

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE QUIMICA

“OSMOSIS INVERSA”

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A

JOAQUIN LOZANO GARCIA CANO

MEXICO, D. F.

186

1974



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CLAS. Tesis
ADQ. 1974
FECHA
PROC. MT-1008 ~~1008~~ 178



JURADO ASIGNADO
ORIGINALMENTE.

PRESIDENTE: PROF. SANTIAGO DE LA TORRE GALINDO.

VOCAL: PROF. ALBERTO JIMENEZ FERNANDEZ.

SECRETARIO: PROF. JOSE FCO. GUERRA RECASENS.

1er. SUP. : PROF. GERARDO BAZAN NAVARRETE.

2o SUP. : PROF. GERARDO RODRIGUEZ ALONSO.

SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA :

BUFETE INDUSTRIAL DISEÑOS Y PROYECTOS S.A.

NOMBRE COMPLETO Y FIRMA DEL SUSTENTANTE :

JOAQUIN LOZANO GARCIA CANO

NOMBRE COMPLETO DEL ASESOR DEL TEMA :

ALBERTO JIMENEZ FERNANDEZ.

A PILY LO MEJOR QUE
TENGO EN LA VIDA

A MIS PADRES BLANCA Y GUILLERMO,
POR SU DIARIO ESFUERZO Y COMPLETO
AMOR

A MARIANA EN QUIEN VEO
VIVIR NUESTRAS ILUSIONES

A MIS HERMANOS Y EN ESPECIAL A
MEMO

A MI PADRINO ING. JOSE DOMINGUEZ
MARQUEZ COMO UN TESTIMONIO DE
UNA IDEA HECHA REALIDAD.

A MI TIO ING. JORGE ANTONIO GARCIA CANO
CONSEJERO Y GUIA EN MI VIDA.

A MIS MAESTROS Y A TODOS LOS
QUE DE UNA FORMA DIRECTA O
INDIRECTA HICIERON POSIBLE
LA REALIZACION DE ESTE TRABAJO.

I N D I C E

CAPITULO I	PAG.
1.0 GENERALIDADES.....	1
CAPITULO II	
2.0 OSMOSIS Y PRESION OSMOTICA.....	11
2.1 DESCRIPCION DE LA OSMOSIS.....	11
2.2 PRESION OSMOTICA.....	11
2.3 TERMODINAMICA DE LA OSMOSIS.....	12
CAPITULO III	
3.0 OSMOSIS INVERSA.....	20
3.1 PRINCIPIO DE LA OSMOSIS INVERSA.....	20
3.2 VARIABLES DE OPERACION.....	23
3.3 LA MEMBRANA.....	27
3.4 PRETRATAMIENTO REQUERIDO.....	38
3.5 EQUIPOS DE OSMOSIS INVERSA.....	41
CAPITULO IV	
4.0 COMPARACION ENTRE COSTOS DE OPERACION.....	44
4.1 OSMOSIS INVERSA V.S. DESMINERA- LIZACION.....	44
4.2 ESTIMADO DE COSTOS.....	49

4.3 RESULTADOS 51

CAPITULO V

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS PARA UNA PLANTA PARA PRODUCIR -- ANTIBIOTICOS

5.0 BASES DE DISEÑO 53

5.1 BALANCE DE AGUA 55

5.2 ANALISIS DEL AGUA CRUDA 56

5.3 TRATAMIENTO SELECCIONADO 57

5.4 DISEÑO 58

5.5 AGUA POTABLE 79

5.6 AGUA PARA CALDERAS Y AGUA DESMI-
NERALIZADA 83

BIBLIOGRAFIA 99

TABLA III: IMPUREZAS COMUNES EN EL AGUA

NOMBRE	FORMULA Y CLASE	PROBLEMAS QUE CAUSA	LIMITE DE TOLERANCIA	TRATAMIENTO	RESIDUO POST-TRATAMIENTO
<p>ALCALINIDAD: DOS TIPOS :</p> <p>a) ALCALINIDAD DE SODIO - (CATION Na^+ SI EXISTE ANION HCO_3^- EN IGUAL CANTIDAD)</p> <p>b) ALCALINIDAD DE Ca^{++} y Mg^{++}</p>	<p>$CO_3 =$ HCO_3^- OH^-</p> <p>SOLIDOS - DISUELTOS</p>	<p>1.- ESPUMA EN LAS CALDERAS</p> <p>2.- MAL SABOR EN EL AGUA POTABLE - ARRIBA DE 400 P.P.M.</p> <p>3.- FORMACION DE CO_2 EN EL VAPOR, LO QUE CAUSA CORROSION EN LAS LINEAS DE RETORNO</p> <p>4.- ARRIBA DE 500 - 700 P.P.M. EN EL AGUA DE CALDERAS, DE BAJA PRESION ORIGINA :</p> <p>a) ACARREO DE SOLIDOS</p> <p>b) CONDENSADO - CORROSIVO</p> <p>c) FRAGILIDAD CAUSTICA.</p>	<p>1.- EN CALDERAS DE ALTA PRESION DE 0 A 5 P.P.M</p> <p>2.- EN CALDERAS DE BAJA PRESION EL LIMITE DEPENDE DE LAS CONDICIONES EN CADA CASO.</p> <p>3.- CERCA DE 300 P.P.M. DE SALES DE SODIO, CAUSAN SABOR SALADO.</p> <p>4.- PARA FINES FARMACEUTICOS O SIMILAR 5 P.P.M.</p>	<p>a) ALCALINIDAD DE SODIO</p> <p>1.- ZEOLITA EN CICLO HIDROGENO</p> <p>b) ALCALINIDAD DE Ca^{++} Mg^{++}</p> <p>1.- CAL-SODA EN FRIO.</p> <p>2.- CAL-SODA EN CALIENTE.</p> <p>3.- ZEOLITA EN CICLO HIDROGENO</p>	<p>1.- 0.5 P.P.M.</p> <p>1.- DE 68 a 85 P.P.M</p> <p>2.- DE 34 a 51 P.P.M.</p> <p>3.- DE 0.5 P.P.M.</p>
<p>ALGAS, MATERIA ORGANICA. (COLOR)</p>	<p>COLOR SOLIDOS EN SUSPENDI- SUENTOS</p>	<p>1.- MAL ASPECTO Y SABOR AL AGUA POTABLE,</p> <p>2.- MANCHA PAPEL TELAS U OTROS TEXTILES</p>	<p>1.- PARA USOS GENERALES BAJO 20 P.P.M.</p> <p>2.- PARA PRODUCTOS FINALES BAJO 5 P.P.M.</p>	<p>1.- POR PRECIPITACION COAGULANTE Y ARCILLA.</p> <p>2.- POR CLORACION Y PURIFICACION CON CARBON ACTIVADO.</p>	<p>EL COLOR SE REDUCE GENERALMENTE A MENOS DE 5-10 P.P.M.</p>

NOMBRE	FORMULA Y CLASE	PROBLEMAS QUE CAUSA	LIMITE DE TOLERANCIA	TRATAMIENTO	RESIDUO POST-TRATAMIENTO.
ACIDEZ O BAJO P.H.	SOLAMENTE EXISTE EN AGUAS INDUSTRIALES O DE MINAS.	1- CORROSIÓN 2- NO ADECUADA PARA LA BEBIDA	3- LOS LIMITES DE LA MATERIA ORGANICA DEPENDEN DE SU APLICACIÓN. 1- DEPENDE DE SU APLICACIÓN.	3- CON SULFATO DE COBRE, 1- NEUTRALIZACIÓN CON SODA, CAL, O CARBONATO DE SODIO	P.H. SEGÚN REQUERIMIENTOS.
ACIDO SULFÚDRICO	H ₂ S	1- CORROSIÓN 2- DA MAL OLOR Y SAZOR AL AGUA.	1- EN AGUA POTABLE 0.5 p.p.m.	1- POR AERACIÓN CON GRAN TIEMPO DE CONTACTO. 2- POR DEGASIFICACIÓN CUANDO CONTIENE ARRIBA DE 10 p.p.m.	CONTENIDO DESPRECIABLE O NULO.
ALUMINIO	Al ⁺⁺ SOLIDOS DISUELTOS.	1- FORMA PARTE DE LA DUREZA 2- MUY PERJUDICIAL PARA CALDERAS DE ALTA PRESION POR FORMAR CON SILICE INCRUSTACIONES DE SILICOALUMINATOS DE CALCIO.		1- POR COAGULACIÓN AYUDANDO A LA MISMA. 2- POR SUAVIZACIÓN CON RESINAS CATIONICAS CICLO SODIO.	CONTENIDO DESPRECIABLE O NULO.

NOMBRE	FORMULA Y CLASE	PROBLEMAS QUE CAUSA	LIMITE DE TOLERANCIA	TRATAMIENTO	RESIDUO POST-TRATAMIENTO
ANHIDRIDO CAR- BONICO	CO ₂	1- CAUSA CORROSION SOBRE TODO EN LAS LINEAS DE CONDENSADOS.	ALCALINIDAD < $\frac{3}{1}$ CO ₂	1- POR AERACION NATURAL EN TO- RRES AEREADORAS 2- POR AERACION ARTIFICIAL POR MEDIO DE UN DESGASIFICADOR.	
	GASES DISUELTOS			3- DOSIFICANDO AMINAS NEUTRA- LIZANTES EN LOS CONDENSADOS. 4- ALIMENTANDO SILICATO DE SODIO (TUBERIAS)	DE 5 A 10 p.p.m.
ACEITES Y GRASAS		1- CAUSAN CORROSION AL DESCOMONERSE EN GLICERINA Y ACIDOS GRASOS	PARA CALDERAS DE 0.5 p.p.m. HASTA 1 p.p.m.	1- POR COAGULACION SOSA Y COAGULAN- TES Y DESPUES FILTRACION.	DE 0.5 A 1 p.p.m.
		2- ESPUMA EN LAS CALDERAS Y ORIGINAN- DO ARRASTRES. 3- FORMAN PELICU- LAS AISLANTES QUE IMPIDEN LA TRASFERENCIA DE CALOR.			

NOMBRE	FORMULA Y CLASE	PROBLEMAS QUE CAUSA	LIMITE DE TOLERANCIA	TRATAMIENTO	RESIDUO POST-TRATAMIENTO
ANION CLORURO	Cl ⁻	1: PRODUCE SABOR SALADO AL EN CONTRARSE PRESENTE EN GRANDES CANTIDADES 2: CORROSION EN EQUIPOS DE ACERO INOXIDABLE	1: PARA USOS GENERALES DE 100 A 300 P.P.M. 2: PARA FINES FARMACEUTICOS O SIMILARES DE 2 A 3 P.P.M.	1: DESMINERALIZACION.	DE 0 A 3 P.P.M.
DUREZA	TODAS LA SALES DE Ca Y Mg, TALES COMO Ca(HCO ₃) ₂ Ca SO ₄ Ca Cl ₂ Mg (HCO ₃) ₂ Mg SO ₄ Mg Cl ₂ SOLIDOS DISUELTOS.	1: ESCAMAS EN LAS CALDERAS. 2: DEPOSITOS GENERALMENTE CUANDO SE CALIENTA. 3: DESTRUYE EL JABON Y FORMA GRUMOS. 4: DESTRUYEN LOS DETERGENTES Y TINTURAS.	1: EN CALDERAS DE ALTA PRESION LAVANDERIAS Y FINES TEXTILES DE 0 A 2 P.P.M. 2: EN CALDERAS DE BAJA PRESION DE 17 A 25 P.P.M. PERO PREFERIBLEMENTE HASTA 2 P.P.M. 3: PARA FINES MUNICIPALES DE 68 A 85 P.P.M. 4: PARA USOS DOMESTICOS DE 0 A 10 P.P.M.	1: CAL-SODA EN FRIO 2: CAL-SODA EN CALIENTE 3: TRATAMIENTO CON FOSFATO EN CALIENTE 4: ZEOLITA EN CICLO SODIO 5: ZEOLITA EN CICLO HIDROGENO	1: DEPENDIENDO DEL EXCESO DE CAL USADA MENOS DE 35 A 85 P.P.M. 2: DEPENDIENDO DEL EXCESO DE CAL USADA MENOS DE 17 A 25 P.P.M. 3: DE 0.1 A 5 P.P.M. 4: DE 0 A 2 P.P.M. 5: DE 0 A 2 P.P.M.

NOMBRE	FORMULA Y CLASE	PROBLEMAS QUE CAUSA	LIMITE DE TOLERANCIA	TRATAMIENTO	RESIDUO POST-TRATAMIENTO
FLUORUROS	F ⁻ SOLIDOS DISUELTOS	1. AFECTA EL ESMALTE DENTAL. ARRIBA DE 1 p.p.m.	1. MAXIMA 1 p.p.m. PARA EVITAR QUE SE AFECTE EL ESMALTE DENTAL.	1. ADICION DEL REACTIVO Mg EN CLARIFICADORES DE LODO DE CORRIENTE ASCENDENTE SIGUIENDO DE FILTRACION.	
		2. NO AFECTA A LOS PROCESOS INDUSTRIALES.	2. MENOS DE 1 p.p.m. PARA REDUCIR LAS CARIES	2. PRECIPITACION DE CAL COAGULANTE EN FRIO	1 p.p.m.0 MENOS
FIERRO Y MANGANESO	Fe ⁺⁺ Mn ⁺⁺ SOLIDOS DISUELTOS COLOIDE SOLIDOS EN SUSP	1. DA AL AGUA SABOR ASTRINGENTE. 2. EN LAS TUBERIAS CAUSA OBSTRUCCIONES. 3. MANCHAS DE OXIDOS Y AMARILLEN-TAS EN PORCELANA Y OTROS PRODUCTOS.	1. 0.5 p.p.m.0 MENOS.	a) FIERRO SOLUBLE 1. CON SUAVIZADORES HASTA 50 p.p.m. SI EL AGUA ES CLARA Y NO AERREADA. 2. POR AERREACION Y PRECIPITACION CON CAL Y COAGULANTE. 3. PARA GASTOS PEQUEÑOS CON ZEOLITAS DE MN HASTA 2 p.p.m.	
				b) FIERRO COLOIDAL 1. POR COAGULACION ASENTAMIENTO Y FILTRACION. c) FIERRO SUSPENDIDO. 1. POR FILTRACION	DE 0.3 A 0.5 p.p.m.

NOMBRE	FORMULA Y CLASE	PROBLEMAS QUE CAUSA	LIMITE DE TOLERANCIA	TRATAMIENTO	RESIDUO POST-TRATAMIENTO
NITRATOS	NO_3^- SOLIDOS DISUELTOS.	1.- CAUSA DAÑO EN LA SANGRE. 2.- NO CAUSA DAÑO EN LA INDUSTRIA.	1.- DE 10 A 20 p.p.m.	1.- POR MEDIO DE UN INTERCAMBIADOR ANIÓNICO.	CONTENIDO DESPRECIABLE.
NITRITOS	NO_2^- SOLIDOS DISUELTOS.	1.- EN PEQUERAS CANTIDADES AFECTA LA POTABILIDAD DEL AGUA. 2.- EL PRODUCTO EN SI ES VENENOSO. 3.- EN CANTIDADES MINIMAS NO AFECTA A LAS INDUSTRIAS. 4.- ACTUA COMO INHIBIDOR DE CORROSIÓN.	4.- DOSIFICACIONES DE 500 p.p.m. PARA TORRES DE ENFRIAMIENTO.	1.- POR OXIDACION A NITRATOS Y DESPUES POR MEDIO DE UN INTERCAMBIADOR ANIÓNICO.	CONTENIDO DESPRECIABLE.
RADIOACTIVIDAD	-----	1.- SE SUPONE QUE EN CANTIDADES APRECIABLES PUEDE CAUSAR CANCER. 2.- EN CANTIDADES MINIMAS SE CONSIDERAN AGUAS MEDICINALES.	-----	1.- MUY POCO O NULA EXPERIMENTACION AL RESPECTO.	

