

24178

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA



ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

"DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA
PRODUCCION DE AGUA ULTRAPURA"

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
P R E S E N T A :
JOSE LUIS STONE AGUILAR

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

INDICE

| | página |
|---|--------|
| I.- Introducción | 4 |
| II.- Generalidades | 8 |
| -Objetivo | 9 |
| -Definición de Agua Ultrapura | 10 |
| -Desarrollo Histórico | 11 |
| -Obtención de Agua Ultrapura | 14 |
| III.- Ingeniería Básica | 47 |
| -Bases de Diseño | 48 |
| -Diagrama de Bloques | 55 |
| -Diagrama de Flujo | 56 |
| -Cálculo del Módulo de Intercambio Iónico | 57 |
| -Dimensionamiento del Módulo de Rad. Ultravioleta | 80 |
| -Dimensionamiento del Módulo de Ultrafiltración | 32 |
| -Balance de Materia | 39 |
| -Balance de Energía | 90 |
| IV.- Descripción del Proceso | 98 |
| -Hojas de Datos de Proceso | 110 |
| -Plano de Localización General | 117 |
| V.- Conclusiones | 118 |
| VI.- Bibliografía | 120 |

I.- INTRODUCCIÓN

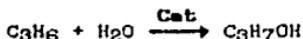
El agua es una sustancia que se encuentra ampliamente distribuida en la naturaleza. Sin embargo, excepto en casos muy esporádicos el agua no es pura y no puede ser usada por la industria o para consumo humano, sin darle algún tipo de tratamiento. Cuando el agua circula en el subsuelo, o sobre la superficie de la tierra o aun en el aire, este se contamina conduciendo sólidos en suspensión o en soluciones tales como: partículas de arcilla, desechos vegetales, organismos vivos (plankton, bacterias, virus, etc.), materia orgánica (ácido húmico, fúlvico, residuos de manufacturas) y gases.

Debido al gran número de impurezas que contiene el agua, esta debe tratarse antes de ser usada, adaptándola a los diversos consumos en que se requiera, por ejemplo para consumo humano, donde se requiere agua potable la cual debe ser clara y limpia o agua ultrapura la cual se utiliza en la industria electrónica.

Las diferentes clases de impurezas que contiene el agua se pueden clasificar en tres categorías: Sólidos en suspensión, sólidos coloidales y sólidos disueltos. En la industria estas impurezas pueden causar problemas por incrustaciones, desgastes por corrosión en equipos como evaporadores, intercambiadores de calor, etc.

En los últimos años la demanda de agua de la más alta pureza (Agua Ultrapura) ha experimentado un crecimiento notable, debido principalmente al desarrollo de la industria

electrónica, para la cual es indispensable este servicio. Se estima que se requieren de 2 a 5 litros de agua ultrapura en el ciclo de producción de cada "chip". En la fabricación de tubos para pantallas de televisores es muy importante que el agua utilizada sea lo mas pura posible para obtener un producto de calidad. La industria farmacéutica tambien necesita de este tipo de agua para la elaboración de vacunas, sueros, medicamentos, etc. Existen tambien en la industria petroquímica algunos procesos como el de producción de alcohol isopropílico, en donde agua de alta calidad entra como materia prima en la reacción catalítica:



y el agua debe estar libre de sales que puedan envenenar al catalizador y causen una reducción de la eficiencia del proceso.

Existen diferentes procesos para la obtención de agua ultrapura y la selección de ellos dependerá de varios aspectos como: cantidad de impurezas en el agua de alimentación al sistema, consideraciones económicas, disponibilidad de espacio, etc.

El presente trabajo tiene su origen en la necesidad que de este tipo de agua tiene PENEX para una planta de alcohol isopropílico (Cap. 75,000 Ton./año) actualmente en proyecto y que se localizará en el Complejo Petroquímico Morelos, en el

municipio de Coatzacoalcos, estado de Veracruz. Por tal motivo se presenta esta tesis que se orienta al desarrollo de la ingeniería básica de la unidad productora de agua ultrapura para proceso.

II.- GENERALIDADES

Objetivo

El agua ultrapura es esencial para el desarrollo, investigación y elaboración de diversos productos tales como: semiconductores, fármacos, ciertos productos químicos, televisores, etc.

Dada la importancia del agua ultrapura en procesos de producción como los arriba mencionados, un correcto diseño, construcción y operación son necesarios para obtener productos de calidad.

Esta tesis tiene como objetivo definir los parámetros más importantes para el diseño de un sistema para la producción de agua ultrapura.

Definición.-

Uno de los puntos mas importantes y controvertidos en la producción de agua ultrapure son las especificaciones de este tipo de agua. La especificación propuesta por la ASTM en los Estados Unidos aparece a continuación en la tabla 1:

TABLA 1. Especificaciones del agua ultrapura (ASTM).

| | |
|---|-------|
| Resistividad, mín., megaohm-cm (25°C) | 18.0 |
| SiO ₂ (total) mg/l | 0.005 |
| Partículas/ml. (mayores a 1 micrómetro) | 2 |
| Bacterias por ml. | 1 |
| Carbón orgánico total mg/l | 0.05 |
| Cobre (Cu ⁺⁺) mg/l | 0.001 |
| Cloro (Cl ⁻) mg/l | 0.002 |
| Potasio (K ⁺) mg/l | 0.002 |
| Sólidos totales mg/l | 0.01 |
| Zinc (Zn ⁺⁺) mg/l | 0.005 |

Antecedentes históricos.-

La preparación de agua pura es probablemente uno de los procesos más antiguos. Aristóteles (384-322 A.C.) hace mención al hecho de producir agua pura por evaporación de agua de mar. Después Plinio el Viejo (23-79 D.C.) describe métodos de diseño de un alambique en el que incluye el uso de lana en la parte de condensación para retener varios aceites y gotas de agua. En Alejandría se perfeccionó este sistema lográndose obtener grandes cantidades de líquidos destilados incluyendo agua y turpentina.

Evidentemente, la producción de agua destilada estuvo limitada en sistemas relativamente pequeños hasta el siglo XVII, cuando la producción de agua para beber a partir de agua de mar cobró importancia por el desarrollo de la marina mundial. En la última mitad del siglo pasado el proceso de destilación alcanzó un grado mayor de refinamiento con la introducción del condensador de Liebig y el condensador de reflujo inventado por Kolbe y Frankland.

En el año de 1894, Kohlrausch y Heydweiller realizaron un experimento para determinar la resistencia absoluta del agua. Redestilaron agua 28 veces en un alambique de cuarzo y encontraron que la resistencia fue de 26.8 megohm-cm a 18 °C.

Al iniciar el presente siglo, el interés por la producción de

agua pura se incrementó, no solo por los avances en la química, sino también en los campos de la biología y la medicina. Por estas fechas se registraron las primeras patentes para producir agua pura por medio de sistemas electrolíticos, y de purificación por medio de ozono.

En el año de 1908, el doctor Gans logró producir por primera vez materiales sintéticos de intercambio iónico, mezclando silicatos y alúmina con carbonato de sodio y cuarzo, a este material le llamó "Permutit". El desarrollo de materiales sintéticos de intercambio iónico ha continuado desde esa fecha.

Además de los métodos de destilación, electrólisis, procesos de filtración, intercambio iónico, como métodos históricos para la producción de agua pura se debe incluir la técnica de quemar una mezcla de oxígeno e hidrógeno puros en frío, en la cual se obtienen cristales de agua pura. Este sistema solo se ha utilizado para obtener pequeñas cantidades de agua.

La tabla 2 muestra diferentes métodos de purificación de agua y la pureza alcanzada con ellos.

TABLA E. Calidad de agua obtenida por diferentes métodos de purificación

| Tipo de agua | Calidad ohm-cm (resistividad a 25°C) |
|--|--|
| Agua despues de 28 destilaciones en cuarzo* | 23,000,000 |
| Agua tratada con resinas de intercambio iónico lecho mixto | 18,000,000 |
| Agua despues de 3 destilaciones en cuarzo | 2,000,000 |
| Agua en equilibrio con el CO ₂ atmosférico | 700,000 |
| Agua despues de una destilación simple | 500,000 |
| Calidad aproximada de agua destilada U.S.P.** | 100,000-500,000 |
| Máxima calidad teórica (calculada) | 23,000,000 |

* Kchrausch, 1884.

** La U.S. Pharmacopeia especifica que el agua destilada U.S.P. no debe contener más de 5 ppm de sólidos totales disueltos.

Obtención de Agua Ultrapura..

El agua ultrapura es el solvente "más Universal" y un fluido de proceso muy agresivo. Por lo tanto atacará todo material de construcción en cierto grado, con el fin de recobrar su estado natural. Los materiales en contacto con el agua ultrapura tenderán a disolverse y cambiarán las condiciones de pureza de ésta.

El simple contacto con el aire ocasiona una pérdida de calidad en el agua ultrapura. En la tabla 3 se puede ver la rápida reducción de la resistividad del agua al poner esta en contacto con la atmósfera.

TABLA 3. Decaimiento de la calidad del agua debido a la absorción de gases atmosféricos.

| Resistividad a 25 °C (megohm-cm) | Tiempo (seg.) |
|-------------------------------------|------------------|
| 17.5 | 0 |
| 15.1 | 2.5 |
| 12.4 | 5.0 |
| 4.8 | 9.0 |
| 1.2 | 14.0 |

La exposición a la atmósfera causa la absorción de gases y como se puede apreciar, existe un severo cambio en la calidad. El grado de cambio del pH del agua ultrapura de 18 megachm-cm al contacto con la atmósfera es aproximadamente proporcional al cambio de la resistividad que se muestra en la tabla 3. El CO_2 que se encuentra en la atmósfera reacciona con el agua ultrapura y forma ácido carbónico.

Un punto crítico en el proceso de producción de agua ultrapura es el monitoreo y control de la calidad del agua, el cual debe ser continuo. Tradicionalmente para aguas de esta calidad se usan medidores de resistividad del agua en líneas, en diferentes puntos del sistema, aunque los resultados de estos análisis no son un indicador absoluto de la pureza del agua, pues solo nos dan una idea de la cantidad de materiales ionizables presentes en el agua, y no nos dicen nada de otros contaminantes posiblemente presentes en la misma agua como: partículas, carbón orgánico total, microorganismos, materia coloidal, etc.

En la medición de resistividad del agua es muy importante tomar en cuenta el efecto que la temperatura tiene sobre esta medida. En la tabla 4 se muestran diferentes lecturas de resistividad contra temperatura. La calidad del agua es la misma.

TABLA 4. Efecto de la temperatura sobre la resistividad de agua técnicamente pura.

| Temperatura | Resistividad | Conductividad |
|-------------|--------------|---------------|
| °C | megohm-cm | micronho/cm |
| 10 | 42.8 | 0.02 |
| 20 | 29.8 | 0.04 |
| 25 | 18.3 | 0.06 |
| 30 | 14.1 | 0.07 |
| 35 | 11.1 | 0.09 |

La temperatura de 25 °C es por convención la temperatura de referencia para la medición de resistividad de agua de alta pureza, en la actualidad la mayoría de los medidores de conductividad disponibles en el mercado cuentan con un compensador automático para la temperatura, de no contarse con este tipo de instrumento se requeriría de una gráfica para hacer la corrección por temperatura.

Como se puede observar en la tabla 2 existen varias alternativas para producir agua ultrapura, sin embargo a nivel industrial solo resulta económicamente atractivo el proceso que involucra el uso de resinas intercambiadoras de iones, cuyo principio será descrito mas adelante .

Para el diseño de un sistema de producción de agua ultrapura es de primordial importancia tener en cuenta los siguientes

factores:

- Conocimiento de la calidad de agua disponible como materia prima.
- Tamaño o capacidad de la planta
- Selección del pretratamiento
- Selección de materiales de construcción.
- Sistemas hidráulicos de distribución.
- Control de corrosión.
- Instrumentación.
- Disposición de derechos.
- Rutinas de limpieza.
- Disponibilidad de espacio.
- Economía del sistema

Suministro de agua.-

La calidad del agua de suministro y el cambio de ésta debe ser documentada exhaustivamente. Un estudio cuidadoso de el agua de suministro es una buena práctica, no solo para la producción de agua ultrapura sino para el usuario general del agua. Generalmente los usuarios no tienen control sobre la fuente de suministro. La calidad de agua de suministro puede variar considerablemente en el transcurso del año, sobre todo si es de una fuente superficial (río o lago). Si esta es de pozo su calidad es más consistente a través del año. Es recomendable contar con más de un análisis del agua influente

en diferentes épocas del año, para así prever que cualquier aumento de la cantidad de impurezas contenidas en el agua sea controlado por nuestro sistema de tratamiento.

Selección del pretratamiento.-

Existen tres importantes consideraciones para el diseño del pretratamiento para la producción de agua ultrapura. Los primeros dos, los tipos de contaminantes presentes en el agua de alimentación a la planta y la variabilidad de la calidad del suministro con la estación ya fueron señalados anteriormente. El tercer requerimiento debe considerar el tipo de tratamiento primario que se usará después del pretratamiento, ya sea ósmosis inversa o intercambio iónico.

El pretratamiento usualmente se inicia con una sedimentación, cloración, adición de coagulantes para clarificación y filtración. Lechos de carbón activado también son utilizados con el propósito de eliminar orgánicos y adsorber el cloro después del pretratamiento. Esto último es necesario para proteger cierto tipo de membranas de ósmosis inversa y resinas de intercambio iónico sensibles al ataque del cloro.

Selección del sistema de tratamiento primario.-

En este punto la cuestión básica es cual sistema utilizar;

ósmosis inversa o intercambio iónico. Normalmente para aguas que contienen un total de sólidos disueltos mayor a 300 ppm la mejor alternativa será un sistema de ósmosis inversa. En el rango de 50-300 ppm de sólidos totales disueltos, la decisión se debe basar en el tipo de contaminantes a ser removidos por el sistema.

