ N ₂ O ₃)	7.980	24.27	-135
	$HL^- = H^+ + L^{2-}$	12.8		
BES	$HL^{\pm} = H^+ + L^-$, (HL = C ₆ H ₁₃ NO ₅ S)	7.187	24.25	-2
Bicine	$H_2L^+ = H^+ + HL^{\pm}$, (HL = C ₆ H ₁₃ NO ₄)	2.0		
	$HL^{\pm} = H^+ + L^-$	8.334	26.34	0
Bis-tris	$H_3L^+ = H^+ + H_2L^{\pm}$, (H ₃ L = C ₈ H ₁₉ NO ₅)	6.484	28.4	27
Bis-tris propane	$H_2L^{2+} = H^+ + HL^+$, (L = C ₁₁ H ₂₆ N ₂ O ₆)	6.65		
	$HL^+ = H^+ + L^+$	9.10		
Borate	$H_3BO_3 = H^+ + H_2BO_3^-$	9.237	13.8	≈-240
Cacodylate	$H_2L^+ = H^+ + HL$, (HL = C ₂ H ₆ AsO ₂)	1.78	-3.5	
	$HL = H^+ + L^+$	6.28	-3.0	-86

**THERMODYNAMIC QUANTITIES FOR THE IONIZATION REACTIONS
OF BUFFERS IN WATER (continued)**

Selected Values of Thermodynamic Quantities for the Ionization Reactions of Buffers in Water at $T = 298.15$ K and $p = 0.1$ MPa

Buffer	Reaction	pK	$\frac{\Delta_r H^\circ}{\text{kJ mol}^{-1}}$	$\frac{\Delta_r C_p^\circ}{\text{J K}^{-1} \text{mol}^{-1}}$
CAPS	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$, (HL = $\text{C}_9\text{H}_{19}\text{NO}_3\text{S}$)	10.499	48.1	57
CAPSO	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$, (HL = $\text{C}_9\text{H}_{19}\text{NO}_4\text{S}$)	9.825	46.67	21
Carbonate	$\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H}^+ + \text{HCO}_3^-$	6.351	9.15	-371
	$\text{HCO}_3^- = \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-}$	10.329	14.70	-249
CHES	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$, (HL = $\text{C}_8\text{H}_{17}\text{NO}_3\text{S}$)	9.394	39.55	9
Citrate	$\text{H}_3\text{L} = \text{H}^+ + \text{H}_2\text{L}^-$, ($\text{H}_3\text{L} = \text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)	3.128	4.07	-131
	$\text{H}_2\text{L}^- = \text{H}^+ + \text{HL}^{2-}$	4.761	2.23	-178
	$\text{HL}^{2-} = \text{H}^+ + \text{L}^{3-}$	6.396	-3.38	-254
L-Cysteine	$\text{H}_3\text{L}^+ = \text{H}^+ + \text{H}_2\text{L}$, ($\text{H}_2\text{L} = \text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2\text{S}$)	1.71	≈ -0.6	
	$\text{H}_2\text{L} = \text{H}^+ + \text{HL}^-$	8.36	36.1	≈ -66
	$\text{HL}^- = \text{H}^+ + \text{L}^{2-}$	10.75	34.1	≈ -204
Diethanolamine	$\text{HL}^+ = \text{H}^+ + \text{L}$, (L = $\text{C}_4\text{H}_{11}\text{NO}_2$)	8.883	42.08	36
Diglycolate	$\text{H}_2\text{L} = \text{H}^+ + \text{HL}^-$, ($\text{H}_2\text{L} = \text{C}_4\text{H}_6\text{O}_5$)	3.05	-0.1	≈ -142
	$\text{HL}^- = \text{H}^+ + \text{L}^{2-}$	4.37	-7.2	≈ -138
3,3-Dimethylglutarate	$\text{H}_2\text{L} = \text{H}^+ + \text{HL}^-$, ($\text{H}_2\text{L} = \text{C}_7\text{H}_{12}\text{O}_4$)	3.70		
	$\text{HL}^- = \text{H}^+ + \text{L}^{2-}$	6.34		
DIPSO	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$, (HL = $\text{C}_7\text{H}_{17}\text{NO}_6\text{S}$)	7.576	30.18	42
Ethanolamine	$\text{HL}^+ = \text{H}^+ + \text{L}$, (L = $\text{C}_2\text{H}_7\text{NO}$)	9.498	50.52	26
N-Ethylmorpholine	$\text{HL}^+ = \text{H}^+ + \text{L}$, (L = $\text{C}_6\text{H}_{13}\text{NO}$)	7.77	27.4	
Glycerol 2-phosphate	$\text{H}_2\text{L} = \text{H}^+ + \text{HL}^-$, ($\text{H}_2\text{L} = \text{C}_3\text{H}_9\text{NO}_6\text{P}$)	1.329	-12.2	-330
	$\text{HL}^- = \text{H}^+ + \text{L}^{2-}$	6.650	-1.85	-212
Glycine	$\text{H}_2\text{L}^+ = \text{H}^+ + \text{HL}^\pm$, (HL = $\text{C}_2\text{H}_5\text{NO}_2$)	2.351	4.00	-139
	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$	9.780	44.2	-57
Glycine amide	$\text{HL}^+ = \text{H}^+ + \text{L}$, (L = $\text{C}_2\text{H}_6\text{N}_2\text{O}$)	8.04	42.9	
Glycylglycine	$\text{H}_2\text{L}^+ = \text{H}^+ + \text{HL}^\pm$, (HL = $\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_3$)	3.140	0.11	-128
	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$	8.265	43.4	-16
Glycylglycylglycine	$\text{H}_2\text{L}^+ = \text{H}^+ + \text{HL}^\pm$, (HL = $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{N}_3\text{O}_4$)	3.224	0.84	
	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$	8.090	41.7	
HEPES	$\text{H}_2\text{L}^+ = \text{H}^+ + \text{HL}^\pm$, (HL = $\text{C}_8\text{H}_{18}\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$)	≈ 3.0		
	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$	7.564	20.4	47
HEPPS	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$, (HL = $\text{C}_6\text{H}_{20}\text{N}_2\text{O}_4\text{S}$)	7.957	21.3	48
HEPPSO	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$, (HL = $\text{C}_9\text{H}_{20}\text{N}_2\text{O}_5\text{S}$)	8.042	23.70	47
L-Histidine	$\text{H}_3\text{L}^{2+} = \text{H}^+ + \text{H}_2\text{L}^+$, (HL = $\text{C}_6\text{H}_9\text{N}_3\text{O}_2$)	1.5 ₁	3.6	
	$\text{H}_2\text{L}^+ = \text{H}^+ + \text{HL}$	6.07	29.5	176
	$\text{HL} = \text{H}^+ + \text{L}^-$	9.34	43.8	-233
Hydrazine	$\text{H}_2\text{L}^{2+} = \text{H}^+ + \text{HL}^+$, (L = H_4N_2)	-0.99	38.1	
	$\text{HL}^+ = \text{H}^+ + \text{L}$	8.02	41.7	
Imidazole	$\text{HL}^+ = \text{H}^+ + \text{L}$, (L = $\text{C}_3\text{H}_4\text{N}_2$)	6.993	36.64	-9
Malcate	$\text{H}_2\text{L} = \text{H}^+ + \text{HL}^-$, ($\text{H}_2\text{L} = \text{C}_4\text{H}_4\text{O}_4$)	1.92	1.1	≈ -21
	$\text{HL}^- = \text{H}^+ + \text{L}^{2-}$	6.27	-3.6	≈ -31
2-Mercaptoethanol	$\text{HL} = \text{H}^+ + \text{L}^-$, (HL = $\text{C}_2\text{H}_6\text{OS}$)	9.7 ₅	26.2	
MES	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$, (HL = $\text{C}_6\text{H}_{13}\text{NO}_4\text{S}$)	6.270	14.8	5
Methylamine	$\text{HL}^+ = \text{H}^+ + \text{L}$, (L = CH_5N)	10.645	55.34	33
2-Methylimidazole	$\text{HL}^+ = \text{H}^+ + \text{L}$, (L = $\text{C}_4\text{H}_6\text{N}_2$)	8.0 ₁	36.8	
MOPS	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$, (HL = $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{NO}_4\text{S}$)	7.184	21.1	25
MOPSO	$\text{H}_2\text{L}^+ = \text{H}^+ + \text{HL}^\pm$, (HL = $\text{C}_7\text{H}_{15}\text{NO}_5\text{S}$)	0.060		
	$\text{HL}^\pm = \text{H}^+ + \text{L}^-$	6.90	25.0	≈ 38
Oxalate	$\text{H}_2\text{L} = \text{H}^+ + \text{HL}^-$, ($\text{H}_2\text{L} = \text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$)	1.27	-3.9	≈ -231
	$\text{HL}^- = \text{H}^+ + \text{L}^{2-}$	4.266	7.00	-231
Phosphate	$\text{H}_2\text{PO}_4^- = \text{H}^+ + \text{HPO}_4^{2-}$	2.148	-8.0	-141
	$\text{H}_2\text{PO}_4^- = \text{H}^+ + \text{HPO}_4^{2-}$	7.198	3.6	-230
	$\text{HPO}_4^{2-} = \text{H}^+ + \text{PO}_4^{3-}$	12.35	16.0	-242