NOMBRE	FORMULA Y CLAS.	PROBLEMAS QUE CAUSA	LIMITE DE TOLERANCIA	TRATAMIENTO	RESIDUO POST-TRATAMIENTO
SILICE	SiO ₂	1- INCRUSTACIONES DURISIMAS EN LAS CALDERAS. (SILICATO DE CALCIO) 2- DEPOSITOS DUROS EN LAS ALETAS DE LAS TURBINAS.	1- MENOS DE 10 A 15 p.p.m. PARA CALDERAS DE ALTA PRESION Y PARA EVITAR INCRUSTACIONES SI LA ALCALINIDAD ES BAJA. 2- MENOS DE 3 A 5 p.p.m. EN CONCENTRACIONES SALINAS PARA CALDERAS DE ALTA PRESION.	1- ADICION DE SULFATO DE FIERRO EN CLARIFICADORES EN LODOS CON CORRIENTE ASCENDENTE 2- ADICION DEL REACTIVO Mg EN CLARIFICADORES EN LODO DE CORRIENTE ASCENDENTE 3- ADICION DEL REACTIVO Mg EN EL PROCESO DE SUAVIZACION CON CAL EN CALIENTE.	1- DE 2 A 3 p.p.m. EN FRIO 2 DE 2 A 3 p.p.m. EN FRIO 3- 1 p.p.m. 4- 0.1 p.p.m.
SODIO Y POTASIO	Na ⁺ K ⁺ SOLIDOS DISUELTOS.	1- AFECTAN EL AGUA POTABLE 2- DEBIDO A SU GRAN SOLUBILIDAD NO AFECTAN LOS PROCESOS I.N.D. 3. AFECTA AL PROCESO DE VARIAS INDUSTRIAS ESPECIALIZADAS	1- 250 p.p.m.	4- DESMINERALIZACION CON INTERCAMBIADOR ANIONICO FUERTEMENTE BASICO. 1- USANDO UNA UNIDAD CATIONICA CICLO SODIO.	CONTENIDO DESPRECIABLE

NOMBRE	FORMULA Y CLASE	PROBLEMAS QUE CAUSA	LIMITE DE TOLERANCIA	TRATAMIENTO	RESIDUO POST-TRATAMIENTO
SUFATOS	SO_4 SOLIDOS DISUELTOS	1- CAUSAN INCRUSTACIONES DURAS EN LAS CALDERAS SI HAY CATIONES DE Ca Y Mg. 2- CAUSA SABOR AMARGO Y EFECTO DE PURGANTE EN GRANDES CANT.	1- PARA USOS GENERALES DE 100 A 300 p.p.m. APROXIMADAMENTE. 2- PARA USOS FARMACEUTICOS O EQUIVALENTES, 2 p.p.m.	1- TRATAMIENTO DE BARIO 2- DESMINERALIZACION.	1- APROX. DE 17 A 25 p.p.m. 2- DE 0 A 3 p.p.m.
TURBIDEDAD	SOLIDOS EN SUSPENSION	1- OCASIONA DEPOSITOS 2- CAUSA QUE SE ENSUCIE EL PAPEL TELAS U OTROS TEXTILES.	1- PARA USOS GENERALES MENOS DE 5 p.p.m. 2- PARA PRODUCTOS FINOS MENOS 1 p.p.m.	1- FILTRACION SI HAY PEQUEÑAS CANT. DE SED. 2- DOSIFICACION QUIMICA Y FILTRACION.	1- MENOS DE 5 p.p.m. 2- DE 2 A 5 p.p.m. 3- MENOS DE 1 p.p.m.
OXIGENO	O_2	1- CORROSION	1- MENOS DE 0.005 p.p.m. EN ECONOMIZADORES DE TUBO DE ACERO O EN CALDERAS DE ALTA PRESION 2- MENOS DE 0.05 p.p.m. EN CALDERAS DE BAJA PRESION.	3- FILTRACION - DIATEMACIA - PARA BACTERIAS Y CANT. PEQUEÑAS DE TURBIDAD. 1- DEAREACION EN CALIENTE. 2- DEAREACION EN FRIO AL VACIO. 3- INHIBIDORES DE CORROSION.	1- DE 0.00 A 0.005 p.p.m. 2- DE 0.1 A 0.3 DEPENDIENDO DE LA TEMPERATURA

CAPITULO I

1.0 GENERALIDADES

El agua es la sustancia que se emplea en la industria, en mayores cantidades. La calidad de ésta - varía según los requerimientos especiales de su - uso, el grado y tipo de impurezas que ésta contenga y el tipo de tratamiento al que se le someta

CLASIFICACION

Por su origen	{	Aguas superficiales	Ríos Lagunas Canales Lagos
		Aguas Subterráneas	Pozos profundos Manantiales Filtraciones subterráneas
Por su aplicación	{	Agua para uso Municipal o Agua Potable	
		Agua para usos Industriales	Agua de enfriamiento. Agua para calderas. Agua para proceso. Agua para usos -- generales.

IMPUREZAS COMUNES EN EL AGUA

Las impurezas comunes en el agua se han agrupado -- la Tabla 1.1 así como los problemas que causan en -- las distintas aplicaciones del agua, los tipos de -- tratamiento usados con mayor frecuencia y sus resul -- tados.

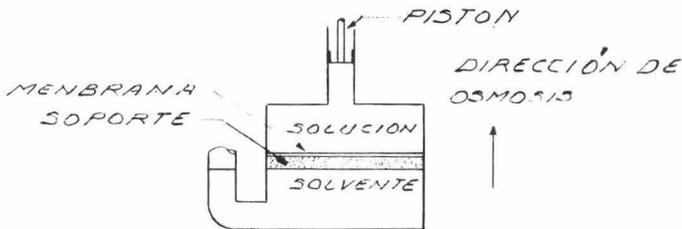
CAPITULO II

2.0 OSMOSIS Y PRESION OSMOTICA

2.1 DESCRIPCION DE LA OSMOSIS.

La osmosis depende de la existencia de una membrana que es selectiva en el sentido, de que ciertos componentes de una solución (generalmente el solvente) pueden pasar a través de la membrana; a tal característica selectiva de la membrana se le llama semipermeabilidad. Si una membrana semipermeable separa una solución de su solvente puro, o dos soluciones de distinta concentración, la tendencia a igualar las concentraciones -- resultará en un flujo de solvente de la fase menos concentrada, ésta es la fase rica en solvente, a la fase más concentrada.

Fig. 2.1.



Este es el flujo de solvente llamado ósmosis.

2.2 PRESION OSMOTICA

Si mediante algún dispositivo se ejerce presión en la

solución más concentrada la velocidad de flujo decrecerá y conforme aumente esta presión, se llegará a un -- punto en el que el flujo llegue a cero.

Esta presión de equilibrio se llama presión osmótica, - y como se verá posteriormente, es una propiedad de la - solución y no depende de ninguna forma de la membrana.

2.3 LA TERMODINAMICA DE LA OSMOSIS

El flujo de materia de una región a otra se encuentra - definido por una propiedad llamada "Potencial Químico". - Cualquier clase de materia, como es el agua, fluye en - la dirección en que decrece la temperatura.

El potencial químico se encuentra definido por la ecuación de Gibb's.

$$dU = TdS - pdV + \sum \mu_i dN_i \quad (2.3)$$

donde U = energía

T = temperatura

S = entropía

P = presión

V = volúmen

μ_i = potencial químico del componente i

N_i = número de moles del componente i

Así también el potencial químico puede relacionarse -- con los diferenciales de otras propiedades, en términos de la energía libre de Gibb's G, la relación es

$$dG = -S dT + V dp + \sum_i \mu_i dN_i \quad (2.4)$$

Esto conduce inmediatamente a las relaciones

$$\mu_i = \left(\frac{\partial G}{\partial N_i} \right)_{T, p, n_j} \quad (2.5)$$

y

$$V = \left(\frac{\partial G}{\partial p} \right)_{T, N} \quad (2.6)$$

Diferenciando la ec. 2.6 con respecto a N_i dá:

$$\left(\frac{\partial^2 G}{\partial N_i \partial p} \right)_{T, N_i} = \left(\frac{\partial V}{\partial N} \right)_{T, p, N_i} \quad (2.7)$$

La derivada en la derecha es la cantidad llamada "volumen molar parcial" del componente i ; este será denotado por V_i y es generalmente interpretado como el incremento en volumen por mol de componente i añadido.

La derivada en la izquierda puede expresarse en términos de el potencial químico, invirtiendo el orden de diferenciación, y aplicando la ec. 2.5, esto dá:

$$\left(\frac{\partial \mu_i}{\partial p} \right)_{T, N} = V_i \quad (2.8)$$

En los cálculos actuales es costumbre no usar el potencial

cial químico por si mismo, sino una cantidad llamada - actividad "a_i" y relacionarla con el potencial químico por:

$$\mu_i = \mu_i^\circ + RT \ln a_i \quad (2.9)$$

donde: R = constante de los gases
a_i = actividad del componente i
μ_i[°] = potencial químico estándar
(dependiente de la presión y temperatura solamente y no de la concentración)

Los requerimientos termodinámicos para el equilibrio - osmótico son tales que el potencial químico del solvente debe ser el mismo en ambos lados de la membrana.

Si nosotros empezamos con solvente puro en ambos lados de la membrana a presión p", las dos fases estarán por supuesto en equilibrio, ambos teniendo un potencial -- químico μ_i. Si ahora agregamos soluto al solvente en un solo lado de la membrana, su potencial químico es:

$$\mu_i(p'') = \mu_i^\circ(p'') + RT \ln a_i(p'') \quad (2.10)$$

donde la p" en paréntesis nos indica que la propiedad correspondiente se evalúa a la presión p".

Para obtener nuevamente las condiciones de equilibrio, será necesario incrementar la presión en la solución -

hasta que el potencial químico del solvente en la solución se eleva hasta igualar al del solvente puro de la ec. 2.8 se puede observar que el incremento del potencial químico de el solvente en la solución de p'' a p' está dado por:

$$\int_{p''}^{p'} \left(\frac{\partial \mu_1}{\partial p} \right)_{T,N} dp = \int_{p''}^{p'} v_1 dp \quad (2.11)$$

Como este incremento, añadido al potencial químico dado por la ec. 2.10 es la diferencia entre el potencial químico del solvente y el solvente en solución tenemos

$$-RT \ln a_1(p'') = \int_{p''}^{p'} v_1 dp \quad (2.12)$$

Esta ecuación es exacta y en principio hace posible -- los cálculos de la presión osmótica que es simplemente $p'-p''$, si a_1 puede ser medida independientemente a -- la presión p'' y v_1 se conoce como una función de p .

Sin embargo esta ecuación es impráctica y generalmente se hacen aproximaciones simplificadas en su lugar.

La primera aproximación usualmente hecha para la -- ec. 2.12 es asumir algunas expresiones simples para v_1 como una función de p como:

$$-RT \ln a_1(p'') = (p'-p'') v_1 = \pi v_1 \quad (2.13)$$

donde π = presión osmótica.

La actividad es frecuentemente determinada mediante me
diciones en la presión de vapor por la ecuación:

$$a_1 = \frac{P_1}{P_1^*} \quad (2.14)$$

donde: P_1 = presión de vapor de la solución

P_1^* = presión de vapor del solvente puro

Con esto obtenemos la actividad a la presión P_1 , pero
como P_1 y p'' son generalmente cercanas y la actividad
varía solamente lentamente con la presión total podemos
escribir:

$$\pi v = RT \ln \left(\frac{P_1^*}{P_1} \right) \quad (2.15)$$

Esta ecuación ha dado excelentes resultados. ←

Presiones osmóticas experimentales para soluciones de
sacarosa se comparan con los calculados por esta ecua
ción en la Tabla 2.1

TABLA 2.1

ND

PRESIONES OSMOTICAS DE
SOLUCIONES DE SACAROSA A 30°C

PRESION OSMOTICA/ATM

MOLALIDAD	EC. VAN'T HOFF	ECUACION 2.15	EXPERIMENTAL
0.991	20.3	26.8	27.2
1.646	30.3	47.3	47.5
2.366	39.0	72.6	72.5
3.263	47.8	107.6	105.9
4.108	54.2	143.3	144.0
5.332	61.5	199.0	204.3

→ Se puede hacer una 2a. simplificación a la ec. 2.13
utilizando la ley de Raoult, para soluciones de muy -
baja concentración

$$\ln a_1 = \ln Z_1 = \ln(1 - Z_2) \approx -Z_2 \quad (2.16)$$

donde Z = fracción mol.

Sust. ec. 2.16 en ec. 2.13 obtenemos.

$$\pi v_1 = RTZ_2 \quad (2.17)$$

y:

$$\pi \left(N_1 v_1 \right) = N_2 RT \quad (2.18)$$

o:

$$\pi V = N_2 RT \quad (2.19)$$

A esta ecuación se le conoce como ecuación de Van't Hoff.

Otra versión es:

$$\pi = n_2 RT \quad (2.20)$$

En todo el desarrollo anterior se ignora completamente las características de el soluto, y se ha asumido que este es una sola especie.

Además como se ha podido observar todas las aproximaciones hechas, es por eso, que con la ecuación 2.20 solo se pueden hacer cálculos más o menos aproximados para soluciones de bajas presión osmótica generalmente abajo de 2 atm.

Por otro lado si el soluto se disocia o asocia en la solución, solo se pueden usar las ecuaciones que relacionan a la presión osmótica con la actividad o presión de vapor, pero no aquellas que la relacionan con la concentración. ← si

° Existen un gran número de teorías que tratan de explicar el mecanismo de la ósmosis, sin embargo no parecer ser posible el decidir entre ellas de una manera general, sino particularmente para cada caso.

El objeto que se persigue en este trabajo no es el de hacer un estudio profundo de la ósmosis, sino el de -- aprovechar su efecto, canalizándolo hacia un fin netamente práctico, que es la ósmosis inversa en el tratamiento de aguas, razón por la cual únicamente se verán las relaciones entre la ósmosis y los parametros que en un momento dado nos conduzcan a las bases de diseño para un sistema de ósmosis inversa. ^G F. J. M.

*El efecto de la ósmosis es
pasar de un lado a otro
En la práctica, para el
ósmosis inversa, se utiliza
un membrana
que permite el paso de agua
pero no de soluto.*

CAPITULO III

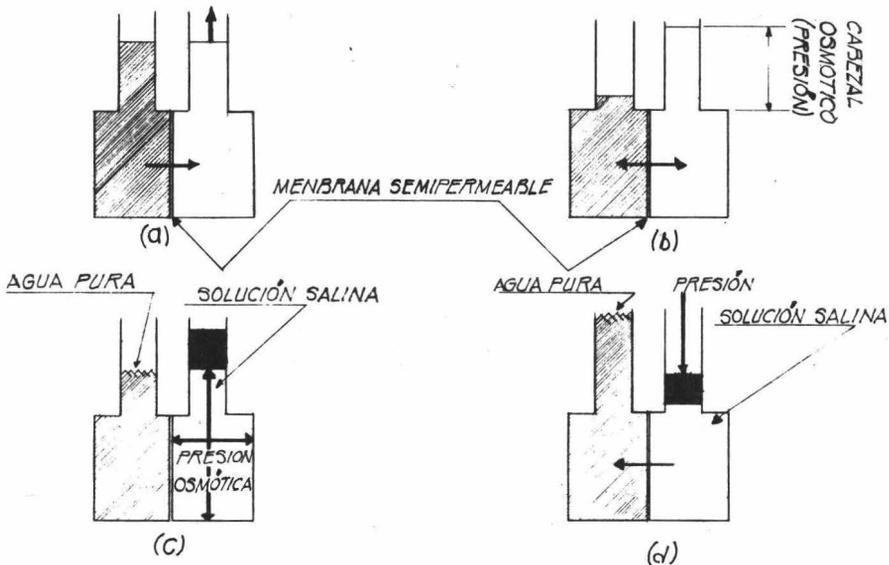
→ 3.0 OSMOSIS INVERSA

3.1 EL PRINCIPIO DE LA OSMOSIS INVERSA.

[La ósmosis inversa es un proceso, que simplificando - actúa como un filtro molecular, que remueve hasta el 90 a 95% de todos los minerales disueltos, el 95 a - 97% de casi todos los orgánicos disueltos y el 98% y más de la materia orgánica y coloidal de el agua.]

Para entender como trabaja la ósmosis inversa veamos las siguientes figuras.

Fig. 3.1.



en la Fig.3.1.(a) agua pura está separada de una solución por una membrana semipermeable, la cual permite el paso fácilmente al agua, pero retarda el flujo de los sólidos disueltos.

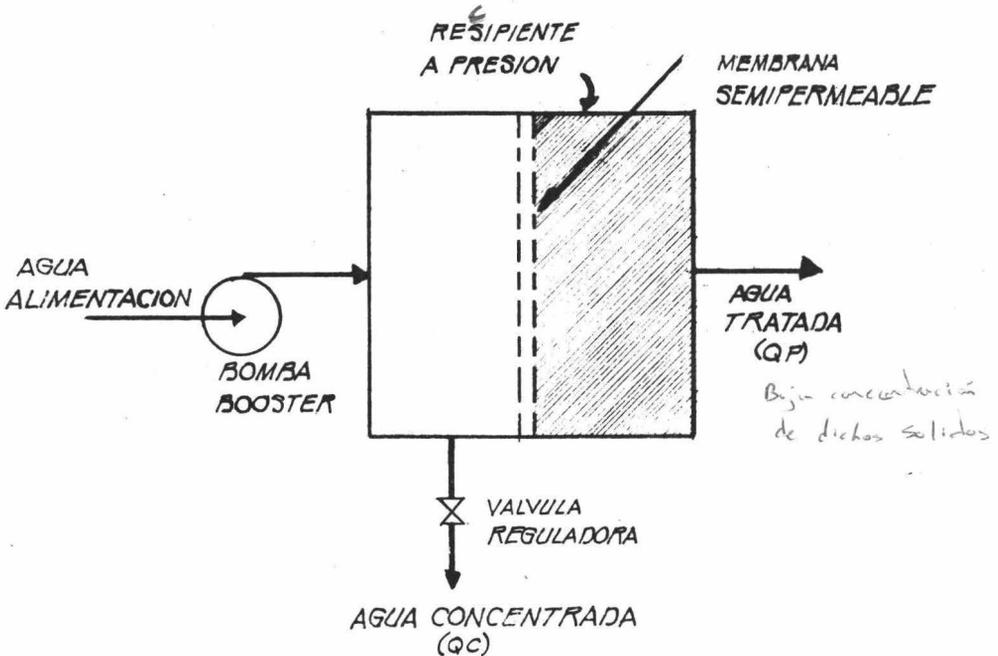
[La ósmosis es el proceso natural en el cual el agua -- pura, fluye a través de la membrana de la solución diluída a la concentrada.

El flujo de agua continúa hasta que la presión en ambos lados de la membrana es la misma. Este es el equilibrio osmótico mostrado en la Fig.3.1. (b)

[En la ósmosis inversa el concentrado se localiza en un compartimento tal como se ilustra en la Fig.3.1.(c). El flujo osmótico natural, no se presentará debido a que la presión osmótica será inferior a la contra presión ejercida en el compartimento y por este mismo efecto - el flujo será contrario al flujo osmótico natural obteniéndose así el proceso de la ósmosis inversa y como consecuencia la purificación del agua. Fig.3.1. (d).