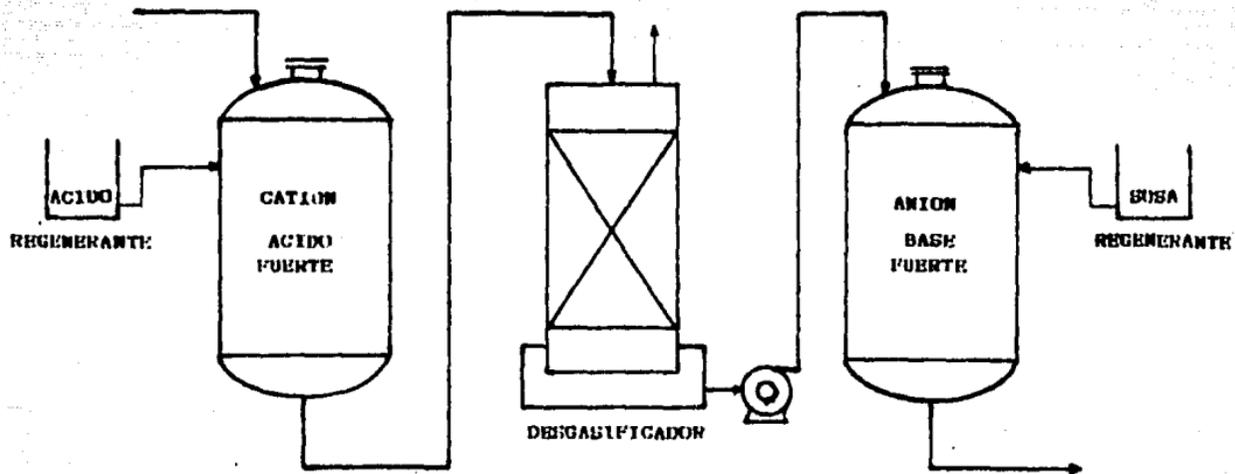
Si se requiere un pretratamiento excesivo para proteger la membrana de ósmosis inversa, se debe considerar la desionización con resinas intercambiadoras. Si las características ultrafiltrantes de la membrana de ósmosis inversa contrapesan otros factores, ósmosis inversa es la selección obvia. Hay muchas ventajas en un buen sistema de ósmosis inversa, con respecto a la remoción de iones, orgánicos, y partículas de tipo coloidal. Sin embargo el proceso requiere bombear el agua de suministro a cuando menos 28.14 kg/cm² (400 psig) para que el sistema sea eficiente, aún así los mejores rangos de conversión son del 75 %. Esto significa que el 25 % del agua pretratada debe ser desechada o utilizada en otra cosa.

Una de las mayores ventajas apuntadas en años recientes para la ósmosis inversa es que en el intercambio iónico se requieren tratamientos especiales para el agua de desecho al neutralizar los regenerantes químicos, y esto puede en algunos casos exceder en costo al agua rechazada por el sistema de ósmosis inversa.

Si se selecciona un sistema de ósmosis inversa como tratamiento primario, será necesario remover compuestos orgánicos, cloro y toda la dureza asociada a calcio y magnesio mediante carbón activado. Aunque en la actualidad existen membranas como la de acetato de celulosa que son resistentes al cloro, las membranas a base de poliamida requieren forzosamente una descloración previa.

El uso de unidades de radiación ultravioleta para la destrucción de microorganismos en el agua, es muy recomendable en los sistemas de producción de agua ultrapura. El nivel de bacterias más alto en un sistema generalmente es a la salida de el carbón activado. Los microorganismos encuentran un hogar natural en estos lechos, como el cloro ha sido removido corriente arriba, los microorganismos pueden proliferar. Toda materia orgánica adsorbida en la superficie del carbón proveerá nutrientes para su crecimiento. Se recomienda poner una unidad de radiación ultravioleta después de este paso.

En los procesos de intercambio iónico el perfeccionamiento de las resinas de intercambio iónico, el uso de lechos estratificados o entremezclados para ambas resinas: catiónica y aniónica; la inclusión de técnicas de regeneración a contracorriente, etc., han desempeñado un papel importante en la optimización de los procesos de intercambio iónico. En caso de seleccionarse un sistema de resinas intercambiadoras de iones para el tratamiento primario, generalmente se hace uso de un sistema de camas separadas, incluyéndose además un



| | |
|------------------------------------|------|
| TESIS PROFESIONAL | UNAM |
| FACULTAD DE QUIMICA | |
| FIGURA 1. CANAS REP./DEGASIFICADOR | |
| JOSE LUIS STONE A. | 1968 |

degasificador para efectuar la eliminación de dióxido de carbono y oxígeno presentes en el efluente de la unidad catiónica (ver figura 1).

Pulido.-

Después del tratamiento primario en el proceso de purificación del agua, la mayoría de los contaminantes han sido reducidos a niveles muy bajos. Esto es comprobable efectuando mediciones de resistividad. La concentración de iones ha sido controlada y una remoción final de las trazas del material inorgánico requiere de pasos especiales. Sería un error considerar que los materiales no iónicos han sido igualmente reducidos. Cuando se usa el intercambio iónico como tratamiento primario, el nivel de materia iónica será mucho menor que cuando sale de un sistema de ósmosis inversa. Por otro lado, la cantidad de partículas y material coloidal que pasa a través de la cama iónica será mayor que para los sistemas de membrana semipermeable.

El uso de lechos de resinas de alta eficiencia, fuertemente ácidas y fuertemente básicas mezcladas en una sola columna ha sido el método tradicional de eliminación de trazas finales de materia iónica. La columna permite que la resina de intercambio este completamente mezclada y así la resina catiónica como la aniónica estén adyacentes para una más alta y eficiente desmineralización..

La calidad del producto que sale del lecho mixto es muy pura iónicamente. Es común alcanzar mediciones de resistividad mayores a 17 megohm-cm a 25 °C a la salida de estos lechos. Se debe ser cauteloso pues esto solo indica la remoción de constituyentes iónicos. Materia orgánica, coloides, partículas y bacterias pueden aún estar presentes a altas concentraciones.

El diseño de los lechos mezclados y los materiales de construcción a este punto son muy críticos, para que el agua no sea recontaminada después del proceso de desmineralización.

Para asegurarse que la población biológica es baja, radiación ultravioleta puede ser usada después de los lechos mixtos pulidores, esto es muy recomendable pues los ciclos de servicio de los lechos pulidores suelen ser largos de 4-6 semanas, pudiéndose presentar crecimiento bacteriano en el seno de los lechos.

En los casos más críticos, donde se requiera una desionización aún mayor, suelen usarse canastillos de resinas mixtas de grado nuclear, las cuales se recomienda instalarlas en el punto final de uso. El método de producción de estas resinas es rigurosamente controlado y probado para condiciones especiales. En suma, la formulación de la resina catiónica excluye el uso del sodio y es producida directamente en su forma hidrogenada. También las resinas son lavadas con solventes antes de liberar el lote. Estas resinas no son regenerables y a cualquier signo de

Degradación de el agua notada en la medición de la resistividad, las canastillas son reemplazadas.

La posición final de la etapa de pulido es ocupada generalmente por un sistema de ultrafiltración, el cual consiste en una serie de cartuchos de fibras huecas que tienen un rango de poros de 0.005 micrómetros. Los microorganismos destruidos por la radiación ultravioleta, partículas, silicio coloidal, y moléculas orgánicas con un peso molecular mayor a 80,000 serán removidos en este paso. Más adelante se tratará este punto con mayor detalle.

Desmineralización por intercambio iónico.-

La desmineralización por intercambio iónico, es el proceso mediante el cual las sales disueltas en el agua se convierten a sus correspondientes ácidos por medio de un catión hidrógeno de una resina intercambiadora, y el ácido es eliminado por medio de una resina aniónica, considerándose por tal motivo como un proceso de dos pasos.

Naturaleza del intercambio iónico.-

Las sales en el agua están disociadas en sus correspondientes iones, los que tienen cargas positivas, cationes, y los cargados negativamente, aniones. Estas sales se encuentran en estado de electroneutralidad. Los materiales intercambiadores también están formados por cationes y aniones en condiciones de electroneutralidad, pero a diferencia de las sales disueltas, el intercambiador solo tiene una especie iónica móvil que es intercambiable.

El mecanismo de intercambio iónico puede describirse en 5 pasos:

- 1.- El ión en la solución se difunde a la superficie del sólido o resina.
- 2.- El ión se difunde dentro de la estructura de la resina
- 3.- Se produce el intercambio iónico.

4.- Los iones intercambiados emigran a la superficie de la resina.

5.- Finalmente, estos últimos se difunden hacia la solución.

Cuando se lleva a cabo una reacción de intercambio iónico, el catión o el anión móvil de la resina es cambiado por un catión o anión de las sales disueltas según sea el caso.

La resina es un material sólido que no está disuelto en el agua y es su estructura lo que permite que exista el intercambio. La resina es un material fabricado por polimerización, los compuestos más utilizados para hacerla son el estireno y el divinilbenceno. La proporción en que se encuentran varía de 80-92 % para estireno y 8-10 % de divinilbenceno.

En la fabricación de la resina al mezclarse el estireno y el divinilbenceno forman pequeñas cuentas o esferas, producto de la reacción de polimerización, las perlas formadas constituyen la matriz de poliestireno, la que se utiliza para darle el carácter a la resina.

Para hacer una resina catiónica, la matriz de poliestireno es tratada con ácido sulfúrico, introduciendo en ella el grupo HSO_3^- , que tiene un hidrógeno intercambiable. Esta resina es llamada resina catiónica fuertemente ácida o resina sulfonada, cuando el grupo funcional es el COOH^- , la resina es llamada débilmente ácida o carboxílica.

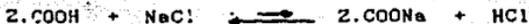
La resina aniónica es fabricada cuando la matriz de poliestireno es aminada o clorometilada, siendo aniónica débil si el grupo funcional es una amina primaria, secundaria o terciaria, y aniónicamente fuerte cuando es un grupo funcional cuaternario.

La resina ácida fuerte, convierte fácilmente en ácido las sales disueltas, por el contrario de la resina débilmente ácida, este opera eficientemente en pH abajo de 7 pero remueve los cationes en una cantidad equivalente a la alcalinidad presente y su eficiencia en la regeneración es muy alta. Las reacciones que ocurren con el NaCl y NaHCO₃ por ejemplo con:

Resina fuertemente ácida



Resina débilmente ácida

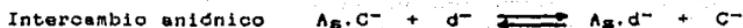


En donde Z es la matriz de poliestireno.

Las reacciones son reversibles y el tamaño de las flechas indica si la reacción tiende más a la derecha o a la izquierda, la diferencia entre las reacciones es causada por la afinidad del ión hidrógeno entre los dos grupos de resinas, la resina ácida fuerte posee un grupo funcional HSO₃ que tiene menos

afinidad por el ión hidrógeno que la carboxílica.

En general una reacción de intercambio iónico se puede expresar en forma simple:



en donde Z es la matriz fija y a^+ , b^+ son cationes intercambiables. A_S es la matriz aniónica y C^- y d^- son los aniones intercambiables. El catión b^+ ataca el sitio en donde está fijado a^+ y se intercambia por a^+ , similarmente ocurre en el intercambio aniónico.

La selectividad de la resina catiónica fuerte va de acuerdo al tamaño y número de cargas de los cationes de las sales disueltas:



De manera similar la selectividad de la resina fuerte básica de acuerdo al mayor anión monovalente:



La reacción reversible de los intercambios iónicos de las ecuaciones anteriores se lleva a cabo en la fase de regeneración o reactivación de las resinas.

Tipos de Resinas

Las resinas debilmente ácidas no pueden remover las sales de los ácidos débiles tales como SiO_2 , pero son usadas cuando el agua presenta gran cantidad de cloruros y sulfatos, esto disminuye los costos de operación al necesitarse menor cantidad de regenerente, por su alta eficiencia en la regeneración.

Las resinas fuertemente ácidas remueven todo tipo de sales disueltas y trabajan en todo el rango de pH eficientemente pero su vida de trabajo pueda ser menor y su consumo de regenerantes es muy grande.

La resina básica débil solo remueve los ácidos fuertemente disociados como sulfúrico, clorhídrico, y nítrico, pero no puede eliminar los ácidos débiles como carbónico, de la alcalinidad o el silícico del SiO_2 , la regeneración puede hacerse con sosa cáustica, carbonato de sodio, o amoníaco lo que puede reducir los costos de operación.

Resina básica fuerte, elimina cualquier tipo de ácido y es de uso importante en el la eliminación de sílice para aguas de alta calidad, solo puede regenerarse con sosa cáustica.

Según el problema de agua que se tenga será la selección del tipo de resina y la combinación de ellas, dependiendo esta selección tanto de criterios técnicos como económicos. En la

figura 1 se muestra un arreglo típico de multicamas o lechos separados, donde el agua es tratada por una resina catiónica fuertemente ácida en la primera columna. El efluente resultante de esta contiene casi exclusivamente los ácidos de las sales correspondientes contenidas en la corriente de alimentación; después es pasada por una columna de resina aniónica fuertemente básica. Este tipo de sistemas son capaces de producir agua con una resistencia específica de 250,000 a 1,000,000 de ohm-cm(25 °C). El contenido total de electrolitos puede ser tan bajo como 2 ppm.

Como se comentó con anterioridad, para poder obtener aguas de la máxima calidad mediante sistemas de intercambio iónico, es necesario utilizar un sistema de lecho mezclado en una sola columna. Esto permite que la resina catiónica y la aniónica estén en contacto íntimo, así se asegura que el ácido formado inicialmente de una sal en contacto con la resina catiónica sea inmediatamente neutralizado por la resina aniónica contigua. La base formada por el contacto inicial de una sal con la resina aniónica también será removida inmediatamente por la resina catiónica. En la figura 2 se muestra una representación del equilibrio que se da en este tipo de sistemas.

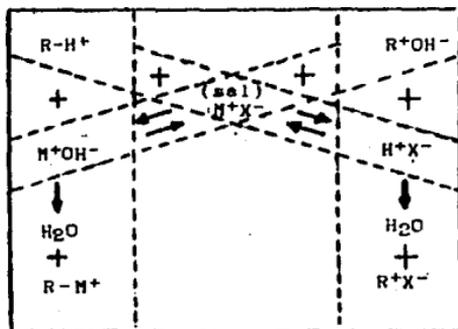
En este tipo de sistemas además de la alta calidad del efluente, se tiene la ventaja que los costos de inversión y los de operación son más bajos que en los sistemas de multicama.

Las columnas pulidoras de lecho mezclado, por lo general

tienen ciclos de servicio relativamente largos. La etapa de servicio normalmente finaliza por uno solo o una combinación de los siguientes criterios:

- a) Baja resistividad del efluente.
- b) Galones totales tratados.
- c) Alta caída de presión del agua a través de la resina.
- d) Alta fuga de sodio o sílice.
- e) Variación del pH en el efluente.

Figura 2. Equilibrio en intercambiadores de lecho mixto



Una vez que la resina se agota, se retrolava consiguiéndose con esto la separación de las resinas en dos capas debido a la diferencia de densidades que existe entre ellas. Una práctica recomendable es incluir una resina neutra de densidad intermedia para que al separar las resinas ésta quede separando la resina aniónica y la catiónica, evitando así la contaminación

de una con el regenerante de la otra. Después de esta separación hidráulica, se introducen los regenerantes en la forma en que se muestra en la figura 3. Una vez regeneradas las resinas, la cama se enjuaga y las resinas se mezclan nuevamente mediante la inyección de aire por el fondo.