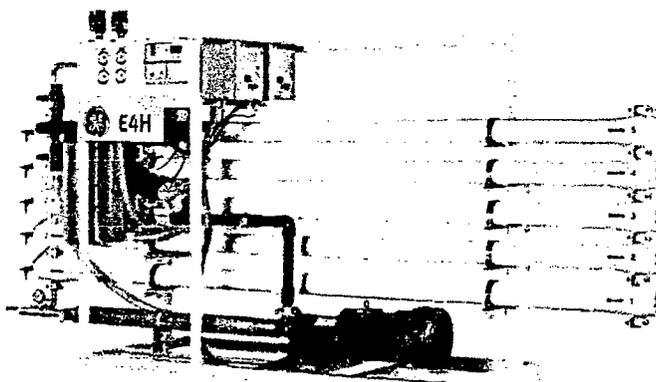
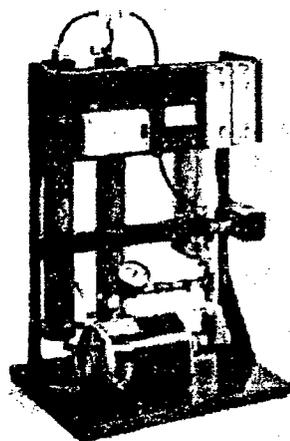
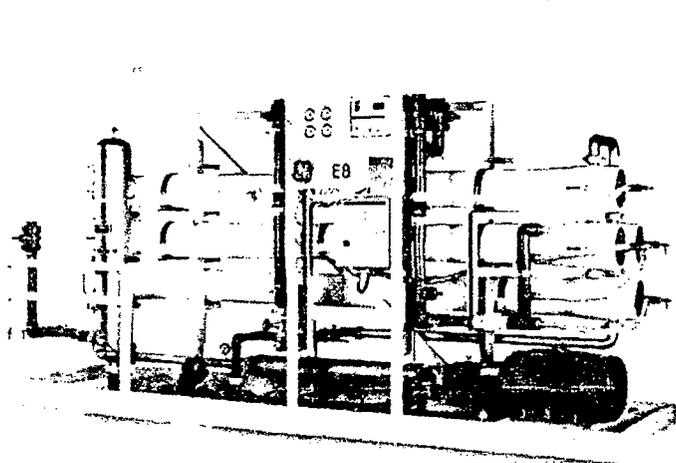
**THERMODYNAMIC QUANTITIES FOR THE IONIZATION REACTIONS
OF BUFFERS IN WATER (continued)**

Selected Values of Thermodynamic Quantities for the Ionization Reactions of Buffers in Water at $T = 298.15$ K and $p = 0.1$ MPa

Buffer	Reaction	pK	$\Delta_r H^\circ$ kJ mol ⁻¹	$\Delta_r C_p^\circ$ J K ⁻¹ mol ⁻¹
Phthalate	$H_2L = H^+ + HL^-$, ($H_2L = C_8H_6O_4$)	2.950	-2.70	-91
	$HL^- = H^+ + L^{2-}$	5.408	-2.17	-295
Piperazine	$H_2L^{2+} = H^+ + HL^+$, ($L = C_4H_{10}N_2$)	5.333	31.11	86
	$HL^+ = H^+ + L$	9.731	42.89	75
PIPES	$HL^\pm = H^+ + L^-$, ($HL = C_8H_{18}N_2O_6S_2$)	7.141	11.2	22
POPSO	$HL^\pm = H^+ + L^-$, ($HL = C_{10}H_{22}N_2O_8S_2$)	≈8.0		
Pyrophosphate	$H_4P_2O_7 = H^+ + H_3P_2O_7^-$	0.83	-9.2	≈-90
	$H_3P_2O_7^- = H^+ + H_2P_2O_7^{2-}$	2.26	-5.0	≈-130
	$H_2P_2O_7^{2-} = H^+ + HP_2O_7^{3-}$	6.72	0.5	-136
	$HP_2O_7^{3-} = H^+ + P_2O_7^{4-}$	9.46	1.4	-141
Succinate	$H_2L = H^+ + HL^-$, ($H_2L = C_4H_6O_4$)	4.207	3.0	-121
	$HL^- = H^+ + L^{2-}$	5.636	-0.5	-217
Sulfate	$HSO_4^- = H^+ + SO_4^{2-}$	1.987	-22.4	-258
Sulfite	$H_2SO_3 = H^+ + HSO_3^-$	1.857	-17.80	-272
	$HSO_3^- = H^+ + SO_3^{2-}$	7.172	-3.65	-262
TAPS	$HL^\pm = H^+ + L^-$, ($HL = C_7H_{17}NO_6S$)	8.44	40.4	15
TAPSO	$HL^\pm = H^+ + L^-$, ($HL = C_7H_{17}NO_7S$)	7.635	39.09	-16
L(+)-Tartaric acid	$H_2L = H^+ + HL^-$, ($H_2L = C_4H_6O_6$)	3.036	3.19	-147
	$HL^- = H^+ + L^{2-}$	4.366	0.93	-218
TES	$HL^\pm = H^+ + L^-$, ($HL = C_6H_{15}NO_6S$)	7.550	32.13	0
Tricine	$H_2L^+ = H^+ + HL^\pm$, ($HL = C_8H_{13}NO_3$)	2.023	5.85	-196
	$HL^\pm = H^+ + L^-$	8.135	31.37	-53
Triethanolamine	$HL^+ = H^+ + L$, ($L = C_6H_{15}NO_3$)	7.762	33.6	50
Triethylamine	$HL^+ = H^+ + L$, ($L = C_6H_{15}N$)	10.72	43.13	151
Tris	$HL^+ = H^+ + L$, ($L = C_4H_{11}NO_3$)	8.072	47.45	-59

ANEXO L

E-Series Reverse Osmosis Machines



Effective April 1 2009
Revision 1



imagination at work

E8 Series

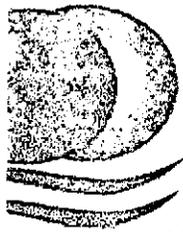
Reverse Osmosis Machines

60 Hz Models

Model Description	RO Unit Capacity ± 15% gpd (m ³ /h)	Motor Voltage	Control Circuit Voltage	Part Number	List Price US\$
Economy (ECN)					
E8-57K-ECN-6	57,600 (9.1)	460 VAC, 3-Phase	115 VAC, 1-Phase	1202846	41,769.00
E8-86K-ECN-6	86,400 (13.6)	460 VAC, 3-Phase	115 VAC, 1-Phase	1202850	54,835.00
E8-108K-ECN-6	108,000 (17.0)	460 VAC, 3-Phase	115 VAC, 1-Phase	1202833	59,441.00
E8-144K-ECN-6	144,000 (22.7)	460 VAC, 3-Phase	115 VAC, 1-Phase	1202835	70,686.00
Deluxe (DLX)					
E8-57K-DLX-6	57,600 (9.1)	460 VAC, 3-Phase	115 VAC, 1-Phase	1202284	56,763.00
E8-86K-DLX-6	86,400 (13.6)	460 VAC, 3-Phase	115 VAC, 1-Phase	1202286	69,829.00
E8-108K-DLX-6	108,000 (17.0)	460 VAC, 3-Phase	115 VAC, 1-Phase	1202287	74,435.00
E8-144K-DLX-6	144,000 (22.7)	460 VAC, 3-Phase	115 VAC, 1-Phase	1202288	85,680.00

50 Hz Models

Model Description	RO Unit Capacity ± 15% gpd (m ³ /h)	Motor Voltage	Control Circuit Voltage	Part Number	List Price US\$
Economy (ECN)					
E8-57K-ECN-5	57,600 (9.1)	380 VAC, 3-Phase	220 VAC, 1-Phase	1202845	41,769.00
E8-86K-ECN-5	86,400 (13.6)	380 VAC, 3-Phase	220 VAC, 1-Phase	1202849	54,835.00
E8-108K-ECN-5	108,000 (17.0)	380 VAC, 3-Phase	220 VAC, 1-Phase	1202831	59,441.00
E8-144K-ECN-5	144,000 (22.7)	380 VAC, 3-Phase	220 VAC, 1-Phase	1202834	70,686.00
Deluxe (DLX)					
E8-57K-DLX-5	57,600 (9.1)	380 VAC, 3-Phase	220 VAC, 1-Phase	1202292	56,763.00
E8-86K-DLX-5	86,400 (13.6)	380 VAC, 3-Phase	220 VAC, 1-Phase	1202294	69,829.00
E8-108K-DLX-5	108,000 (17.0)	380 VAC, 3-Phase	220 VAC, 1-Phase	1202295	74,435.00
E8-144K-DLX-5	144,000 (22.7)	380 VAC, 3-Phase	220 VAC, 1-Phase	1202296	85,680.00



mercantil
interamericana S.A.C.
TECNOLOGÍAS EN AGUA Y PROCESOS

Cot. N° 456/09

Surquillo, 01 de Diciembre del 2009

Señor:
Miguel A. Ubillus Borja

E - mail : miguel.ubillus@gmail.com

Estimados Señor:
Nos es grato saludarlos y a la vez hacerles llegar nuestra propuesta técnica económica por el siguiente repuesto:

ÍTEM	CANT	UNID	DESCRIPCIÓN	MARCA	PRECIO UNITARIO (US\$)	PRECIO TOTAL (US\$)
01	1.0	Und.	Bomba de inyección de químicos Modelo TeknaEvo Tanque de preparación 200 litros Sensor de nivel	Seko	1,000.00	1,000.00

PRECIO TOTAL US\$ 1,000.00 Inc. IGV

CONDICIONES DE VENTA

FORMA DE PAGO : Contado - Contraentrega

Banco de Crédito del Perú : Cta. Cte US\$. N° 194-0852532-0-33

TIEMPO DE ENTREGA : 03 días después de recibida su Orden de Compra
(Previa Coordinación)

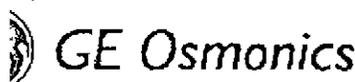
VALIDEZ DE LA OFERTA : 15 días

Mercantil Interamericana S.A. asegura soporte técnico, asesoría técnica, y repuestos permanentes.

Atentamente,

Ing. Roberto Anaya Diaz
Div. Ingeniería y Proyectos

distribuidor:

Jr. Antenor Rizo Patrón N° 157 Lima 34 - Perú
Telfs: 444-8215 / 242-2794 Fax: 444-8376
E-mail: merinsa@merinsa.com
www.merinsa.com

ANEXO M



Desinfección de Agua Potable con Cloro y Dióxido de Cloro

Un bosquejo de diferentes métodos



por W. Roeske, C. Müller y Günzburg

Debido al turismo mundial y al contacto con potenciales áreas infestadas, nuestra agua potable está expuesta al peligro, en todo momento, de las higiene de epidemia. Mientras que en la mayoría de los países industrializados las epidemias causadas por agua contaminada disminuyeron inmediatamente después de la introducción de la desinfección del agua, el 80 por ciento de las enfermedades y epidemias en el 3° Mundo son el resultado de pobres suministros de agua potable, de acuerdo a los estudios de la Organización Mundial de la Salud (OMS).