Un diagrama de flujo simplificado se muestra en la -- Fig.3.2.

DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO
DE UN SISTEMA OSMOSIS INVERSA
FIG. 3.2



y muestra como opera el proceso. Se aplica continuamente presión a la corriente de alimentación mediante una bomba de alta presión. Los sólidos disueltos rechazados por la membrana son continuamente removidos de la misma; se obtienen dos corrientes continuas, una llamada rechazo (QC) que contiene un alto contenido --

de sólidos disueltos, mientras que la otra llamada - producto (QP) contiene muy baja concentración de dichos sólidos.] ←

3.2 VARIABLES DE OPERACION

Merten, en 1966 encontró que el flujo de agua y sal a través de una membrana puede ser descrito por dos -- ecuaciones

$$Q_w = K_w (\Delta P - \Delta \pi) A / t \quad (3.1)$$

$$Q_s = K_s (\Delta C) A \quad (3.2)$$

donde: Q_w = flujo de agua
 Q_s = flujo de sal
 ΔP = presión diferencial en la membrana
 ΔC = concentración diferencial
 $\Delta \pi$ = área de la membrana
 t = espesor de la membrana

Básicamente, estas dos ecuaciones nos dicen que el flujo de agua a través de la membrana es proporcional a la presión diferencial aplicada a través de la membrana, y el flujo de sal a través de la membrana es proporcional a la concentración.] Entonces incrementando la presión de operación se incrementa el flujo de agua a un flujo constante de sal.

3.2.1 Conversión y Porcentaje de Sal.

Conversión o recuperación está definido por la ecuación:

$$Y = \frac{Q_p}{Q_f} (100) \quad (3.3)$$

donde: Y = % de conversión o recuperación

Q_p = flujo de agua producto

Q_f = flujo de agua alimentado

Esto simplemente significa que si nosotros trabajamos al 75% de conversión, se obtendrán 75 galones de agua pura y 25 galones de rechazo, si nosotros usamos 100 galones de agua de alimentación.

Es por supuesto deseable operar a altas conversiones, para desperdiciar lo menos posible de agua.

La mayoría de los procesos industriales operan en un rango del 75 - 80%. Sin embargo algunas veces es necesario operar a más bajas conversiones debido a la posibilidad de la precipitación, de las sales disueltas en la alimentación (generalmente carbonato o sulfato de calcio).

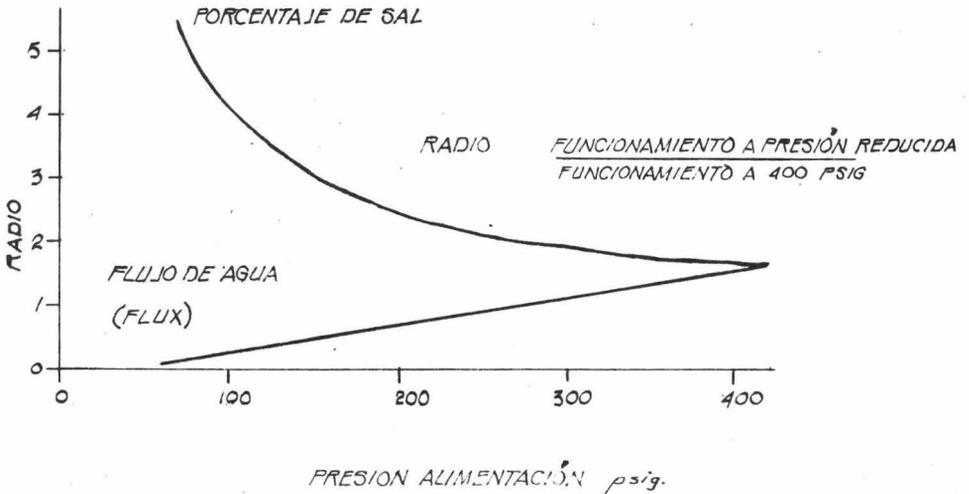
Porcentaje de Sal.- Este término es simplemente la concentración de sólidos disueltos en la corriente producto dividido por la concentración en la corriente de alimentación.

$$SP = \frac{C_p}{C_f} (100) \quad (3.4)$$

donde: sp = porcentaje de sal
Cp = concentración en el producto
Cf = concentración en la alimentación

La Fig. 3.3 nos muestra el efecto de la reducción de la presión con el flujo de agua y el porcentaje de sal.

FIG 3.3

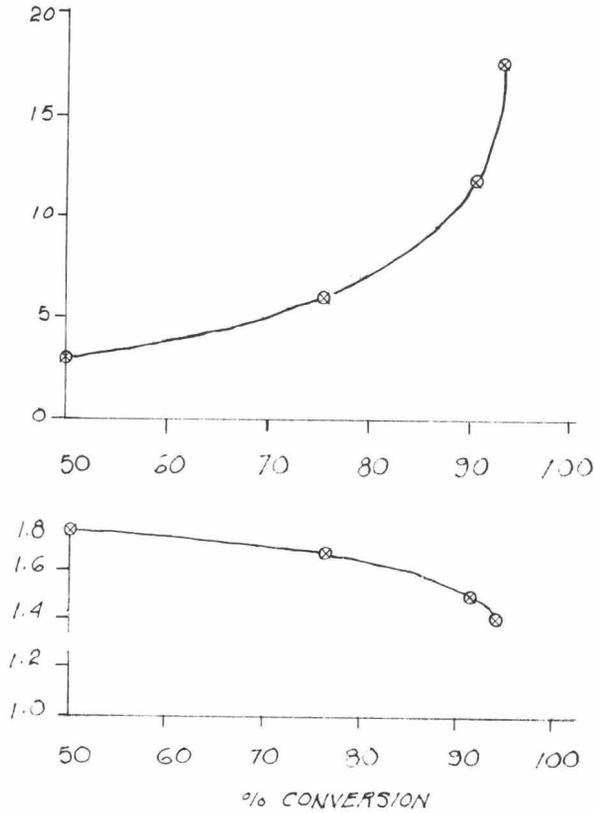


El nivel de conversión seleccionado en el diseño de una planta afectará su funcionamiento debido al porcentaje de sal como se muestra en la Fig. 3.4.

FIG 3.4
EFECTO DEL GRADO DE CONVERSIÓN
EN EL FUNCIONAMIENTO

PRODUCTO G.P.M.

% DE SAL



Conforme incrementamos la conversión, la corriente de rechazo se hace más y más concentrada y ésta incrementa a su vez el "driving force".

A muy altas conversiones (mayores del 80%) la presión osmótica diferencial puede elevarse demasiado y traer como consecuencia un decrecimiento en el flujo de agua.

→ 3.3 LA MEMBRANA ✓

El flujo de agua a través de la membrana como se indicó anteriormente, es directamente proporcional al área de la membrana e inversamente proporcional al espesor de la misma. Es por este motivo que lo más deseable es presentar la mayor área posible en un espesor de membrana mínimo.

En este intento se han encontrado distintos tipos de membranas, diferentes tanto en su forma de operación, como en su material de construcción.

3.3.1 Semipermeabilidad.

En un principio se pensó que la presión osmótica dependía de la naturaleza de la membrana utilizada en sus medidas, pero] debemos subrayar que esto no es cierto; [existe únicamente una presión osmótica de --

una solución dada, a una temperatura definida; pero - esto solo puede observarse con una membrana semipermeable perfecta. [Siempre que una membrana sea completamente semipermeable,] [la presión osmótica desarrollada será independiente de la naturaleza de dicha membrana.] Esto se demuestra por la siguiente -- consideración teórica:

Imaginemos una vasija dividida en tres secciones por dos membranas semipermeables fijas S_1 y S_2 tal como se muestra en la figura 3.5.

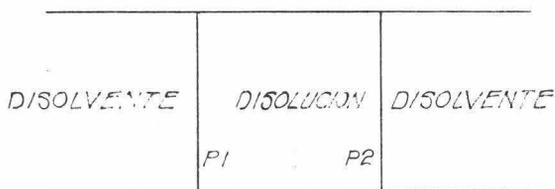


FIG 3.5

La porción central entre las membranas contiene una solución y en las exteriores se coloca solamente -- solvente puro. Supongamos que la presión osmótica -- que se puede producir en S_1 sea P_1 pero que en la -- membrana S_2 sólo se pueda producir una más pequeña -- que sea P_2 . Deberá fluir solvente a través de S_1 -- hasta que se tenga una sobrepresión P_1 ; esta presión -- sin embargo, mayor que la necesaria para impedir -- la ósmosis en S_2 de forma que el disolvente en la -- disolución pasará a través de esta membrana para -- intentar reducir la sobrepresión en la disolución -- hasta P_2 . Este descenso de presión perturbará el -- equilibrio en S_1 y entrará más disolvente por esta -- membrana únicamente para volver a salir por la S_2 . Resultará, por tanto, un flujo continuo de solvente desde la izquierda a la derecha, el cual sólo se -- podrá utilizar para ejecutar trabajo sin recibir -- energía del exterior.

Dicho de otro modo, en virtud de que las dos membra -- nas soportan diferentes presiones osmóticas, se po -- drá obtener un movimiento perpetuo. Como esto es -- contrario a los principios termodinámicos es eviden

te que la presión osmótica deberá ser independiente de la naturaleza de la membrana. Si una de las membranas por ejemplo la S_2 , es permeable de forma que en ella se alcanza una presión inferior, habrá un -- flujo inicial del disolvente, que cesará pronto; el soluto pasará gradualmente a través de S_2 y la con-- centración de la disolución, y por lo tanto, su presión osmótica tenderá a cero. De esta forma se puede obtener algún trabajo que, será equivalente a la energía de dilución.

3.3.2 Causas de la Semipermeabilidad.

Las primeras indicaciones acerca del origen de la -- propiedad semipermeable de ciertas membranas fueron hechas por M. Tranbe (1867), quien pensaba que ac-- tuaban como en cedazo, reteniendo las moléculas gran-- des, pero dejando pasar las pequeñas. El mecanismo de cribado se puede aplicar en parte al proceso de -- la diálisis, pero es dudoso que se pueda aplicar al comportamiento de las membranas semipermeables. Se ha establecido por ejemplo que las membranas con -- poros de diámetro mucho mayor que el de las moléculas de soluto son capaces de impedir el paso de es--

tas últimas. El fenómeno de la semipermeabilidad se puede ilustrar con el ejemplo siguiente. Se colocan en un cilindro cloroformo, agua y éter en el ordenado de manera que se formen tres capas. Siendo el éter soluble en agua en un grado apreciable, podrá pasar a través de ésta hasta la capa clorofórmica; pero el cloroformo debido a su insolubilidad en el agua, no podrá alcanzar la capa etérea. El agua funciona así como una membrana semipermeable, permitiendo el paso del éter, pero no así del cloroformo.

Según lo anterior parece que la semipermeabilidad en conexión con la ósmosis, se puede explicar suponiendo que el disolvente es soluble en la membrana mientras que el soluto no lo es.

En los últimos años se ha desarrollado la idea, basada en la sugerencia de J. Von Liebig (1862) de que el factor que determina la semipermeabilidad es la solubilidad superficial o adsorción; si las partículas que constituyen la membrana se recubren con moléculas adsorbidas del disolvente se establecerá una continuidad que permitirá el movimiento fácil del disolvente a través de la membrana. Por otro lado,

las moléculas del soluto son incapaces de penetrar - en la red compleja, especialmente por la adsorción - preferente de las moléculas de disolvente sobre la - superficie hace que los poros sean efectivamente de diámetro menor.

Se puede observar que quizá no exista una explicación capaz de abarcar todos los ejemplos de semipermeabilidad, y es tema del investigador el seguir estudiando este fenómeno, con el fin de obtener como resultado día con día modelos más adecuados y completos que expliquen este fenómeno.

3.3.3 Tipos de Membranas.

Como se observó en la ec. 3.1. el flujo de agua a través de una membrana está relacionado directamente a el área de la membrana, e inversamente al espesor de la misma. Es por esto que para hacer efectivo un equipo de ósmosis inversa este debe presentar la mayor área posible de membrana, con el menor espesor de ésta. Esta consideración básica junto con otras muchas variables han conducido básicamente al diseño de cuatro tipos de membranas:

- a) El diseño más sencillo de entender y el primero descubierto es el diseño de placas.

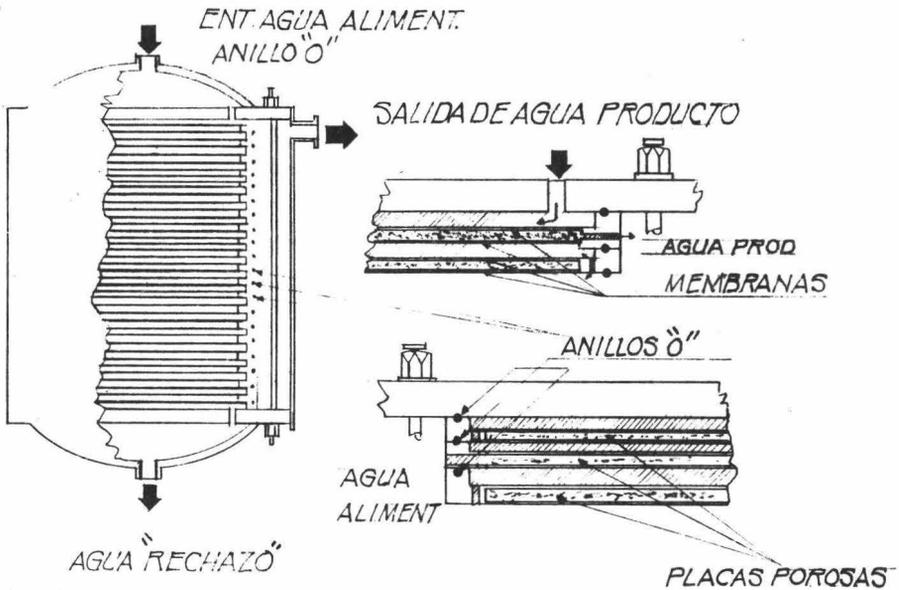


FIG. 3.6

Este diseño es complejo mecánicamente y además - bastante ineficiente, debido a la pequeña cantidad de área de membrana por unidad de volumen -- de equipo.

Sin embargo unidades similares se usan aún para laboratorios y equipos de investigación, pero -- tales unidades tienen muy poca aplicación en lo que a usos industriales se refiere.

b) La segunda aproximación a un diseño, de una ósmosis inversa fué ^{b)} el diseño tubular.

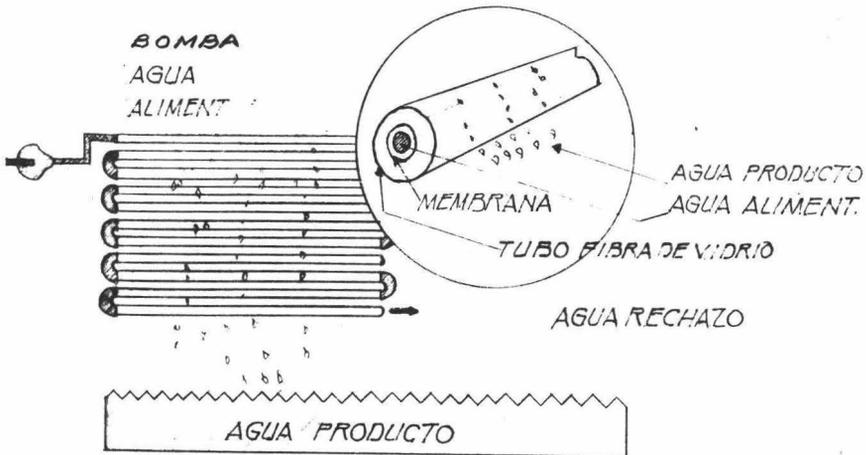


FIG. 3.6 3A

Este diseño fué un esfuerzo para obtener más --
área superficial por unidad de volúmen de equi-
po y por simplificar la mecánica de dicho equi-
po.

En Este diseño es simple de entender. La membrana
semipermeable se encuentra insertada en la su-
perficie de un tubo poroso, el cual es diseñado
para soportar la presión de operación. El agua
de alimentación a presión, se introduce en uno
de los extremos de el tubo, el agua producto --
pasa a través de la membrana y el tubo y es co-

lectada en el exterior el rechazo o concentrado sale por el otro extremo de el tubo.

- c) Otro esfuerzo por obtener áreas superficiales -
mayores por unidad de volúmen de equipo es el -
c) tipo espiral.

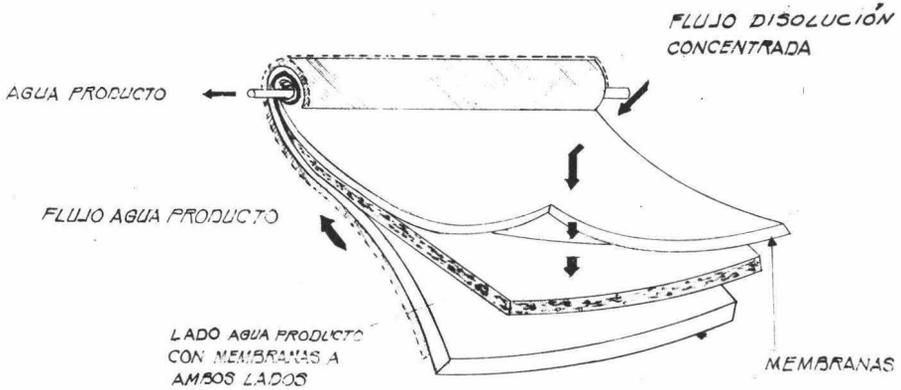


FIGURA 3.8

Este diseño utiliza una lámina de membrana sopor
tado en ambos lados por un material poroso utili
zado como distribuidor de flujo y soporte de mem
brana.

