

T-UES
1506
F954
1994

Ej.-2

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA



DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA
DE DESMINERALIZACION DE AGUA PARA USO
DE LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA DE LA UNIVERSIDAD
DE EL SALVADOR

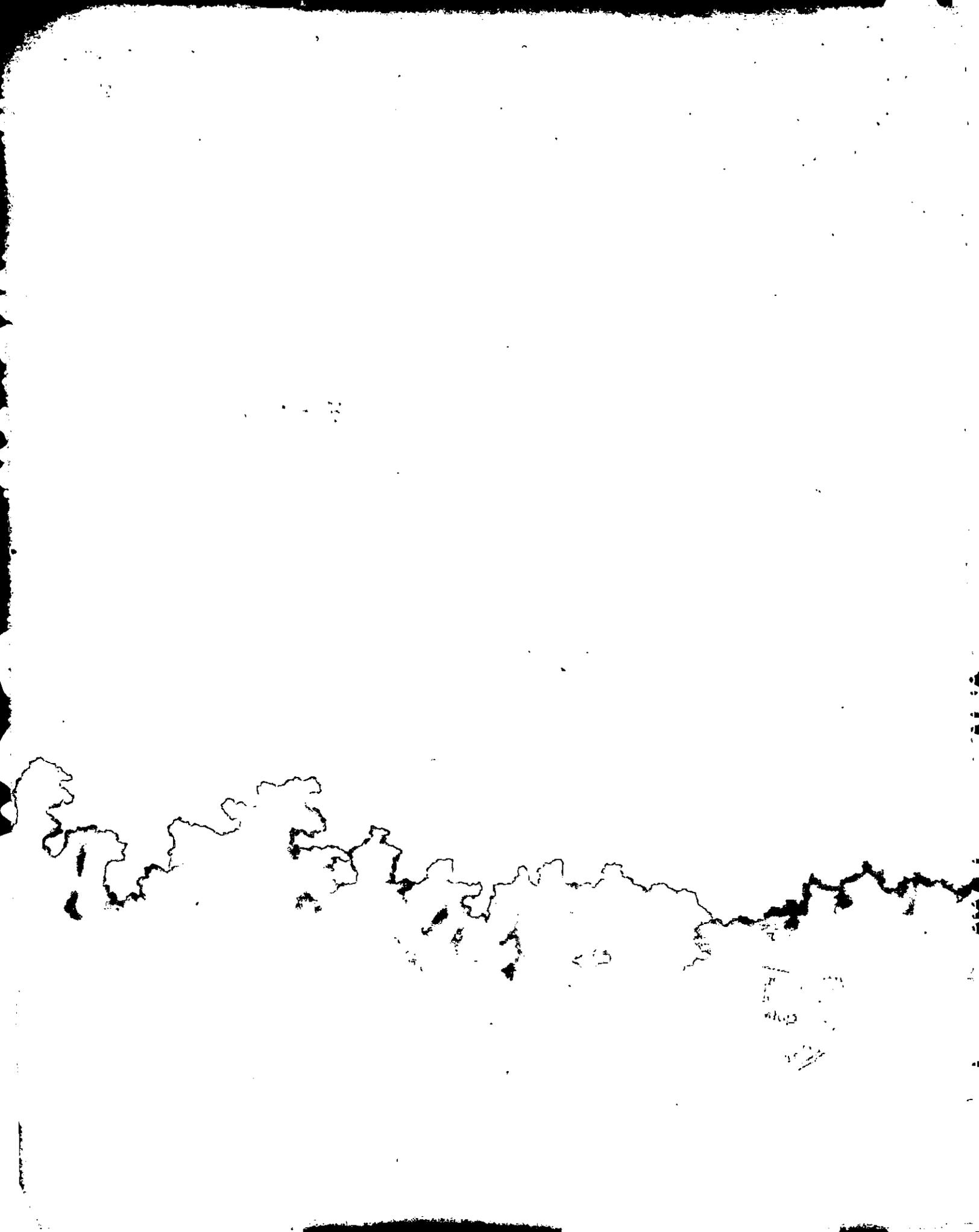
TRABAJO DE GRADUACION PRESENTADO POR:
ALICIA HAYDEE FUENTES TREMINIO
DANIEL BUENAVENTURA MEJIA
JUAN JOSE PANIAGUA CALDERON

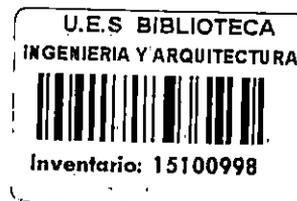
PARA OPTAR AL TITULO DE:

INGENIERO QUIMICO

15100998
15100998

DICIEMBRE 1994





UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA

TRABAJO DE GRADUACION PREVIO A LA OPCION AL TITULO DE

INGENIERO QUIMICO

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SISTEMA DE DESMINERALIZACION
DE AGUA PARA USO DE LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE
INGENIERIA QUIMICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR .

PRESENTADO POR:

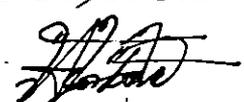
ALICIA HAYDEE FUENTES TREMINIO

DANIEL BUENAVENTURA MEJIA

JUAN JOSE PANIAGUA CALDERON

TRABAJO DE GRADUACION APROBADO POR:


COORDINADOR: LIC. VÍCTOR MANUEL SEGURA LEMUS


ASESOR: ING. ITALO ANDRÉS CORDOVA FLAMENCO


ASESOR: ING. GUSTAVO NERY IRAHETA ANGULO



SAN SALVADOR, DICIEMBRE DE 1994



100

100

100

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR : DR. FABIO CASTILLO FIGUEROA

SECRETARIO GENERAL : LIC. JUSTO ROBERTO CANAS

FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

DECANO : ING. JOAQUIN ALBERTO VANEGAS AGUILAR

SECRETARIO : ING. JOSE RIGOBERTO MURILLO CAMPOS



DIRECTORA : M. Sc. DELMY DEL CARMEN RICO PEÑA

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Delmy del Carmen Rico Peña".

AGRADECIMIENTOS

Los autores del presente trabajo de graduación desean expresar sus más sinceros agradecimientos al Coordinador Lic. Victor Manuel Segura Lemus y a los Asesores Ing. Gustavo Nery Iraheta Angulo e Ing. Italo Andrés Cordova Flamenco, por el valioso aporte al desempeño del mismo.

Se extiende agradecimientos especiales a la empresa ESPECIALIDADES INDUSTRIALES S.A. DE C.V. (ESPINSA), especialmente a su Gerente General Ing. Mario González Suvillaga y al Ing. Pedro Salvador Mendoza por su apoyo moral y material brindado en la realización de este trabajo.

Asi mismo, expresamos los agradecimientos a las siguientes personas por el apoyo brindado al realizar nuestro trabajo de graduación:

Ing. Delmy del Carmen Rico Peña
Arq. Fredy Reynaldo Joma Bonilla
Ing. Juan Rodolfo Ramirez Guzman
Ing. Eduardo Enrique Garcia Klee
Ing. José Eduardo Figueroa Garcia
Ing. Guadalupe Ortiz
Br. Mario Ernesto Estrada
Br. Luis Alonso Herrera
Ing. Fernando Teodoro Ramirez Zelaya
Ing. Saul Antonio Ramos
Lic. Victor Hugo Hurtarte

Sr. Juan Rodolfo Mendoza

Lic. Guillermo Cortéz

Sra. Ana Patricia de Miranda

Srita. Ana Judith Romero Martinez

Sra. Ana Elsy de Ramirez

Sra. Luz Estela Durán de Villela

Srita. Noemy Andrade

Sra. Helen Lissette Escobar de Fuentes

Fam. Mejia Platero

Fam. Paniagua Calderón

Fam. Fuentes Treminio

A todos los compañeros y amigos de la Escuela de Ingeniería Química, y a todas aquellas otras personas que de alguna forma hicieron posible la realización de este trabajo.

DEDICATORIA

- A DIOS TODOPODEROSO** : Por darme la oportunidad de lograr alcanzar otra meta más de las que me he propuesto.
- A MIS PADRES** : Miguel Angel y Haydeé, porque gracias a su esfuerzo, palabras de aliento, amor y comprensión, he logrado coronar mi carrera. Los quiero mucho.
- A MIS HERMANOS** : Rene Eduardo, Leonel Ernesto, Miguel Angel y a su esposa Helen por el apoyo que me brindaron en los momentos difíciles.
- A MIS SOBRINITAS** : Helen Beatriz, Stephany y Jenifer por el amor y la alegría que me brindan.
- A MI ABUELITA** : Mariana por el cariño que me da.
- A TODOS MIS FAMILIARES** : Especialmente a mis tíos Alicia de Castillo, German y Sonia Garay por apoyarme y estar siempre pendiente de mi.

- A MI NOVIO** : Eduardo Antonio, por la paciencia que ha tenido, el cariño y apoyo que me ha brindado.
- A MIS COMPANEROS** : Daniel y Juan José por todos los momentos difíciles y alegres que compartimos.
- A TODOS MIS AMIGOS** : Especialmente a los de la Escuela de Ingeniería Química por ayudarnos en las diferentes etapas de la realización de este trabajo y por el apoyo moral que nos brindaron.

ALICIA HAYDEE FUENTES

DEDICATORIA

A DIOS TODOPODEROSO : Porque me ha permitido llegar al término de mi carrera, quien me dio confianza, esperanza, paciencia, serenidad, prudencia, etc., ese apoyo inagotable de misericordia y amor que siempre me ha brindado.

A MIS PAPAS : Manuel Cristobal y Ana Dilia por el apoyo incondicional que me dieron, por su comprensión, por sus consejos y el sacrificio que han realizado por apoyarme.

A MIS HERMANOS : Manuel Cristobal, Rafael Antonio, Fernando Ernesto por su apoyo en todo momento.

A MI ABUELITA : Pilar por ese incentivo y apoyo inagotable durante tanto tiempo.

A TODA MI FAMILIA

A MI NOVIA : Quien soporto toda mi tensión, alegrías y tristezas, ese constante aprecio y cariño que me brindo en todo momento.

A MIS HERMANOS DE COMUNIDAD : Por esa incesante alimentación de fe que han brindado en todo momento.

A MIS COMPAÑEROS : Alicia y Daniel por soportarme hasta el final.

A TODOS MIS COMPAÑEROS DE INGENIERIA QUIMICA : Con quienes hemos compartido estudios, desvelos, diversión y trabajo.

Y a todos los que no han sido mencionados, gracias por su colaboración y apoyo.

JUAN JOSE PANIAGUA CALDERON

DEDICATORIA

Deseo dedicar éste trabajo de graduación a DIOS TODOPODEROSO por haberme iluminado en todo momento para poder alcanzar ésta importante etapa de mi vida.

A MI MADRE : JESUS MEJIA, por todo el amor e incondicional apoyo que me ha brindado cada día de mi existencia. Este triunfo es tuyo madre.

A LA MEMORIA DE MI ABUELO : BUENAVENTURA VAZQUEZ, quien siempre tuvo la fe y la esperanza de que yo alcanzara ésta meta.

A MI ESPOSA : MARLENE PLATERO, por el amor y la felicidad que me ha dado; y por el sacrificio que ha significado para ella el que yo logre éste objetivo.

A MIS HIJOS : FLORENCE MARLEN Y DANIEL ERNESTO, por el tiempo que les he faltado en la realización de éste trabajo.

A TODA MI DEMAS FAMILIA.

A MIS CASI HERMANDOS : DAVID JOMA, FREDY JOMA Y MAURICIO PICHE, por el enorme apoyo y sincero cariño que en todo momento me otorgan.

A MIS GRANDES AMIGOS : LILIANA SANTAMARIA, JUAN R. RAMIREZ,
EDUADO E. GARCIA, SAUL RAMOS, MIGUEL VARGAS, JOSE S. LOPEZ,
FRANCISCO SOTO, CARLOS ZELAYA, QUIQUE, MEMO, BORJA,

A TODOS LOS BUENOS DOCENTES QUE ME FORMARON : Sin su ayuda no
lo hubiese logrado.

A MIS COMPAÑEROS DE TESIS : ALICIA FUENTES Y JUAN PANIAGUA,
por el buen trabajo que realizamos juntos.

Asi mismo deseo dedicar éste trabajo a todas aquellas personas
que de una u otra forma hicieron posible su realización.

DANIEL B. MEJIA

Todas las actividades que se realizan en un laboratorio requieren del uso de reactivos de alta calidad; y el agua, que es el reactivo mas utilizado, debe cumplir con ciertas normas de calidad para ser usada en la preparación de reactivos, lavar el material de vidrio, etc.

Las normas para el agua "grado reactivo" o "calidad reactivo" recomiendan varios métodos para producirla. De estos, se seleccionó la desmineralización total por medio de resinas de intercambio iónico con el objeto de diseñar y construir un sistema desmineralizador para los laboratorios de Ingeniería Química; carrera que a pesar de tener 25 años de existencia no contaba con un medio propio, hasta la realización de este trabajo, para producir el agua requerida en sus laboratorios. Aunque en el mercado nacional se encuentran disponibles sistemas desmineralizadores automáticos o semiautomáticos, estos tienen costos relativamente altos por lo que resulta muy difícil para la Escuela de Ingeniería Química adquirir uno. Por esta razón, este Trabajo de Graduación representa una alternativa en el sentido de reducir costos al dimensionar un sistema operado y controlado por medio de válvulas manuales pero que a su vez incorpora ciertos elementos prefabricados que aseguran la durabilidad y eficiencia del mismo.

En el marco de la investigación bibliográfica del trabajo se presenta información concerniente a las propiedades

RESUMEN

del agua y su composición, formas de concentración de los minerales disueltos (impurezas inorgánicas) en el agua, los análisis físico-químicos a realizar para evaluar la calidad inicial y final del agua, parámetros de calidad final del agua, teoría sobre los principios del fenómeno de intercambio iónico, información sobre los intercambiadores iónicos sintéticos (resinas o polímeros orgánicos); y finalmente se aborda detalladamente el proceso de desmineralización (como una aplicación del intercambio iónico), definiendo en cada una de sus etapas los tópicos de mayor interés que sirven de base para la parte práctica del trabajo.

En lo concerniente al diseño y construcción, primeramente se define un modelo que contiene todas las partes del sistema y en el que se establece la dirección de cada uno de los flujos asociados a las diferentes etapas del proceso de desmineralización del agua. Seguidamente, se procede al dimensionamiento formal del sistema, en donde se incluyen aspectos como: datos técnicos para la operación óptima de las resinas, cálculos de capacidad del sistema en base a la cantidad del agua cruda y a la demanda de agua desmineralizada, etc. Luego de la especificación se procede a la construcción y al desarrollo de la experimentación.

La etapa experimental del trabajo se desarrolla básicamente en cuatro partes:

- a. Pruebas de concentración contra flujo total (gpm) a través del inyector de Acido Clorhídrico para la resina

- catiónica.
- b. Prueba del comportamiento de la resina catiónica a diferentes niveles de regeneración con Acido Clorhídrico.
 - c. Pruebas de concentración contra flujo total (gpm) a través del inyector de Hidróxido de Sodio para la resina aniónica.
 - d. Prueba del comportamiento de la resina aniónica a diferentes niveles de regeneración con Hidróxido de Sodio.

El objetivo de la experimentación fué el de determinar si los inyectores eran capaces de proporcionar la concentración de regenerantes requerida para ambas resinas y definir el nivel de regeneración óptimo para las mismas. Esto, a su vez, permitió la calibración de las válvulas de control del sistema desmineralizador de lecho doble, de manera que esta información sirvió de base para elaborar el manual de operación.

Una vez establecidas las condiciones de operación del sistema, se procede a la evaluación de la calidad del agua producida por este; encontrándose que el agua desmineralizada obtenida en un sólo paso y con recirculación cumplen con las normas de calidad establecidas para el agua grado reactivo. Adicionalmente se construyó una columna de lecho mixto para la producción del agua pulida que las normas exigen para usos especiales. El agua pulida obtenida también cumplió con las normas de calidad. De esta manera, es posible decir que este trabajo ha tenido éxito en todos los objetivos planteados.

INDICE

Contenido	Página
INDICE DE FIGURAS.....	xviii
INDICE DE TABLAS	xxi
INTRODUCCION	1
I. EL AGUA, PROPIEDADES Y COMPOSICION	3
1.1 Introducción	3
1.2 Propiedades del agua	6
1.3 Composición del agua	9
1.3.1 Sustancias minerales disueltas en el agua	15
1.4 Formas de expresar la concentración	18
1.5 Calidad del agua	28
1.5.1 Calidad inicial del agua	29
1.5.2 Calidad del agua producto	31
II. INTERCAMBIO IONICO	34
2.1 Principios del Intercambio Iónico	34
2.1.1 Definición de Intercambio Iónico	35
2.1.2 Factores influyentes en las reacciones de Intercambio Iónico	38
2.2 Propiedades Físicas y Químicas de las resinas de Intercambio Iónico	43
2.2.1 Propiedades Físicas	48
2.2.2 Propiedades Químicas	53
III. LA DESMINERALIZACION	61
3.1 Principios de la Desmineralización Total	61
3.2 Tipos de arreglos de la Desminerali- zación	64
3.3 Proceso de Desmineralización con Siste- mas de Lecho Doble	66
3.3.1 Etapas del proceso de Desminera- lización Total	66
3.3.1.1 Ciclo de servicio	68
3.3.1.2 Recirculación en el ciclo de servicio	77
3.3.1.3 Ciclo de retrolavado	78
3.3.1.4 Ciclo de regeneración	81
3.3.1.5 Lavado lento	94
3.3.1.6 Lavado rápido o final	96
3.5 Lecho Mixto	96

Contenido	Página
IV. DEMANDA DE AGUA DESMINERALIZADA EN LOS LABORATORIOS DE INGENIERIA QUIMICA	99
4.1 Calidad de agua desmineralizada	101
V. DISEÑO DEL SISTEMA DE DESMINERALIZACION	104
5.1 Sistema de Lecho Doble	105
5.2 Lecho Mixto	107
VI. DISEÑO EXPERIMENTAL	119
VII DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DESMINE- RALIZADOR	124
7.1 Cálculos para determinar el tamaño del Desmineralizador de Lecho Doble	124
7.1.1 Datos técnicos de las resinas	127
7.1.1.1 Resina Catiónica	127
7.1.1.2 Resina Aniónica	130
7.1.2 Cálculo de las unidades catiónica y aniónica	135
7.1.2.1 Unidad catiónica	136
7.1.2.2 Unidad aniónica	138
7.1.2.3 Determinación de fugas	144
7.1.3 Especificación de tanques para resinas	147
7.1.4 Especificación de la bomba para envío de agua	149
7.1.5 Especificación de Inyectores	151
7.1.6 Especificación de tanques para desechos de regeneración	155
7.2 Especificación del Lecho Mixto	156
7.2.1 Cálculo aproximado del galonaje de agua pulida producido por el Lecho Mixto.....	158
7.3 Planos de construcción	160
VIII COSTOS DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR	165
8.1 Costos de construcción	165
IX PRESENTACION, EVALUACION ESTADISTICA Y DISCUSION DE RESULTADOS	167
9.1 Presentación de resultados	167
9.1.1 Resultados de pruebas con los inyectores	167
9.1.2 Resultados de las pruebas de las resinas catiónica y aniónica	169

Contenido	Página
9.2 Evaluación estadística y análisis de resultados	181
9.2.1 Evaluación y análisis de las pruebas con los Inyectores	181
9.2.2 Evaluación y análisis de la prueba de las unidades catiónica y aniónica	190
9.3 Evaluación del Sistema Desmineralizador produciendo agua en un sólo paso	197
9.4 Evaluación del agua desmineralizada producida utilizando recirculación	198
9.5 Evaluación de la columna del Lecho Mixto	199
X. MANUAL DE OPERACION Y MANTENIMIENTO	201
10.1 Operación del Lecho Doble	201
10.1.1 Regeneración de la unidad catiónica ...	201
10.1.2 Regeneración de la unidad aniónica	204
10.1.3 Lavado final de todo el sistema	206
10.1.4 Etapa de recirculación	206
10.2 Operación del Lecho Mixto	208
10.2.1 Regeneración del lecho mixto.....	209
10.3 Manual de mantenimiento	211
CONCLUSIONES	215
RECOMENDACIONES	219
REFERENCIAS	221
ANEXOS	223
ANEXO A: NORMAS DE CALIDAD PARA EL AGUA GRADO REACTIVO	224
ANEXO B: GUIA DE DIMENSIONAMIENTO DE DESMINERALIZADORES	229
ANEXO C: PASOS Y FORMULAS ESTADISTICAS PARA LA EVALUACION EXPERIMENTAL	248

INDICE DE FIGURAS

Num.	Figura.	Página
1.1	REPRESENTACION ESQUEMATICA DE PUENTES DE HIDROGENO.....	7
2.1	DENSIDAD DE UNA RESINA CATIONICA FUERTEMENTE ACIDA COMO FUNCION DEL GRADO DE RETICULACION.....	50
2.2	HINCHAMIENTO DE RESINAS TIPO GEL, CATIONICA FUERTEMENTE ACIDA Y ANIONICA FUERTEMENTE BASICA, COMO UNA FUNCION DE LA RETICULACION.....	52
3.1	DIRECCION DE FLUJOS EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE UN SISTEMA DESMINERALIZADOR EN OPERACION CO-CORRIENTE.....	67
3.2	DIRECCION DE FLUJOS EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE UN SISTEMA DESMINERALIZADOR EN OPERACION CONTRA-CORRIENTE.....	68
3.3	RETENCION DE IONES COMO FUNCION DE LA SELECTIVIDAD EN LA RESINA CATIONICA DE ACIDO FUERTE EN LA FORMA DE HIDROGENO.....	70
3.4	RETENCION DE IONES COMO FUNCION DE LA SELECTIVIDAD EN LA RESINA ANIONICA DE BASE FUERTE EN LA FORMA DE OXIDRILLO.....	73
3.5	ESQUEMA DEL PRINCIPIO DE INTERCAMBIO IONICO EN UN LECHO MIXTO.....	98
5.1	DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL PROCESO DE PRODUCCION DE AGUA DESMINERALIZADA Y PULIDA PARA DIFERENTES USOS EN EL LABORATORIO.....	104
5.2	VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO QUE SE CONSTRUIRA EN LAS INSTALACIONES DE LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	108
5.3	VISTA FRONTAL DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO QUE SE CONSTRUIRA EN LAS INSTALACIONES DE LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	109
5.4	VISTA EN PERSPECTIVA DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO QUE SE CONSTRUIRA EN LAS INSTALACIONES DE LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR....	110

Num. Figura.	Página
5.5 DIRECCION DEL FLUJO DE SERVICIO Y RECIRCULACION DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO.....	111
5.6 DIRECCION DEL FLUJO DE RETROLAVADO DEL LECHO DE RESINA CATIONICA.....	112
5.7 DIRECCION DEL FLUJO DE SUCCION DE REGENERANTE ACIDO PARA EL LECHO DE RESINA CATIONICA.....	113
5.8 DIRECCION DEL FLUJO DE LAVADO LENTO Y RAPIDO PARA EL LECHO DE RESINA CATIONICA.....	114
5.9 DIRECCION DEL FLUJO DE RETROLAVADO DEL LECHO DE RESINA ANIONICA.....	115
5.10 DIRECCION DEL FLUJO DE SUCCION DE REGENERANTE ALCALINO PARA EL LECHO DE RESINA ANIONICA.....	116
5.11 DIRECCION DEL FLUJO DE LAVADO LENTO Y RAPIDO PARA EL LECHO DE RESINA ANIONICA.....	117
5.12 MODELO DE LA COLUMNA DE LECHO MIXTO QUE SERVIRA COMO PULIDORA DE AGUA DESMINERALIZADA.....	118
7.1 GRADO DE EXPANSION DE LA RESINA CATIONICA DE ACIDO FUERTE COMO FUNCION DE LA TEMPERATURA A DIFERENTES VELOCIDADES DE FLUJO.....	129
7.2 CAIDA DE PRESION DE LA RESINA ANIONICA DE BASE FUERTE COMO UNA FUNCION DE LA VELOCIDAD DE FLUJO A DIFERENTES TEMPERATURAS.....	133
7.3 GRADO DE EXPANSION DE LA RESINA ANIONICA DE BASE FUERTE COMO FUNCION DE LA TEMPERATURA PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLUJO.....	134
7.4 TANQUE DE FIBRA DE VIDRIO PARA CONTENER RESINAS (CATIONICA Y ANIONICA) UTILIZADOS EN EL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE LECHO DOBLE.....	148
7.5 TAPADERA PARA LOS TANQUES CONTENEDORES DE RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO (FIG. 7.4).....	149
7.6 BOMBA PARA EL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO.....	150
7.7 DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL INYECTOR DE REGENERANTES QUIMICOS PARA RESINAS.....	154

Num. Figura.	Página
7.8 INYECTOR DE REGENERANTES QUIMICOS PARA LAS RESINAS UTILIZADO EN EL SISTEMA DE DESMINERALIZACION...	154
7.9 TANQUES PARA LA NEUTRALIZACION DE DESECHOS DE LA REGENERACION DE RESINAS CATIONICA Y ANIONICA.....	156
7.10 COLUMNA DE LECHO MIXTO PARA PULIR AGUA DESMINERALIZADA.....	160
7.11 SISTEMA DE DESMINERALIZACION TOTAL DE AGUA PARA USO EN LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	164
9.1 REPRESENTACION GRAFICA DE LA VARIACION DE LA DUREZA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SERVICIO Y DEL NIVEL DE REGENERACION EN LA PRUEBA DE LA UNIDAD CATIONICA. N1, N2, N3: NIVELES DE REGENERACION.....	175
9.2 VARIACION DE LA SILICE CON EL NIVEL DE REGENERACION Y CON EL GALONAJE TOTAL DE AGUA DESMINERALIZADA PRODUCIDA DURANTE LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA. N1, N2, N3: NIVELES DE REGENERACION.....	179
9.3 VARIACION DE LOS CLORUROS CON EL NIVEL DE REGENERACION Y CON EL GALONAJE TOTAL DE AGUA DESMINERALIZADA PRODUCIDA DURANTE LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA. N1, N2, N3: NIVELES DE REGENERACION.....	180
9.4 VARIACION DE LA CONCENTRACION DE ACIDO CLORHIDRICO EN FUNCION DEL FLUJO TOTAL SALIENDO DEL INYECTOR.....	185
9.5 VARIACION DE LA CONCENTRACION DEL NaOH EN FUNCION DEL FLUJO TOTAL SALIENDO DEL INYECTOR.....	189
10.1 UBICACION DE LAS VALVULAS EN EL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO.....	212

INDICE DE TABLAS

Num. Tabla.		Página
1-1	IONES MAS ABUNDANTES EN SUMINISTROS DE AGUAS NATURALES.....	17
1-2	FACTORES PARA CALCULAR EL EQUIVALENTE DE CARBONATO DE CALCIO DE DIVERSAS SUSTANCIAS.....	26
1-3	CRITERIOS DE ACEPTACION PARA UN ANALISIS DE AGUA EN BASE AL PORCENTAJE DE DIFERENCIA.....	27
1-4	CARACTERISTICAS QUE COMUNMENTE SE REQUIERE ANALIZAR EN EL AGUA PARA ESTABLECER SU ADECUABILIDAD EN UN USO INDUSTRIAL DETERMINADO.....	30
1-5	ESPECIFICACIONES DEL AGUA GRADO REACTIVO PARA DIFERENTES USOS EN EL LABORATORIO.....	32
2-1	ALGUNOS TIPOS DE RESINAS CATIONICAS DE ACIDO FUERTE DISPONIBLES COMERCIALMENTE.....	45
2-2	ALGUNOS TIPOS DE RESINAS ANIONICAS DE BASE FUERTE DISPONIBLES COMERCIALMENTE.....	46
2-3	EFECTO DE LA RETICULACION SOBRE LA DENSIDAD DE UNA RESINA CATIONICA FUERTEMENTE ACIDA.....	50
2-4	EFECTO DE LA RETICULACION SOBRE LA RETENCION DE AGUA EN RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO TIPO GEL.....	55
2-5	EFECTO DE LA RETICULACION SOBRE LA RETENCION DE AGUA EN RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO POROSAS.....	56
2-6	IONIZACION Y VALORES PK DE MATERIALES DE INTERCAMBIO IONICO.....	57
2-7	COEFICIENTES DE SELECTIVIDAD DE LOS CATIONES EN UN INTERCAMBIADOR CATIONICO DE ACIDO FUERTE.....	59
2-8	COEFICIENTES DE SELECTIVIDAD DE ANIONES MONOVALENTES EN INTERCAMBIADORES ANIONICOS DE BASE FUERTE.....	60
3-1	ARREGLOS TIPICOS DE SISTEMAS DE DESMINERALIZACION UTILIZADOS INDUSTRIALMENTE.....	65
4-1	DEMANDA ANUAL PROMEDIO DEL AGUA DESMINERALIZADA EN LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA.....	100

Num. Tabla.	Página
4-2 DATOS COMPARATIVOS DE LA CALIDAD DEL AGUA DESMINERALIZADA UTILIZADA EN LOS LABORATORIOS DE INGENIERIA QUIMICA ENTRE JULIO 1993 Y MAYO 1994.....	102
7-1 ANALISIS FISICO-QUIMICOS DEL AGUA CRUDA SUMINISTRADA A LOS LABORATORIOS DE INGENIERIA QUIMICA REALIZADOS EN DIFERENTES FECHAS.....	126
7-2 CARACTERISTICAS FISICAS DE LA RESINA CATIONICA DE ACIDO FUERTE.....	128
7-3 CONDICIONES DE OPERACION SUGERIDAS PARA LA RESINA CATIONICA DE ACIDO FUERTE.....	128
7-4 PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LA RESINA ANIONICA DE BASE FUERTE.....	131
7-5 CONDICIONES DE OPERACION SUGERIDAS PARA LA RESINA ANIONICA FUERTEMENTE BASICA.....	132
7-6 PROMEDIO DEL ANALISIS DE AGUA CRUDA EN BASE AL CUAL SE REALIZA EL CALCULO DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA DE LECHO DOBLE.....	136
7-7 VELOCIDADES DE FLUJO, TIEMPO Y VOLUMENES DE DESECHO PRODUCIDOS EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE LA REGENERACION DE LAS RESINAS CATIONICAS Y ANIONICAS.....	155
8-1 DETALLE DE PRECIOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR.....	165
9-1 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE POSICION DE LA VALVULA PRINCIPAL CONTRA CONCENTRACION EFECTUADAS EN EL INYECTOR DE HCl PARA LA RESINA CATIONICA.....	168
9-2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE POSICION DE LA VALVULA PRINCIPAL CONTRA CONCENTRACION EFECTUADAS EN EL INYECTOR DE NaOH PARA LA RESINA ANIONICA.....	169
9-3 VARIACION DE LA DUREZA EN FUNCION DEL TIEMPO DURANTE EL CICLO DE SERVICIO EN LAS PRUEBAS DE RESINA CATIONICA.....	173
9-4 RESULTADOS DE PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA CORRESPONDIENTE AL NIVEL DE REGENERACION 1 (N1).....	176
9-5 RESULTADOS DE PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA CORRESPONDIENTE AL NIVEL DE REGENERACION 2 (N2).....	177

Num. Tabla.	Página
9-6 RESULTADOS DE PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA CORRESPONDIENTE AL NIVEL DE REGENERACION 3 (N3).....	178
9-7 RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL INYECTOR DE ACIDO CLORHIDRICO PARA LA RESINA CATIONICA, CON LOS PARAMETROS NECESARIOS PARA EL ANALISIS DE VARIANZA.....	181
9-8 RESULTADO DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA LAS REPETICIONES DE LA PRUEBA CON EL INYECTOR DE HCl (ANALISIS EN UNA SOLA DIRECCION).....	182
9-9 ANALISIS DE VARIANZA DE REPETICIONES Y POSICIONES DE VALVULA PRINCIPAL PARA EL INYECTOR DE HCl (ANALISIS EN DOS DIRECCIONES).....	182
9-10 RESULTADOS DEL ANALISIS DE DMS PARA LAS POSICIONES DE LA VALVULA PRINCIPAL EN LA PRUEBA CON EL INYECTOR DE HCL.....	184
9-11 RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL INYECTOR DE HIDROXIDO DE SODIO PARA LA RESINA ANIONICA, CON LOS PARAMETROS NECESARIOS PARA EL ANALISIS DE VARIANZA.....	186
9-12 RESULTADO DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA LAS REPETICIONES DE LA PRUEBA CON EL INYECTOR DE HIDROXIDO DE SODIO (ANALISIS EN UNA SOLA DIRECCION).....	186
9-13 ANALISIS DE VARIANZA DE REPETICIONES Y POSICIONES DE VALVULA PRINCIPAL PARA EL INYECTOR DE NaOH (ANALISIS EN DOS DIRECCIONES).....	187
9-14 RESULTADOS DEL ANALISIS DE DMS PARA LAS POSICIONES DE LA VALVULA PRINCIPAL EN LA PRUEBA CON EL INYECTOR DE NaOH.....	188
9-15 RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LA RESINA CATIONICA CON LOS PARAMETROS NECESARIOS PARA EL ANALISIS DE VARIANZA.....	190
9-16 RESULTADO DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA LAS REPETICIONES EN LA PRUEBA DE LA RESINA CATIONICA (ANALISIS EN UNA SOLA DIRECCION).....	191
9-17 RESULTADO DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA LAS REPETICIONES Y LOS NIVELES DE REGENERACION EN LA PRUEBA DE LA RESINA CATIONICA (ANALISIS EN DOS DIRECCIONES).....	191

Num. Tabla.	Página
9-18 RESULTADOS DEL ANALISIS DE SILICE OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA, CON LOS PARAMETROS NECESARIOS PARA EL ANALISIS DE VARIANZA.....	193
9-19 RESULTADOS DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA LAS REPETICIONES DE LA CONCENTRACION DE SILICE EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA (ANALISIS EN UNA SOLA DIRECCION).....	193
9-20 RESULTADOS DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA REPETICIONES Y NIVELES DE REGENERACION CON LOS DATOS DE CONCENTRACION DE SILICE OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA.....	194
9-21 RESULTADOS DEL ANALISIS DE CLORUROS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA, CON LOS PARAMETROS NECESARIOS PARA EL ANALISIS DE VARIANZA.....	195
9-22 RESULTADOS DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA REPETICIONES DEL ANALISIS DE CLORUROS EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA (ANALISIS EN UNA SOLA DIRECCION).....	195
9-23 RESULTADOS DEL ANALISIS DE VARIANZA DE REPETICIONES Y NIVELES DE REGENERACION CON LOS DATOS DE CONCENTRACION DE CLORUROS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA (ANALISIS EN DOS DIRECCIONES).....	196
9-24 RESULTADOS DE ANALISIS DEL AGUA DESMINERALIZADA PRODUCIDA EN UN SOLO PASO.....	197
9-25 RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO EN MUESTRAS DE AGUA DESMINERALIZADA PRODUCIDA CON RECIRCULACION.....	199
9-26 RESULTADOS OBTENIDOS EN LA EVALUACION DE LA COLUMNA DE LECHO MIXTO.....	200

INTRODUCCION

En la industria química actual, el análisis químico tiene aplicaciones de suma importancia en la definición, especificación, y control de los procesos; en el control de calidad de materias primas, productos intermedios y productos terminados; así como en la caracterización y el tratamiento de los desechos generados en los procesos industriales. Este importante hecho plantea la necesidad de una adecuada enseñanza, en las Universidades, de asignaturas como la Química General; Química Analítica; Análisis Instrumental; Química del Agua; Tratamiento de Aguas; etc., las cuales proveen al futuro profesional los métodos y técnicas necesarias para desarrollarse en éstas importantes áreas de la industria. Un aspecto fundamental en el proceso de enseñanza es la realización de laboratorios prácticos que vienen a reafirmar los conocimientos teóricos, y para llevarlos a cabo se requiere que las sustancias químicas involucradas posean el grado de "calidad reactivo", es decir, sustancias químicas de alta pureza. El agua no es la excepción y para su uso en prácticas de laboratorio debe cumplir con cierto nivel estándar de calidad. Debe también anotarse que el agua es la sustancia más usada en el laboratorio puesto que sirve para preparar reactivos, lavar material de vidrio, realizar análisis, etc.

En la Facultad de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de El Salvador corresponde a la Escuela de Ingeniería Química proporcionar el servicio de laboratorio tanto a los

estudiantes de esta Escuela como a los de otras carreras que cursan Química Técnica. Sin embargo, a pesar del tiempo que tiene de existir la Escuela de Ingeniería Química, en las instalaciones de sus laboratorios no se tiene un equipo para producir agua de la calidad requerida para utilizar en los laboratorios.

Con el presente Trabajo de Graduación se ha pretendido solventar esta necesidad a través del diseño y construcción de un sistema de tratamiento para la obtención de agua que tenga la calidad exigida en las prácticas de laboratorios. Se inicia el trabajo con un estudio teórico del agua y sus propiedades, calidades de agua, formas de purificar químicamente el agua y en el capítulo tres se aborda con detalle la teoría relativa al proceso de desmineralización total por medio de intercambio iónico. Seguidamente se aborda el tema de las necesidades de agua en los laboratorios de Ingeniería Química, para luego iniciar con el modelaje del diseño del sistema a construir. Se describe en el capítulo seis el diseño de la experimentación a realizar, y en el capítulo siete se procede a dimensionar y a especificar todos los componentes del sistema desmineralizador. También se aborda el tema de los costos de construcción del sistema así como un análisis de los resultados obtenidos en la experimentación y de su respectiva evaluación estadística. Finalmente se abordará en el capítulo diez el manual de operación y mantenimiento del equipo, así como las recomendaciones y conclusiones relativas a todo el trabajo.

CAPITULO I

EL AGUA PROPIEDADES Y COMPOSICION.

1.1. INTRODUCCION.

La mayoría de personas podría decir que cualquiera sabe lo que es el agua, y muchas de ellas podrían agregar que H_2O es un símbolo químico bien conocido para este preciado líquido. Sin embargo, mucha gente utiliza la palabra agua indistintamente para describir a océanos, ríos, lagos, pozos, lluvia, e incluso aguas que han sido tratadas o acondicionadas para diferentes usos en la industria, los hogares, etc. A pesar de ello, parece obvio que la diferencia principal entre las fuentes de agua mencionadas es la cantidad y tipo de "cosas" o "contaminantes" que en ellas se encuentran como plantas, peces, microorganismos, rocas, minerales disueltos, etc.

Probablemente cada ser humano tenga su propio concepto acerca del agua; sin embargo, el desarrollo científico e industrial ha exigido definiciones concretas del término agua para que sean aceptadas universalmente. En general, todas las definiciones conocidas se basan en las características o propiedades que el agua posee. Por ejemplo, basándose en ciertas propiedades físicas y químicas del líquido puro se puede definir al agua de la siguiente manera (1a):

"Líquido incoloro, inodoro e insípido, fórmula molecular H_2O , esencial para la vida animal y vegetal y el más empleado de

los disolventes. Punto de fusión 0°C (32°F), punto de ebullición 100°C (212°F); ambos a una presión de 1 atmósfera, gravedad específica (a 4°C) 1.0000, peso por galón (a 15°C) 8.337 lbs".

La definición anterior es bien conocida en el ámbito científico y académico pero para los fines industriales son más importantes otras definiciones comunes en la terminología del tratamiento de aguas y que denotan la presencia de contaminantes en el agua. Entre estas están:

a. Agua Cruda o Agua de Alimentación: Es el agua que proviene de fuentes de origen natural como pozos, ríos o lagos, y que es alimentada a algún proceso de tratamiento particular con el objetivo de modificar o adecuar su calidad al nivel requerido para una aplicación específica.

b. Agua Destilada: Es agua de alta pureza que se prepara evaporando agua cruda* y posteriormente el vapor es condensado por enfriamiento para obtener nuevamente agua que está libre de contaminantes de origen mineral y orgánico.

c. Agua Desmineralizada: Es aquella a la que se le han eliminado casi en su totalidad los contaminantes de origen inorgánico que naturalmente posee, sometiendo agua cruda a

*En la práctica resulta más conveniente destilar agua desmineralizada de una calidad tal que su contenido de dureza (calcio y magnesio) y sílice no provoquen daños considerables de incrustación en los destiladores.

un proceso de intercambio iónico utilizando materiales sintéticos que reciben el nombre de resinas de intercambio iónico. La calidad del agua desmineralizada puede variar en un rango más o menos amplio dependiendo del uso que tendrá, y es posible obtener agua con igual calidad físico-química que la destilada; la diferencia principal es que el proceso de intercambio iónico no elimina microorganismos como sucede en la destilación.

d. Agua Ultrapura o Pulida: Es agua de altísima calidad (o pureza) que puede obtenerse por destilación de agua desmineralizada de alta calidad, por redestilación, o tratando agua desmineralizada de alta calidad con una mezcla de resinas sintéticas de intercambio iónico dispuestas en una sola columna (lecho mixto).

De lo anterior puede observarse que existe una estrecha relación entre el concepto del agua y los contaminantes que contiene. Los contaminantes (o impurezas), ya sea orgánicos o inorgánicos, presentes en los diferentes tipos de aguas les otorgan un conjunto de características que conoceremos con el nombre de "composición del agua". Para establecer una diferencia puede entonces hablarse de una "composición química del agua" para hacer referencia al contenido de impurezas de origen inorgánico disueltas en el agua; o de una "composición biológica del agua" para referirse a impurezas de origen

orgánico presentes en ella.

En este trabajo será de principal interés estudiar la forma de separar los contaminantes de origen inorgánico (minerales) disueltos en el agua por medio de un proceso de desmineralización utilizando resinas de intercambio iónico; y por lo tanto, los conceptos de agua cruda, agua desmineralizada, y agua pulida son relevantes y a menudo se mencionaran en secciones posteriores.

Previamente al estudio de la desmineralización se hace necesario conocer un poco más acerca del agua, por lo que en las siguientes secciones se discutirá sobre sus propiedades, composición, y forma de expresar la concentración de los contaminantes.

1.2. PROPIEDADES DEL AGUA (1b).

La mayoría de las moléculas de agua tienen un peso molecular de 18. Sin embargo, puesto que el Hidrógeno y el Oxígeno tienen cada uno 3 isótopos, hay 18 pesos moleculares posibles del agua. En la molécula del agua ambos átomos de Hidrógeno están ubicados del mismo lado del átomo de Oxígeno; sus enlaces con el átomo de Oxígeno se encuentran separados a 105° . Los átomos de Hidrógeno tienen una carga positiva mientras que el átomo de Oxígeno tiene carga negativa. Debido a esta distribución de carga, el agua es una molécula fuertemente bipolar. Los bipolos de la molécula de agua se atraen entre sí y forman agregados a través de enlaces que se conocen

como "puentes de Hidrógeno" (Fig. 1.1).

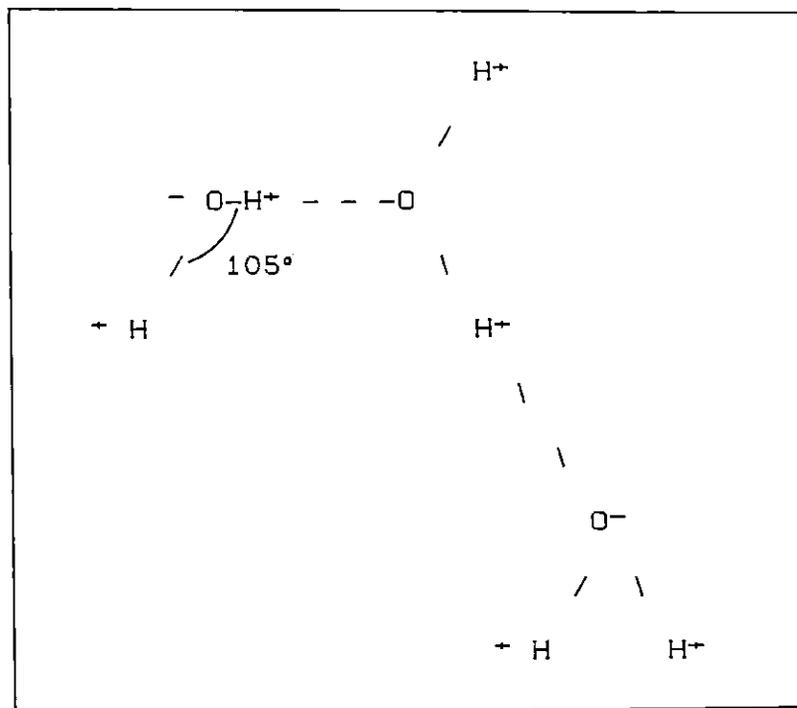


FIG. 1.1. REPRESENTACION ESQUEMATICA DE PUENTES DE HIDROGENO

Se piensa que estos agregados del agua a temperatura ambiente pueden alcanzar tamaños que lleguen a 100 moléculas de agua.

Los enlaces de Hidrógeno en agua son responsables de muchas de las propiedades poco usuales que presenta esta sustancia. El agua es el Dihidruro de Oxígeno. Si se le compara con los Dihidruros de los elementos en la misma familia de la tabla periódica que el Oxígeno, como el Sulfuro de Hidrógeno, H_2S ; el Seleniuro de Hidrógeno, H_2Se ; y el Teluriuro de Hidrógeno, H_2Te , se encuentra que muchas de sus propiedades físicas son anómalas. A presión atmosférica y temperatura

ambiente (25°C) estos Dihidruros que tienen moléculas más pesadas, son todos gases, a diferencia del agua que es líquida. Es una sustancia mucho más densa que las especies relacionadas con ella a cualquier temperatura dada; su densidad máxima se presenta a 4°C. Su tensión superficial y constante dieléctrica son mucho más altas de lo que se podría predecir a partir de las propiedades de los otros Dihidruros. Su punto de congelación es inferior de lo que podría esperarse y se congela formando hielo, el cual es menos denso que el agua líquida a partir de la cual se forma. Todas estas propiedades (y muchas más) se deben, en mucho, a los enlaces de Hidrógeno entre las moléculas de agua. La última propiedad (que el agua forma un sólido menos denso que el líquido a partir del cual proviene) tiene efectos de gran trascendencia. Si el agua sólida fuese más densa que el agua líquida, al formarse el hielo tendería a depositarse en el fondo de los depósitos naturales de agua y no en la superficie. Los lagos se congelarían del fondo hacia arriba y como consecuencia, la vida no existiría en los sistemas acuáticos donde la temperatura disminuye por debajo del punto de congelación del agua puesto que dichos depósitos naturales de agua se congelarían.

La polaridad del agua es un factor importante para determinar sus propiedades disolventes. Los minerales que forman la corteza terrestre son en su mayoría sólidos inorgánicos en donde los iones de cargas positivas y negativas existen en una estructura reticular unidos entre sí por

enlaces electrostáticos. El agua, con su carácter bipolar, tiene el poder de rodear a un ion de carga positiva con la parte negativa de su molécula (o a la inversa, rodear el ion cristalino de carga negativa con la parte de carga positiva en la molécula, aislando por tanto a este ion de los que le rodean y neutralizando las fuerzas de atracción que mantienen la integridad de la estructura cristalina. El ion, rodeado (o hidratado) con moléculas de agua puede dejar el retículo cristalino y desplazarse hacia la solución transformándose en un ion disuelto.

El agua disuelve cierta cantidad (pequeña o grande) de casi todos los sólidos o gases con los que se pone en contacto. En el ciclo global del agua sobre la tierra (el ciclo hidrológico), el agua establece contacto con los gases en la atmósfera (incluyendo contaminantes del aire y emanaciones volcánicas) y los minerales que hay en los primeros kilómetros de la corteza terrestre. En menor escala, el agua circula en sistemas construidos por el hombre (conductos y tuberías hechas de materiales sintéticos como el concreto y de metales refinados como el Hierro y el Cobre). En estos sistemas el agua actúa como disolvente y da lugar a fenómenos generales como la corrosión o incrustación.

1.3. COMPOSICION DEL AGUA (1c).

La composición general de los diversos tipos de agua en el planeta tierra puede estudiarse mejor dentro de el marco de

referencia del ciclo hidrológico. De la cantidad total del agua sobre la tierra, a los océanos les corresponden el 97.13%. a los casquetes polares y glaciares el 2.24%; al agua subterránea el 0.61% y a ríos, lagos, y corrientes solo les corresponden el 0.02% del total.

De los océanos, el agua se evapora y es transportada sobre las masas territoriales, donde se puede depositar por una u otra forma de precipitación (lluvia, nieve, granizo, etc.). Durante su paso del océano a la superficie terrestre el agua atraviesa la parte inferior de la atmósfera. Debido a esto tiene la posibilidad de equilibrarse con los gases en la atmósfera. Es necesario darse cuenta de que la composición promedio de la atmósfera terrestre esta sujeta a variaciones considerables, especialmente en los niveles de ciertos constituyentes menores como son CO_2 , CO , SO_2 , NO_x , etc., que son productos de los procesos de combustión y están asociados con la contaminación atmosférica que hay en las comunidades urbano-industriales. Los principales constituyentes atmosféricos, N_2 y O_2 , son ambos ligeramente solubles en agua (17.5 y 39.3 mg/kg, respectivamente, a 25°C)* pero algunos de los constituyentes menores, por ejemplo, CO_2 y SO_2 , son muy solubles (1,450 y 94,100 mg/kg, respectivamente, a 25°C). La composición de la precipitación es muy variable y los

*La solubilidad del gas está expresada como el peso del gas (mg) disuelto en 1 kg de agua a una presión total (presión parcial del gas indicado más la presión de vapor del agua a 25°C) de 760 mmHg (760 Torr ó 1 atm).

contaminantes atmosféricos influyen considerablemente sobre ella. La precipitación cerca de los océanos contienen más SO_4^{2-} , Cl^- , Na^+ y Mg^{2+} que la precipitación que cae en el interior de una gran extensión de tierra. La lluvia y la nieve que se generan en una atmósfera que contiene altas concentraciones de SO_2 producido por combustión puede ser muy ácida. Sin embargo, el agua lluvia es sin duda una solución muy diluida de sales disueltas que indica la notable eficiencia del proceso de destilación natural que resulta con la producción de agua potable a partir de agua de mar.

Durante la precipitación pluvial, el agua cae sobre la superficie de la tierra y establece contacto con rocas, sedimentos y el suelo, así como con los habitantes, animales y vegetales de la superficie terrestre. Se llevan a cabo reacciones químicas que modifican aún mas la composición del agua. Estas reacciones se pueden considerar en términos generales como una titulación ácido-base, global gigantesca en donde los ácidos del agua lluvia (CO_2 , SO_2 y NO_x) neutralizan las bases de las rocas. Como la composición de la superficie terrestre y el grado de actividad biológica así como su naturaleza (incluyendo la actividad del hombre) varían de un lugar a otro, se puede esperar que de estas reacciones se produzcan aguas de muy diversas composiciones. El tiempo y el grado de contacto entre el agua y las rocas también influyen sobre la composición de la solución. Las aguas superficiales que se originan en cuencas donde las rocas principales son

graníticas contienen muy pequeñas cantidades de materiales disueltos, no más de aproximadamente 30 mg/L. Otro tipo general de aguas superficiales tienen su origen en cuencas distintas a las graníticas (como los lagos) y contienen mayores cantidades de materiales disueltos.

Las aguas subterráneas en general tienen concentraciones de material disuelto superiores a las de las superficiales. Esto se debe al estrecho contacto entre el agua cargada de CO_2 con las rocas y tierra en el suelo así como al tiempo de contacto para la disolución. Además, puede agregarse CO_2 al agua en el suelo por la actividad de microorganismos. Sobre la superficie de la tierra los ácidos de la atmósfera precipitados por la lluvia atacan las bases de las rocas y producen una agua que contienen minerales disueltos. La disolución de estos minerales de las rocas hacen que estas se degraden y finalmente que formen minerales arcillosos. De las rocas se extraen cationes como Potasio (K^+), Sodio (Na^+), Calcio (Ca^{2+}) y Magnesio (Mg^{2+}) además de Sílice (SiO_2) dejando un mineral arcilloso que es menos rico en estos minerales que la roca de donde proviene. Estas partículas de minerales arcillosos pueden ser lavadas por los ríos junto con las sales disueltas y transportadas hacia el océano.

Ahora considérese que la tierra está habitada por plantas y animales. Sus actividades son importantes para alterar la composición de las aguas naturales en todas las etapas del ciclo hidrológico. Ya se vio que las actividades industriales

del hombre pueden incrementar la acidez de la atmósfera y del agua que establece contacto con ella a través de la precipitación. Este incremento en la actividad puede disolver más minerales de los que sería posible en aire no contaminado. Las actividades del hombre pueden influir en la calidad del agua en muy diversas formas incluyendo la descarga de desechos municipales, industriales y agrícolas a las aguas superficiales y subterráneas. Los desechos domésticos aumentan el contenido de materia mineral y orgánica de las aguas naturales. Los componentes individuales que forman estos minerales disueltos no están presentes en la misma relación que sería de esperarse por la mera disolución de rocas. El agua de desecho tanto de la industria como de fuentes agrícolas y domésticas contiene una gran variedad de compuestos orgánicos. El impacto de estos materiales orgánicos de los drenajes sobre la calidad del agua natural tiene muy diversas formas. Los componentes orgánicos biodegradables pueden eliminarse en una planta de tratamiento de desechos o ser degradados por la flora y la fauna naturales del agua. Los materiales tóxicos (tanto inorgánicos como orgánicos) pueden modificar o eliminar los procesos biológicos que se llevan a cabo en el agua natural. Los orgánicos de origen industrial pueden causar sabores y olores, o bien pueden tener efectos indeseables sobre la salud si no se les elimina durante la purificación para obtener agua potable. Los componentes orgánicos de todo tipo pueden reaccionar con los productos

químicos en el tratamiento del agua y así producir nuevos compuestos orgánicos con efectos indeseables. Las aguas naturales en si nunca están libres de organismos. Aún el agua tratada por desinfección para el suministro público contiene microorganismos. La importancia de éstos en el agua natural se relaciona con los tipos de transformaciones químicas que catalizan. Estas actividades se pueden dividir en dos tipos: aquellas que proporcionan energía utilizable para el organismo (catabolismo) y el otro tipo en el que el organismo gasta energía (anabolismo).