La tarea de la desinfección del agua potable es la eliminación de las bacterias patógenas y la inactivación de los virus patógenos. En la práctica, la cloración ha probado—a la fecha—ser un método confiable de desinfección en los tratamientos de agua potable y de exitosamente evitar la reaparición de bacterias en las tuberías. En todo lugar en que la cloración ha sido usada para la desinfección, ya no han vuelto a ocurrir las severas epidemias debidas al agua potable contaminada.

Para la desinfección del agua potable, los siguientes desinfectantes pueden ser usados en Alemania, de acuerdo a la nueva Acta 2001 del agua potable: cloro gaseoso, hipocloritos de sodio y calcio, dióxido de cloro y ozono. El cloro gaseoso, el hipoclorito de sodio, el hipoclorito de calcio y el dióxido de cloro son especialmente convenientes como desinfectantes del agua potable. La tabla 1 muestra una lista de estos desinfectantes.

En lo que concierne a la importancia del agua como transmisora de infecciones, se dispone de un conocimiento bien fundado. Una gran cantidad de problemas es (que afectan especialmente al tracto gastrointestinal) pueden ser transmitidos por la vía del agua potable. Estos incluyen la tifoidea, paratifoidea, cólera, diarrea con vómito, shigelosis, leptospirosis y lombrices, así como problemas causados por virus, como la hepatitis.

Sistemas de dosificación de cloro gaseoso

Hoy en día, todos los cloradores operan generalmente bajo el principio de vacío total y solamente son usados para la cloración directa. En el tratamiento de agua, cloración indirecta significa que una solución de cloro es producida in situ utilizando cloro gaseoso y agua. Esta solución sirve como desinfectante.

Desde la introducción de cloradores al vacío total, las objeciones en contra del uso del cloro gaseoso, con respecto a la seguridad, han ido a menos.

Vacío total significa que existe un vacío en toda la instalación, por ejemplo: desde el cilindro de cloro, hasta el punto de inyección. Afortunadamente no puede haber una fuga de cloro en caso de una falla, ni desde el suministro de cloro ni por la línea que va al inyector. Una fuga sólo ocasionará que el aire entre al sistema, de modo que el riesgo de que el cloro gaseoso se escape, queda

excluido. Así, el principio de vacío total es garantía de óptima seguridad.

Iniciando desde la válvula que se conecta al cilindro, la presión del cloro gaseoso en el cilindro, es reducida desde aproximadamente 6 bar hasta un vacío de 850 mbar abs. De esta forma se asegura que no habrá escape de cloro gaseoso, en el caso de una fuga, o incluso por la ruptura de una línea. Mediante una unidad de cambio automático de cilindro es posible cambiar de cilindros vacíos a llenos, asegurando una dotación ininterrumpida de cloro gaseoso. Como equipo adicional en las salas donde el cloro se almacena ya medido, se debe proveer la instalación de un detector de fugas.

Preparación y medición de un sistema de hipoclorito de sodio

En la cloración de los volúmenes más pequeños de agua, se puede usar hipoclorito de sodio para la desinfección del agua potable. Se dispone comercialmente como una solución al 150-170 g/l de cloro efectivo y puede ser adquirido desde los proveedores químicos. Estas soluciones de hipoclorito se pueden almacenar sólo por un período de tiempo limitado. Se descomponen gradualmente y el grado de cloro efectivo disminuye. La descomposición se acelera por la exposición a la luz, el calor y por impurezas tales como las trazas de metal. La mayoría de las bombas de diafragma, con "degas", que son controladas por un sistema automático de medición de residual y de control, dosifican

Tabla 1. Desinfectantes para el agua potable

Desinfectante	Notación química	Estado de agregación	Características comerciales / Características de aplicación
Cloro gaseoso	Cl ₂	Gaseoso	Licuada en cilindros de acero de 50kgs y 65 kgs ó tanques de acero de 500 kg o 1,000 kg; términos de embarque de acuerdo a la DIN EN 937 Φ 99.5% Cl ₂ máx., 20 ppm H ₂ O, adición como soluciones acuosas con 0.3-3 g/L Cl ₂ o producido en sitio por electrólisis por medio de cloruro de sodio ó ácido clorhídrico.
Hipoclorito de sodio	NaClO ₂	Líquido, como solución acuosa	Solución comercial con 150-170 g/L de cloro efectivo, la solución de hipoclorito de sodio contiene aprox. 12 g/L de sosa cáustica y por consiguiente es fuertemente alcalina, valor de pH de 11.5-12.5; términos de embarque de acuerdo a la DIN EN 901, contiene como subproducto aprox. 140 g/L de cloruro de sodio (NaCl) y aprox. 5 g/L de clorato de sodio (NaClO ₃) así como bromato, es difícil de almacenar, se descompone. o Producido en sitio por electrólisis por medio de una solución de cloruro de sodio. Concentración efectiva en la solución de 8.25 g/L dependiendo del proceso de electrólisis. La solución de hipoclorito producida por medio de la salmuera tiene un valor de pH de 9-10.
Hipoclorito de calcio	Ca(ClO) ₂	Sólido	Comercialmente disponible en polvo, gránulos o tabletas; términos de embarque según la DIN EN 900, el hipoclorito de calcio debe contener un mínimo de 65% de cloro activo, además contiene 4-7% de sustancias no solubles en agua y un mínimo de 5% de H ₂ O, se usa como solución al 1-5%, el valor de pH de la solución es 10-11.
Dióxido	ClO ₂	Líquido como	Generado en sitio por medio de cloro gas y solución de clorito de sodio o por medio de ácido de cloro solución acuosa clorhídrico y solución de clorito de sodio, la concentración de la solución es de 0.5-4.0 g/l ClO ₂ .

reactivo directamente en el flujo del agua.

Las desventajas del limitado tiempo de macenamiento, pueden excluirse produciendo directamente la solución, en el sitio de uso. Aquí se preparan soluciones de una más baja concentración, que son consumidas sin tiempos intermedios de macenamiento tan largos. Para su producción, son más convenientes los sistemas electrolíticos de cloración en sitio, ya sea por electrólisis de celda tubular ó electrólisis de membrana.

Los procesos de membrana de los sistemas modernos de cloración electrolítica, operan como sigue: Como en todos los electrolizadores, la celda electrolítica es el corazón del sistema. Consiste de un compartimento de ánodo y cátodo, separados por una membrana. Electrodo recientemente desarrollados, especialmente cubiertos, combinados con un sistema integral para la limpieza de la membrana, aseguran la larga vida de servicio de las celdas.

Una solución saturada de salmuera es alimentada desde el tanque de disolución dentro del compartimento del ánodo. El compartimento del cátodo se alimenta con agua suavizada. El agua es reducida a iones H⁺ e hidrógeno gaseoso (H₂), en el

compartimento del cátodo, mientras los iones cloruro (Cl⁻) son oxidados para formar cloro gaseoso (Cl₂) en el compartimento del ánodo. Los iones de sodio pasan del compartimento del ánodo a través de la membrana, dentro del compartimento del cátodo para formar hidróxido de sodio (NaOH) con los iones OH⁻. Una de las características especiales de esta tecnología es que la débil salmuera que abandona el compartimento del ánodo es circulada junto con el cloro—brevemente llamada anolito—en un circuito cerrado. El circuito cerrado consiste del separador de la celda del electrolizador y del cloro. Al contrario de los procesos convencionales—normales de membrana, la salmuera débil no es regresada al tanque de disolución de la sal. De esta manera, el cloro no puede entrar al tanque de disolución de sal ni escapar de allí, como gas, hacia el aire ambiental. No se necesita de una corrección de pH con hidróxido de sodio, requerida en los procesos normales de membrana. En la celda del electrolizador, el hidróxido de sodio y el cloro son generados a una proporción molar de 1:1. Los productos son pasados al reactor—sin mayor trámite. En el reactor, el hidróxido de sodio y el cloro gaseoso finalmente reaccionan para formar hipoclorito de sodio. Mediante dos

cambiadores de calor—en el circuito del anolito y en el reactor—se recupera una parte de la energía. La solución de hipoclorito de sodio abandona el reactor con una concentración de cloro de 25 g/l a 25°C máx., y es descargada en el tanque de suministro. La solución generada de hipoclorito de sodio se caracteriza por su excelente estabilidad y es dosificada directamente desde el tanque de suministro al agua en tratamiento. El taponamiento de la garganta del inyector, por precipitación de las durezas, puede evitarse usando una garganta de inyección de diseño especial. El sistema montado en su totalidad en patín, está construido a modo de conformar una unidad muy compacta con SPC, suavizador de agua y rectificador, como módulos funcionales, y está protegido de accesos indeseados por la cubierta de un bloque celular.

Otro proceso de electrólisis de membrana que produce ácido hipocloroso directamente del ácido clorhídrico, opera como sigue: El ácido clorhídrico diluido es convertido en cloro (Cl₂) e hidrógeno (H₂) por electrólisis. A la salida de la celda del Electrolizador, el cloro es descargado en una línea de desviación de agua potable y queda disponible de inmediato como solución de ácido hipocloroso. El agua

de derivación es después regresada a la fuente principal. El hidrógeno separado es descargado, por una línea, al cielo abierto. Para la formación del ácido hipocloroso, normalmente se usa ácido clorhídrico diluido 9 por ciento o al 18 por ciento.

Sistema de dosificación de hipoclorito de calcio

El hipoclorito de calcio es un compuesto diluido de cloro, disponible en el comercio en forma de tabletas o de gránulos. Para preparar una solución medidora, se usan 65 gránulos del 65 al 75 por ciento de cloro activo, dependiendo del producto.

Deben utilizarse tanques de disolución y edición, de fondo inclinado, en la preparación de la solución medidora, ya que el hipoclorito de calcio contiene cerca de un 10 por ciento de materiales no solubles. Estos se depositan en el fondo inclinado de los tanques, después de un tiempo de asentamiento de unos 30 minutos, se obtiene una solución pura de hipoclorito de calcio, con la cual se puede llenar el tanque de suministro. Para su dosificación se prefieren bombas de diafragma, que son controladas por un sistema automático de medición y control.