- d) El último diseño desarrollado es el de la membra
na en forma de finas fibras utilizadas en un --

equipo similar a un cambiador de calor, en donde las fibras se encuentran haciendo las veces de tubos en dicho equipo.

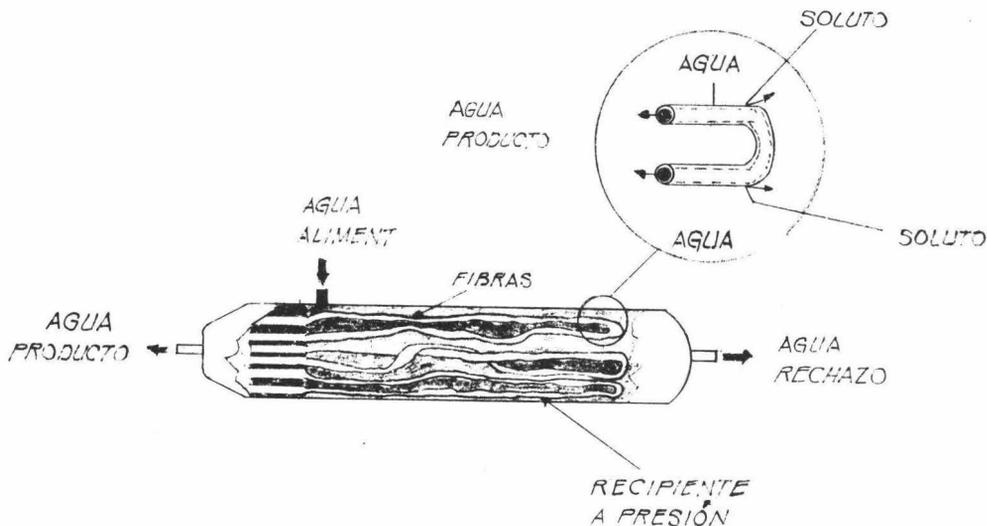


FIGURA 3.9

La solución a ser procesada se introduce dentro del "cambiador" por el lado de la coraza a suficiente alta presión para que venza la presión osmótica y pase a través de las paredes de las membranas y pase al lado de los tubos y salga por dicho lado, el concentrado o rechazo se obtiene por el mismo lado de la coraza.

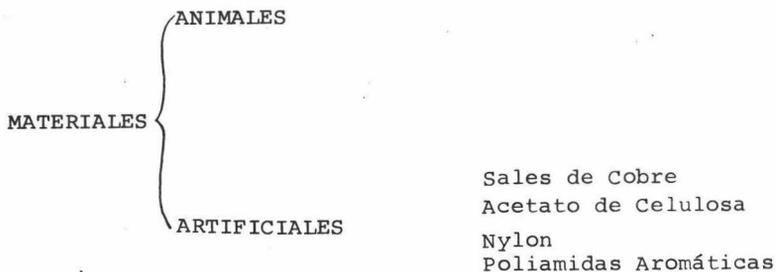
En la tabla 3.3 se concentran las característi-

cas de área por unidad de volúmen de los sistemas anteriormente descritos.

TABLA 3.1			
TIPO DE MEMBRANA	AREA DE LA MEMBRANA POR MODULO (ft ²)		VOLUMEN POR MODULO (ft ³)
MEMBRANA TUBULAR	TUBO SENCILLO 18 TUBOS	18	0.02 0.36
MEMBRANA ESPIRAL		50	0.2
MEMBRANA DE FIBRAS		50000	55

3.3.4 Materiales de Construcción

Los materiales para las membranas los podemos clasificar como sigue:



Estos son los materiales hasta la fecha más comúnmente usados para la fabricación de membranas semipermeables; sin embargo día con día la tecnología de materiales experimenta nuevos materiales para que los procesos de ósmosis inversa resulten cada vez más eficientes y accesibles.

3.4 PRETRATAMIENTO REQUERIDO ←

Para el acondicionamiento del agua por ósmosis inversa es necesario efectuar un pretratamiento, que varía según varíen las condiciones del agua a tratar, sin embargo dentro de esta variedad de condiciones, es necesario cuidar la operación de varios parámetros como sigue:

3.4.1 Presión

Haciendo referencia a la ecuación 3.1. la presión juega un papel importantísimo dentro de el proceso de ósmosis inversa ya que esta nos proporcionará la amplitud del "driving force" para efectuarse dicho proceso.

Incrementando la presión de alimentación se debería incrementar la cantidad de producto; se ha encontrado que así sucede, sin embargo a mayor presión se --

requiere de materiales más costosos y de membranas más resistentes, así como de costos de operación más elevados y es aquí donde la economía nos marca ciertos límites recomendables.

En términos generales podemos decir que la presión de operación de nuestro sistema de ósmosis inversa deberá ser aquella que nos proporcione el flujo de agua más económico es decir $\$/m^3$ de agua tratada.

3.4.2 Temperatura.

Basándonos en la ecuación de Van't Hoff. Podemos observar que la presión osmótica es directamente proporcional a la temperatura.

Debido a que la presión de alimentación, así como la concentración se mantienen constantes, los cambios de temperatura pueden incrementar o disminuir el "driving force" del proceso y ocasionarnos trastornos y pérdidas de eficiencia en él mismo.

Además por otro lado las características semipermeables de la membrana pueden modificarse con la temperatura de operación.

Es por estos motivos que en los procesos de ósmosis inversa es necesario trabajar dentro de ciertos lími

tes prácticos de temperatura que generalmente nos --
los establece el fabricante de la membrana.

3.4.3 Sólidos no Disueltos o en Suspensión y Bacterias.

Otra característica que debe tener el agua a tratar--
por un proceso de ósmosis inversa, es el que debe --
ser un agua clara y filtrada, es decir libre de só--
lidos en suspensión, así como de bacterias.

La razón de esto es puramente mecánica ya que los --
sólidos no disueltos, nos pueden "bloquear" la mem--
brana, incrementando la caída de presión a través de
la unidad, disminuyendo así nuestro "driving force"
y como consecuencia la capacidad de nuestro sistema.

3.4.4 P. H.

El control del P.H. es probablemente el más importan--
te pretratamiento requerido por el agua de alimenta--
ción.

En la mayoría de las aguas naturales es necesario --
agregar ácido para prevenir la precipitación del car--
bonato de calcio o hidróxido de magnesio durante la--
concentración de la alimentación en el proceso de ósmosis inversa.

Además por razones de tiempo de vida de la membrana es necesario mantener un P.H. determinado.

En términos generales un P.H. en el agua de alimentación entre 5 y 6, nos ofrece un buen punto de operación entre costo de químicos, tiempo de vida de la membrana, precipitación de carbonato de calcio y corrosión.

La cantidad de ácido requerido, dependerá del grado de alcalinidad.

3.5 EQUIPOS DE OSMOSIS INVERSA ←

(3.5.1 Recipiente a Presión.)

Debido a las altas presiones a que se trabaja, los recipientes, generalmente están diseñados bajo código; las dimensiones y materiales de construcción varían según las diferentes aplicaciones y las características de la solución de alimentación.

[La selección de los materiales de construcción está basada en las condiciones de presión, corrosión y requerimientos económicos para condiciones relativamente no corrosivas, el acero al carbón es aceptable.] Para la desalación de agua de mar, sin embargo, existe la tendencia a usar aleaciones costosas tales

como SS 20, 316 ó monel.

[Para sistemas a presión abajo o hasta 500 psig, se puede usar fibra de vidrio reforzada con resinas -- epóxicas.] Este material tiene excelentes perspectivas ya que su resistencia a la corrosión, es excelente y su única limitación es su resistencia mecánica.

[3.5.2 Bombas de Alta Presión.]

Existe una gran variedad de bombas disponibles en -- la actualidad en el mercado, para prestar el servicio requerido de presión en los sistemas de ósmosis inversa.

[Las bombas centrífugas generalmente son las que se prefieren, debido a su flexibilidad y sus bajos requerimientos de mantenimiento.]

Sin embargo para bajos volúmenes de flujo este tipo de bomba está restringido a usarse a baja presión -- debido a los costos de capital y a la eficiencia de bombas.

[Para condiciones de alta presión y capacidades pequeñas las bombas de pistón son las que se prefieren.]

[3.5.3 Controles.]

[Los principales parámetros de control en las plantas de ósmosis inversa son:]

[Presión, calidad del agua tratada, P.H. y caída de presión a través de la membrana y la velocidad de flujo en el rechazo.]

[El control del P.H. se puede efectuar mediante un medidor de P.H. en la corriente de alimentación, procurando mantenerlo mediante la adición controlada de ácido.]

[La presión del sistema se puede controlar] cerca del punto de operación [con válvulas operadas por presión colocadas en "by pass" y por válvulas de relevo.]

[La calidad del agua tratada puede ser controlada -- mediante celdas de conductividad que nos indiquen el contenido de sólidos.]

Es conveniente controlar también [la cantidad de sólidos en el rechazo, ya que a concentraciones excesivas pueden ocasionarnos bloqueo e ineficiencia de nuestro sistema.] ←

CAPITULO IV

4.0 COMPARACION ENTRE COSTOS DE OPERACION

En el capítulo primero se mostró cuales son las impurezas más comunes en el agua, y cuales los métodos convencionales de tratamiento para la eliminación de dichas impurezas. Como se puede observar las resinas intercambiadoras de iones, son las que hasta la fecha, presentan los métodos más prácticos y comerciales a los que se recurre en un momento dado para la eliminación de las impurezas indeseables en el agua a usar.

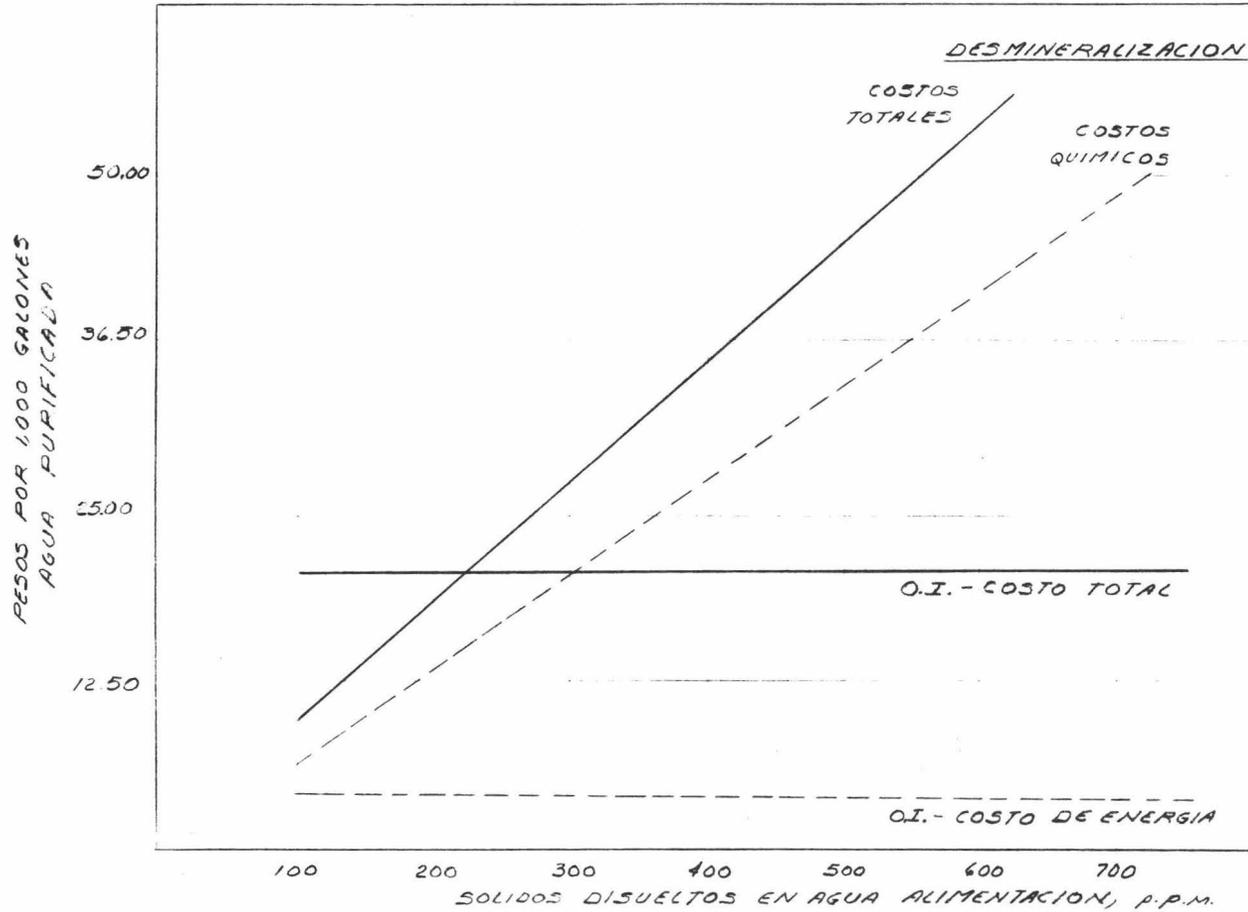
Cuando se requiere agua desmineralizada, es necesario recurrir a una combinación de resinas, una ciclo hidrógeno y otra aniónica fuertemente básica. En algunas ocasiones los costos de operación de este tipo de tratamiento son elevadísimos y encarecen demasiado el agua tratada, es en estos casos cuando la ósmosis inversa encuentra su total aplicación.

4.1 OSMOSIS INVERSA V.S. DESMINERALIZACION.

4.1.1 Desmineralización.

La figura 4.1 muestra los costos de operación para la producción de 25000 GPD de agua tratada a partir de aguas de alimentación con contenidos de sólidos

FIG. 4.1
OSMOSIS INVERSA VS. DESMINERALIZACION
25,000 G.P.D. AGUA PURIFICADA



dos totales diferentes, mediante un equipo de ósmosis inversa por un lado, y un equipo convencional de dos camas por el otro.

Debido a que los costos de operación en los sistemas de ósmosis inversa son independientes de el contenido sólidos disueltos, los costos de operación para el sistema de ósmosis inversa permanecen constantes para las distintas calidades de el agua de alimentación.

Por otro lado, el costo de químicos requeridos para la regeneración de las camas de resinas intercambiadoras se incrementan directamente en proporción al contenido de sólidos disueltos a ser eliminado.

Consecuentemente, mientras que los costos de operación mediante una desmineralización convencional resultan pequeños a un bajo contenido de sólidos disueltos, estos se incrementan rápidamente con el incremento en la concentración de sólidos disueltos, hasta que se llega a un punto en que la diferencia de costos de operación llega a ser notable y el ahorro permitirá la amortización de el capital más rápidamente.

Es posible pues predecir observando el contenido de sólidos totales disueltos cual será el sistema adecua

do para efectuar la desmineralización. Pero definitivamente a altas concentraciones de sólidos la ósmosis inversa es el método más efectivo, operable y adecuado a usar.

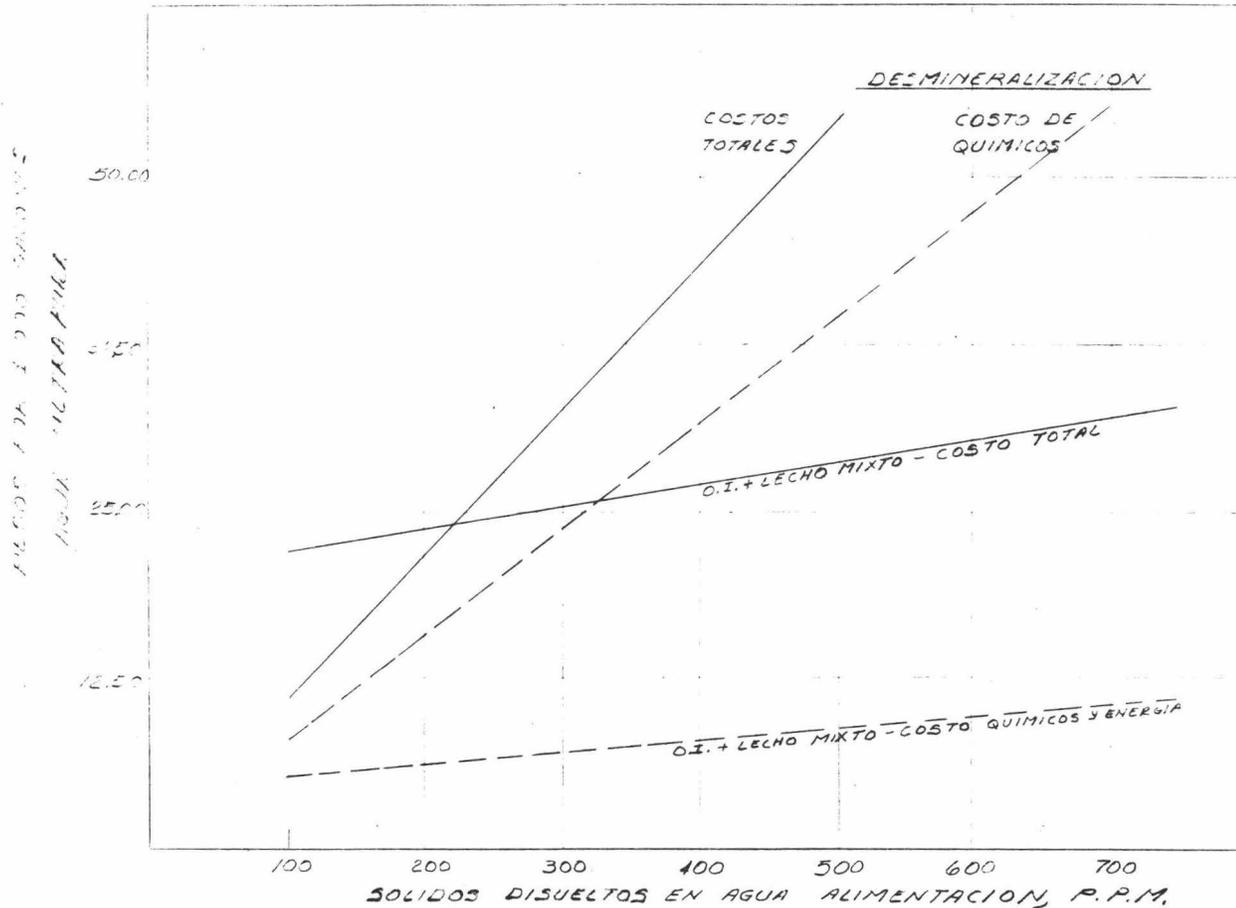
4.1.2 Agua Ultrapura.