Por ejemplo, la fotosíntesis es la reacción en la que los organismos utilizan la energía radiante (luz solar) para impulsar una reacción de oxidación-reducción en la que el Dióxido de Carbono (CO_2) se reduce a materia orgánica mediante el agua y con producción de Oxígeno. Esta reacción es de importancia fundamental en los sistemas naturales porque su verificación dicta que el sistema acuático no se puede tratar como un sistema cerrado. La fotosíntesis utiliza una fuente externa (no química) de energía para impulsar una reacción que energéticamente es imposible en un sistema cerrado. La fotosíntesis es en último término responsable de la mayoría de la materia orgánica presente en la tierra y en las aguas naturales y como muchas otras reacciones biológicas influye sobre la calidad del agua.

La discusión anterior proporciona una visión general de las interacciones entre aire, tierra y agua involucradas en el

llamado ciclo hidrológico. Sin embargo, resulta conveniente abordar con un poco más de detalle el tema de los contaminantes o impurezas de origen inorgánicos disueltas en las aguas naturales.

1.3.1 SUSTANCIAS MINERALES DISUELTAS EN EL AGUA.

Como se ha visto anteriormente todas las aguas naturales contienen una gran variedad de contaminantes que de una manera general se pueden clasificar en: 1) Sustancias minerales disueltas; 2) Gases disueltos; 3) Turbidez y sedimentos; 4) Color y materia orgánica; 5) Sabores y olores; y 6) Microorganismos (2a).

En esta sección se describirán las sustancias minerales disueltas en el agua que son de mayor interés para el proceso de desmineralización total por medio de intercambio iónico, así como la forma de expresar las concentraciones de estos minerales dentro de la terminología del tratamiento de aguas.

Para comprender mejor la naturaleza de las sustancias minerales disueltas debe partirse de la base de que todas las aguas naturales son soluciones diluidas* de sales minerales que el agua ha disuelto al ponerse en contacto con materiales que las contienen; y del principio de que todas las soluciones deben de ser eléctricamente neutras. Este principio se conoce con el nombre de "Ley de la Electroneutralidad" y puede defi-

*El concepto de agua diluida se refiere a aguas cuyo contenido de sales disueltas no se compara con el agua de mar, fuentes de aguas geotérmicas, etc.

nirse de la siguiente manera:

Los iones de una carga (positiva o negativa) no se pueden agregar a una solución, formarse en ella, o eliminarse de la misma sin que haya una adición, formación o eliminación de un número igual de iones de carga opuesta. En una solución el número de cargas positivas debe ser igual al número de cargas negativas (1d).

Por definición un ion puede ser un átomo que posee una carga eléctrica ya sea positiva o negativa, o bien un grupo de átomos unidos que en su conjunto posean una carga eléctrica ya sea positiva o negativa. Comúnmente a un grupo de átomos que en su conjunto presenten una carga eléctrica se le conoce con el nombre de radical. A los iones cargados negativamente se les llama "aniones" y los que tienen carga positiva se les conoce como "cationes". Otro concepto que está íntimamente relacionado con los iones es el de "La Valencia".

Formalmente, se define la valencia como "el número de iones de Hidrógeno o iones Oxhidrilo con los cuales otro átomo o grupo de átomos reaccionará". Una interpretación, y definición más simple es como sigue: "Valencia es el poder de combinación de cationes y aniones" (3a).

Para los propósitos de este trabajo se entenderá como valencia el número de cargas eléctricas que posee un ion. Por ejemplo, el Calcio cuando se encuentra en solución presenta una carga eléctrica de +2 por lo que se dice que es un catión con valencia igual a 2, o que es un ion divalente positivo. El

ion Cloruro (Cl^-), es un anión monovalente puesto que su carga eléctrica es menos 1 de esta manera se tendrán iones (cationes y aniones) monovalentes, divalentes, trivalentes, etc. Estos conceptos son de mucha utilidad al momento de expresar la concentración de los diferentes iones en una solución, así como en la identificación de las sales minerales disueltas que le dieron origen.

En todas las aguas naturales, los iones disueltos que normalmente se encuentran en mayor abundancia son los que se muestran en la tabla 1-1.

TABLA 1-1. IONES MAS ABUNDANTES EN SUMINISTROS DE AGUAS NATURALES (3f).

Cationes	Valencia	Símbolo	Aniones	Valencia	Símbolo
Calcio	+2	Ca^{2+}	Carbonatos	-2	CO_3^{2-}
Magnesio	+2	Mg^{2+}	Bicarbonatos	-1	HCO_3^-
Sodio	+1	Na^+	Sulfatos	-2	SO_4^{2-}
Potasio	+1	K^+	Cloruros	-1	Cl^-

Además de las sustancias descritas en la tabla 1-1, otras que se encuentran en las aguas naturales incluyen la Sílice (SiO_2), Hierro (Fe), Manganeseo (Mn), Nitratos (NO_3^-), Fluoruros (F^-), etc. El Potasio comúnmente se encuentra en concentraciones más bajas que las del Sodio, pero sus compuestos presentan propiedades físico-químicas muy similares

a los minerales de este ultimo. El Hierro se encuentra presente en muchos suministros de agua en cantidades relativamente pequeñas, si se encuentra en cantidades de 0.1 mg Fe/L o menos es considerado como despreciable para muchos usos industriales; pero si se encuentra en cantidades mayores de 0.3 mg Fe/L generalmente es muy objetable. El Manganeseo también se encuentra en cantidades pequeñas, pero por ser más dañino que el Hierro sus tolerancias para usos especiales son menores (0.1 mg Mn/L). Los Nitratos generalmente sólo se presentan como trazas o están ausentes, pero de esto hay excepciones y pueden encontrarse cantidades considerables*. Los Fluoruros pueden encontrarse en cantidades desde menos de 1 mg F/L hasta 8 mg F/L y son importantes desde el punto de vista de la salud pero de poca importancia para la mayoría de industrias. En cuanto a la Sílice, ésta se encuentra en estado de alta pureza en el cuarzo y en varias arenas. Es también un constituyente principal del granito, Feldespato, Arcilla, y otros minerales. Se le encuentra prácticamente en todas las aguas naturales en cantidades que varían desde menos de 1 mg SiO₂/L hasta más de 100 mg SiO₂/L. (2c).

1.4. FORMAS DE EXPRESAR LA CONCENTRACION (1e).

Para los fines del tratamiento de aguas, y los de este

*En El Salvador, debido al amplio uso de abonos nitrogenados para fines agrícolas, los niveles de Nitratos en muchas fuentes de agua alcanzan valores considerables y por ello se consideran importantes en este trabajo.

trabajo, los métodos más adecuados para expresar la concentración son: la concentración en masa y la concentración normal.

Hay dos formas básicas de expresar la concentración en masa de las especies disueltas (solutos o sustancias minerales) en solución. La primera es especificar la concentración en unidades de masa de soluto en un volumen unitario de solución; la llamada "base peso/volumen (p/v)". La segunda es una base peso/peso (p/p), o sea, el peso de soluto en un peso determinado de solución. Las unidades mg/L y ppm (partes por millón) son, las unidades p/v y p/p que más a menudo se emplean para expresar la concentración de diversos materiales tanto en agua natural como en aguas de desecho. Ambos métodos pueden interconvertirse si se conoce la densidad de la solución.

Si la densidad de la solución es la unidad, estos dos métodos de expresar la concentración son idénticos, o sea,

$$\text{miligramos/Litro} , (\text{mg/L}) = \frac{\text{Masa de sustancia}(\text{mg})}{\text{Volumen de solución}(\text{L})} \quad (1.1)$$

$$\text{ppm} = \frac{\text{Masa de sustancia}(\text{mg})}{\text{Masa de solución}(\text{Kg})} \quad (1.2)$$

$$\text{Densidad, } (\rho) = \frac{\text{Masa de solución}(\text{Kg})}{\text{Volumen de solución}(\text{L})} \quad (1.3)$$

Entonces :

En ambos tipos de expresiones de concentración el componente de la masa del término de la concentración puede adoptar diversas formas. La más simple es cuando se expresa los componentes específicos de una solución en términos de los componentes mismos (concentraciones expresadas "como tal"). Una forma más complicada es cuando se expresa la concentración de cada constituyente en términos de otra sustancia diferente. Un sistema muy difundido (y de mucha utilidad) es expresar las concentraciones como Carbonato de Calcio (CaCO₃). Para poder aplicar este método es necesario conocer los conceptos de peso equivalente y concentración normal.

La expresión de soluto como equivalente/litro, o sea, equivalente y concentración normal.

Para las aguas de desecho y la mayoría de las aguas naturales (a excepción de agua del mar y las salmueras), puede hacerse la suposición de que la densidad de la solución es igual a 1, de manera que mg/L y ppm son equivalentes. Sin duda, estas concentraciones unitarias se utilizan en la práctica de forma indiferente.

$$\begin{aligned}
 & \text{y si } \rho = 1 \text{ Kg/L :} \\
 & \text{mg/Kg} = \text{mg/L} \quad (1.6) \\
 & \text{ppm} = \text{mg/L} \quad (1.7) \\
 & \text{ppm(mg/Kg)} = (\text{mg/L}) \times (\text{L/Kg}) \quad (1.5) \\
 & \text{ppm(mg/Kg)} = (\text{mg/L}) \times (1/\rho) \quad (1.4)
 \end{aligned}$$

concentración normal, se basa en una definición que se relaciona con el tipo de reacción en que interviene el constituyente de la solución. La ventaja de utilizar normalidad es que cuando dos sustancias reaccionan para producir otras, el número de equivalentes de cada especie reaccionante es igual al número de equivalentes de producto. Esta forma de expresar concentraciones requiere del conocimiento de la reacción que se considera. Puede haber casos en que una sola sustancia tenga dos distintos pesos equivalentes a causa de su intervención en dos diferentes tipos de reacción.

Por definición la normalidad de una solución es el número de pesos equivalentes-gramo de una sustancia disueltos en un litro de solución, es decir :

$$N = \frac{\text{Nº Pesos Equivalentes-gramo de sustancia}}{\text{Litro de solución}} \quad (1.8)$$

en donde :

$$\text{Nº pesos equivalentes-gramo} = \frac{\text{gramos de sustancia}}{\text{Peso equivalente-gramo de la sustancia}} \quad (1.9)$$

El peso equivalente-gramo de una sustancia puede establecerse de diferentes maneras. En la química del agua y de las aguas residuales por lo común se encuentran tres métodos de definición del peso equivalente. Estos se basan en:

(1) La carga de un ion (o su valencia), (2) el número de protones o iones Oxhidrilos transferidos en una reacción ácido-base, (3) El número de electrones transferidos en una reacción de oxidación-reducción. De estos, los dos primeros son los importantes para definir la concentración como CaCO_3 y por lo tanto es necesaria su definición.

1. Peso equivalente basado en la carga del ion. En este caso se tiene que:

$$\text{Peso equivalente-gramo} = \frac{\text{Peso molecular (o atómico) del ion (en gramos)}}{\text{Carga del ion}} \quad (1.10)$$

Los equivalente/Litro (eq/L) de las unidades de carga iónica son útiles para verificar la exactitud de los análisis de agua. Para satisfacer la ley de electroneutralidad, el número total de equivalentes/Litro de los iones de carga positiva (o sea, la cantidad total de carga positiva) debe ser igual al número total de equivalentes/Litro de los iones de carga negativa (cantidad total de carga negativa).

2. Peso equivalente basado en reacciones ácido-base. El peso equivalente de una sustancia en las reacciones ácido-base se define como "el peso de una sustancia que reemplace un ion Hidrógeno (H^+) en un ácido, proporcione un H^+ para la reacción, o reaccione con un H^+ para formar un ácido". Otra

forma de enunciar la misma definición es "el peso de una sustancia que sustituya un ion Oxhidrilo (OH^-) de una base, proporcione un OH^- para una reacción, o reaccione con un OH^- para formar una base".

Generalizando se puede escribir:

$$\text{Peso equivalente-gramo} = \frac{\text{Peso molecular de la sustancia (en gramos)}}{n} \quad (1.11)$$

donde n: es el número de H^+ u OH^- que reaccionan.

Ahora es posible calcular la concentración de cualquier sustancia en términos del CaCO_3 siempre que el peso equivalente de la sustancia así como el del CaCO_3 estén correctamente definidos. En lo que corresponde a este trabajo se tomará como peso equivalente del CaCO_3 el valor de 50.045 y para las demás sustancias se definirá su peso equivalente en función de la carga del ion y de acuerdo a la reacción ácido-base en que participe. Debe decirse que existen muchas formas posibles de cálculos químicos para llegar a expresar las concentraciones como CaCO_3 ; sin embargo, comúnmente se partirá de la concentración de las especies disueltas expresadas en ppm (mg/L) como tal y que luego deben expresarse como CaCO_3 . Si este es el caso, el cálculo se realiza de la siguiente manera:

$$\text{ppm como CaCO}_3 = \text{ppm sustancia como tal} \times \frac{\text{mili-equivalente sustancia}}{\text{mg de sustancia (que tiene un mili-equivalente)}} \times \frac{50.045 \text{ mg de CaCO}_3}{1 \text{ mili-equivalente de CaCO}_3} \quad (1.12)$$

En donde las ppm de sustancia pueden estar en mg/kg ó como es más usual, en mg/L (para soluciones diluidas).

Por ejemplo, si de un análisis de agua se obtiene una concentración de 60 mg/L (ppm) de Cloruros (expresado como Cl); para determinar su concentración equivalente como CaCO_3 se aplica la ecuación (1.12) de la siguiente manera:

$$\text{ppm como } \text{CaCO}_3 = \frac{60 \text{ mg Cl}^-}{\text{L}} \times \frac{1 \text{ mili-equivalente}}{35.45 \text{ mg Cl}^-} \times \frac{50.045 \text{ mg CaCO}_3}{1 \text{ mili-equivalente}}$$

$$\text{ppm como } \text{CaCO}_3 = 84.70 \text{ mg CaCO}_3/\text{L}$$

Se observa además que en la ecuación (1.12) se hace uso de los miliequivalentes en lugar de los equivalentes. Esta sustitución es necesaria para que la ecuación sea dimensionalmente consistente y es posible realizarla considerando que :

$$\frac{\text{gramos de sustancia}}{1 \text{ equivalente de sustancia}} = \frac{\text{miligramos de sustancia}}{1 \text{ mili-equivalente de sustancia}}$$

También puede observarse de la ecuación (1.12) que el factor que traslada la concentración de la sustancia a su equivalente de Carbonato de Calcio es una relación entre los pesos equivalentes del CaCO_3 y de la sustancia. Para el ejemplo de los Cloruros este factor es igual a 1.41 (50.045/35.45). De forma similar se pueden calcular estos factores para muchas otras sustancias. En la tabla 1-2 se representan

los factores de conversión para aquellos elementos, radicales y compuestos de uso más común en la química del agua (3c). En ella, los pesos equivalentes han sido definidos en base a lo indicado anteriormente.

Antes de concluir con esta breve discusión sobre concentraciones se definirá un método que es de mucha más utilidad para el dimensionamiento de equipos de tratamiento de aguas tales como suavizadores y desmineralizadores. Se trata de los granos por galón (gpg) y se deriva de la siguiente manera (3d):

1.0 lb = 7,000 granos y el agua tiene un peso de 8.33 lb/galón por definición:

$$1.0 \text{ ppm} = \frac{1 \text{ lb sustancia}}{1000000 \text{ lb agua}} = \frac{7,000 \text{ granos sustancia}}{1,000,000 \text{ lb agua}} \times \frac{8.33 \text{ lb agua}}{1 \text{ galón agua}} \quad (1.13)$$

Entonces:

$$1.0 \text{ ppm} = 0.0583 \text{ granos/galón} \quad \text{y} \quad 1 \text{ gpg} = 17.15 \text{ ppm} \quad (1.14)$$

Adicionalmente veremos la importancia de la ley de electroneutralidad.

Esta ley además de ser útil en la resolución de problemas relacionados con el equilibrio químico, tiene una aplicación práctica importante en el análisis de la composición química del agua. Como todas las aguas deben de ser eléctricamente neutras, puede deducirse que un análisis de agua completo debe

TABLA 1-2: FACTORES DE CONVERSION PARA CALCULAR EL EQUIVALENTE DE CARBONATO DE CALCIO DE DIVERSAS SUSTANCIA (3c).

PARA ENCONTRAR EL EQUIVALENTE DE CaCO_3 DE:	MULTIPLIQUE POR:	PARA ENCONTRAR EL EQUIVALENTE DE CaCO_3 DE:	MULTIPLIQUE POR:
Al^{3+}	5.560	Na_2CO_3	0.944
$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$	0.500	NaCl	0.856
$\text{Al}(\text{OH})_3$	1.920	Na_2SO_4	0.705
Ca^{2+}	2.500	NaNO_3	0.588
CaO	1.790	K^+	1.28
$\text{Ca}(\text{OH})_2$	1.350	K_2O	1.06
$\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$	0.617	KOH	0.89
CaCO_3	1.000	KHCO_3	0.499
CaCl_2	0.902	K_2CO_3	0.724
CaSO_4	0.735	KCl	0.67
$\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$	0.610	K_2SO_4	0.574
Mg^{2+}	4.120	KNO_3	0.495
MgO	2.480	OH^-	2.94
$\text{Mg}(\text{OH})_2$	1.720	CO_3^{2-}	1.667
$\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$	0.684	HCO_3^-	0.820
MgCO_3	1.190	Cl^-	1.41
MgCl_2	1.050	SO_4^{2-}	1.04
MgSO_4	0.831	SO_3^-	1.25
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	0.674	SO_2^-	1.56
Na^+	2.170	NO_3^-	0.805
Na_2O	1.610	H_2SO_4	1.02
NaHCO_3	0.596	HCl	1.37
CO_2	2.270	SiO_2	1.67

dar un resultado en donde el número total de cargas positivas sea igual al número total de cargas negativas de los iones presentes (1f), en base a la teoría.

Matemáticamente la ley de electroneutralidad puede expresarse como sigue:

$$\Sigma (\text{de cationes}) = \Sigma (\text{de aniones}) \quad (1.15)$$

Sin embargo, para fines de un análisis de agua (y debido a los errores en dicho análisis) resulta de mayor interés hacer uso de la expresión anterior para calcular el porcentaje de diferencia que se define de la siguiente forma (4a):

$$\%Dif. = \frac{\Sigma(\text{cationes}) - \Sigma(\text{aniones})}{\Sigma(\text{cationes}) + \Sigma(\text{aniones})} \times 100 \quad (1.16)$$

En un análisis aceptable de agua, esta expresión se aplica de acuerdo a los criterios mostrados en la tabla 1-3.

TABLA 1-3: CRITERIOS DE ACEPTACION PARA UN ANALISIS DE AGUA EN BASE AL PORCENTAJE DE DIFERENCIA (4a).

Suma de Aniones			% Diferencia Aceptable
ppm CaCO ₃	gpg CaCO ₃	(meq/L)	
0 - 150	0 - 9	0 - 3	± 0.2
150 - 500	9 - 29	3 - 10	± 2.0
1000 - 40036	58 - 2334	20 - 800	± 2.0 - 5.0

Visto de forma más práctica, la ecuación (1.16) tiene una concordancia de \pm (2-5)% si se trata de aguas residuales o agua de mar y de \pm 2% en análisis de aguas comunes. Una desviación mayor a estos valores indica errores en el análisis o alguna omisión en las especies analizadas (1g), de \pm 0.2 para aguas desmineralizadas.

Debe observarse que la ley de electroneutralidad y el % diferencia se cumplen siempre que las concentraciones se expresan en una base común.

Tal es el caso de las ppm CaCO_3 , gpg CaCO_3 , equivalentes/Litro (eq/L), meq/L o equivalentes por millón (epm)*.

1.5 CALIDAD DEL AGUA.

No es cuantitativamente simple describir el término "calidad del agua". En la práctica, la calidad de un recurso de agua es determinada por mediciones de varias características físicas, químicas, y/o biológicas. Los resultados de las mediciones usualmente son comparados con estándares o criterios de calidad del agua en orden a juzgar la adecuación del agua. Hay varias series diferentes de criterios, dependiendo del uso esperado del agua; un agua que satisface los criterios para un uso particular no necesariamente cumplirá los criterios para otros usos (3e).

Además dado que en cualquier proceso de tratamiento de aguas la materia prima es agua, y el producto también lo es;

*1 epm = 1 meq/L para soluciones diluidas (densidad = 1)

al hablar de calidad del agua debe definirse si se está haciendo referencia a las condiciones iniciales o finales del proceso. De esta manera se tendrá una calidad inicial del agua y una calidad del agua producto.

1.5.1 CALIDAD INICIAL DEL AGUA.

De manera general puede decirse que la calidad inicial de una fuente de agua particular está definida por el conjunto de impurezas orgánicas e inorgánicas, que ésta tenga. De lo discutido en las secciones anteriores puede concluirse que la cantidad de impurezas en el agua depende de factores geográficos, geológicos, contaminación industrial, etc.; y por lo tanto, las características (o la calidad) del agua varían de un lugar a otro. Debido a esto, no es posible establecer parámetros de la calidad inicial de las diferentes fuentes de agua natural; más bien lo que se hace en la práctica, es reportar las características del agua que sean más importantes para un proceso industrial o de tratamiento en particular. Por ejemplo, para poder especificar un sistema de desmineralización total por medio de resinas de intercambio iónico (que es el objetivo de este trabajo), es necesario analizar y reportar las características que se muestran en la tabla 1-4.

También puede observarse de la tabla 1-4 que la alcalinidad de Carbonatos esta definida por la presencia de iones Carbonato y Bicarbonato. Sin embargo, los iones Carbonato (CO_3^{2-}) sólo se encuentran en algunas aguas superficiales y

TABLA 1-4: CARACTERISTICAS QUE COMUNMENTE SE REQUIERE ANALIZAR EN EL AGUA PARA ESTABLECER SU ADECUABILIDAD EN UN USO INDUSTRIAL DETERMINADO (2b).

Nombre de la especie	Fórmula	Expresado como	Nombre común
Calcio	Ca^{2+}	CaCO_3	Dureza de Calcio
Magnesio	Mg^{2+}	CaCO_3	Dureza de Magnesio
Sodio	Na^+	CaCO_3	
Potasio	K^+	CaCO_3	
Hidróxido	OH^-	CaCO_3	Alcalinidad Caústica
Carbonato	CO_3^{2-}	CaCO_3	Alcal. de Carbonato
Bicarbonato	HCO_3^-	CaCO_3	Alcal. de Carbonato
Cloruro	Cl^-	CaCO_3	
Sulfato	SO_4^{2-}	CaCO_3	
Nitrato	NO_3^-	CaCO_3	
Sílice	SiO_2	CaCO_3	
Dióxido de Carbono	CO_2	CaCO_3	
pH	--	Unidades	
Hierro	Fe	Fe	
Manganeso	Mn	Mn	
Temperatura	T	°C	

NOTA: Las propiedades enmarcadas en la primera parte de la tabla 1-4 son las más importantes para el dimensionamiento de un equipo desmineralizador dado que son los más abundantes en cualquier agua natural o contaminada. Esta tabla define los análisis necesarios para la realización de cálculos en secciones posteriores.

subterráneas en cantidades reducidas; cantidades objetables se encuentran en las llamadas aguas alcalinas. De esta manera, la alcalinidad de Carbonatos comúnmente esta definida por la presencia de iones Bicarbonatos (HCO_3^-). Por su parte la alcalinidad cáustica debida a la presencia de iones (OH^-) no se encuentra más que en aguas tratadas o contaminadas (2b).

1.5.2 CALIDAD DEL AGUA PRODUCTO.

La calidad del agua producto depende específicamente del uso final que el agua va a tener. En el caso que se está tratando el agua producto se utilizará para los diferentes usos en un laboratorio. Es decir, para la preparación de reactivos, para la realización de análisis químico, para lavar material de vidrio, etc. Aquí, uno de los aspectos más importantes es la preparación de la llamada "agua grado reactivo" o "agua calidad reactivo".

La norma 1080 presentada por The Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (4b), define los diferentes tipos de agua calidad reactivo para usos en el laboratorio. De acuerdo a esta norma el agua grado reactivo cubre un rango desde el tipo I con concentraciones no detectables de los compuestos o elementos a ser analizados, en el límite de detección de los métodos analíticos hasta el tipo III que se utiliza para lavar materiales de vidrio y para análisis cualitativo como se muestra en la tabla 1-5 (tabla 1080:I de la norma presentada en el anexo A). El agua calidad reactivo

deberá estar libre de sustancias que interfieran con los métodos analíticos. La calidad del agua requerida esta directamente relacionada con el análisis que se este realizando o de acuerdo al uso que se le dará.

TABLA 1-5. ESPECIFICACIONES DEL AGUA GRADO REACTIVO PARA DIFERENTES USOS EN EL LABORATORIO (4a).

Parámetro de calidad	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Bacterias, UFC/ml	10	1000	NA
pH	NA	NA	5-8
Resistividad, megaohms-cm a 25°C	> 10	> 1	0.1
Conductividad, μ mos/cm a 25°C	< 0.1	1	10
SiO ₂ , mg/L	< 0.05	< 0.1	< 1
Solidos Totales Disueltos, mg/L	0.1	1	5
Carbono orgánico total oxidable, mg/L	< 0.05	< 0.2	< 1

NA = No Aplicable

UFC = Unidades Formadoras de Colonias

De acuerdo a esta norma, los diferentes tipos de agua calidad reactivo pueden ser preparados por los siguientes métodos: destilación, osmosis inversa, intercambio iónico, y/o adsorción.

El agua reactivo tipo I es preparada típicamente primero por destilación, desionización (desmineralización), u osmosis inversa, seguida por un desmineralizador de lecho mixto. Su

uso es para métodos de prueba (análisis) que requieren un mínimo de interferencias y un máximo de precisión y exactitud (por ejemplo en análisis espectrofotométricos).

El agua tipo II es típicamente producida por destilación o desmineralización. Es utilizada en la preparación de reactivos, indicadores, etc.

El agua tipo III puede ser preparada por osmosis inversa o por desmineralización y puede usarse para lavar el material de vidrio, o como alimentación para la producción de agua con más alta calidad (por ejemplo a un proceso de destilación).

De los métodos recomendados por la norma 1080 para la producción de agua calidad reactivo, se ha seleccionado el de intercambio iónico para la realización de este trabajo. Se utilizarán mediciones de pH, Conductividad, Sílice (SiO_2), Cloruros (Cl^-), Dureza, etc., para evaluar la calidad físico-química final del agua producto.

CAPITULO II

EL INTERCAMBIO IONICO.

El proceso de intercambio iónico es un fenómeno natural que ocurre en suelos, minerales, y tejidos tanto de plantas como animales. En cada caso hay sitios activos (o grupos de sitios) que participan en las reacciones de intercambio. El fenómeno fué utilizado por el hombre sin comprender el mecanismo involucrado hasta que en 1850 Thompson y Way, dos químicos agrícolas, lo reconocieron y caracterizaron. Luego, en 1858, Eichorn demostró que el intercambio iónico era un proceso reversible (5a).

2.1. PRINCIPIOS DEL INTERCAMBIO IONICO.

Un gran número de factores intervienen en el intercambio iónico, por lo cual es imposible dar una sola teoría completa y satisfactoria. Sin embargo, el estudio sistemático de diversos parámetros permite relacionar de forma interesante los fenómenos concernientes a las resinas con los aspectos fundamentales sobre soluciones y coloides. En la práctica, el intercambio iónico es un fenómeno dinámico, y su eficacia depende del tiempo de contacto entre la solución y la resina (6a).

Un estudio profundo de los factores involucrados en este fenómeno necesariamente nos llevaría a considerar los aspectos cinéticos y de equilibrio que puede ocurrir así como la complejidad matemática inherente a ellos. Sin embargo, el princi-

El interés de este trabajo se relaciona con los efectos globales del proceso, es decir, con lo que ocurre cuando se hace uso del intercambio iónico para la remoción de las sales minerales disueltas en el agua. Bajo esta óptica se abordará la presente sección con el objetivo de establecer algunos parámetros de interés práctico para la aplicación del intercambio iónico en lo que se refiere al proceso de desmineralización total mediante el uso de resinas sintéticas.

2.1.1. DEFINICION DE INTERCAMBIO IONICO.

Se da el nombre de "intercambio iónico" a la reacción de intercambio (de iones) entre dos fases no miscibles que puede observarse entre ciertos compuestos sólidos, o más raramente entre líquidos, y una solución iónica generalmente acuosa (6b). Si llamamos M y M' a dos iones diferentes, se puede escribir la siguiente reacción de intercambio (6a).



en donde:

RM y RM': son los resيناتos que consiste en la estructura orgánica polimérica (macro-ion) conteniendo al ion M antes de la reacción, y al ion M' después de la reacción.

AM' y AM : son los electrólitos antes y después de la reacción.

M y M' : son de signo contrario al macro-ion (resina

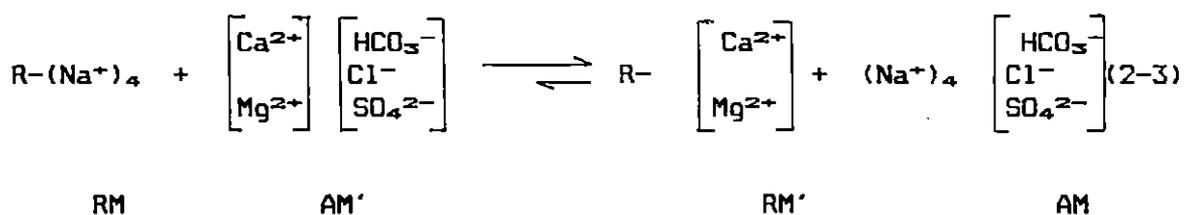
sintética) y se conocen con el nombre de contraiones.

A : que es del mismo signo del macro-ion se conoce con el nombre de co-ion.

La reacción (2-1) es válida tanto para el intercambio catiónico como el aniónico, por lo que de momento no es necesario escribir los símbolos químicos de los iones M y M'. También puede observarse que en la ecuación de la reacción no se han escrito coeficientes, lo que indica que los iones M y M' son monovalentes; sin embargo, es posible hacer modificaciones (cuando sea necesario) en función de las valencias Z y Z' de los iones.

La reacción de intercambio mostrada tiene por resultado la sustitución de un ion en disolución por otro introducido por un sólido al que se le llama "intercambiador" (resina). Por ejemplo, el proceso de suavización es completado cuando una resina catiónica en la forma de Sodio se pone en contacto con agua que contiene iones Calcio y Magnesio (Dureza). Los iones divalentes de Calcio y Magnesio se intercambian por el ion Sodio sobre la resina sólida, con los iones Sodio pasando adentro de la solución acuosa en lugar del calcio y magnesio, removiendo así la dureza y produciendo agua suave o suavizada.

La reacción puede ser representada como sigue (7a).



Notese que en la ilustración se muestra una ecuación balanceada con cuatro iones Sodio monovalentes sobre la resina que están siendo reemplazados con cada uno de los iones divalentes Calcio y Magnesio, y los iones resultantes en el agua serán iones positivos y negativos balanceados puesto que este es un requerimiento necesario en todas las reacciones de intercambio iónico (ley de electroneutralidad). Obviamente, el número de sitios de intercambio sobre la resina serán más de aquellos mostrados en la reacción del ejemplo; dado que ésta solo se ha usado para representar la reacción que toma lugar.

Notese también que el tamaño de las flechas muestran que la reacción se está verificando predominantemente de izquierda a derecha, pero existe una ligera tendencia de la reacción a revertirse a alcanzar un equilibrio. Por ejemplo, si el agua y la resina fueran colocadas en una jarra o beaker y se dejarán reposar, la reacción podría (después de un período de tiempo) alcanzar un equilibrio donde habría algo de Sodio sobre la resina y algo de Calcio y Magnesio en el agua.

Si el agua fuese empobrecida sobre una columna de resina (sostenida en un tubo o columna por una pantalla o platos porosos) y luego removida desde la base de la columna, entonces la reacción sería dirigida más hacia la derecha debido a que los productos de la reacción (en el lado derecho) serían removidos mientras se forman y habría poca fuerza guiadora para empujar el equilibrio hacia el lado izquierdo. También,

mientras el agua está pasando hacia abajo en la columna de resina, hay sodio sobre la resina en la base de la columna en tanto que el agua (que llega a esta sección) tiene cada vez menos y menos iones Calcio y Magnesio; de esta manera la fuerza guiadora (diferencia de concentración) podría inducir la reacción de izquierda a derecha hasta una extensión o grado de conversión aún mayor.

La primera condición descrita arriba con el agua y la resina colocadas en una jarra es llamada "condición estática", dado que el agua y la resina no están en movimiento una en relación a la otra. La segunda condición descrita con la resina en una columna y el agua corriendo a través de la resina es llamada "condición dinámica". La mayoría de operaciones comerciales de intercambio iónico son realizadas bajo condiciones dinámicas.

Hay un buen número de otras condiciones que afectan las reacciones de intercambio iónico y que tienen influencia sobre la dirección en la cual procederán las reacciones y en el grado de conversión obtenido. Algunas de estas se discuten a continuación.

2.1.2. FACTORES INFLUYENTES EN LAS REACCIONES DE INTERCAMBIO IÓNICO.

Todos los factores que afectan a las reacciones de intercambio iónico guardan una estrecha relación entre sí, y en mucho dependen de la naturaleza de una resina particular;

es decir, están asociados a las propiedades físicas y químicas de las resinas (7b).

Se ha observado que el intercambio iónico no es instantáneo, y necesita tiempo para ser completado, siendo desde algunos segundos hasta el infinito. Por ejemplo, un ion orgánico muy difícil de manejar como el Amonio Cuaternario: $(\text{CH}_3)_2\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_2\text{C}_6\text{H}_5\text{N}^+$, apenas es intercambiado hasta después de una semana de contacto con una resina sulfónica, mientras que el ion Sodio (Na^+) lo hace en un minuto (6a).

La velocidad del intercambio está determinada por dos fenómenos físicos de difusión:

- a) Difusión del contra-ion, a ser intercambiado (M'), desde la solución hasta el límite de la resina en forma de gel (hidratada).
- b) Difusión del contra-ion en la resina hasta el sitio de intercambio (sitio en el que se colocará).
- c) Y un fenómeno químico, la reacción de intercambio.

Simultáneamente el ion intercambiado que proviene de la resina (M) sigue un curso inverso, de manera que la carga eléctrica total de cada elemento de volumen deberá ser nula.

a) Difusión en la película (fase acuosa). La difusión en la fase acuosa es rápida y está ligada a la velocidad de desplazamiento del líquido o a la velocidad de agitación, según el montaje que se tenga para realizar el proceso.

Todo ocurre como si hubiese alrededor de la resina una película inmóvil de un cierto espesor, que depende de la agitación del líquido y a través de la cual la concentración varía rápidamente entre el valor de la solución y el de la resina; se estima que este espesor es del orden de 10 a 100 micrones. Este modo de razonar, introducido por NERNST, es clásico en el estudio de la difusión.

El cálculo exacto de la cinética del fenómeno de intercambio es casi imposible, pero no obstante se pueden hacer cierto número de previsiones.

La difusión en la película se debe considerar si hay indicios de que los cambios que afectan la película superficial modificaran la velocidad.

Estos cambios son, principalmente:

- a.1.El aumento de la agitación (o velocidad) del líquido disminuye el espesor de la película.
- a.2.El aumento de la concentración del contra-ion en la solución (M') aumenta igualmente la velocidad de difusión en la película pero tiene menos efecto sobre la difusión en la resina. En general, la importancia de la difusión en la película sobre la cinética del intercambio es predominante para las soluciones diluidas donde el gradiente de concentración es débil.
- a.3.Los cambios en el tamaño de la partícula de resina son importantes. Es evidente que cuando más pequeña es la partícula de resina más importante es la difusión

superficial y la difusión en gel, para un espesor de película constante.

En definitiva, es esta primera etapa la que rige la velocidad para las soluciones diluidas ($\leq 0.01 N$) y las resinas de fina granulometría en un medio poco agitado.

b) Difusión en el gel (resina hidratada). La difusión en el gel, o medio estructurado, es más difícil para los iones grandes que para los pequeños y menos rápida en las resinas muy reticuladas (con mayores porcentajes de Divinilbenceno).

Esto es particularmente claro con los iones orgánicos que poseen radios iónicos mayores y su difusión a través de la estructura de la resina se vuelve muy difícil o imposible. Así, la velocidad del intercambio de los iones monoatómicos polivalentes es más débil que la de los iones monoatómicos monovalentes debido a la mayor dificultad de los primeros en difundirse en el gel.

c) Reacción de intercambio. La reacción de intercambio, una vez que los iones están cerca del grupo funcional de interés (sitio de intercambio), es prácticamente instantánea; y no es ella en principio quien limita la velocidad.

De lo anterior puede observarse que los fenómenos de difusión son determinantes en la velocidad del intercambio iónico, y por ello es de mucha utilidad el conocimiento de los

coeficientes de difusión de los diferentes iones en una resina dada. Evidentemente la evaluación de dichos coeficientes implica el desarrollo de un enorme trabajo experimental y teórico que no es objetivo cubrir en este trabajo. Sin embargo algunos factores de mayor interés son los siguientes:

a. **Temperatura.** Generalmente, mientras más alta es la temperatura más rápida es la reacción. Sin embargo, la temperatura tiene una gran influencia sobre la solubilidad de algunas sustancias y, dependiendo de la dirección en que se desee que la reacción se verifique, puede haber un efecto indeseable.

b. **Tiempo de contacto.** Bajo condiciones estáticas la reacción de intercambio iónico procede rápidamente al principio y luego más lentamente, en la medida en que los iones intercambiables sobre la resina disminuyen hasta un verdadero punto de equilibrio (cuando la reacción se detiene), lo cual depende de los iones involucrados (en la resina y en la solución).

Bajo condiciones dinámicas el intercambio es conducido hasta su conclusión mientras el agua fluye a través de la columna, pero la extensión del intercambio también depende del tiempo de contacto entre la solución acuosa con la resina en la columna. Es decir, de los galones por minuto (gpm) por pie cúbico (pie³) de resina.

Dependiendo de los iones involucrados, hay un límite superior para la velocidad de flujo por unidad de volumen de resina para conseguir que ocurra el intercambio en una extensión aceptable.

c. Concentración. En la reacción ilustrada anteriormente (2-3), no hay indicio de la cantidad o concentración de cada sustancia involucrada, y esta es la información más importante necesaria para determinar si la reacción tomará lugar, y en que dirección y extensión ocurrirá. En otras palabras, el tamaño de las flechas de izquierda a derecha o de derecha a izquierda está determinado por la concentración de cada especie iónica en la reacción.

Otros factores que son determinantes en la reacción de intercambio iónico están íntimamente ligadas a las propiedades físicas y químicas de las resinas de intercambio iónico.

2.2. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LAS RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO.

Los intercambiadores iónicos actuales (resinas) son esencialmente los mismos desde la década de 1950, pero han venido sufriendo mejoras sobre todo en lo relativo a la capacidad de intercambio y las eficiencias de regeneración. En este mismo período también se ha profundizado el estudio teórico y experimental del fenómeno al grado que existen

teorías satisfactorias para explicarlo, en función de las propiedades físicas y químicas de un material de intercambio iónico particular.

Comercialmente existen en la actualidad un gran número de resinas de intercambio iónico fabricados por diversas compañías. Pueden encontrarse resinas de ácido y base fuertes, de ácido y base débiles, y resinas para usos especiales. Las resinas más resistentes son fabricadas de Estireno y Divinilbenceno (DVB).

En este trabajo son de principal interés las resinas catiónicas de ácido fuerte y las resinas aniónicas de base fuerte dado que el objetivo del mismo es construir un sistema para lograr la desmineralización total del agua. En las tablas 2-1 y 2-2 se presenta información relativa a diferentes marcas comerciales de estos tipos de resinas; y seguidamente se aborda el tema de las propiedades físicas y químicas de estos materiales.

TABLA 2-1. ALGUNOS TIPOS DE RESINAS CATIONICAS DE ACIDO FUERTE DISPONIBLES COMERCIALMENTE. (8a)

Matriz	Grupo iónico	Nombre comercial	Fabricante	Capacidad		Contenido de Humedad % peso	Temperatura máxima, °C	Rango de pH	Forma física	Observaciones
				meq/g resina seca	meq/ml lecho resina					
Resinas de Poliestireno	-SO ₃ ⁻	Amberlite IR-120	Rohm and Haas Co.	4.3-5	1.9	44-48	120	0-14	perlas esféricas	Resina estándar, aprox. 8% DVB
		Amberlite IR-122	Rohm and Haas Co.	4.3-5	2.1	40-44	120	0-14	perlas esféricas	Aprox. 10% DVB, alta resistencia a oxidación
		Amberlite IR-124	Rohm and Haas Co.	4.3-5	2.1	37-41	120	0-14	perlas esféricas	Aprox. 12% DVB, alta resistencia a oxidación
		Amberlite 200	Rohm and Haas Co.	4.3	1.75	47-52	120	0-14	perlas esféricas	Más alta estabilidad mecánica y química
		Amberlite XE-100	Rohm and Haas Co.	4.9	1.2	58-65	120	0-14	perlas esféricas	Aprox. 4% DVB, baja capacidad
		Amberlyst 15	Rohm and Haas Co.	4.9	1.2	60-66	120	0-14	perlas esféricas	Resinas macroreticular
		Duolite C-20	Chemical process Co.	5.1	2.2	45-51	150	0-14	perlas esféricas	Resina estándar aprox. 8% DVB
		Duolite C-25	Chemical process Co.	5.1	1.7	55-62	120	0-14	perlas esféricas	Resina porosa
		Duolite C-27	Chemical process Co.	5.0	2.1	45-50	150	0-14	perla esféricas	Resina estándar aprox. 8% DVB
		Imac C-12	Activit, Holland	4.5	2.0	--	120	0-14	perlas esféricas	Resina estándar aprox. 8% DVB

DVB = Divinilbenceno.

TABLA 2-2. ALGUNOS TIPOS DE RESINAS ANIÓNICAS DE BASE FUERTE DISPONIBLES COMERCIALMENTE. (8b)

Matriz	Grupo iónico	Nombre comercial	Fabricante	Capacidad		Contenido de humedad % peso	Temperatura máxima, °C	Rango de pH	Forma física	Observaciones
				meq/g resina seca	meq/ml lecho resina					
Resinas de poliestireno	$-N(CH_3)_3^+$	Amberlite IRA-400	Rohm and Haas Co.	2.6	1.2	42-48	60	0-12	perlas esféricas	Resina estándar, aprox. 8% DVB
		Amberlite IRA-401	Rohm and Haas Co.	3.0	1.0	54-59	60	0-12	perlas esféricas	Resina porosa
		Amberlite IRA-425	Rohm and Haas Co.	3.0	1.3	50-53	60	0-12	perlas esféricas	Alta capacidad
		D-Acidite FF	Permutit Co. Ltd. Inglaterra	4.0	1.6	42-48	60	0-12	perlas esféricas	Resina estándar, 7-9% DVB
		Dowex 21K	Dow Chemical Co.	4.5	1.2	57	50	0-12	perlas esféricas	Estabilidad mecánica mejorada
		Duolite A-42	Chemical Process Co.	2.3	0.7	57	60	0-14	perlas esféricas	Resina porosa, baja capacidad
		Duolite 101D	Chemical Process Co.	4.2	1.4	57	60	0-14	perlas esféricas	Más porosa que la A-42
		Lewatit NP-500	Farbenfabriken Bayer, Alemania	4.0	1.2	55-60	70	1-14	perlas esféricas	Naturaleza del grupo iónico desconoc.
		Permutit ESB-26	Permutit A.G., Berlin, Alemania	3.3	1.3	60-65	70	1-14	perlas esféricas	Resina estándar con 8% DVB, más porosa
		Resanex H8L	Jos. Crosfield, Inglaterra	3.5	1.5	60-65	60	1-14	perlas esféricas	Resina estándar con 8% DVB, porosa

DVB = Divinilbenceno

En las tablas 2-1 y 2-2 se menciona la capacidad de las resinas. Esta es de fundamental importancia debido a que define la equivalencia entre las resinas de un mismo tipo.

De manera cuantitativa, las resinas de intercambio iónico son caracterizadas por su capacidad; la cual, de manera general se define como el número de contraiones presentes en una cantidad específica de resinas. Se pueden definir varios tipos de capacidad pero los de mayor utilidad práctica son la capacidad en peso y la capacidad en volumen (8d).

a. **Capacidad en Peso.** Resulta de dividir el número de contraiones entre la cantidad específica de resina seca cuando esta se encuentra completamente en la forma de Hidrógeno, H^+ , (para la resina catiónica) o en la forma de cloruros*, Cl^- , (para la resina aniónica). Se expresa en miliequivalentes por gramo de resina seca (meq/g).

b. **Capacidad en Volumen.** Se define como el número de contraiones por unidad de volumen de lecho empacado. Se expresa comúnmente en miliequivalentes por mililitro de resina húmeda (meq/mL) o en kilogramos de Carbonato de Calcio por pie cúbico de resina húmeda (Kgr $CaCO_3$ /pie³).

*La capacidad de los intercambiadores aniónicos se refiere a la forma de Cloruros (Cl^-) más que a la forma de Oxhidrilo (OH^-) debido a que el peso seco de la resina en forma de OH^- es más difícil de determinar (8d).

Dado que las resinas de intercambio iónico son sustancias electrolíticas sólidas, resulta casi imposible separar la discusión de propiedades físicas y químicas. Sin embargo, existen ciertos fenómenos físicos y químicos que están directamente relacionados con la estructura copolimérica de Estireno-Divinilbenceno de la resina que de alguna forma pueden ser estudiados por separado (5b).

2.2.1. PROPIEDADES FISICAS (5c).

Los fenómenos físicos inherentes a la naturaleza de la resina y asociados a su comportamiento durante el proceso de intercambio iónico son: la reticulación, la densidad, el hinchamiento, la resistencia al choque osmótico, la difusión, y la porosidad relativa. Adicionalmente, la caída de presión, que no depende de la estructura del copolímero es una propiedad física relacionada a la distribución del tamaño de partícula.

a.Reticulación. La polimerización del estireno produce largas cadenas lineales, cada una conteniendo un gran número de monómeros de Estireno. Sin ningún tratamiento adicional, el polímero formado es un sólido; sin embargo, aplicando sulfonación el producto final que se obtiene es soluble, dependiendo la solubilidad del grado de sulfonación. Este fenómeno ha sido aplicado industrialmente y existen varios, así llamados, "intercambiadores iónicos líquidos" disponi-

bles comercialmente. Sin embargo, la solubilidad no es práctica cuando se está tratando suministros de aguas. El uso de Divinilbenceno (DVB) como un copolímero en la suspensión de polimerización proporciona productos de intercambio iónico insolubles. La cantidad de Divinilbenceno utilizado puede variarse en un amplio rango. Los productos de intercambio iónico disponibles hoy en día están limitados aun rango de 2-16% en peso de Divinilbenceno. A las resinas con menos del 2% de DVB les falta fuerza mecánica para resistir los cambios de volumen que ocurren durante las operaciones a las que normalmente son sometidas. Arriba del 16% de DVB la estructura polimérica presenta alta resistencia mecánica pero la producción de estos materiales se vuelve difícil y costosa.

b.Densidad. Para un tipo de intercambiador iónico dado en una forma iónica conocida la densidad esta directamente relacionada al grado de reticulación (%DVB) como se muestra en la tabla 2-3 y en la figura 2.1.

c.Hinchamiento. Los grupos activos unidos a la matriz polimérica se hidratan cuando la resina es sumergida en agua. Por eso, la resina adsorbe agua cuando ésta pasa del estado seco al húmedo y la cantidad de agua adsorbida dependerá de la naturaleza del grupo iónico, del ion intercambiado en el grupo activo, y del grado de reticulación.

TABLA 2.3. EFECTO DE LA RETICULACION SOBRE LA DENSIDAD DE UNA RESINA CATIONICA FUERTEMENTE ACIDA (5c).

Reticulación (% p/p DVB)	Densidad (g/L)	
	Forma de sodio	Forma de hidrógeno
2	120	90
4	260	220
6	360	320
8	420	385
10	460	430
12	490	460
14	510	480
16	520	500

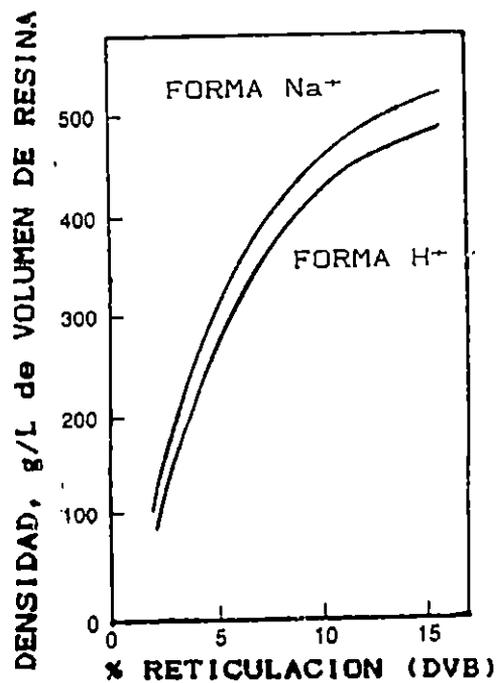


FIG. 2.1. DENSIDAD DE UNA RESINA CATIONICA FUERTEMENTE ÁCIDA COMO FUNCION DEL GRADO DE RETICULACION (5c).

d. Choque Osmótico y Fuerza Mecánica. La fuerza mecánica de un material de intercambio, como es de esperarse, está directamente relacionado con el grado de reticulación. Los buenos materiales de intercambio iónico se caracterizan por ser uniformemente esféricos, sin rajaduras internas,

aguas como efectos del "choque osmótico". Fenómeno es conocido en la industria del tratamiento de aplicación por lo que tiende a rajarse y quebrarse. Este cambio iónico se contrae y se hincha muchas veces durante su resina es regenerada. Como resultado, el material de intercambio durante las aplicaciones normales siempre que la agua. Cuando esto pasa, la resina se contrae. Este fenómeno competencia entre las resinas y la solución de sal por el es colocado en una solución concentrada de una sal, hay una Por el contrario, cuando un material de intercambio iónico sobre el hinchamiento de resinas catiónica y aniónica.

En la figura 2.2 se muestra el efecto de la reticulación el cual se considera una propiedad química). resinas esta íntimamente ligado al fenómeno de hidratación, misma forma iónica. (El fenómeno de hinchamiento de las extensión que las resinas con más alta reticulación en la resinas con baja reticulación se hincharán en una mayor que retiene el intercambiador disminuye. Debido a esto, A medida que la reticulación aumenta, la cantidad de agua

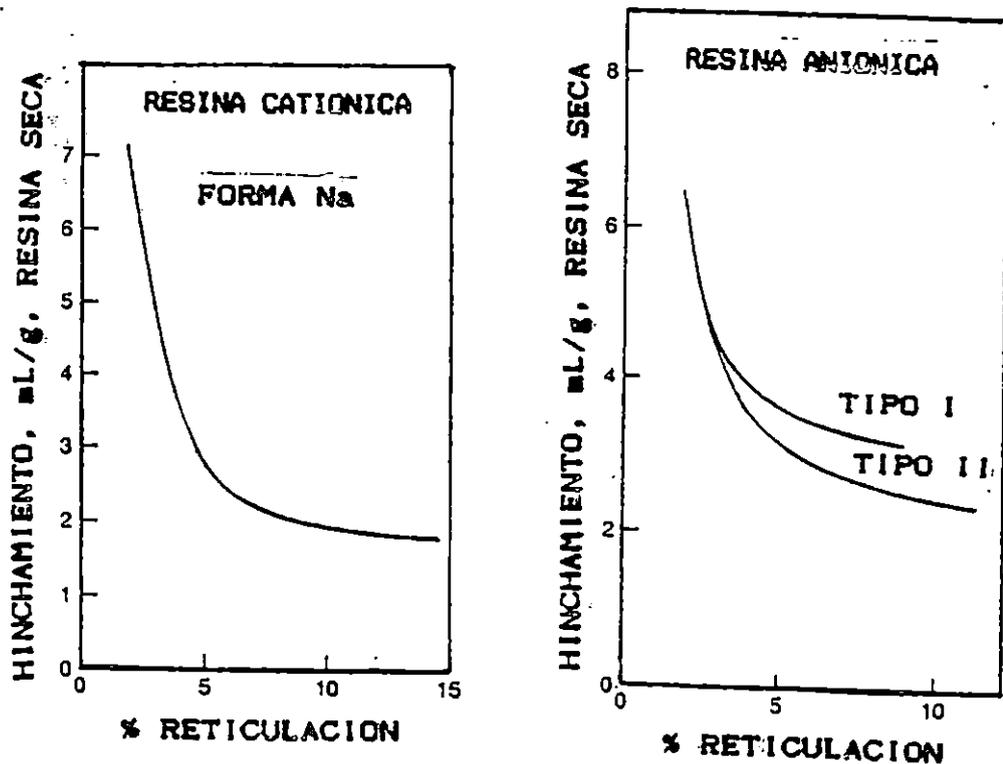


FIG. 2.2. HINCHAMIENTO DE RESINAS TIPO GEL, CATIONICA FUERTEMENTE ACIDA Y ANIONICA FUERTEMENTE BASICA, COMO UNA FUNCION DE LA RETICULACIÓN (5c).

resistentes a la compresión mecánica, y por ser no quebradizos. La resistencia al choque osmótico implica que un material de intercambio es lo suficientemente flexible para resistir miles de ciclos de operación, que involucran contracción e hinchamiento, sin desarrollar esfuerzos internos que tiendan a fracturar las perlas de resinas.

e. Difusión. Un ion, en orden a intercambiarse con un contra-ion en un sitio activo, debe difundirse a través de la capa

limite y la fase sólida (estructura copolimérica) hasta el punto en donde ocurre el intercambio. Por su parte, el contra-ion que queda libre debe difundirse en dirección opuesta hacia la fase acuosa externa para completar la reacción (ver sección 2.3.4). Esta difusión toma tiempo y es afectado por el tamaño de la perla, el grado de reticulación, etc.

f. Porosidad. La mayoría de los iones son relativamente pequeños (diámetros $< 10 \text{ \AA}$); sin embargo, algunos ácidos orgánicos naturales pueden tener pesos moleculares muy altos y se encontraran algunos que tengan tamaños mayores de 100 \AA . Estos grandes ácidos orgánicos se intercambian en las resinas aniónicas y, debido a su tamaño, son muy difíciles de remover por procesos normales de regeneración. Por esta razón, se han desarrollados materiales de intercambio iónico porosos para manejar estas condiciones de operación. Algunas de estas resinas tienen poros con diámetros mayores de $100,000 \text{ \AA}$.