Dióxido de cloro

Se sabe que desde 1974 que, durante la cloración del agua potable, los trihalometanos (haloformas) pueden ser producidos por una reacción secundaria. Los trihalometanos pueden formarse de existir materias orgánicas que son halogenadas por la adición de cloro. Como los trihalometanos (THM) no son deseables en el agua potable, se define un límite a 0.05 mg/l, en el Acta del Agua potable.

Para la formación de trihalometanos (THM) son importantes tanto la cantidad de cloro usada, como el tiempo de reacción. Por un preciso control de la cloración y la observación de ciertas condiciones de reacción, la reacción de cloración puede ser eliminada. Si aún fuera excedido el valor límite de los 0.05 mg/l, el dióxido de cloro (ClO_2) debe ser usado en lugar del cloro. Con el ClO_2 o se forman los THM's; además el dióxido de cloro tiene otras ventajas. Las sustancias que producen olor y sabor en el agua, causadas por ejemplo por fenoles, algas o sus productos de descomposición, pueden ser oxidadas por el dióxido de cloro, de modo que posteriormente ya no puedan ser organolépticamente percibidas.

Al contrario del cloro, el ClO_2 no forma

los clorofenoles de desagradable olor en combinación con los fenoles. Algunas veces el agua a ser desinfectada contiene amoníaco, el cual puede afectar la desinfección con el cloro. En estos casos, se recomienda el uso del dióxido de cloro, ya que no reacciona con el amoníaco ni con otros compuestos nitrogenados.

El hierro bivalente y el manganeso son oxidados por el dióxido de cloro, ya que el dióxido de cloro ataca también a las sustancias orgánicas complejas. El efecto esporicida y virucida del dióxido de cloro se compara mejor con el cloro a la misma concentración. Como el dióxido de cloro tiene propiedades desinfectantes a pH's de 8-9, es apropiado para la desinfección del agua a los valores de pH más altos. Esta es una ventaja mayor del dióxido de cloro en relación al cloro, puesto que el efecto desinfectante del cloro decrece al aumentar el pH.

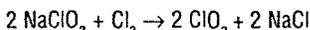
El dióxido de cloro es muy estable en el agua. Después de completarse su consumo, se puede mantener un residual por un período de tiempo más largo, de modo que aún en el caso de sistemas de distribución extendidos, se asegure una concentración activa incluso en lugares remotos y se pueden evitar con efectividad los recrecimientos bacterianos.

Dadas sus propiedades físicas y físico-químicas, el dióxido de cloro es sólo generado en sitio, como solución acuosa, por el uso de equipo especial. El dióxido de cloro es producido ya sea por medio de clorito de sodio y cloro como activador o por medio de clorito de sodio y un ácido—preferentemente el clorhídrico.

Se dispone de los generadores de dióxido de cloro en diferentes gamas de capacidad: de 5 a 250 g/h ClO_2 , hasta los sistemas para producir hasta 5 kg/h de dióxido de cloro.

Sistema de dióxido de cloro tipo clorito/cloro

Una solución de clorito y cloro gaseoso se usa como producto básico en la preparación de dióxido de cloro por el proceso clorito/cloro. La generación se lleva a cabo de acuerdo a las siguientes reacciones:



Clorito de sodio + cloro gaseoso \rightarrow dióxido de cloro + cloruro de sodio

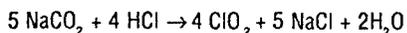
Para producir 1,000 g de ClO_2 , se requieren, teóricamente, 1,240 g de NaClO_2 y 555 g de Cl_2 .

Para producir la concentración requerida de solución de cloro de 3.5 g/l mín., se necesita un suministro de agua de proceso, con suficiente presión inicial. La capacidad de agua en l/h se ajusta con precisión en el rotámetro y es regulada eléctricamente por un contacto de lengüeta. La correspondiente capacidad de cloro en g/h es ajustada en todos los cloradores al vacío total y controlada por el interruptor de vacío. Con la alta concentración de cloro de 3.5 g/l, se prepara una solución de cloro fuertemente ácida, al tiempo que la solución de clorito de sodio es cebada desde su tanque de descarga (300g/l) mediante una bomba dosificadora y es mezclada con la solución de cloro directamente antes de entrar a la torre de reacción. La solución de dióxido de cloro es diluida con agua, antes de pasar al tanque de almacenamiento. La cantidad de agua agregada depende de la concentración deseada en la aplicación de dióxido de cloro, que por razones de seguridad, deberá ser menor de 4 g/l de ClO_2 . Preferentemente debe seleccionarse una concentración de 2 g/l de ClO_2 y el flujo de agua de dilución requerido debe ser ajustado con precisión en el rotámetro.

Todas las funciones del generador totalmente automático, son controladas por una caja de control equipada con un diagrama de bloques, en mímica. Una falla del módulo será indicada en la mímica del diagrama, el sistema será puesto en paro y un mensaje de error será enviado.

Sistema de dióxido de cloro—clorito/ácido clorhídrico

Además, el dióxido de cloro puede ser producido por clorito de sodio ácido clorhídrico, utilizando soluciones comerciales. La generación se lleva a cabo de acuerdo a la siguiente reacción química:



clorito de sodio + ácido clorhídrico \rightarrow + dióxido de cloro + cloruro de sodio + agua.

Para producir 1,000 g de ClO_2 , teóricamente se requieren 1,676 g de NaClO_2 y 540 g de HCl.

La solución de dióxido de cloro, es generada por el siguiente proceso, de las soluciones diluidas: La solución de clorito de sodio (7.5 por ciento) y de ácido clorhídrico (9 por ciento), son aportadas, cada una, por

La bomba dosificadora de diafragma desde tanques normales de carga o de almacenamiento y descargadas dentro de la torre de cloración. La dosificación exacta de los dos reactivos básicos es monitoreada y controlada por dos sensores de flujo. El exceso de ácido clorhídrico en el reactor, asegura una alta eficiencia de descarga: clorito → dióxido de cloro. La solución de dióxido de cloro reducida después de un tiempo definido de reacción de cerca de 15 minutos, en operación continua, tiene una concentración de 20 g/l de ClO_2 . La solución es agregada al agua de reposo y después pasada a un mezclador estático. Subsecuentemente el agua de reposo, ahora con una concentración de ClO_2 de 0.05-0.30 g/l, es descargada dentro de la corriente principal de nueva cuenta. El sistema es monitoreado y controlado en su totalidad por un SPC. Si el generador de dióxido de cloro va a suministrar varios puntos de aplicación, es también posible usar una operación al tandeo (batch).

El dióxido de cloro puede también ser generado desde soluciones concentradas. En este caso, se usa una solución de clorito de sodio al 24 por ciento y una de ácido clorhídrico al 33 por ciento. La dilución de las soluciones concentradas y la preparación de la solución de ClO_2 , se lleva a cabo, de la manera siguiente: La solución de clorito de sodio y el ácido clorhídrico es cebada mediante un inyector y simultáneamente mezclada y descargada en el reactor. La solución de ClO_2 con una concentración de 15-20 g/l-preparada en el reactivo diluida subsecuentemente a 2-3 g/l de ClO_2 y pasada al tanque de tandeo. Debido al monitoreo especial tanto eléctrico como del proceso, queda garantizada la seguridad de la operación del sistema. La adición del agua siempre será requerida para mezclar las dos soluciones concentradas.

Sistemas de medición y control para la solución de cloro y de dióxido de cloro

Para adherirse a la concentración de cloro en el agua potable, prescrita por la ley, la cloración deberá adaptarse a la cantidad de agua y al consumo de cloro.

Para cloro, un máximo de 1.2 g/l es lo prescrito. Sin embargo, el valor de cloro no debe exceder 0.3 g/l en el punto de suministro dentro de la red del agua potable.

Un máximo de 0.4 g/l de dióxido de cloro debe ser agregado al agua potable. En el caso de un agua correctamente tratada, 0.15-0.20 mg/l normalmente es suficiente. En general,

la cantidad agregada deberá ser ajustada y minimizada a la aplicación individual. Los siguientes, son los posibles modos de control:

- La dosificación como una función de la cantidad, si el consumo de cloro por el agua es constante y el suministro del agua es variable. La cantidad de solución de cloro o de dióxido de cloro agregada depende del flujo del volumen total del agua y es controlado por una señal de flujo análoga o digital.

- La dosificación depende del valor del residual medido, si el suministro del agua es constante pero varía el consumo de cloro/dióxido de cloro. La cantidad de cloro o dióxido que debe agregarse es determinada por la concentración medida. En este caso deberá ser conectada una señal de control externo. Una medición precisa del nivel de cloro/dióxido de cloro es una condición para la dosificación automática, de acuerdo al valor del residual. Un sistema automático de dosificación cloro/dióxido de cloro sólo opera satisfactoriamente si las mediciones son fieles, continuas y suficientemente sensitivas. En la práctica, es importante que el equipo de medición cloro/dióxido de cloro, suministre también valores exactos por más largos períodos de tiempo, sin mayores maniobras de mantenimiento. Un equipo de medición operando de acuerdo al principio de depolarización, y que incluya un sistema de limpieza para electrodo, ha comprobado ser confiable en la práctica.

- Dosificación por control combinado: El mejor y más preciso método para el control de la calidad del agua potable es el uso de las dos cantidades medidas (flujo de agua y residual de cloro/dióxido de cloro). Un control externo calcula una tasa de control como función de una cantidad a controlar (ejemplo: señal de flujo). Esta cantidad a controlar resulta en una constante cantidad medida, la cual es controlada, adicionalmente, en base a un valor previamente ajustado. (ejemplo: concentración de ClO_2).

La solución inicial de cloro o de dióxido de cloro en operación al tandeo, puede ser dosificada ya sea por bombas dosificadoras o por inyectores succionadores. En la práctica los inyectores han probado ser confiables en la dosificación de la solución de cloro/dióxido de cloro...ésto por la limitada vida de servicio de los diafragmas de las bombas dosificadoras.

La solución es inyectada por el inyector succionador, de la manera siguiente: El agua de proceso genera un vacío en el inyector (principio del venturi), con la ayuda del vacío, la solución de ClO_2 es extraída del tanque de

suministro mediante una válvula que controla el flujo, preconnectada a un rotámetro. El flujo a ser medido se ajusta en la válvula de control de flujo y puede ser leído desde el rotámetro. El flujo de la solución es controlado automáticamente como una función del volumen de agua o el residual de dióxido de cloro. En el inyector, la solución extraída de dióxido de cloro es mezclada con el agua y dosificada a través de la garganta de inyección, dentro del agua a ser tratada.