Internos del recipiente.-

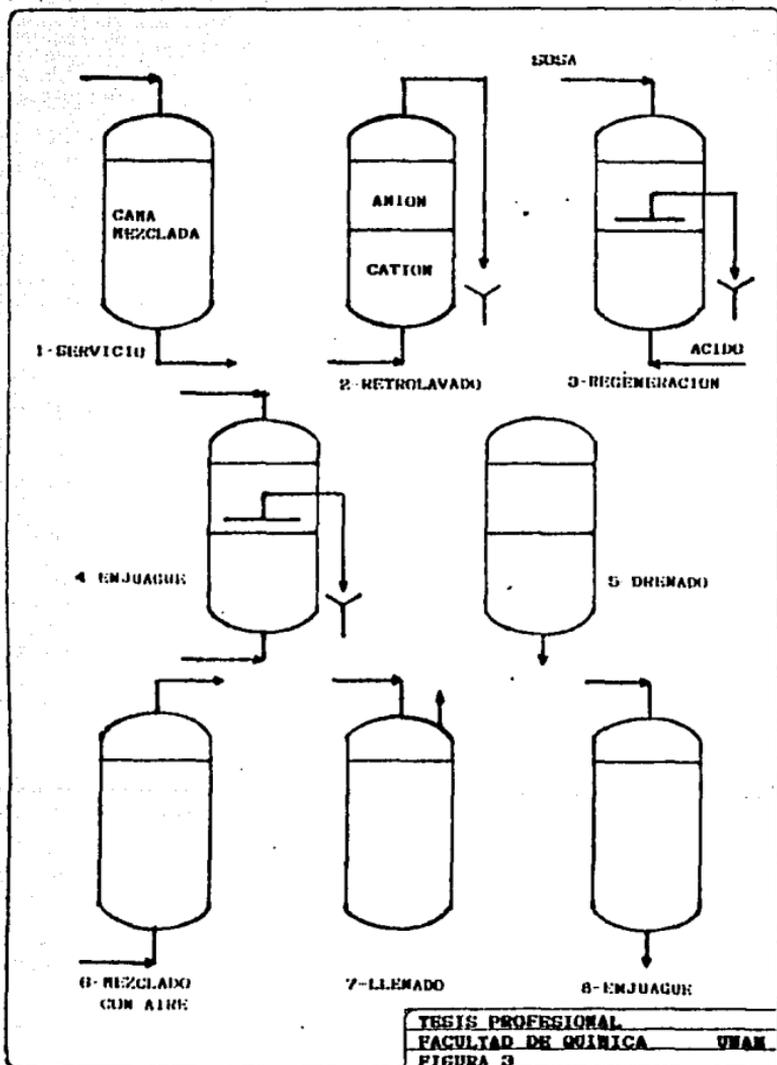
Los internos de distribución de regenerante y retrolavado, enjuague y alimentación de agua cruda, son considerados como partes críticas en el diseño del sistema. El material de construcción será acero inoxidable.

Distribuidor de agua.-

Su diseño debe permitir una correcta distribución de flujo de entrada y también permitir coleccionar el agua de retrolavado (ver figura 4).

Distribuidor de regenerante.-

Su fabricación es similar a la del distribuidor de agua. Su función es garantizar una buena distribución del regenerante, que permite un contacto íntimo de éste con la resina. Este distribuidor debe ubicarse en función de la altura que resulte al considerar la expansión de la cama de resina durante el retrolavado, para evitar que el nivel de la resina rebese al distribuidor y no sea por tanto regenerada en su totalidad (Fig. 5).



| | |
|-----------------------|------|
| INGENIERO PROFESIONAL | |
| FACULTAD DE QUIMICA | UNAM |
| FIGURA 3 | |
| JOSE LUIS STONE A. | 1988 |

Colector interfacial.-

Su capacidad debe ser suficiente para recolectar los regenerantes gastados, así como las aguas de enjuague (Fig. 7).

Distribuidor interfacial.-

Debe tener capacidad suficiente para recolectar el agua tratada y garantizar la entrada de regenerante (Fig. 6).

e

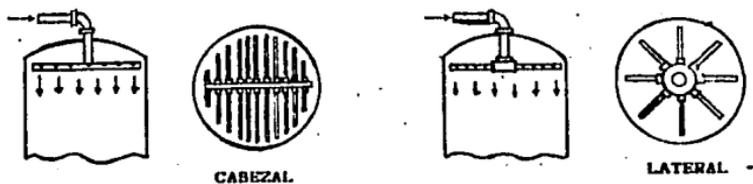


Figura 4.

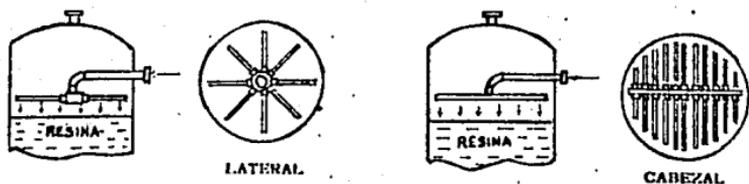


Figura 5.

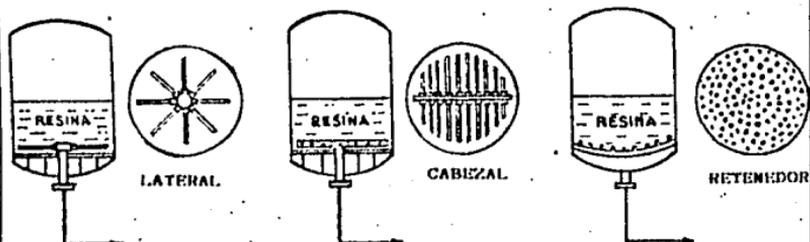
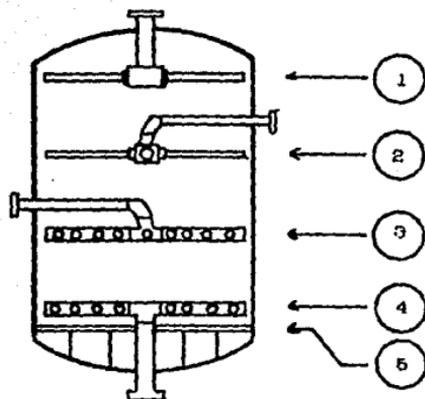


Figura 6.

| | |
|--------------------------------------|------|
| TESIS PROFESIONAL | UNAH |
| FACULTAD DE QUIMICA | |
| FIGURA 4, 5, 6. INTERIORS DEL RECIP. | |
| JOSE LUIS STONE A. | 1988 |



- 1 Distribuidor de agua de servicio
Colector de agua de retrolavado
- 2 Distribuidor de regenerante
- 3 Colector interfacial de regenerante
- 4 Colector de agua tratada
Entrada de agua de retrolavado
- 5 Plato soporte (fondo falso)

Desinfección de Agua Mediante Radiación Ultravioleta

La desinfección de agua mediante radiación de luz ultravioleta fué usada por primera vez en Francia, en el año de 1910, para tratar el agua de la ciudad de Marsella.

El rango de la luz ultravioleta dentro del espectro electromagnético, cae entre la luz visible de más corta longitud de onda y los rayos X de mayor longitud de onda. Esto cubre la región del espectro entre los 100 y los 400 nanómetros (nm), aunque solamente radiaciones ultravioleta con longitudes de onda menores a los 290 nm son efectivas para combatir microorganismos. Por esta razón las lámparas de vapor de mercurio que emiten luz con una longitud de onda entre los 240 y los 290 nm son muy utilizadas.

Cuando un microorganismo es irradiado con luz ultravioleta, los fotones ultravioletas que pegan en la célula atraviesan la pared celular, el citoplasma y la membrana nuclear de esta, incidiendo en los cromosomas. Aquí, los ácidos nucleicos adsorben fácilmente los fotones ultravioletas, produciéndose entonces una reacción fotoquímica irreversible la cual inactiva a la célula.

En la Tabla 5 se muestra una lista de los microorganismos más comunes en el agua y las dosis de radiación necesarias para matar o inactivar el 90 % de una población en una muestra dada.

Tabla 5. Dosis de radiación ultravioleta requerida para matar el 90 % de varios microorganismos.

| <u>Organismo</u> | <u>Dosis*</u> |
|---------------------------------------|---------------|
| Serratia marcescens | 2.42 |
| Pseudomonas aeruginosa | 5.5 |
| Mycobacterium tuberculosis | 6.0 |
| Salmonella enteritidis | 4.0 |
| Salmonella paratyphi | 3.2 |
| Salmonella typhi | 2.14 |
| Salmonella typhimurium | 8.0 |
| Shigella dysenteriae | 2.2 |
| Shigella paedysenteriae | 1.68 |
| Escheichia coli | 3.0 |
| Proteus vulgaris | 2.7 |
| Bacillus anthracis | 4.52 |
| Bacillus megaterium (celulas) | 3.75 |
| Bacillus megaterium (esporas) | 9.07 |
| Bacillus subtilis (celulas y esporas) | 7.1 |
| Bacillus subtilis (esporas) | 12.0 |
| Clostridium tetani | 4.9 |
| Staphylococcus aureus | 2.18 |
| Streptococcus viridans | 2.0 |
| Streptococcus pyogenes | 2.16 |
| Micrococcus candidus | 8.05 |
| Micrococcus sphaeroides | 10.0 |
| Sarcina lutea (M. luteus) | 19.7 |
| Micrococcus lysodeikticus | 23.0 |
| Micrococcus radiodurans | 20.05 |
| Leveduras (promedio) | 4.0 |
| Protozoos | 60-100 |
| Alga, azul-verde | 300-600 |
| Aspergillus niger | 100 |
| Aspergillus amstelodami | 70 |
| Cladosporium herbarum | 30-70 |
| Penicillium chrysogenum | 30-50 |
| Mucor mucedo | 50-70 |
| Scopulariopsis brevicaulis | 50-80 |
| Rhizopus nigricans | 300 |

* La dosis ($mJ\text{ seg}/cm^2$) dada es para luz ultravioleta de 254 m μ requerido para matar un 90 % de los organismos expuestos a ella. Multiplicado la dosis por 4 se tiene una efectividad del 99.99 %.

El método de desinfección mediante luz ultravioleta tiene la ventaja de que no altera la estructura química, la composición, la resistividad o el pH del agua, pues nada es añadido o renovado del agua. En contraste otros métodos de desinfección a base de oxidantes químicos provocan cambios en la composición del agua y también cambian su sabor y olor y en algunos casos pueden producir reacciones indeseables, como es el caso de la cloración en donde el cloro puede reaccionar con algunos componentes presentes en el agua y formar productos como: clorofenol, cloroaminas, trihalometanos, etc.. En la tabla 6 se muestra una comparación de las cualidades de diferentes métodos de desinfección de agua.

Tabla 6 .Comparación de Métodos de desinfección de Agua.-

| | Ultravioleta | Cloración simple | Cloración/descloración | Osmo |
|---------------------------------------|--------------|-------------------------|-------------------------|--------------------|
| Costo (capital) | bajo | el más bajo | medio | alto |
| Costo de operación | el más bajo | bajo | bajo | alto |
| Facilidad de instalación | excelente | buena | compleja | compleja |
| Facilidad de mantenimiento | excelente | buena | buena | pobre |
| Costo de mantenimiento | bajo | bajo | medio | alto |
| Frecuencia de mantenimiento | no frecuente | frecuente | frecuente | continuo |
| Efectividad de desinfección | excelente | posible recontaminación | posible recontaminación | ----- |
| Efectividad en virus | buena | pobre | pobre | buena |
| Riesgos a personal | ninguno | alto | alto | alto |
| Toxicidad | no | si | si | si |
| Efecto en el agua | ninguno | forma trihaloetanos | forma trihaloetanos | biproducos tóxicos |
| Efectos residuales | no | si | si | algunos |
| Problemas de operación | bajos | medio | medio | altos |
| Tiempo de contacto | 1-5 seg. | 30-60 min. | 30-60 min. | 10-20 min. |
| Facilidad para hacer cambios de flujo | Excelente | pobre | pobre | buena |

En la fase final (pulido) de los sistemas de producción de agua ultrapura la adición de desinfectantes químicos es evitada pues estos constituyen en sí un contaminante del agua, por lo que en este caso el método de desinfección más adecuado es la radiación con luz ultravioleta.

TABLA 8.1 INFORMACION TECNICA DE LAMPARAS RAD. ULTRAVIOLETA

| <u>TIPO</u> | <u>VOLTAJE</u> <u>Voltios</u> | <u>CORRIENTE</u> <u>Amperios</u> | <u>RADIACION*</u> <u>mW/m²</u> |
|-------------|----------------------------------|-------------------------------------|--|
| TUV 8 W | 220 | 0.027 | 8.5 |
| TUV 15 W | 54 | 0.31 | 370.0 |
| TUV 25 W | 48 | 0.67 | 700 |
| TUV 30 W | 96 | 0.38 | 830 |
| TUV 40 W | 107 | 0.48 | 940 |

* A una distancia de 1 m

Ultrafiltración.-

Diferentes tipos de procesos de membranas.-

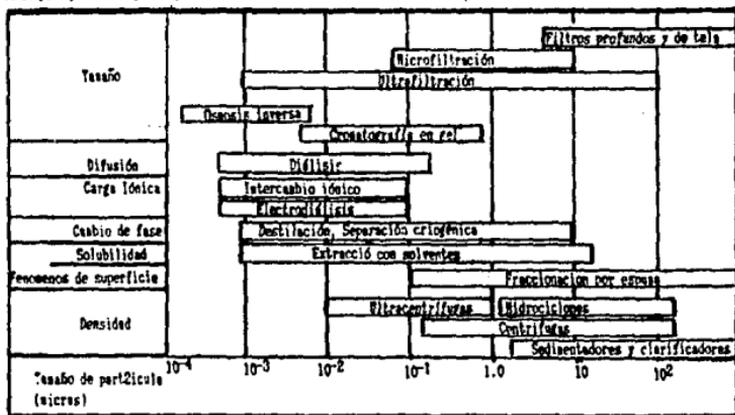
Existen diferentes tecnologías para efectuar separaciones (figura 8) el uso de alguna de ellas dependerá de las características del material a separar.

La filtración es un proceso de separación que puede tomar diferentes formas según el material a separar. La filtración estándar, incluyendo la filtración profunda, es el más común de los procesos de este tipo. La separación de los materiales ocurre en la superficie del medio filtrante o dentro de él, atrapando o adsorbiendo los materiales. Esta clase de filtros son imprácticos para servicio continuo pues su vida de uso es limitada, y se desechan después de un período de tiempo relativamente corto.