2.2.2. PROPIEDADES QUIMICAS (5d).

Las propiedades químicas de la resina están relacionadas a la estructura de la matriz polimérica y a la naturaleza del grupo iónico unido a dicha matriz. Las principales propiedades químicas de un material de intercambio iónico, que afectan su desempeño y aplicación, son: la hidratación, equilibrio y

selectividad, y la ionización.

a.Hidratación. En todas las resinas de intercambio la ionización del grupo activo (o grupo iónico) depende de la presencia de agua en la matriz. En cambio, la cantidad de agua que absorberá el material de intercambio depende del grado de reticulación (o rigidez) del polímero. Esta dependencia se muestra en las tablas 2-4 y 2-5 para una resina catiónica de ácido fuerte, y dos resinas aniónica de base fuerte.

b.Ionización. En medio acuoso, las resinas de intercambio catiónicas de ácido fuerte y aniónicas de base fuerte están completamente hidratadas; y los iones asociados con el grupo activo están siempre libres para intercambiarse con los iones de igual carga que están presentes en la solución que está siendo tratada (agua cruda). El valor al cual la ionización se vuelve efectiva (valores de pK) en resinas catiónicas de ácido débil y aniónicas de base débil es diferente, como se muestra en la tabla 2-6.

En términos generales, la información mostrada en la tabla 2-6 indica que:

b.1.El intercambiador catiónico de ácido fuerte estará efectivamente ionizado a cualquier valor de pH mayor que 1.

b.2.El intercambiador aniónico de base fuerte estará efectivamente ionizado a cualquier valor de pH menor que 13.

TABLA 2-4. EFECTO DE LA RETICULACION SOBRE LA RETENCION DE AGUA EN RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO TIPO GEL (5d).

Retención de agua (en % peso)			
Reticulación (%peso DVB)	Catiónica de ácido fuerte	Aniónica de base fuerte (forma de Cl ⁻)	
	(forma de Na ⁺)	Tipo I	Tipo II
2	79	71	73
3	-	61	62
4	64	55	54
5	-	50	49
6	52	45	46
7	-	43	43
8	45	40	42
9	-	-	41
10	41	-	40
12	39	-	-
14	36	-	-
16	33	-	-
18	31	-	-
22	28	-	-

a. **Concentración del Acido Clorhídrico (HCl) (7i).** No existen cationes en un suministro de agua que formen precipitados insolubles cuando la resina se regenera con Acido Clorhídrico (como sucede cuando se usa Acido Sulfúrico). De este modo, concentraciones tan altas como 10% p/p pueden ser usadas. Sin embargo, la mejor concentración a ser utilizada dependerá del análisis del agua de alimentación así como del porcentaje de cationes divalente (Calcio y Magnesio) comparado al porcentaje de cationes monovalentes (Sodio y Potasio). Puesto que los cationes divalentes son retenidos mas fuertemente que los cationes monovalentes, mientras más alta es la concentración del Acido Clorhídrico, los primeros serán removidos más eficientemente. Por esta razón, resulta más adecuado el uso de HCl entre 8 y 10% p/p cuando las concentraciones de los cationes divalentes son altas; mientras que mejores capacidades serán obtenidas utilizando HCl del 2 al 5% p/p cuando las concentraciones de cationes monovalentes son altas. Un arreglo en la concentración del ácido puede hacerse con aguas de relaciones intermedias entre cationes divalentes y monovalentes. Además deberá considerarse el factor tiempo; puesto que con concentraciones más bajas, volúmenes más grandes de regenerantes deberán ser utilizados y habrá volúmenes mayores de desecho.

Con Acido Clorhídrico, el tiempo de contacto deberá ser de por lo menos 30 minutos; pero para mejorar la remoción de Calcio y Magnesio, un tiempo de contacto más largo es bene-

ficioso y presentará mejoras en la capacidad. Los cationes divalentes, particularmente el Calcio, son fuertemente retenidos por la resina; y aquel que no es removido durante el ciclo de regeneración se mantendrá sobre los grupos de intercambio durante el subsecuente ciclo de servicio con muy poca o ninguna evidencia de fuga (dependiendo del agua de alimentación); pero esta cantidad sobre la resina reducirá la cantidad de grupos de intercambio y en consecuencia reduce la capacidad util de la resina.

b. Nivel de Regeneración (7j). En la mayoría de las discusiones acerca del nivel de regeneración, la cantidad de regenerante está dada en libras del químico a una concentración del 100% puro y no como es suministrado comercialmente (el HCl usualmente es suministrado al 32% p/p y el H₂SO₄ del 96% al 98%p/p), a menos que se especifique de otra forma. En la mayoría de aplicaciones para las resinas catiónicas de ácido fuerte en la forma de Hidrógeno, los requerimientos para su funcionamiento están basados en la fuga de Sodio permisible.

La eficiencia de regeneración de resinas catiónicas de ácido fuerte en la forma de Hidrógeno depende del nivel de regeneración para cumplir con los requerimientos de fuga de Sodio, y por ello no puede ser una materia de elección. Cuando se usa Acido Clorhídrico, la eficiencia de regeneración puede variar en un rango aproximado de 0.15 a 0.30 (libras de HCl al

100% por kilograno de cationes removidos) (7k).

En el anexo B se presentan las curvas típicas que muestran las relaciones entre todos los factores discutidos anteriormente y que influyen en la capacidad de intercambio de las resinas catiónicas. Estas gráficas comprenden datos técnicos reales y son de aplicación general para el cálculo de la capacidad de resinas catiónicas de ácido fuerte para diferentes niveles de regeneración y para una composición específica del agua cruda.

3.3.1.4.2. REGENERACION DE LA RESINA ANIONICA DE BASE FUERTE (71,14a).

En la discusión del ciclo de servicio de las resinas aniónicas fuertemente básicas, se dijo que los aniones son cargados sobre el lecho de resina desde la parte superior hasta la base en un orden correspondiente a la fuerza con que los aniones (SO_4^{2-} , Cl^- , HCO_3^- y SiO_2) son retenidos, y que hay un buen número de diferencias en la regeneración de las resinas aniónicas base fuerte (comparada a las resinas catiónicas de ácido fuerte) debido a la Sílice y sus características especiales.

El regenerente químico utilizado es el Hidróxido de Sodio (soda cáustica), que usualmente es obtenido en solución al 50% y deberá ser mantenido a una temperatura arriba de 52°F o este se solidificará. Para sistemas desmineralizadores donde las resinas aniónicas de base fuerte son utilizadas, no existen

otros regenerentes fuertemente básicos fácilmente obtenibles, aunque Hidróxido de Potasio (KOH) e Hidróxido de Calcio (Ca(OH)_2) han sido utilizados en algunos casos.

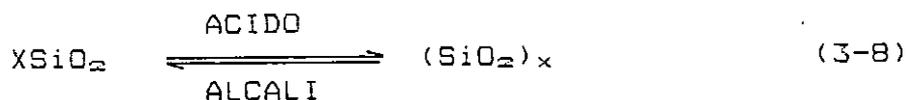
La calidad del Hidróxido de Sodio utilizado es de mayor interés, debido a que las impurezas presentes pueden afectar, en alguna medida, el buen funcionamiento de las resinas aniónicas de base fuerte. La impureza más importante a ser monitoriada es el Carbonato de Sodio debido a que esta puede ser una fuente para la fuga de Sodio y para el ensuciamiento de la resina aniónica con carbonatos.

Comúnmente la remoción de Sulfatos, Cloruros y Bicarbonatos no representa un problema serio, excepto en pocas aplicaciones específicas de alta calidad. Para la mayoría de las aplicaciones de las resinas aniónicas de base fuerte, la Sílice es el factor de control de calidad alrededor del cual el ciclo de regeneración debe ser diseñado.

La Sílice tiene propiedades inusuales comparada con los otros aniones debido a su tendencia a polimerizarse sobre la estructura de la resina, particularmente con el tiempo. Mientras más largo es el tiempo entre las regeneraciones (largos ciclos de servicio), mayor es la tendencia para que la polimerización tome lugar.

Partículas poliméricas más grandes pueden clasificarse como Sílice coloidal y no serán adsorbidas. La polimerización de la Sílice puede ocurrir durante el almacenaje de agua superficial pero es además catalizado por el contacto con los

ácidos provenientes del intercambiador catiónico. Un medio ácido favorece la depolimerización:



De esta manera si la remoción completa de la Sílice no es obtenida durante la regeneración de la resina aniónica una pequeña cantidad de fuga de Sodio desde el intercambiador catiónico puede producir un medio alcalino provocando una depolimerización de la Sílice remanente, la cual aparecerá como fuga en el efluente final.

Para eliminar toda la Sílice de la resina aniónica de base fuerte y solubilizar la Sílice polimérica, dos de los factores más importantes son: el tiempo de contacto (para solubilizar la sílice polimérica) y la temperatura (mientras más alta es la temperatura de la solución cáustica, más rápido la Sílice polimérica pasará a solución) (14a).

a. Concentración de la Soda Cáustica (NaOH). En la regeneración de la resina aniónica de base fuerte con soda cáustica, no hay mayores problemas en la remoción de los Sulfatos, Cloruros, Nitratos y Bicarbonatos siempre que se cumplan las condiciones de regeneración para remover la Sílice. Se ha encontrado que una concentración del 4% p/p posee la suficiente fuerza guiadora para remover la mayoría de aniones desde la resina, proporcionando un volumen suficiente de

regenerante para hacer contacto con toda la resina a una velocidad de flujo aceptable para dar un tiempo mínimo de contacto de 60 minutos (7m).

Concentraciones más bajas, abajo del 2% p/p, pueden ser usadas ventajosamente con niveles bajos de regeneración para proporcionar tiempos de contacto más largos, incrementar la eficiencia de regeneración y obtener una buena remoción de Silice. Concentraciones más altas no mejoran grandemente las eficiencias de regeneración e incrementan la probabilidad del choque osmótico. Con concentraciones altas podría ser difícil controlar el tiempo de contacto y las velocidades de flujo que permitan una distribución uniforme sobre la resina (7n).

En la mayoría de las aplicaciones de las resinas aniónicas de base fuerte es deseable que los aniones débiles (HCO_3^- y SiO_2) en el agua sean removidos de la misma manera que los ácidos minerales libres (Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^-). La fuga de Silice es el factor controlante en la determinación del nivel de regeneración. En general, esta fuga para condiciones de regeneración óptimas depende de los siguientes factores (14a):

a) La razón de la concentración de la Silice a la concentración total de aniones en el agua de alimentación.

b) El nivel de regeneración

c) La temperatura de regeneración

- d) La velocidad de flujo de regeneración
- e) Velocidad de flujo de lavado
- f) La fuga de Sodio procedente del lecho catiónico.

De estos factores, el porcentaje de Sílice y la fuga de Sodio son las más importantes, dado que los otros pueden ser controlados por el volumen de resina utilizado.

En cuanto a la temperatura de regeneración, existen limitaciones, dado que el grupo de intercambio utilizado para dar las características fuertemente básicas de estas resinas es un grupo de amonio cuaternario el cual tiene resistencia limitada a la temperatura. El grupo de amonio cuaternario regenerado (forma de OH^-) es menos resistente a la temperatura, mientras que en la forma agotada las resinas aniónicas de base fuerte tienen mejor estabilidad para soportar altas temperaturas. Comúnmente se recomienda aplicar la Soda Caústica a una temperatura máxima de 40°C para lograr la más baja fuga de sílice; pero generalmente es necesario contar con datos proporcionados por los fabricantes acerca de los rangos de temperaturas que soportan sus resinas aniónicas de base fuerte (7ñ).

En cuanto al tiempo de contacto entre la solución cáustica diluida y la resina, normalmente se recomienda una velocidad de flujo de regeneración cercana a 0.25 gpm/pie^2 de resina para alcanzar los 60 minutos (7ñ).

b. Nivel de Regeneración. Los niveles de regeneración utilizados pueden estar generalmente en el rango de 4 a 10 lbs de NaOH 100% puro/pie³ de resina, pero el nivel más comúnmente utilizado es de 8 lbs NaOH 100%/pie³. Las capacidades que se pueden obtener a estos niveles variarían ampliamente con el porcentaje de Sílice, Cloruros, y Alcalinidad, en relación al total de aniones (7ñ,o).

La razón por la cual los Cloruros influyen en la capacidad es que este anión monovalente no es retenido tan fuertemente por la resina aniónica de base fuerte como el Sulfato, y cualquier Cloruro remanente en el lecho de resina después de la regeneración tendería a ocupar sitios de intercambios que no estarían disponibles para los aniones débiles de Bicarbonato y Sílice. Mientras más alto es el porcentaje de Cloruros, más baja será la capacidad. Generalmente los niveles de Cloruros abajo del 20% tienen poco efecto sobre la capacidad (7o).

En cuanto a las eficiencias de regeneración de las resinas aniónicas de base fuerte, estas podrían estar en las proximidades de 0.35 lbs de NaOH al 100% por kgr de aniones removidos para las resinas tipo I y de 0.23 lbs de NaOH al 100% por kgr para las resinas del tipo II, con capacidades variables de 12 a 17 kgr CaCO₃/pie³ para el tipo I y de 17 a 22 kgr CaCO₃/pie³ para el tipo II (7o).

En el anexo B se presentan gráficas que muestran las relaciones entre los factores discutidos anteriormente, y que sirven de base para el cálculo de la capacidad de resinas aniónicas de base fuerte.

3.3.1.5. LAVADO LENTO (7p).

Después de la aplicación del regenerante químico al lecho de resina, existe un volumen de regenerante en el lecho que tiene que ser desplazado para finalizar la regeneración. Este último volumen de regenerante en el lecho de resina es el mejor regenerante que la resina puede tener, dado que no ha sido diluido por el agua que sobra en el lecho de resina al inicio de la regeneración y no tiene mucho desecho o iones contaminantes en él. Este último volumen de regenerante tiene que ser desplazado a la misma velocidad de flujo de regeneración. Usualmente, este desplazamiento se realiza cortando el flujo de regenerante químico y continuando con el flujo de agua de dilución.

a. Calidad del Agua de Lavado. El agua de lavado lento deberá ser de la misma calidad que el agua de dilución utilizada en la regeneración química. Es decir, si el agua decationizada es requerida como agua de dilución para la introducción del regenerante químico de la resina aniónica, esta deberá ser utilizada en el lavado de desplazamiento también.

Existen algunos casos (tales como la regeneración de la

resina catiónica en la forma de Hidrógeno) donde el agua cruda es utilizada como agua de dilución para el ácido, pero si el agua tiene alta dureza podría considerarse no utilizarla para el lavado de desplazamiento. Esto se debe a que si las concentraciones de ácido son bajas hay posibilidades de que el Calcio y el Magnesio puedan ser colectados desde el agua de lavado en cantidad suficiente para reducir la capacidad de la resina.

En el caso de la regeneración de la resina aniónica, en el lavado de desplazamiento y en el lavado final, se hace necesario utilizar agua decationizada para prevenir la precipitación de Calcio y Magnesio en el ambiente de pH alto que impera en el lecho de resina aniónica que ha sido regenerada.

En un sistema desmineralizador de doble lecho, los volúmenes de resina catiónica y aniónica son iguales y debido a su naturaleza, la resina catiónica produce mayor volumen de agua tratada (decationizada) que la que produce la resina aniónica (deanionizada). Este hecho es aprovechado en el sentido de que la resina catiónica provee el agua decationizada necesaria para la regeneración de la resina aniónica; y como consecuencia el volumen total de agua desmineralizada que un sistema de lecho doble puede producir esta controlado por el volumen de agua que la unidad aniónica esta en capacidad de producir.

3.3.1.6. LAVADO RAPIDO O FINAL (7q).

El lavado rápido o lavado final se realiza con el objetivo de asentar completamente el lecho de resina además de expulsar las últimas cantidades de regenerantes que pueden haber quedado en los lechos de resina en las llamadas áreas "muertas". Estas son zonas vacías que quedan entre las perlas de resinas después de la etapa de retrolavado, en las cuales puede acumularse el regenerante. El uso de velocidades de flujo de lavado más altas tienen un efecto de empaquetamiento sobre el lecho de resina, logrando así la eliminación de las áreas muertas.

En la mayoría de los casos, el lavado rápidos se realiza a la misma velocidad de flujo utilizada en el ciclo de servicio. A esta etapa de lavado también se le da el nombre de enjuague final debido a que con esta se busca obtener la calidad de agua desmineralizada para iniciar el ciclo de servicio.

3.5. LECHO MIXTO (7s).

Se conoce como lecho mixto a una unidad de desmineralización que contiene una mezcla de resinas catiónicas y aniónicas dispuestas en una misma columna. Si se compara una columna de lecho mixto con un sistema de lecho doble operando a co-corriente, se encuentra que la calidad del agua desmineralizada producida por el lecho mixto es de mejor calidad que la producida con el sistema del lecho doble cuando ambos son alimentados con agua cruda de la misma calidad. De lo anterior

cas para los lechos mixtos. Sin embargo, en este trabajo es de
varias posibles combinaciones de resinas catiónicas y anióni-
Al igual que con los sistemas de lecho doble existen
secciones anteriores.

estas pueden ser regeneradas según lo establecido en las
tará en la base de la columna. Una vez separadas las resinas,
de la columna y la resina catiónica que es más pesada se asen-
resina aniónica que es más ligera subirá a la parte superior
que la resina catiónica; así que por un retrolavado simple, la
mayoría de los casos, la resina aniónica es de menor densidad
(en el mismo tanque o externamente). Afortunadamente, en la
de servicio de manera que puedan ser regeneradas separadamente
es la habilidad de separar las dos resinas después del ciclo
utilizando resinas aniónicas y catiónicas en un mismo tanque
Industrialmente, la clave para la operación de un sistema

mineralizada sus ciclos de servicio serán muy largos.
consecuentes dificultades) puesto que al alimentarle agua des-
necesidad de regenerar continuamente el lecho mixto (y sus
que sirve para "pulir" el agua desmineralizada. Esto evita la
agua desmineralizada seguido por una columna de lecho mixto
es utilizar un sistema de doble lecho para la obtención de
lecho doble. Por esta razón, lo que normalmente se acostumbra
de desmineralizadores de lecho mixto comparados con los de
chas más dificultades técnicas en la operación y mantenimiento
cualquier aplicación industrial. Sin embargo, se presentan mu-
parece obvio que resultaría mejor utilizar un lecho mixto para

interés el uso de resinas catiónica de ácido fuerte y aniónica de base fuerte para construir un lecho mixto pulidor de agua desmineralizada.

La forma en que el intercambio iónico ocurre en un lecho mixto se asemeja a una serie infinita de sistemas de lecho doble, puesto que debido a la íntima mezcla de ambas resinas tanto los cationes como los aniones presentes en la solución acuosa son removidos casi al mismo tiempo como se muestra en la figura 3.6.

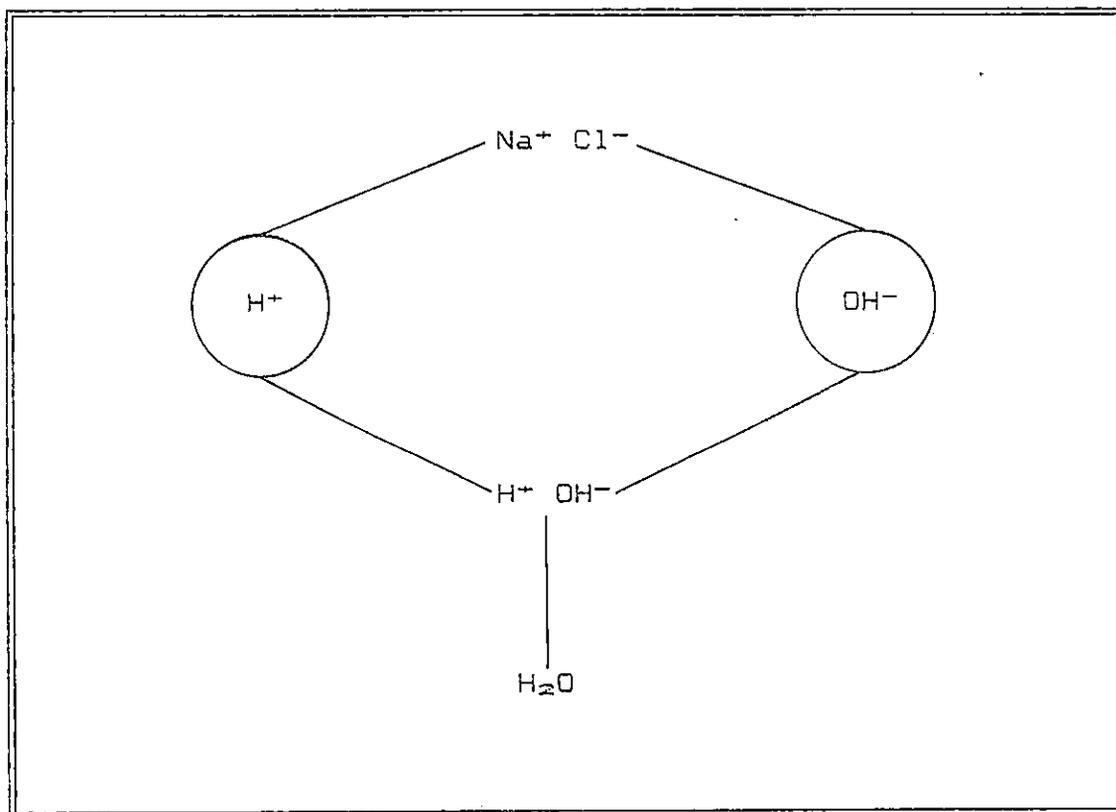


FIG. 3.5. ESQUEMA DEL PRINCIPIO DE INTERCAMBIO IONICO EN UN LECHO MIXTO (7t).

CAPITULO IV
DEMANDA DE AGUA DESMINERALIZADA EN LOS LABORATORIOS DE
INGENIERIA QUIMICA.

Esta sección se introdujo con el objetivo de determinar las necesidades, tanto en cantidad como en calidad de agua desmineralizada que tiene la Escuela de Ingeniería Química para brindar el servicio de laboratorios prácticos a sus estudiantes y a los de otras carreras. Esta información es de mucha utilidad para poder especificar o dimensionar el sistema de desmineralización propuesto como objetivo fundamental de este trabajo.

En principio puede establecerse que la Escuela de Ingeniería Química da servicio de laboratorio prácticamente en todas las asignaturas que le compete; siendo las que más laboratorios requieren las siguientes : Química General (I, II), Química Orgánica, Físico-química (I,II), Química Analítica, Análisis Instrumental, Química Industrial, las Técnicas Electivas y Trabajos de Graduación. También existe una demanda considerable de agua desmineralizada para los laboratorios de Química Técnica que se brinda como servicio a las demás ramas de Ingeniería.

Toda esta actividad de laboratorios ha ejercido una demanda promedio de agua desmineralizada como la que muestra la tabla 4-1 (10).

TABLA 4-1. DEMANDA ANUAL PROMEDIO DEL AGUA DESMINERALIZADA EN LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA.

ANO	GALONES	COSTO/GALON	COSTO ANUAL
antes de 1990	10	¢ 1.00	¢ 120.00
1990	10	¢ 1.00	¢ 120.00
1991	15	¢ 1.00	¢ 180.00
1992	20	¢ 2.00	¢ 480.00
1993	25	¢ 2.00	¢ 600.00
1994	25	¢ 2.00	¢ 600.00

Los datos de la tabla 4-1 corresponden únicamente al gasto que la Escuela de Ingeniería Química ha absorbido, sin embargo, hay un consumo adicional de agua desmineralizada que los trabajos de graduación demandan y los gastos han sido asumidos por los estudiantes que realizan dichos trabajos de graduación. Un caso concreto lo constituye la demanda de agua desmineralizada ejercida por los trabajos de graduación en el período entre mayo de 1993 y marzo de 1994. En este período se estima el consumo en 240 galones de agua desmineralizada a un costo de ¢ 3.35/ galón* sumando esto un total de ¢ 804.00 (11).

*Los trabajos de graduación requieren para los experimentos, agua desmineralizada de alta calidad, por lo que se hace necesario comprarla a empresas particulares dado que el agua suministrada actualmente por la Facultad de Química y Farmacia no cumple con los requisitos exigidos por los trabajos de graduación.

Adicionalmente debe decirse que los datos mostrados en la tabla 4-1 no consideran el gasto de agua desmineralizada requerido para lavar el material de vidrio. Esto es debido a que en la actualidad se utiliza agua cruda para lavar toda la cristalería que se usa en los laboratorios. Por esta razón no ha sido posible cuantificar esta cantidad de agua desmineralizada, que obviamente deberá ser mucho mayor que la utilizada en las otras actividades de laboratorio.

4.1. CALIDAD DE AGUA DESMINERALIZADA.

Anteriormente se ha dicho que el agua desmineralizada para el uso en laboratorios debe de cumplir con ciertas normas de calidad. Sin embargo, el agua que actualmente le esta siendo suministrada a la Planta Piloto por la Facultad de Química y Farmacia no llena dichos requisitos; por lo que se hace necesario que para algunos fines especiales se compre agua a empresas particulares. La diferencia en cuanto a la calidad del agua desmineralizada es significativa como puede observarse en la tabla 4-2.

La inadecuada calidad del agua genera problemas al momento de preparar reactivos y realizar análisis químicos. Por ejemplo, el alto contenido de Sílice y el contenido menor de otras sales disueltas obliga a destilar el agua antes de poder utilizarla en la preparación de reactivos y en la realización de análisis tales como Sílice, Cloruros, Sulfatos, etc.

TABLA 4-2. DATOS COMPARATIVOS DE LA CALIDAD DEL AGUA DESMINERALIZADA UTILIZADA EN LOS LABORATORIOS DE INGENIERIA QUIMICA ENTRE JULIO 1993 Y MAYO 1994.

FECHA DE ANALISIS	FACULTAD DE QUIMICA Y FARMACIA		PROVEEDORES EXTERNOS	
	SILICE (ppm SiO ₂)	CONDUCTIVIDAD (µmhos/cm)	SILICE (ppm SiO ₂)	CONDUCTIVIDAD
18/07/93	42.5	15.0	ND	3.5
04/09/93	33.4	9.0	ND	1.4
12/12/93	17.2	11.5	ND	1.8
21/02/94	28.1	13.0	ND	2.7
17/03/94	52.0	8.0	ND	2.1
04/05/94	94.0	10.0	ND	1.5

ND = No Detectable

Los datos presentados en la Tabla 4-2 fueron obtenidos realizando análisis de Conductividad y de Sílice dado que son dos de los parámetros más importantes para evaluar la calidad del agua desmineralizada para el uso en laboratorios (sección 1.5.2).

El objetivo fundamental de este trabajo no solo es el de producir agua desmineralizada, si no también asegurar la calidad de ésta agua de manera que cumpla con los requisitos exigidos por las normas.

El dimensionamiento del sistema a construir se hará tomando como base un volumen de 100 galones de agua desmineralizada producida por ciclo de regeneración, cuya conductividad no exceda de 10 µmhos/cm. Se elige este límite para la conduc-

tividad considerando que es el valor máximo permitido por la norma 1080:1 (ver anexo A). Para el agua que ha de utilizarse en la realización de análisis químicos, la conductividad se llevará a niveles de entre 1 y 3 $\mu\text{mhos/cm}$ utilizando la técnica de recirculación a través del sistema desmineralizador. Finalmente, el agua destinada a la preparación de reactivos (especialmente para análisis colorimétricos) se llevará hasta un nivel de conductividad menor de 0.5 $\mu\text{mhos/cm}$ haciendo pasar agua desmineralizada de 3 $\mu\text{mhos/cm}$ o menos a través de un lecho mixto de resinas catiónica y aniónica que servirá como equipo pulidor del agua.

El galonaje seleccionado para dimensionar el sistema desmineralizador se da en base a los requerimientos de agua grado reactivo mostrados anteriormente, que incluye los trabajos de graduación, más un exceso que pueda cubrir la demanda proyectada en los años venideros, así como el agua necesaria para lavar el material de vidrio. Debe recordarse que estos requerimientos de agua desmineralizada están calculados en base a un mes de trabajo en la Planta Piloto y no por ciclo de regeneración del desmineralizador; por lo que si en un momento dado la demanda crece más allá de lo previsto, existe la posibilidad de obtener más agua simplemente regenerando el desmineralizador cada vez que sea necesario.

CAPITULO V

DISEÑO DEL SISTEMA DE DESMINERALIZACION.

Para cumplir con todos los requisitos de calidad especificados en la sección 4.0 para el agua desmineralizada se requiere de un sistema de lecho doble (catiónica y aniónica) más una columna de lecho mixto que sirva como "pulidora" del agua ya desmineralizada, como se muestra en el diagrama de la figura 5.1. En esta sección se presenta una descripción general de los componentes básicos tanto del lecho doble como del lecho mixto, así como los modelos de diseño que son una aproximación previa a la especificación formal de cada uno de ellos.

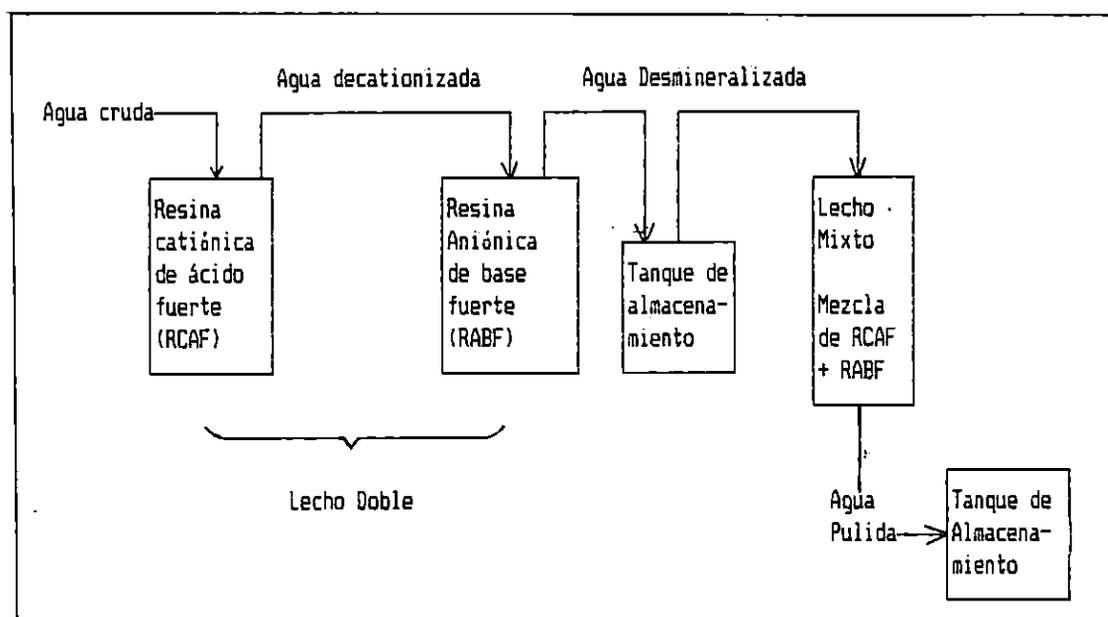


FIG. 5.1. DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL PROCESO DE PRODUCCION DE AGUA DESMINERALIZADA Y PULIDA PARA DIFERENTES USOS EN EL LABORATORIO.

5.1 SISTEMA DE LECHO DOBLE.

El sistema de lecho doble es la parte más importante puesto que aquí ocurre la remoción del mayor porcentaje del contenido de Sólidos Totales Disueltos (STD) en el agua cruda o de alimentación. La parte medular de este sistema lo constituye una unidad (o columna) catiónica consistente de un tanque cilíndrico en el que se dispondrá la resina catiónica de ácido fuerte para la retención de cationes como el Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , etc.; y una unidad aniónica de base fuerte para la remoción de los aniones como los Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , y NO_3^- , además de la Sílice (SiO_2). Adicionalmente, el sistema debe contar con una bomba para impulsar el agua a través de los lechos de resina y los demás accesorios del sistema para asegurar la constancia de los flujos y presión requeridos en la operación.

Otra parte importante del sistema son los dispositivos para la dosificación de los regenerantes químicos de las dos resinas de intercambio iónico. En cada resina se utilizarán inyectores de tipo venturi que debido al flujo de agua que pasa a través de ellos generan la succión de la solución regenerante, lográndose así la mezcla regenerante-agua que finalmente llega a la resina. Los regenerantes a utilizar son: Acido Clorhídrico concentrado tipo comercial para el intercambiador catiónico, y solución saturada de Hidróxido de Sodio comercial para el intercambiador aniónico.

También se ha considerado dotar al sistema de un tanque

de captación de agua cruda para asegurar la producción de agua desmineralizada cuando falte el suministro de ANDA o para poder recircular el agua obtenida a través del sistema, con propósitos de mejorar la calidad o de ahorrar agua de lavados después de parar el equipo.

Además se han incluido dos tanques para la captación de los desechos de regeneración, en los que se verificará la neutralización de los mismos antes de descargarlos al sistema de alcantarillado.

Finalmente, para poder regular velocidades de flujo así como hacer derivaciones de flujos, es necesario el uso de la tubería y los accesorios adecuados. Dentro del grupo de accesorios se tienen: codos, tees, válvulas de bola, chorros, y uniones universales (que garanticen que el sistema es fácilmente desmontable).

En cuanto a los materiales de construcción, deben utilizarse aquellos que presenten alta resistencia a la corrosión y que soporten presiones relativamente altas. Así, en el caso de los tanques para resinas y los inyectores serán de materiales especiales (detallados en el capítulo VII), los tanques para agua cruda y desechos de regeneración serán barriles de plástico; y toda la tubería y los accesorios de Cloruro de Polivinilo (PVC).

En general, todo el sistema estará constituido de polímeros sintéticos a excepción de la bomba que será metálica.

La forma en que se dispondrán todos los componentes del sistema a construir se muestra en las Figuras 5.2, 5.3 y 5.4. En las figuras 5.5 a 5.11 se muestra la dirección del flujo en cada una de las etapas del proceso para el sistema desmineralizador a construir. El diseño del sistema es tal que este funcionará como un sistema co-corriente. En el capítulo VII se procederá a la especificación formal del sistema desmineralizador y se presentarán los planos de construcción.

5.2 LECHO MIXTO.

La columna de lecho mixto servirá para eliminar cationes y aniones que aún contiene (en muy bajas concentraciones) el agua desmineralizada que proviene del sistema de lecho doble, y de esta manera obtener agua ultrapura o pulida. El lecho mixto consistirá de una mezcla de resinas catiónica de ácido fuerte y aniónica de base fuerte, que estará contenida en un tubo de PVC y en su extremo inferior tendrá un tapón hembra fijo del cual se extraerá el agua pulida por medio de un grifo para regular la velocidad de flujo. En la parte superior contará con un tapón hembra desmontable para permitir la alimentación manual de la columna. El modelo del lecho mixto se muestra en la figura 5.12.

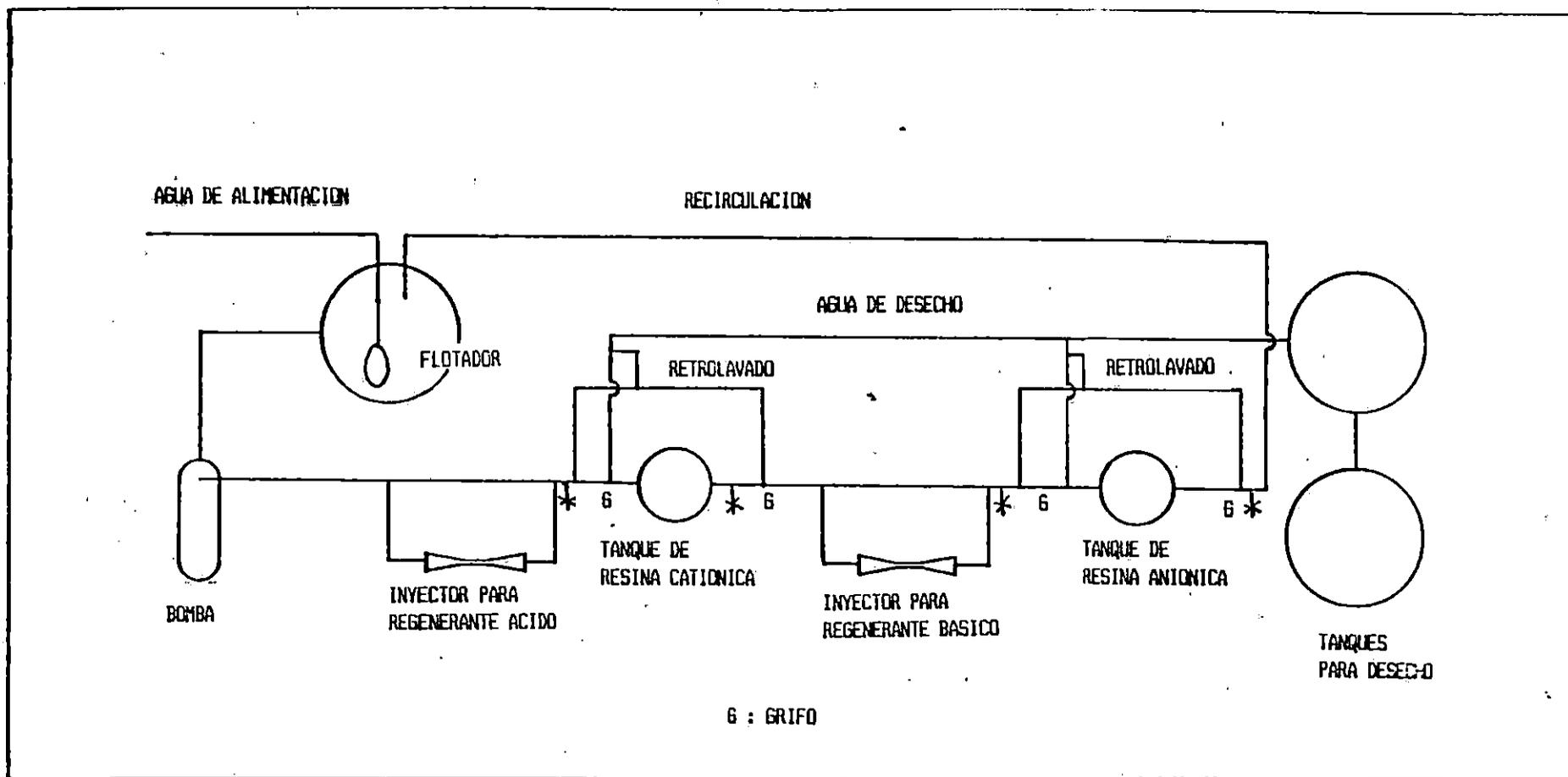


FIG. 5.2. VISTA SUPERIOR DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO QUE SE CONSTRUIRA EN LAS INSTALACIONES DE LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

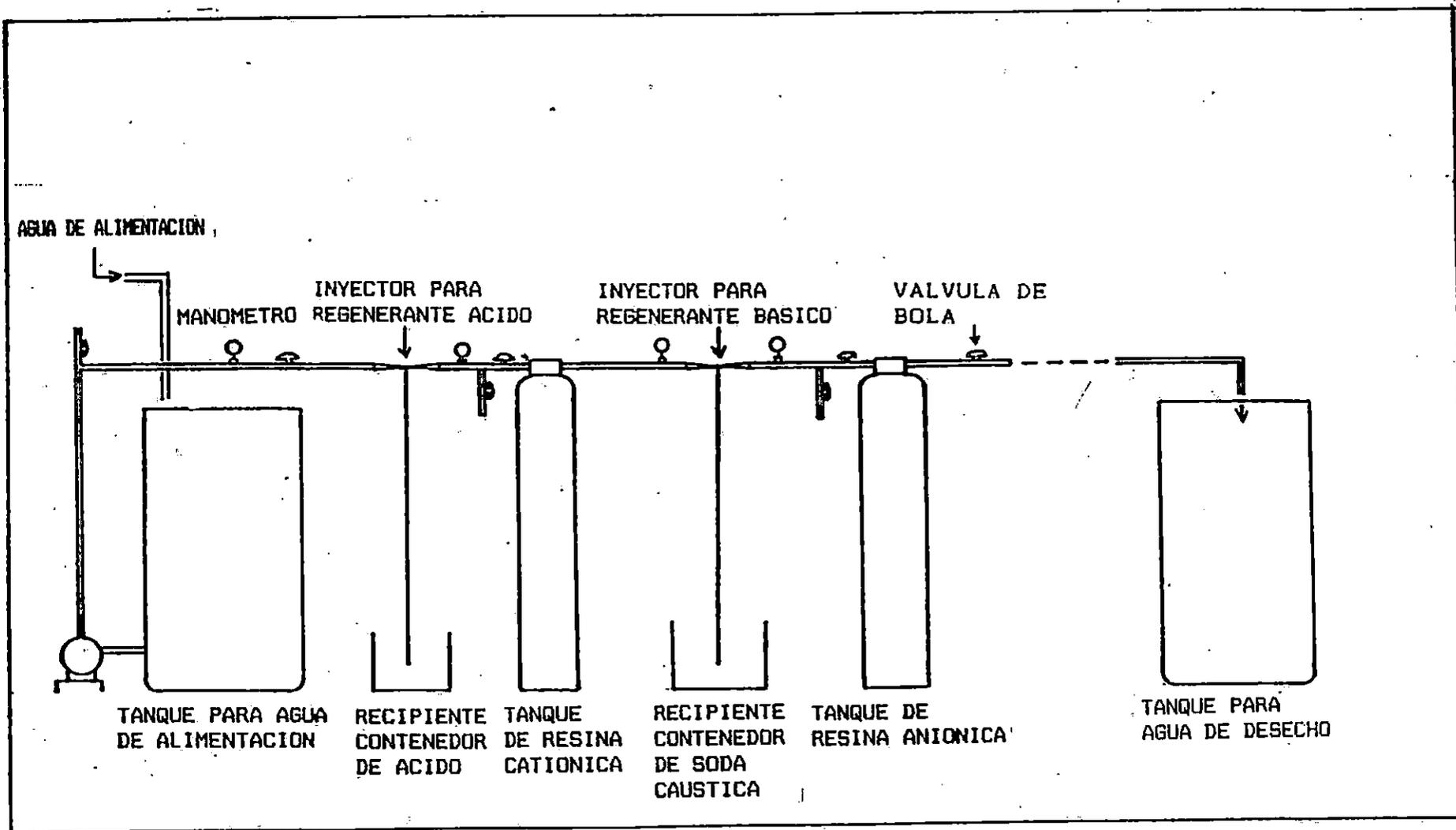


FIG. 5.3. VISTA FRONTAL DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO QUE SE CONSTRUIRA EN LAS INSTALACIONES DE LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

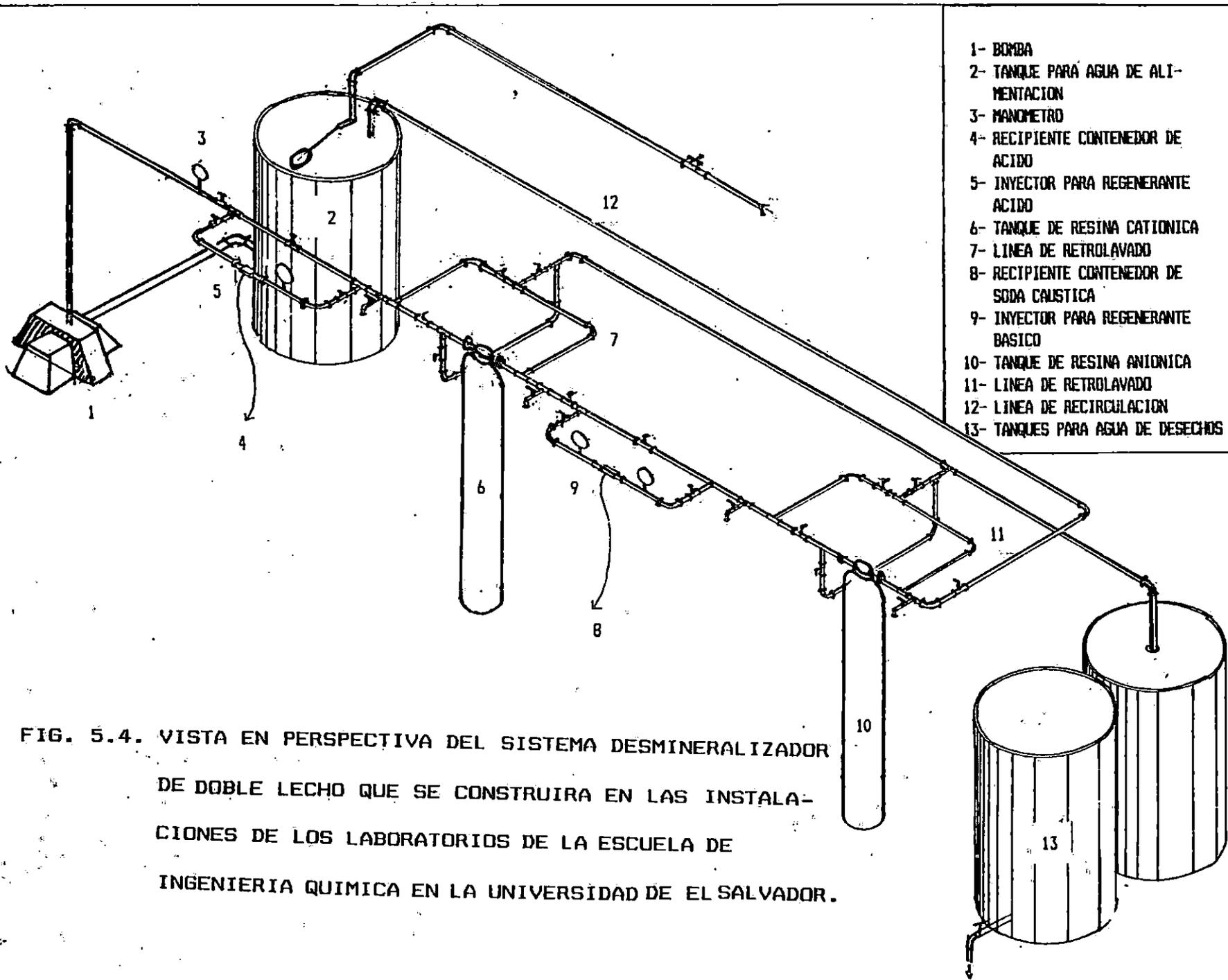


FIG. 5.4. VISTA EN PERSPECTIVA DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO QUE SE CONSTRUIRA EN LAS INSTALACIONES DE LOS LABORATORIOS DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

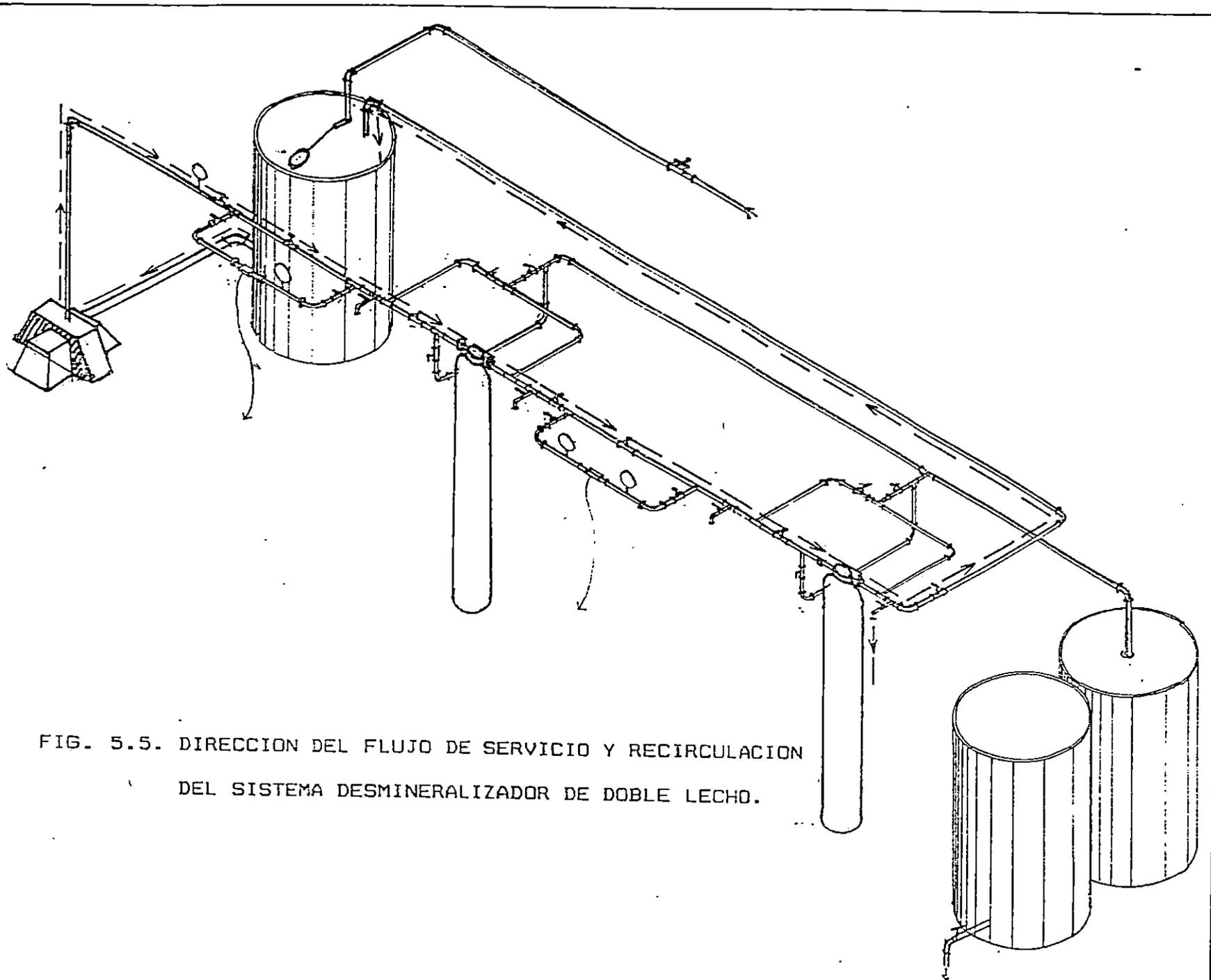


FIG. 5.5. DIRECCION DEL FLUJO DE SERVICIO Y RECIRCULACION DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO.