Programas remotos de diagnóstico permiten la intergración de los datos procesados y de las cantidades medidas dentro de sistemas de más alta visualización. Es también posible enviar mensajes definidos al usuario hacia cualquier medio, tal como el teléfono. El programa de diagnóstico remoto es configurado de acuerdo a las especificaciones del usuario.

Conclusión

Por muchas décadas, el cloro ha probado ser un agente extremadamente confiable para una desinfección segura.

Ya que—durante mucho tiempo—el cloro no ha podido ser reemplazado por un desinfectante más conveniente, la tecnología sistemática, a este medio, se ha desarrollado a la alta normatividad de los tiempos actuales, acatando cualquier requerimiento de seguridad.

Como resultado de la tecnología de control, medición y dosificación, el cloro puede ser usado a modo de que los valores límites, definidos en el Acta del Agua Potable, no sean excedidos, al mismo tiempo que se garantiza una segura desinfección.

En aquellos casos en que se formaran en el agua, sustancias de sabor indeseable combinadas con el cloro, se puede usar dióxido de cloro como alternativa. Además el ClO_2 posee la ventaja de asegurar la desinfección a altos valores de pH. Por lo consiguiente, el dióxido de cloro es más conveniente para la desinfección del agua, en la industria de alimentos y bebidas. □

Acerca de los autores

Autores: Ing. quí. dipl. Wolfgang Roeske, Dipl. BrM Christoph Müller, Günzburg. Para mayores detalles, referirse a: <http://brauwelt.de>—"Autorenverzeichnis" (lista de autores)

Visite

www.agualatinoamerica.com

ANEXO N



Mejoramiento de la calidad del agua de salida del sistema de membrana de ósmosis inversa (RO) mediante electrodesionización (EDI/CDI)* mediante contactores de membrana Liqui-Cel

Las membranas de RO en combinación con la tecnología EDI/CDI están logrando una rápida aceptación en la producción de agua de alta pureza. La unión de las dos tecnologías ofrece muchas ventajas al diseño de un sistema de lecho mixto de RO. El rendimiento global de un sistema RO-EDI/CDI puede mejorarse mediante la eliminación de dióxido de carbono disuélto entre las unidades de RO y EDI/CDI. Los contactores de membrana se usan normalmente junto con estas tecnologías para brindar un sistema de agua de alta pureza con poco mantenimiento y sin productos químicos.

La siguiente información describe los principios generales de los contactores de membrana y la EDI/CDI y explica la química básica del agua involucrada en este proceso.

EDI/CDI

La EDI es una tecnología que está logrando una rápida aceptación en la industria del tratamiento del agua. Esta tecnología consiste en un dispositivo de membrana que combina la tecnología convencional de resina de intercambio iónico y corriente eléctrica. La corriente eléctrica se utiliza para regenerar continuamente la resina, con lo que se elimina la necesidad de regeneración química periódica.

Usualmente, esta tecnología se combina con una membrana de RO. Este concepto ofrece varias ventajas sobre el diseño convencional de lecho mixto de RO.

Un sistema RO-EDI/CDI produce continuamente agua de alta calidad.

No es necesario apagarlo para la regeneración. Esto elimina la filtración de iones que se produce al comienzo y al final del ciclo de regeneración en un lecho mixto. Asimismo, este proceso continuo simplifica la operación. Ya no son necesarios los operadores ni los procedimientos operativos asociados con los ciclos de regeneración recurrente.

Otra ventaja significativa que se logró con EDI/CDI es que no se requieren productos químicos para la regeneración. Esto elimina los costos de almacenamiento y desecho de los productos químicos peligrosos utilizados en la regeneración y las corrientes de desecho asociadas con la regeneración de un sistema convencional de resina de intercambio iónico.

En los últimos 10 años, la EDI/CDI ha evolucionado desde las aplicaciones piloto a pequeña escala hasta las aplicaciones industriales de gran flujo. Tradicionalmente este concepto estaba dirigido a la producción de agua de alta pureza en la industria electrónica. A medida que los temas ambientales relacionados con la eliminación de desechos y productos químicos se han reglamentado más estrictamente, este concepto ha obtenido una aceptación más amplia. (1)

Contactores de membrana

Un contactor de membrana es un dispositivo de membrana hidrófoba que permite que el agua y un gas entren en contacto directo entre sí sin mezclarse. El agua fluye por un lado de la membrana y el gas lo hace por el otro. El tamaño pequeño del poro y la propiedad hidrófoba de la

membrana evitan que el agua atraviese el poro. La membrana actúa como un apoyo que permite al gas y al agua entrar en contacto entre sí en los poros. Al controlar la presión y la composición del gas en contacto con el agua, se puede generar una fuerza motriz para pasar los gases disueltos de la fase acuosa a la fase gaseosa.

El contactor de membrana funciona según los mismos principios que el desgasificador de vacío o el desaireador de tiro forzado. Sin embargo, la tecnología basada en membrana ofrece un sistema operativo más limpio, más pequeño y más estable que el diseño convencional de torre de desgasificación.

El contactor de membrana pone en contacto directo a las fases gaseosa y líquida en el poro de una membrana hidrófoba microporosa. El tamaño del poro de la membrana microporosa está en el orden de los 0,03 micrones, de modo que la contaminación aerotransportada no atravesará el poro ni contaminará la corriente de agua.

La membrana ofrece una interfaz estructurada entre el gas y las corrientes líquidas que no se altera por ningún cambio en los caudales de flujo de líquido. Esto proporciona un sistema operativo estable a una amplia gama de caudales de flujo. Además, la interfaz estructurada ofrece un área de contacto diez veces mayor por unidad de volumen que la encontrada en el envase de una torre de desgasificación convencional. Esto permite que el sistema de membrana sea mucho más pequeño que una torre de desgasificación convencional. (2)

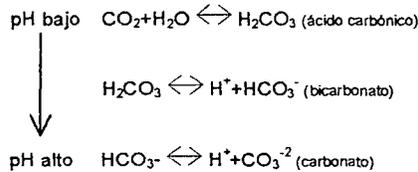
óxido de carbono

El dióxido de carbono atravesará fácilmente una membrana de RO. Al atravesar la membrana de RO se ionizará y elevará la conductividad del agua. Como la resistividad de la del agua de una unidad EDI/CDI es proporcional a la conductividad de entrada, cualquier especie iónica que pase a partir del gas de dióxido de carbono reducirá la resistividad de la del agua producida por la EDI/CDI. La carga iónica agregada también puede afectar la capacidad de EDI/CDI de eliminar semanalmente las especies iónicas cargadas como el boro y la sílice coloidal.

El dióxido de carbono se encuentra comúnmente en los suministros de agua de todo el mundo. Se produce a partir de la disolución del MgCO3 y CaCO3 (carbonato de magnesio y carbonato de calcio). Estos carbonatos se encuentran presentes en los minerales de nuestra dieta. Se disuelven en el agua producida que ésta fluye sobre los minerales en la corteza terrestre. Cuando estos carbonatos se encuentran en el agua forman iones de magnesio, calcio, carbonato y bicarbonato y gas de dióxido de carbono. La concentración de cada uno depende del pH de la fuente de agua. (3)

Una membrana de RO rechazará las especies iónicas; sin embargo, el gas de dióxido de carbono pasará fácilmente a través de la membrana. El gas de CO2 disuelto que atraviesa la membrana se volverá a ionizar. (2) El gas será una fuente de iones en el agua que aumentará la conductividad del agua. Las ecuaciones que describen las reacciones que rigen la química del dióxido de carbono en el agua.

Cuando existe un pH bajo, el equilibrio se desplaza hacia el gas de dióxido de carbono; cuando el pH es alto, el equilibrio se desplaza hacia las especies iónicas.



Manejo del dióxido de carbono

En general, el manejo del CO2 en el agua se puede llevar a cabo de dos maneras. Se puede ajustar el pH del agua para permitir que la membrana de RO rechace las especies iónicas o se puede eliminar el dióxido de carbono del agua mediante un gas de purga.

Ajuste del pH

El pH del agua en la membrana de RO se puede elevar para desplazar las ecuaciones de equilibrio hacia el lado del carbonato. En este proceso, una pequeña cantidad de gas de dióxido de carbono está presente en el agua. La membrana de RO rechazará las especies iónicas y poco o nada de gas de dióxido de carbono estará presente corriente abajo de la membrana de RO.

Para ajustar el pH del agua, se agregan productos químicos al agua. Esto contribuye a la contaminación del agua rechazada que se debe tratar. El agua que tiene una alcalinidad alta también puede contaminar la membrana de RO. Con el fin de evitar esta contaminación, se utilizan habitualmente productos antiincrustantes. Esto, nuevamente, aumenta los productos químicos agregados al agua.

Como la calidad del agua cambia según las estaciones, el control de la adición de productos químicos debe estar diseñado teniendo esto en cuenta. Esto contribuye a la complejidad del sistema de control del pH.

La desventaja más importante del control del pH es que el usuario debe agregar productos químicos adicionales a la corriente de agua. Esto se suma a los productos químicos, el manejo, el almacenamiento y el tratamiento de las corrientes de desecho generadas por el uso de estos productos químicos.

Extracción con aire

Una segunda alternativa para la extracción del CO2 del agua es eliminar el gas del agua mediante un gas de purga. Tradicionalmente esto se logró a través del uso de una torre de descarbonización de tiro forzado. En una torre de descarbonización, el agua fluye por un material de embalaje y se introduce aire en la torre. A medida que el agua fluye por el material de embalaje forma una película delgada que está en contacto con el aire. El dióxido de carbono pasa preferentemente de la corriente de agua a la de aire y se elimina o "purga" del agua.

En un sistema de RO-EDI/CDI no resulta práctica una torre de descarbonización de tiro forzado debido a su tamaño y al riesgo de agregar contaminantes nuevamente al agua después de la RO. Los contactores de membrana ofrecen una alternativa compacta, limpia y económica a la torre de descarbonización convencional.