Ni la desmineralización convencional, ni la ósmosis inversa son capaces de producir agua ultrapura. Sin embargo, si el agua producto de cualquiera de los dos sistemas se procesa mediante una unidad intercambiadora de lecho mixto, el efluente de ésta será comparable en calidad con el agua triple destilada.

En la Figura 4.2 se muestran los costos de operación para la producción de 25000 GPD de agua ultrapura con una conductividad menor a 1.0 micromho, mediante los dos sistemas anteriormente descritos cuando se utiliza en cada uno de ellos, una resina intercambiadora de lecho mixto como unidad pulidora.

Los costos comparativos presentan una situación parecida a la anterior sólo que en este caso los costos de operación del sistema de ósmosis inversa se incrementan ligeramente debido al consumo de químicos por la unidad pulidora.

FIG. 4.2. COSTOS DE OPERACION
 OSMOSIS INVERSA + LECHO MIXTO VS. DESMINERALIZACION + LECHO MIXTO
 25,000 G.P.D. AGUA ULTRA PURA



Cuando se desee estudiar la posibilidad de la instalación de un sistema de ósmosis inversa, será necesario realizar un análisis o estimado de costos para ver si se justifica o no.

En el capítulo V de este trabajo se desarrolla la ingeniería para un sistema de ósmosis inversa con una capacidad de 4500 GPH para producir agua ultra-pura a partir de una concentración inicial de 750 p.p.m. de sólidos totales disueltos.

El análisis de costos entre los dos sistemas anteriormente descritos es como sigue:

4.2 ESTIMADO DE COSTOS.

4.2.1 Sistema de Osmosis Inversa

a) Características del sistema.

Sistema de O.I. con capacidad de 25000 GPD.

b) Costos de Operación:

1. Costos de potencia basados en un motor de 40 HP usando 360 KWH por día a \$0.25/KWH.
2. Costo de químicos fueron estimados a \$0.625/1000 Gal.
3. Mano de obra.- Se estimó 0.5 horas/día a \$62.50/hora.

c) Costos de Amortización.

Costo del sistema O.I:	516 500.00
Costo de instalación:	25 825.00
Inversión inicial:	<u>542 325.00</u>

Los módulos suministrados con el equipo fueron -
amortizados en tres años, el resto en 10 años.

4.2.2 Sistema de Desmineralización.

A) Características del sistema:

	Sistema 2 Camas	Sistema Lecho Mixto
Resina Catiónica ft ³	11.0	5.4
Resina Aniónica ft ³	9.5	8.0
Flujo (GPH)	1500	1500
Tiempo entre ciclos (HRS)	4.5	18
Ciclos/día	4	1

B) Costos de operación

1. Regeneración con ácido 20 lbs de HCL
al 30%
2. Regeneración con sosa 4 lbs de NaOH
3. Mano de obra.- Se estimó en 6 horas/día para-
el sistema de 2 camas y en 2 horas/día para --
el sistema de lecho mixto a \$62.50 hora.

C) Costos de amortización

Costo del sistema de 2 camas: 61 250.00

Costo del sistema de lecho mixto: 56 250.00

Costo de instalación: 5 875.00

Inversión inicial: 123 375.00

El total de la inversión inicial fué amortizado en 10 años.

4.3 RESULTADOS

\$/1000 Gal.

Caso I: O.I. + lecho mixto.

	Sist. O.I.	Lecho Mixto	Total
Energía (y químicos)	4.25	7.12	11.37
Mano de obra	<u>1.25</u>	<u>5.00</u>	<u>6.25</u>
Costos Directos	5.50	12.12	17.62
Amortización	<u>14.75</u>	<u>0.625</u>	<u>15.375</u>
Costo Total	20.25	12.745	32.995

Caso II: Desmineralización Completa.

	Desmineralizador	Lecho Mixto	Total
Químicos	52.00	7.12	59.12
Mano de obra	<u>15.00</u>	<u>5.00</u>	<u>20.00</u>
Costos Directos	67.00	12.12	79.12
Amortización	<u>0.875</u>	<u>0.625</u>	<u>1.50</u>
Costo Total	67.875	12.745	80.62
AHORRO	47.625	\$/1000 Gal.	

DEFICIT EN LA INVERSION INICIAL

$$542,325.00 - 67,125.00 = 475,200.00$$

AHORRO MENSUAL

$$47,625 \frac{\$}{1000 \text{ Gal.}} \times 4500 \text{ GPH} \times 18 \frac{\text{hr}}{\text{día}} \times 10^{-3} =$$

$$= 3850.00 \text{ \$/día}$$

$$3,850.00 \times 30 = 115,700 \text{ \$/mes}$$

RECUPERACION DE CAPITAL

$$\frac{475,200 \text{ \$}}{115,700 \text{ \$/mes}} = 4.107 \text{ meses.}$$

CAPITULO V

DISEÑO DE UN SISTEMA DE TRATAMIENTO DE AGUAS PARA UNA -- PLANTA PARA PRODUCIR ANTIBIOTICOS, LOCALIZADA EN EL NORTE DE LA REPUBLICA.

5.0 BASES DE DISEÑO

Esta planta para realizar su proceso de manufactura de - antibióticos, requiere como parte de sus servicios agua- para los siguientes usos:

- a) Agua de proceso.
- b) Agua de calderas.
- c) Agua de enfriamiento.
- d) Agua potable.
- e) Agua desmineralizada.

con las siguientes características:

5.01 Agua de Proceso

Este tipo de agua se requiere para lavados, disoluciones, pruebas etc. en las áreas de proceso. Este tipo de agua deberá ser libre de sólidos en suspensión -- bacterias etc. Es decir deberá ser un agua limpia, - clara, y libre de materia orgánica.

5.02 Agua de Calderas

Las calderas requieren agua de alimentación de alta - pureza, debido a que al evaporarse ésta, la concentrara

ción de las impurezas se incrementa, ocasionando deterioros en los materiales de las calderas e ineficiencias de las mismas.

La asociación americana de fabricantes de calderas ha establecido los límites máximos de concentración de sólidos, alcalinidad y sílice, tal como se muestran en la Tabla 5.1.

TABLA 5.1
LÍMITES DE SÓLIDOS Y OTRAS CARACTERÍSTICAS EN CALDERAS

PSIG	HASTA 300	301-450	451-600	601-750	751-900	901-1000	1001
SÓLIDOS TOTALES	3500	3000	2500	2000	1500	1250	1000
SÓLIDOS DISUELTOS	2500	2300	2100	1900	1430	1200	980
SÓLIDOS EN SUSP	1000	700	400	100	70	50	20
ALCALINIDAD (FENOLTALEINA)	500	420	340	260	180	120	80
ALCALINIDAD (ANARANJADO DEMET)	600	500	400	300	220	150	100
FOSFATOS COMO PO ₄	100	80	60	40	20	10	5
SULFITOS COMO SO ₃	80	60	40	30	20	10	5
SÍLICE COMO SiO ₂	120	80	50	30	20	10	5

5.03 Agua de Enfriamiento

Como su nombre lo indica es aquella que se utiliza en los distintos sistemas de enfriamiento.

La calidad de este tipo de agua debe ser tal que no -- forme incrustaciones, que no sea corrosiva y libre de sedimentos y crecimientos orgánicos.

5.04 Agua Potable

Es el agua requerida para baños, lavabos, estaciones - de servicio etc.

Este tipo de agua debe cumplir con la calidad, bacte-- riológica necesaria y debe además estar libre de olo-- res y sabores objetables.

5.05 Agua Desmineralizada

Este tipo de agua se requiere en el proceso para efec-- tuar la cristalización del antibiótico.

La calidad de este tipo de agua deberá ser tal que pre sente una resistencia al paso de la corriente eléctri-- ca de 1,000,000 de ohms.

5.1 Balance de Agua a Límite de Baterías

AGUA DE PROCESO	400 GPM.
AGUA DE CALDERAS	50 GPM.
AGUA DE ENFRIAMIENTO	675 GPM.
AGUA POTABLE	50 GPM.
AGUA DESMINERALIZADA	25 GPM.
TOTAL	<u>1200 GPM.</u>

5.2 Análisis del Agua Cruda

El agua de suministro a la planta se tomará de un canal superficial y tendrá el siguiente análisis aproximado:

$\text{SO}_4^=$	133 p.p.m.
CL^-	180 p.p.m.
HCO_3^-	139 p.p.m.
Ca^{++}	56 p.p.m.
Mg^{++}	29 p.p.m.
Na^+	92 p.p.m.
Al^{+++}	--
Fe^{+++}	--
Dureza total	260 p.p.m.
Dureza temp.	181 p.p.m.
Dureza perm.	79 p.p.m.
Sólidos totales	829 p.p.m.
Sólidos susp.	132 p.p.m.
Sólidos dis.	697 p.p.m.
SiO ₂	13 p.p.m.
P.H.	8.0 p.p.m.

5.3 Tratamiento Seleccionado

En la Fig. 5.3 se puede observar el diagrama de bloques, mostrando el tipo de tratamiento seleccionado para suministrar las distintas calidades de agua -- de agua requeridos.

Como puede observarse en dicho diagrama el tratamiento se divide en dos:

- a) Pretratamiento: Que será común para toda el -- agua consumida en la planta.
- b) Tratamiento para agua a calderas y agua desmine -- realizada.

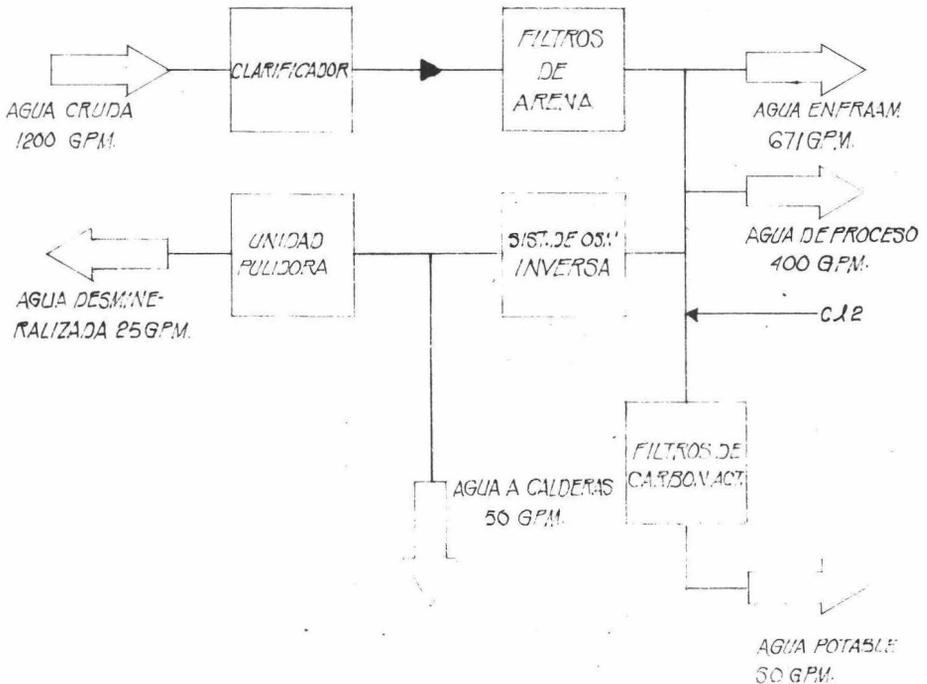


FIG. 5.3

5.4 Diseño

5.4.1 Pretratamiento

5.4.1.1 Equipo de Clarificación

La clarificación es el proceso de eliminación de la materia suspendida en el agua, esta eliminación se puede llevar a cabo mediante tres métodos, usándose aisladamente o en combinación.

- a) Sedimentación
- b) Coagulación
- c) Filtración

La Sedimentación tiene aplicación cuando se trata de aguas superficiales que llevan grandes cantidades de lodos o de corrientes sujetas a cambios repentinos en su concentración debido a la lluvia o a otros agentes externos. Es un tratamiento primario del agua.

La Coagulación se usa después de un tanque sedimentador o directamente sobre el agua cruda, cuando la turbidez no es muy alta.

La Filtración es el paso final de la clarificación y se usa después del tanque coagulador.

I. TANQUE CLARIFICADOR

Existe un gran número de diseños para los equipos de clarificación, sin embargo estos se pueden agrupar en dos grupos principales:

- a) Tanques convencionales de sedimentación
 - . Decantador cilíndrico-cónico
 - . Decantador estático horizontal
- b) Tanques de tratamiento a flujo rápido
 - . Precipitador Spauldin
 - . Accelerator
 - . Pulsator
 - . Circulator

Los tanques convencionales de sedimentación, se usan para tratar volúmenes muy grandes de agua. Los tanques de tratamiento a flujo rápido permiten que se realice en ellos las siguientes operaciones: dosificación, de reactivos, mezclado, - floculación y sedimentación.

Se usan para tratar volúmenes pequeños ó moderadamente grandes.

El flujo es ascendente, el agua a tratar pasa, a través de un lecho flotante de lodos o bien es - llevada por recirculación forzada con una maya -

coagulada y preparada.

En nuestro tratamiento en particular usaremos el segundo tipo ya que las características de flujo y concentración de sólidos en suspensión así lo requieren.

II. BASES DE DISEÑO

- a) El área de decantación deberá ser tal que -- permita una relación de 1 a 1.5 gpm/ft².
- b) La velocidad ascensional del agua no deberá ser superior a 8 ft/hr.
- c) El tiempo de retención debe estar entre 1 a 2 horas.

Respetando estos tres parámetros básicamente se puede dimensionar el clarificador.

1. flujo de agua: 1200 GPM.
2. area de decantación requerida

$$\frac{1200 \text{ GPM}}{1 \text{ GPM/ft}^2} = 1200 \text{ ft}^2$$

$$\text{chequeo: } \frac{1200 \text{ GPM} \times 60}{7.48 \times 1200 \text{ ft}} = 8 \frac{\text{ft}}{\text{hr}}$$

3. capacidad de almacenamiento:

$$1200 \text{ GPM} \times 120 \text{ MIN} = 144 \text{ 000 Gal.}$$

III. EQUIPO SELECCIONADO

Basándose en estudios económicos y de funcionalidad distintos fabricantes, tienen en existencia la ingeniería para modelos estándar, dentro de los cuales se seleccionó el siguiente equipo:

Tanque clarificador marca Pfaudler-Permutit con capacidad de almacenamiento de 147 000 Gal y un tiempo de retención de 122 min.

Dimensiones	Ancho	27'-0"
	Largo	45'-6"
	Alto	17'-0"

Suministrado con el siguiente equipo:

Distribuidor de entrada construido en placa de acero de 3/16".

Colectores laterales y longitudinales de efluentes construidos placa 3/16".

Mamparas de escurrimiento construidas en placa de acero de 3/16".

Miembros de soporte estructurales.

Agitador de 4 velocidades, completo con motor de 3 HP, y reductor de velocidad.

Un mecanismo completo de agitación consistiendo en 2 juegos de flechas, paletas, baleros, etc.

Toda la tubería requerida para la colección de lodos, cabezales perforados, limpieza y muestreo. Pasarela de acero de 30" de ancho a lo largo del clarificador.

El vendedor del equipo deberá suministrar lo siguiente:

Todo el trabajo de concreto.

Todo el equipo de instalación.

Todo el equipo eléctrico.

Toda la tubería de entrada y salida del precipitador.

Agua para el lavado de lodos y remoción de estos.

La Fig. 5.4.1.1. muestra los detalles de construcción del clarificador.