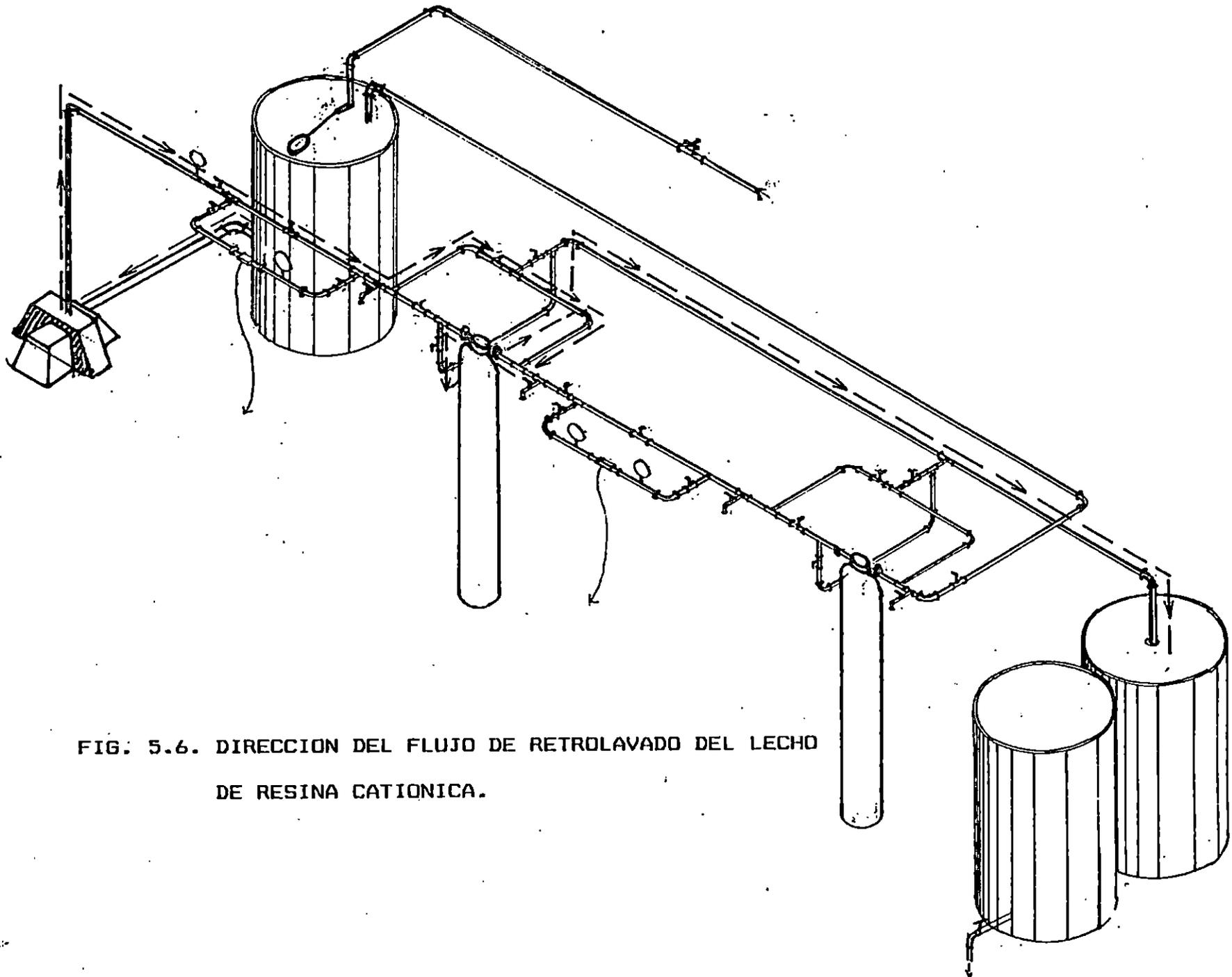


FIG. 5.6. DIRECCION DEL FLUJO DE RETROLAVADO DEL LECHO DE RESINA CATIONICA.

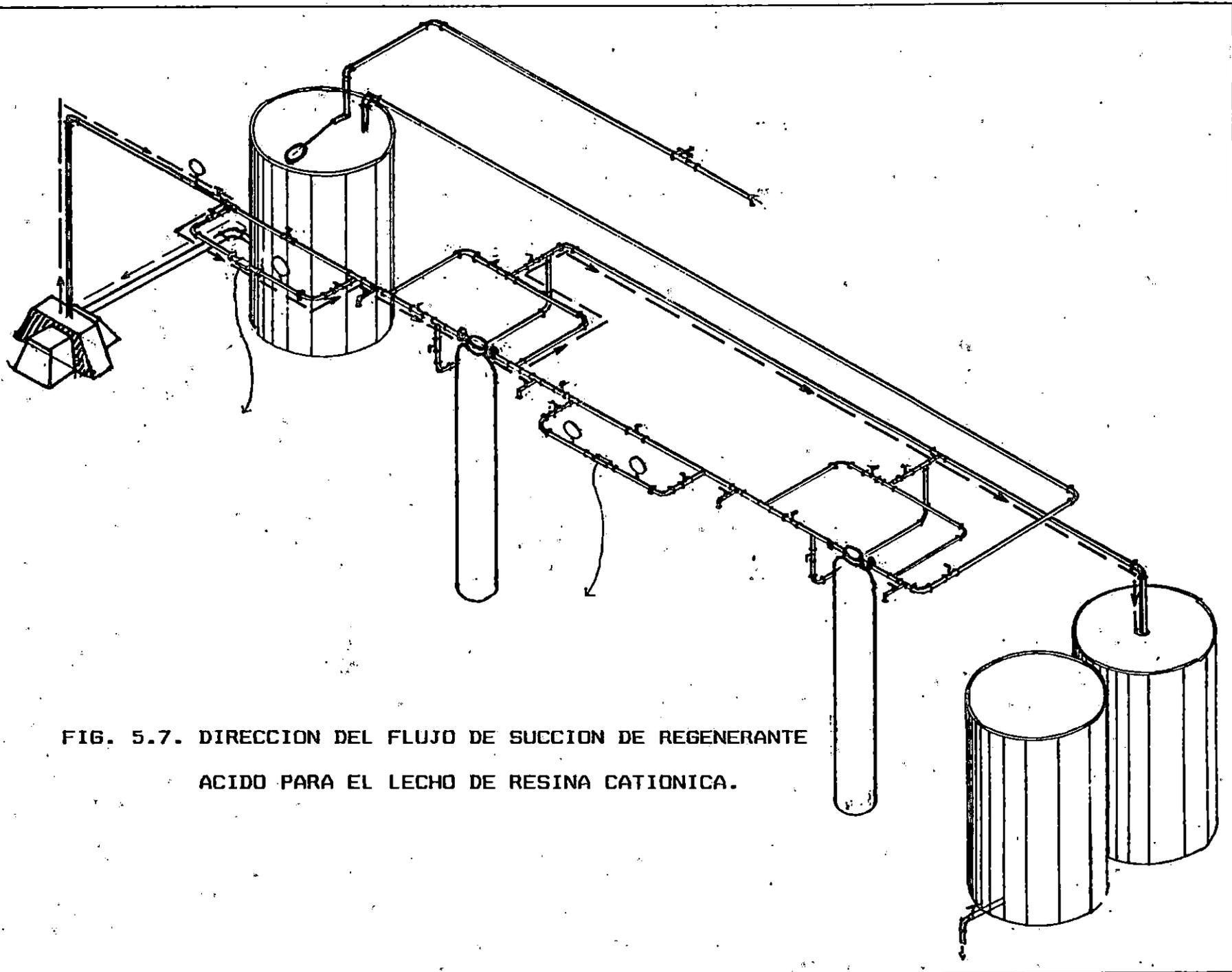


FIG. 5.7. DIRECCION DEL FLUJO DE SUCCION DE REGENERANTE ACIDO PARA EL LECHO DE RESINA CATIONICA.

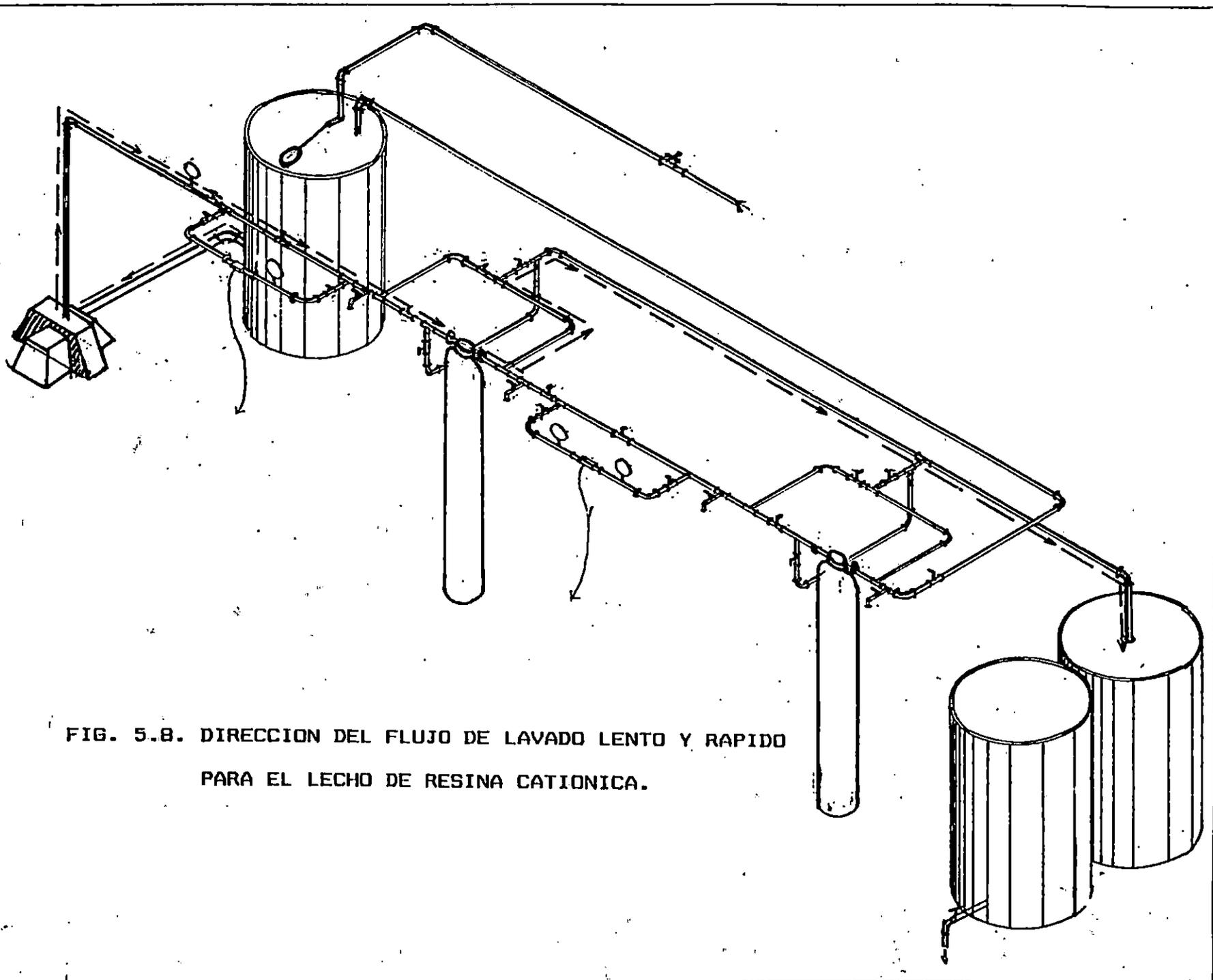


FIG. 5.8. DIRECCION DEL FLUJO DE LAVADO LENTO Y RAPIDO PARA EL LECHO DE RESINA CATIONICA.

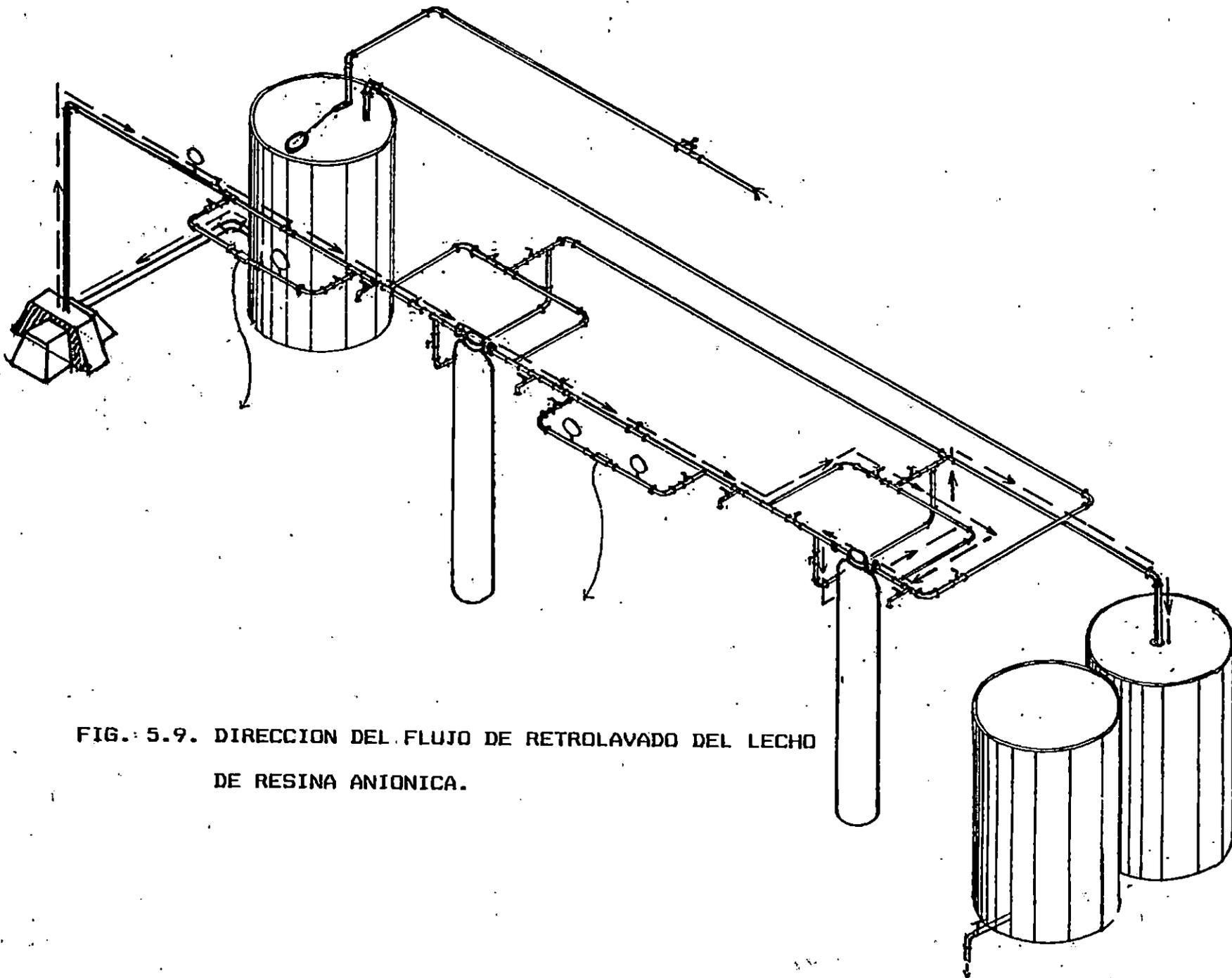


FIG. 5.9. DIRECCION DEL FLUJO DE RETROLAVADO DEL LECHO DE RESINA ANIONICA.

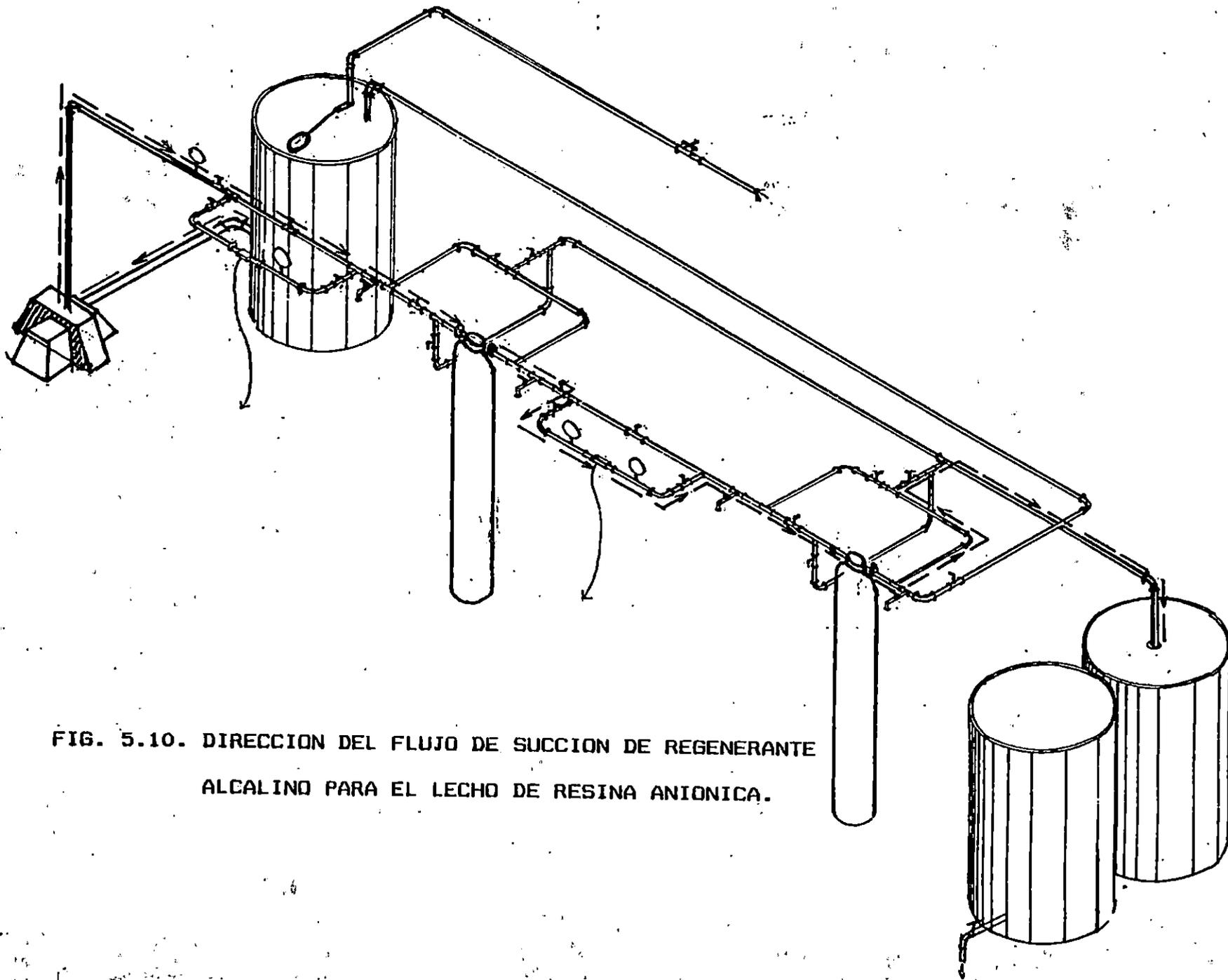


FIG. 5.10. DIRECCION DEL FLUJO DE SUCCION DE REGENERANTE
ALCALINO PARA EL LECHO DE RESINA ANIONICA.

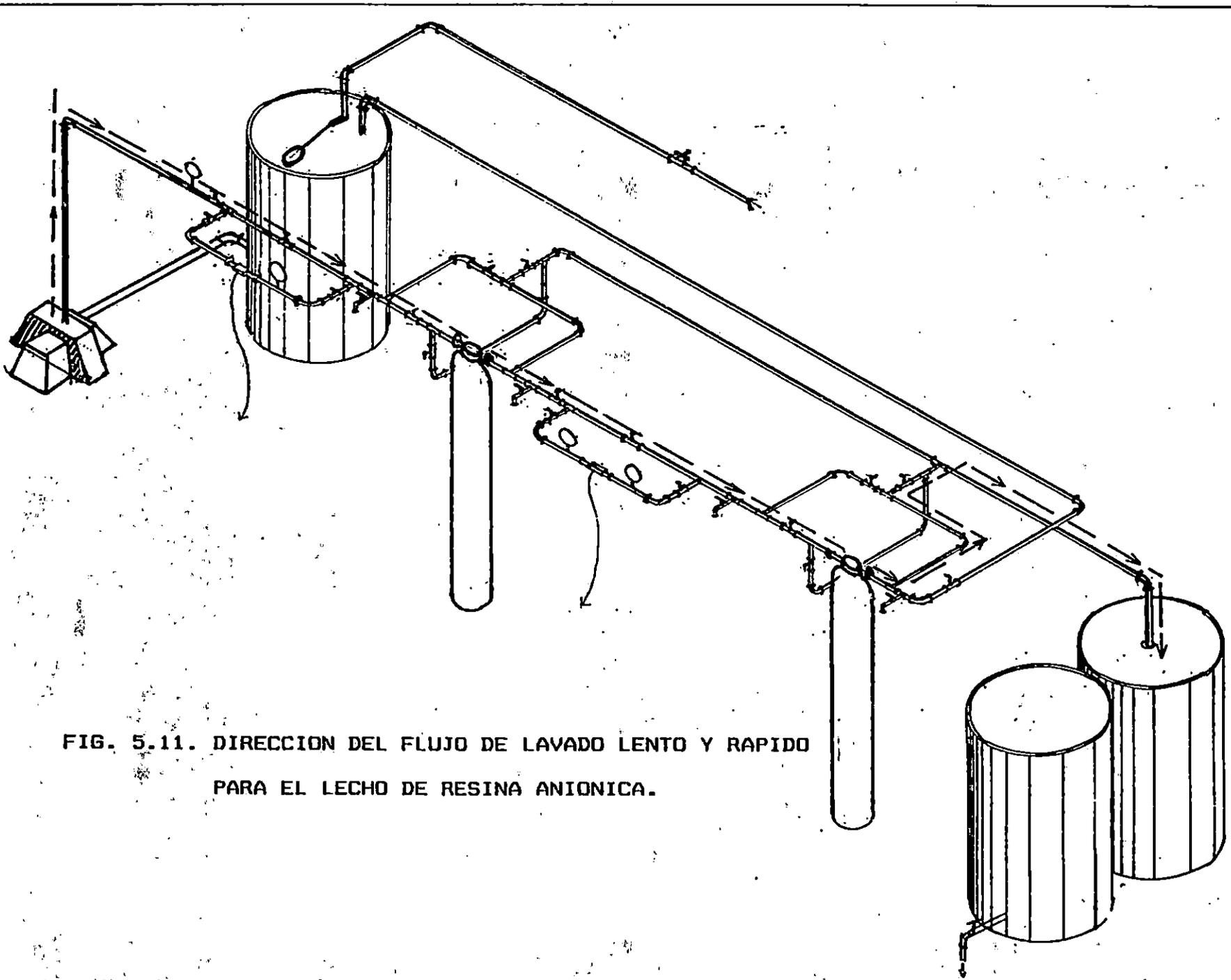


FIG. 5.11. DIRECCION DEL FLUJO DE LAVADO LENTO Y RAPIDO PARA EL LECHO DE RESINA ANIONICA.

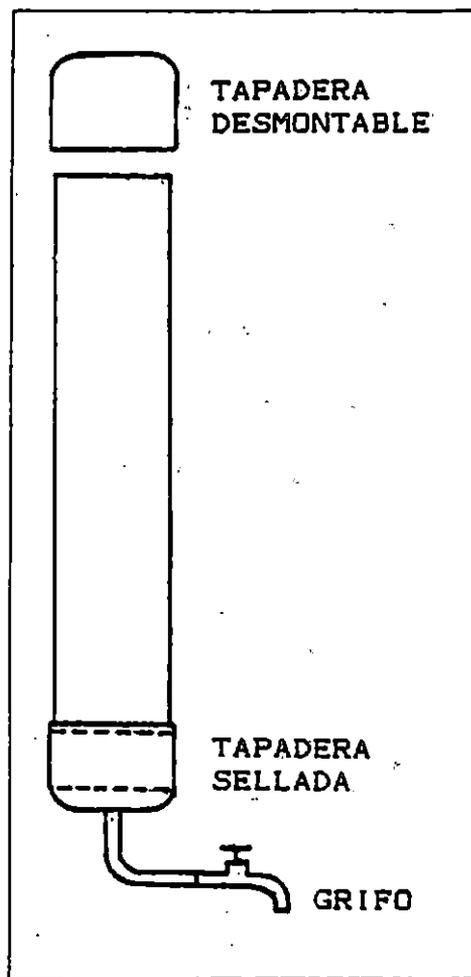


FIG. 5.12. MODELO DE LA COLUMNA DE LECHO MIXTO QUE SERVIRA
COMO PULIDORA DE AGUA DESMINERALIZADA.

CAPITULO VI

DISEÑO EXPERIMENTAL

La experimentación a realizar en este trabajo se irá desarrollando a medida que avance la construcción del sistema desmineralizador. Se aplicará el diseño experimental con dos objetivos específicos:

- a. Determinar las velocidades de flujo total, a través de los inyectores, que proporcionen una concentración adecuada de la respectiva mezcla de agua y regenerante que se inyectará a cada resina. Estas velocidades serán controladas por medio de la válvula principal del sistema.
- b. Establecer el nivel de regeneración óptimo para cada resina. Es decir, la cantidad de regenerantes que resulte más adecuada para la obtención de un mayor galonaje de agua desmineralizada de excelente calidad considerando los niveles de regeneración recomendados por la bibliografía.

La experimentación se divide en las siguientes cuatro partes:

- a. Prueba del inyector de Acido Clorhídrico para la resina catiónica de ácido fuerte. Esta se realizará variando la posición de la válvula principal (variable independiente) y observando el comportamiento de la concentración del regenerante diluido (variable dependiente o variable respuesta). El diseño experimental correspondiente a esta prueba

consistirá en:

a.1. Diseño de bloques al azar para cuatro niveles de posición de la válvula principal a dos repeticiones. La evaluación de este diseño se hará por medio de:

i) Evaluación estadística mediante análisis de varianza (ANVA) para establecer posible diferencia estadística entre posiciones y entre repeticiones. Esto requiere de un análisis de varianza en dos direcciones.

ii) Evaluación estadística mediante diferencia mínima significativa (DMS) entre niveles de posición de la válvula principal.

a.2. Realización de análisis de regresión entre posiciones de la válvula principal y concentración del regenerante (HCl) si resulta concerniente de acuerdo a la evaluación por DMS.

b. Prueba de los niveles de regeneración de Acido Clorhídrico para la resina catiónica de ácido fuerte. Esta se realizará variando la cantidad de regenerante o nivel de regeneración (variable independiente) y observando el comportamiento de la resina catiónica en cuanto a la eficiencia de decationización. El parámetro seleccionado como variable respuesta para medir dicha eficiencia será la dureza en el agua decationizada (variable dependiente) a un tiempo de operación predeterminado. El diseño experimental correspondiente a esta prueba consistirá de:

b.1. Diseño de bloques al azar para tres niveles del nivel de regeneración a dos repeticiones. La evaluación de este diseño se hará de la siguiente manera:

- i) Evaluación estadística mediante análisis de varianza (ANVA) para establecer posible diferencia estadística entre niveles de regeneración y entre repeticiones. Se requiere análisis de varianza en dos direcciones.
- ii) Evaluación estadística mediante diferencia mínima significativa (DMS) entre niveles del nivel de regeneración.

c. Prueba del inyector de Hidróxido de Sodio para la resina aniónica de base fuerte. Esta prueba se realizará básicamente de la misma manera que para el inyector de la resina catiónica; siendo la única diferencia, que la variable dependiente en este caso será la concentración de NaOH. El diseño experimental y su evaluación se hará igual que en el numeral 1.

d. Prueba de los niveles de regeneración de Hidróxido de Sodio para la resina aniónica de base fuerte. Esta se realizará variando la cantidad de regenerante o nivel de regeneración (variable independiente) y observando el comportamiento de la resina aniónica en cuanto a su eficiencia de deanionización. Los parámetros seleccionados para medir la eficiencia serán: la Conductividad, pH, Dureza, Sílice

Sulfatos y Cloruros en el agua desmineralizada (variables dependientes) a un tiempo de operación predeterminado. El diseño experimental correspondiente a esta prueba consistirá de:

- d.1. Diseño de bloques al azar para tres niveles del nivel de regeneración a dos repeticiones. La evaluación de este diseño se hará de la misma manera que los incisos a y b del numeral 2.

- e. Evaluación total del sistema desmineralizador de lecho doble produciendo agua desmineralizada en un solo paso. Esta evaluación consistirá en regenerar las resinas con el nivel de regeneración que ha sido aceptado estadísticamente para cada una de ellas y midiendo la cantidad de agua producida así como su calidad por medio de un análisis físico-químico que incluirá las siguientes propiedades: Conductividad, pH, Dureza, Sodio, Sulfatos, Cloruros, Sílice y Alcalinidad.

- f. Evaluación total del sistema desmineralizador de lecho doble produciendo agua desmineralizada utilizando la técnica de recirculación. Esta evaluación se hará regenerando las resinas con el nivel de regeneración aceptado estadísticamente para cada una de ellas y midiendo la cantidad de agua producida así como su calidad por medio de un análisis físico-químico que incluirá las siguientes propiedades: Conductividad, pH, Sílice, Alcalinidad, Dureza, Cloruros,

9. Evaluación de la columna de lecho mixto para pulir agua des-mineralizada. La prueba consistirá en alimentar, al lecho mixto, agua desmineralizada con una conductividad de 3 μ hos o menos y evaluar el comportamiento de éste en lo relativo a la disminución de la conductividad.

Esta prueba se realizará recirculando el agua a través del sistema hasta que se obtiene una conductividad menor de 3 μ hos/cm; en este momento, se inicia el ciclo normal de servicio produciéndose agua hasta el punto en que la conductividad sube hasta 10 μ hos/cm, en donde se procede a recircular nuevamente el agua. Este proceso se repite hasta que llega el momento en el cual la conductividad ya no baja de 10 μ hos.

CAPITULO VII

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR

En esta sección se procede al dimensionamiento formal del sistema de desmineralización total por medio de resinas de intercambio iónico. Este dimensionamiento consiste en la especificación de todas las partes componentes del sistema de doble lecho de acuerdo a las figuras 5.2, 5.3 y 5.4 presentadas en la sección 5.0 y tomando como base la producción de 100 galones de agua desmineralizada por ciclo de regeneración de las resinas (ver sección 4.0). Así mismo, se especificará el lecho mixto para la obtención de agua pulida.

El primer paso consiste en determinar el volumen o cantidad de resina (aniónica y catiónica) necesario, y consecuentemente fijar el flujo de operación y el tamaño de los tanques que contendrán a las resinas. Seguidamente, se especificará la bomba, los inyectores de regenerante y el volumen de los tanques de desechos en función de los flujos y tiempos recomendados para cada etapa del proceso.

7.1. CALCULOS PARA DETERMINAR EL TAMANO DEL DESMINERALIZADOR DE LECHO DOBLE.

Como fue mencionado en la sección 1.5.1, lo primero que debe hacerse para especificar un desmineralizador es determinar las características (o calidad) del agua que ha de someterse al proceso (agua cruda).

Con este fin se realizaron los análisis listados en la tabla 1-4, en muestras del agua servida a la planta piloto por la Administración de Acueductos y Alcantarillados, ANDA. Las muestras se tomaron en diferentes fechas y los resultados obtenidos se muestran en la tabla 7-1.

Puede observarse de los datos mostrados en la tabla 7.1 que hubo una variación muy pequeña en la composición química del agua de la muestra analizada el 9 de Noviembre de 1993 con relación a la muestra analizada el 14 de mayo de 1994, por lo que la composición química puede considerarse constante para los fines prácticos. Debido a esto los cálculos para el desmineralizador se realizarán con el promedio de las muestras analizadas.

Las formas de cálculo para las unidades catiónica y aniónica se harán en base a lo establecido por la guía de dimensionamiento para sistemas de desmineralización de la Culligan Company de los Estados Unidos de Norte América* (12).

Previo a los cálculos numéricos, es conveniente analizar los datos técnicos específicos de las resinas a utilizar; así como los aspectos concernientes a los niveles de regeneración y sus efectos en las diferentes etapas del proceso de desmineralización.

*Esta documentación corresponde a los datos técnicos que esta compañía proporciona a las empresas que distribuyen sus equipos alrededor del mundo. Parte de esta guía de dimensionamiento se presenta en el anexo B.

TABLA 7-1. ANALISIS FISICO-QUIMICOS DEL AGUA CRUDA SUMINISTRADA A LOS LABORATORIOS DE INGENIERIA QUIMICA, REALIZADOS EN DIFERENTES FECHAS.

ANALISIS REALIZADOS	RESULTADOS				EXPRESADO COMO
	FECHA DEL ANALISIS				
	9-11-93	17-2-94	14-5-94	\bar{x}	
Calcio	121.40	121.80	125.40	122.87	ppm CaCO ₃
Magnesio	141.60	140.80	142.70	141.70	"
Sodio	157.60	158.10	157.90	157.87	"
Potasio	13.10	13.10	13.00	13.07	"
Bicarbonato	275.10	276.20	276.50	275.93	"
Cloruro	48.50	51.60	51.90	50.67	"
Sulfato	66.10	66.40	66.30	66.27	"
Nitrato	11.50	11.50	11.60	11.53	"
Silice	160.30	159.30	159.10	159.57	"
Dióxido de Carbono	90.00	65.00	72.00	75.67	"
pH	6.70	6.85	6.80	6.78	Unidades
Hierro	0.01	0.01	0.01	0.01	ppm Fe
Manganeso	ND	ND	ND	ND	ppm Mn
Temperatura	29.50	30.00	30.00	29.83	°C
Conductividad	800.00	800.00	810.00	803.33	µmhos/cm
STD	550.00	550.00	555.00	551.67	ppm
% de diferencia	3.89	3.35	3.87		-

ND: No Detectables.

7.1.1. DATOS TECNICOS DE LAS RESINAS.

Como se ha dicho antes, para lograr la desmineralización total debe hacerse uso de un lecho doble con resina catiónica de ácido fuerte seguida por una resina aniónica de base fuerte. Dado que existen diversos tipos de intercambiadores de ácido y base fuerte se hace necesario especificar las características de cada resina a utilizar en un desmineralizador.

7.1.1.1. RESINA CATIONICA (13a).

En el sistema que se va a construir se utilizará la resina catiónica de ácido fuerte. Esta resina tipo gel que es regenerada con ácido fuerte, presenta una alta capacidad de intercambio, una excelente estabilidad a temperaturas elevadas, amplio rango de pH, y buena resistencia a la fricción debido a la alta densidad de las partículas esféricas.

En la tabla 7-2 se presentan las características físicas principales de esta resina, y en la tabla 7-3 se sugiere las condiciones de operación con las cuales pueden obtenerse resultados óptimos al usar este intercambiador.

Resultados más eficientes pueden obtenerse cuando la resina catiónica de ácido fuerte es utilizada en el tratamiento de soluciones libres de materias suspendidas y cuando las unidades que contengan las resinas sean diseñadas para proporcionar una adecuada distribución de flujo a través del lecho de resina.

TABLA 7-2. CARACTERISTICAS FISICAS DE LA RESINA CATIONICA DE ACIDO FUERTE (13a).

Tipo	Gel
Forma iónica	Sodio o Hidrógeno
Forma	Partículas esféricas
Humedad	44 a 48%
Capacidad de intercambio	1.9 meq/ml
Densidad	48 a 54 lbs/pie ³
Peso de embarque	53 lbs/pie ³
Tamaño efectivo	0.45 a 0.60 mm
Clasificación del tamaño	16 a 50 mesh
Coefficiente de uniformidad	1.8 máximo
Contenido de finos	0.7% máximo (en 50 mesh)

TABLA 7-3. CONDICIONES DE OPERACION SUGERIDAS PARA LA RESINA CATIONICA DE ACIDO FUERTE (13a).

	CICLO DE HIDROGENO
pH	1.0 a 14.0
Temperatura máxima	250 °F o 121 °C
Altura mínima del lecho	24 plgs.
Velocidad de flujo de retrolavado	6 gal/(pie ²)(min) a 72 °F o 22 °C
Concentración del regenerante	10% p/p HCL ó 1 a 5% p/p H ₂ SO ₄
Velocidades de flujo de regeneración	0.5 a 0.75 gal/(pie ³)(min)
Velocidades de flujo de lavado	0.5 a 0.75 gal/(pie ³)(min) inicialmente, luego 1.5 gal/(pie ³)(min)
Requerimiento del agua de lavado	25 - 50 galones/pie ³
Velocidad de flujo de servicio	2 gal/(pie ³)(min)

El grado de expansión de la resina catiónica a diferentes velocidades de flujo se muestra en la figura 7.1. En general, la velocidad de flujo de retrolavado varía con la temperatura del agua; a mayor temperatura se requiere mayor velocidad de flujo para mantener un nivel constante de expansión del lecho.

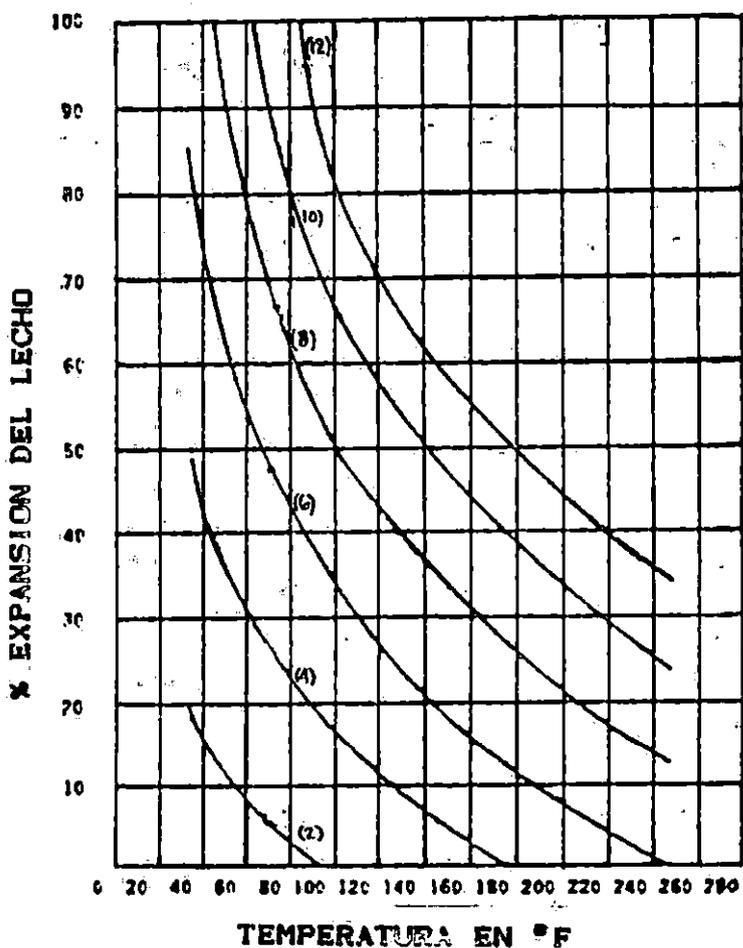


FIG. 7.1. GRADO DE EXPANSION DE LA RESINA CATIONICA DE ACIDO FUERTE COMO FUNCION DE LA TEMPERATURA A DIFERENTES VELOCIDADES DE FLUJO (14a).

Las dimensiones de una unidad de intercambio iónico varían con el tamaño y la aplicación; sin embargo, una profundidad mínima del lecho de 24 plg es recomendable en la mayoría de los casos.

7.1.1.2. RESINA ANIONICA (14a).

En la unidad aniónica se utilizará una resina aniónica de base fuerte tipo gel. La basicidad de esta resina es derivada de la funcionalidad del amonio cuaternario. Su estructura porosa esta basada en el copolímero de Estireno Divinilbenceno, incuestionablemente la matriz polimérica más fuerte disponible para la síntesis de este tipo de productos.

Cuando se requiere una remoción de Sílice muy completa, como sucede en aguas de alimentación para calderas de alta presión, esta resina de base fuerte, con una regeneración apropiada producirá un efluente de excelente calidad.

La resina aniónica a utilizar es del tipo I, por lo que ofrece máxima estabilidad a la temperatura y buena resistencia a la pérdida de capacidad de intercambio debido a oxidación.

En la tabla 7-4 se presentan las propiedades físicas y químicas de la resina aniónica de base fuerte, y en la tabla 7-5 las condiciones de operación sugeridas con las cuales pueden obtenerse resultados óptimos.

TABLA 7-4. PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DE LA RESINA ANIO-
NICA DE BASE FUERTE (14a).

Tipo	Gel
Forma iónica	Cloruro
Estructura	Partículas esféricas
Humedad	42 a 48%
Densidad	40 a 46 lbs/pie ³
Peso de embarque	44 lbs/pie ³
Medida efectiva	0.41 a 0.48 mm
Graduación en malla	16 a 50 mesh (U.S. tamaño estándar)
Coefficiente de uniformidad	1.8 máximo
Contenido de finos	3.7% máximo a través de 50 mesh
Hinchamiento	Máximo 22% sobre completa conversión desde la forma de cloruro a la forma oxhidrilo (OH ⁻).
Temperatura limitantes	
Forma de OH ⁻	140 °F ó 60 °C máximo
Otras formas	170 °F ó 77 °C máximo
CAPACIDAD TOTAL DE INTERCAMBIO	
a) Volumétrica	1.4 meq/mL mínimo 30.5 kgr/pie ³ como CaCO ₃ 4.4 lb eq/pie ³ como CaCO ₃
b) Peso	3.8 meq/g de resina seca en la forma de cloruro (mínimo)

La caída de presión a través de un lecho de la resina aniónica de base fuerte depende de la velocidad de flujo y de la temperatura del agua. Estas relaciones son mostradas gráfi-

camente en la figura 7-2 para el agua a diferentes temperaturas. La caída de presión también puede verse incrementada por la presencia de materiales insolubles, presentes en la solución acuosa, que se depositan en la parte superior del lecho durante el ciclo de agotamiento.

TABLA 7-5. CONDICIONES DE OPERACION SUGERIDAS PARA LA RESINA ANIONICA FUERTEMENTE BASICA (14a).

Limitaciones de pH	Ninguno
Altura de lecho mínimo	24 plg
Velocidad de flujo de retrolavado	2 a 3 gal/pie ² /minuto a 70 °F
Concentración del regenerante	4% p/p NaOH
Velocidad de flujo de regeneración	0.25 a 1.0 gal/pie ² /minuto
Velocidad de flujo de lavado	0.25 a 0.5 gal/pie ² /minuto inicialmente, para desplazar el regenerante 2.5 gal/pie ² /min
Requerimiento del agua de lavado	40 a 90 gal/pie ²
Velocidad de flujo de servicio	2 a 5 gal/pie ² /minuto

Como es típico de todas las partículas sólidas, el grado de expansión de la resina aniónica de base fuerte depende de la velocidad de flujo, la temperatura, la viscosidad y la densidad de la solución. La figura 7.3 representa valores típicos de la expansión del lecho de resina aniónica de base fuerte

para el agua a diferentes temperaturas.

Al igual que con la resina catiónica de ácido fuerte, el retrolavado de la resina aniónica de base fuerte debe efectuarse a una velocidad de flujo que proporcione una expansión del lecho del 50 al 75% en un tiempo de 10 a 15 minutos.

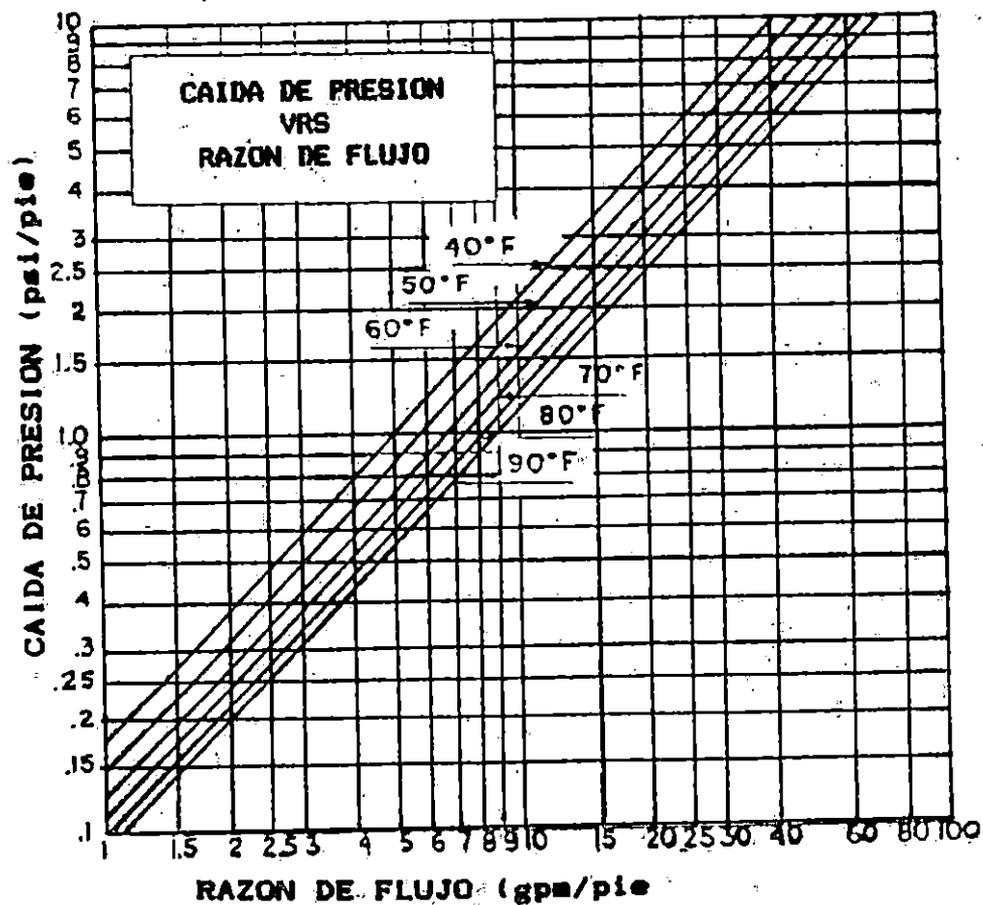


FIG. 7.2. CAIDA DE PRESION DE LA RESINA ANIONICA DE BASE FUERTE COMO UNA FUNCION DE LA VELOCIDAD DE FLUJO A DIFERENTES TEMPERATURAS (14a).

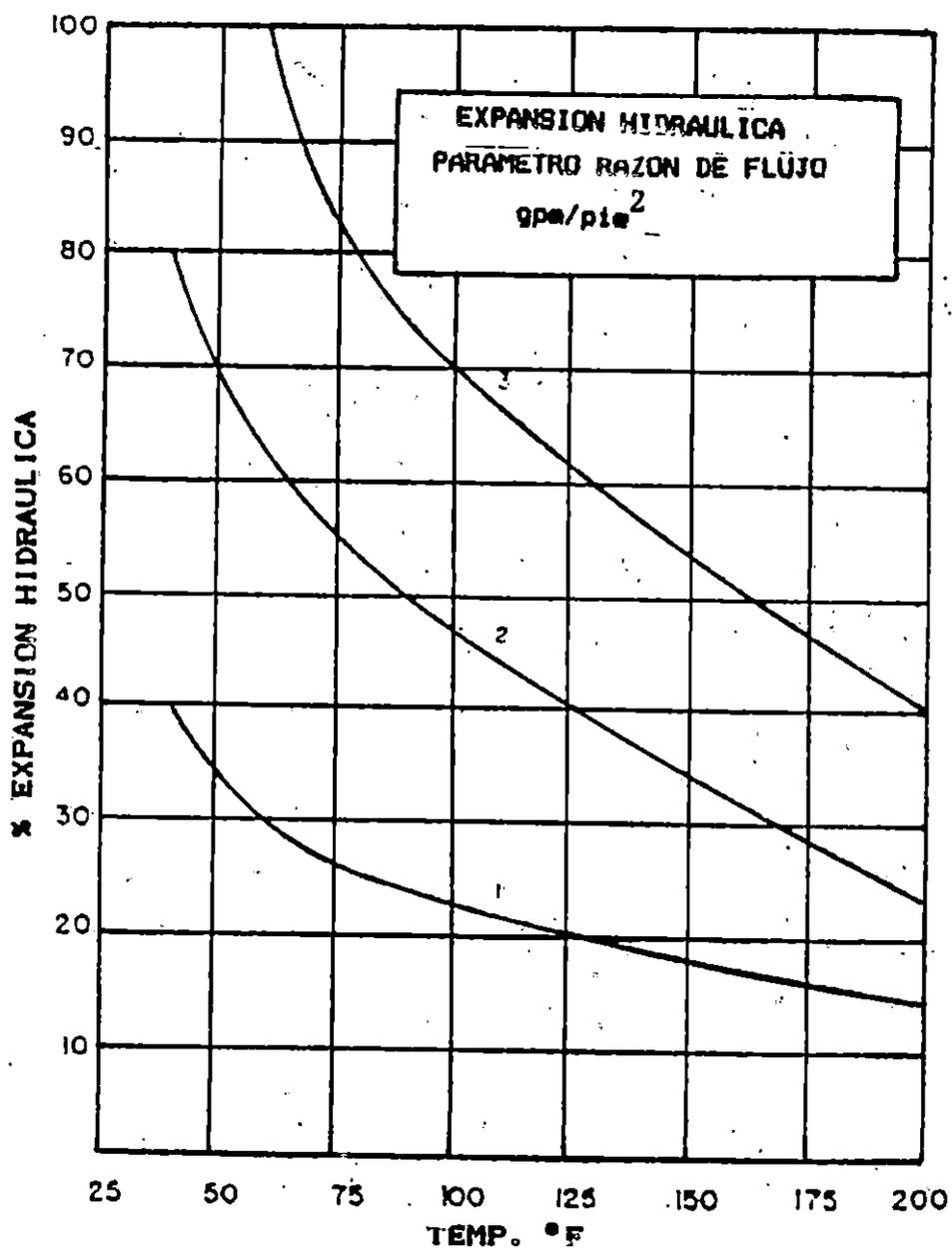


FIG. 7.3. GRADO DE EXPANSION DE LA RESINA ANIONICA DE BASE FUERTE COMO FUNCION DE LA TEMPERATURA PARA DIFERENTES VELOCIDADES DE FLUJO (14a).

7.1.2. CALCULO DE LAS UNIDADES CATIONICA Y ANIONICA.

En primer lugar se calculará el volumen de resina catiónica y aniónica necesario para producir 100 galones de agua desmineralizada y posteriormente se hará una corrección de éste volumen (si fuese necesario) con el objetivo de adecuarlo al tamaño de tanques para resina disponibles en el mercado. Finalmente se calculará el nuevo galonaje que teóricamente se puede obtener con este nuevo volumen de resina.

Los datos necesarios para realizar los cálculos se presentan en la tabla 7-6, los cuales corresponden a un promedio del análisis físico-químico del agua cruda suministrada a la planta piloto.

De acuerdo a la guía de dimensionamiento presentada en el anexo B los factores de carga para calcular las capacidades de intercambio de la resina catiónica de ácido fuerte y aniónica de base fuerte son:

$$\text{Factor Y} = \Sigma \text{ Cationes} \quad (7.1)$$

$$\text{Factor Z} = \Sigma \text{ Aniones} + \text{gpg SiO}_2 + \text{gpg CO}_2 \quad (7.2)$$

Debe de tomarse en cuenta que en todos los cálculos especificados en la guía de dimensionamiento, la concentración de todas las especies químicas involucradas tienen que estar expresadas en granos por galón como CaCO_3 .

TABLA 7-6. PROMEDIO DEL ANALISIS DE AGUA CRUDA EN BASE AL CUAL SE REALIZA EL CALCULO DE LA CAPACIDAD DEL SISTEMA DE LECHO DOBLE.

pH:	6.78		Conductividad eléctrica:	803.33	
Hierro:	0.01 ppm Fe		Sólidos totales disueltos:	551.67 ppm	
µmhos/cm			Sílice:	159.57 ppm CaCO ₃	
Manganeso:	ND			9.30 gpg CaCO ₃	
Temperatura:	29.83 °C		Dióxido de Carbono:	75.67 ppm CaCO ₃	
				4.41 gpg CaCO ₃	
CATIONES	ppm CaCO ₃	gpg CaCO ₃	ANIONES	ppm CaCO ₃	gpg CaCO ₃
Calcio	122.87	7.16	Cloruros	50.67	2.95
Magnesio	141.70	8.26	Sulfatos	66.27	3.86
Sodio	157.87	9.21	Nitratos	11.53	0.67
Potasio	13.07	0.76	Bicarbonato	275.93	16.09
Total de Cationes	435.51	25.39	Total de aniones	404.40	23.57

7.1.2.1. UNIDAD CATIONICA.

Para determinar la capacidad de operación de la unidad catiónica es necesario conocer el % Sodio y % Alcalinidad.

$$\% \text{Sodio} = \frac{\text{gpg Na}^+ + \text{gpg K}^+}{Y} \times 100 \quad (7.3)$$

De acuerdo a la ecuación (7.1), el factor de carga Y para este caso es:

$$\text{Factor Y} = (7.16 + 8.26 + 9.21 + 0.76) \text{ gpg CaCO}_3$$

$$\text{Factor Y} = 25.39 \text{ gpg CaCO}_3$$

$$\% \text{ Sodio} = \frac{9.21 + 0.76}{25.39} \times 100$$

$$\% \text{ Sodio} = 39.26$$

$$\% \text{Alcalinidad} = \frac{\text{gpg CO}_3^{2-} + \text{gpg HCO}_3^-}{\text{Factor Y}} \quad (7.4)$$

$$\% \text{Alcalinidad} = \frac{0 + 16.09}{25.39} \times 100$$

$$\% \text{Alcalinidad} = 63.37$$

En la gráfica B-1* (anexo B) se ubica en el eje de las X el valor del % de sodio, luego siguiendo verticalmente se intercepta la curva del % de alcalinidad y finalmente, siguiendo una línea recta hasta el eje de las Y, se encuentra la capacidad en kilogramos como $\text{CaCO}_3/\text{pie}^3$ de resina catiónica. En la mayoría de los casos será necesario interpolar entre las curvas del % de alcalinidad.