Además, los contactores de membrana tienen un diseño de sistema simple y económico. En una torre de

carbonización de tiro forzado convencional, el agua de salida se bombea desde un tanque de almacenamiento (pozo de infiltración) a la torre. En el contactor de membrana, el agua de salida está bajo presión. No se necesitan ni tanque de almacenamiento ni membranas de respresurización.

En un sistema de contactor de membrana correctamente diseñado, la resistividad del agua de salida puede alcanzar 1 a 2 Mohm/cm. La reducción de la conductividad reducirá ampliamente el rendimiento por unidad de EDI/CDI.

Eficacia de la extracción de CO₂ de un contactor de membrana: contactor de membrana Liqui-Cel® de 4 pulgadas con una distribución del flujo de aire de 8 m³/h

Concentración de gas CO ₂ de entrada	ppm	Concentración del CO ₂ disuelto de salida (ppm)		
		1 m ³ /h	2 m ³ /h	4 m ³ /h
CO ₂	30,0	1,5	4,3	9,5
	50,0	2,0	7,0	15,7
	100,0	3,6	13,4	31,0

Conclusiones

Los sistemas RO-EDI/CDI están creciendo rápidamente en popularidad en la industria del tratamiento del agua. Altos niveles de conductividad de entrada en un dispositivo EDI/CDI tienden a reducir la resistividad del agua de salida. Una causa común de la alta conductividad es el dióxido de carbono disuelto. Los contactores de membrana ofrecen un método limpio y que no necesita mantenimiento para extraer el dióxido de carbono del agua sin producir cambios en el pH.

Para obtener más información o ayuda con su aplicación específica, comuníquese con su Representante de Membrana – Charlotte.

Referencias:

- Página Web de E-Cell www.e-cell.com 7/00
- Fiesler, F., "Membrane Contactors: An Introduction to the Technology", *Ultrapure Water Journal*, V13, No 4, Tall Oaks Publishing, Littleton, CO, pp. 27-31 (May/June 1996)
- 396 Kemmer, F N *Nalco Water Handbook*, Second Edition, pp. 4.7-4.12, McGraw Hill, New York, NY (1988)

Desionización/Desionización continua.

Este producto sólo deberá ser utilizado por personas familiarizadas con su uso. Se deberá mantener dentro de las limitaciones establecidas. Todas las ventas están sujetas a los términos y condiciones del comprador. El comprador asume toda la responsabilidad por la idoneidad y adecuación para el uso, así como también por la protección del medio ambiente y por los asuntos relacionados con la seguridad vinculados con este producto. El Vendedor se reserva el derecho de modificar este documento sin previo aviso. Consulte a su representante para verificar la última actualización. Nuestros conocimientos, la información que este documento contiene es exacta. Sin embargo, ni el Vendedor ni ninguno de sus afiliados asumen responsabilidad alguna respecto a la exactitud o actualidad de la información contenida en este documento. La determinación final de la idoneidad de cualquier material y de si existe o no alguna infracción de patentes, marcas comerciales o derechos de autor es responsabilidad exclusiva del usuario. Los usuarios de cualquier sustancia deben convencerse por sí mismos, mediante investigaciones independientes, de que el material se puede utilizar con seguridad. Podemos haber descrito ciertos peligros, pero no podemos garantizar que éstos sean los únicos peligros que existen.

MEMBRANA, SuperPhobic y MiniModule son marcas comerciales registradas y NB es una marca comercial de Membrana-Charlotte, una división de Celgard, LLC y nada de lo que aparezca en este documento deberá considerarse una recomendación o licencia para utilizar información que discrepe de Membrana, marca comercial o derecho de autor del Vendedor u otras personas.



Membrana – Charlotte Una división de Celgard, LLC (TB19Rev4_10-05)

Membrana – Charlotte
 división de Celgard, LLC
 100 South Lakes Drive
 Charlotte, North Carolina
 28213 EE.UU.
 Teléfono: (704) 587 8888
 Fax: (704) 587 8585

Membrana GmbH
 Oehler Strasse 28
 42289 Wuppertal
 Alemania
 Teléfono: +49 202 6099 -593
 Teléfono: +49 202 6099 -224
 Fax: +49 202 6099 -750

Oficina en Japón
 Shinjuku Mitsui Building, 27F
 1-1, Nishishinjuku 2-chome
 Shinjuku-ku, Tokio 163-0427
 Japón
 Teléfono: 81 3 5324 3361
 Fax: 81 3 5324 3369

MEMBRANA
 Underlining Performance

www.membrana.com
www.liqui-cel.com

A POLYPURE Company

ANEXO O

SEGUNDA PARTE

PARAMETROS FISICO-QUIMICOS: ALCALINIDAD

DEFINIMOS ALCALINIDAD COMO la capacidad del agua para neutralizar ácidos o aceptar protones. Esta representa la suma de las bases que pueden ser tituladas en una muestra de agua. Dado que la alcalinidad de aguas superficiales está determinada generalmente por el contenido de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos, ésta se toma como un indicador de dichas especies iónicas. No obstante, algunas sales de ácidos débiles como boratos, silicatos, nitratos y fosfatos pueden también contribuir a la alcalinidad de estar también presentes. Estos iones negativos en solución están comúnmente asociados o pareados con iones positivos de calcio, magnesio, potasio, sodio y otros cationes. El bicarbonato constituye la forma química de mayor contribución a la alcalinidad. Dicha especie iónica y el hidróxido son particularmente importantes cuando hay gran actividad fotosintética de algas o cuando hay descargas industriales en un cuerpo de agua.

La alcalinidad, no sólo representa el principal sistema amortiguador del agua dulce, sino que también desempeña un rol principal en la productividad de cuerpos de agua naturales, sirviendo como una fuente de reserva para la fotosíntesis. Históricamente, la alcalinidad ha sido utilizada como un indicador de la productividad de lagos, donde niveles de alcalinidad altos indicarían una productividad alta y viceversa (Tabla 1).

Dicha correlación se debe en parte a que la disponibilidad del carbono es mayor en lagos alcalinos y también al hecho de que las rocas sedimentarias que contienen carbonatos, a menudo contienen también concentraciones relativamente altas de nitrógeno y fósforo

(en comparación con el granito, otras rocas ígneas y regiones donde el lecho rocoso ha sido desgastado y lavado, los cuales generalmente contienen bajas concentraciones de estos dos nutrientes limitantes y del CaCO_3).

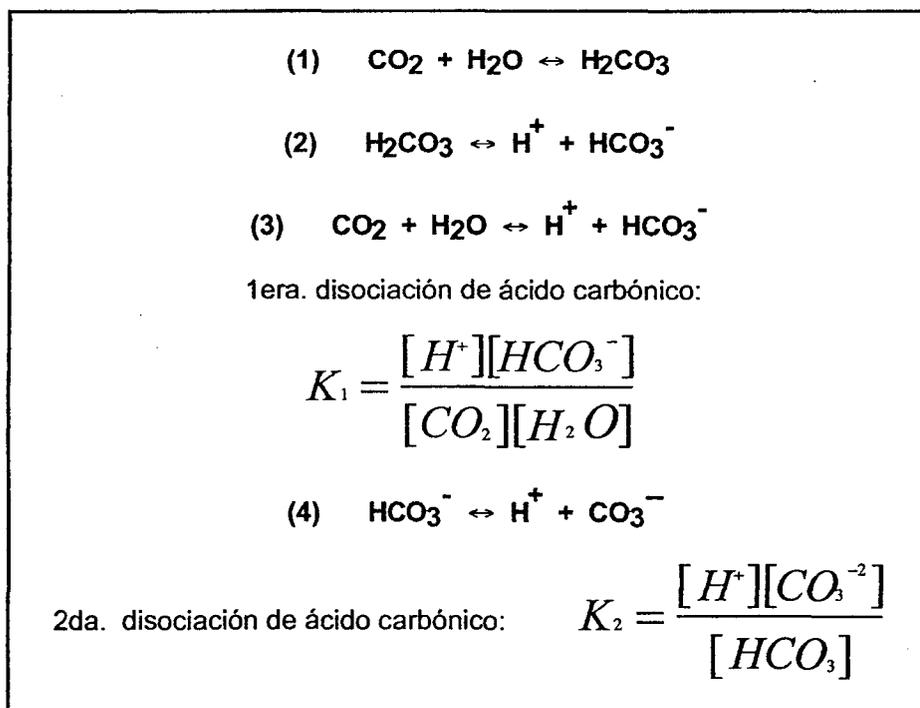
Tabla 1: Rangos de alcalinidad.

RANGO	ALCALINIDAD (mg/L CaCO_3)
BAJA	< 75
MEDIA	75 - 150
ALTA	> 150

* Datos tomados de Kevern (1989).

El sistema de alcalinidad tiene interacciones importantes con los procesos de fotosíntesis y respiración celular. Veamos en primer término las reacciones de equilibrio que describen la interacción de CO_2 y H_2O (Figura 1).

Figura 1: Equilibrio que describen la interacción de CO_2 y H_2O .



Dado que la concentración de ácido carbónico (H_2CO_3) es generalmente baja, las primeras dos ecuaciones se combinan para formar el equilibrio descrito en la ecuación

#3. Determinando los valores de las constantes de disociación K_1 y K_2 (las cuales varían con la temperatura y el pH), podemos calcular las concentraciones relativas de los componentes de estas ecuaciones de equilibrio. La figura 2 y la tabla 2 ilustran cómo el por ciento de composición de dichos componentes varía con el pH.

Figura 2: Efecto del pH en el por ciento de composición de especies de bióxido de carbono en agua.

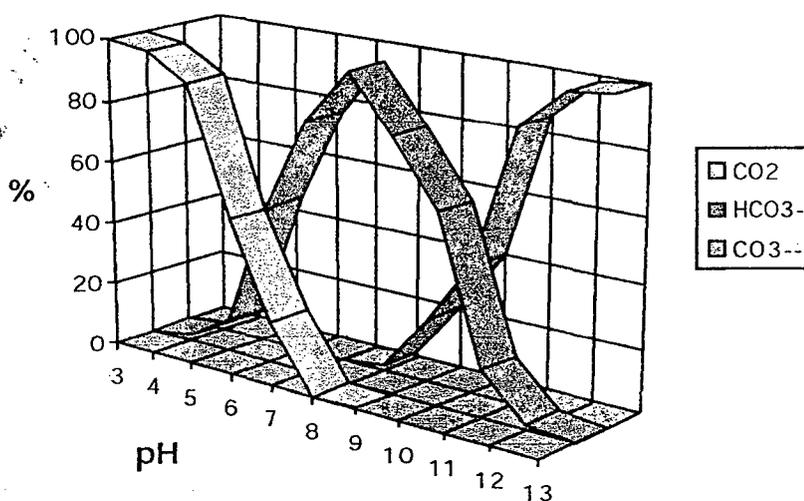


Tabla 2: Efecto del pH en las proporciones de especies iónicas de bióxido de carbono en agua.