Los filtros de membrana, son de tres tipos dependiendo del nivel de separación a lograr. Microfiltración es la separación (retención) de partículas de rango micro o submicron en una solución a través de una membrana. La membrana de microfiltración es una delgada hoja plástica (material polimérico) con poros de diversos diámetros. Este proceso se lleva a cabo por presión. La caída de presión a través de membranas de este tipo es por lo general de 5 a 15 psig.

Figura 8. Procesos de separación

Principio aprovechado para separar



Virus
(Diámetro 500 Å)

Proteína
(Peso molecular 70,000)
(Diámetro 30-70 Å)

Sucrosa
(Peso molecular 342)

Ultrafiltración es un proceso más "fino" que la microfiltración. La estructura y la capacidad de las membranas de ultrafiltración es diferente que la de la microfiltración. La membrana de ultrafiltración es anisotrópica o asimétrica (las membranas de microfiltración son isotrópicas) lo que significa que la superficie activa en contacto con la solución es una "piel" de alta densidad formada por un sustrato poroso continuo. Es también un proceso activado por presión. Este proceso opera normalmente con presiones de 10 a 100 psig.

Osmosis Inversa, este deriva de ósmosis, que es un fenómeno natural de transporte mediante el cual se mueven los fluidos en las plantas y animales. La ósmosis natural ocurre cuando el agua pasa de una solución de baja concentración, a través de una membrana semipermeable a una solución más concentrada. Debido a la diferencia de potencial químico, el agua viaja de una región de baja concentración a una región de alta concentración, hasta alcanzar un equilibrio (ver figura 9). La diferencia de energía o presión es llamada presión osmótica. La ósmosis inversa se da cuando la presión osmótica natural del fluido alimentado ha sido excedida. Obviamente, al incrementar la presión de operación, más allá de la presión osmótica, el sistema es más productivo. Las presiones de operación típicas para los sistemas de ósmosis inversa varían de 100 a 1,000 psig.

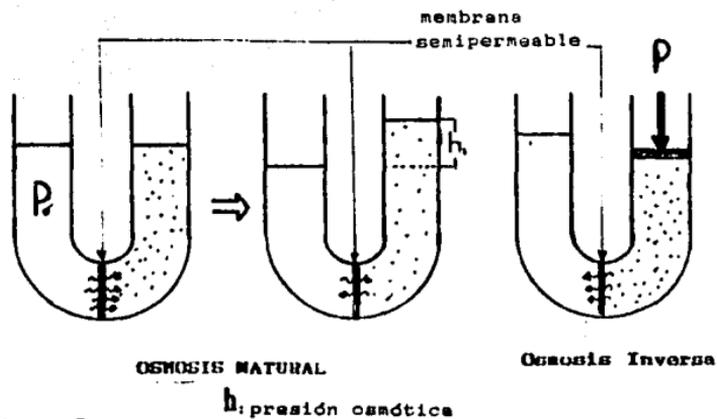


Figura 8.

La ultrafiltración es un proceso de membrana semipermeable, llevado a cabo por presión, capaz de realizar una gran variedad de separaciones basadas en el peso molecular. En la ultrafiltración el fluido de proceso fluye a través de una membrana con poros de diámetros en el rango de 10-200 Å (0.001 a 0.02 micras). Solventes y especies cuyo tamaño molecular este por debajo del peso molecular de corte de la membrana serán permeables a través de ella y saldrán como ultrafiltrado, mientras que las especies rechazadas son progresivamente concentradas en la corriente de proceso.

En los últimos años, el desarrollo de materiales filtrantes de fibra hueca, ha permitido disponer de una gran superficie de

membrana en un espacio manejable, esto hace que el proceso de ultrafiltración sea efectivo y económico.

La estructura autosoportable de las fibras huecas, permite el flujo inverso con el propósito de limpiar la membrana. El flujo inverso elimina materiales atropados en la membrana, así como las espas inhibitoras de flujo que se acumulan en la superficie de la membrana. Dadas las características de flujo dentro de las fibras huecas la polarización por concentración se minimiza.

En la actualidad existen en el mercado membranas de ultrafiltración para la industria, en arreglos de cartucho tipo "tubos y coraza", lo cual permite tener sistemas tan grandes como se quieren en arreglos modulares.

Entre las principales características y ventajas de la ultrafiltración se incluyen:

- Arreglo en cartuchos .
- Estabilidad química y física.
- Membrana polimérica sintética autosoportable que permite el retrolavado.
- Operable a bajo flujo y presión.
- No requiere pretratamiento químico.
- Reducción de polarización por concentración.
- Recuperación de Aprox. 80 % del fluido alimentado.

Áreas de uso de la ultrafiltración:

- Plantas de proceso químico.
- Producción de lácteos y alimentos.
- Industria farmacéutica.
- Tratamiento de aguas.

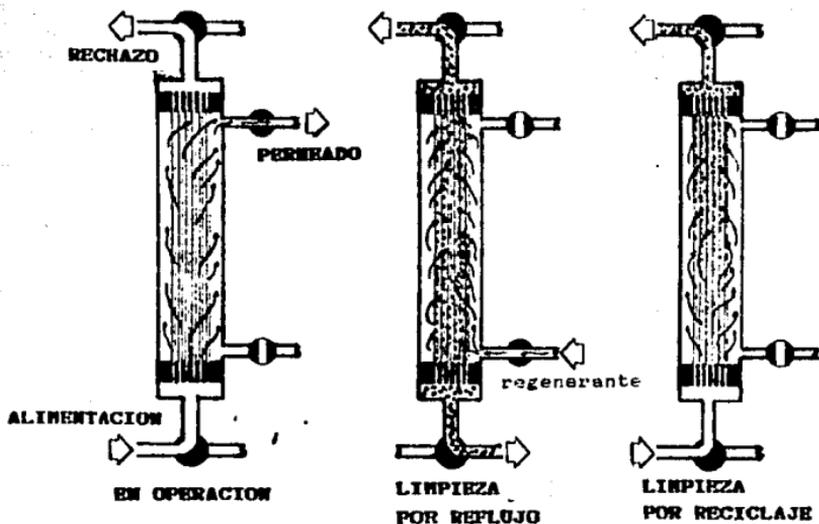


Figura 10.

III.- INGENIERIA BASICA

BASES DE DISEÑO**Localización.-**

La unidad de producción de agua ultrapura estará localizada dentro de la planta de alcohol isopropílico del Complejo Petroquímico Morelos, en el municipio de Coatzacoalcos, Veracruz.

Función.-

La unidad recibirá agua pulida proveniente de la planta de tratamiento de aguas del complejo petroquímico Morelos, reduciendo el contenido de impurezas iónicas, orgánicas y coloidales, dejándole con una calidad aceptable (ver tabla 7) para ser usadas en el reactor catalítico de la planta de alcohol isopropílico.

Tipo de proceso.-

Parte del agua pulida que se produce para emplearse en las calderas de alta presión, entra en la unidad de lecho mixto, donde se reduce el contenido de materiales iónicos casi en su totalidad, pasa a un tanque de almacenamiento de donde se

alimenta a un sistema de desinfección a base de radiación de luz ultravioleta, después el agua es filtrada en la unidad de ultrafiltración, la cual se encarga de eliminar la materia orgánica y coloidal que puede transportar el agua.

Las unidades de lecho mixto tendrán un ciclo de servicio de +/- 6 semanas. Estas mismas están diseñadas para ser regeneradas con ácido sulfúrico y sosa cáustica.

Condiciones de diseño y capacidad de la unidad.-

La unidad está diseñada para producir un máximo de 5.87 m³/h (25 gpm) de agua ultrapura. La capacidad nominal y la mínima son 3.63 m³/hr (18 gpm).

Factor de servicio.-

La unidad trabajará 365 días/año.

Flexibilidad.-

La unidad tendrá la misma flexibilidad que tiene la planta de alcohol isopropílico tanto en caso de fallas de energía eléctrica como en falla de aire.

Especificaciones del producto.-

(Ver tabla 7)

Especificaciones de la materia prima.-

1- Agua pulida (Ver tabla 8). líquida, se recibirá en límites de batería por tubería a una presión de 4.08 kg/cm² (60 Lb/pulg.²), con una temperatura máxima de 38 °C y una mínima de 18 °C.

2- Acido sulfúrico, 68 Be, a temperatura ambiente, líquido de densidad 1.851 g/cm³, será recibido en pipas o en porrones.

3- Sosa cáustica al 50 %, líquida con densidad de 1.521 g/cm³ se recibe a temperatura ambiente en forma similar al ácido sulfúrico.

4- Peróxido de hidrógeno al 30 % se recibe a temperatura ambiente, en porrones.

5- Aire para mezclado de la cama mixta durante la regeneración, debe ser aire seco libre de aceite ; puede usarse el aire de instrumentos.

TABLA 7 . Especificaciones del producto.-

1.- Pureza como resistencia específica, 10 megohm-cm mínimo.

(Para diseño 18 megohm-cm)

2.- Impurezas :

| Substancia | símbolo | concentración (ppm como CaCO ₃ Máx.) |
|---------------|-------------------|--|
| Cloruros | Cl ⁻ | 0.01 |
| Hierro | Fe ⁺⁺⁺ | 0.01 |
| Calcio | Ca ⁺⁺ | 0.01 |
| Magnesio | Mg ⁺⁺ | 0.01 |
| Silicio | Si ⁺⁺⁺ | 0.01 |
| Aluminio | Al ⁺⁺⁺ | 0.01 |
| Otros iones | | 0.01 |
| Iones Totales | | 0.05 |
| Sólidos | | ---- |
| DBO | | 0.01 |
| pH | | 7.0 |

3.- Presión en límite de baterías, 2.70 kg/cm² Men.

4.- Temperatura en límite de baterías, nominal 37 °C, mínima 12 °C.

TABLA 8 Especificaciones de la materia prima.-

| Substancia | Símbolo | concentración (ppm como CaCO ₃) |
|----------------------------|-------------------------------|--|
| <u>Cationes</u> | | |
| Calcio | Ca ⁺⁺ | 0.05 |
| Magnesio | Mg ⁺⁺ | 0.05 |
| Sodio | Na ⁺ | 0.2 |
| Hidrógeno | H ⁺ | 0.0 |
| Fierro | Fe ⁺⁺⁺ | ----- |
| Cationes totales | | 0.3 (máxima) |
| <u>Aniones</u> | | |
| Bicarbonatos | HCO ₃ ⁻ | ----- |
| Carbonatos | CO ⁻ | ----- |
| Hidroxilos | OH ⁻ | 0.2 |
| Fosfatos | PO ₄ | ----- |
| Cloruros | Cl ⁻ | 0.1 |
| Sulfatos | SO ₄ | ----- |
| Aniones totales | | 0.3 (máximo) |
| Sólidos totales disueltos | | 0.05 |
| Oxígeno disuelto | | 0.01 |
| Sílice (SiO ₂) | | 0.05 |
| pH | | 8-9 |

Equipo de seguridad.-

En la fase de regeneración de los lechos mixtos los operadores deberán usar equipo de protección, para manejo de ácidos y bases fuertes, como guantes, lentes, batas, casco, etc.

Se deben observar las normas de higiene y seguridad para el manejo de ácido, además se contará con áreas de lavacjos y regaderas.

Eliminación de desechos.-

Los desechos son aguas usadas en la regeneración, las cuales se drenan y pasan a un neutralizador. Una vez alcanzada la neutralización del agua residual, se descarga a la red de drenaje.

Servicios auxiliares.-

1- Vapor de baja presión con una temperatura de 153 °C y 4 kg/cm² de presión.

2- Aira para instrumentos, se recibe de la sala de compresores para servicio general de la planta a una presión de 7-8 kg/cm².

3- Alimentación eléctrica:

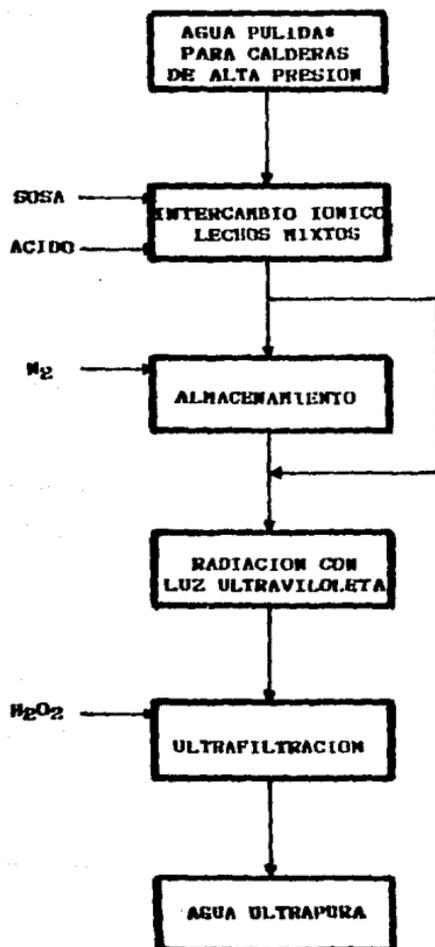
Fuente de suministro: Subestación eléctrica

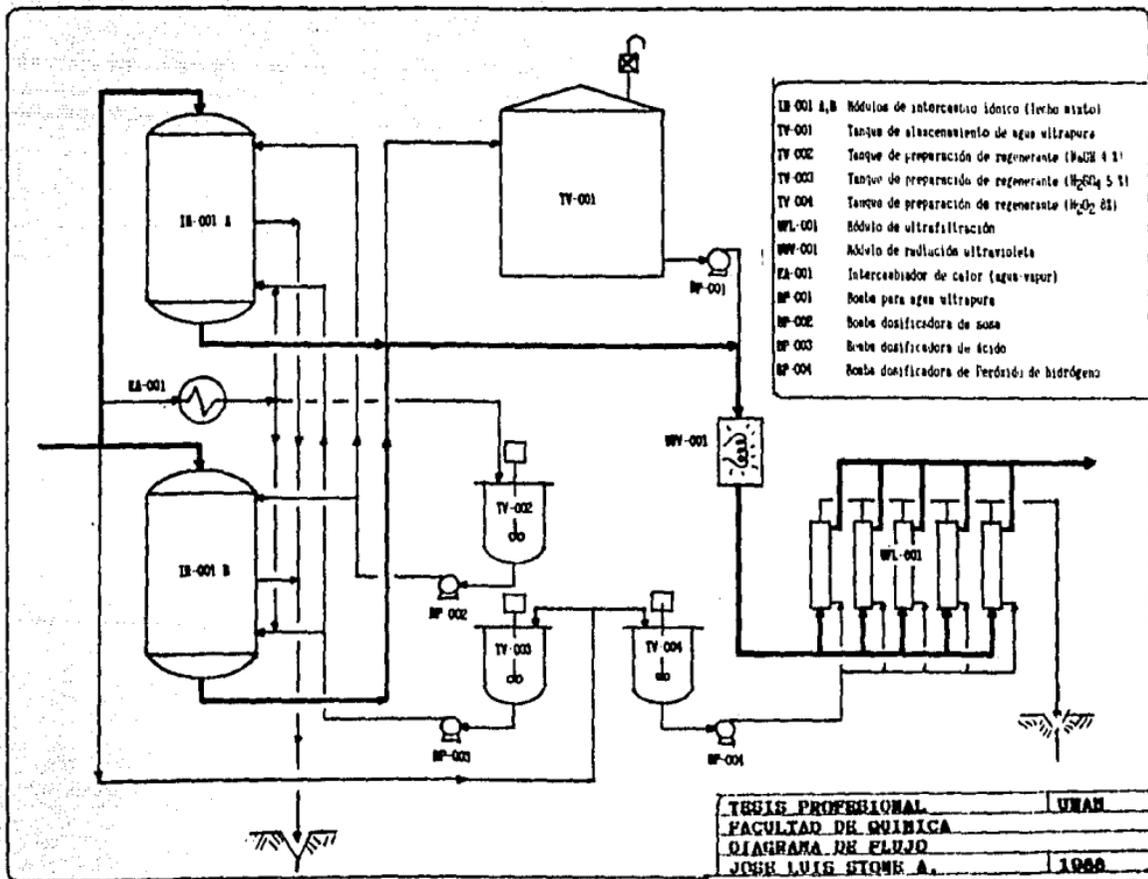
Frecuencia: 60 Hertz.