De acuerdo a lo anterior se tiene:

$$\begin{aligned} \text{Capacidad de resina catiónica} &= 28.3 \text{ kgr CaCO}_3/\text{pie}^3 \\ &= 28,300 \text{ gr CaCO}_3/\text{pie}^3 \end{aligned}$$

*Con esta gráfica se calcula la capacidad de la resina catiónica al nivel máximo de regeneración recomendado (9 lbs de HCl 100% puro/ pie^3 de resina) para resinas catiónica de ácido fuerte.

Ahora, para tratar 100 galones de agua que tiene 25.39 gpg CaCO_3 de cationes a ser removidos, se necesitará del siguiente volumen de resina:

$$\text{Volumen de resina catiónica} = 100 \text{ gal} \times 25.39 \frac{\text{gr}}{\text{gal}} \times \frac{1 \text{ pie}^3}{28,300 \text{ gr}}$$

$$\text{Volumen de resina} = 0.09 \text{ pie}^3 = 0.1 \text{ pie}^3$$

7.1.2.2. UNIDAD ANIONICA.

Para el cálculo de la capacidad de la resina aniónica también se hará uso del nivel de regeneración máximo recomendado (8 lbs de NaOH 100%/pie³ de resina).

De acuerdo a la guía de dimensionamiento, los parámetros requeridos para el cálculo de la capacidad son el % de ácido carbónico, % de iones monovalentes y el % de sílice.

$$\% \text{ ácido carbónico} = \frac{\text{gpg CO}_3^{2-} + \text{gpg HCO}_3^- + \text{gpg CO}_2}{\text{Factor Z}} \times 100 \quad (7.5)$$

de acuerdo a la ecuación (7.2), el factor de carga Z para este caso será:

$$\text{Factor Z} = (23.57 + 9.3 + 4.41) \text{ gpg CaCO}_3$$

$$\text{Factor Z} = 37.28 \text{ gpg CaCO}_3$$

$$\% \text{ de ácido carbónico} = \frac{0 + 16.09 + 4.41}{37.28} \times 100$$

$$\% \text{ ácido carbónico} = 54.99$$

$$\% \text{ iones monovalentes} = \frac{\text{gpg Cl}^- + \text{gpg NO}_3^-}{\text{Factor Z}} \times 100 \quad (7.6)$$

$$\% \text{ iones monovalentes} = \frac{2.95 + 0.67}{37.28} \times 100$$

$$\% \text{ iones monovalentes} = 9.7$$

$$\% \text{ sílice} = \frac{\text{gpg SiO}_2}{\text{Factor Z}} \times 100 \quad (7.7)$$

$$\% \text{ sílice} = \frac{9.3}{37.28} \times 100$$

$$\% \text{ sílice} = 24.95$$

Luego, en el gráfico B-5 (anexo B) se ubica el nivel de regeneración deseado (8 lbs de NaOH 100%/pie³) en el eje de las X y se lee verticalmente hacia arriba hasta interceptar la curva y finalmente se proyecta una línea recta hacia el eje de las Y para encontrar la capacidad de la resina aniónica.

Siguiendo el procedimiento anterior se obtiene la siguiente capacidad:

$$\begin{aligned} \text{Capacidad de resina aniónica} &= 16 \text{ kgr CaCO}_3/\text{pie}^3 \\ &= 16,000 \text{ gr CaCO}_3/\text{pie}^3 \end{aligned}$$

La capacidad obtenida anteriormente debe ser corregida en base a los porcentajes de Acido Carbónico, iones mono-valentes y Sílice. En la tabla B-1 (anexo B), se ubican estos porcentajes y se leen los correspondientes factores de corrección. Así:

Para: 54.18% de Acido Carbónico : $F_1 = 1.13$

10.02% de iones monovalentes : $F_2 = 0.98$

25.26% de Sílice y 8 lbs NaOH 100% : $F_3 = 0.96$

La capacidad corregida se obtiene multiplicando la capacidad inicial por cada uno de los factores de corrección.

Capacidad corregida: $16,000 \times 1.13 \times 0.98 \times 0.96$

Capacidad corregida: $17,009.7 \text{ granos/pie}^3$

Finalmente, el volumen requerido de resina para tratar los 100 galones de agua será:

$$\text{Volumen de resina aniónica} = 100 \text{ gal} \times 37.28 \frac{\text{gr}}{\text{gal}} \times \frac{1 \text{ pie}^3}{17,009.7 \text{ gr}}$$

$$\text{Volumen de resina aniónica} = 0.22 \text{ pie}^3$$

Como puede observarse el volumen de resina aniónica, para tratar un mismo galonaje de agua cruda, es mayor que el volumen de resina catiónica. Esto es debido a que la capacidad de intercambio de la resina aniónica es menor que la capacidad de intercambio de la resina catiónica (ver tablas 2-1 y 2-2); y

en parte también se debe a que el factor de carga Z es mayor que el factor de carga Y.

Los volúmenes de resinas calculados anteriormente son relativamente pequeños y consecuentemente resulta difícil encontrar, en el mercado nacional, tanques prefabricados que tengan las dimensiones adecuadas para manejar dichos volúmenes. Además, por consideraciones hidráulicas, no es posible manejar volúmenes diferentes de resina en un sistema desmineralizador. Por esta razón, deben de seleccionarse tanques del mismo tamaño para contener igual volumen de resinas y la cantidad de agua desmineralizada a producir estará gobernada por la capacidad de intercambio de las resinas.

En El Salvador las compañías que distribuyen equipos para tratamiento de aguas, particularmente para desmineralización, ofrecen tanques de diferentes tamaños; siendo el mínimo, un tanque que puede manejar un volumen de 0.5 pie³ de resinas. En base a lo anterior se diseña el sistema de manera que cuente con 0.5 pie³ de resina catiónica de ácido fuerte y 0.5 pie³ de resina aniónica de base fuerte. Estas cantidades de resinas permitirán la producción de un mayor galonaje de agua, lo que constituye un margen de seguridad para la obtención de agua desmineralizada con relación a las necesidades establecidas en el capítulo IV.

El galonaje que producirán 0.5 pie³ de resina catiónica es:

$$\text{Gal agua decationizada} = \frac{(\text{capac. de resina}) \times (\text{vol. de resina})}{\text{Factor de carga Y}}$$

$$\text{Gal de agua decationizada} = \frac{28,300 \frac{\text{gr}}{\text{pie}^3} \times 0.5 \text{ pie}^3}{25.39 \text{ gr/gal}}$$

$$\text{Galones de agua decationizada} = 557$$

Notese que la capacidad de intercambio de la resina catiónica se mantiene, y esto es debido a que solo depende de la calidad del agua cruda y del nivel de regeneración; y no del volumen de resina utilizado.

El volumen calculado anteriormente corresponde al galonaje total de agua decationizada que teóricamente producirá la resina catiónica por ciclo de regeneración. Sin embargo, dado que la resina aniónica se regenera con agua decationizada, el galonaje neto de la unidad catiónica para agua desmineralizada será menor. Normalmente se utiliza un promedio de 100 galones de agua decationizada para regenerar 1 pie³ de resina aniónica, por lo que el galonaje neto de la unidad catiónica será:

$$\text{Galonaje neto} = 557 \text{ gal} - \frac{100 \text{ gal}}{\text{pie}^3} \times 0.5 \text{ pie}^3$$

$$\text{Galonaje neto} = 507$$

Recuérdese que también se utilizaran 0.5 pie³ de resina aniónica. En consecuencia, los galones de agua producidos por este volumen de resina aniónica serán:

$$\text{Gal unidad aniónica} = \frac{17,009.7 \frac{\text{gr}}{\text{pie}^3} \times 0.5 \text{ pie}^3}{37.28 \text{ gr/gal}}$$

Galones de agua desmineralizada = 228

Notese que éste volumen de agua estará libre de aniones y cationes dado que el agua que pasa a través del lecho aniónico es agua decationizada, resultando un efluente de agua desmineralizada.

Notese también que para un mismo volumen de resinas catiónica y aniónica, la capacidad (en galonaje) de un sistema desmineralizador de lecho doble siempre esta determinada por la capacidad de la unidad que se agota primero. Debido a la diferencia de capacidades de intercambio, la unidad aniónica se agota primero, por lo que se toma como capacidad total del sistema la cantidad de agua producida por esta unidad.

En el caso que se está tratando, se estima que el sistema desmineralizador de "medio pie cúbico" producirá un total de 230 galones de agua desmineralizada con una calidad que oscila

en un rango de 2 a 30 $\mu\text{mhos/cm}^*$ de conductividad eléctrica. Esta estimación será cierta siempre que se mantengan las condiciones en base a las cuales se realizó el cálculo de las capacidades. Es decir siempre que no cambie la composición del agua cruda y se mantengan los niveles de regeneración establecidos así como las condiciones de operación del sistema.

7.1.2.3. DETERMINACION DE FUGAS.

De lo discutido en el proceso de desmineralización, se tiene que dos de los parámetros más importantes para evaluar el punto final del ciclo de servicio son la fuga de Sodio desde la unidad catiónica y la fuga de sílice desde la unidad aniónica.

a. Fuga de Sodio de la Unidad Catiónica. Con los porcentajes de Sodio y Alcalinidad determinados anteriormente, 39.26 y 63.37 respectivamente, y haciendo uso del gráfico B-2 (anexo B), se ubica el porcentaje de Sodio en el eje de las X; luego dirigiéndose verticalmente hacia arriba se intercepta la curva de alcalinidad deseada, en ese punto se lee horizontalmente hacia la parte izquierda del gráfico en donde se determina el valor promedio de fuga de Sodio (expresado como

*Este rango para la calidad del agua desmineralizada se toma en base a que la mayoría de sistemas desmineralizadores automáticos disponibles comercialmente son previamente fijados a 30 $\mu\text{mhos/cm}$. Cuando se alcanza éste valor de conductividad el sistema detiene, en forma automática, el ciclo de servicio y una nueva regeneración es necesaria.

% Na⁺ del total de cationes).

El valor obtenido es de 0.2% y las ppm de Sodio se determina de la siguiente manera:

$$\text{Fuga de sodio} = \frac{\% \text{fuga}}{100} \times \text{factor } Y \times 17.1$$

$$\text{Fuga de sodio} = 0.002 \times 25.39 \text{ gpg} \times 17.1 \text{ ppm/gpg}$$

$$\text{Fuga de sodio} = 0.87 \text{ ppm CaCO}_3 = 0.4 \text{ ppm Na}$$

Para los fines prácticos, siempre es recomendable aproximar la fuga de Sodio al entero próximo mayor (ver guía de dimensionamiento, anexo B); de manera que en este caso se tomará como fuga de Sodio 1 ppm CaCO₃ (0.46 ppm Na).

b. Fuga de Sílice desde la Unidad Aniónica. En un sistema desmineralizador como el que se está dimensionando, la fuga en el efluente final consiste de Hidróxido de Sodio, Sílice, y otros iones que pueden estar en concentraciones menores. El Sodio proviene de la fuga en la unidad catiónica y es convertido a Hidróxido de Sodio en la unidad aniónica de base fuerte, lo que significa que el agua será alcalina en un solo paso.

La fuga de Sílice está directamente relacionada a la cantidad de Sílice remanente en la resina aniónica después de su regeneración y a la fuga de Sodio desde el intercambiador

catiónico. Para determinar la fuga de Sílice se utilizará el % de Sílice y las ppm de fuga de Sodio determinadas anteriormente. El procedimiento es como sigue:

En la figura B-6 (anexo B) se ubica el porcentaje de Sílice en el eje de las X, se lee verticalmente hacia arriba hasta interceptar la curva del nivel de regeneración utilizado (8 lb NaOH) y luego horizontalmente hacia la izquierda hasta encontrar, en el eje de las Y, la fuga promedio de Sílice.

Para el 24.95% de SiO_2 se obtiene:

Fuga promedio de SiO_2 = 0.11 ppm

Luego, con la figura B-7 (anexo B) se encuentra el factor de corrección debido a la fuga de Sodio. Para ello, se ubica en el eje de las X la fuga de Sodio (en ppm CaCO_3); se lee hacia arriba hasta dar con la curva del nivel de regeneración correcto y seguidamente se proyecta una línea recta hacia el eje de las Y en donde se encuentra el factor de corrección.

Para 1 ppm de fuga de Sodio se tiene:

Factor de corrección de fuga de SiO_2 = 0.95

Entonces, al dividir la fuga promedio de Sílice entre el factor de corrección se encuentra la fuga corregida:

$$\text{Fuga promedio de sílice corregida} = \frac{0.11 \text{ ppm}}{0.95} = 0.12 \text{ ppm}$$

Estos valores de fuga que se han estimado son los que teóricamente ocurrirán en el punto final del ciclo de servicio, es decir cuando la resina aniónica se haya agotado.

7.1.3. ESPECIFICACION DE TANQUES PARA RESINAS.

Los tanques para resinas han sido especificados de manera que tengan un volumen total de 1 pie³ para poder contener 0.5 pie³ de resina, y cumplir con los requerimientos de expansión de lecho en la etapa de retrolavado (sección 3.3.1.3). Estos tanques se muestran en la figura 7.4 y tienen las siguientes especificaciones:

Altura	: 44 pulgadas
Diámetro	: 7 pulgadas
Volumen interno	: 1 pie ³
Material de construcción	: Polyglass (Fibra de vidrio recubierta con un polímero)
Presión máxima de operación	: 150 psig
Temperatura máxima de operación	: 120 °F

Para controlar la entrada y salida de flujos en los tanques, estos cuentan con una tapadera roscada (cabezal) que tiene las siguientes especificaciones (figura 7.5):

Diámetro : 3 pulgadas
Orificio de entrada : 1/2 pulgadas
Orificio de salida : 1/2 pulgadas
Orificio para conectar el distribuidor
(ubicado al centro de la tapadera) : 13/16 pulgadas

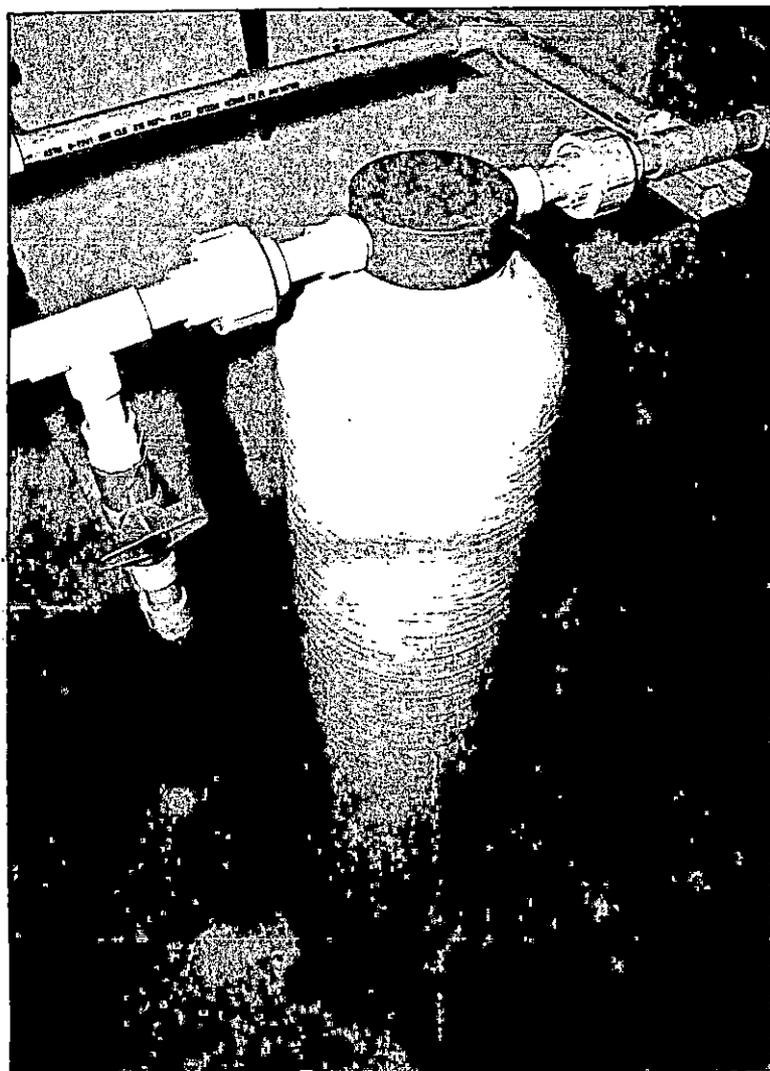


FIG. 7.4. TANQUE DE FIBRA DE VIDRIO PARA CONTENER RESINAS
(CATIONICA Y ANIONICA) UTILIZADOS EN EL SISTEMA
DESMINERALIZADOR DE LECHO DOBLE.

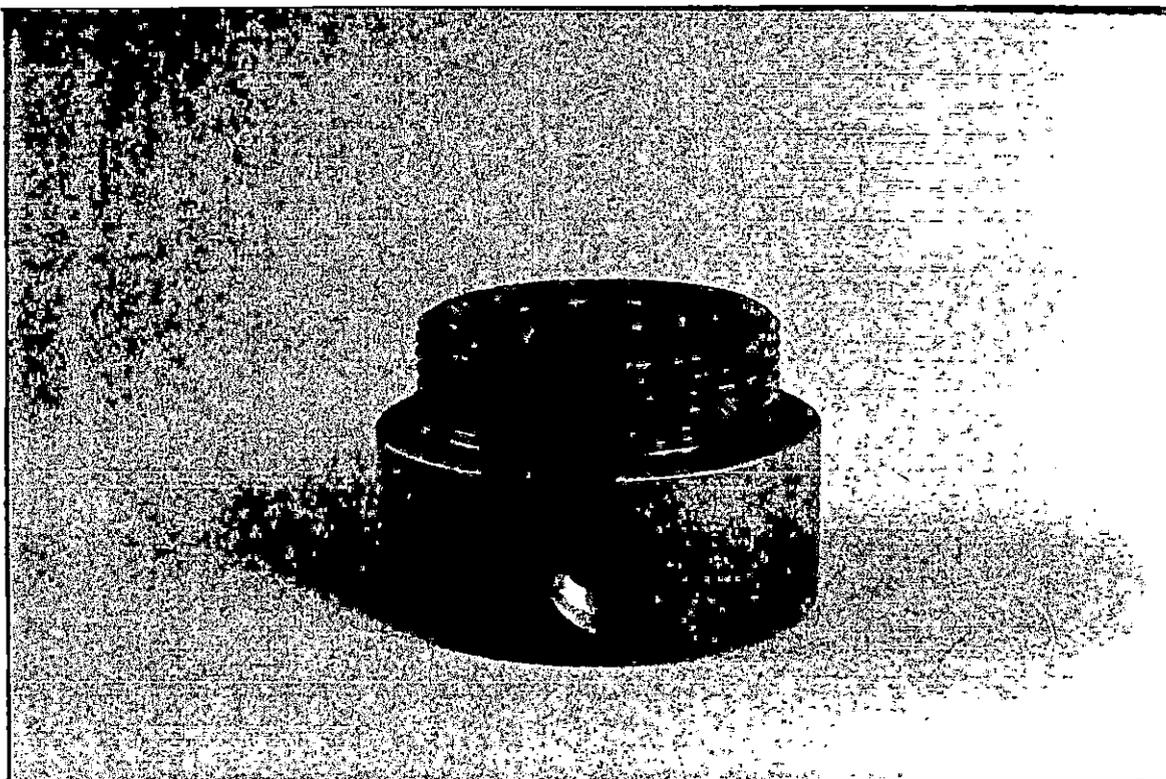


FIG. 7.5. TAPADERA PARA LOS TANQUES CONTENEDORES DE RESINAS DE INTERCAMBIO IONICO (FIG. 7.4).

7.1.4. ESPECIFICACION DE LA BOMBA PARA ENVIO DE AGUA.

Para manejar los diferentes flujos en el sistema desmineralizador de lecho doble se requiere del uso de una bomba que cuente con la potencia suficiente para vencer la caída de presión a través de los lechos de resinas, accesorios y tubería, de manera que puedan obtenerse las velocidades de flujo recomendadas para la operación óptima de las resinas.

En este orden, se selecciona una bomba que cuenta con las

siguientes características (ver fig. 7.6):

Potencia : 1/2 Hp

Voltaje : 115/230 V

Amperaje : 8.8/4.4 A

Rpm : 3450

Caudal : 5 gpm

Cabeza de descarga: 60 psi

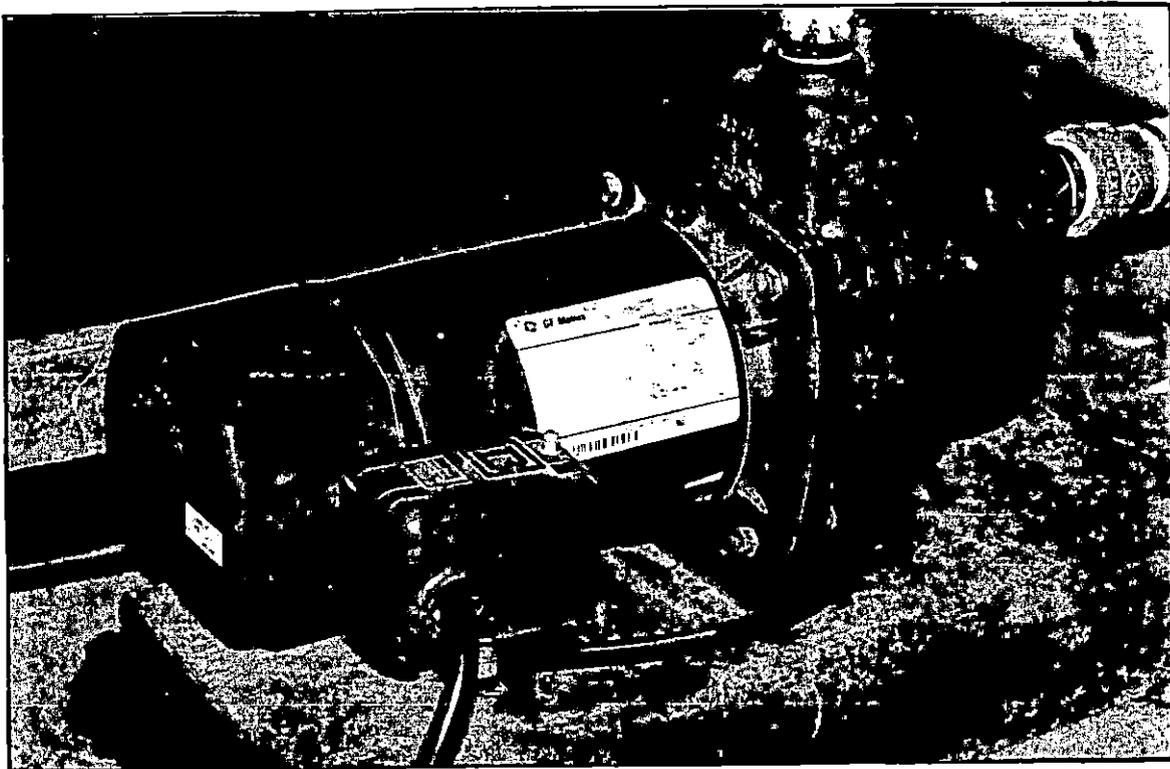


FIG. 7.6. BOMBA PARA EL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE
LECHO.

7.1.5. ESPECIFICACION DE INYECTORES.

Los inyectores de regenerante químico para las resinas se seleccionan en base a su capacidad de succión (del regenerante) bajo ciertas condiciones de operación que pueden ser controladas por el operario del sistema (por ejemplo, la velocidad de flujo). Adicionalmente se considera la resistencia mecánica y química que es necesaria de acuerdo al regenerante.

Estos inyectores son mecanismos del tipo venturi (ver fig. 7.7) y el principio de operación en que se basan es el siguiente: cuando un fluido de operación presurizado (flujo

motoriz) ingresa a la entrada del inyector, este es dirigido hacia la cámara de inyección (sección reducida con orificio de succión) y cambia a una corriente de alta velocidad. Este incremento de velocidad a través de la cámara de inyección resulta en una disminución en la presión (se genera un "vacío"), permitiendo de esta manera que el material líquido sea conducido a través de la puerta de succión e incorporado a la corriente motora (flujo total). Mientras la corriente a la motriz es difundida hacia la salida del inyector, su velocidad es reducida y de nuevo es convertida a energía de presión; pero esta vez, a un nivel de presión más bajo que la presión de entrada al inyector (16).

En otras palabras, la capacidad del inyector para succionar la solución química regenerante e incorporarla a la corriente final que será inyectada a la resina es función de la caída de presión entre los brazos del inyector, del flujo

volumétrico entrando al inyector, y de las propiedades físicas de la solución regenerante (como la viscosidad y la densidad).

En base a lo anterior, debe seleccionarse un inyector que succione una cantidad adecuada de regenerante que al mezclarse con el agua se logre la concentración requerida para la regeneración de cada resina. Estas concentraciones se especifican de acuerdo a lo recomendado por la bibliografía y para el caso que se está tratando se tiene lo siguiente:

a. Para la resina catiónica de ácido fuerte la concentración de ácido clorhídrico puede variar entre el 2% y 10% p/p según sea la relación de cationes monovalentes a cationes divalentes (ver sección 3.3.1.4). Del análisis del agua cruda servida a la planta piloto (Tabla 7-6) puede observarse que hay un 46% de cationes monovalentes (Na y K) contra un 54% de cationes divalentes (Ca y Mg); por lo que teóricamente se estima que una concentración entre el 4% y 5% p/p de HCl será adecuada para la regeneración de la resina catiónica ácido fuerte.

b. Para la resina aniónica de base fuerte se recomienda el uso de concentraciones menores al 4% p/p de Hidróxido de Sodio (Sección 3.3.1.4), por lo que se estima que una solución del 3% al 4% p/p de NaOH será adecuada para la regeneración de la resina aniónica base fuerte.

Entonces, en base a las consideraciones hechas anteriormente, se selecciona un inyector que proporcione las concentraciones indicadas cuando sea operado bajo las

siguientes condiciones* :

- a. Caída de presión a través del inyector : 15 psi aprox.
- b. Flujo motriz entrando al inyector : 2.15 gpm aprox.
- c. Flujo de succión del regenerante : menor de 0.07
gpm

El modelo de inyector seleccionado (Fig. 7.8) cuenta además con las siguientes características:

Entrada y salida	: 1/2 "
Puerta de succión	: Válvula check interna con bola de teflón, tapadera roscada con adaptador macho de 3/16".
Longitud total	: 5.9"
Longitud del punto de entrada a cámara de succión	: 2.5"
Material de construcción	: Kynar (Polivinil Fluorideno)

* Estas condiciones de operación son estimadas en base a los datos técnicos presentados por los fabricantes de inyectores.

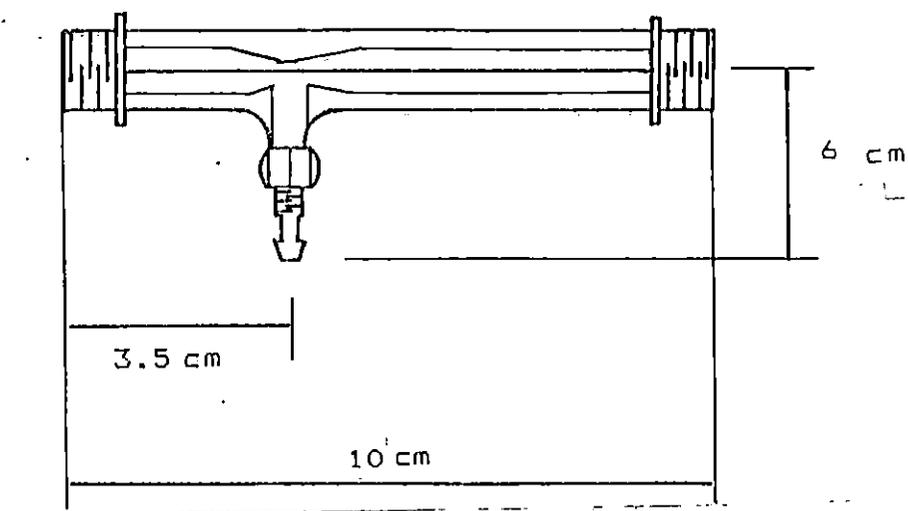


FIG. 7.7. DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL INYECTOR DE REGENERANTES QUIMICOS PARA RESINAS (16a).

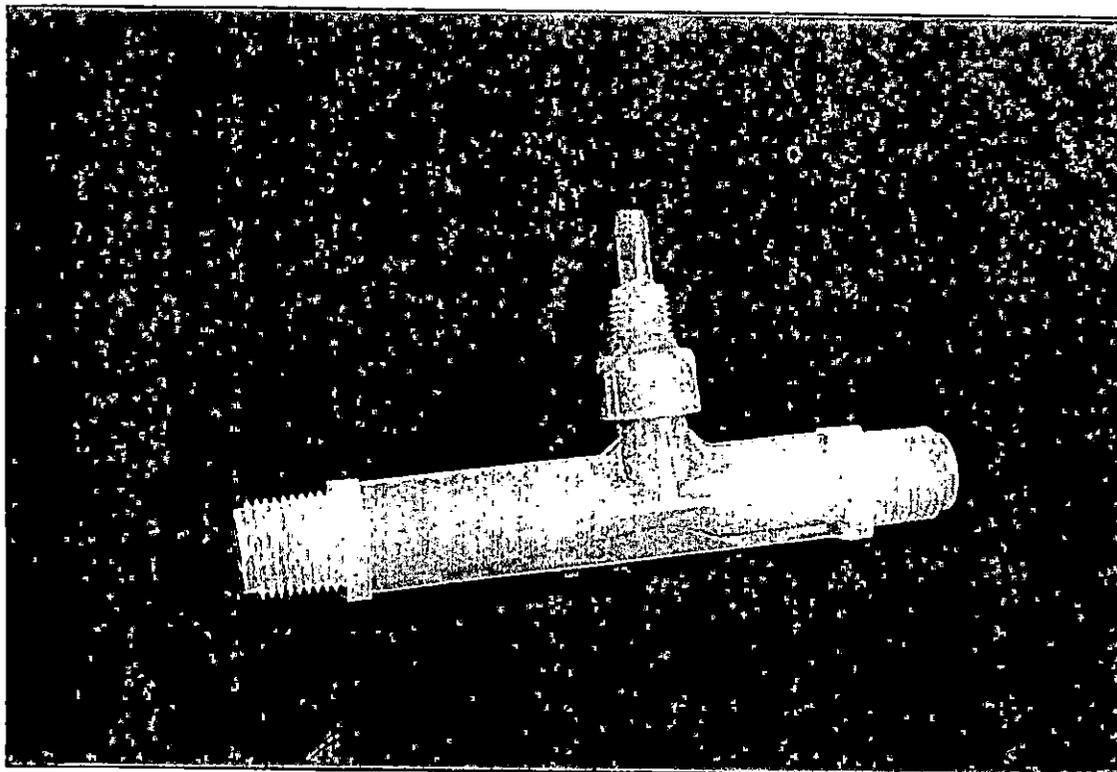


FIG. 7.8. INYECTOR DE REGENERANTES QUIMICOS PARA LAS RESINAS UTILIZADO EN EL SISTEMA DE DESMINERLIZACION.

7.1.6 ESPECIFICACION DE TANQUES PARA DESECHOS DE REGENERACION.

En base a los datos técnicos de las resinas (tabla 7-3 y 7-5) se calcula el volumen de agua de desecho generado en el ciclo de regeneración de ambas resinas para su captación y neutralización en tanques plásticos, y su posterior descarga a la red de alcantarillado. La neutralización se da entre la corriente ácida que proviene de la regeneración de la unidad catiónica y la corriente básica que proviene de la regeneración de la unidad aniónica. En la tabla 7-7 se presentan los volúmenes de desecho generados en las diferentes etapas de regeneración de las unidades catiónica y aniónica.

TABLA 7-7. VELOCIDADES DE FLUJO, TIEMPO, Y VOLUMENES DE DESECHO PRODUCIDOS EN LAS DIFERENTES ETAPAS DE LA REGENERACION DE LAS RESINAS CATIONICA Y ANIONICA (13a, 14a).

ETAPA	RESINA CATIONICA			RESINA ANIONICA		
	Flujo (gpm)	Tiempo (min)	Volumen (gal)	Flujo (gpm)	Tiempo (min)	Volumen (gal)
Retrolavado	1.60	10	16.00	0.800	10	8.0
Regeneración	0.75	15	11.25	0.500	15	7.5
Lav. lento	0.25	30	7.50	0.125	60	7.5
Lavado rápido	0.75	10	7.50	0.750	10	7.5
Volumen Total			42.25	Volumen Total		30.5
Volumen de la Resina Cationica + Resina Aniónica						72.75

El volumen total de desecho para ambas lechos de resinas es de 72.75 gal. En base a esto se determina que es necesario el uso de dos tanques plásticos de 55 gal cada uno, unidos en serie por vasos comunicantes para el manejo de los desechos de regeneración (ver figura 7.9).



FIG. 7.9. TANQUES PARA LA NEUTRALIZACIÓN DE DESECHOS DE LA REGENERACIÓN DE RESINAS CATIONICA Y ANIONICA.

7.2. ESPECIFICACION DEL LECHO MIXTO.

La columna de lecho mixto deberá ser usada únicamente para pulir agua desmineralizada y de ninguna manera para pro-

cesar agua cruda. Debido a lo anterior, no hay una forma fácil de calcular la capacidad de operación del lecho mixto dado que el agua que se le va a alimentar posee un contenido de minerales disueltos muy bajos (aproximadamente 1 ppm de Sólidos Totales Disueltos); y en consecuencia, resulta casi imposible realizar un análisis químico para establecer los parámetros necesarios en el dimensionamiento (por ejemplo: %Na, %Cl, etc.). Adicionalmente, los datos técnicos disponibles para el dimensionamiento de desmineralizadores son adecuados para cálculos con aguas crudas que típicamente poseen una concentración entre 200 y 500 ppm de sólidos totales disueltos.

Sin embargo, una forma práctica de estimar la capacidad (en galonaje) del lecho pulidor puede basarse en las siguientes consideraciones:

- a. Que la capacidad de intercambio de las resinas catiónica y aniónica es la misma que la capacidad calculada con los datos obtenidos a partir del análisis del agua cruda (ver sección 7.1.2); puesto que para regenerarlas se usarán los mismos niveles de regeneración, de HCl y NaOH, que se utilizaron antes, y además se simularán las mismas condiciones de regeneración (flujo de regeneración, lavado lento, etc.).
- b. Que alimentando agua desmineralizada de 3 μ mos de conductividad (1.5 ppm de sólidos totales disueltos) y esperando obtener agua de 0.5 μ mos de conductividad (0.25 ppm de sólidos totales disueltos), se estima que la cantidad de

minerales disueltos a remover es de 1.25 ppm (0.073 gpg). Esta concentración puede servir de base para estimar el galonaje que teóricamente puede producir el lecho mixto.

7.2.1. CALCULO APROXIMADO DEL GALONAJE DE AGUA PULIDA DADO POR EL LECHO MIXTO.

Se construirá un lecho mixto que contenga un volumen total de mezcla de resinas de 0.1 pie^3 . En este, la capacidad total de intercambio de la resina catiónica debe ser igual a la capacidad total de intercambio de la resina aniónica puesto que el intercambio iónico se da en forma simultanea. Esto implica que el volumen de resina catiónica será diferente al volumen de resina aniónica debido a la diferencia en sus capacidades de intercambio.

El cálculo de los volúmenes de resina es como sigue:

$$\text{Capacidad catiónica} = \text{Capac. intercambio} \times \text{Vol. resina} \quad (7.10)$$

$$\text{Capacidad catiónica} = 28,300 \text{ gr/pie}^3 \times V \text{ resina} \quad (7.11)$$

$$\text{Capacidad aniónica} = 17,009.7 \text{ gr/pie}^3 \times V \text{ resina} \quad (7.12)$$

$$V_T = \text{Volumen}_{R.Catiónica} + \text{Volumen}_{R.Aniónica} \quad (7.13)$$

donde $V_T = 0.1 \text{ pie}^3$

Por simultaneo de las ecuaciones (7.11, 7.12 y 7.13) resulta que el volumen aproximado de resina catiónica será de 0.04 pie³ y 0.06 pie³ para la resina aniónica, para una capacidad total aproximada de 1,058 granos.

Luego el volumen de agua pulida que teóricamente proporcionará el lecho mixto de 0.1 pie³ será:

$$V_{\text{agua pulida}} = \frac{\text{Capacidad total}}{\text{Sólidos totales disueltos a remover}} \quad (7.14)$$

$$V_{\text{agua pulida}} = \frac{1,058 \text{ gr}}{0.073 \text{ gr/gal}}$$

$$V_{\text{agua pulida}} = 14,493.2 \text{ gal.}$$

Esto es en base a que el agua de alimentación será agua desmineralizada con una conductividad de 3 µmhos/cm como máximo.

El lecho mixto construido se muestra en la figura 7.10, y sus dimensiones son las siguientes:

Altura : 1 m

Diámetro : 3 "

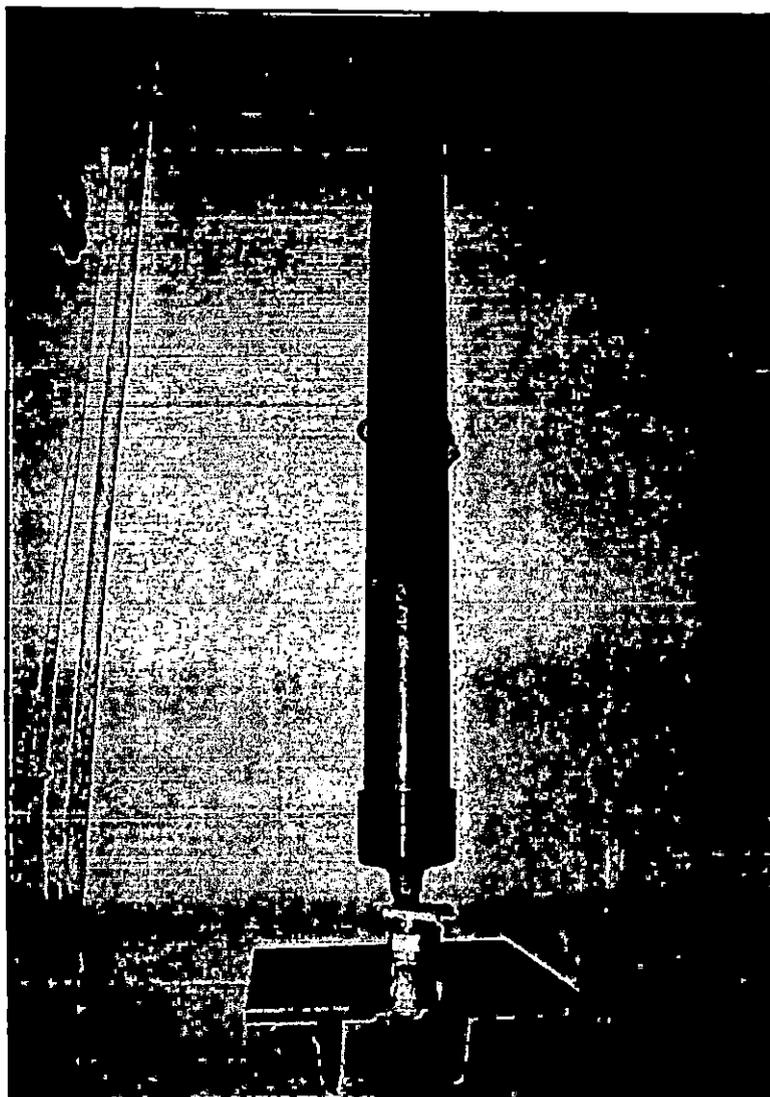
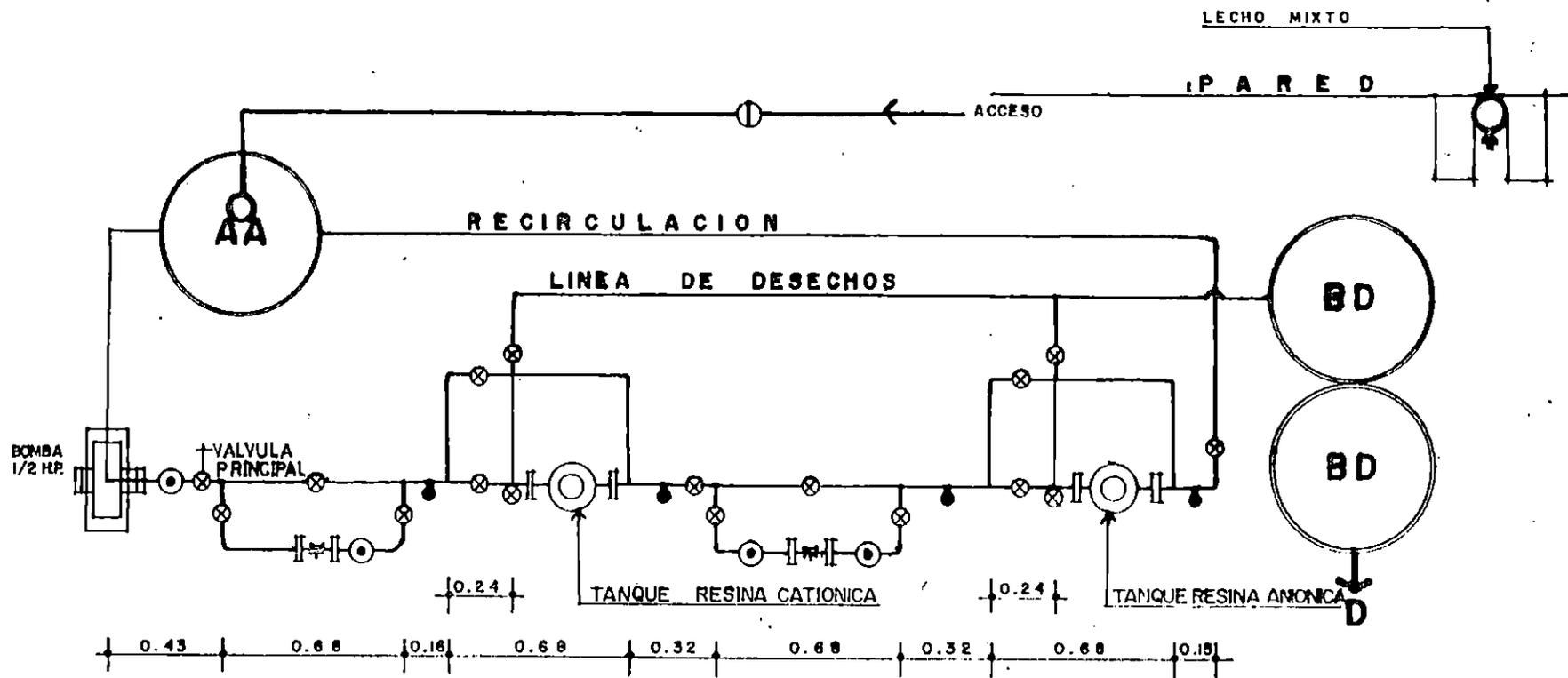


FIG. 7.10. COLUMNA DE LECHO MIXTO PARA PULIR AGUA DESMINE-
RALIZADA.

7.3. PLANOS DE CONSTRUCCION.

A continuación se presentan los planos de construcción del sistema completo de desmineralización total de agua dimensionado según lo expuesto en las secciones anteriores, y en la figura 7.11 se muestra el sistema ya construido.

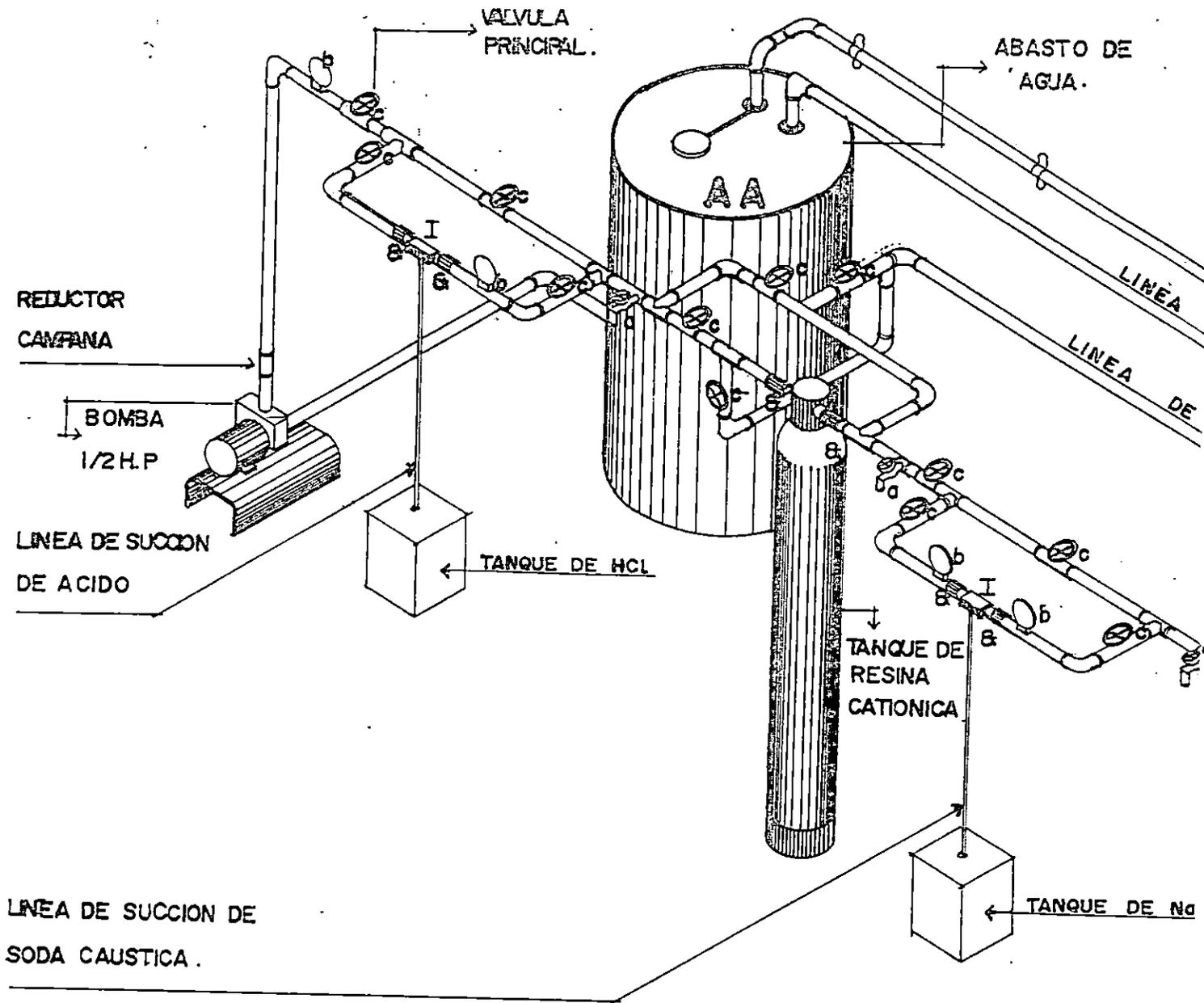


VISTA EN PLANTA DEL SISTEMA DE DESMINERALIZACION DE AGUA.

esc. 1:25

SIMBOLO	CARACTERISTICAS
	I INYECTORES T/VENTURY
	d GRIFOS
	c VALVULA BOLA.
	v VALVULA GLOBO
	b MANOMETRO
	TANQUES DE RESINA h=1.15 D=0.16 cms
	a ADAPTADORES
AA	ABASTO DE AGUA
BD	BARRIL DE DESECHOS
D	DEBAQUE

NOTA.
TODA LA RED ES DE RV.C. ø 1/2"



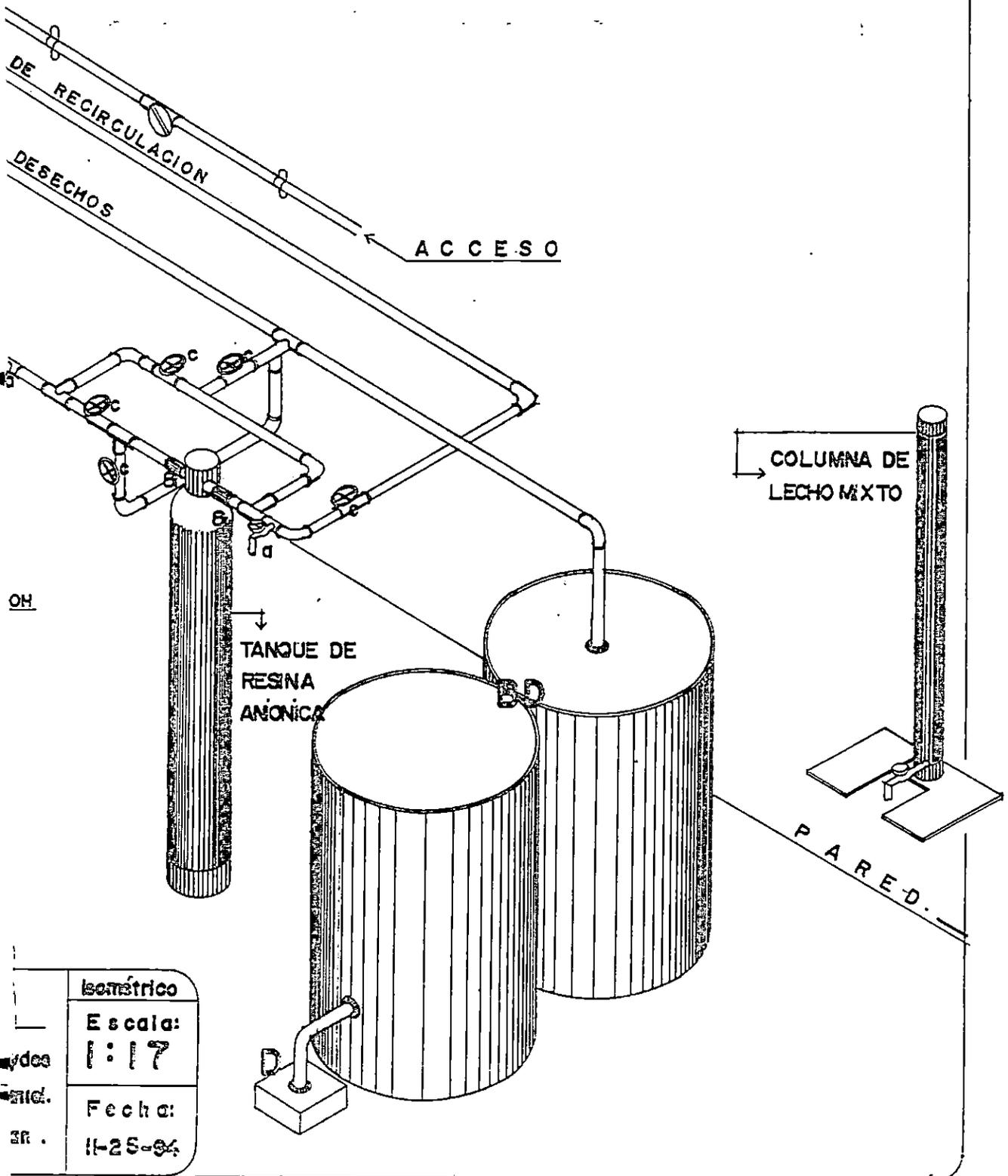
UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR...
 FAC. DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA.
 ESC. DE INGENIERIA QUIMICA.

TRABAJO DE GRADUACION.

Tema:
 DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN
 SISTEMA DE DESMINERALIZACION
 DE AGUA PARA USO EN LOS LAB.
 INGENIERIA QUIMICA DE LA UES.

ALUMNOS :

- FUENTES TREMINIO → HC
- BJENAVENTURA MEJIA → D
- RAMAGUA CALDERON → JU



OH

aydes
nid.
SR .