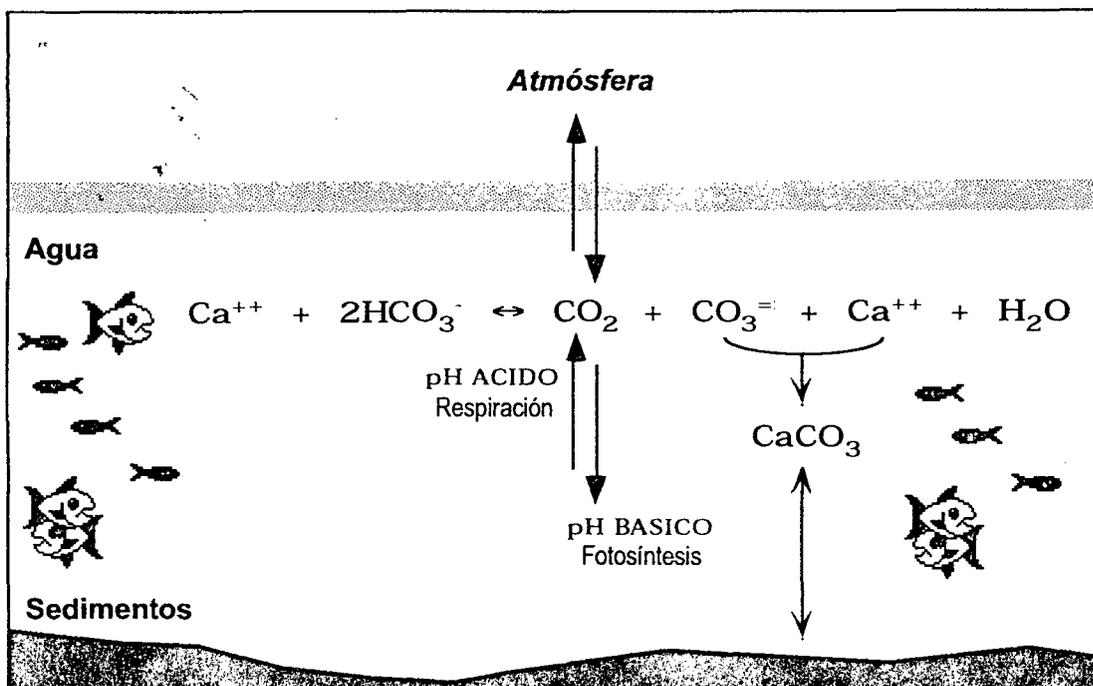
pH	CO_2	HCO_3^-	CO_3^{2-}
4	0.996	0.004	1.25×10^{-9}
5	0.962	0.038	1.20×10^{-7}
6	0.725	0.275	9.1×10^{-5}
7	0.208	0.792	2.6×10^{-4}
8	0.025	0.972	3.2×10^{-3}
9	0.003	0.966	0.031
10	0.000	0.757	0.243

* Datos tomados de Hutchinson (1957).

Es evidente que las proporciones de las especies iónicas de bióxido de carbono son alteradas significativamente por cambios en pH. A un pH < 6, CO_2 es la especie

dominante. A valores de pH entre 7 y 9, HCO_3^- predomina, mientras que CO_3^{2-} comienza a aumentar su concentración significativamente a valores de $\text{pH} > 9$. El sistema de alcalinidad tiene interacciones importantes con los procesos de fotosíntesis y respiración. Dichas interacciones se ilustran en la figura 3 donde aparecen combinadas la primera y segunda disociaciones de ácido carbónico.

Figura 3: Efecto de procesos metabólicos en la alcalinidad.



Durante el proceso de fotosíntesis se consume CO_2 desplazándose el equilibrio descrito en la figura 3 hacia la derecha, causando a su vez que el pH aumente. El aumento en pH se debe a que la baja en concentración de CO_2 libre ocasiona a su vez una disminución en la concentración del ión hidronio (H^+) y por ende un aumento en pH. Dicho efecto lo podemos apreciar al analizar las reacciones de equilibrio que describen la interacción de CO_2 y H_2O (Figura 1: ecuaciones 1 - 3). Si las concentraciones de CO_2 libres disminuyen, entonces disminuyen también las concentraciones de H^+ como lo establece la ecuación #3 y la constante de disociación K_1 . En adición, si el equilibrio descrito en la figura 2 se desplaza hacia la derecha durante periodos intensos de fotosíntesis, entonces la concentración de carbonatos debe aumentar causando que la concentración de H^+ disminuya de acuerdo con la ecuación #4 (Figura 1) y la constante de disociación K_2 .

Según el CO_2 es incorporado a fotosintetatos, su concentración en agua puede ser restituida por difusión molecular de CO_2 atmosférico al agua o puede ser repuesto por el

sistema de alcalinidad a través de la disociación de bicarbonato (ecuación #1). En aguas con alta productividad, el proceso fotosintético puede agotar los niveles de CO₂ libre, a tal punto que el crecimiento de plantas acuáticas se ve limitado y el pH puede alcanzar valores mayores de 9 ó 10.

Por otro lado, los procesos de respiración aerobia y anaerobia generan CO₂, el cual, dependiendo de su concentración, puede desplazar el equilibrio descrito en la ecuación #1 hacia la izquierda, causando que el pH disminuya.

La actividad fotosintética puede redundar en la precipitación de carbonato de calcio (CaCO₃), si la concentración de carbonato aumenta lo suficiente como para exceder la constante de solubilidad de carbonato de calcio (K_{sp} a 25°C = $10^{-8.35}$). Esa es una situación muy común en lagos de alta productividad con una alta alcalinidad, donde se puede observar una cubierta blancuzca sobre la superficie de estructuras vegetales y sobre el sedimento. Cuando la actividad del proceso de respiración excede la actividad fotosintética (se produce CO₂ por respiración aerobia y anaerobia) disminuye la concentración de carbonato a tal punto que los depósitos de carbonato de calcio se disuelven en el agua.

El CaCO₃ puede ser producido también por procesos abióticos en lagos que reciben afluentes de manantiales con una alcalinidad alta, supersaturados con CO₂. Una vez el afluente entra al lago, el CO₂ se libera a la atmósfera (ecuación #1). El equilibrio se desplaza hacia la derecha, aumentando así la concentración de carbonato, a tal punto que excede el K_{sp} de CaCO₃ y se precipita. Dichos lagos se caracterizan por presentar gránulos blancos finos suspendidos en la columna de agua, los cuales pueden causar turbidez en el agua.

Origen de carbonatos y bicarbonatos en agua dulce:

Los carbonatos y bicarbonatos presentes en cuerpos naturales de agua dulce se originan generalmente del desgaste y disolución de rocas en la cuenca que contienen carbonatos tales como la piedra caliza. A pesar de que la piedra caliza no es muy soluble en agua pura, su disolución es promovida por la presencia de CO₂ disuelto en el agua (CO₂ atmosférico o CO₂ generado en sedimentos ricos en materia orgánica). El CO₂ reacciona con el agua para generar pequeñas cantidades de ácido carbónico, el cual disuelve entonces las rocas de carbonato en la cuenca, lo que a su vez contribuye a la alcalinidad del agua (Figuras 4 y 5).

ANEXO P

Cuadro sinóptico de plantas paquetes de desalinización por Osmosis Inversa, ofrecidos por HOH Canarias S.A.

DESIGNACIÓN	SeaRO-10 ERS	SeaRO-10 ERS y pl. eólica	SeaRO-20 ERS	SeaRO-20 ERS y pl. eólica	SeaRO-25 ERS	SeaRO-25 ERS y pl. eólica	SeaRO-42 ERS	SeaRO-42 ERS y pl. eólica	SeaRO-84 ERS	SeaRO-84 ERS y pl. eólica	Notas ERS = Energy Recovery System
Capacidad: Por segundo l/s	1.16	1.16	2.89	2.89	3.47	3.47	5.79	5.79	11.57	11.57	
Por hora m3/h	4.17	4.17	10.42	10.42	12.50	12.50	20.83	20.83	41.67	41.67	
Por día m3/d---	100	100	250	250	300	300	500	500	1,000	1,000	
Producción anual, 95% * (m3)	34,675	34,675	86,688	86,688	104,025	104,025	173,375	173,375	346,750	346,750	
Consumo max. (KWh)	25	25	62	62	62	62	92	92	161	161	
eléctrico: unitario (KWh/m3)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	
Consumo eléctrico por año (KWh)	104,025	104,025	260,063	260,063	312,075	312,075	520,125	520,125	1,040,250	1,040,250	
Electricidad producido por año		131,400		262,800		315,360		446,760		788,400	
Capacidad de la planta eólica (KW)		50		100		120		170		300	Suposición
Costos únicos (US \$):											
Planta desaladora	117,300	117,300	188,455	188,455	230,755	230,755	355,835	355,835	610,705	610,705	Precios: Mayo 2000
Planta generadora eólica #	0	65,000	0	120,000	0	144,000	0	187,000	0	300,000	estimación
Transporte y seguro	3,000	4,500	3,500	5,250	3,800	5,700	5,000	7,500	7,000	10,500	suposición
Instalación **	4,692	14,442	6,596	24,338	8,076	27,950	10,675	36,673	12,214	54,428	suposición
Preparación del sitio ###	9,384	14,584	13,192	21,592	14,999	24,359	17,792	27,142	18,321	27,321	suposición
Total costos únicos	134,376	215,826	211,743	359,635	257,631	432,764	389,302	614,150	648,240	1,002,954	US \$
Costo unitario de inversión	1,344	2,158	847	1,439	859	1,443	779	1,228	648	1,003	por m ³ instalado
Costos recurrentes:											
Amortización (10 % Inter., 15 años) ##	17,667	28,375	27,839	47,283	33,872	56,897	51,183	80,745	85,227	131,862	vida útil 15 años
Funcionamiento y mantenimiento. ***	8,669	10,403	19,938	24,273	22,886	28,087	34,675	43,344	58,948	76,285	suposición
Valor de electricidad consumido del red, p.a. (3 KWh/m3 y 0.12 US \$ / KWh)	12,483	12,483	31,208	31,208	37,449	37,449	62,415	62,415	124,830	124,830	0.12 US\$/KWh
Valor de electricidad producido p.a. *	0	10,512		21,024		25,229		35,741		63,072	0.08 US\$/KWh
Total costos recurrentes p.a.	38,819	40,749	78,984	81,739	94,206	97,204	148,273	150,763	269,004	269,905	
Costo por m3 producido, US \$	1.12	1.18	0.91	0.94	0.91	0.93	0.86	0.87	0.78	0.78	

Notas: Todos costos en US \$. Todas las plantas desaladoras se consideran conectados con un red eléctrico. El aerogenerador también es conectado con el red eléctrico.