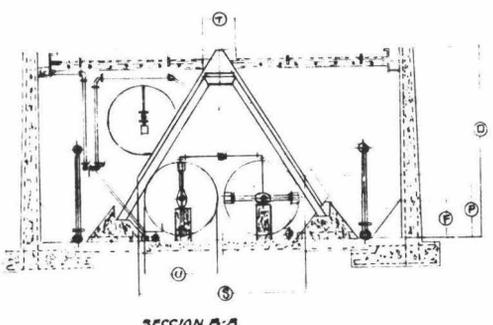
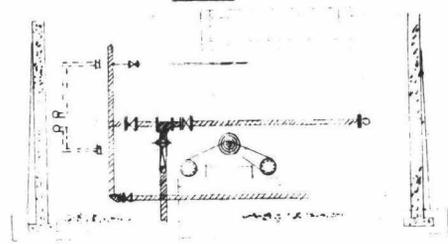
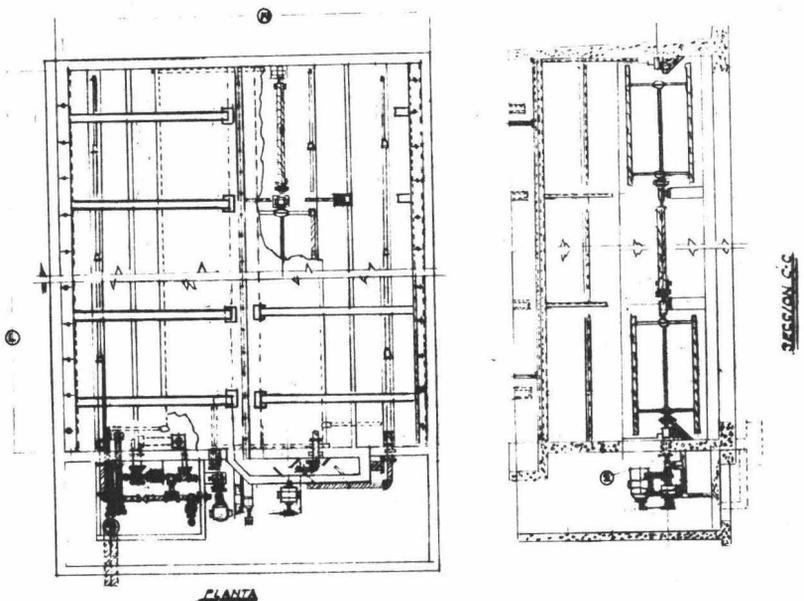


FIG. 5.4.1.1

W	27'-0"
L	45'-6"
D	17'-0"
U	5'-6"
N	18"
T	2'-6"
P	4'-0"
S	12'-1"
F	3'-0"
M	3' $\frac{1}{2}$ "

1200 G.P.M.

0.375 G.P.M.

F.C.Q.	TESIS PROFESIONAL	
	CLARIFICADOR	
UNAM	J. LOZANO	1974

5.4.1.2 Químicos para la Coagulación

La Coagulación es el proceso mediante el cual -- las partículas de turbidez cuyo tamaño es tan -- pequeño que necesitarían un tiempo de sedimentación muy grande o que resisten a la sedimentación, son agrupadas en partículas mayores que -- precipitan.

Al agregar un agente coagulante a un agua que con tenga materia suspendida y coloidal, se desarrollan cambios físicos y químicos que producen sus tancias gelatinosas llamadas flóculos, los que - se agrupan entre sí ocluyendo sólidos en suspensión y formando cuerpos mayores que sedimentan.- El agua y la materia orgánica suspendida forman un coloide, donde las partículas están cargadas negativamente, si se logra descompensar la carga del mismo este se destruye.

La acción del coagulante es el de presentar el - ión efectivo que es el del signo opuesto al de - las partículas coloidales.

La capacidad precipitante aumenta con el aumento del número de valencia del ión efectivo, en la -

práctica se utilizan sales de Fierro y Aluminio que producen iones positivos trivalentes.

El potencial zeta nos mide la carga del coloide, y el P.H. está íntimamente relacionado con este, por lo tanto existe un P.H. óptimo de operación que debe regularse mediante la adición controlada de ácido o base según sea el caso.

Por último, para aumentar el rendimiento de la coagulación, se debe agregar un agente ayuda -- coagulante, que generalmente son polimeros polielectrolíticos de alto peso molecular solubles en el agua, que al disociarse producen iones fuertes.

A continuación se muestran en las Tablas -- 5.4.1.2-A y 5.4.1.2-B cuales son los coagulantes comerciales, el P.H. óptimo al que se debe trabajar, así como la dosificación normal y sus propiedades.

TABLA 5.4.1.2-A COAGULANTES COMERCIALES

NOMBRE	FORMULA	CONCENTRACION COMERCIAL	FORMAS DISPONIBLES	PESO $\frac{14}{4T^3}$	MATERIALES CON QUE SE MANEJA	MISCELANEOS
SULFATO DE ALUMINIO	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	17% Al_2O_3	TERRON POLVO GRANULOS	POLVO, 38-45 OTROS, 57-67	PLOMO HULE HIERRO AL SILICIO	PH (SOLUCION AL 1%) = 3.4
ALUMINATO DE SODIO	$Na_2Al_2O_4$	55% Al_2O_3	CRISTALES	60	HIERRO ACERO HULE PLASTICOS	ESTABILIZADO CON APROX. 3% DE EXCESO DE NaOH
ALUMBRE DE AMONIO	$Al_2(SO_4)_3$ $(NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$	11% Al_2O_3	TERRON POLVO	60-68	PLOMO HULE HIERRO AL SILICIO	PH (SOLUCION AL 1%) = 3.5
SULFATO FERROSO	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	55% $FeSO_4$	CRISTALES GRANULOS	63-68	PLOMO ESTANO MADERA	EFLORESCENTE
SULFATO FERRICO	$Fe_2(SO_4)_3$	90% $Fe_2(SO_4)_3$	POLVO GRANULOS	60-70	PLOMO HULE ACERO AL CARBON PLASTICOS	HIGROSCOPICO
CLORURO FERRICO	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	60% $FeCl_3$	CRISTALES	45-55	HULE VIDRIO	HIGROSCOPICO
OXIDO DE MAGNESIO	MgO	95% MgO	POLVO	25-35	HIERRO ACERO	ESENCIALMENTE INSOLUBLE, ALIMENTA- DO EN FORMA DE LECHADA
BENTONITA			POLVO	60	HIERRO ACERO	ESENCIALMENTE INSOLUBLE, ALIMENTA- DO EN FORMA DE LECHADA
SILICATO DE SODIO	$Na_2SiO_3 \cdot 9H_2O$	41% Be	SOLUCION	87	HIERRO ACERO HULE	FORMAS DE SOLU- DOS, SON UTILIZA- DAS CON RELACIONES VARIABLES DE Na_2O-SiO_2

TABLA 5.4.1.2.-B CANTIDADES RECOMENDABLES Y P.H OPTIMO DE OPERACION

COAGULANTE		AGENTE ALCALINIZANTE			OTROS AGENTES		USOS	
NOMBRE	P.H OPTIMO	DOISIS	CAL HIDRATADA	SOSA CAUSTICA	SODA ASH	A		B
ALUMBRE $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	6.8	15-100 gr/m ³ SEGUN TURBIDEZ	IGUAL A LA TERCERA PARTE DE DOSIS DE ALUMBRE	IGUAL AL 36% DE DOSIS DE ALUMBRE	UNA DOSIS DE SOSA SOLVAY DE 50 a 100% DE LA DE ALUMBRE			ES EL DE MAYOR USO DE TODOS YA SEA COMBI- NADO O SOLO
ALUMINATO DE SODIO (50% Al_2O_3)	>6.8	5-50 gr/m ³ SEGUN TURBIDEZ				$FeCl_3 \cdot 6H_2O$ DOSIS: IGUAL A LA DEL ALU-	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$ DOSIS: 125 % DE LA DE ALUMI- NATO DE SODIO	REMOCION DE COLOR AGUAS CORROSIVAS COM- PLEMENTO DEL CAL CARBONATO
ALUMBRE CON ALUMINATO DE SODIO (50%)	5.6	DOSIS DE ALUMINATO 75% MENOR QUE LA DE ALUMBRE						REMOCION DE COLOR REDUCE EL CONTENIDO DE SILICE - COMPLEMENTO DEL CAL CARBONATO
SULFATO FERROSO $FeSO_4 \cdot 7H_2O$	9.3	5-25 gr/m ³ SEGUN TURBIDEZ	26% DEL SULFATO FERROSO			CLORO Y EL DEL SULFATO FERROSO	$KMnO_4$ 57% DEL SULFATO FERROSO	AGUAS MUY TURBIAS COM- PLEMENTO DEL CAL CARBONATO
SULFATO FERRICO $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	9.3	10-50 gr/m ³	40% DE LA DE SULFATO FERRICO					AGUAS MUY TURBIAS INCON- VENIENTE MUCHA MATERIA ORGANICA DA COLORACION - SOLUCIONES SON CARASIVAS
SULFATO DE COBRE $CuSO_4 \cdot 5H_2O$		5-20 gr/m ³	30% DE LA DE SULFATO DE COBRE					ELIMINACION COLOR, OLOR SABORES VEGETA- LES, ALGAS
CLORURO FERRICO $FeCl_3 \cdot 6H_2O$	5	5-30 gr/m ³						AGUAS NEGRAS SOLUCIONES SON CORRO- SIVAS.
CLORURO DE ALUMINIO $AlCl_3 \cdot 6H_2O$		12-40 gr/m ³						
ALUMBRE DE AMONIO $Al_2(SO_4)_3 \cdot (NH_4)_2SO_4 \cdot 24H_2O$								TANQUE A PRESION

4. Concentración de la solución:

7.5% en peso.

5. Flujo de dosificación

$$0.0332 \frac{\text{lb}}{1000 \text{ Gal}} \times 1200 \text{ GPM} = 0.0399 \frac{\text{lb}}{\text{min.}} \text{ Cal.}$$

$$\text{lb de Agua} = \frac{(0.0399) (0.925)}{(0.075)} = 0.49 \frac{\text{lb}}{\text{min.}}$$

$$\text{lb totales soluc. al 7.5\%} = 0.5299 \frac{\text{lb}}{\text{min.}}$$

$$\begin{aligned} \rho &= (57) (0.075) + (62.4) (0.925) \\ &= 61.87 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \end{aligned}$$

$$\frac{0.5299 \text{ lb/min}}{61.87 \text{ lb/ft}^3} \times 7.48 \frac{\text{Gal}}{\text{ft}^3} \times 60 \frac{\text{min}}{\text{hr.}}$$

$$= 3.84 \text{ Gal/hr}$$

6. Tanque con tiempo de residencia de
24 horas.

7. Volúmen requerido = $3.84 \times 24 = 92 \text{ Gal.}$

c) Cálculos para el ayuda coagulante

1. Solución Polímero polielectrolítico (calgón).

2. Dosificación Recomendada por el fabricante.

$$0.0167 \frac{\text{lb}}{1000 \text{ Gal.}}$$

3. Tipo de dosificación intermitente controlada por timer.

4. Concentración de la solución 5% peso

5. Flujo de dosificación:

$$0.0167 \frac{\text{lb}}{1000 \text{ Gal}} \times 1200 \text{ GPM} = 0.02 \frac{\text{lb}}{\text{min.}} \quad \text{A.C.}$$

$$\text{lb de Agua} = \frac{(0.02) (0.95)}{(0.05)} = 0.38 \frac{\text{lb}}{\text{min.}}$$

$$\text{lb Totales Sol. al 5\%} = 0.40 \frac{\text{lb}}{\text{min.}}$$

$$= (45) (0.05) + (62.4) (0.95)$$

$$= 61.55 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3}$$

$$\frac{0.40 \text{ lb/min.}}{61.55 \text{ lb/ft}^3} \times 7.48 \frac{\text{Gal}}{\text{ft}^3} \times 60 \frac{\text{min.}}{\text{hr}} = 2.81 \frac{\text{Gal}}{\text{hr.}}$$

6. Tanque con tiempo de residencia de 24 horas.

7. Volúmen requerido= $2.81 \times 24 = 67.5$ Gal.

II. EQUIPO SELECCIONADO

Con objeto de suministrar las cantidades de químicos de coagulación anteriormente descritos, se seleccionó el siguiente equipo:

a) Equipo para alimentación de coagulante.

Un tanque de acero al carbón, recubierto de hule, con diámetro de 3'-0" y una altura recta de 4'-0".

Un agitador marca Lightnin NS-1 completo -- con motor totalmente cerrado de 1/3 HP.

Un dosificador electroquímico completo con motor eléctrico.

b) Equipo para alimentación de cal hidratada.

Un tanque de acero al carbón, con diámetro - de 3'-0" y una altura recta de 4'-0".

Un agitador marca Lightnin NS-1 completo con motor totalmente cerrado de 1/3 HP.

Un dosificador electroquímico completo con motor eléctrico.

Un evacuador de polvo.

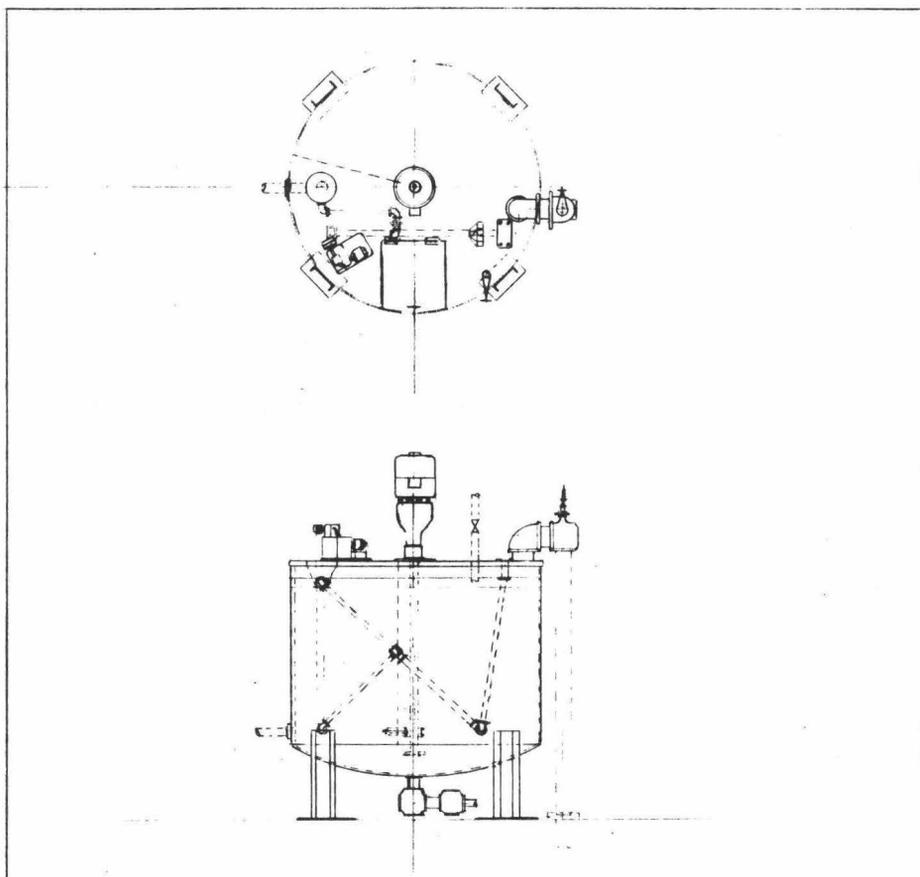


FIG. 5.4.1.2.

	TESIS PROFESIONAL	
F.C.Q.	EQUIPO ALIMENTACION QUIMICOS	
UNAM	J. LOZANO	1974

- c) Equipo para la alimentación de ayuda de coagulante.

Un tanque de fibra de vidrio reforzada con resina, poliéster, con diámetro de 3'-0" y una altura recta de 4'-0".

Un agitador marca Lightnin NS-1 completo con motor totalmente cerrado de 1/3 HP.

Un dosificador electroquímico completo con motor eléctrico.

5.4.2 Filtración

La filtración es el proceso por medio del cual se eliminan sólidos suspendidos en el agua, al hacerla pasar por un medio poroso.

Se utiliza generalmente para completar la eliminación de turbidez y sólidos suspendidos después de los procesos de sedimentación y/o coagulación.

Los filtros empleados en el tratamiento de aguas pueden ser de dos tipos básicamente.

- . Filtros por gravedad.
- . Filtros por presión.

Tanto los gravimétricos como los de presión consisten del filtro en si y del medio filtrante.

Los medios filtrantes más utilizados son la arena y la antracita y en menor escala la calcita, la magnetita, el carbón activado y la neutralita.

En la Tabla 5.4.2 se muestran algunos de los materiales filtrantes más estilizados, sus tamaños -- efectivos y coeficientes de uniformidad.

Tabla 5.4.2.

MEDIO	TAMAÑO EFECTIVO	COEFICIENTE DE UNIFORMIDAD
Arena	0.35-0.50 mm	1.75 (máximo)
	0.45-0.60 mm	1.60 (máximo)
	0.50-0.60 mm	1.70 (máximo)
	0.50-0.72 mm	1.3 - 1.5
Antracita (Número 1)	0.60-0.80 mm	1.75
Neutralita (CaCO ₃)	0.38-0.68 mm	1.40 (típico)
Carbón activado	0.35-0.50 mm	1.50 (típico)

El tamaño efectivo corresponde a aquel tamaño donde el 10% de las partículas son menores y el 90% - mayores.

El coeficiente de uniformidad corresponde a la relación donde el 60% son menores y 40% de las partículas son mayores al tamaño efectivo.

Los filtros gravimétricos generalmente se utilizan para grandes capacidades, debido a su bajo costo -- relativo, mientras que los filtros a presión se -- utilizan para capacidades pequeñas.

En nuestro caso se utilizarán tres filtros gravimétricos, utilizando como medio filtrante arena.

I. BASES DE DISEÑO

Las velocidades superficiales recomendadas para que se efectúe una correcta filtración son los siguientes:

Filtros de gravedad	2-4 GPM/ft ²
Filtros de presión	2-3 GPM/ft ²

El filtro tiene un tiempo de operación útil a medida que trabaja se van rellenando los poros de materia suspendida; una vez que el filtro ha llegado a cierto límite es necesario hacer una operación de limpieza llamada retrolavado, que consiste en inyectar agua o una mezcla de agua-aire en flujo invertido respecto al de operación, con el fin de remover los lodos acumulados en el medio filtrante.