Isométrico
Escala: 1:17
Fecha: 11-25-94

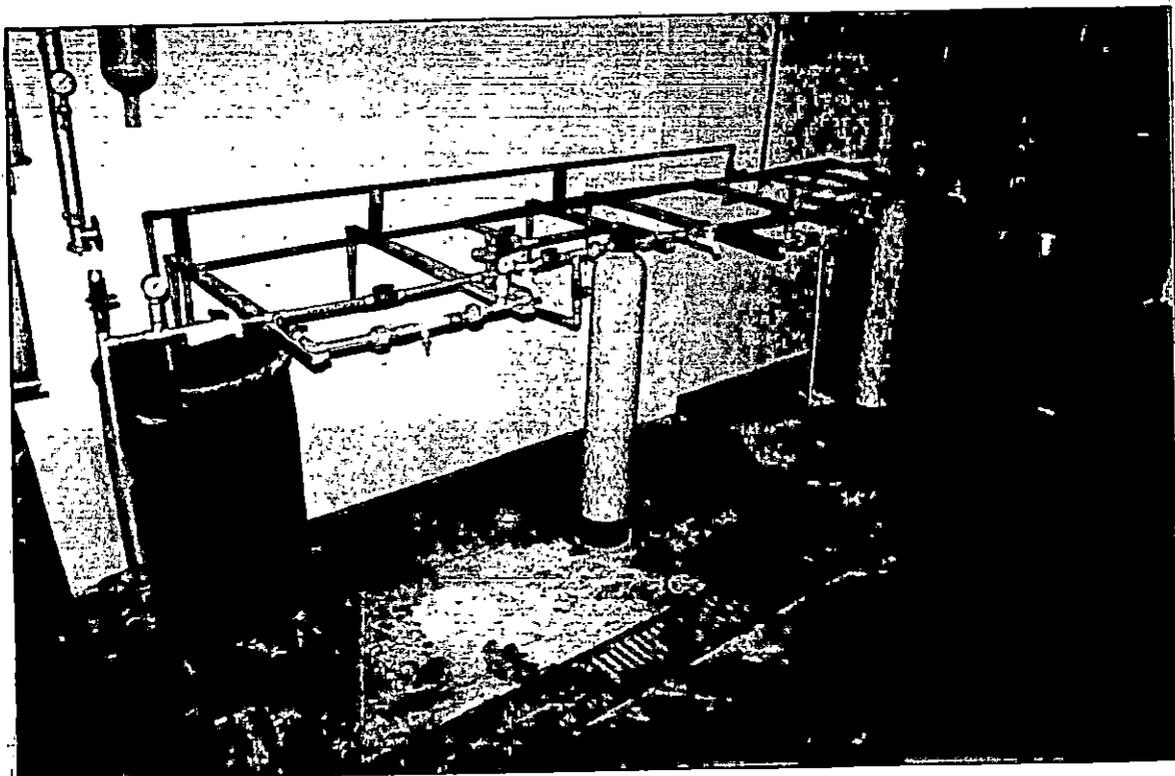


FIG. 7.11. SISTEMA DE DESMINERALIZACION TOTAL DE AGUA PARA USO EN LOS LABORATORIOS DE LA PLANTA PILOTO DE LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.

CAPITULO VIII

COSTOS DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR

B.1. COSTOS DE CONSTRUCCION.

La estimación del costo total del sistema desmineralizador se realiza en base a los precios vigentes en el mercado hasta el mes de Octubre de 1994 y consecuentemente los datos presentados en esta sección estarán sujetos a los cambios de precios en el mercado.

En la tabla 8-1 se presenta en detalle los costos para cada uno de los componentes del sistema desmineralizador.

TABLA 8-1. DETALLE DE PRECIOS DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR.

Nombre	Cantidad	Precio Unif- tario (¢)	Precio Total (¢)
Bomba	1	1,980.00	1,980.00
Tanques plásticos	3	100.00	300.00
Válvula de bola	19	37.70	716.30
Válvula flotadora completa	1	119.70	119.70
Grifos	5	17.25	86.25
Tubería, PVC de 1/2 "	18 m	3.0/m	54.00
Tubería, PVC de 3"	1 m	18.80/m	18.80
Unión universal, PVC, de 1/2 "	9	6.63	59.67
Unión universal, PVC, de 1 "	1	19.06	19.06
Tee, PVC, 1/2"	24	1.49	35.76

Continuación de tabla 8-1.

Nombre	Cantidad	Precio Unitario (¢)	Precio Total (¢)
Reductor campana galvanizado de 1½ x 1"	1	15.00	15.00
Niple todo rosca de 1½, galv.	1	6.40	6.40
Codos, PVC, de 1/2" x 90°	20	2.67	53.40
Adaptadores machos, PVC, 1/2"	40	1.00	40.00
Camisas rosca-das, PVC, 1/2"	9	2.05	18.45
Bushing reductor, PVC, 1/2 x ¼	4	6.60	26.40
Manómetros	4	80.00	320.00
Adaptador macho PVC, 1½ "	4	6.70	26.80
O-ring de 1" x 3/8	2	13.75	27.50
Escuadras de 12x14"	6	10.75	64.50
Tapones hembra, PVC de 3"	2	22.00	44.00
Tanques para resinas	2		
Resina catiónica	0.5 pie ³		
Resina aniónica	0.5 pie ³		
Distribuidor	2		
Tapadera para tanques de resina	2		
Inyectores	2		
			7,200.00
TOTAL			11,231.99

NOTA: Todos los precios incluyen IVA.

CAPITULO IX

PRESENTACION, EVALUACION ESTADISTICA Y DISCUSION DE RESULTADOS

9.1. PRESENTACION DE RESULTADOS.

Los datos que a continuación se presentan son los resultados de las pruebas realizadas tanto en los inyectores como en las resinas catiónica y aniónica con los cuales se efectuará la evaluación estadística del diseño experimental para cumplir con lo especificado en el capítulo 6.0.

9.1.1 RESULTADOS DE PRUEBA CON LOS INYECTORES.

En la tabla 9-1 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas del inyector de HCl para la resina catiónica de ácido fuerte, y en la tabla 9-2 se presentan los resultados obtenidos con el inyector de NaOH para la resina aniónica de base fuerte.

En ambos casos, la variable independiente es la posición de la válvula principal (Fig. 10.1) y la variable respuesta es la concentración de regenerante obtenida a diferentes posiciones de la válvula principal. Cada posición de esta válvula define una velocidad de flujo total saliendo del inyector, este flujo incluye el agua que entra al inyector (flujo motriz) más el flujo de regenerante que ha sido succionado por el inyector. Las posiciones de la válvula principal están definidas de tal manera que la posición número 1 representa a

la válvula completamente abierta (flujo máximo), y las siguientes posiciones corresponden a flujos menores. Es decir, que a medida que aumenta el número de la posición de la válvula la velocidad de flujo disminuye como se observarse en las tablas 9-1 y 9-2 . A estos resultados se les aplicará la evaluación estadística planteada en el diseño experimental para determinar cual es la concentración óptima de regenerante necesaria en cada caso según lo establecido en la sección 7.1.6.

TABLA 9-1. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE POSICION DE LA VALVULA PRINCIPAL CONTRA CONCENTRACION EFECTUADAS EN EL INYECTOR DE HCl PARA LA RESINA CATIONICA.

	Posición de válvula principal			
	(1) 3,1 gpm	(2) 2.22 gpm	(3) 1.07 gpm	(4) 0.93 gpm
Repeticiones	% HCl	% HCl	% HCl	% HCl
1	1.50	1.93	3.62	4.89
2	1.48	1.91	3.67	4.92
\bar{X}	1.49	1.92	3.60	4.91

NOTA: La concentración de Acido Clorhídrico (HCl) esta dada en porcentaje peso/peso (% p/p), y la velocidad de flujo (en gpm) que acompaña a cada posición de la válvula corresponde al flujo total de la mezcla regenerante-agua que sale del inyector.

TABLA 9-2. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE POSICION DE LA VÁLVULA PRINCIPAL CONTRA CONCENTRACION EFECTUADAS EN EL INYECTOR DE NaOH PARA LA RESINA ANIONICA.

	Posición de válvula principal			
	(1) 2.22 gpm	(2) 2.06 gpm	(3) 1.57 gpm	(4) 1.05 gpm
Repeticiones	% NaOH	% NaOH	% NaOH	% NaOH
1	1.60	1.67	2.04	3.96
2	1.56	1.65	2.06	4.00
\bar{X}	1.58	1.66	2.05	3.98

NOTA: La concentración de NaOH esta dada en % p/p, y los gpm reportados corresponden al flujo total saliendo del inyector.

9.1.2 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS EN LAS RESINAS CATIONICA Y ANIONICA.

En la tabla 9-3 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas de la unidad catiónica de ácido fuerte y en las tablas 9-4, 9-5 y 9-6, se presentan los resultados obtenidos en la prueba de la unidad aniónica para los diferentes niveles de regeneración utilizados. En la figura 9-1 se representan gráficamente los resultados mostrados en la tabla 9-3 y en las figuras 9-2 y 9-3 se representan gráficamente los resultados de la prueba en la unidad aniónica. La prueba de la unidad catiónica consiste en regenerar la resina catiónica a diferen-

tes niveles de regeneración y cuando la unidad este lista para el ciclo de servicio se inicia el agotamiento hasta un punto en el cual la concentración de dureza en el agua saliendo de la unidad es prácticamente la misma que en el agua de alimentación. De acuerdo a esto, la variable independiente en esta prueba es el nivel de regeneración y la variable respuesta (variable dependiente) es el tiempo de servicio que da la unidad antes de agotarse. La prueba se realizó a una velocidad de flujo de servicio constante de 1 gpm, por lo que un tiempo de operación determinado automáticamente define un galonaje de agua decationizada producida.

De la tabla 9-3 puede observarse que mientras más alto es el nivel de regeneración mayor es el tiempo de servicio que proporciona la unidad catiónica; y por medio de la evaluación estadística definida en el diseño experimental se establecerá si existe diferencia entre los diferentes niveles de regeneración utilizados, y a partir de este resultado se definirá cual de estos es el mejor para regenerar la resina catiónica. La evaluación estadística se realizará tomando como base de cálculo las mediciones de dureza*, para cada nivel de regeneración, correspondientes al tiempo de operación en el cual se obtiene el galonaje que teóricamente producirá la resina

*Aunque la fuga de sodio es el problema principal que se da en la unidad catiónica en relación a la calidad del agua, se eligió la dureza para hacer esta evaluación debido a que en la Planta Piloto no se cuenta con un fotómetro de llama requerido para realizar los análisis de sodio, mientras que la dureza es un parámetro fácilmente medible.

cuando es regenerada con 9 lbs de HCl 100% puro/pie³ (nivel máximo de regeneración recomendado). De acuerdo a los cálculos realizados en la sección 7.1.2, un volumen de 0.5 pie³ de resina catiónica esta en la capacidad de producir 557 gal de agua decationizada. Por esta razón la evaluación estadística se realiza a un valor de 570 gal de agua decationizada.

En la tabla 9-3, el nivel de regeneración número 1 (N1) corresponde a 5 lbs de HCl 100%/pie³ de resina, el nivel número 2 (N2) a 7 lbs de HCl 100%/pie³, y el nivel 3 (N3) a 9 lbs de HCl 100%/pie³ de resina catiónica. En términos de galones de HCl al 32%/pie³ de resina se tiene que a N1 corresponden 1.5 gal de HCl, a N2 corresponden 2.25 gal y a N3 corresponden 3 gal.

La prueba en la unidad aniónica consiste en regenerar la resina aniónica a diferentes niveles de regeneración y cuando la unidad este lista para el ciclo de servicio se inicia el agotamiento tomando muestras cada 30 minutos hasta que la conductividad del agua saliendo de la unidad llegue a un valor de 30 μ mhos, midiéndose la concentración de sílice, cloruros y sulfatos en las muestras tomadas. De acuerdo a esto la variable independiente en esta prueba, al igual que en la unidad catiónica, es el nivel de regeneración y la variable respuesta

es el tiempo de servicio que da la unidad antes de agotarse*.

La prueba se realizó a velocidad de flujo de servicio constante (1 gpm) por lo que el tiempo de operación define automáticamente el galonaje de agua desmineralizada producida.

De la tabla 9-4 puede observarse que mientras más alto es el nivel de regeneración mayor es el tiempo de servicio que proporciona la unidad antes de agotarse, y por medio de la evaluación estadística se decidirá cuál es el mejor nivel de regeneración para esta resina. La evaluación estadística se realizará tomando como base de cálculo la concentración de iones cloruro y sílice que se encuentran presentes cuando el sistema produce un volumen de agua desmineralizada cercano al que teóricamente debe producir la resina aniónica regenerada con el nivel máximo recomendado que es de 8 lbs de NaOH 100%puro/pie³. De la sección 7.1.2 se tiene que la resina aniónica puede producir, teóricamente, 228 galones de agua desmineralizada cuando se regenera con el nivel máximo recomendado. Por esta razón, la evaluación estadística de la prueba con la resina aniónica se realiza cuando se han obtenido 240 galones de agua desmineralizada (10 galones más de lo estimado teóricamente).

*Para los fines de este trabajo se entenderá que el equipo desmineralizador esta agotado cuando la conductividad sea de 10 μ mhos (de acuerdo a la norma 1080 del anexo A); sin embargo, la prueba se realiza hasta un valor de conductividad de 30 μ mhos debido a que es en este punto en donde se alcanza el galonaje que teóricamente debe producir la resina aniónica regenerada con el nivel máximo recomendado.

TABLA 9-3. VARIACION DE LA DUREZA EN FUNCION DEL TIEMPO DURANTE EL CICLO DE SERVICIO EN LAS PRUEBAS DE LA RESINA CATIONICA.

Tiempo (min)	NIVEL DE REGENERACION					
	3		2		1	
	Repet. 1	Repet. 2	Repet. 1	Repet. 2	Repet. 1	Repet. 2
0	0.30	0.40	0.39	0.49	1.3	2.0
30	0.60	0.40	0.39	0.49	2.1	2.9
60	0.40	0.25	0.39	0.49	3.0	4.0
90	0.50	0.25	0.39	0.49	3.0	4.0
120	0.25	0.29	0.39	0.49	3.0	4.0
150	0.25	0.29	0.39	0.49	3.0	4.0
180	0.26	0.29	0.39	0.49	3.0	4.0
210	0.25	0.29	0.39	0.49	3.0	4.0
240	0.25	0.29	0.39	0.49	3.0	4.0
270	0.25	0.29	0.39	0.25	3.0	4.0
300	0.25	0.29	0.45	0.25	3.0	4.0
330	0.25	0.29	0.51	0.25	3.0	4.0
360	0.25	0.29	0.51	0.25	3.0	4.0
390	0.25	0.29	0.51	0.25	3.0	4.0
420	0.26	0.29	0.55	0.98	6.0	4.0
450	0.30	0.29	0.79	1.71	6.0	4.0
480	0.30	0.37	0.79	1.96	25.2	8.0
510	0.30	0.37	1.50	1.96	37.5	15.8
540	0.41	0.37	2.21	1.96	52.5	32.0
570	0.41	0.37	3.67	2.21	72.8	60.3
600	0.41	0.37	5.60	2.94	90.0	120.4
630	0.41	0.37	7.4	4.2	117.5	148.9
660	0.41	0.37	9.7	8.6	153.0	175.3
690	0.41	0.37	10.8	11.2	175.5	201.6
720	0.41	0.37	12.1	13.5	201.0	220.1
750	0.41	0.45	16.2	17.7	205.7	238.3

Continua...

Continuación de tabla 9-3.

Tiempo (min)	NIVEL DE REGENERACION					
	3		2		1	
	Repet. 1	Repet. 2	Repet. 1	Repet. 2	Repet. 1	Repet. 2
780	0.50	0.53	18.3	24.5	214.2	250.7
810	0.60	0.53	25.3	27.7	217.3	265.6
840	0.80	0.70	29.4	30.1	221.0	283.6
870	0.80	0.81	33.6	34.4	253.8	284.5
900	0.85	0.81	40.2	36.9		
930	1.00	1.20	45.1	41.3		
960	1.00	1.20	50.3	45.6		
990	1.75	1.20	65.5	57.8		
1020	4.10	2.50	75.7	69.8		
1050	4.60	5.00	87.9	83.9		
1080	5.10	6.10	100.7	96.3		
1110	5.10	6.10	155.9	145.4		
1140	5.10	6.20	200.2	197.2		
1170	5.00	6.20	225.6	200.7		
1200	7.70	6.80	241.3	230.7		
1230	8.60	6.80	276.6	263.3		
1260	12.00	9.00				
1290	12.60	18.30				
1320	14.40	20.50				
1350	17.80	26.10				
1380	20.60	29.20				
1410	24.80	33.50				

NOTA: Los valores de dureza reportados para cada nivel de regeneración, a dos repeticiones, están dados en ppm como CaCO_3 .

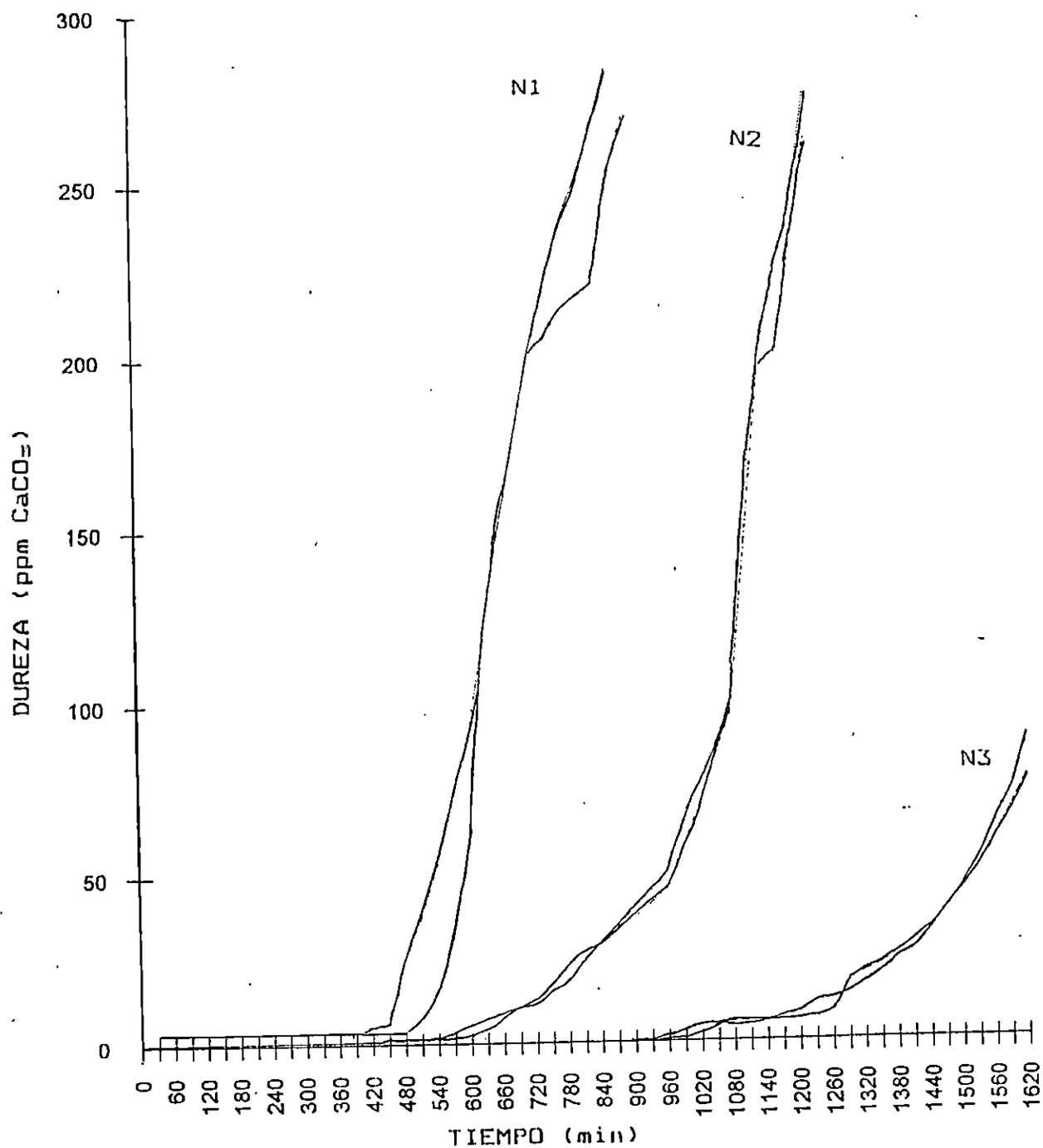


FIG. 9.1. REPRESENTACION GRAFICA DE LA VARIACION DE LA DUREZA EN FUNCION DEL TIEMPO DE SERVICIO Y DEL NIVEL DE REGENERACION EN LA PRUEBA DE LA UNIDAD CATIONICA. N1, N2, N3: NIVELES DE REGENERACION.

TABLA 9-4. RESULTADOS DE PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA
CORRESPONDIENTES AL NIVEL DE REGENERACION 1 (N1).

NIVEL DE REGENERACION 1 (N1): 9 lb HCl 100%/pie ³ y 6 lb NaOH 100%/pie ³								
	1° REPETICION				2° REPETICION			
Tiempo (min)	Conducti.	Silice	Cloruros	Sulfatos	Conducti.	Cloruros	Sulfatos	Silice
0	10.0	ND	0.12	ND	10.0	0.14	ND	0.10
30	9.0	ND	0.12	ND	9.0	0.14	ND	ND
60	8.0	ND	0.10	ND	8.0	0.12	ND	ND
90	8.0	ND	0.10	ND	7.5	0.10	ND	ND
120	7.5	ND	0.10	ND	7.0	0.10	ND	ND
150	5.0	ND	0.06	ND	6.5	0.08	ND	ND
180	4.8	0.12	0.02	ND	2.9	0.02	ND	1.2
210	9.3	17.10	0.28	0.23	11.0	0.31	0.27	15.6
240	18.9	37.10	0.53	0.90	21.0	0.58	0.94	36.4
270	23.2	73.70	0.62	0.91	24.0	0.73	0.95	68.4
300	29.5	89.10	0.97	1.10	30.6	1.04	0.99	87.9

ND: no detectable.

NOTA: En esta tabla, la conductividad esta dada en $\mu\text{mhos/cm}$,
la Silice en ppm de SiO_2 , los Cloruros en ppm Cl^- , y
los Sulfatos en ppm SO_4^{2-} .

TABLA 9-5. RESULTADOS DE PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA CORRESPONDIENTE AL NIVEL DE REGENERACION 2 (N2).

NIVEL DE REGENERACION 2 (N2): 9 lbs HCl 100%/pie ³ y 8 lbs NaOH 100% puro/pie ³								
Tiempo (min)	1° REPETICION				2° REPETICION			
	Conducti.	Silice	Cloruros	Sulfatos	Conduct.	Cloruros	Sulfatos	Silice
0	10.8	0.31	0.21	0.12	10.2	0.22	0.10	0.28
30	9.2	0.15	0.20	0.07	8.8	0.17	ND	0.16
60	7.5	0.10	0.14	ND	8.8	0.15	ND	0.11
90	7.0	ND	0.11	ND	6.8	0.10	ND	ND
120	7.0	ND	0.11	ND	6.5	0.10	ND	ND
150	6.3	ND	0.06	ND	5.8	0.04	ND	ND
180	3.4	ND	ND	ND	3.1	ND	ND	0.09
210	6.6	3.2	0.04	ND	6.4	0.05	ND	4.10
240	10.3	14.70	0.20	ND	10.0	0.19	ND	15.20
270	16.0	22.10	0.38	ND	15.8	0.34	ND	21.9
300	19.7	41.00	0.41	0.06	19.9	0.40	0.06	38.80
330	25.1	53.70	0.57	0.14	24.8	0.54	0.10	51.40
360	27.9	66.50	0.62	0.19	28.1	0.65	0.21	68.00
390	32.3	89.10	0.77	0.27	33.2	0.81	0.30	90.30

ND: No Detectable.

NOTA: En esta tabla, la conductividad esta dada en $\mu\text{mhos/cm}$, la concentración de Silice en ppm de SiO_2 , la concentración de Cloruros en ppm de Cl^- , y la concentración de Sulfatos en ppm de SO_4^{2-} .

TABLA 9-6. RESULTADOS DE PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA CORRESPONDIENTE AL NIVEL DE REGENERACION 3 (N3).

NIVEL DE REGENERACION 3 (N3): 9 lbs HCl 100%/pie ³ y 10 lbs NaOH 100%puro/pie ³								
	1° REPETICION				2° REPETICION			
Tiempo (min)	Conducti.	Silice	Cloruros	Sulfatos	Conduct.	Cloruros	Sulfatos	Silice
0	10.2	0.21	0.16	0.04	10.0	0.14	ND	0.19
30	9.0	0.10	0.12	ND	8.5	0.11	ND	0.06
60	7.6	0.06	0.11	ND	7.0	0.11	ND	ND
90	6.5	ND	0.10	ND	6.3	0.10	ND	ND
120	5.9	ND	0.09	ND	6.0	0.08	ND	ND
150	5.3	ND	0.05	ND	5.5	0.05	ND	ND
180	3.0	ND	ND	ND	2.7	ND	ND	ND
210	4.5	ND	0.04	ND	4.0	0.02	ND	0.09
240	6.8	1.50	0.08	ND	7.0	0.06	ND	1.30
270	10.2	10.20	0.14	ND	10.5	0.16	ND	11.60
300	13.1	20.80	0.22	ND	13.0	0.22	ND	22.30
330	16.0	33.00	0.30	ND	15.6	0.27	ND	34.30
360	19.0	48.20	0.33	0.02	18.2	0.31	ND	47.10
390	21.9	61.60	0.45	0.05	22.7	0.48	0.08	62.40
420	25.8	85.00	0.60	0.15	26.0	0.64	0.13	87.00
450	29.4	97.10	0.68	0.25	29.6	0.69	0.21	98.20

ND: no detectable.

NOTA: En esta tabla, la conductividad esta dada en $\mu\text{mhos/cm}$, la concentración de Silice en ppm de SiO_2 , la concentración de Cloruros en ppm de Cl^- , y la concentración de Sulfatos en ppm de SO_4^{2-} .

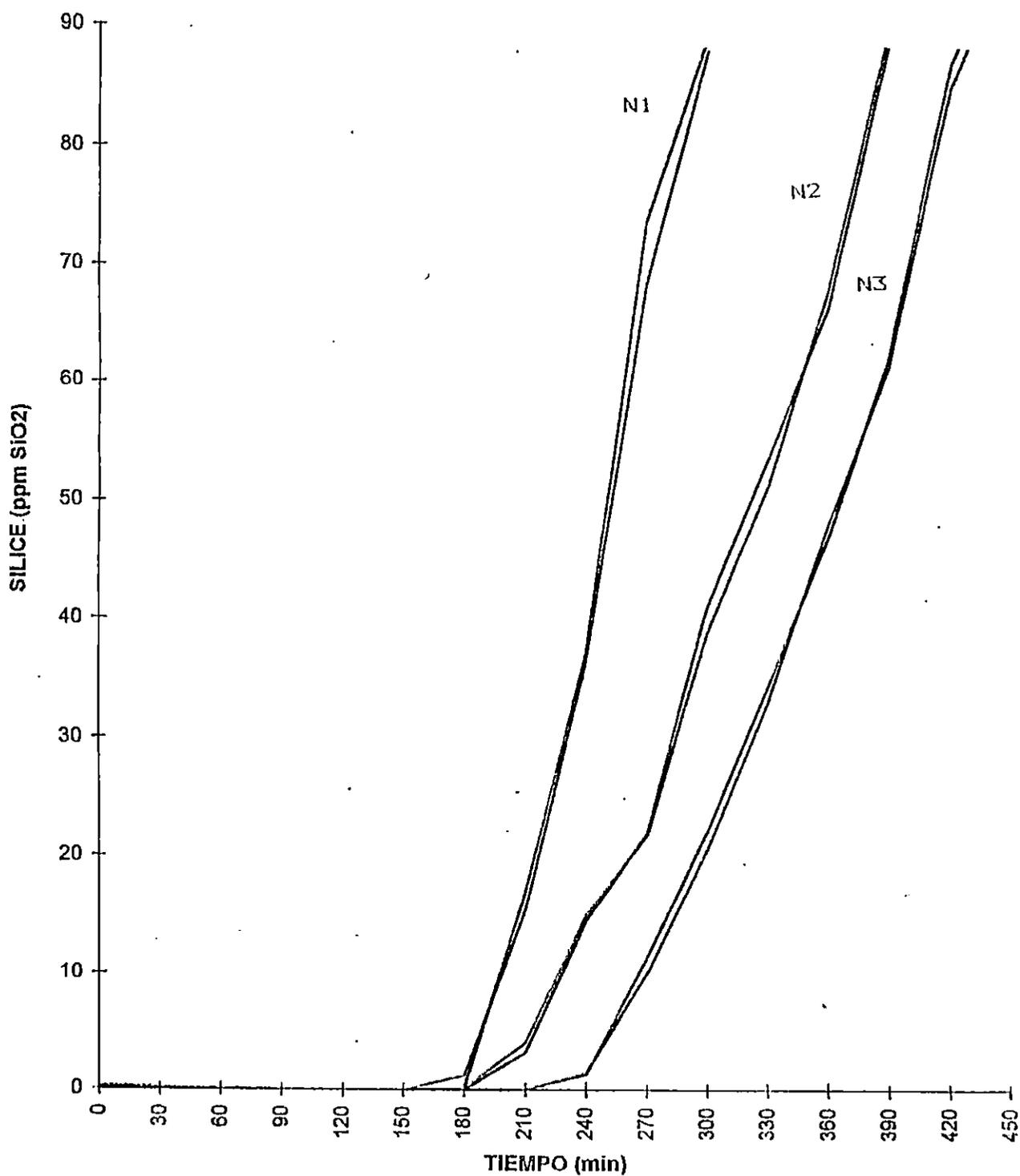


FIG. 9.2. VARIACION DE LA SILICE CON EL NIVEL DE REGENERACION Y CON EL GALONAJE TOTAL DE AGUA DESMINERALIZADA PRODUCIDA DURANTE LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA. N1, N2, N3: NIVELES DE REGENERACION.

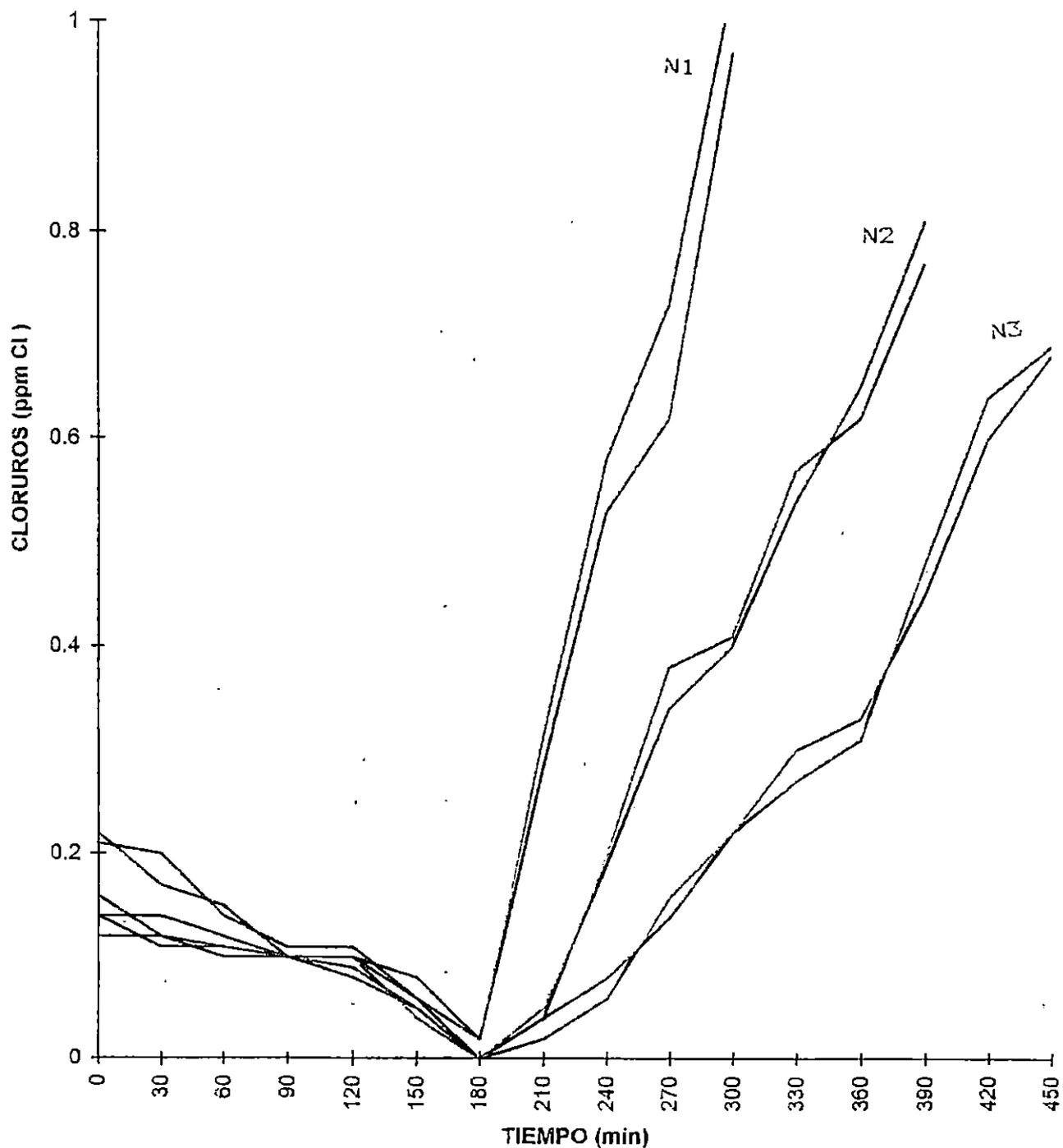


FIG. 9.3. VARIACION DE LOS CLORUROS CON EL NIVEL DE REGENERACION Y CON EL GALONAJE TOTAL DE AGUA DESMINERALIZADA PRODUCIDA DURANTE LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA. N1, N2, N3: NIVELES DE REGENERACION.

En todas las tablas y figuras presentadas en la sección anterior, el tiempo cero al que se hace referencia corresponde al momento en el cual se inicia el ciclo de servicio del sistema desmineralizador de lecho doble.

9.2. EVALUACION ESTADISTICA Y ANALISIS DE RESULTADOS.

9.2.1 EVALUACION Y ANALISIS DE LAS PRUEBAS CON LOS INYECTORES.

En la tabla 9-7 se presentan los parámetros para el análisis de varianza (ANVA) de la experimentación realizada con el inyector de ácido clorhídrico, y en las tablas 9-8 y 9-9 se presenta el análisis de varianza correspondiente, evaluado según lo establecido en el anexo C.

TABLA 9-7. RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL INYECTOR DE ACIDO CLORHIDRICO PARA LA RESINA CATIONICA, CON LOS PARAMETROS NECESARIOS PARA EL ANALISIS DE VARIANZA (VARIABLE RESPUESTA: % P/P DE HCl).

Repeti- ciones	Posiciones de válvula principal				\bar{x}	S_{n-1}	%CV	ΣX	ΣX^2
	1	2	3	4					
1	1.5	1.93	3.62	4.89	2.985	1.5653	52.43	11.94	42.9914
2	1.48	1.91	3.57	4.92	2.97	1.5818	53.26	11.88	42.7898
\bar{x}	1.49	1.92	3.595	4.905	2.9775				
S_{n-1}	0.0141	0.0141	0.0353	0.0212					
%CV	0.95	0.73	0.98	0.43					
ΣX	2.98	3.84	7.19	9.81				23.82	
ΣX^2	4.4404	7.373	25.8493	48.1195					85.7822

TABLA 9-8. RESULTADO DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA LAS REPETICIONES DE LA PRUEBA CON EL INYECTOR DE HCl (ANALISIS EN UNA SOLA DIRECCION).

Fuente de variación	gl	SS	\bar{SS}	Fc	10%	5%	1%
REPETIC.	1	0.0005	0.0005	0.0002	3.74	5.99	13.74
ERROR	6	14.8567	2.4761				
TOTAL	7	14.8572					

TABLA 9-9. ANALISIS DE VARIANZA DE REPETICIONES Y POSICIONES DE VALVULA PRINCIPAL PARA EL INYECTOR DE HCl (ANALISIS EN DOS DIRECCIONES).

Fuente de variación	gl	SS	\bar{SS}	Fc	10%	5%	1%
REPETICIONES	1	0.0005	0.0005	0.82	5.54	10.13	34.12
POSICIONES	3	14.8551	4.9517	9003.05	5.39	9.28	29.46
ERROR	3	0.0017	0.0006				
TOTAL	7	14.8572					

Del cuadro ANVA presentado en la tabla 9-8 se concluye que no existe diferencia estadística significativa entre repeticiones, debido a que el F calculado (Fc) no supera los valores leídos de tabla (tabla C-1, anexo C), lo que significa

que las repeticiones de la prueba con el inyector del HCl no contribuyen al error de toda la experimentación.

Del cuadro ANVA correspondiente al análisis en dos direcciones para el inyector del HCl (tabla 9-9) se observa que existe una altísima diferencia significativa a un nivel de confianza estadístico del 1% para las posiciones de las válvulas, dado que el F calculado (F_c) es mucho mayor que el F de tabla (F_t) al nivel indicado. Lo anterior indica que existe diferencia en la concentración del HCl al variar la posición de la válvula principal; y en consecuencia, procede la realización de un análisis de diferencia mínima significativa (DMS) para determinar si es válido establecer un análisis de regresión.

En la tabla 9-10 se presentan los resultados del análisis de diferencia mínima significativa, los cuales indican que es posible establecer un análisis de regresión entre el flujo total saliendo del inyector (definido por la posición de la válvula principal) y la concentración de Acido Clorhídrico correspondiente a cada flujo.

Los criterios en base a los cuales se decide que es posible establecer el análisis de regresión se definen en el anexo C.

El análisis de regresión se realizó por medio del programa de computadora TBL CURVE que se encuentra instalada en la computadora de la Escuela de Ingeniería Química el cual es un paquete especializado para análisis estadístico.

TABLA 9-10. RESULTADOS DEL ANALISIS DE DMS PARA LAS POSICIONES DE LA VALVULA PRINCIPAL EN LA PRUEBA CON EL INYECTOR DE HCl.

Valores de DMS calculados				Valores de diferencias entre promedios				
α	10%	5%	1%	\bar{X}	1.49	1.92	3.595	4.905
t	2.353	3.182	5.841	4.905	3.415*	2.985*	1.31*	0
gl	3	3	3	3.595	2.105*	1.675*	0	
DMS	0.0552	0.075	0.137	1.92	0.43*	0		
				1.49	0			

*Supera el DMS.

El análisis da como resultado una ecuación de tipo semi-logarítmica como la mejor regresión que correlaciona los datos de flujo total en gpm (definido por cada posición de la válvula principal) y la concentración de ácido clorhídrico (HCl) expresado en porcentaje peso/peso. La expresión obtenida es la siguiente:

$$y = a + bx/\ln x + ce^{-x} \quad (9.1)$$

en donde:

$$a = 0.3259095$$

$$b = 0.17292536$$

$$c = 9.4433901$$

y: flujo total en gpm

x: % p/p HCl

El coeficiente de correlación (r^2) para la ecuación 9.1 es de 0.999999286, un valor muy cercano a la unidad, lo que indica que la ecuación es capaz de predecir con mucha exactitud el comportamiento de los datos obtenidos experimentalmente. La representación gráfica de los datos reales correlacionados por la ecuación 9.1 se muestra en la figura 9.4.

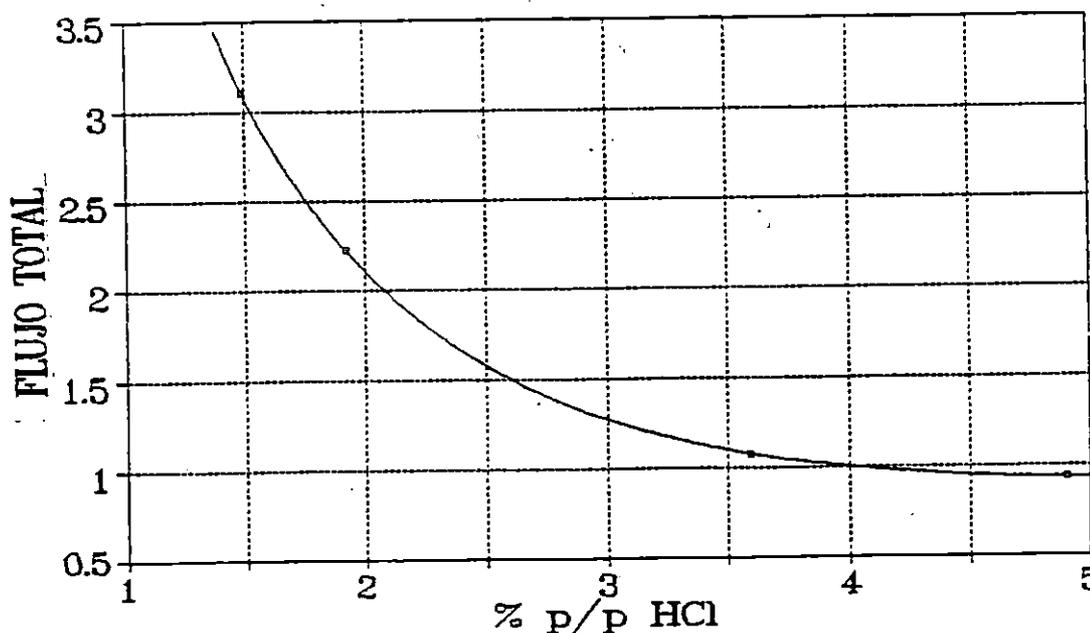


FIG. 9.4. VARIACION DE LA CONCENTRACION DE ACIDO CLORHIDRICO EN FUNCION DEL FLUJO TOTAL SALIENDO DEL INYECTOR.

En la tabla 9-11 se presentan los parámetros para el análisis de varianza de la experimentación realizada con el inyector de Hidróxido de Sodio y en las tablas 9-12 y 9-13 se

presenta el análisis de varianza correspondiente evaluado según los establecido en el anexo C.

TABLA 9-11. RESULTADOS DE LA PRUEBA DEL INYECTOR DE HIDROXIDO DE SODIO PARA LA RESINA ANIONICA, CON LOS PARAMETROS NECESARIOS PARA EL ANALISIS DE VARIANZA (VARIABLE RESPUESTA: % P/P NaOH).

Repeti ciones	Posición de válvula principal				\bar{X}	S_{n-1}	%CV	ΣX	ΣX^2
	1	2	3	4					
1	1.60	1.67	2.04	3.96	2.3175	1.1119	47.98	9.27	25.1921
2	1.56	1.65	2.06	4.00	2.3175	1.1426	49.30	9.27	25.3997
\bar{X}	1.58	1.66	2.05	3.98					
S_{n-1}	0.0283	0.0141	0.0141	0.028					
%CV	1.79	0.85	0.69	0.71					
ΣX	3.16	3.32	4.1	7.96				18.54	
ΣX^2	4.9936	5.5114	8.4052	31.6816					50.5918

TABLA 9-12. RESULTADO DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA LAS REPETICIONES DE LA PRUEBA CON EL INYECTOR DE HIDROXIDO DE SODIO (ANALISIS EN UNA SOLA DIRECCION).

F. de variac.	gl	SS	\bar{SS}	Fc	10%	5%	1%
REPETIC.	1	0.0000	0.0000	0.00	3.78	5.99	13.74
ERROR	6	7.6253	1.2709				
TOTAL	7	7.6253					

TABLA 9-13. ANALISIS DE VARIANZA DE REPETICIONES Y POSICIONES DE VALVULA PRINCIPAL PARA EL INYECTOR DE NaOH (ANALISIS EN DOS DIRECCIONES).

F. de variac.	gl	SS	\bar{SS}	Fc	10%	5%	1%
REPETIC	1	0.0000	0.0000	0.0	5.54	10.13	34.12
POSICI.	3	7.6233	2.5411	3630	5.39	9.28	29.46
ERROR	3	0.0020	0.0007				
TOTAL	7	7.6253					

Del cuadro ANVA presentado en la tabla 9-12 se concluye que no existe diferencia estadística significativa entre repeticiones, debido a que el F calculado (Fc) no supera los valores leídos de tabla (tabla C-1, anexo C), lo que significa que las repeticiones de la prueba con el inyector del NaOH no contribuyen al error de toda la experimentación.

Del cuadro ANVA correspondiente al análisis en dos direcciones para el inyector del NaOH (tabla 9-13) se observa que existe una altísima diferencia significativa a un nivel de confianza estadístico del 1% para las posiciones de las válvulas, dado que el F calculado (Fc) es mucho mayor que el F de tabla (Ft) al nivel indicado. Lo anterior indica que existe diferencia en la concentración del NaOH al variar la posición de la válvula principal; y en consecuencia, procede la realización de un análisis de diferencia mínima significativa (DMS) para determinar si es válido establecer un

análisis de regresión.

En la tabla 9-14 se presentan los resultados del análisis de diferencia mínima significativa, los cuales indican que es posible establecer un análisis de regresión entre el flujo total saliendo del inyector (definido por la posición de la válvula principal) y la concentración de NaOH correspondiente a cada flujo.

Los criterios en base a los cuales se decide que es posible establecer el análisis de regresión se definen en el anexo C.

TABLA 9-14. RESULTADOS DEL ANALISIS DE DMS PARA LAS POSICIONES DE LA VALVULA PRINCIPAL EN LA PRUEBA CON EL INYECTOR DE NaOH.

Valores de DMS calculados				Valores de diferencias entre promedios				
α	10%	5%	1%	\bar{X}	1.60	1.67	2.04	3.96
t	2.352	3.182	5.841	3.96	2.36*	2.29*	1.92*	0
gl	3	3	3	2.04	0.44*	0.37*	0	
DMS	0.062	0.084	0.154	1.67	0.07 ^{NS}	0		
				1.60	0			

* Supera el DMS

^{NS} No supera al DMS.

El análisis de regresión para el inyector del anión da como resultado la siguiente expresión:

$$y = a + b \ln x / x^2 + c / x^2 \quad (9.2)$$

en donde:

$$a = 1.007307$$

$$b = -2.5443139$$

$$c = 4.1908477$$

El coeficiente de correlación (r^2) para la ecuación 9.2 es de 0.999999924, al igual que para el inyector de HCl, un valor muy cercano a la unidad, lo que indica que la ecuación es capaz de predecir con mucha exactitud el comportamiento de los datos obtenidos experimentalmente. En la figura 9.5 se representan graficamente los datos reales correlacionados por la ecuación 9.2.

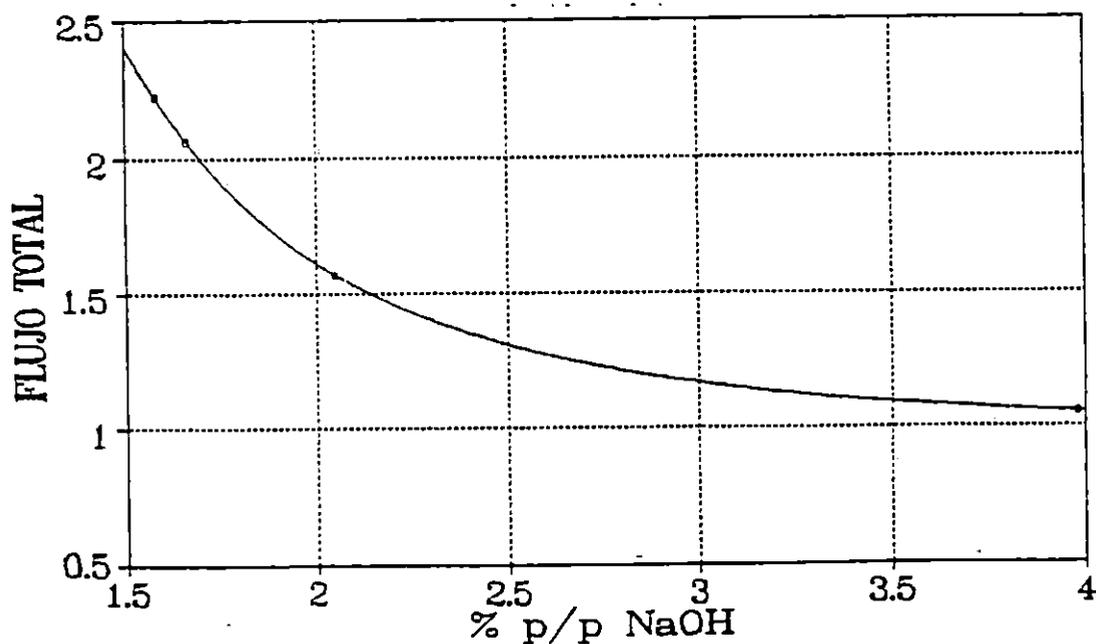


FIG. 9.5. VARIACION DE LA CONCENTRACION DEL NaOH EN FUNCION DEL FLUJO TOTAL SALIENDO DEL INYECTOR.

9.2.2 EVALUACION Y ANALISIS DE LA PRUEBA DE LAS UNIDADES CATIONICA Y ANIONICA.

En la tabla 9-15 se presentan los parámetros para el análisis de varianza de la experimentación realizada con la unidad cationica y en las tablas 9-16 y 9-17 se presenta el análisis de varianza correspondiente evaluado según lo establecido en el anexo C.

TABLA 9-15. RESULTADOS DE LA PRUEBA DE LA UNIDAD CATIONICA CON LOS PARAMETROS NECESARIOS PARA EL ANALISIS DE VARIANZA (VARIABLE RESPUESTA: CONCENTRACION DE DUREZA).

Repeti- ciones	Nivel de regeneración			\bar{X}	S_{n-1}	%CV	EX	EX ²
	1	2	3					
1	52.50	3.68	0.41	18.8633	29.1760	154.67	56.59	2769.9605
2	32.00	2.21	0.37	11.5267	17.7553	154.03	34.58	1029.021
\bar{X}	42.25	2.945	0.39					
S_{n-1}	14.4957	1.0394	0.0283					
%CV	34.3	35.295	7.25					
EX	84.5	5.89	0.78				91.17	
EX ²	3780.25	18.4265	0.305					3798.9815

NOTA : En esta tabla los niveles de regeneración estan dados en orden ascendente, correspondiendo el nivel 3 a 9 lb de HCl 100% por pie³ de resina (3 gal de HCl comercial al 32% por pie³); y los valores de dureza correspondientes a cada repetición y a cada nivel de regeneración están dados en ppm como CaCO₃.

TABLA 9-16. RESULTADO DEL ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LAS REPETICIONES EN LA PRUEBA DE LA RESINA CATIONICA (ANÁLISIS EN UNA SOLA DIRECCION).

F. de variac.	gl	SS	\bar{SS}	FC	10%	5%	1%
REPETIC	1	80.7400	80.7400	0.1384	4.54	7.71	21.20
ERROR	4	2332.9133	583.2283				
TOTAL	5	2413.6534					

TABLA 9-17. RESULTADO DEL ANÁLISIS DE VARIANZA PARA LAS REPETICIONES Y LOS NIVELES DE REGENERACION EN LA PRUEBA DE LA RESINA CATIONICA (ANÁLISIS EN DOS DIRECCIONES).

F. DE VARIACION	gl	SS	\bar{SS}	FC	10%	5%	1%
REPETICIONES	1	80.7400	80.7400	1.2377	8.53	18.51	98.49
NIVEL DE REGENERACION	2	2202.4471	1101.2236	16.8814	9.0	19.0	99.0
ERROR	2	130.4662	65.2331				
TOTAL	5	2413.6534					

Del cuadro de análisis de varianza presentado en la tabla 9-16 para la unidad catiónica se concluye que no existe diferencia estadística significativa entre repeticiones debido a que el F calculado no supera los valores leídos de tabla lo que significa que las repeticiones con la prueba de la resina

catiónica no contribuyen al error de toda la experimentación.

Del cuadro ANVA correspondiente al análisis en dos direcciones para la resina catiónica (tabla 9-17) se observa que existe diferencia estadística significativa al 10% de confiabilidad entre los valores de dureza obtenidos (en el punto de evaluación) a los diferentes niveles de regeneración establecidos para evaluar la resina catiónica dado que el F calculado supera moderadamente al F de tabla solo al nivel de confianza indicado. De acuerdo a los resultados de esta prueba (tabla 9-1), mientras más alto es el nivel de regeneración más bajo es el nivel de dureza que se obtiene cuando se alcanza el galonaje de agua decationizada que teóricamente debe producir los 0.5 pie³ de resina catiónica.

Después de haber establecido estadísticamente que existe diferencia entre los distintos niveles de regeneración para la resina catiónica procede la elección de aquel nivel que cumpla con los requerimientos de calidad del agua desmineralizada. En este caso se seleccionará el nivel de 9 lbs de HCL 100% puro/pie³ de resina como el nivel óptimo de regeneración. Obsérvese que este valor coincide con el nivel máximo recomendado por la bibliografía.

En la tabla 9-18 se presentan los parámetros para el análisis de varianza de la unidad aniónica (correspondiente a la sílice) y en las tablas 9-19 y 9-20 se presenta el respectivo análisis de varianza, evaluado según lo establecido en el anexo C.

TABLA 9-18. RESULTADOS DEL ANALISIS DE SILICE OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA, CON LOS PARAMETROS NECESARIOS PARA EL ANALISIS DE VARIANZA.

Repeti- ciones	NIVELES DE REGENERACION			\bar{X}	S_{n-1}	%CV	EX	EX ²
	1	2	3					
1	37.10	14.7	1.50	17.77	17.997	101.3	53.3	1594.75
2	36.40	15.2	1.30	17.63	17.676	100.2	52.9	1557.69
\bar{X}	36.75	14.95	1.40					
S_{n-1}	0.4949	0.3536	0.1414					
%CV	1.35	2.36	10.10					
EX	73.5	29.9	2.80				106.2	
EX ²	2701.37	447.13	3.94					3152.44

NOTA : En esta tabla los niveles de generación están dados en orden ascendente, y los valores de concentración de Silice en ppm como SiO₂ (variable respuesta: concentración de Silice en ppm SiO₂)

TABLA 9-19. RESULTADOS DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA LAS REPETICIONES DE LA CONCENTRACION DE SILICE EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA (ANALISIS EN UNA SOLA DIRECCION).

F. de V.	gl	SS	\bar{SS}	F _c	10%	5%	1%
REPETICIONES	1	0.0267	0.0267	0.00008	4.54	7.71	21.20
ERROR	4	1272.6733	318.168				
TOTAL	5	1272.7					

TABLA 9-20. RESULTADOS DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA REPETICIONES Y NIVELES DE REGENERACION CON LOS DATOS DE CONCENTRACION DE SILICE OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA.