Tensión: 440 Voltios en 3 fases

Recibida en límites de batería.

DIAGRAMA DE BLOQUES





| | |
|---------------------|------|
| TESIS PROFESIONAL | UNAH |
| FACULTAD DE QUIMICA | |
| DIAGRAMA DE FLUJO | |
| JOSÉ LUIS STONE A. | 1988 |

Cálculo de la Unidad de Lecho mixto

Dimensiones del recipiente a utilizar.-

Para determinar el diámetro del recipiente a utilizar se toma como parámetro las velocidades de flujo recomendadas por el fabricante de las resinas. Las velocidades de flujo guardan relación con la caída de presión por pie en profundidad de resina. De la figura 11 tomamos un valor de flujo de 15 gpm/pie² (36.82 m³/hr/m²), con el cual la caída de presión será de aproximadamente 1 Lb./pulg² (0.0703 kg/cm²) por cada pie de profundidad de la cama de resina a 120°F (49°C).

Considerando una eficiencia de 90 % en la unidad de ultrafiltración será necesario tratar 6.29 m³/hr (27.7 GPM) para poder obtener 5.67 m³/hr (25 gpm) de agua ultrapura, entonces el área requerida para manejar un flujo de 36.82 m³/hr/m² (15 gpm/pie²) se calcula como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Área Transversal} &= (6.29 \text{ m}^3/\text{hr}) / (36.82 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^2) \\ &= 0.1703 \text{ m}^2 \text{ (1.833 pie}^2\text{)} \end{aligned}$$

Si el área de una circunferencia es: $A = (\pi D^2)/4$,
entonces, $D = ((4 * A)/\pi)^{0.5}$,

donde D es el diámetro del recipiente,

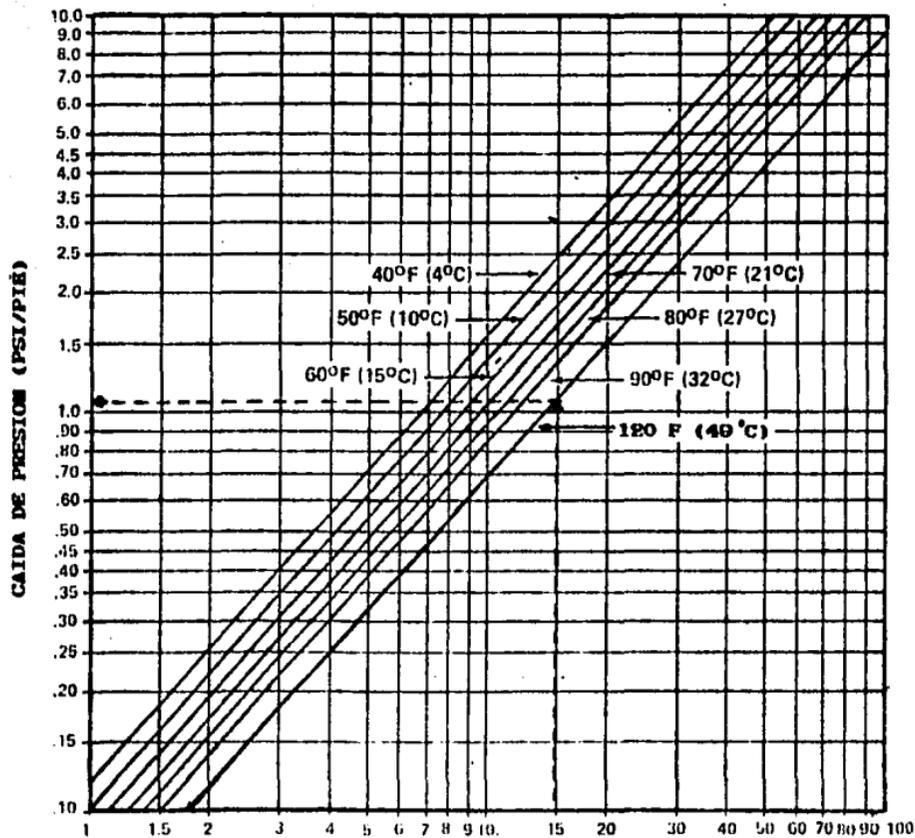
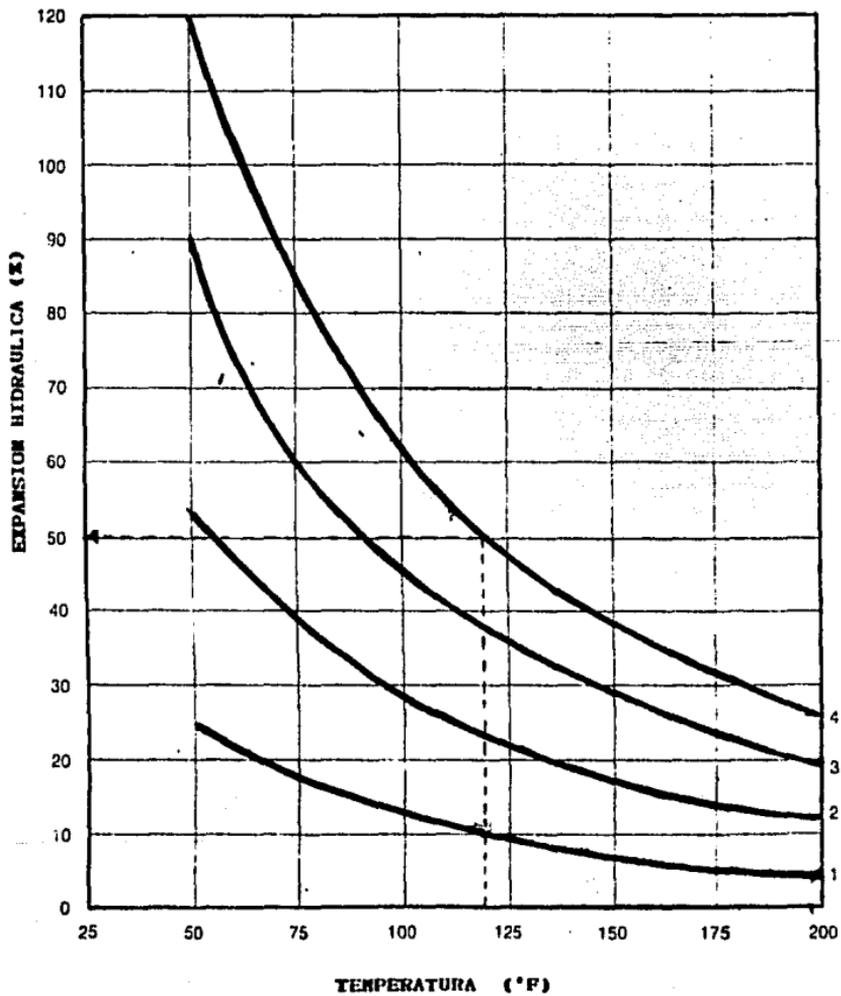


Figura 11. FLUJO (GPM/PIE²)

Figura 12.

AMBERLITE IRA-402
EXPANSION HIDRAULICA
PARAMETRO: FLUJO (GPH/PIE²)



$$D = ((4 * 0.1703 \text{ m}^2) / 3.1418)^{0.5}$$

$$= 0.4656 \text{ m (1.527) pie}$$

Para manejar números más cómodos redondearemos el diámetro a 1.5 pies (0.4572 m).

Para definir la altura del recipiente es necesario conocer los volúmenes de resina requeridos para tratar este tipo de agua, por lo cual nos referiremos a la información que sobre capacidad y otras características de las resinas aniónica y catiónica suministra el fabricante de estas.

Capacidad de la cama Catiónica (Asberite 120).-

Del análisis del agua de entrada tenemos que:

Na⁺ como mg/l de CaCO₃(ppm) = 0.2

otros cationes = 0.1

TOTAL de cationes = 0.3

OH⁻ como mg/l de CaCO₃ = 0.2

Cl⁻ " " " " = 0.1

TOTAL de aniones = 0.3

Silice como SiO₂ = 0.05

$$\% \text{ de Na} = (0.2 * 100)/0.3 = 66.6$$

$$\% \text{ de Alc.} = (0.2 * 100)/0.3 = 66.6$$

Con la figura 13 para un nivel de regeneración de de 5 Lbs. de H_2SO_4 (86 Be)/pie³ (80.1 kg/m³) para esta resina encontramos que la fuga de sodio es de 2.5 % de la concentración de los cationes en la corriente de alimentación, entonces la concentración de sílice al la salida del lecho será :

$$(2.5 * 0.3)/100 = 0.0075 \text{ ppm como CaCO}_3$$

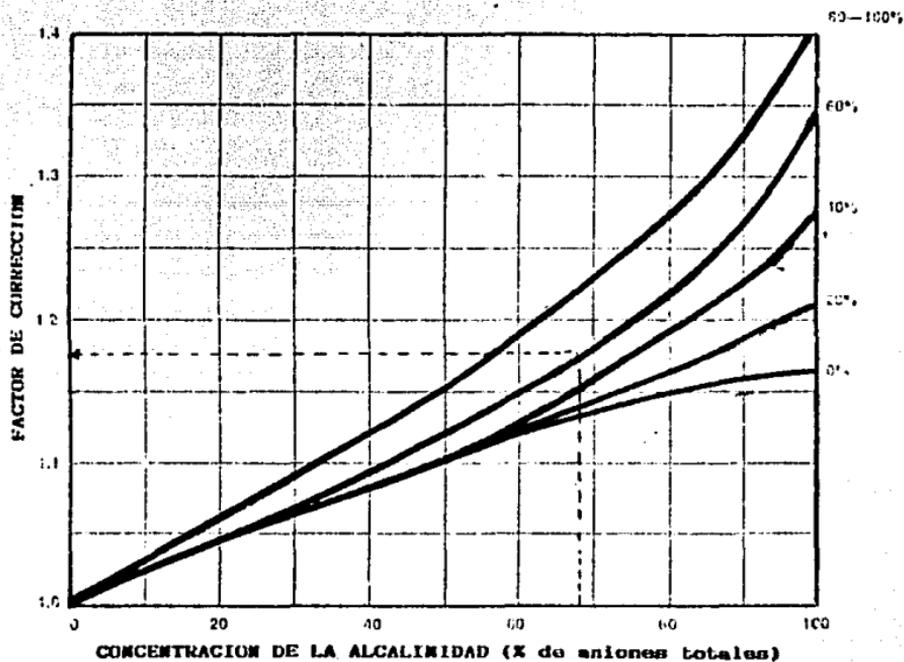
lo cual se ajusta a nuestros requerimientos.

mediante la gráfica 14 leemos que para un 66 % de sodio la capacidad de la resina catiónica es de:

$$12.8 \text{ kgr. de CaCO}_3/\text{pie}^3 \quad (\text{Nota 1})$$

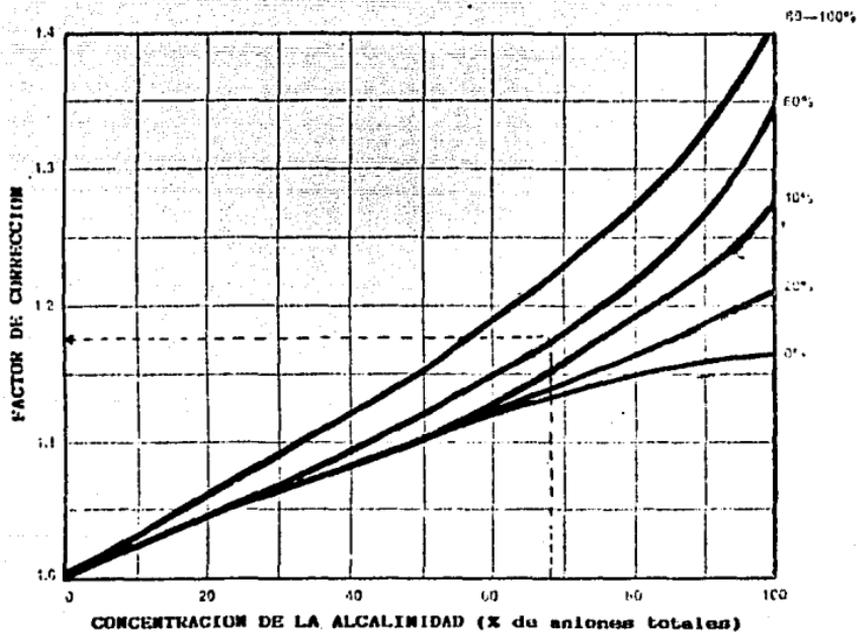
El factor de corrección por alcalinidad lo obtenemos de la figura 15 y es de 1.15, por tratarse de un lecho mixto tenemos que aplicar un factor de corrección de 0.8 según recomendaciones del fabricante de las resinas, entonces la capacidad corregida será:

Nota 1.- El término kgr (kilogramos= 1,000 gramos) se desarrolló originalmente del lecho de que 7,000 gramos de trigo pesan aproximadamente una libra. Es la unidad inglesa más utilizada para realizar cálculos de capacidades de resinas intercambiables. 1 grano/pulón = 17.1 ppm como $CaCO_3$.