La velocidad superficial en el retrolavado varía -- normalmente de 12 a 15 GPM/ft² para filtros de --

Espesor de la Capa Filtrante.- El espesor de la -
capa del medio filtrante varía entre 15 y 30 pul--
gadas y la de la capa de grava soporte entre 80 y
20 pulg. aproximadamente.

El espesor de la capa del medio filtrante se encuentra
determinado por el tamaño de la partícula.

1. AREA DE FILTRACION REQUERIDA :

$$\frac{1200 \text{ GPM}}{2 \text{ GPM/ft}^2} = 600 \text{ ft}^2$$

II. EQUIPO SELECCIONADO

Tipo	-	Gravedad
Número de filtros	-	3
Capacidad por unidad	-	400 GPM
Capacidad total	-	1200 GPM
Velocidad de filtra- ción	-	2 GPM/ft ²
Ancho	-	14 ft
Longitud	-	15 ft
Medio filtrante	-	Arena
Profundidad del medio	-	24 pulg.
Tamaño efectivo	-	0.35 - 0.50
Coefficiente de uniform.	-	1.75

Completos con:

Conexión de entrada con mampara de distribución.

Tubería para retrolavado.

Soporte para el medio filtrante.

5.4.3 Resultados

El agua efluente del Pretratamiento anteriormente-

descrito mostrará el siguiente análisis:

SO_4^-	225 p.p.m.
Cl^-	188 p.p.m.
HCO_3^-	75 p.p.m.
Ca^{++}	74 p.p.m.
Mg^{++}	27 p.p.m.
Na^{++}	122 p.p.m.
Fe^{+++}	0 p.p.m.
Al^{+++}	0 p.p.m.
Dureza total	300 p.p.m.
Dureza temporal	260 p.p.m.
Dureza permanente	40 p.p.m.
Sólidos totales	744 p.p.m.
Sólidos susp.	9 p.p.m.
Sólidos dis.	735 p.p.m.
SiO_2	10
p H	7.4

Con esta calidad de agua se satisfacerán los reque
rimientos para:

- . Agua de Proceso
- . Agua de Enfriamiento

5.5 Agua Potable

Respecto a las cualidades tanto químicas como bacteriológicas, lo primero que se pide en este tipo de agua es que sea apta para beber.

Muchas aguas del tipo superficial, no son seguras, por lo que requieren de tratamiento antes de mandarlas a las redes de distribución.

Las normas que rigen la calidad de este tipo de aguas son las siguientes:

a) Características Físicas.

1. La turbidez del agua no deberá exceder a 10 p.p.m.
2. El agua no deberá tener olor ni sabor desagradable.

b) Características Químicas.

1. No deberá contener cantidades excesivas de sustancias minerales disueltas.
2. La presencia de plomo (Pb) en exceso de 0.1 p.p.m., de fluor en esceso de 1.5 p.p.m., de arsénico en exceso de 0.05 p.p.m. de selenio en exceso de 0.05 p.p.m. y de cromo hexavalente en exceso de 0.05 p.p.m. constituirán fundamentos para rechazar el suministro de agua.

c) Microorganismos y Materia Orgánica

El agua destinada para estos fines deberá ser libre de microorganismos, algas, lamas, hongos y bacterias.



5.5.1 Tratamiento Requerido

- 1) Con el fin de desinfectar el agua utilizada para este servicio, se le dosificará cloro (Cl_2) como desinfectante y para dejarla libre de sabores y olores se pasará a través de un filtro de carbón activado.

La dosis de cloro varía dependiendo de la demanda del agua. De una manera general, las dosis varían desde menos de 1 p.p.m. hasta 10 p.p.m. y después de un reposo de 20 a 30 minutos el agua debe mostrar un cloro residual de 0.1 a 0.2 p.p.m.

I. EQUIPO SELECCIONADO

Con el fin de efectuar la cloración se seleccionó el siguiente equipo:

Un clorador marca Wallace & Tiernan serie V 831 para operación automática con las siguientes características de operación.

Flujo de agua	50 GPM
Requerimientos de Cloro residual	0.2 p.p.m.
Dosificación aproximada	3 p.p.m.
Cap. de aliment. max.	2 lb de Cloro/24 hrs.
Tipo de control alimentación	automática
Paro	con corte en el suministro en el agua de inyección.

El equipo se suministra completo con:

- . Inyector
- . Rotámetro
- . Empaques
- . Convertidor de vacío
- . Válvula reductora de presión
- . Difusor
- . Manómetro
- . Filtro

2) Eliminación de Olores y Sabores

Los filtros de carbón activado se usan ampliamente para eliminar los olores y sabores del agua.

Los filtros de carbón activado, invariablemente son del tipo vertical a presión.

Los filtros de carbón tienen una construcción similar a la de los filtros de arena.

I. BASES DE DISEÑO

La velocidad de filtración dependiendo del grueso del lecho, varía de 4 a 6 GPM/ft².

La profundidad del lecho de carbón varía de 24 a 36 pulgadas, soportado por capas de grava y arena.

Es necesario hacer retrolavados periódicos para mantener el lecho en buenas condiciones, la velocidad de retrolavado usual es de 6 GPM/ft²

1. Area de Filtración Requerida:

$$\frac{50 \text{ GPM}}{4 \frac{\text{GPM}}{\text{ft}^2}} = 12.5 \text{ ft}^2$$

2. Profundidad del lecho: 24 pulgadas.

II. EQUIPO SELECCIONADO

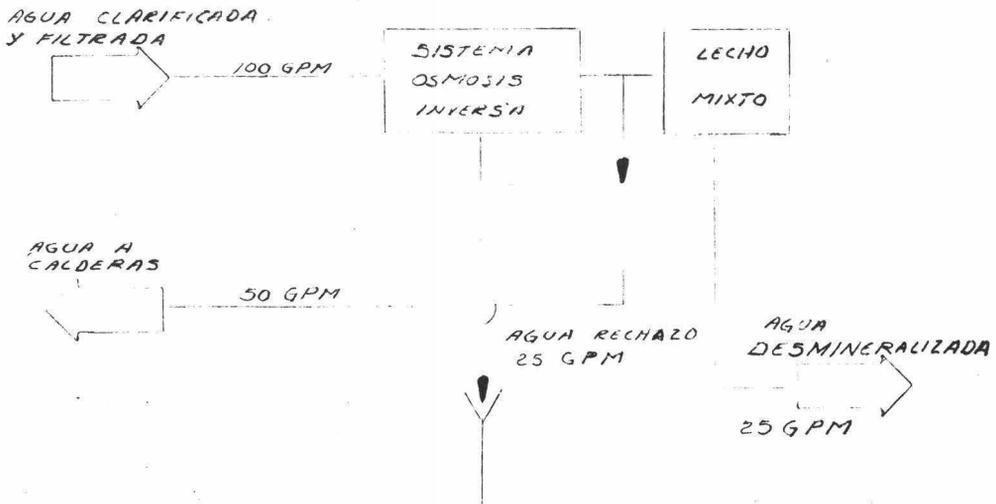
Un filtro de carbón activado, con las siguientes características:

Capacidad	50 GPM
Diámetro del tanque	48 pulg.
Altura recta	3'-0"
Presión de diseño	100 psig.
Material de contruc.	acero al carbón
Medio filtrante	carbón activado

En el Diagrama 5.1 se muestra el diagrama de tubería e -
instrumentación del sistema de Pretratamiento anterior--
mente descrito.

5.6 AGUA PARA CALDERAS Y AGUA DESMINERALIZADA

De acuerdo con las características que debe reunir el -
agua de alimentación a calderas descritas en el párrafo
5.02 y las descritas en el párrafo 5.05 para el agua --
desmineralizada. El tratamiento seleccionado, basándo--
se en el análisis económico descrito en el capítulo IV
será un sistema de ósmosis inversa seguido de una uni--
dad intercambiadora de iones de lecho mixto.



5.6.1 Sistema de Osmosis Inversa

I. Bases de Diseño

- | | |
|----------------------------------------------------------------|---------|
| a) Flujo requerido: | 75 GPM |
| b) Grado de conversión seleccionado: | 75% |
| c) Flujo alimentado: | 100 GPM |
| d) Flujo agua rechazo: | 25 GPM |
| e) % Sal | 6% max. |
| f) Análisis agua aliment. (El
mostrado en el párrafo 5.4.3) | |
| h) Temperatura requerida en
aliment. | 98 °F |
| i) P.H. requerido | 6.5 |

II. Equipo Seleccionado

- a) Tipo de Membrana.- De acuerdo con lo establecido en el capítulo III, el diseño de fibras será el más adecuado, debido a que este es el que más área de membrana presenta por unidad de volumen.
- b) Número de Módulos Requeridos

En el diseño de fibras se han establecido unidades paquete, de sistemas de ósmosis inversa, que consisten en módulos de construcción estándar -- que manejan un flujo determinado de agua, a una presión establecida de alimentación.

La Fig. 5.6.1 nos muestra lo anterior.

Los datos mostrados en la Fig.5.6.1 se encuentran basados en la ecuación:

(Qw)

$$\text{Flujo de Agua} = \frac{K_w (\Delta P - \Delta \Pi) A}{t}$$

En estos sistemas las variables $\frac{(K_w) (A)}{t}$ son -- una constante= K1, en cada módulo; y debido a que la presión osmótica presenta un valor aproximado 10 psi por cada 1000 p.p.m. de sólidos totales - disueltos, trabajando a una presión constante, - mucho mayor que la presión osmótica (400 psig) - se puede relacionar el flujo de agua con un nú-- mero determinado de módulos.

En nuestro caso:

$$\text{Número de módulos requeridos} = 50$$

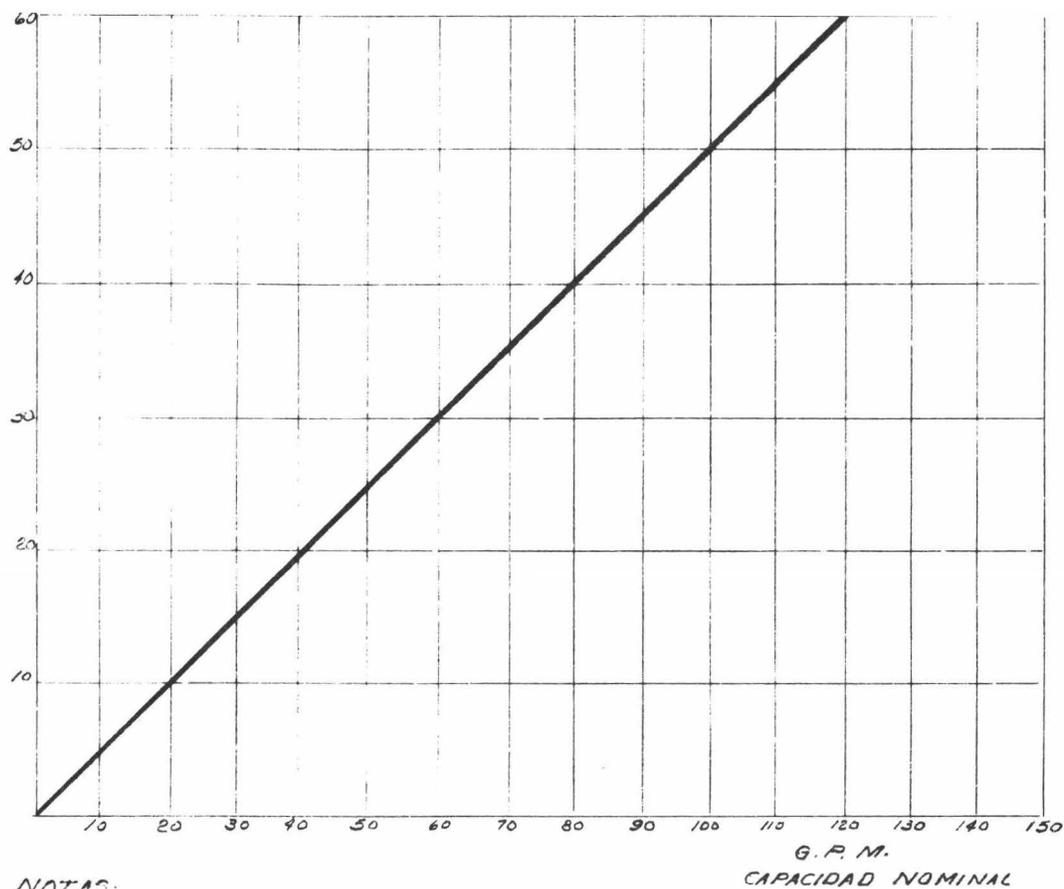
c) Bombas de Alta Presión

Con el objeto de alimentar el agua de alimenta-- ción a la presión requerida se necesitará, un -- equipo de bombeo con las sigüentes caracterís-- ticas:

Flujo a bombear

100 GPM

Nº DE MÓDULOS



NOTAS:

- 1: CAPACIDAD PARA PERMEATORS B9 DUPONT
- 2: PRESION DE OPERACION = 400 PSIG
- 3: SOLIDOS TOTALES DISUELTOS = 2000 p.p.m.
- 4: $\pi = 20$ PSIG.

G.P.M.
CAPACIDAD NOMINAL

FIG. 5.6.1

Capacidad seleccionada	120 GPM
Presión de succión	25 psig
Presión de descarga	425 psig
Presión total diferencial	400 psig
Eficiencia de bombeo	75 %

$$\text{B.H.P.} = \frac{120 \text{ GPM} \times 400 \times 2.31}{3960 \times 1 \times 0.75} = 37.3$$

Motor seleccionado 40 H.P.

d) Control de la Temperatura

De acuerdo con lo descrito en el capítulo III, -- párrafo 3.4.2 es necesario controlar la temperatura, esto se logrará mediante la instalación de un cambiador de calor de coraza y tubos, para asegurar una alimentación a 90°F.

La situación crítica en la localidad es cuando la temperatura del agua baje hasta 43°F.

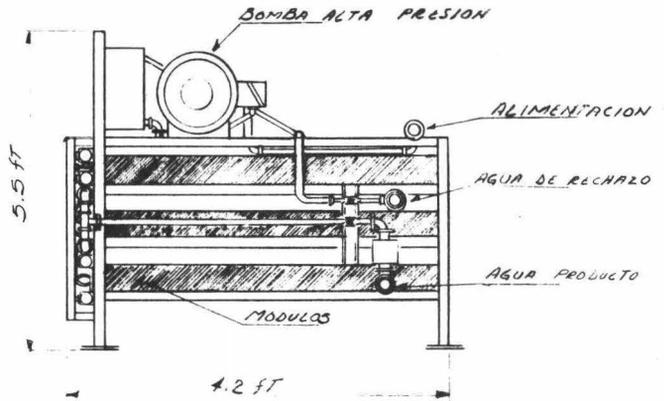
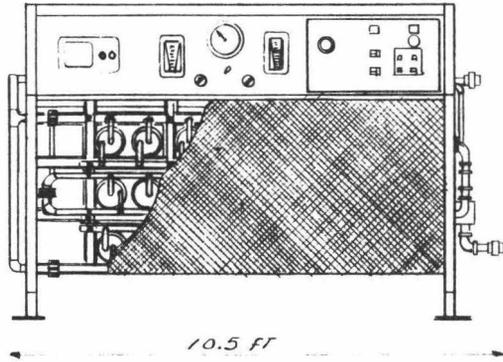
1. Balance de Calor:

$$\text{Flujo} = 120 \text{ G.P.M.} \times \frac{8.32 \text{ lb}}{\text{Gal.}} \times \frac{60 \text{ min}}{\text{hr.}} = 59900 \frac{\text{lb}}{\text{hr.}}$$

$$Q = MC_p \Delta T = \left(59900 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \right) (1) (90-43) = 2815300 \frac{\text{Btu}}{\text{hr}}$$

2. Vapor Requerido:

$$M = \frac{Q}{\lambda} = \frac{2815300 \text{ Btu/hr}}{945 \text{ Btu/lb}} = 2980 \frac{\text{lb}}{\text{hr}}$$



F.C.Q.	TESIS PROFESIONAL	
	EQUIPO OSMOSIS INVERSA	
	J. LOZANO	1974

$$\text{Vap. } 15 \text{ psig.} = 945 \text{ Btu/lb}$$

3. LMTD:

$$250 - 43 = 207$$

$$250 - 90 = \frac{160}{46}$$

$$\text{L.M.T.D.} = \frac{46}{\frac{207}{160}} = \frac{46}{0.252} = 182^\circ\text{F}$$

$$\text{FT} = 1$$

4. Ud supuesta = 500

$$A = \frac{Q}{\text{Ud } \Delta T} = \frac{2815300}{(500)(182)} = 31 \text{ ft}^2$$

para tubos 3/4" ϕ y 6' long.

$$a" = 0.1963 \text{ ft}^2/\text{ft lin.}$$

$$\text{Número de tubos} = \frac{31}{6 \times 0.1963} = 26 \text{ tubos}$$

Para una coraza de 8" ϕ int. y un cambiador 1-2 se tienen 32 tubos de 3/4" ϕ en un arreglo triangular de 15/16"

$$A = 32 \times 6 \times 0.1963 = 37.6 \text{ ft}^2$$

$$\text{Ud} = \frac{Q}{A \cdot T} = \frac{2815300}{(376)(182)} = 411.4 \text{ ft}^2$$