F. de Variac.	gl	SS	\bar{SS}	Fc	10%	5%	1%
REPETICIONES	1	0.027	0.027	0.1816	8.53	18.51	98.49
NIVEL DE REG.	2	1272.319	636.155	3503.06	9.0	19.0	99.0
ERROR	2	0.363	0.182				
TOTAL	5	1272.700					

Del cuadro ANVA presentado en la tabla 9-20 correspondiente al análisis de sílice en la prueba de la resina aniónica, se observa que existe una altísima diferencia significativa a un nivel de confianza estadístico del 1% para los niveles de regeneración, dado que el F calculado supera los valores leídos de tabla. Esto indica que existe diferencia en la cantidad y calidad de agua desmineralizada (con respecto a la Sílice) producida al variar los niveles de regeneración.

En la tabla 9-21 se presentan los parámetros para el análisis de varianza con los valores de la concentración de cloruros obtenidos en la prueba de la resina aniónica y en las tablas 9-22 y 9-23 se presenta el análisis de varianza correspondiente, evaluado según lo establecido en el anexo C.

TABLA 9-21. RESULTADOS DEL ANALISIS DE CLORUROS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA, CON LOS PARAMETROS NECESARIOS PARA EL ANALISIS DE VARIANZA.

Repeti- ciones	NIVELES DE REGENERACION			\bar{X}	S_{n-1}	%CV	ΣX	ΣX^2
	1	2	3					
1	0.53	0.20	0.08	0.27	0.233	86.0	0.81	0.3273
2	0.58	0.19	0.06	0.277	0.271	97.8	0.83	0.3761
\bar{X}	0.555	0.195	0.07					
S_{n-1}	0.0353	7.0711	0.0141					
%CV	6.37	3.63	20.2					
ΣX	1.11	0.39	0.14				1.64	
ΣX^2	0.6173	0.0761	0.01					0.7034

NOTA : En la tabla anterior los niveles de regeneración están en orden ascendente, y los valores de la concentración de cloruros están dados en ppm como tal (ppm Cl^-). Variable respuesta: concentración de Cl^- .

TABLA 9-22. RESULTADOS DEL ANALISIS DE VARIANZA PARA REPETICIONES DEL ANALISIS DE CLORUROS EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA (ANALISIS EN UNA SOLA DIRECCION).

F. de V.	gl	SS	\bar{SS}	Fc	10%	5%	1%
REPETICIONES	1	0.0000	0.0000	0.0	4.54	7.71	21.20
ERROR	4	0.2551	0.0637				
TOTAL	5	0.2551					

TABLA 9-23. RESULTADOS DEL ANALISIS DE VARIANZA DE REPETICIONES Y NIVELES DE REGENERACION CON LOS DATOS DE CONCENTRACION DE CLORUROS OBTENIDOS EN LA PRUEBA DE LA RESINA ANIONICA (ANALISIS EN DOS DIRECCIONES).

F. de V.	gl	SS	\bar{SS}	Fc	10%	5%	1%
REPETICIONES	1	0.0000	0.0000	0.0	8.53	18.51	98.49
NIVEL DE REG.	2	0.2536	0.1268	169.07	9.0	19.0	99.0
ERRDR	2	0.0015	0.0008				
TOTAL	5	0.2551					

Del cuadro ANVA presentado en la tabla 9-22 se observa que las repeticiones no contribuyen al error total de la experimentación puesto que el F calculado no supera al F leído de tablas; y de la tabla 9-23 se observa que existe una alta diferencia minima significativa entre la concentración de cloruros para los niveles de regeneración utilizados puesto que el F calculado supera a los leídos de tabla a los tres niveles de significancia estadística.

El análisis de varianza para la concentración de Sulfatos no se realizó debido a que estos fuerón no detectables en dos niveles de regeneración (2 y 3) en el punto de evaluación seleccionado (240 gal de agua desmineralizada).

Luego de establecer estadísticamente que existe diferencia entre los distintos niveles de regeneración para la

resina aniónica procede la elección del nivel que cumpla con los requerimientos de calidad del agua desmineralizada. Para este caso se seleccionará el nivel 3 (10 lbs de NaOH 100% puro/pie³ de resina) como el nivel óptimo de regeneración, debido a que con dicho nivel se obtiene mayor cantidad de agua desmineralizada y de mejor calidad.

9.3. EVALUACION DEL SISTEMA DESMINERALIZADOR PRODUCIENDO AGUA EN UN SOLO PASO.

En la tabla 9-24 se presentan los resultados obtenidos en la evaluación del sistema en un solo paso utilizando los niveles de regeneración aceptados estadísticamente (9 lbs de HCl 100% y 10 lbs de NaOH 100%, ambos por pie³ de resina).

TABLA 9-24. RESULTADOS DE ANALISIS DEL AGUA DESMINERALIZADA PRODUCIDA EN UN SOLO PASO.

Tiempo	Conduc.	SiO ₂	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	pH	Na ⁺	HCO ₃ ⁻	CO ₃ ²⁻	DUREZA
0	30.0	0.19	0.25	0.24	9.60	2.1	4.90	0.10	1.13
30	10.2	ND	0.14	ND	9.10	1.0	3.44	0.06	0.91
60	7.5	ND	0.11	ND	7.40	0.6	3.00	--	0.65
90	6.3	ND	0.05	ND	7.01	0.6	3.20	--	0.65
120	5.5	ND	0.02	ND	6.98	0.3		--	0.65
150	2.3	0.10	ND	ND	7.00	0.6		--	0.12
180	4.5	11.57	0.04	ND	6.82	0.5		--	0.55
210	18.8	87.04	0.64	ND	5.40	0.4	4.00	--	0.65
240	29.1	98.18	0.69	0.12	5.55	0.6	6.80	--	0.81

En la tabla 9-24 la concentración de Dureza y Alcalinidad (CO_3^{2-} y HCO_3^-) están expresadas en ppm como CaCO_3 y la concentración de las otras especies está expresada como tal. Además, el tiempo de operación define el galonaje producido dado que el sistema estaba operando a una velocidad de flujo constante de 1 gpm.

De los resultados mostrados en la tabla 9-24 puede concluirse que el sistema desmineralizador construido está en la capacidad de producir 150 galones de agua con la calidad exigida por la norma 1080 de los Metodos Estandar cuando es regenerada con los niveles definidos anteriormente y produciendo agua en un solo paso. También se observa que se pueden producir 180 gal de agua con una conductividad menor de 10 $\mu\text{mhos/cm}$ cuya limitante es el contenido de Silice (11.5 ppm SiO_2) pero que podría ser utilizada para lavar material de vidrio.

9.4. EVALUACION DEL AGUA DESMINERALIZADA PRODUCIDA UTILIZANDO RECIRCULACION.

En la tabla 9-25 se presentan los resultados de análisis realizados al agua desmineralizada producida con recirculación a través del sistema de doble lecho. Los análisis de Sulfatos, Cloruros, Sodio y Silice se realizaron utilizando como blanco agua pulida de 0.2 $\mu\text{mhos/cm}$.

La concentración de Dureza y Alcalinidad está dada en ppm como CaCO_3 y las otras se expresan como tal.

TABLA 9-25. RESULTADOS DE ANALISIS QUIMICO EN MUESTRAS DE AGUA DESMINERALIZADA PRODUCIDA CON RECIRCULACION

Conductividad	Silice	Cloruros	Sulfatos	pH	Sodio	Bicarbonatos	Dureza
3.0	ND	ND	ND	6.80	0.2	0.10	ND
1.0	ND	ND	ND	6.95	ND	0.05	ND
1.9	ND	ND	ND	7.01	ND	0.05	ND
0.7	ND	ND	ND	6.50	ND	ND	ND
3.8	ND	ND	ND	6.80	ND	0.13	ND

ND = No Detectable.

Los resultados mostrados en la tabla 9-25 se generaron a partir de muestras tomadas al azar cuando se estaba produciendo agua que había sido recirculada. No fue posible realizar la prueba de igual forma que en los casos anteriores debido a que en esta ocasión el agua tenía que recircularse nuevamente cuando alcanzaba una conductividad máxima de 4 μ mos/cm por lo que la producción no fué continua. Sin embargo, el galonaje total de agua producido de esta manera fué de 180 galones de agua cuya conductividad oscilaba entre 1 y 4 μ mos/cm; y la Silice era no detectable. Es decir que utilizando recirculación se obtienen 30 gal más de agua desmineralizada que cumple con las exigencias de la norma 1080 en comparación con la producción en un solo paso. Los resultados están expresados en igual forma que en la tabla 9-24.

9.5. EVALUACION DE LA COLUMNA DE LECHO MIXTO.

En la tabla 9-26 se presentan los resultados obtenidos en

la evaluación de la columna del lecho mixto, utilizando como alimentación agua desmineralizada con conductividades de 1, 2 y 3 μmhos .

TABLA 9-26. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA EVALUACION DE LA COLUMNA DE LECHO MIXTO.

Tiempo	Conductividad (1 μmhos)	Conductividad (2 μmhos)	Conductividad (3 μmhos)
0	0.27	0.18	0.14
5	0.24	0.18	0.14
10	0.24	0.16	0.14
15	0.24	0.16	0.14
20	0.22	0.14	0.13
25	0.22	0.14	0.13
30	0.21	0.14	0.10
35	0.21	0.13	0.10
40	0.18	0.13	0.10
45	0.18	0.13	0.10
50	0.18	0.13	0.10

De los resultados mostrados en la tabla 9-26 puede observarse que el comportamiento del lecho mixto es tal que en un principio (al alimentar agua de 1 $\mu\text{mhos/cm}$) se está dando un lavado del lecho, y esta tendencia continua hasta que se alcanza una conductividad constante a la salida. Esto ocurre después de haber pasado un volumen de agua aproximado de 28 gal (este volumen se estima a partir de que la velocidad promedio a través del lecho es de 0.2 gpm).

CAPITULO X
MANUAL DE OPERACION Y MANTENIMIENTO

10.1. OPERACION DEL LECHO DOBLE.

A continuación se describe el manejo del sistema desmineralizador de lecho doble para que pueda ser operado en una forma efectiva.

10.1.1 REGENERACION DE LA UNIDAD CATIONICA.

A. ETAPA DE RETROLAVADO.

Para esta etapa realizar los siguientes pasos:

- a.1. Verificar que las válvulas que se describen a continuación estén completamente abiertas o cerradas. (Todas las posiciones de válvula mencionadas a partir de este momento están referidas a la figura 10.1).

Abiertas

2
6
8

Cerradas

3
4
5
7
9
14
16

- a.2. Colocar la válvula N°1 (válvula principal) en la posición N°1.
- a.3. Encender la bomba y esperar 15 min para que se complete la etapa de retrolavado.
- a.4. Apagar la bomba y esperar 5 minutos para que se asiente el lecho de resina. (durante este período preparar la

siguiente etapa).

B. ETAPA DE SUCCION DEL ACIDO CLORHIDRICO.

Efectuar los siguientes pasos:

- b.1. Preparar 2 galones de ácido clorhídrico comercial al 32% de pureza.
- b.2. Colocar la manguera de succión del inyector en el recipiente que contiene el ácido.
- b.3. Verificar que las válvulas enumeradas a continuación se encuentren completamente abiertas ó completamente cerradas.

Abiertas	Cerradas
3	2
4	6
5	8
	9
	14
	16

- b.4. Colocar la válvula N01 en la posición N02, y la válvula N07 en la posición N01.
- b.5. Encender la bomba y esperar 12 minutos para que se complete la succión de 1.5 gal. de HCl al 32%.
- b.6. Después de este tiempo cerrar completamente las válvulas 3 y 4 y abrir la válvula N02.

C. ETAPA DE LAVADO LENTO.

- c.1. Inmediatamente después de la operación anterior verificar que las siguientes válvulas estén completamente abiertas y cerradas.

Abiertas

2
5

Cerradas

3
4
6
8
9
14
16

- c.2. Colocar la válvula N07 en la posición N03, manteniendo la válvula N01 en la misma posición que en la etapa de succión (posición 2).
- c.3. Esperar un tiempo de 30 minutos para completar el lavado lento y continuar con el lavado rápido.

D. ETAPA DE LAVADO RAPIDO.

- d.1. Colocar la válvula N07 en la posición N02 manteniendo todas las demás válvulas en las posiciones de la etapa de lavado lento.
- d.2. Esperar 10 minutos y después verificar que el ácido remanente en la resina ha sido desalojado. Esta verificación se hace realizando una prueba comparativa de Cloruros como se indica a continuación:
- d.2.1. En un erlenmeyer de 250 ml medir 100 ml de agua cruda, y en otro erlenmeyer similar medir 100 ml de agua decationizada colectados a través del grifo N02.
- d.2.2. Agregar a cada recipiente 1 ml de Acido Nítrico concentrado (HNO_3) y 1 ml de solución de Nitrato

de Plata 1N.

d.2.3. Agitar y comparar visualmente la intensidad de la turbidez generada en ambos recipientes. Si el agua decationizada tiene mayor turbidez que el agua de alimentación necesitará más tiempo de lavado, en caso contrario pasar a la regeneración de la columna aniónica.

10.1.2 REGENERACION DE LA UNIDAD ANIONICA.

A. ETAPA DE RETROLAVADO.

a.1. Verificar que las válvulas que se describen a continuación estén completamente abiertas o cerradas:

Abiertas	Cerradas
2	3
5	4
9	6
12	7
14	8
	10
	11
	13
	16
	17

a.2. Colocar la válvula N°1 en la posición N°3 y la válvula N°15 en la posición N°1.

a.3. Esperar 15 minutos para que se complete la etapa de retrolavado.

a.4. Apagar la bomba y esperar 5 minutos para que se asiente el lecho de resina.

B. ETAPA DE SUCCION DE LA SODA CAUSTICA.

- b.1. Preparar con anticipación 1 galón de soda caústica saturada (50%) a una temperatura máxima de 40°C.
- b.2. Colocar la manguera de succión del inyector en el recipiente que contiene la soda caústica.
- b.3. Verificar que las válvulas enumeradas a continuación se encuentren completamente abiertas ó cerradas.

Abiertas	Cerradas
2	3
5	4
9	6
10	7
11	8
13	12
	14
	15
	17

- b.4. Colocar la válvula N°1 en la posición N°3 y la válvula N°16 en la posición N°1.
- b.5. Encender la bomba y esperar 12 minutos para que se complete la succión de 0.8 galón de soda caústica.
- b.6. Después de este tiempo cerrar completamente las válvulas 10 y 11 y abrir la válvula N°12.

C. ETAPA DE LAVADO LENTO.

- c.1. Inmediatamente después de la operación anterior verificar que las siguientes válvulas estén completamente abiertas y cerradas.

Abiertas	Cerradas
2	3
5	4
9	6
12	7
13	8
	10
	11
	14
	15
	17

c.2. Colocar la válvula N°16 en la posición N°3, la válvula N°1 continua en la misma posición.

c.3. Esperar un tiempo de 1 hora para completar el lavado lento y continuar con el siguiente ciclo.

D. ETAPA DE LAVADO RAPIDO.

d.1. Colocar la válvula N°16 en la posición N°2, manteniendo todas las demás válvulas en las posiciones de la etapa de lavado lento.

d.2. Esperar 10 minutos, y pasar a la etapa de lavado final de ambos lechos.

10.1.3 LAVADO FINAL DE TODO EL SISTEMA.

El lavado final de todo el sistema se realiza de la siguiente manera:

a. Mantener todas las válvulas en la misma posición que en el ciclo de lavado rápido de la resina aniónica.

b. Controlar continuamente la conductividad (tener el conductivímetro de 5 escalas para las mediciones respectivas) hasta que el agua desmineralizada llegue a un valor de 30

µmhos.

- c. Cerrar la válvula N°16 y abrir completamente la válvula N°17 para comenzar con la etapa de recirculación.

10.1.4 ETAPA DE RECIRCULACION.

Para esta etapa seguir los siguientes pasos:

- a. Esperar el tiempo necesario para obtener el agua producto deseada, medir la conductividad de dicha agua.
- b. Cuando se obtenga el agua producto deseada cerrar la válvula N°17 y abrir completamente el grifo N°4 para evacuar el agua producto.
- c. Cuando se haya obtenido una cantidad adecuada de agua desmineralizada y esta tenga una conductividad de 5 µmhos, cerrar el grifo N°4 y abrir nuevamente la válvula N°17 para continuar recirculando, cuando la conductividad del agua recirculada no baje de 10 µmhos entonces "regenera nuevamente".

Para verificar la calidad del agua producto realizar los siguientes análisis:

A. SILICE.

- a.1. Tomar una muestra de 5 ml de agua desmineralizada.
- a.2. Agregarle 5 gotas de HCl 1+1 y posteriormente agregar 5 gotas de molibdato de amonio al 10% p/v.
- a.3. Observar si hay desarrollo de color amarillo. (Es recomendable hacer esta prueba en un envase plástico). Si

hay desarrollo de color es porque existe sílice en el agua.(ver manual de mantenimiento).

B. CLORUROS.

- b.1. Tomar una muestra de agua desmineralizada y agregarle Acido Nítrico concentrado y 1 ml de Nitrato de Plata 1 N.
- b.2. Observar si desarrolla turbidez, si el desarrollo se efectúa entonces el agua desmineralizada contiene Cloruros.

Si el desarrollo de color (en la medición de la Sílice) o la turbidez (en los Cloruros) son evidentes, entonces procedase a regenerar nuevamente.

C. ALCALINIDAD.

- c.1. Tomar una muestra de 50 ml de agua desmineralizada y agregarle 3 gotas de fenolftaleina.
- c.2. Observar si se desarrolla color rosado lo que indicaría presencia de OH^- , es decir, que el pH anda arriba de 10.5. En este caso es conveniente seguir recirculando.

10.2. OPERACION DEL LECHO MIXTO.

Realizar los siguientes pasos para la obtención de agua pulida.

- A. Alimentar en la parte superior del lecho mixto agua desmineralizada con una conductividad menor o igual a 3 μmhos (llenar completamente la columna).

B. Abrir el grifo y regular el flujo hasta que se obtenga 150 ml de agua desmineralizada/12 seg (procurar que el nivel de agua dentro del lecho permanezca constante alimentando agua continuamente durante la producción de agua pulida).

C. Esperar que la conductividad del agua disminuya hasta un valor entre 0.1 - 0.5 μ mhos. (si es necesario recircular hasta que la conductividad disminuya).

10.2.1. REGENERACION DEL LECHO MIXTO.

a. Preparar 2 galones de una solución saturada de Cloruro de Sodio.

b. Sacar la resina y colocarla en un recipiente.

c. Agregar la solución saturada de cloruro de sodio a la resina. Se observará que la resina aniónica quedará en la parte superior y la resina catiónica en la parte inferior.

d. Decantar la resina que queda en la parte superior y colocar la otra resina en el lecho mixto para proceder a la regeneración.

A. REGENERACION DE LA RESINA CATIONICA.

a.1. Preparar una solución al 10% de ácido clorhídrico comercial de la siguiente manera:

Medir 455 ml de HCl concentrado y diluya hasta 1500 ml con agua desmineralizada.

a.2. Agregar la solución regenerante al lecho catiónico.

a.3. Abrir el grifo de tal manera que la velocidad de flujo

sea de 150 ml/12 seg. Media vez se ha pasado toda la solución regenerante debe continuarse con el lavado de la resina.

- a.4. Agregar, continuamente, agua desmineralizada de 3 μ hos/cm hasta no detectar cloruros (análisis de acuerdo al presentado en el manual de operación de lecho doble). La velocidad de flujo es la misma que en el literal a.3.
- a.5. Mantener esta velocidad de flujo por una hora.
- a.6. Cuando ya no se detecten cloruros vertir la resina catiónica en un recipiente diferente y colocar la resina aniónica en la columna del lecho mixto para proceder a regenerarla.

B. REGENERACION DE LA RESINA ANIONICA.

- b.1. Preparar una solución de Hidróxido de Sodio al 4%.
Medir 365 ml de solución saturada de hidróxido de sodio y agregarle 4200 ml de agua desmineralizada.
- b.2. Agregar la solución regenerante al lecho de resina aniónica.
- b.3. Abrir el grifo de tal manera que la velocidad de flujo sea de 40 ml/min y mantener esta velocidad hasta que haya pasado toda la solución regenerante. Después continuar con la etapa de lavado.
- b.4. Lavar hasta que no se detecten los iones oxhidrilos (tomar una muestra de agua saliendo del lecho mixto y agregarle 2 gotas de fenoftaleína, si vira a rojo seguir la-

vando hasta que ya no de coloración).

b.5. Luego de haber regenerado y lavado ambas resinas, deben mezclarse nuevamente en la columna y agregar agua desmineralizada hasta que la conductividad llegue a un valor menor de 0.5 μ hos/cm. En este momento, el lecho mixto estará listo para entrar en operación.

10.3. MANUAL DE MANTENIMIENTO.

Cuando se han ejecutado correctamente todas las etapas de regeneración y al iniciar el ciclo de servicio se observa que el desmineralizador no produce agua de 30 μ hos/cm después de 15 minutos, entonces el equipo puede presentar cualquiera de los siguientes problemas:

a. Por una obstrucción en cualquiera de los inyectores, no se ha succionado la cantidad de regenerante recomendado. En este caso se recomienda la revisión de las mangueras de succión y de los inyectores mismos para determinar si existe obstrucción, entonces proceda a la limpieza respectiva. La forma de realizar la limpieza es separar de la tubería ambos inyectores, desenroscando las uniones universales en ambos extremos. Lave con agua desmineralizada las partes internas, además limpiar válvula de retención del inyector, teniendo el cuidado de no dañar el sello y que no se extravíe ninguna de sus piezas.

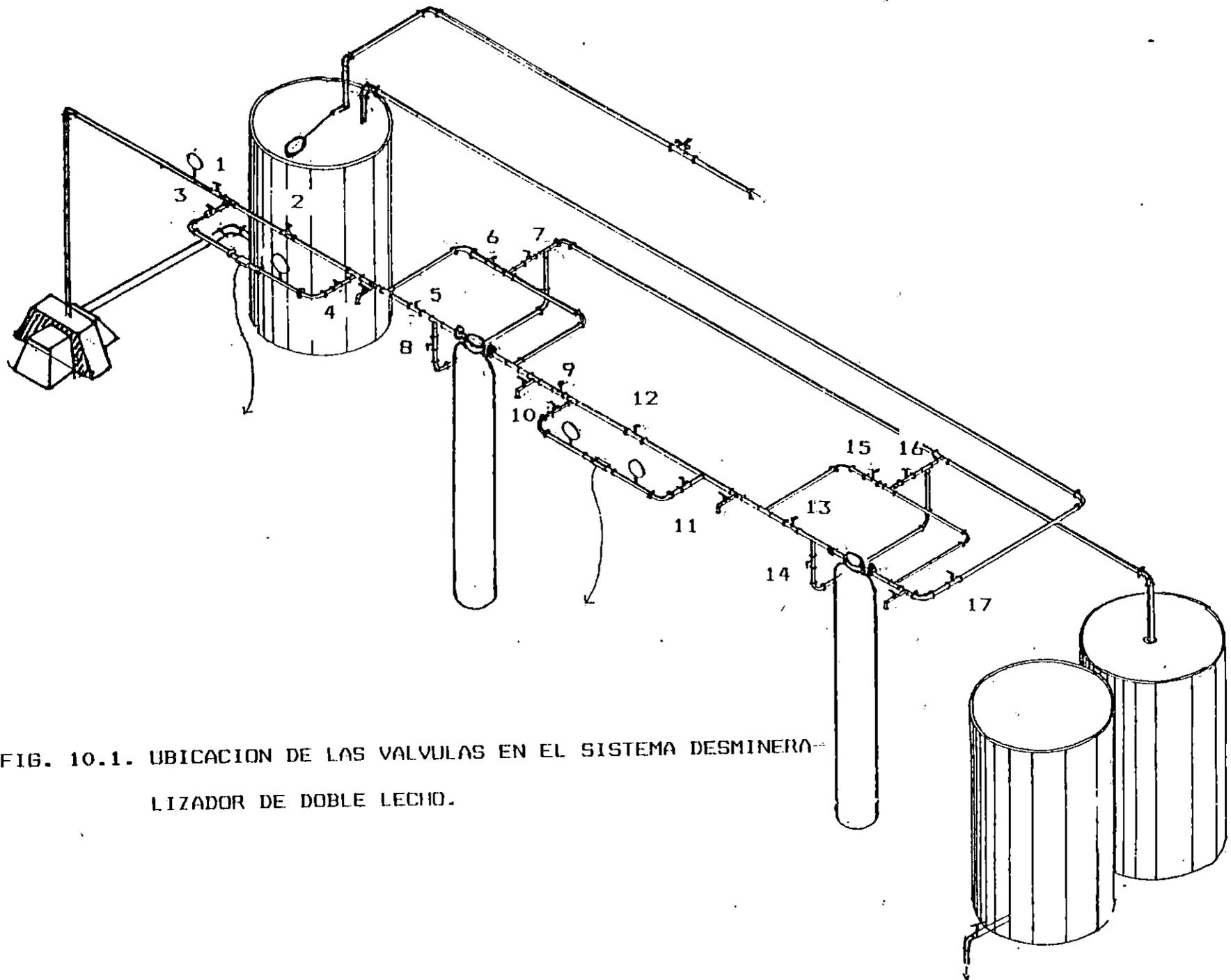


FIG. 10.1. UBICACION DE LAS VALVULAS EN EL SISTEMA DESMINERALIZADOR DE DOBLE LECHO.

b.El posible ensuciamiento de la resina aniónica con Carbonato de Calcio y Magnesio esto podría provocar que la resina no sea bien regenerada. En este caso, será necesario una evaluación física y química, para lo que se recomienda contactar con los distribuidores de resinas.

c.Podría existir (aunque es más difícil) el ensuciamiento de la resina catiónica con Hierro, provocando que la resina catiónica no sea bien regenerada. Este caso es similar al anterior, por lo tanto se recomienda que el procedimiento de limpieza sea consultado con los distribuidores de resina.

d.El desgaste físico con el tiempo de trabajo de las resinas provocará una reducción en su capacidad de intercambio, lo que provocará un desbalance en la calidad final del agua. Por esta razón es necesario analizar física y químicamente las resinas.

Siempre que sea necesario realizar un análisis físico-químico de las resinas se recomienda el siguiente procedimiento para tomar una muestra representativa:

- a. Desenroscar la tapadera de cada tanque
- b. Introducir un tubo de PVC de 1/2 " con la longitud suficiente para alcanzar el fondo del tanque, tapar la parte superior del tubo para generar un vacío y sacarlo lentamente. Luego vertir la resina que esta en la parte

interior del tubo en un recipiente limpio.

- c. Colocar 50 mL de la resina en un recipiente y agregar 75 mL de HCl calidad reactivo y dejar en contacto durante un tiempo de dos horas.
- d. Lavar la resina con agua desmineralizada y luego realizar la evaluación física observando la resina al microscopio y realizando un conteo de resinas enteras, quebradas, y rajadas. Si el porcentaje de resinas enteras es menor de 40, entonces es momento de cambiar la resina. En caso de darse otro tipo de problemas es recomendable consultar con los distribuidores de resina.

CONCLUSIONES

1. De los resultados obtenidos en la prueba de los inyectores puede concluirse que el mecanismo seleccionado para realizar la mezcla de regenerante que finalmente se alimenta a la resina es adecuado y relativamente fácil de manejar con sistemas manuales de desmineralización; por tanto, la posición N° 4 de la válvula principal que proporciona un flujo total de 0.93 gpm en el inyector de Acido Clorhídrico, y la posición N° 4 de la válvula principal que proporciona un flujo total de 1.05 gpm en el inyector de Hidróxido de Sodio; son las recomendadas para lograr las concentraciones de regenerantes que deben alimentarse a las resinas.
2. Las pruebas realizadas en las unidades catiónica y aniónica dieron resultados muy cercanos a los predichos teóricamente cuando se estaba especificando el sistema con los niveles de regeneración recomendados por la guía de dimensionamiento. Esto es muy importante por que permite concluir que el comportamiento de las resinas es el mismo que puede tener en otro tipo de sistemas que no son completamente manuales; lo que debe tomarse en cuenta es que deben respetarse las condiciones de operación sugeridas por los fabricantes de resina. Por ejemplo, en los niveles de regeneración, se ha determinado que la

resina catiónica cumple con el nivel máximo recomendado por la guía de dimensionamiento que son 9 lbs de HCl 100% puro por cada pie³. Por su parte, para la resina aniónica se determinó que era necesario un nivel de regeneración mayor (10 lb de NaOH 100% /pie³) que el máximo recomendado para obtener mejores resultados, pero este aumento no es muy grande y en consecuencia los costos de regeneración del equipo no se verán incrementados en mayor grado.

3. En cuanto a la cantidad de agua desmineralizada por ciclo de regeneración, puede observarse de los resultados que se obtiene un poco más (240 gal) de lo que se había predicho teóricamente (228 gal) y esto puede deberse a que la resina aniónica es regenerada con 10 lbs de NaOH 100%/pie³ de resina. La comparación de este galonaje se hace en base a la conductividad que teóricamente se seleccionó para considerar agotado el desmineralizador, es decir, 30 μ hos/cm. Sin embargo, puede observarse que la calidad del agua con respecto a la Sílice no cumple con lo predicho teóricamente. Este resultado lleva a la conclusión de que los altos niveles de Sílice en las aguas Salvadoreñas hace que no se cumpla lo predicho por los datos técnicos que han sido desarrollados (probablemente) para aguas con bajo contenido de Sílice.

4. En los sistemas de doble lecho la unidad aniónica es la que limita la capacidad de producción. Esto último puede observarse de los resultados de la prueba de la resina catiónica según los cuales sería posible obtener más de 1000 galones de agua decationizada con la suficiente calidad para producir agua desmineralizada de menos de 30 μ mos, mientras que la resina aniónica produce alrededor de los 160 galones (tabla 9-24) de agua con una calidad que todavía es adecuada para los usos de laboratorio, pero a partir de ese valor los datos de Sílice indican que se ha agotado según los requerimientos del agua para uso en el laboratorio (tabla 1-6).

5. La evaluación de la resina catiónica por medio del análisis de dureza puede no ser el más adecuado, pero es el más práctico, por ser fácil y rápido, mientras que el análisis de sodio requiere de la fotometría de llama y/o espectrofotometría de absorción atómica. De los resultados experimentales puede concluirse que la dureza resulta útil para medir la calidad final del agua puesto que hay una relación entre la fuga de Sodio y el nivel de dureza en el agua desmineralizada, para el caso de la tabla 9-24 se observa que a una conductividad de 30 μ mos siendo la fuga de sodio de 2.1 ppm Na^+ , el nivel de dureza es de 1.13 ppm como CaCO_3 .

6. La calidad del agua desmineralizada obtenida en un solo paso y recirculada del sistema, cumple con los requisitos exigidos para los usos en el laboratorio (tabla 1-6) y en consecuencia se concluye que los objetivos fundamentales de este proyecto han sido alcanzados. En lo relativo al agua pulida para usos especiales la conclusión es la misma, dado que la expectativa de lograr producir agua de 0.5 μ mhos fué alcanzada y superada al obtener agua de 0.10 μ mhos/cm (tabla 9-25).

7. Un análisis de los costos del sistema desmineralizador nos lleva a concluir que este resulta mucho más barato, que los sistemas de avanzada tecnología que son automáticos y semi-automáticos. Las desventajas de un sistema manual es su uso relativamente complicado para los cuales se requiere que el operario reciba un mayor entrenamiento.

RECOMENDACIONES

1. El sistema desmineralizador debe de ser operado siguiendo estrictamente lo indicado en su respectivo manual de operación, también es recomendable que sea protegido para que no sea dañada físicamente ninguna de sus partes, sobre todo cuando el sistema sea utilizado para fines educativos.
2. El agua producida debe de ser almacenada en recipientes adecuados y lavados con agua desmineralizada.
3. Con relación al agua pulida lo más recomendable es que se produzca cuando se va a utilizar y que nunca se utilice agua mayor de 3 μ mhos/cm para alimentar el lecho mixto. Cuando el lecho mixto no sea utilizado se debe tener el cuidado que se mantenga tapado.
4. El sistema desmineralizador de doble lecho así como el pulidor, están diseñados de manera que puedan operar durante mucho tiempo sin dar mayores problemas siempre que sean operados de la manera indicada. Sin embargo, después de algunos años de operación pueden comenzar aparecer problemas que no podrían ser resueltos por el operario y en ese momento se recomienda consultar con los distribuidores de resinas.

5. Se recomienda que cuando el agua producida por el sistema desmineralizador sea utilizada para fines de Bacteriología, ésta deberá ser esterilizada en el autoclave.

6. Como una aplicación para fines educativos del sistema desmineralizador, se recomienda diseñar una práctica de laboratorio para evaluar el comportamiento del sistema cuando sea regenerado alternativamente en flujo a corriente y contracorriente.

7. Finalmente, se recomienda que en la Escuela de Ingeniería Química se realicen más trabajos de graduación orientados a la construcción o recuperación de equipos para la Planta Piloto.

REFERENCIAS.

1. SNDEYINK, L. VERNON; JENKINS, DAVID. "QUIMICA DEL AGUA" PRIMERA EDICION EN ESPAÑOL, 1990. EDITORIAL LIMUSA S.A. DE C.V. MEXICO, D.F., 1987.
(a) 13, (b) 13-15, (c) 15-26, (d) 118, (e) 26-36, (f) 30, 120, (g) 120.
2. NORDEL, ESKEL. "TRATAMIENTO DE AGUA PARA LA INDUSTRIA Y OTROS USOS". SEGUNDA EDICION EN ESPAÑOL. COMPANIA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. MEXICO, 1986.
(a) 62, (b) 62-67, (c) 66-67.
3. C. D. MORELLI. "BEVERAGE WORLD WATER MANUAL" SECOND EDITION. PUBLISHED BY BEVERAGE WORLD. NEW YORK, 1994
(a) 148, (b) 160-161, (c) 157, (d) 16, (e) 62.
4. "STANDARS METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER AND WASTEWATER". 17th EDITION, PREPARED AND PUBLISHED JOINTHY BY: AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION, WATER POLLUTION CONTROL FEDERATION, AMERICAN WORKS WATER ASSOCIATION. USA, 1989.
(a) sección (1-20)
5. SIMON, GEORGE P. "ION EXCHANGE TRAINING MANUAL" EDITORIAL VAN NOSTRAND REINHOLD UNITED STATES OF AMERICAN, 1991
(a) 3, (b) 25, (c) 25-34, (d) 35-41, (e) 46.
6. GARCIA MARTINEZ, OSCAR. "RESINAS CAMBIADORAS DE IONES" PRIMERA EDICION. EDITORIAL ALHAMBRA, S.A. MADRID, 1967.
(a) 17, (b) 1.
7. OWEMS, DEAN L. "PRACTICAL PRINCIPLES OF ION EXCHANGE WATER TREATMENT". FIRST EDITION. TALL OAKS PUBLISHING, INC. UNITED STATES OF AMERICAN, 1991
(a) 17, (b) 30-32, (c) 57-59, (d) 60-62, (e) 65-68, (f) 70-71, (g) 72-73, (h) 77, (i) 78, (j) 80-82, (k) 84, (l) 87-88, (m) 88, (n) 89, (ñ) 91, (o) 92, (p) 95-96, (q) 96-97, (r) 97, (s) 114-120, (t) 119.
8. HELFERICH FRIEDRICH. "ION EXCHANGE" EDITORIAL MCGRAW-HILL, 1962
(a) 574-575, (b) 577-579, (c) 556, (d) 73.
9. BETS. "HANDBOOK OF INDUSTRIAL WATER CONDITIONING" EIGHT EDITION. EDITER BY BETS LABORATORIES, INC PENNSYLVANIA, 1980
(a) 71-72, (b) 73.

10. ENTREVISTA PERSONAL CON EL SEÑOR JUAN RODOLFO MENDOZA, TECNICO (II) LABORATORISTA DE LA PLANTA PILOTO PERTENECIENTE A LA ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA, UES. NOVIEMBRE 1993.
11. ENTREVISTA PERSONAL CON LOS ESTUDIANTES EGRESADOS DE LA CARRERA DE INGENIERIA QUIMICA (CICLO II, 1993) Y ACTUALMENTE CURSANDO TRABAJO DE GRADUACION. NOVIEMBRE 1993.
12. "GUIA DE DIMENSIONAMIENTO DE SISTEMAS DESMINERALIZADORES", PRESENTADO POR LA CULLIGAN COMPANY DE LOS ESTADOS UNIDOS.
13. AMBERLITE IR-120, TECHNICAL BULLETIN, FLUID PROCESS CHEMICALS DEPARTMENT, ROHM AND HAAS COMPANY, PHILADELPHIA, 1976.
(a) 1-5, (b) 5, (c) 5.
14. AMBERLITE IRA-400, TECHNICAL BULLETIN, FLUID PROCESS CHEMICALS DEPARTMENT, ROHM AND HAAS COMPANY, PHILADELPHIA, 1976.
(a) 1-3.
15. McCABE, WARREN L.- SMITH, JULIAN C.- HARRIOT PETER. "OPERACIONES BASICAS DE INGENIERIA QUIMICA" CUARTA EDICION. EDITORIAL MCGRAW HILL, 1991.
(a) 75, (b) 109.
16. MAZZEI INYECTOR CORPORATION, DATOS TECNICOS, USA.
17. ESPINSA, "SEMINARIO DE TRATAMIENTO DE AGUAS" ASOCIACION SALVADOREÑA DE INGENIEROS QUIMICOS Y QUIMICOS INDUSTRIALES, 1994.

A N E X O S

ANEXO A

NORMAS DE CALIDAD PARA EL AGUA GRADO REACTIVO.

1080 AGUA DE CALIDAD PARA REACTIVOS

1080 A. Introducción

Uno de los aspectos más importantes del análisis es la preparación del agua de calidad para reactivos que han de utilizarse en la dilución de éstos y para los análisis de blancos. Los niveles de calidad cubren un espectro que oscila entre el tipo I, sin concentraciones detectables de los compuestos o elementos a analizar dentro de los límites de detección del método analítico, y el tipo III, para lavados y análisis cualitativos (véase tabla 1080:I). El agua para análisis no debe contener sustancias que interfieran con los métodos analíticos. La calidad del agua está directamente relacionada con el análisis que vaya a efectuarse. Puede diferir, de hecho, en función de los componentes orgánicos, inorgánicos y microbiológicos y del uso que se vaya a dar a dicha agua.

Cualquier método de preparación de agua de calidad para reactivos es acepta-

ble siempre que se cumplan los requisitos adecuados, ya que un sistema mal conservado puede dar lugar a la inducción de contaminantes. La ósmosis inversa, la destilación y la desionización en distintas combinaciones pueden utilizarse para el mismo propósito si se emplean de forma adecuada. También pueden utilizarse en este proceso la ultrafiltración, el tratamiento con luz ultravioleta o una combinación de ambos. En la sección 1080 se proporcionan normas generales para la preparación de este tipo de aguas. En la tabla 1080:II se enumeran los procesos más habituales para la purificación del agua y las clases principales de contaminantes que pueden eliminarse mediante esta purificación.

Para más detalles sobre la preparación del agua para pruebas microbiológicas, véase la sección 9020B.3c.

TABLA 1080:I. ESPECIFICACIONES DEL AGUA PARA REACTIVOS*

Parámetro de calidad	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Bacterias, UFC/ml	10	1.000	NA
pH	NA	NA	5-8
Resistividad, megaohm-cm a 25 °C	> 10	> 1	0,11
Resistividad, megaohm-cm a 25 °C	> 10	> 1	0,1
Conductividad, µmho/cm a 25 °C	< 0,1	1	10
SiO ₂ , mg/l	< 0,05	< 0,1	< 1
Sólidos totales, mg/l	0,1	1	5
Carbono orgánico oxidable total, mg/l	< 0,05	< 0,2	< 1

* NA = no aplicable.

1080 B. Métodos de preparación de agua de calidad para reactivos

1. Destilación

Puede prepararse agua para análisis destilando agua en un alambique de vidrio de borosilicato, cuarzo fundido o titanio. Para eliminar el amoníaco, se destilará a partir de una solución ácida. El CO_2 puede eliminarse hirviendo el agua durante 15 minutos y enfriándola rápidamente a temperatura ambiente. Por su parte, el CO_2 atmosférico se excluye utilizando un tubo que contenga cal sodada o un agente comercial eliminador del CO_2 *.

Téngase en cuenta que al hervir el agua pueden incorporarse otras impurezas que se desprenden del envase. Es necesario realizar tratamiento previo del agua y mantenimiento periódico para evitar la formación de escamas en el alambique. En los casos en que el agua contiene cantidades significativas de calcio, magnesio o bicarbonato puede ser necesario efectuar un pretratamiento de desmineralización mediante ósmosis inversa o intercambio iónico. La resistividad del agua destilada (tipo II) debe ser $> 1,0$ megaohmio-cm a 25°C , y para la de tipo I el valor deberá ser de 10 megaohmios-cm. Las mediciones son más exactas si se hacen sobre células en serie.

2. Ósmosis inversa

La ósmosis inversa es un proceso en el que se fuerza al agua para que entre a presión a través de una membrana semipermeable, eliminando una parte de los componentes disueltos y de las impurezas suspendidas. La calidad del agua ob-

tenida depende, obviamente, de la del agua original.

Es preciso seleccionar el módulo de membrana de ósmosis inversa adecuado a las características del agua a tratar y obtener los datos sobre los contaminantes en el agua original, a la presión a que se vaya a trabajar. Es, asimismo, necesario establecer la producción total de agua para economizar al máximo en su uso sin comprometer la calidad final de la operación. La elección de las configuraciones de las hendiduras depende del grado de suciedad del agua a tratar. Con independencia de la configuración utilizada, puede hacerse necesario un pretratamiento para minimizar la contaminación de la membrana por coloides o partículas, así como la introducción de cloro, hierro y otros compuestos oxidantes que puedan degradar las membranas de ósmosis inversa. Es necesario hacer una limpieza periódica de los módulos de membrana.

3. Intercambio iónico

Prepárese agua desionizada haciendo pasar el agua a través de un lecho mixto de intercambiador iónico constituido por resinas aniónicas y catiónicas fuertes. Cuando el sistema no está funcionando continuamente, ha de ponerse de nuevo en circulación el agua producida por el lecho de intercambio iónico. La resistencia del agua de tipo I debe ser de 10 megaohmios-cm (en serie) a 25°C .

En los casos en los que sea rentable proceder a una regeneración de la resina se utilizarán lechos separados de resinas aniónicas y catiónicas. En estos casos dispóngase el intercambiador aniónico después del catiónico para extraer los residuos que puedan proceder de la resina.

* Azarite, Fisher Scientific Co., o equivalente.

ciónica. Es esencial que las dimensiones del lecho sean las adecuadas para que las resinas ofrezcan el rendimiento requerido. En especial, hay que establecer la relación entre la longitud y el diámetro del lecho según la máxima velocidad de flujo, para asegurar que no se sobrepasa la velocidad máxima y que el agua permanece durante un tiempo suficiente en contacto con la resina.

En situaciones en las que el agua de alimentación contiene cantidades significativas de materia orgánica, es preciso eliminar los microorganismos para disminuir en lo posible la contaminación de las resinas. Los posibles tratamientos previos consisten en prefiltración, destilación, ósmosis inversa y adsorción.

4. Adsorción

La adsorción suele utilizarse para eliminar el cloro y las impurezas orgánicas. Se suele realizar con carbón activado granular. El nivel de eficacia en la eliminación de organismos depende de la naturaleza de los mismos, de las características físicas del carbón activado y de las condiciones de actuación. La eficacia de

la adsorción de organismos es inversamente proporcional a la solubilidad, y, por ello, esta técnica puede resultar inadecuada para la eliminación de compuestos polares de bajo peso molecular. Las diferencias de funcionamiento entre los distintos carbones activados son atribuibles al uso de distintos materiales y a los procedimientos de activación. Seleccionese el carbón activado adecuado teniendo en cuenta estas diferencias. Incluso con un carbón activado óptimo, no se conseguirá un funcionamiento correcto a menos que las dimensiones de la columna permitan obtener velocidad de entrada y tiempo de paso adecuados a la máxima tasa de flujo.

El empleo de carbon activado puede producir efectos adversos en la resistividad o resistencia específica. Estos efectos pueden controlarse mediante ósmosis inversa, con resinas mixtas o con adsorbentes especiales. Para conseguir el menor nivel posible de organismos contaminantes, se utilizarán mezclas de resinas de pulimentación con carbones especiales en combinación con otros tratamientos adicionales, tales como ósmosis inversa, carbones naturales, oxidación ultravioleta o ultrafiltración.

TABLA 1080:II. PROCESOS DE PURIFICACIÓN DEL AGUA

Proceso	Principales clases de contaminantes*					
	Sólidos ionizados disueltos	Gases ionizados disueltos	Compuestos orgánicos disueltos	Partículas	Bacterias	Pirógenos
Destilación	B-E†	P	B	≡	≡	≡
Desionización	≡	≡	P	P	P	P
Ósmosis inversa	B†	P	B	≡	≡	≡
Adsorción en carbono	P	P§	B-E	P	P	P
Filtración	P	P	P	≡	≡	P
Ultrafiltración	P	P	B#	≡	≡	B-E
Oxidación por luz ultravioleta	P	P	B-E**	P	B††	P

El National Committee for Clinical Laboratory Standards ha autorizado la reproducción de esta tabla procedente de C3-T2, «Preparation and Testing of Reagent Water in the Clinical Laboratory - Second Edition: Tentative Guideline». El texto completo puede conseguirse en el National Committee for Clinical Laboratory Standards, 771 E. Lancaster Ave., Villanova, Pennsylvania 19085.

* E = excelente (capaz de eliminación completa o casi total), B = buena (capaz de eliminar grandes porcentajes), P = pobre (eliminación escasa o nula).

† La resistividad del agua purificada por destilación es de un orden de magnitud inferior al del agua producida por desionización, a causa sobre todo de la presencia de CO_2 , y a veces de H_2S_2 , NH_3 y otros gases ionizados que pudieran existir en el agua potable.

‡ La resistividad de los sólidos ionizados disueltos depende de la resistividad original del agua potable.

§ El carbon activado elimina el cloro por adsorción.

¶ Cuando se emplean en combinación con otros procesos de purificación, el carbon activado de calidad especial y otros adsorbentes sintéticos muestran una excelente capacidad de eliminación de los contaminantes orgánicos. Su empleo, sin embargo, se orienta hacia compuestos y aplicaciones específicas.

Los ultrafiltros han resultado útiles en la reducción de contaminantes orgánicos en el suministro de agua, basada en la disminución del peso molecular de la membrana.

** La oxidación con luz ultravioleta de 185 nm (sistemas de acumulación) es eficaz para eliminar los contaminantes orgánicos residuales cuando se emplea como posttratamiento. La composición del agua potable desempeña un papel esencial en el rendimiento de estos procesadores de acumulación.

†† Los esterilizadores UV de 254 nm, aunque no eliminan físicamente las bacterias, pueden tener una notable capacidad bactericida o bacteriostática que dependen de la intensidad, tiempo de contacto y velocidad de flujo.

1080 C. Calidad del agua para reactivos

1. Patrones de calidad

Existen varios patrones de calidad del agua para análisis, todos ellos basados en los niveles de contaminantes (véase tabla 1080:I)^{1, 2}. Los métodos y usos enumerados proceden del National Committee for Clinical Laboratory Standards (NCCLS).

Utilícese agua de tipo I en los métodos analíticos que requieran un mínimo de interferencias y desviación y un máximo de precisión. El agua de tipo II está

destinada a proporcionar al usuario un agua en la que sea admisible la presencia de bacterias. Se utiliza para la preparación de reactivos, colorantes o tinciones. El agua de tipo III puede utilizarse para la limpieza del material de vidrio o como agua de alimentación para la producción de aguas de mayor nivel de calidad.

El agua para análisis de tipo I, con una resistividad mínima de 10 megaohm-cm a 25 °C (en serie), se prepara mediante destilación, desionización o tratamiento con ósmosis inversa del agua de ali-

mentación, seguidos de acabado con un lecho mixto desionizador y paso a través de un filtro de membrana de 0.2 µm de poro. También puede tratarse con ósmosis inversa seguida de adsorción con carbón y desionización. Determinese su calidad en el momento de su producción. Los desionizadores de lecho mixto añaden pequeñas cantidades de materia orgánica al agua, sobre todo si el lecho es fresco. La resistividad del agua de tipo I debe ser > 10 megaohm-cm a 25 °C, medida en serie. La determinación de la resistividad no podrá detectar organismos o contaminantes no ionizados ni proporcionará una valoración exacta de los contaminantes iónicos a nivel de microgramo por litro. Por consiguiente, se harán mediciones distintas para contaminantes del tipo de TOC, SiO₂ y recuentos bacterianos.

El agua de tipo II se produce mediante destilación o desionización. Su resistencia debe ser > 1 megaohm-cm a 25 °C. Hay que adoptar las mismas precauciones al hacer las determinaciones de los contaminantes.

El agua de tipo III debe tener una resistividad mínima de 0,1 megaohm-cm.

En la tabla 1080:I se enumeran otros contaminantes del agua para reactivos.

El pH del agua de tipo I y II no puede medirse de manera exacta sin contami-

narse. Para algunos análisis es necesario medir otros componentes.

El agua de tipo I no puede ser almacenada sin que sufra una degradación significativa, por lo que debe producirse de manera continua y consumirse de inmediato. El agua de tipo II puede conservarse, pero hay que procurar que su almacenamiento dure el menor tiempo posible y que mantenga la calidad adecuada al uso que se le va a dar. Consérvese sólo en materiales que la protejan de la contaminación, como el TFE y el vidrio para análisis orgánicos o los plásticos para análisis de metales. El agua de tipo III se conservará en materiales que la protejan de la contaminación.

2. Referencias

1. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 1987. Annual Book of ASTM Standards, Parte 31, Water, Atmospheric Analysis. American Soc. Testing & Materials, Filadelfia, Pennsylvania.
2. COMMISSION ON LABORATORY INSPECTION AND ACCREDITATION. 1985. Reagent Water Specifications. College of American Pathologists, Chicago, Ill.
3. NATIONAL COMMITTEE FOR CLINICAL LABORATORY STANDARDS. 1988. Preparation and Testing of Reagent Water in the Clinical Laboratory - Segunda edición; Tentative Guideline. Publ. C3-T2, National Comm for Clinical Laboratory Standards, Villanova, Pennsylvania.

ANEXO B

GUIA DE DIMENSIONAMIENTO DE DESMINERALIZADORES.

A continuación se presenta la traducción de una parte de la guía de dimensionamiento de sistemas desmineralizadores presentados por la Culligan Co. de los Estados Unidos.

B.1. SISTEMAS DESMINERALIZADORES.

Esta guía de dimensionamiento esta diseñada para presentar datos técnicos y fórmulas que ayudarán en el cálculo de las capacidades de las unidades (catiónica y aniónica) y de las calidades de agua producto.

Usando la información básica y los datos de esta guía, usted será capaz de predecir exactamente la capacidad y calidad de agua producida por un desmineralizador.

Todas las curvas de capacidad y fuga mostradas en esta guía están basadas en agua que tiene un contenido típico de minerales disueltos como se muestra en el análisis en la página 241.

Las relaciones de la capacidad (en galonaje) de las unidades mostradas están basadas en el nivel de calidad real obtenido.

En la selección del tamaño y tipo apropiado del desmineralizador para una aplicación específica, los siguientes factores deben ser considerados:

- 1- El uso esperado del agua.
- 2- Calidad requerida del agua.
- 3- Velocidad de flujo requerida (máximos y mínimos).
- 4- La capacidad (de galonaje) requerida entre regeneraciones.
- 5- Limitaciones de operación de la unidad desmineralizadora.

Con una cuidadosa evaluación de estos factores, la recolección de suficientes datos y el uso apropiado de esta guía de dimensionamiento, puede ser seleccionado el desmineralizador correcto para cumplir las necesidades del comprador.

B.2. CALIDAD DEL AGUA.

Si la remoción de sílice y/o dióxido de carbono es requerida, es necesario un sistema de desmineralización de base fuerte. Si dicha remoción no es requerida, puede ser aplicado un sistema desmineralizador con una base débil.

Las unidades catiónica y aniónica base fuerte son fabricadas para máximos niveles de regeneración para lograr mantener una fuga de sodio y sílice mínima.

Los siguientes datos dan la calidad y fugas esperadas en aguas desmineralizadas producidas por sistemas desmineralizadores de base fuerte.

Componentes	Dos lechos base fuerte
NaCl	0
NaOH	1 - 10 ppm
CO ₂	0
SiO ₂	usualmente 0.2 ppm
pH	7.5 - 10
Ohms	50,000 - 200,000

B.3. CAPACIDAD.

Generalmente, los desmineralizadores deben ser seleccionados de manera que no sean regenerados más de una vez al día. Si la capacidad requerida excede la capacidad del desmineralizador, una unidad con mayor capacidad deberá ser considerada.

Las tablas y gráficos presentadas a continuación están diseñadas para proveer una referencia rápida y fácil para el diseño de desmineralizadores. El procedimiento para la determinación de la capacidad y la calidad de la unidad se encuentra más adelante. Con el seguimiento de estos pasos y usando las gráficas apropiadamente, resulta fácil diseñar una unidad para cualquier situación dada.