FACTOR DE CORRECCION POR ALCALINIDAD. AMBERLITE-120

Figura 15.



FACTOR DE CORRECCION POR ALCALINIDAD. AMBERLITE-120

Figura 15.

AMBERLITE 120

NIVEL DE REGENERACION: 5 Lbs H_2SO_4 (66 B6)/ Pl_3

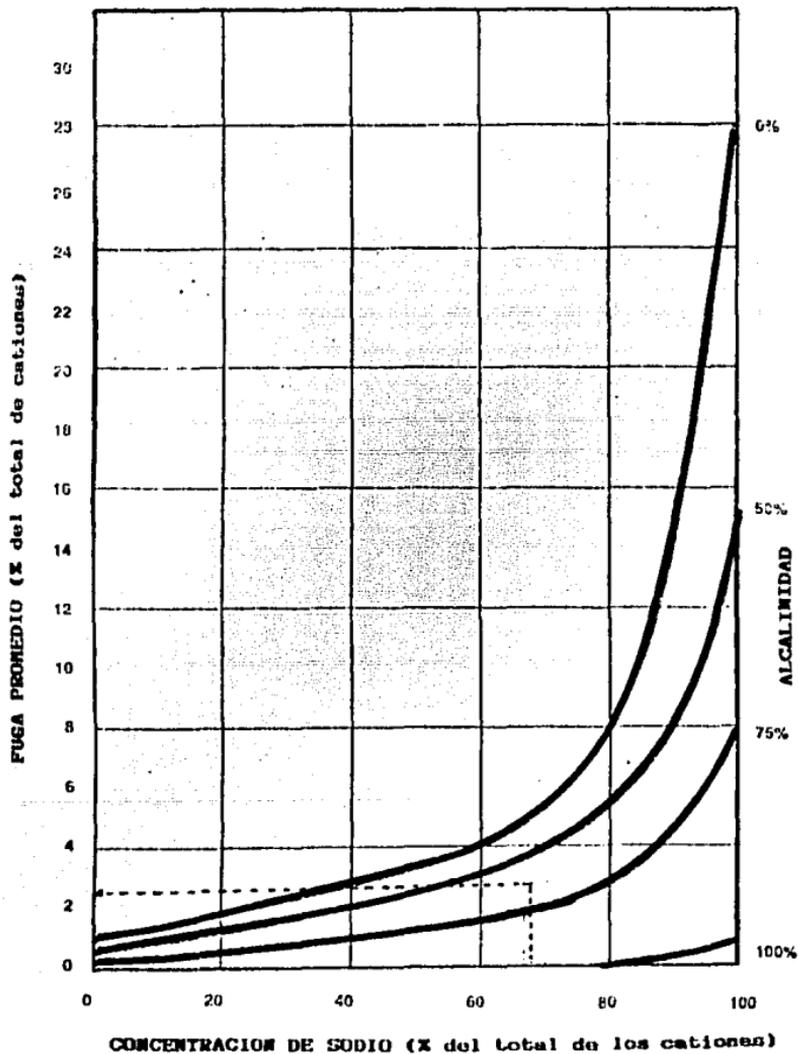
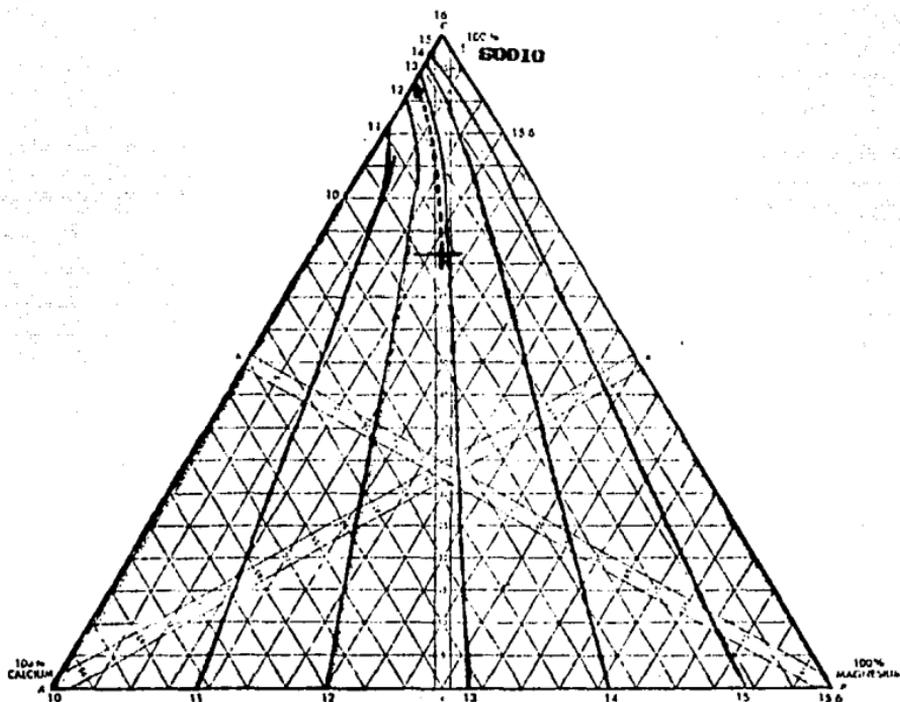


Figura 13.

INFORMACION DE ISO-CAPACIDAD
 @ alcalinidad cero

kg(CaCO_3)/pie³



AMBERLITE-120

NIVEL DE REGENERACION--5 lbs H_2SO_4 (CaCO_3)/pie³

Figura 14.

$$\begin{aligned} \text{Capacidad corregida} &= 12.8 * 1.15 * 0.8 \\ &= 11.77 \text{ kgr./pie}^3 \\ &= 416.88 \text{ kgr./m}^3 \end{aligned}$$

Capacidad de la resina Aniónica (Amberlite IMA-402).-

Del análisis del influente:

| | |
|--|--------------|
| CO ₂ como mg/l (ppm) de CaCO ₃ | = 0.0 |
| SiO ₂ " " " " | = 0.05 |
| THA* " " " " " | = <u>0.3</u> |
| TOTAL " " " " " | = 0.35 |

$$\% \text{ THA} = (0.3 * 100) / 0.35 = 85.71$$

$$\% \text{ SiO}_2 = (0.05 * 100) / 0.35 = 14.29$$

En la figura 15 se muestra que la fuga de sílice para un nivel de regeneración de 10 Lb. de NaOH al 100%/pie³ (160 kg/m³) de resina, que es el máximo reportado por el fabricante, tendremos una fuga de sílice menor de 0.008 ppm como CaCO₃, lo cual es adecuado para la calidad de agua requerida.

* THA - Por sus iniciales en inglés, ácidos minerales totales. (Es la suma de cloruros, sulfatos y nitratos)

De la figura 18 utilizando los valores de % de TMA y % de SiO₂ obtenidos arriba vemos que la capacidad de la resina aniónica es de: 17.2 kgr. de CaCO₃/pie³.

Factor de corrección por cloruros = 0.83

Factor de corrección por tratarse de lecho mixto = 0.8

Capacidad corregida = $17.2 * 0.83 * 0.8 = 12.78 \text{ kgr./pie}^3$.

= 453.25 kgr/m³

Dimensionamiento final del lecho mixto.-

Casa Catiónica (Amberlite IR-120).-

Flujo = 8.29 m³/hr (27.7 gpm)

Diámetro del recipiente = 0.4572 m (1.5 pie)

Área transversal del recipiente = $(\pi * D^2)/4$

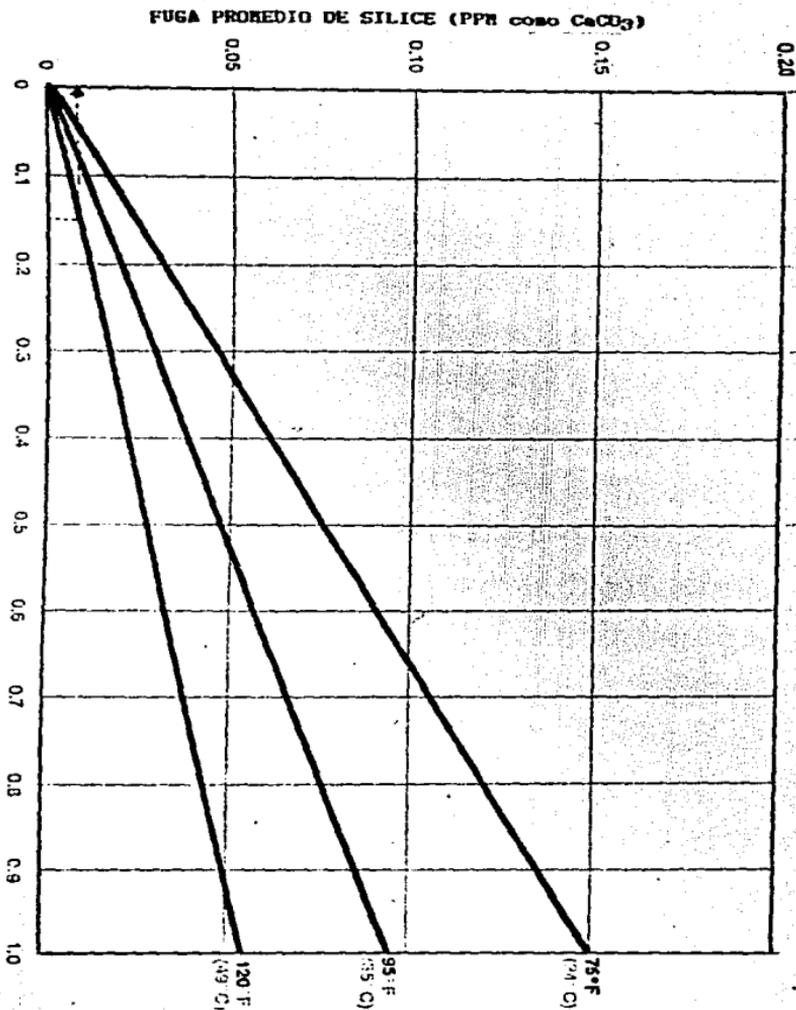
$$= (3.1416 * (0.4572 \text{ m})^2)/4$$

$$= 0.1641 \text{ m}^2 (1.7871 \text{ pie}^2)$$

Altura de resina mínima recomendable = 0.61 m (2 pies)

Volumen de resina = área * altura

$$= 0.1641 \text{ m}^2 * 0.61 \text{ m}$$



FUGA DE SILICE
 @ 10 lbs de NaOH a 100 X/pies

CONCENTRACION DE SILICE
 (Fracción de anhídrido total)

Figura 10.

AFUGA DE SILICE (PPM como CaCO_3)

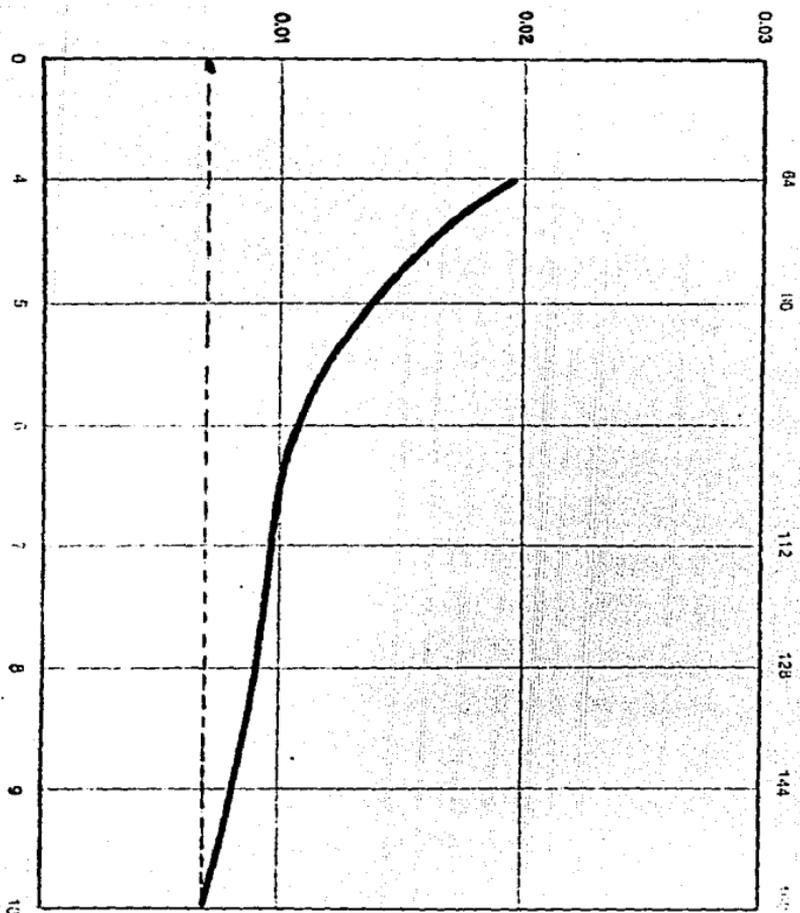


FIGURA 17. HIDROXIDO DE SODIO AL 100% (lbs/pic³)

FUGA DE SILICE &
 NIVEL DE REGENERACION A 120 F
 (REGENERACION OPTIMA)

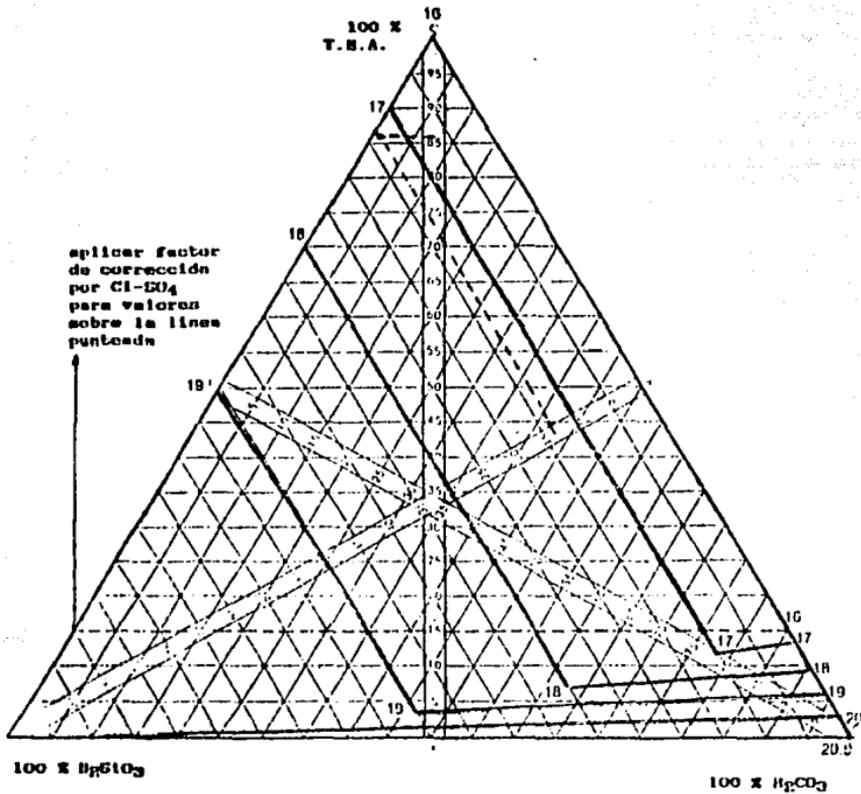
Figura 16.