5. Fluido Caliente: Lado de la coraza: Vapor

$$B = \frac{I.D.}{1} = \frac{8}{1} = 8$$

$$\begin{aligned} A_s &= I.D \times c' B / 144 \quad P_t = 8 \times 0.25 \times 8 / 144 \times 15 / 16 \\ &= 0.1184 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

$$G_s = \frac{W}{a s} = \frac{2980}{0.1184} = 25168 \frac{\text{lb}}{\text{hr ft}^2}$$

$$a \text{ a } 250^\circ\text{F} = 0.147 \text{ c.p} \times 2.42 = 0.0355 \frac{\text{lb}}{(\text{ft}) (\text{hr})}$$

$$D_e = \frac{0.55}{12} = 0.0458 \text{ ft}$$

$$R_e = \frac{D_e G_s}{\mu} = \frac{(0.0458) (25168)}{(0.0355)} = 32470$$

$$h_o = 1500 \text{ Btu}/(\text{hr}) (\text{ft}^2) (^\circ\text{F})$$

6. Fluido Frío: Lado de los tubos: Agua.

$A't = 0.302 \text{ in}^2$ para tubos de $3/4'' \text{ } \phi$ y 16 BWG.

$$\begin{aligned} A_t &= N_t A't / 144 n \\ &= (32) (0.302) / (144) (2) \\ &= 0.0335 \text{ ft}^2 \end{aligned}$$

$$G_t = \frac{W}{A_t} = \frac{59900}{0.0335} = 1788060 \frac{\text{lb}}{(\text{hr}) (\text{ft}^2)}$$

$$\begin{aligned} v &= \frac{G_t}{3600} = \frac{1788060}{(3600) (62.4)} = 7.95 \\ &= 0.82 \times 2.42 = 1.99 \text{ lb}/(\text{ft}) (\text{hr}) \end{aligned}$$

$$D = 0.62 / 12 = 0.0517 \text{ ft}$$

$$\begin{aligned} R_{e_t} &= D G_t / \nu = \frac{(0.0517) (1788060)}{1.99} \\ &= 46454 \end{aligned}$$

$$h_i = 1350$$

$$h_{i_o} = h_i \times \frac{I.D.}{O.D.} = 1350 \times \frac{0.62}{0.75} = 1116$$

7. Coeficiente Limpio

$$U_c = \frac{h_{io} h_o}{h_{io} + h_o} = \frac{(1116) (1500)}{(1116) + (1500)} = \frac{1674000}{2616}$$
$$= 639$$

8. Factor de Incrustación

$$R_d = \frac{U_c - U_d}{U_c U_d} = \frac{639 - 411.4}{(639) (411.4)} = \frac{227.6}{262884.6}$$

$$R_d = 0.0009$$

9. Caída de Presión por el lado de la coraza

$$\text{Para UN } Re = 32470$$

$$f = 0.00165$$

$$\text{Número de Cruces} = N + 1 = 12 \times \frac{L}{B} = 12 \times \frac{6}{8} = 9$$

$$U = 13.7 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

$$S = \frac{1}{13.7 \times 62.4} = 0.00116$$

$$D_s = 8/12 = 0.666$$

$$\Delta P_s = \frac{1}{2} \times \frac{f G_s^2 (D_s) (N + 1)}{5.22 \times 10^4 D_e S \phi s}$$
$$= \frac{1}{2} \times \frac{(0.0016) (25168)^2 (0.666) (9)}{(5.22 \times 10^4) (0.0458) (0.0016) (1)}$$
$$= 1 \text{ psi.}$$

10. Caída de Presión por el lado de los tubos

$$\text{Para un reinolds} = 46454$$

$$f = 0.00018$$

$$S = 1$$

$$P_t = \frac{f Gt^2}{5.22 \times 10 \text{ DS}} = \frac{(0.00018) (1788060)^2 (6) (2)}{(5.22 \times 10) (0.0517) (1)}$$

$$= 2.56 \text{ psi}$$

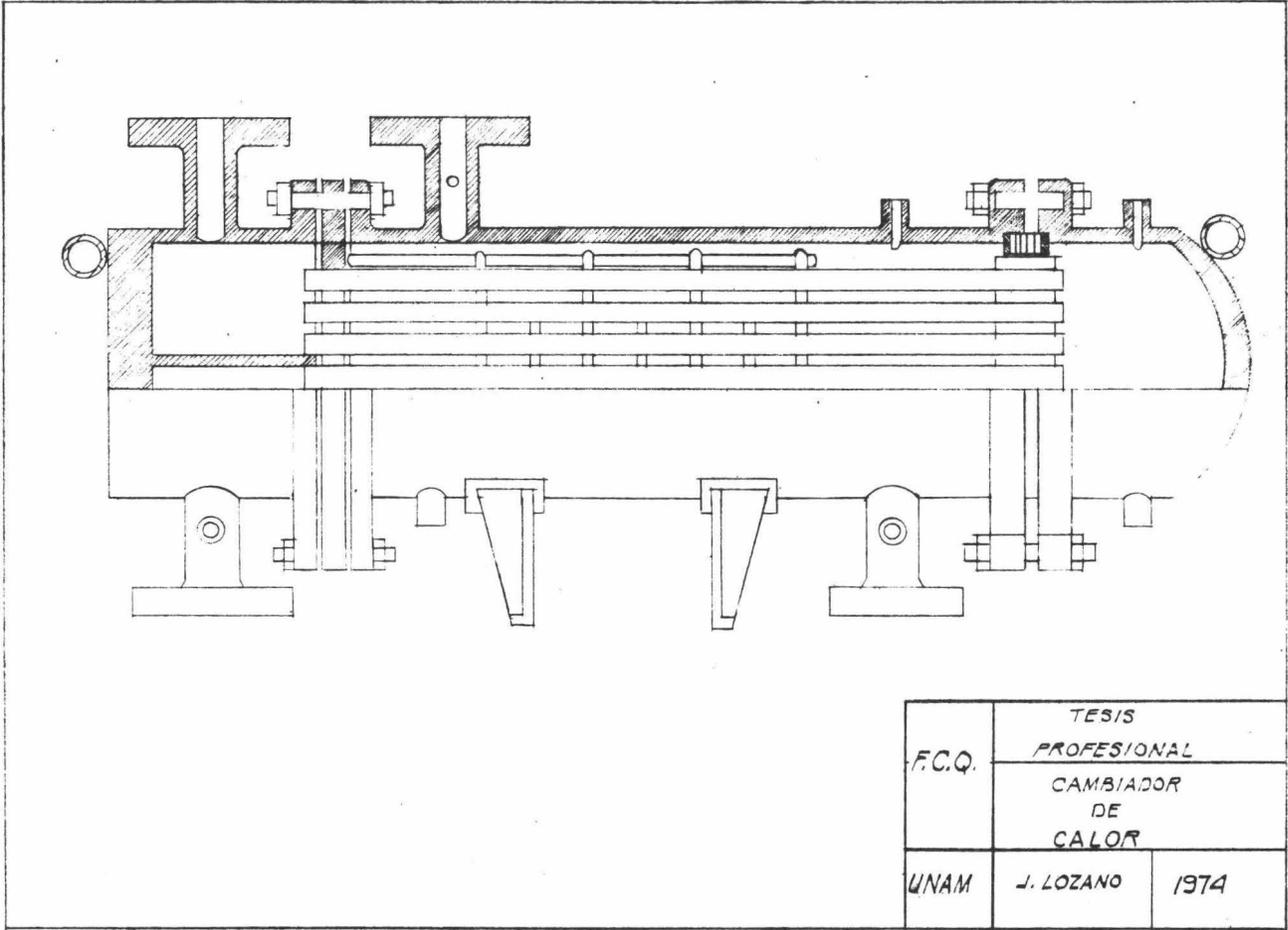
$$P_r = 4 \text{ h} \frac{v^2}{29} \times \frac{62.4}{144} = \frac{(4) (2) (7.95)^2 (62.4)}{(2) (32.2) (144)} = 3.40$$

$$= 3.40 + 2.56 = 6 \text{ psi.}$$

e) Análisis del Agua Producto

El agua producto obtenido como efluente del sistema de ósmosis inversa mostrará las siguientes -- características:

SO_4^-	13.5 p.p.m.
Cl^-	11.3 p.p.m.
HCO_3^-	4.5 p.p.m.
Ca^{++}	4.5 p.p.m.
Mg^{++}	1.62 p.p.m.
Na^{++}	7.32 p.p.m.
Fe^{+++}	0
Al^{+++}	0
Dureza total	33.69
Dureza temporal	3.69
Dureza Permanente	30
Sólidos Totales	42.74



F.C.Q.	TESIS PROFESIONAL	
	CAMBIADOR DE CALOR	
UNAM	J. LOZANO	1974

Sólidos suspendidos	0 .
Sólidos disueltos	42.74
SiO ₂	0.3
P.H.	6.5

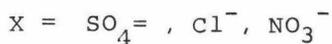
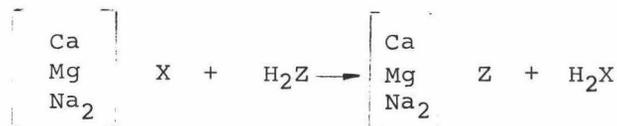
Esta calidad de agua es la que se utilizará como agua de alimentación a calderas.

5.6.2 Sistema de lecho Mixto:

Un sistema de lecho mixto es aquel que contiene en combinación una resina catiónica ciclohidrógeno y una aniónica fuertemente básica. Dichas resinas tienen la característica de intercambiar iones con el agua, aceptando los iones indeseables en ésta, y cediendo otros que no ocasionan dichos problemas.

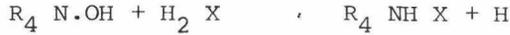
En el sistema anterior las reacciones que se efectúan son:

Para la ciclo hidrógeno:



Z = Grupo activo de la resina

Para la fuertemente básica:



Una más que se ha agotado dicha intercambia--
bilidad las resinas son susceptibles de rege--
nerarse, haciendo la operación contraria. Las
reacciones son:

Para la ciclo hidrógeno:



Para la fuertemente básica:



I.- Bases de Diseño

- a) Flujo = 25 GPM
- b) Calidad del efluente = 10 p.p.m. max.
de sólidos
- c) Ciclo entre regeneraciones = 10 horas
- d) Capacidad de la resina

$$\text{Ciclo Hidrógeno} = 2.18 \text{ Kgr/ft}^3$$

$$\text{Fuert. Básica} = 3.20 \text{ Kgr/ft}^3$$

(Estos valores se obtienen de los fabricantes --
de las resinas, a las condiciones de operación)

e) Volumen de la Resina

Se encuentra dado por:

$$\text{ft}^3 \text{ de resina} = 0.0035 \frac{(\text{GPM}) (\text{p.p.m.}) (\text{horas})}{\text{Kgr/ft}^3}$$

$$\text{Ciclo Hidrógeno} = 0.0035 \frac{(25) (13.42) (10)}{2.18}$$

$$= 5.4 \text{ ft}^3$$

$$\text{Furt. Básica} = 0.0035 \frac{(25) (29.3) (10)}{3.20}$$

$$= 8.0 \text{ ft}^3$$

$$\text{Volúmen total} = 8.0 + 5.4 = 13.4 \text{ ft}^3$$

f) Dimensiones del Tanque Requerido

Las dimensiones del tanque deberán ser tales, que su diámetro permita una velocidad superficial de 8 g.p.m./ft² y que su altura permita la expansión que sufre la resina, cuando está operando.

$$\text{Diámetro del tanque} = 24 \text{ pulg.} = 2 \text{ ft.}$$

$$\text{Velocidad superficial} = 8 \text{ g.p.m./ft}^2$$

$$\text{Altura del Tanque} = \text{Profundidad del lecho X}$$

Factor de Expansión.

$$\text{Prof. del Lecho} = \frac{\text{Volumen}}{\text{Area}} = \frac{13.4 \text{ ft}^3}{3.14 \text{ ft}^2}$$

$$= 4.26 \text{ ft}$$

Factor de Exp. = 1.75

Altura del tanque = $4.26 \times 1.75 = 7.5$ ft

g) Nivel de Regeneración

Se establece en función de las fugas y la cantidad de impurezas a eliminar y es información que proporciona el fabricante de la resina, en nuestro caso:

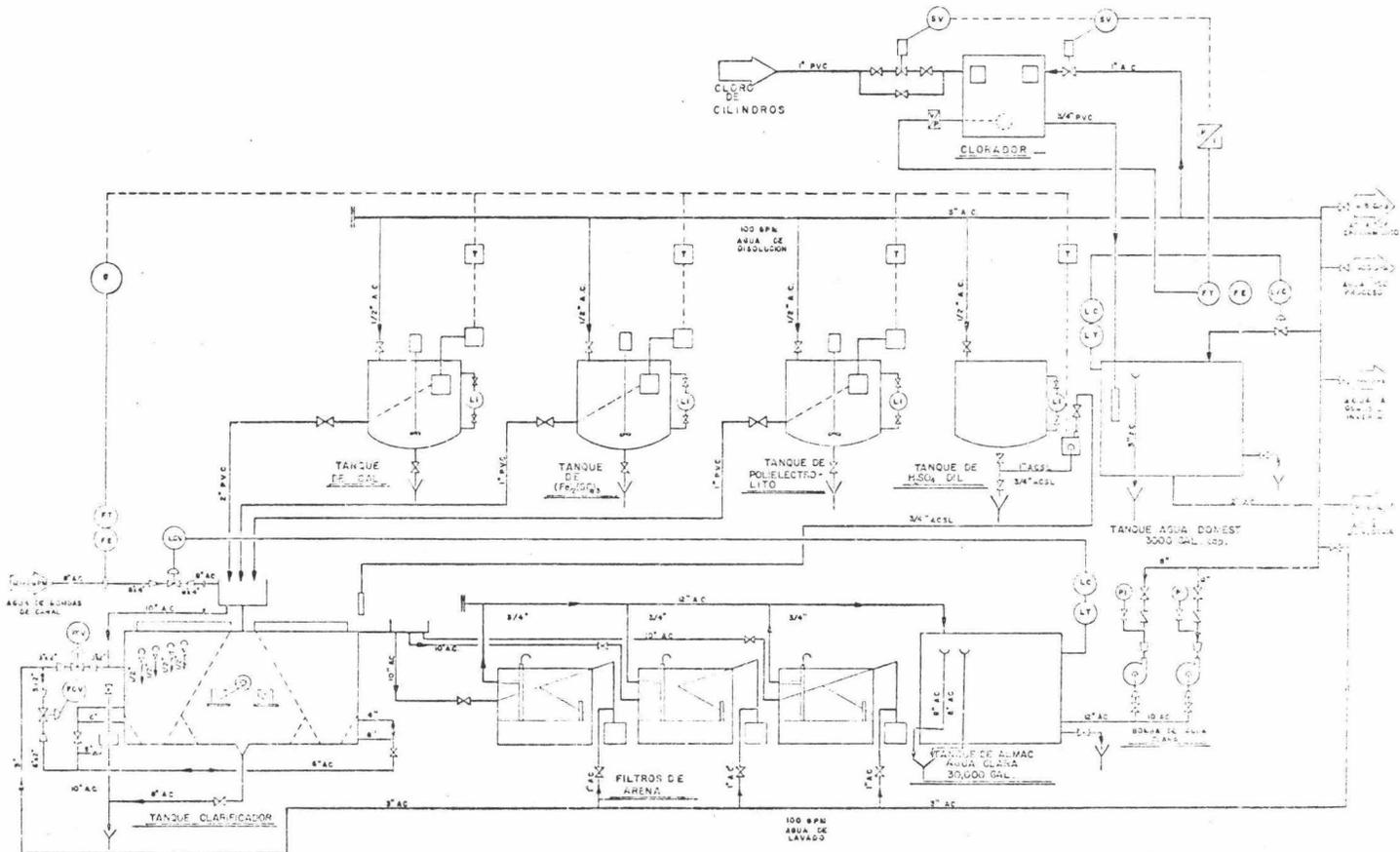
para fugas = 10 p.p.m.

Regeneración con ácido = 5 lb de HCl
al 30%

Regeneración con Sosa = 3 lb de NaOH

5.6.3 Diagramas de Tubería Instrumentación

A continuación se presentan los diagramas de tubería e instrumentación tanto del pretratamiento como del tratamiento planteado en este capítulo, en él se muestra, el equipo básico, así como, la instrumentación requerida, y la ingeniería completa del sistema.



TESIS
 PROYECTO DE
 DIAGRAMA DE
 TUBERIA E
 INSTRUMENTACION
 PARA EL
 PRETRATAMIENTO
 UNAM J LOZANO 1974

B I B L I O G R A F I A

- a) QUIMICA FISICA
GLASSTONE SAMUEL
AGUILAR

- b) THERMODINAMICS
CROFT
Mc GRAW-HILL

- c) PHYSICAL CHEMISTRY
CASTELAN
ADDISON WESLEY

- d) TRATAMIENTO DE AGUAS PARA LA
INDUSTRIA Y OTROS USOS
NORDELL ESKELE
CECSA

- e) DESALINATION BY
REVERSE OSMOSIS
MERTEN
M.I.T.

- f) THE B-9 PERMASEP PERMEATOR
DEVELOPMENT & PERFORMANCE
P. DE BUSSY
DUPONT PRESS

- g) HOLLOW FIBER PERMEATOR IN INDUSTRIAL
WASTE STREAM SEPARATIONS
P. COOKE WILLIAMS
ELSEVIER PUBLISHING CO.

- h) GULF ENVIRONMENTAL SYSTEMS
ROGA PRODUCT BULLETIN

- i) AJAX INTERNATIONAL CORPORATION
REVERSE OSMOSIS SYSTEMS
TECHNICAL PUBLICATIONS

- j) POLIMETRICS REVERSE OSMOSIS
WATER PURIFICATION SYSTEMS
DIVISION OF TECHNICAL EQUITIES CO.
BULLETIN 280

- k) PROCESS HEAT TRANSFER
KERN DONALD
Mc GRAW-HILL