* Se consideran 5 % de tiempo de paro para el mantenimiento y reparaciones. Para las plantas eólicas se considera una generación de electricidad por 50% del tiempo y un factor de planta de 80 %. Por principio, la planta eólica es conectado con un red eléctrico y trabaja siempre cuando hay viento. La cantidad de electricidad superior a las necesidades de producción, se entrega a la red, por un valor estimado de 0.08 US\$/KWh.

** Para instalación se asuman entre 2% y 4% del costo de compra de las plantas desaladoras y 10% hasta 15% del costo de los aerogeneradores.

*** Costos por m3 producido. Suponiendo entre 0.26 y 0.18 US\$ para las plantas desaladoras (contrato de servicio completo, comprendido el recambio de membranas todos los cinco años) y 0.05 US\$ para las plantas eólicas.

Se aplica solo en el caso de generación de electricidad por planta eólica. Se consideran plantas con una capacidad generativa entre 80% y 100% sobre el máximo necesario, asumiendo un costo entre 1,000 y 1,300 US \$ / KW instalada.

La amortización se aplica sobre el total de los costos únicos, durante 15 años. Se considera el financiamiento de 100% del costo por un crédito con 10% de interés.

Se suponen entre 3% y 8% del costo de compra de las plantas (construcción de 2 taladros, una con bomba de agua, conexiones con el red eléctrico, con el red telefónico y con el red de distribución).

Conclusiones: 1. Los costos unitarios de producción bajan con la capacidad y la producción de la planta.

2. Las plantas desaladoras combinadas con aerogeneradores compiten bastante bien con plantas sin aerogenerador. Aerogeneradores ampliamente dimensionados, reduzcan el costo del agua.

3. Con costos unitarios estimados entre 0.86 US \$ y 1.18 US \$ por metro cúbico producido, las plantas del tipo HOH-Osmosis Reversa se consideran económicas.

ANEXO Q

LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
LA COMISIÓN DE REGLAMENTOS TÉCNICOS Y
COMERCIALES CON REGISTRO N° LE-002



Registro N° LE 002

INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA807111

Página 1 de 7

Entidad de:	AQUATROL PERU S.A.C. CAL. FRANCISCO GRAÑA NRO. 652 URB. SANTA CATALINA LIMA - LA VICTORIA		
Identificación de Ensayo:	LB-281144-002		
Ensayo realizado por:	El Cliente	Cantidad Muestras:	1
Ubicación:	Pozo Villa El Salvador	Fecha de Recepción a SGS:	10/11/2008 10:30 a.m.

Análisis

Concentración de Hidrógeno
Cloruros
Sulfatos
Dureza Cálcica
Fluoruro
Total
Conductividad

Método

APHA-AWWA-WEF 4500-H+-B, 2005 21st Ed. pH Value: Electrometric Method.
APHA-AWWA-WEF 4500-Cl-B, 2005 21st Ed. Chloride: Argentometric Method
APHA-AWWA-WEF 4500-SO4-E, 2005 21st Ed. Sulfate: Turbidimetric Method
APHA-AWWA-WEF 3500-Ca-B, 2005 21st Ed. Calcium: EDTA Titrimetric Method
APHA-AWWA-WEF 4500-F-C, 2005 21st Ed. Fluoride: Ion Selective Electrode Method
EPA - 200.7: 1994 Rev 4.4 Determination of Metals and Trace Elements in Water and Wastes by Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry.
APHA-AWWA-WEF 2510-B, 2005: 21st Ed. Conductivity: Laboratory Method

Reynaldo López

Revisor de Laboratorio

**LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR
LA COMISIÓN DE REGLAMENTOS TÉCNICOS Y
COMERCIALES CON REGISTRO N° LE-002**



Registro N° LE-002

**INFORME DE ENSAYO CON VALOR OFICIAL
MA807111**

Página 2 de 7

riz
ducto descrito como
nificación de Muestra

Simbolo L.D.

Agua Subterránea
Agua de Pozo
Mixer con Pozo 1
09/11/2008 03:00:00P.M.

Simbolo	L.D.	Valor
Potencial de Hidrógeno pH	pH	0.1 9.3
Cloruros mg/L	Cl ⁻	1 1,249
Sulfatos mg/L	SO ₄ ⁼	1 386
Dureza Cálrica mg/L	CaCO ₃	1 22
Fluoruro mg/L	F ⁻	0.01 0.54
Conductividad uS/cm	-	0.01 5,930.00
Aluminio mg/L	Al	0.01 <0.01
Antimonio mg/L	Sb	0.005 <0.005
Arsénico mg/L	As	0.005 0.015
Bario mg/L	Ba	0.003 0.009
Berilio mg/L	Be	0.0003 <0.0003
Bismuto mg/L	Bi	0.005 <0.005
Boro mg/L	B	0.1 2.1
Cadmio mg/L	Cd	0.001 <0.001
Calcio mg/L	Ca	0.1 6.2
Cerio mg/L	Ce	0.05 <0.05
Circonio mg/L	Zr	0.003 <0.003
Cobalto mg/L	Co	0.001 <0.001
Cobre mg/L	Cu	0.003 0.003
Cromo mg/L	Cr	0.001 0.007
Escandio mg/L	Sc	0.003 <0.003
Estaño mg/L	Sn	0.01 <0.01
Estroncio mg/L	Sr	0.001 0.280
Fósforo mg/L	P	0.1 <0.1
Hierro mg/L	Fe	0.1 0.2
Itrio mg/L	Y	0.005 <0.005
Lantano mg/L	La	0.0005 <0.0005
Litio mg/L	Li	0.01 0.03
Magnesio mg/L	Mg	0.04 3.86
Manganeso mg/L	Mn	0.002 0.004
Molibdeno mg/L	Mo	0.005 0.014
Niquel mg/L	Ni	0.001 <0.001
Plata mg/L	Ag	0.001 <0.001

**ESTA SECCION CONTIENE EVALUACIONES QUE NO HAN
SIDO ACREDITADAS POR INDECOPI**

**INFORME DE ENSAYO
MA807111**

Página 4 de 7

Ítem	Método
turbidez	APHA-AWWA-WEF 2130-B, 2005 21st Ed. Turbidity. Nephelometric Method
Nitrógeno-Nitratos	APHA-AWWA-WEF 4500-NO3-B, 2005 21st Ed. Nitrogen (nitrate): Ultraviolet Spectrophotometric Screening Method
Carbonatos	AOAC 920.194: 2005; 18 th Edition. Carbonate and Bicarbonate in Water. Titrimetric Method
Alcalinidad	AOAC 973.43: 2005; 18th Edition. Alkalinity of Water. Titrimetric Method
Calcio Magnésica	APHA-AWWA-WEF 3500-Mg B, 2005 21st Ed. Magnesium. Calculation Method.
Fósforo (como Fosfato)	APHA-AWWA-WEF 4500-P-E, 2005 21st Ed. Phosphorus: Ascorbic Acid Method
Silicio	APHA-AWWA-WEF 4500-SiO2-C, 2005 21st Ed. Molybdo-silicate Method

Reynaldo López

Supervisor de Laboratorio

**ESTA SECCION CONTIENE EVALUACIONES QUE NO HAN
SIDO ACREDITADAS POR INDECOPI**

**INFORME DE ENSAYO
MA807111**

Página 5 de 7

cto descrito como
ficación de Muestra

Simbolo L.D.

Agua Subterránea
Agua de Pozo
Miscion Pozo 1
09/11/2008 03:00:00P.M.

	NTU	0.20	4.57
Turbidez NTU			
Nitrogeno-Nitratos mg/L	N-NO3	0.023	65.276
Bicarbonatos CaCO3 mg/L	CaCO3	1	158
Alcalinidad CaCO3 mg/L	CaCO3	1	217
Dureza Magnésica mg/L	CaCO3	1	14
Fosfato mg/L	PO4	0.1	<0.1
Silice mg/L	SiO2	0.1	28.1

INFORME DE ENSAYO

MA807111

Página 7 de 7

	Cloruro (mg/L) 0.003	Nitrogeno-Nitatos (mg/L) 0.023	Conductividad (uS/cm) 0.01	Sulfatos (mg/L) 1	Silice (mg/L) 0.1	Fosfato (mg/L) 0.1	Fluoruro (mg/L) 0.01	Potencial de Hidrogeno (pH) 0.1	Cloruros (mg/L) 1
PT_NITRATOS(06/01)		100.90 %							
PT_PH(07/02)							99.70 %		
PT_PO4(07/01)						103.30 %			
PT_SILICE					0.9				
PT_SULFATOS(06/01)				102.80 %					
	Bicarbonatos (CaCO3 mg/L) 1	Alcalinidad (CaCO3 mg/L) 1	Dureza Cálcica (mg/L) 1	Dureza Magnésica (mg/L) 1					
BLANCO	<1	<1	<1	<1					
MA807111.0001	158	217	23	13					
PT_ALCA_(06/02)		100.20 %							
PT_ALCA_B(06/01)	99.80 %								
PT_DURCAL(08/01)			99.80 %						

= Blanco REP = Replicado STD = Patrón de trabajo SPK = Spike
 centaje dentro del Rango de Aceptación de los Métodos.