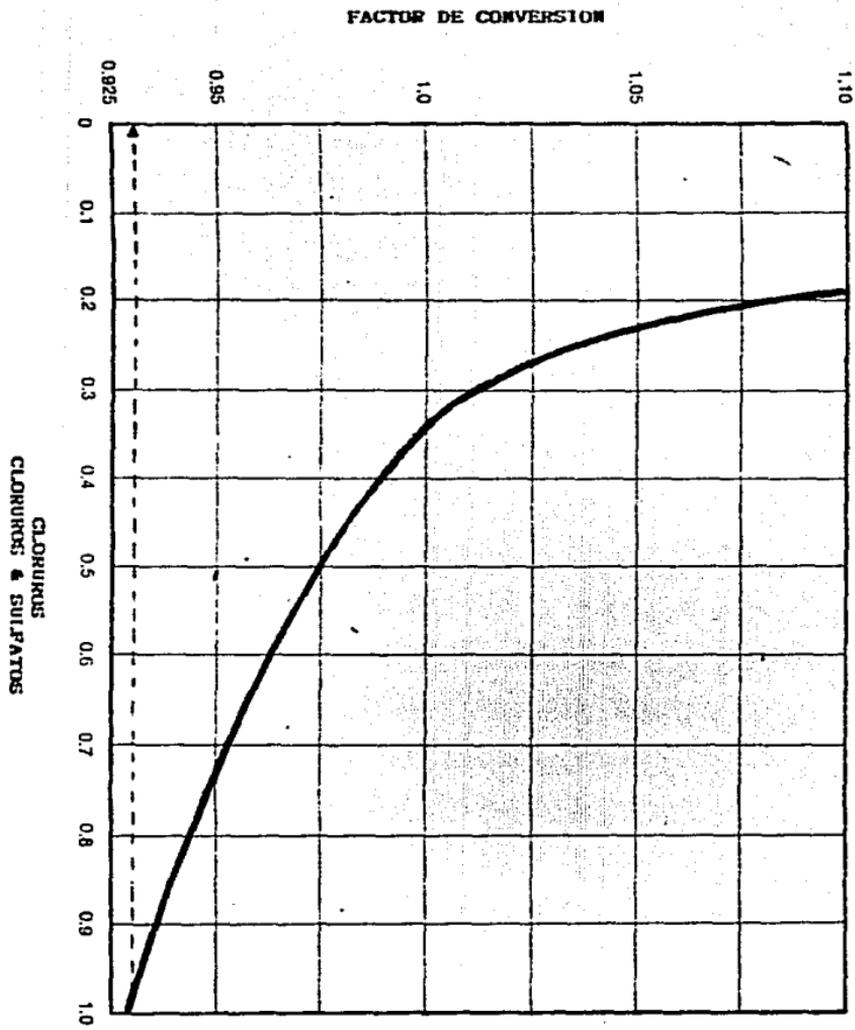
AMBERLITE IRA-402 CURVAS DE CAPACIDAD

condiciones:

NIVEL DE REGENERACION: 10 lbs de NaOH al 100 %/pie³

TEMPERATURA 120 F





FACTOR DE CORRECCION POR CLORO-SULFATO

Figura 18.

$$= 0.10 \text{ m}^3 \text{ (3.5343 pie}^3\text{)}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidad instalada} &= \text{Cap. de la resina} * \text{volumen de resina} \\ &= 416.88 \text{ kgr/m}^3 * 0.1 \text{ m}^3 \\ &= 41.688 \text{ kgr.} \end{aligned}$$

Determinación de la cantidad de cationes expresada en granos por metro cubico presentes en el agua influente.

$$\begin{aligned} \text{Total de cationes a remover} &= (0.3 \text{ mg/l}) / (17.1 \text{ mg/l/gr/gal}) \\ &= 0.0175 \text{ gr/gal.} \\ &= 4.6235 \text{ gr/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen a tratar} &= (41,688 \text{ gr}) / (4.6235 \text{ gr/m}^3) \\ &= 9,016.54 \text{ m}^3 \text{ (2,382,177 gal)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Horas de trabajo} &= \text{Volumen a tratar} / \text{Flujo de diseño} \\ &= (9,016.54 \text{ m}^3) / (6.291 \text{ m}^3/\text{hr}) \\ &= 1,433.2 \text{ hrs.} \\ &= 59.7 \text{ días} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Acido para regenerar} &= \text{Vol. de resina} * \text{nivel de regeneración} \\ &= 0.1 \text{ m}^3 * 80.1 \text{ kg de H}_2\text{SO}_4 \text{ 68 Be/m}^3 \\ &= 8.01 \text{ kg (17.6 Lb) de H}_2\text{SO}_4 \text{ (68 Be)} \end{aligned}$$

Cama Aniónica (Amberlite IRA-402)

Usando el volumen de agua obtenido en el cálculo de la cama catiónica, tenemos que el total de aniones intercambiables son:

$$\begin{aligned} \text{Total de aniones a remover} &= (0.35 \text{ mg/l}) / (17.1 \text{ mg/l/gr/gal}) \\ &= 0.02048 \text{ gr/gal} \\ &= 5.405 \text{ gr/m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Kilogramos a remover} &= \text{Vol. a tratar} * \text{total de aniones} \\ &= (9,016.54 \text{ m}^3 * 5.405 \text{ gr/m}^3) / 1000 \\ &= 48.73 \text{ kgr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen de resina} &= \text{kgr a remover} / \text{Cap. de la resina} \\ &= 48.73 \text{ kgr.} / (45.25 \text{ kgr/m}^3) \\ &= 0.1075 \text{ m}^3 \text{ (3.80 pie}^3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Altura de la cama aniónica} &= \text{Vol. de resina} / \text{area} \\ &= 0.1075 \text{ m}^3 / 0.164 \text{ m}^2 \\ &= 0.6552 \text{ m (2.150 pie)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sosa para regenerar} &= \text{Vo. de resina} * \text{nivel de regeneración} \\ &= 0.1075 \text{ m}^3 * 160 \text{ kg/m}^3 \text{ de NaOH al 100 \%} \\ &= 17.2 \text{ kg (37.88 Lbs.) de NaOH al 100 \%} \end{aligned}$$

Altura del lecho mixto:

Resina catiónica = 0.61 m

Resina aniónica = 0.65 "

Resina neutra = 0.30 "

Altura TOTAL = 1.56 m (5.139 pies)

El volumen total de resina es, $V_t = \text{Area de Col.} \times \text{altura}$

$$= 0.164 \text{ m}^2 \times 1.56 \text{ m}$$

$$= 0.256 \text{ m}^3$$

Para fijar la altura del recipiente debe tomarse en cuenta que las resinas deben expandirse al menos un 50 % durante la fase de regeneración para que esta sea lo mas eficiente. Así durante la regeneración la resina alcanzará una altura de:

$$1.565 \text{ m} \times 1.5 = 2.347 \text{ m (7.709 pies)}$$

Además de la cama de resina, consideraremos un espacio de 0.61 m (2 pies) para la ubicación de los distribuidores superior e inferior. Así la altura final del recipiente será:

Altura de la cama de resina = 2.347 m

Espacio para los distribuidores = 0.61 "

Altura final del recipiente = 2.957 m (9.71 pies)

Regeneración del lecho mixto.-

Tiempo de retrolavado = 0.25 hrs. (recomendado)

Velocidad de retrolavado = $7.334 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^2$ (3 gpm/pie²)

Flujo de retrolavado = $7.334 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^2 \times 0.164 \text{ m}^2$
 = $1.202 \text{ m}^3/\text{hr}$ (5.3013 gpm)

Volumen de agua de retrolavado = $1.202 \text{ m}^3/\text{hr} \times 0.25 \text{ hr}$
 = 0.3005 m^3 (79.61 galones)

Introducción de regenerantes.-

La regeneración una vez efectuada la separación de las resinas por su diferencia de densidades, se efectúa en forma simultánea introduciendo ácido sulfúrico al 5 % por abajo, y sosa cáustica al 4 % por arriba.

a) Regeneración básica.-

Nivel de regeneración 10 Lb de NaOH/pie³ (160 kg de NaOH por m³ de resina)

Se dispone de sosa al 50 % debiéndose alimentar al 4 %.

Densidades:

NaOH al 4 % = $41.71 \text{ kg}/\text{m}^3$ (0.3481 Lb/gal)

NaOH al 50 % = $782.5 \text{ kg}/\text{m}^3$ (6.364 Lb/gal)

Requerimiento de sosa = 17.2 kg (37.88 Lb.) al 100 %

$(17.2 \text{ kg}) / (41.71 \text{ kg/m}^3) = 0.4123 \text{ m}^3$ (108.84 gal) al 4%

$(17.2 \text{ kg}) / (762.5 \text{ kg/m}^3) = 0.0225 \text{ m}^3$ (5.859 gal) al 50 %

El agua requerida para dilución será:

$$\begin{array}{r} 0.4123 \text{ m}^3 \\ - 0.0225 \text{ "} \\ \hline 0.3898 \text{ " (102.88 gal)} \end{array}$$

El flujo de regenerante recomendado para estas resinas es de $2 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^3$ a $4 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^3$

Considerando el valor mayor para la resina aniónica, el flujo de regenerante será:

$$4 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^3 = 0.1075 \text{ m}^3 = 0.43 \text{ m}^3/\text{hr} (1.893 \text{ gpm})$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de regeneración} &= (0.4123 \text{ m}^3) / (0.43 \text{ m}^3/\text{hr}) \\ &= 0.9588 \text{ hr (57.5 min)} \end{aligned}$$

b) Regeneración ácida.-

Nivel de regeneración 5 Lb de $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{pie}^3$ (80 kg/m^3).

Se dispone de ácido sulfúrico al 98 % debiéndose alimentar al 5 % .

Densidades:

H_2SO_4 al 98 % = 1,799.7 kg/m³ (15.02 Lb/gal)

H_2SO_4 al 5 % = 51.58 kg/m³ (0.43 Lb/gal)

Requerimiento de ácido sulfúrico = 8.02 kg. (17.87 Lb.) al
98 %

$(8.02 \text{ kg}) / (1,799.78 \text{ kg/m}^3) = 0.00445 \text{ m}^3$ (1.176 gal) de
 H_2SO_4 al 98%

$(8.02 \text{ kg}) / (51.58 \text{ kg/m}^3) = 0.1554 \text{ m}^3$ (41.09 gal) de H_2SO_4
al 5 %

El agua requerida para diluir el ácido es:

$$\begin{array}{r} 0.15548 \text{ m}^3 \\ - 0.00445 \text{ " } \\ \hline 0.15102 \text{ " } \quad (39.89 \text{ gal}) \end{array}$$

El flujo de regenerante recomendado es de, 4 a
8 m³/hr/m³, multiplicando el valor de 4 m³/hr/m³ por el
volumen de resina catiónica, tendremos el flujo de
regeneración:

$$4 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{m}^3 * 0.1 \text{ m}^3 = 0.4 \text{ m}^3/\text{hr} (1.767 \text{ gpm})$$

$$\begin{aligned} \text{Tiempo de regeneración} &= (0.15548 \text{ m}^3) / (0.4 \text{ m}^3/\text{hr}) \\ &= 0.3887 \text{ hr} (23.52 \text{ Min}) \end{aligned}$$

Dado que tenemos tiempos diferentes para la dosificación de sosa y ácido sulfúrico, igualamos estos tiempos para no introducir un flujo de bloqueo.

Tiempo de regeneración = 0.9588 hrs.

Volumen requerido de ácido sulfúrico al 5 % = 0.1554 m³
(41.09 gal).

Flujo = 0.1554 m³/0.9588 hrs
= 0.162 m³/hr (0.7136 gpm)

Flujo de regeneración del ácido = (0.1620 m³/hr)/0.1 m³
= 1.62 m³/hr/m³

Desplazamiento.-

Volumen total de resina = 0.2584 m³ (9.08 pie³)

Se considerando por seguridad un espacio adicional de 0.15 m (6 pulgadas) por encima del nivel de la resina .

$$0.15 \text{ m} \times 0.164 \text{ m}^2 = 0.0246 \text{ m}^3 \text{ (0.888 pie}^3\text{)}$$

Volumen de desplazamiento

$$0.2584 \text{ m}^3 + 0.0246 \text{ m}^3 = 0.281 \text{ m}^3 \text{ (10.68 pie}^3\text{)}$$

Tomando la mitad de este volumen para el desplazamiento por cada sección y considerando para la operación de desplazamiento el mismo flujo utilizado en el retrolavado:

$$V = 0.281 \text{ m}^3 / 2 = 0.1405 \text{ m}^3$$

$$\begin{aligned} \text{El tiempo será} &= 0.1405 \text{ m}^3 / 1.203 \text{ m}^3/\text{hr} \\ &= 0.116 \text{ hrs. (7.07 min)} \end{aligned}$$

Vaciado de la unidad.-

Considerando un volumen de 0.281 m^3 para esta operación, tomará un tiempo de 0.25 hrs (15 min)

Mezclado del lecho.-

En el vaciado de la unidad, el agua debe ser drenada hasta que su nivel se de 20-30 cm por encima de las resinas. Posteriormente por el colector inferior se le inyecta aire por un tiempo de 0.25 hrs. (15 min) con el objeto de mezclar las resinas.