Una vez que las capacidades por pie³ han sido determinadas, es fácil cambiar el tamaño de la unidad. Todo lo que se requiere es un recálculo basado en los pie³ totales de la resina en la nueva unidad.

Recuerde, que los cálculos de la capacidad y la fuga

deben hacerse con el análisis del agua cruda que se desea tratar, ya que las capacidades calculadas para un tipo de agua usualmente no serán las mismas para otro.

B.4. CALCULOS PARA LA UNIDAD CATIONICA.

Para determinar la capacidad de operación de la unidad cationica, utilice el siguiente procedimiento:

(Ejemplo de la muestra analizada pág.241)

A- Del análisis del agua cruda, determine el porcentaje de sodio y de alcalinidad.

$$\% \text{ Sodio} = \frac{\text{gpg sodio} + \text{gpg potasio}}{\text{Factor de carga Y}} \times 100 \quad (B-1)$$

$$\% \text{ Sodio} = \frac{2.5 + 0.1}{10} \times 100 = 26$$

$$\% \text{ Alcalinidad} = \frac{\text{gpg carbonato} + \text{gpg bicarbonato}}{\text{Factor de carga Y}} \times 100 \quad (B-2)$$

$$\% \text{ Alcalinidad} = \frac{0 + 5.0}{10} \times 100 = 50$$

(NOTA: el % de alcalinidad puede ser calculado como se hizo arriba o leído directamente de la guía de análisis).

B- Utilizando la gráfica B-1, se ubica en la parte inferior del gráfico, eje de las X, el porcentaje de sodio calculado y moviéndose verticalmente hacia arriba se intercepta la curva del porcentaje de alcalinidad. Continuando horizontalmente hacia la izquierda del gráfico se lee, en el eje de las Y, la

capacidad en kilogramos por pie³ de resina. Para los porcentajes anteriores la capacidad leída del gráfico es de 27.6 kgr/pie³ de resina

$$\text{Kgr} \times 1000 = 27,600 \text{ granos/pie}^3$$

NOTA: en la mayoría de los casos será necesario interpolar entre las curvas de % de alcalinidad. La interpolación es estimada entre dos curvas dadas.

C- Multiplicar la capacidad calculada del catión por el número total de pie³ de la unidad escogida para determinar la capacidad total de la resina catiónica en granos como CaCO₃.

$$\text{Capacidad total} = \text{Capacidad unidad} \times V \text{ resina}$$

$$\text{Capacidad total} = 27,600 \text{ gr/pie}^3 \times 2 \text{ pie}^3 = 55,200 \text{ gr}$$

D- Dividir la capacidad de la unidad (en granos) por el factor de carga "Y" para encontrar la capacidad en galones.

$$\text{Galones} = \frac{\text{Capacidad total}}{\text{Factor carga Y}}$$

$$\text{Galones} = \frac{55,200 \text{ gr}}{10 \text{ gpg}} = 5,520$$

Esta es la capacidad total de la unidad. Pero debido a que la unida catiónica suministra el agua para la regeneración de la unidad aniónica, esa agua de regeneración no esta disponible para el ciclo de servicio y debe ser descontada. Por cada pie³ de resina aniónica, descontar 100 galones de agua decationizada. La capacidad catiónica neta disponible en

galones será:

Galonaje neto = 5,520 - (pie³ de resina aniónica x 100 gal)

Galonaje neto = 5,520 - (2x100) = 5,320

Determinación de fuga de sodio.

La calidad del efluente de un desmineralizador de dos lechos es función de la fuga de la unidad catiónica. La fuga del catión está influenciada por la concentración de sodio, la concentración de la alcalinidad y el nivel de regeneración. La fuga de los desmineralizadores será considerada solamente en el nivel de regeneración estándar de 9 lbs de HCl.

Para determinar la fuga de sodio desde la unidad catiónica, se utiliza el siguiente procedimiento:

A- El % de sodio y alcalinidad fueron determinados en el paso A anterior.

% Sodio = 26

% Alcalinidad = 50

B- Utilizando el gráfico B-2 se localiza el porcentaje de sodio en la parte de inferior del gráfico, siguiendo verticalmente hacia arriba se intercepta la curva del porcentaje de alcalinidad (interpolarse si es necesario). Continuando horizontalmente hacia la izquierda del gráfico lea el promedio de fuga de sodio como porcentaje de cationes totales. Para los porcentajes anteriores el valor leído es de 0.2 %.

C- Multiplique el factor de carga Y por el porcentaje de cationes totales y por 17.1 para determinar la fuga de sodio

(en ppm) de la unidad catiónica.

$$\text{Fuga de sodio} = \frac{\% \text{cationes}}{100} \times \text{Factor de carga Y} \times 17.1$$

$$\text{Fuga de sodio} = \frac{0.2}{100} \times 10 \times 17.1 = 0.34 \text{ ppm}$$

Aunque el gráfico de fuga indique la posibilidad de un 0% de fuga, el ciclo de las esferas de resinas rara vez produce menos de 1 ppm de fuga. Por lo tanto nunca use menos de 1 ppm de fuga de sodio calculada, además se redondea el valor de fuga de sodio calculado al próximo mayor a 1 ppm. Por ejemplo, si una fuga calculada es de 3.3 ppm se redondea a 4 ppm.

B.5. CALCULOS PARA LA UNIDAD ANIONICA.

Las capacidades aniónicas de base fuerte en esta guía de dimensionamiento están basadas en un punto final donde la fuga de sílice a incrementado a 0.3 ppm sobre su promedio de fuga calculado. Recuerde que la fuga de sílice no afecta la resistencia específica leída. Por lo tanto, al final del ciclo de servicio, habrá alta fuga de sílice.

La capacidad de la resina esta directamente relacionada con la completa remoción de sílice desde el lecho de resina durante la regeneración. La remoción de sílice y la fuga de sílice son influenciadas por la dosis de regeneración, temperatura y tiempo de contacto. Cuando la sílice es superior al 10% se utiliza un nivel de regeneración de 8 lbs de NaOH/pie³ o más.

Para determinar la capacidad de la unidad aniónica fuertemente básica del desmineralizador, utilice los siguientes pasos:

A- Del análisis del agua cruda de la guía de dimensionamiento encuentre el porcentaje de ácido carbónico, el porcentaje de iones monovalentes, y el % de sílice en relación a los aniones totales intercambiables (factor de carga Z). Así:

$$\% \text{Acido Carbónico} = \frac{\text{gpg CO}_3^{2-} + \text{gpg HCO}_3^- + \text{gpg CO}_2}{\text{Factor de carga Z}} \quad (B-3)$$

$$\% \text{Acido carbónico} = \frac{0.0 + 5.0 + 0.9}{11.4} \times 100 = 51.7$$

$$\% \text{iones monovalentes} = \frac{\text{gpg cloruro} + \text{gpg nitrato}}{\text{Factor de carga Z}} \times 100 \quad (B-4)$$

$$\% \text{iones monovalentes} = \frac{2.4 + 0.2}{11.4} \times 100 = 22.8$$

$$\% \text{Sílice} = \frac{\text{gpg Sílice}}{\text{Factor de carga Z}} \times 100 \quad (B-5)$$

$$\% \text{Sílice} = \frac{0.5}{11.4} \times 100 = 4.4$$

B- Utilizando el nivel de regeneración deseado (nivel estándar de 8 lbs de NaOH/pie³ de resina) se encuentra la capacidad del anión por pie³ de resina en el gráfico B-5. Ubicando las 8 lbs del nivel de regeneración (a menos que otro nivel sea elegido) en el eje de las X, moviéndose verticalmente hacia arriba hasta interceptar la curva, y desplazándose horizontalmente

hacia la izquierda del gráfico lea en el eje de las Y el valor de la capacidad de intercambio. El valor leído para dicho nivel de regeneración es de 16.1 Kgr/pie² de resina. De la tabla B.1 seleccione los factores de corrección para 51.7 % de ácido carbónico, 22.8 % de iones monovalentes y 4.4 % de sílice, los factores de corrección son $F_1 = 1.12$, $F_2 = 0.96$ y $F_3 = 0.99$ respectivamente. Multiplicando la capacidad por cada factor de corrección se tiene:

$$\text{Capacidad corregida} = \text{Capacidad} \times F_1 \times F_2 \times F_3$$

$$\text{Capacidad corregida} = 16,000 \times 1.12 \times 0.96 \times 0.99 = 17,100 \text{ gr,}$$

Divida la capacidad de la unidad por el factor de carga Z para encontrar el volumen de agua desmineralizada por ciclo de regeneración.

$$\text{Galones} = \frac{\text{Capacidad (gr)}}{\text{Factor de carga Z}}$$

$$\text{Galones} = \frac{34,200 \text{ gr}}{11.4 \text{ gpg}} = 3,000$$

D- El volumen de agua producida por un desmineralizador de lecho doble se registrará siempre por la resina aniónica quien es la que se agota primero.

B.6. DETERMINACION DE LA FUGA DE SILICE.

La fuga desde un desmineralizador de lecho doble

consistirá de hidróxido de sodio y sílice. Donde el sodio viene desde la unidad catiónica. Este es convertido a hidróxido de sodio en la unidad aniónica de base fuerte. Por lo tanto la cantidad de hidróxido de sodio en el agua desmineralizada es igual a la fuga de sodio desde la unidad catiónica dicha fuga es 1 ppm.

La resistencia específica de esta agua reflejará la presencia de hidróxido de sodio solamente después que todo el ácido carbónico (dióxido de carbono) sea removido por la resina aniónica de base fuerte véase el gráfico B-8 y encuentre la conductividad específica causada por el hidróxido de sodio.

Ubique las ppm de fuga de sodio en el eje de las X del gráfico, diríjase verticalmente hacia arriba e intercepte la línea para sistemas fuertemente básicos y luego desplácese horizontalmente hacia la izquierda y lea la conductividad específica. Para 1 ppm de fuga de sodio la conductividad específica es de 5.2 μ mhos.

La fuga de sílice esta directamente relacionada con la cantidad de sílice que permanece en la resina de la regeneración anterior y la fuga de sodio desde la unidad catiónica.

Para determinar la fuga de sílice desde el intercambiador aniónico fuertemente básico, utilice el siguiente procedimiento:

A- Encuentre el % de sílice y las ppm de fuga de sodio (ambas encontradas en los procedimientos descritos anteriormente).

% de sílice = 4.4

Fuga de sodio = 1 ppm

B- Utilizando la gráfica B-6, encuentre el valor aproximado de fuga de sílice. Ubique el % de sílice en el eje de las X, luego moviéndose verticalmente hacia arriba hasta interceptar la curva del nivel de regeneración utilizado, luego desplazándose horizontalmente hacia la izquierda lea el promedio de fuga de sílice. En los casos donde el % de sílice no puede interceptar la curva del nivel de regeneración, use un promedio de fuga mínimo de 0.05 ppm. En el caso del ejemplo no intercepta la curva del nivel de regeneración, por tanto el promedio de fuga de sílice será de 0.05 ppm.

C- El factor de corrección de la fuga de sílice se encuentra en el gráfico B-7. Ubicando las ppm de fuga de sodio en el eje de las X desplácese verticalmente hacia arriba hasta interceptar con la curva del nivel de regeneración elegido, luego desplácese horizontalmente hacia la izquierda para encontrar el factor de corrección.

Para 1ppm de fuga de sodio se tiene un factor de corrección de 0.95 para 8 lbs de NaOH/pie². Divida el promedio de fuga de sílice por el factor de corrección para llegar a la fuga de sílice corregida.

$$\text{Fuga corregida} = \frac{\text{promedio de fuga de sílice}}{\text{Factor de corrección}}$$

$$\text{Fuga corregida} = \frac{0.05}{0.95} = 0.053 \text{ ppm SiO}_2$$

Para predecir el pH del efluente final utilice la siguiente tabla:

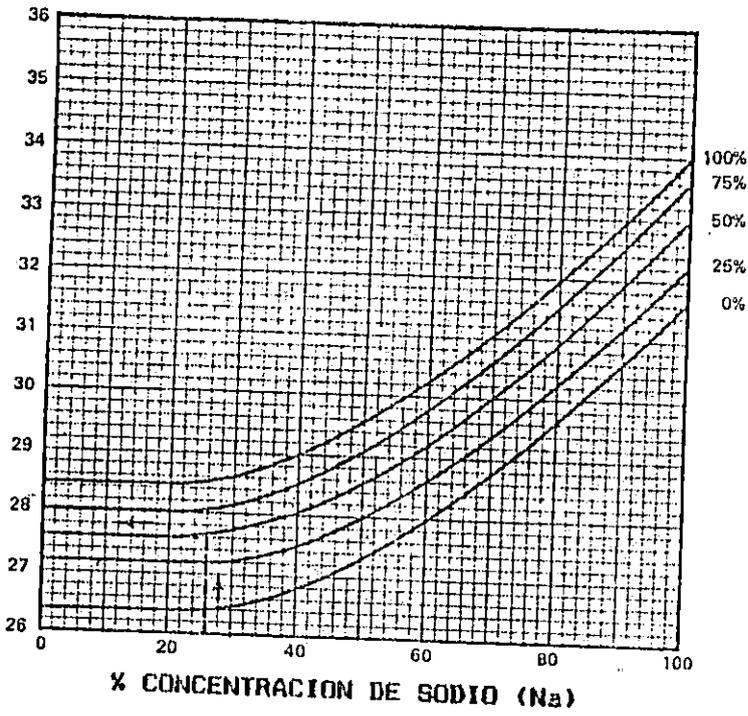
ppm fuga de sodio	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
pH	7.7	8.2	8.6	9.0	9.3	9.6	9.8	10.0	10.2	10.3

Utilice la fuga de sodio encontrada en la unidad catiónica y lea el pH aproximado en la tabla. Por ejemplo, 1 ppm de fuga de sodio a través de la resina aniónica fuertemente básica resultará en un pH aproximado de 7.7.

EJEMPLO DE ANALISIS FISICOQUIMICO PARA EL DIMENSIONAMIENTO
DE SISTEMAS DESMINERALIZADORES (CULLIGAN CO.).

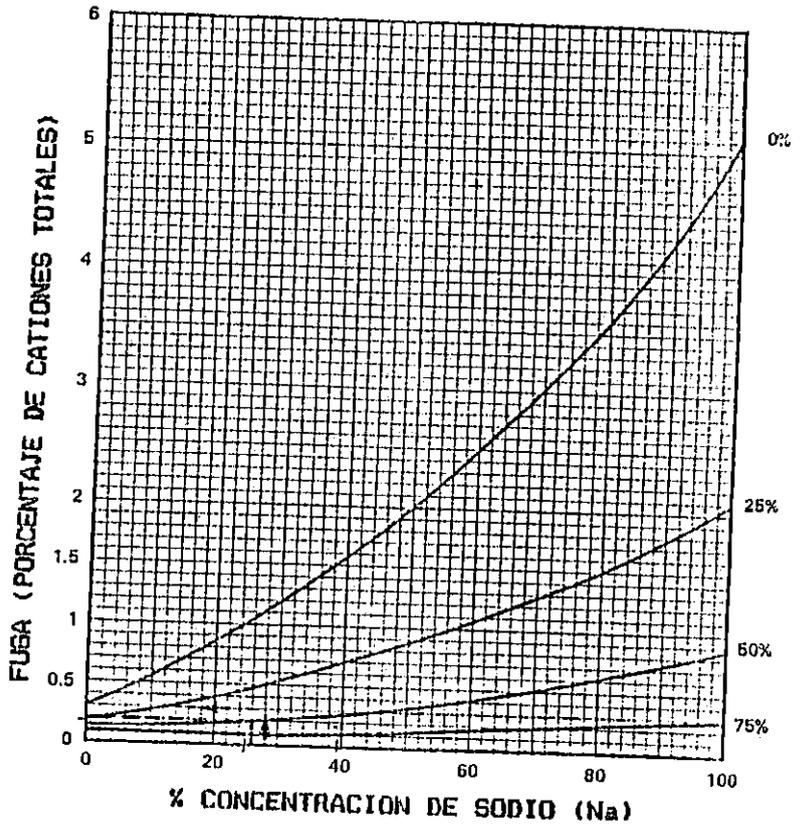
Los valores de gpg están dados como CaCO ₃			
Cationes	Concentración	Aniones	Concentración
Calcio	5.0 gpg	Cloruros	2.4 gpg
Magnesio	2.4 gpg	Sulfatos	2.4 gpg
Sodio	2.5 gpg	Nitratos	0.2 gpg
Potasio	0.1 gpg	Hidróxido	0.0 gpg
		Carbonatos	0.0 gpg
		Bicarbonatos	5.0 gpg
Total de Cationes	10 gpg	Total de Aniones	10 gpg
Para calculos de desmineralización total:			
Sílice	0.5 gpg	Factor de carga Y	10.0 gpg
Dióxido de Carbono	0.9 gpg	Factor de carga Z	11.4 gpg

CAPACIDAD EN KILOGRAMOS (kgr) POR PIE³ COMO CaCO₃



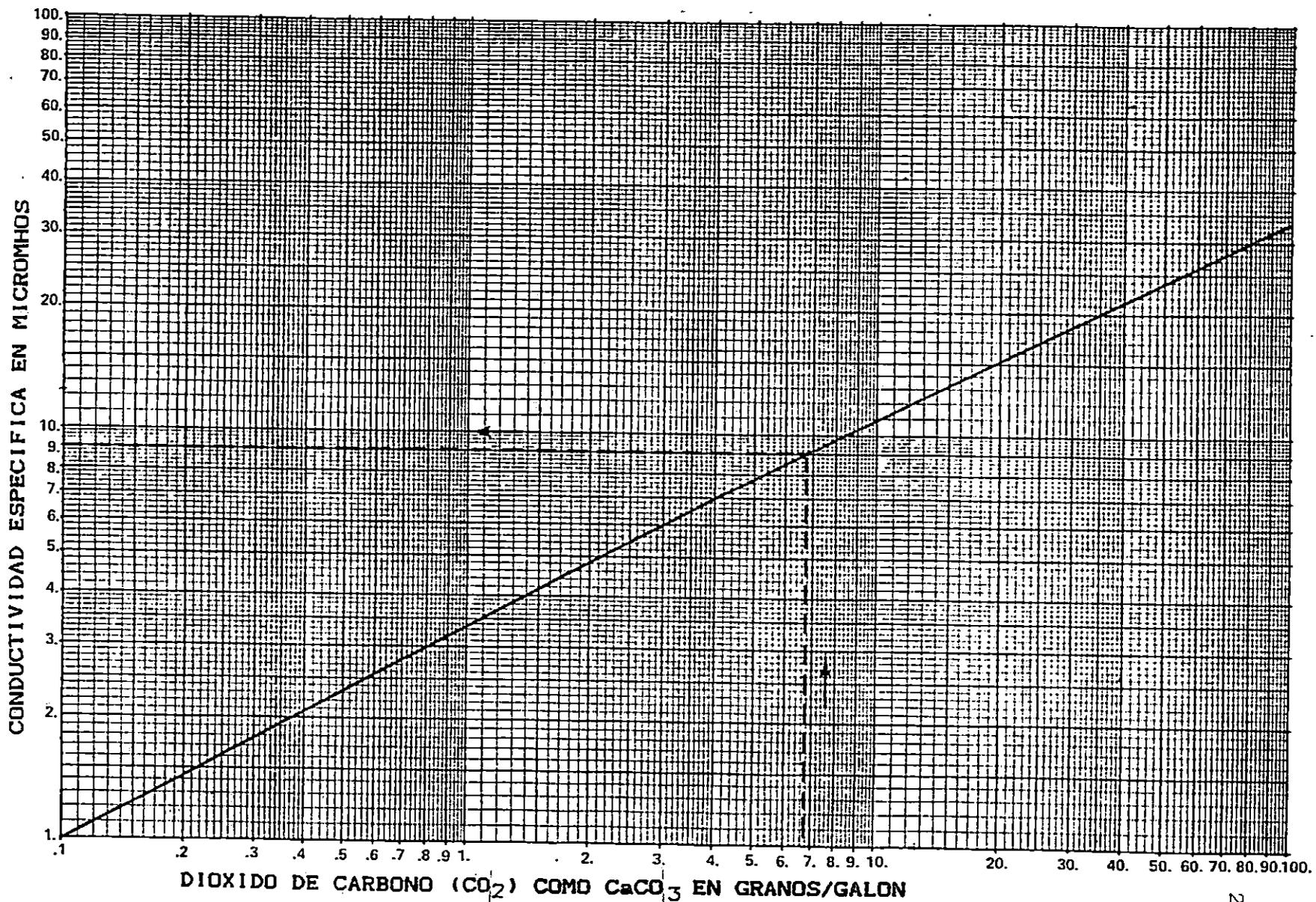
% CONCENTRACION DE SODIO (Na)

GRAFICO B-1



% CONCENTRACION DE SODIO (Na)

GRAFICO B-2



DIOXIDO DE CARBONO (CO₂) COMO CaCO₃ EN GRANOS/GALON

GRAFICO B-3. EFECTOS DEL DIOXIDO DE CARBONO (CO₂) EN LA CONDUCTIVIDAD ESPECIFICA

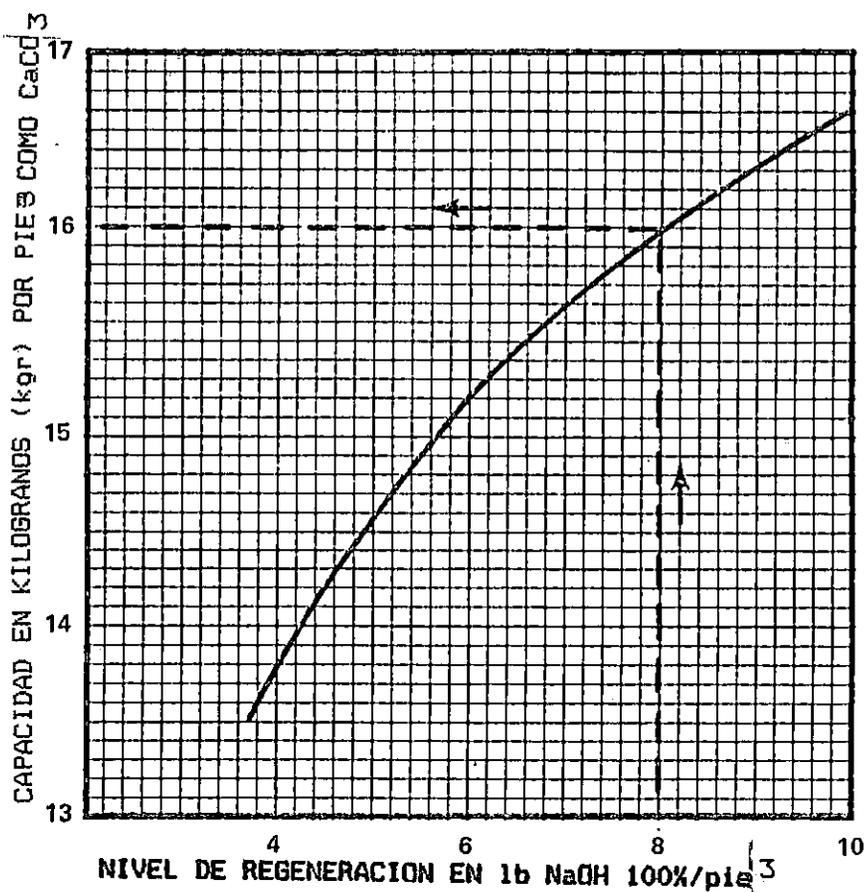


GRAFICO B-4

TABLA B-1

FACTORES DE CORRECCION PARA LA CAPACIDAD DE RESINA ANIONICA BASE FUERTE

ACIDO CARBONICO		IONES MONOVALENTES		% SILICE			
% H ₂ CO ₃	F ₁	% IONES	F ₂	@ 4lbs. NaOH	@ 6 lbs. NaOH	@ 8 lbs. NaOH	F ₃
0-2	1.00	0-6	0.99	0-1.3	0-4	0-8	0.99
2-4	1.01	6-12	0.98	1.3-2.5	4-8	8-14	0.98
4-6	1.02	12-20	0.97	2.5-4	8-11	14-20	0.97
6-8	1.03	20-30	0.96	4-5	11-15	20-25	0.96
8-10	1.04	30-40	0.95	5-7	15-19	25-31	0.95
10-13	1.05	40-53	0.94	7-9	19-22	31-36	0.94
13-17	1.06	53-65	0.93	9-10.5	22-25	36-41	0.93
17-20	1.07	65-80	0.92	10.5-12	25-29	41-45	0.92
20-25	1.08	80-100	0.91	12-14	29-32	45-50	0.91
25-30	1.09			14-17	32-35		0.90
30-36	1.10			17-19	35-39		0.89
36-44	1.11			19-21	39-42		0.88
44-54	1.12			21-24	42-45		0.87
54-65	1.13			24-26	45-50		0.86
65-78	1.14			26-29			0.85
78-100	1.15			29-32			0.84
				32-35			0.83
				35-38			0.82
				38-42			0.81
				42-44			0.80

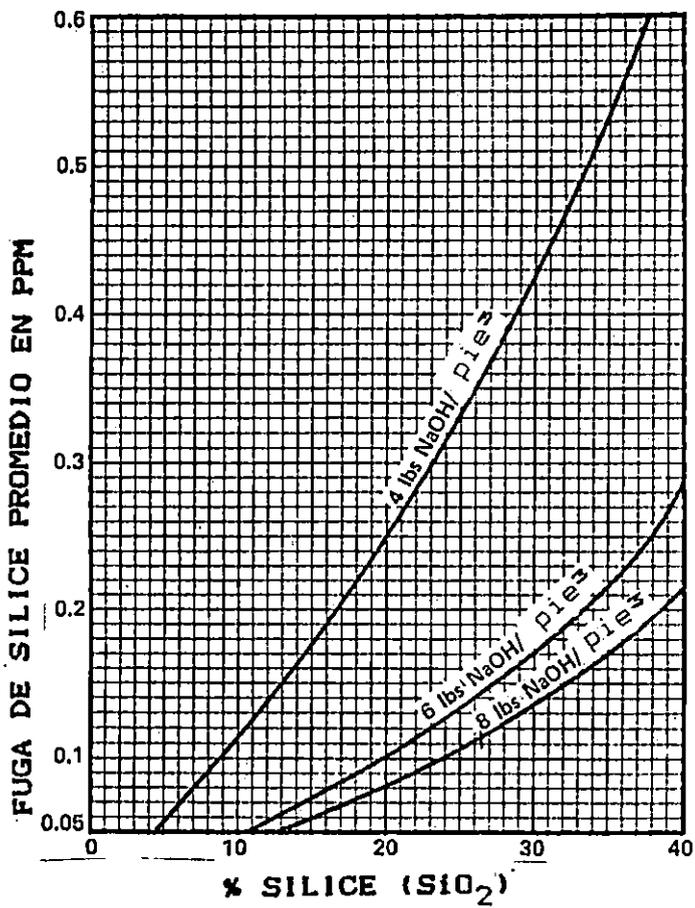
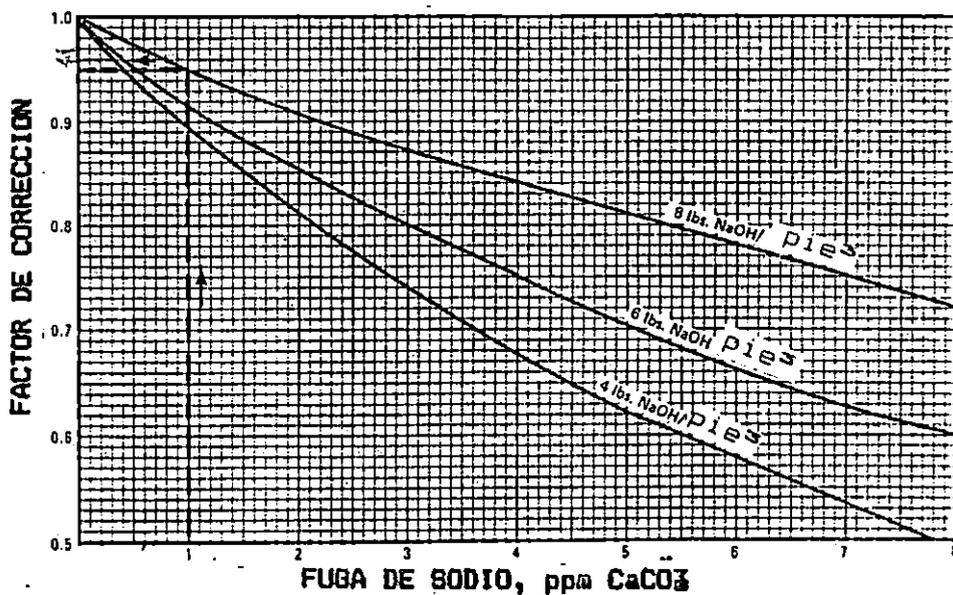


GRAFICO B-5

GRAFICO B-6

FACTOR DE CORRECCION DE FUGA DE SILICE DEBIDO AL SODIO



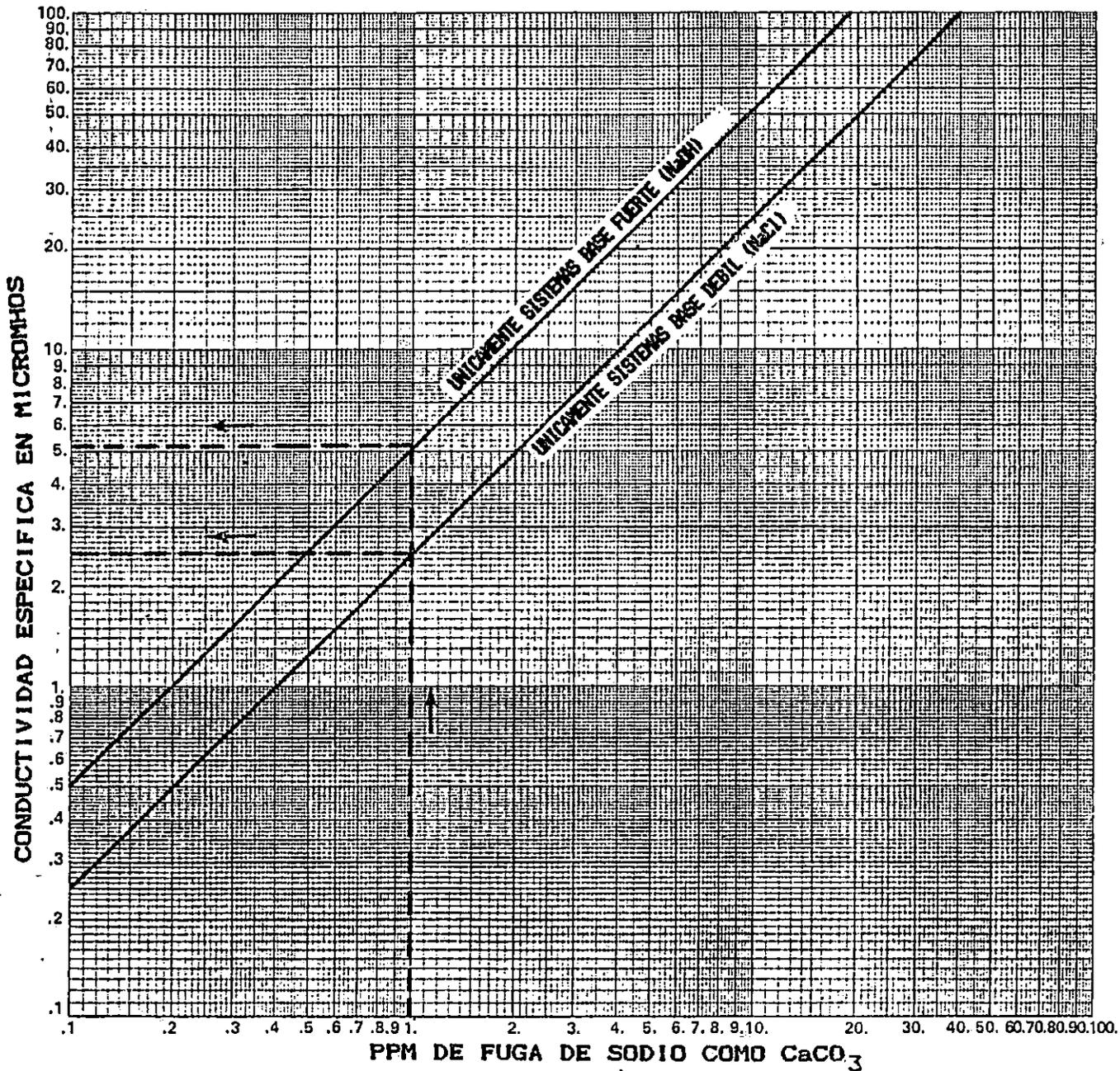


GRAFICO B-7

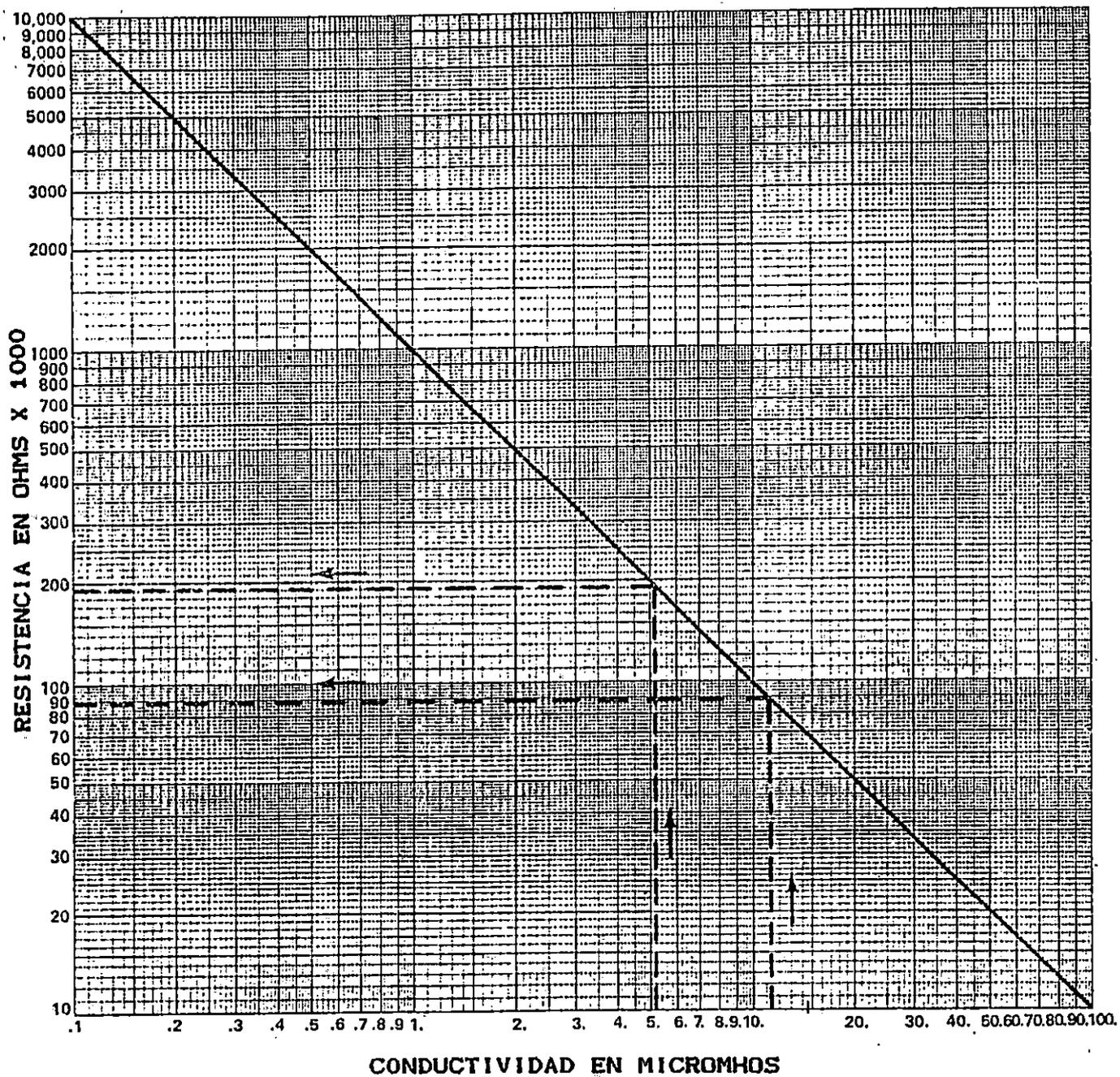


GRAFICO B-8

ANEXO C.

PASOS Y FORMULAS ESTADISTICAS PARA LA EVALUACION
EXPERIMENTAL.

1. Evaluación de las medidas de tendencia central

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} \quad (C.1)$$

$$\Sigma X = X_1 + X_2 + \dots + X_n \quad (C.2)$$

$$\Sigma X_n^2 = X_n^2 + X_n^2 + \dots + X_n^2 \quad (C.3)$$

$$S_{n-1} = \sqrt{\frac{\Sigma X^2 - (\Sigma X)^2/n}{n-1}} \quad (C.4)$$

también se evalúa dentro de estos datos estadísticos el coeficiente de variación, el cual se calcula de la siguiente manera:

$$\%CV = \frac{S_{n-1}}{\bar{X}} \quad (C.5)$$

2. Para el análisis de varianza, se deben seguir los siguientes pasos:

a. Análisis en una dirección (1):

a.1 Factor de corrección

$$F.C. = \frac{(\Sigma X)^2}{n} \quad (C.6)$$

donde n: número de datos que ha generado la sumatoria.

a.2 (Variación del experimento)

$$SS_{TOTAL} = \sum(\sum X^2) - F.C. \quad (C.7)$$

a.3

$$SS_{REPETICIONES} = \frac{(\sum X_1)^2 + \dots + (\sum X_n)^2}{n} - F.C. \quad (C.8)$$

donde n: es el número de datos que ha generado la sumatoria en la dirección señalada.

$$a.4 \quad SS_{ERROR} = SS_{TOTAL} - SS_{REPETICIONES} \quad (C.9)$$

a.5 Cuadro ANVA

Fuente de	gl	SS	\bar{SS}	Fc	F _{tabla}
Repeticiones	n ₁	SS _{REP.}	S ² _R	F _R	
Error	n ₂	SS _{ERROR}	S ² _{ERROR}		
Total	n _T	SS _{TOTAL}			

donde: gl : grados de libertad, $S^2_R = SS_{REP}/gl_{REP}$ y
 $F_R = S^2_R/S^2_{ERROR}$ y F_{tabla} se encuentra en tabla C-1.

NOTA: Si se tiene un resultado donde el F calculado no supera al F de tabla se dice que los promedios son estadísticamente iguales y no es necesario evaluarlos. De lo contrario, se comparan por medio de la diferencia media significativa (DMS). El cálculo y comparación del DMS se hace de la siguiente manera:

$$DMS = t_{tab(\alpha)} * \sqrt{2 * \frac{S_i^2}{n}} \quad (C.10)$$

donde $t_{tab(\alpha)}$ se encuentra en la tabla C-2, α es el nivel de confianza estadística y n es el número de datos por cada repetición o posición de acuerdo a la dirección que se este realizando el análisis.

α	10	5	1	\bar{X}	X_1	X_2	X_3
t				X_3			
g1				X_2			
DMS				X_1			

donde la diferencia de $X_3 - X_1$, $X_3 - X_2$, $X_2 - X_1$, superan el dato calculado de DMS se dice que los promedios tienen una alta diferencia significativa al nivel de confianza que se ha calculado o de lo contrario se diría que no hay diferencia significativa entre los promedios.

El procedimiento global a seguir para el análisis en dos direcciones se efectúa siguiendo los pasos desde a.1 hasta a.3 anteriores, y posteriormente :

a.4.

$$SS_{POSICIONES} = \frac{(\sum X_1)^2 + \dots + (\sum X_n)^2}{n} - F.C. \quad (-) \quad (C.11)$$

donde n : número de datos que ha generado la sumatoria en la dirección señalada.

$$a.5. SS_{ERROR} = SS_{TOTAL} - SS_{REPETICIONES} - SS_{POSICIONES}$$

a.6. Cuadro ANVA.

F. de varia.	gl	SS	\bar{SS}	F _C	F _{tabla}
REPETICIONES	n ₁	SS _{REP}	S ² _R	F _R	
POSICIONES	n ₂	SS _{POS}	S ² _P	F _P	
ERROR	n ₃	SS _{ERROR}	S ² _{ERROR}		
TOTAL	n _T	SS _{TOTAL}			

$$\text{donde } S^2_R = SS_{REP}/gl_{REP}, \quad S^2_P = SS_{POS}/gl_{POS},$$

$$S^2_{ERROR} = SS_{ERROR}/gl_{ERROR}, \quad F_R = S^2_R/S^2_{ERROR} \text{ y } F_P = S^2_P/S^2_{ERROR}$$

Bajo las mismas consideraciones descritas en la nota se procede a calcular o no el DMS. Cuando la diferencia de los promedios supera al DMS, es posible hacer un análisis de regresión ya que existe una diferencia significativa entre los promedios que han dado origen al DMS, en consecuencia es posible establecer una relación matemática entre los puntos que han generado los promedios.

Ejemplo de cálculo del inyector de regenerante aniónico.

1. Análisis en una dirección ()

a) Factor de corrección:

$$F.C = \frac{(\sum X)^2}{n} = \frac{(18.54)^2}{8}$$

$$F.C = \underline{42.9665}$$

b)

$$SS_{TOTAL} = \sum X^2 - FC$$

$$F.C = \frac{(\sum X)^2}{n} = \frac{(18.54)^2}{8}$$

b)

$$SS_{TOTAL} = \sum X^2 - FC$$

$$SS_{TOTAL} = 50.5918 - 42.9665 = 7.6253$$

c)

$$SS_{REPETICIONES} = \frac{\sum (\sum X_{REPETICIONES})^2}{n} - FC$$

$$SS_{REPETICIONES} = \frac{9.27^2 + 9.27^2}{4} - 42.9665 = 42.9665 - 42.9665$$

$$SS_{REPETICIONES} = 0.0$$

$$d) SS_{ERROR} = SS_{TOTAL} - SS_{REPETICIONES}$$

$$SS_{ERROR} = 7.6253 - 0.0$$

$$SS_{ERROR} = 7.6253$$

Ver tabla 9-9

Se observa que el F calculado no supera al F de tabla, se dice entonces que los promedios son estadísticamente iguales y no es necesario evaluarlos.

2. Análisis en dos direcciones.

a)

$$SS_{\text{POSICIONES}} = \frac{\sum (\sum X)^2}{n} - FC$$

$$SS_{\text{POSICIONES}} = \frac{(3.16^2 + 3.32^2 + 4.1^2 + 7.96^2)}{2} - 42.9665$$

$$SS_{\text{POSICIONES}} = 7.6233$$

$$b) SS_{\text{ERROR}} = SS_{\text{TOTAL}} - SS_{\text{REPETICIONES}} - SS_{\text{POSICIONES}}$$

$$SS_{\text{ERROR}} = 7.6253 - 0.00 - 7.6233$$

$$SS_{\text{ERROR}} = 0.002$$

Ver tabla 9-10

Se observa que el F calculado supera el F de tabla, es necesario evaluar los promedios por diferencia mínima significativa (DMS).

La diferencia mínima significativa, se calcula de la siguiente manera:

$$DMS = t_{\text{tab}(\alpha)} * \sqrt{2 * S^2/n}$$

De la tabla C-2, el $t_{\text{tab}(\alpha)}$ para un grado de libertad de 3 y un $n=2$

TABLA 9-14. RESULTADOS DEL ANALISIS DEL DMS PARA EL INYECTOR
DEL NaOH.

Posiciones de válvula.

α	10%	5%	1%	\bar{X}	1.60	1.67	2.04	3.96
t	2.352	3.182	5.841	3.96	2.36*	2.29*	1.92*	0
gl	3	3	3	2.04	0.44*	0.37*	0	
DMS	0.062	0.084	0.154	1.67	0.07 ^{NS}	0		
				1.60	0			

* Supera el DMS

^{NS} No supera al DMS.

De acuerdo, a la evaluación se dice que existe una diferencia significativa entre los promedios que han dado origen al DMS, en consecuencia es posible establecer una relación matemática entre los puntos que han generado los promedios.

TABLA C-1. 10%, 5% Y 1% PORCENTAJES PARA LA DISTRIBUCION F.

GRADOS DE LIBERTAD PARA EL DENOMINADOR	GRADOS DE LIBERTAD PARA EL NUMERADOR																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	20				
1	.10	39.86	49.50	53.59	55.83	57.24	58.20	58.91	59.44	59.89	60.20	60.70	245	61.22	246	61.74				
	.05	161	200	216	225	230	234	237	239	241	242	243	244	245	246	248				
	.01	4,052	4,999	5,403	5,625	5,764	5,859	5,928	5,981	6,022	6,056	6,082	6,105	6,142	6,169	6,208				
2	.10	8.53	9.00	9.16	9.24	9.29	9.33	9.35	9.37	9.38	9.39	9.41	9.41	9.42	9.44	9.44				
	.05	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.36	19.37	19.38	19.39	19.40	19.41	19.42	19.43	19.44				
	.01	98.49	99.00	99.17	99.25	99.30	99.33	99.34	99.36	99.38	99.40	99.41	99.42	99.43	99.44	99.45				
3	.10	5.54	5.46	5.39	5.34	5.31	5.28	5.27	5.25	5.24	5.23	8.76	8.71	5.20	8.69	8.66				
	.05	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.88	8.84	8.81	8.78	8.76	8.74	8.71	8.69	8.66				
	.01	34.12	30.82	29.46	28.71	28.24	27.91	27.67	27.49	27.34	27.23	27.13	27.05	26.92	26.83	26.69				
4	.10	4.54	4.32	4.19	4.11	4.05	4.01	3.98	3.95	3.94	3.92	3.90	3.90	3.87	3.87	3.84				
	.05	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.93	5.91	5.87	5.84	5.80				
	.01	21.20	18.00	16.69	15.98	15.52	15.21	14.98	14.80	14.66	14.54	14.45	14.37	14.24	14.15	14.02				
5	.10	4.05	3.78	3.62	3.52	3.45	3.40	3.37	3.34	3.32	3.30	3.27	3.27	3.24	4.60	4.56				
	.05	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.78	4.74	4.70	4.68	4.64	4.60	4.56				
	.01	16.26	13.27	12.06	11.39	10.97	10.67	10.45	10.27	10.15	10.05	9.96	9.89	9.77	9.68	9.55				
6	.10	3.78	3.46	3.29	3.18	3.11	3.05	3.01	2.98	2.96	2.94	2.90	2.90	2.87	3.92	3.87				
	.05	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	4.03	4.00	3.96	3.92	3.87				
	.01	13.74	10.92	9.78	9.15	8.75	8.47	8.26	8.10	7.98	7.87	7.79	7.72	7.60	7.52	7.39				
7	.10	3.59	3.26	3.07	2.96	2.88	2.83	2.78	2.75	2.72	2.70	2.67	2.67	2.63	3.49	3.44				
	.05	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.63	3.60	3.57	3.52	3.49	3.44				
	.01	12.25	9.55	8.45	7.85	7.46	7.19	7.00	6.84	6.71	6.62	6.54	6.47	6.35	6.27	6.15				
8	.10	3.46	3.11	2.92	2.81	2.73	2.67	2.62	2.59	2.56	2.54	2.50	2.50	2.46	3.20	3.15				
	.05	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.34	3.31	3.28	3.23	3.20	3.15				
	.01	11.26	8.65	7.59	7.01	6.63	6.37	6.19	6.03	5.91	5.82	5.74	5.67	5.56	5.48	5.36				
9	.10	3.36	3.01	2.81	2.69	2.61	2.55	2.51	2.47	2.44	2.42	2.38	2.38	2.34	2.98	2.93				
	.05	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.13	3.10	3.07	3.02	2.98	2.93				
	.01	10.56	8.02	6.99	6.42	6.06	5.80	5.62	5.47	5.35	5.26	5.18	5.11	5.00	4.92	4.80				

CONTINUACION DE LA TABLA C-1.....

GRADOS DE LIBERTAD PARA EL DENOMINADOR	GRADOS DE LIBERTAD PARA EL NUMERADOR																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	14	15	16	20				
10	.10	3.28	2.92	2.73	2.61	2.52	2.46	2.41	2.38	2.35	2.32	2.28	2.24	2.24	2.20	2.20				
	.05	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.97	2.91	2.86	2.82	2.77	2.77				
	.01	10.04	7.56	6.55	5.99	5.64	5.39	5.21	5.06	4.95	4.85	4.78	4.71	4.60	4.52	4.41				
11	.10	3.23	2.86	2.66	2.54	2.45	2.39	2.34	2.30	2.27	2.25	2.21	2.17	2.17	2.12	2.12				
	.05	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.86	2.82	2.79	2.74	2.70	2.65				
	.01	9.65	7.20	6.22	5.67	5.32	5.07	4.88	4.74	4.63	4.54	4.46	4.40	4.29	4.21	4.10				
12	.10	3.18	2.81	2.61	2.48	2.39	2.33	2.28	2.24	2.21	2.19	2.15	2.10	2.10	2.06	2.06				
	.05	4.75	3.88	3.49	3.26	3.11	3.00	2.92	2.85	2.80	2.76	2.72	2.69	2.64	2.60	2.54				
	.01	9.33	6.93	5.95	5.41	5.06	4.82	4.65	4.50	4.39	4.30	4.22	4.16	4.05	3.96	3.86				
13	.10	3.14	2.76	2.56	2.43	2.35	2.28	2.23	2.20	2.16	2.14	2.10	2.05	2.05	2.01	2.01				
	.05	4.67	3.80	3.41	3.18	3.02	2.92	2.84	2.77	2.72	2.67	2.63	2.60	2.55	2.51	2.46				
	.01	9.07	6.70	5.74	5.20	4.86	4.62	4.44	4.30	4.19	4.10	4.02	3.96	3.85	3.78	3.67				
14	.10	3.10	2.73	2.52	2.39	2.31	2.24	2.19	2.15	2.12	2.10	2.05	2.05	2.01	2.01	1.96				
	.05	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.77	2.70	2.65	2.60	2.56	2.53	2.48	2.44	2.39				
	.01	8.86	6.51	5.56	5.03	4.69	4.46	4.28	4.14	4.03	3.94	3.86	3.80	3.70	3.62	3.51				
15	.10	3.07	2.70	2.49	2.36	2.27	2.21	2.16	2.12	2.09	2.06	2.02	1.97	1.97	1.92	1.92				
	.05	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.70	2.64	2.59	2.55	2.51	2.48	2.43	2.39	2.33				
	.01	8.68	6.36	5.42	4.89	4.56	4.32	4.14	4.00	3.89	3.80	3.73	3.67	3.56	3.48	3.36				
16	.10	3.05	2.67	2.46	2.33	2.24	2.18	2.13	2.09	2.06	2.03	1.99	1.94	1.94	1.89	1.89				
	.05	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.45	2.42	2.37	2.33	2.28				
	.01	8.53	6.23	5.29	4.77	4.44	4.20	4.03	3.89	3.78	3.69	3.61	3.55	3.45	3.37	3.25				
17	.10	3.03	2.64	2.44	2.31	2.22	2.15	2.10	2.06	2.03	2.00	1.96	1.91	1.91	1.86	1.86				
	.05	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.62	2.55	2.50	2.45	2.41	2.38	2.33	2.29	2.23				
	.01	8.40	6.11	5.18	4.67	4.34	4.10	3.93	3.79	3.68	3.59	3.52	3.45	3.35	3.27	3.16				
18	.10	1.01	2.62	2.42	2.29	2.20	2.13	2.08	2.04	2.00	1.98	1.93	1.89	1.89	1.84	1.84				
	.05	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.37	2.34	2.29	2.25	2.19				
	.01	8.28	6.01	5.09	4.58	4.25	4.01	3.85	3.71	3.60	3.51	3.44	3.37	3.27	3.19	3.07				

TABLA C-2. DISTRIBUCION

d'	0.1	0.05	0.01	0.001
1	6314	8271	6164	6366
2	2520	4503	9925	3180
3	2353	3182	5.841	1294
4	2132	2776	4.604	6.610
5	2015	2571	4.033	6.659
6	1.943	2447	3.707	5.959
7	1.895	2365	3.469	5.405
8	1.860	2306	3.355	5.041
9	1.833	2262	3.296	4.781
10	1.812	2228	3.189	4.587
11	1.795	2201	3.106	4.437
12	1.782	2179	3.055	4.318
13	1.771	2160	3.012	4.221
14	1.761	2145	2.977	4.140
15	1.753	2131	2.947	4.073

CONTINUACION DE TABLA C-2.

d'	0.1	0.05	0.01	0.001
16	1.746	2120	2.921	4.045
17	1.740	2110	2.896	3.965
18	1.734	2101	2.878	3.922
19	1.729	2.093	2.861	3.883
20	1.725	2.086	2.845	3.850
21	1.721	2.080	2.831	3.819
22	1.717	2.074	2.819	3.792
23	1.714	2.069	2.807	3.767
24	1.711	2.064	2.797	3.745
25	1.706	2.060	2.787	3.725
26	1.706	2.056	2.779	3.707
27	1.703	2.052	2.771	3.690
28	1.701	2.048	2.763	3.676
29	1.699	2.045	2.756	3.659
30	1.697	2.042	2.750	3.646
∞	1.685	1.960	2.516	3.291

(continued)

	0.05	0.025	0.005	0.0005
--	------	-------	-------	--------