Enjuague final.-

El volumen de enjuague recomendado es de 75 galones por pie³

de resina:

79

$$75 \text{ gal/Pie}^3 * 9.08 \text{ pie}^3 = 681 \text{ galones}$$
$$= 2.577 \text{ m}^3$$

El flujo de enjuague será igual al flujo de servicio, 3.63 m³/hr (18 gpm)

$$\text{Tiempo} = 2.577 \text{ m}^3 / (3.63 \text{ m}^3/\text{hr})$$
$$= 0.7099 \text{ hrs (42.99 min)}$$

RESUMEN

| ETAPA | FLUJO (m ³ /hr) | | TIEMPO (hr) |
|----------------|----------------------------|-------|-------------|
| | ácido | base | |
| Retrolavado | 1.203 | | 0.25 |
| Regeneración | 0.182 | 0.430 | 0.958 |
| Desplazamiento | 1.203 | 1.203 | 0.116 |
| Vaciado | gravedad | | 0.25 |
| mezclado | ----- | | 0.25 |
| Enjuague | 3.63 | | <u>0.71</u> |
| | | | 2.63 hrs. |

Por tanto se requiere de aproximadamente 2 1/2 horas para la el ciclo completo de regeneración.

Módulo de Radiación Ultravioleta.-

El módulo estará constituido por 6 lámparas de vapor de mercurio de 40 watts con 0.81 m (38") de longitud (figura 20), las cuales circundan un tubo de 0.15 m (6") de diámetro. Este tubo deberá ser de cuero o de Teflón, ambos materiales son permeables a la radiación ultravioleta. Este sistema estará contenido en un cuadro reflector de aluminio pulido, cuya función es la de redirigir las radiaciones hacia el tubo que conduce el agua.

El tiempo de residencia (t_r) del agua dentro del sistema será:

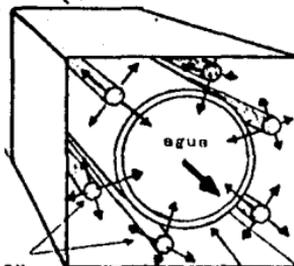
$$t_r = \text{Volumen del tubo} / \text{Gasto de diseño}$$

$$\begin{aligned} \text{Volumen del tubo, } V &= (\pi D^2/4) * L \\ &= (3.1416 * 0.15^2/4) * 0.81 \\ &= 0.018 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\text{Gasto de diseño, } G = 8.25 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$\begin{aligned} t_r &= 0.018/8.25 \\ &= 0.00225 \text{ hr (8.2 s)} \end{aligned}$$

cuadro reflector de
aluminio pulido



lámpara de vapor
de mercurio

tubo de cuarzo
o de Teflón

| | |
|---------------------------------|------|
| TESIS PROFESIONAL | UNAM |
| FACULTAD DE QUÍMICA | |
| FIG. 20. MOD. RAD. ULTRAVIOLETA | |
| JOSE LUIS STONE A. | 1969 |

Cálculo de la unidad de ultrafiltración.-

La unidad de ultrafiltración deberá tener capacidad para tratar 6.29 m³/hr (27.7 gpm) de agua desmineralizada proveniente de la unidad de lecho mixto con una eficiencia de 90 %, produciendo 5.67 m³/hr de agua ultrafiltrada, para lograr esto se utilizarán cartuchos de fibras huecas.

En la tabla 8 se pueden observar las características de diferentes tipos de membranas de la marca Romicon de la compañía Rohm and Haas que son las líderes en el mercado.

Para nuestro caso escogemos el modelo HF-53-20 Gm-80, en un arreglo de 5 cartuchos (ver figura 21).

$$\begin{aligned} \text{Área de membrana} &= 4.92 \text{ m}^2/\text{cartucho} \times 5 \text{ cartuchos} \\ &= 24.61 \text{ m}^2 \text{ (265 pie}^2\text{)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacidad de la unidad} &= 1.25 \text{ m}^3/\text{hr}/\text{cartucho} \times 5 \text{ cartuchos} \\ &= 6.25 \text{ m}^3/\text{hr} \text{ (27.5 gpm mínimo)} \end{aligned}$$

La unidad estará diseñada para permitir la limpieza de cada cartucho por separado sin que sea necesario interrumpir el servicio. Para garantizar un flujo estable se deberá limpiar cada 3 días cada cartucho, mediante una operación de retrolavado con una solución de peróxido de hidrógeno al 8 %.

Tabla 9. Cartuchos de membranas de fibra hueca para ultrafiltración Romicon GM80

| ESPECIFICACIONES DEL CARTUCHO | | |
|-------------------------------|----------------------|----------------------|
| | HF 30 | HF 53 |
| Área de membrana | 30 pies ² | 53 pies ² |
| Tipo de membrana | GM80 | GM80 |
| Material de la coraza | Polisulfato | Polisulfato |
| Número de fibras | 2940 | 290 |
| Longitud del cartucho | 25 pulgadas | 43 pulgadas |
| Diámetro externo | 3 pulgadas | 3 pulgadas |

| CONDICIONES DE OPERACION RECOMENDADAS | | |
|---------------------------------------|---------|---------|
| Máxima Temp. de operación | 45 C | 45C |
| Máxima presión | 100 psi | 100 psi |
| Máxima diferencia de presiones | 25 psi | 25 psi |

| ESPECIFICACIONES | DE | LA | MEMBRANA |
|---------------------------------|-------------|-------------|----------|
| Diámetro interior de las fibras | 0.020 pulg. | 0.020 pulg. | |
| Peso molecular de corte | 80,000 | 80,000 | |
| Diámetro promedio de poro | 40-50 A | 40-50 A | |
| Mínimo flujo de permeato | 3 gpm | 5.5 gpm | |
| Rango de pH | 1.5-13 | 1.5-13 | |

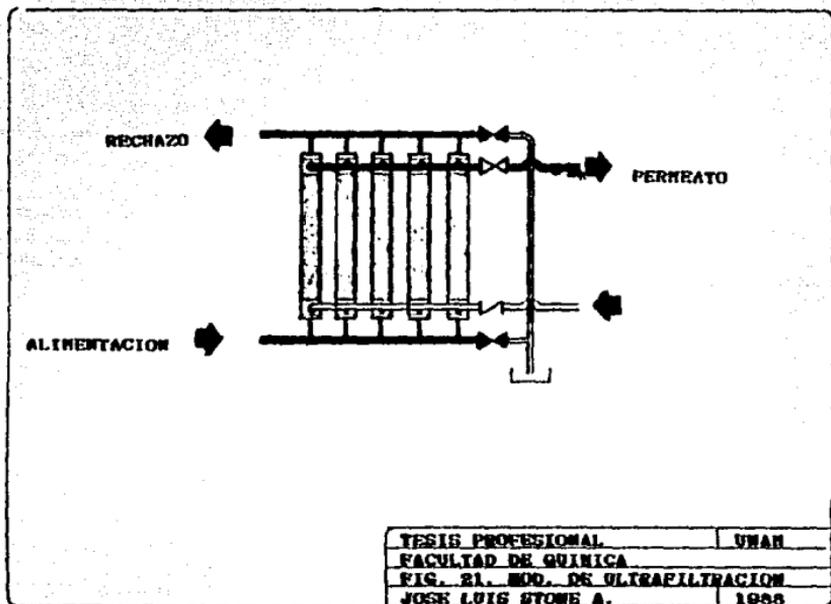
Mediante una rutina, controlada automáticamente, se limpiará un cartucho cada 15 Horas. Cuando un cartucho requiera limpieza la válvula de alimentación se cierra y se abre la válvula de la parte inferior del lado de la coraza y por ella fluye la solución de peróxido de hidrógeno la cual es bombeada del tanque de preparación de la solución por la bomba BP-004 a razón de $1.25 \text{ m}^3/\text{hr}$, esta operación dura 20 minutos. Cuando la operación de limpieza termina se regresa a las condiciones de flujo de servicio.

$$\begin{aligned} \text{Gasto de regenerante por cartucho} &= 1.25 \text{ m}^3/\text{hr} * 0.33 \text{ hr} \\ &= 0.416 \text{ m}^3 \text{ (110 galones)} \end{aligned}$$

Contando una regeneración cada 15 hrs. el gasto mensual será:

$$0.416 \text{ m}^3/15 \text{ hrs} * 720 \text{ hrs./mes} = 19.97 \text{ m}^3/\text{mes} \text{ (5,275 gal)}$$

El sistema tiene la suficiente flexibilidad para que al sacar uno de los cartuchos para limpiarlo los otros 4 puedan mantener el flujo requerido.



| | |
|----------------------------------|------|
| TESIS PROFESIONAL | UNAM |
| FACULTAD DE QUIMICA | |
| FIG. 21. MOD. DE ULTRAFILTRACION | |
| JOSE LUIS STONE A. | 1998 |

Tanques de preparación de soluciones regenerantes.-

Estos deberán tener capacidad para contener la solución requerida para una regeneración más un 25 % de exceso para facilitar el mezclado de las soluciones. Las proporciones de estos recipientes cilíndricos serán, altura igual al doble de la base. Deberán ser construidos en acero inoxidable o en material plástico.

Regenerante ácido.-

Volumen de ácido sulfúrico al 5 % necesario para una regeneración, 0.1554 m^3 .

Volumen del tanque, $V_t = 0.1554 * 1.25$

$$= 0.1942 \text{ m}^3$$

$$V_t = (\pi D^2/4) * h$$

como altura $h = 2D$, sustituyendo

$$V_t = \pi D^3/2$$

entonces, $D = (2V_t/\pi)^{1/3}$

$$= (2 * 0.1942 / 3.1416)^{1/3}$$

$$= 0.498 \text{ m}$$

$$h = 2D$$

$$= 2 * 0.498$$

$$= 0.996 \text{ m}$$

Regenerante básico.-

Volumen de sosa cáustica al 4 % necesaria para una regeneración, 0.41123 m^3

$$\begin{aligned} \text{Volumen del tanque, } V_t &= 0.4123 * 1.25 \\ &= 0.515 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro del tanque, } D &= (2V_t/\pi)^{1/3} \\ &= (2 * 0.515 / 3.1416)^{1/3} \\ &= 0.6897 \text{ m} \end{aligned}$$

Peroxido de hidrógeno.-

Volumen de peroxido de hidrógeno al 8 % necesario para limpiar un cartucho, 0.416 m^3

$$\begin{aligned} \text{Volumen del tanque, } V_t &= 0.416 * 1.25 \\ &= 0.52 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Diámetro del tanque, } D &= (2V_t/\pi)^{1/3} \\ &= (2 * 0.52 / 3.1416)^{1/3} \\ &= 0.691 \text{ m} \end{aligned}$$

Tanque de almacenamiento de agua ultrapura.-

Capacidad = 6 m³

Si tomemos en cuenta que la base del tanque cilíndrico será igual a su altura, el diámetro del recipiente será:

$$V = (\pi D^2 H) / 4 = (\pi D^3) / 4,$$

$$D = (4 V / \pi)^{1/3}$$

$$= ((4 \times 6 \text{ m}^3) / \pi)^{1/3}$$

$$= 1.889 \text{ m}$$

CUADRO SINOPTICO DEL BALANCE DE MATERIA

(Cantidades consumidas por ciclo de servicio de la unidad de lecho mixto, 1,433 horas)

| | |
|-------------------------------------|-------------------------|
| -Agua a tratar por el sistema | 8,016.84 m ³ |
| -Agua ultrapura producida | 8,114.88 m ³ |
| -Acido sulfúrico concentrado (98 %) | 0.00445 m ³ |
| -Acido sulfúrico diluido (5 %) | 0.1554 m ³ |
| -Agua de dilución para ácido | 0.1510 m ³ |
| -Sosa cáustica concentrada (50 %) | 0.0225 m ³ |
| -Sosa cáustica diluida (4 %) | 0.4123 m ³ |
| -Agua de dilución para sosa | 0.3898 m ³ |
| -Peróxido de hidrógeno Conc. (30 %) | 7.423 m ³ |
| -Peróxido de hidrógeno Dil. (8 %) | 39.74 m ³ |
| -Agua de dilución de peróxido | 32.32 m ³ |
| -Agua de desecho: | |
| Recnezo de ultrafiltración | 801.66 m ³ |
| Retrolavado | 0.3005 m ³ |
| Desplazamiento | 0.281 m ³ |
| Enjuague | 2.776 m ³ |
| Lavado de cartuchos de U. F. | 0.416 m ³ |

Balace de energía.-

Para lograr la máxima eficiencia en la regeneración de los lechos mixtos se recomienda precalentar la cama a una temperatura de 49 °C (120 °F) antes de introducir los regenerantes. Esto se hace con el agua de retrolavado que ademas de calentar el lecho, separa las resina aniónica de la catiónica, debido a su diferencia de densidades.

El agua de retrolavado proviene del intercambiador de calor EA-001 que es del tipo doble tubo.

El medio de calentamiento es vapor , la carga de agua esta constituida por el agua de retrolavado y el agua de dilución de la sosa.

Datos:

Tubo interior (agua)

ánulo (vapor)

$$W_{\text{retrolavado}} = 1.203 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$T_v = 153 \text{ C (307 F)}$$

$$W_{\text{agua dil.}} = 0.478 \text{ "}$$

$$\lambda_v = 503.9 \text{ kcal/kg}$$

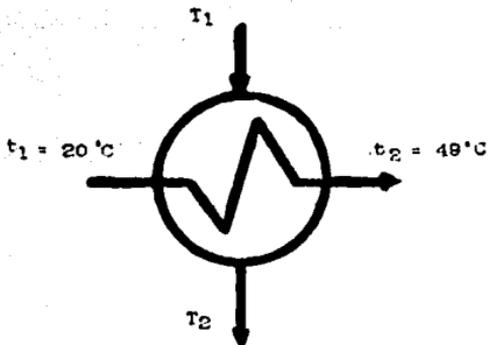
$$W_{\text{total}} = 1.682 \text{ m}^3/\text{hr} (3,704.8 \text{ lb/h}) \quad P_v = 4 \text{ kg/cm}^2$$

$$t_1 = 20 \text{ °C}$$

$$t_2 = 49 \text{ °C}$$

$$= 1 \text{ kg/l}$$

$$C_p = 1 \text{ kcal/kg}$$



Calor requerido:

$$Q = W C_p T$$

$$Q = (1682 \text{ kg/hr})(1 \text{ kcal/kg C})(48 \text{ C} - 20 \text{ C})$$

$$= 48,778.0 \text{ kcal/hr}$$

Considerando una pérdida de calor de 3% (1,463.3 kcal/hr) el calor requerido total es:

$$Q_t = 48,778.0 \text{ kcal/hr} + 1,463.3 \text{ kcal/hr}$$

$$= 50,241.34 \text{ kcal/hr (109,370.4 BTU/hr)}$$

La cantidad de vapor es:

$$Q_t = M_v \cdot v$$

$$M_v = Q_t / v$$

$$= (50,241.34 \text{ kcal/hr}) / (503.8 \text{ kcal/kg})$$

$$= 99.7 \text{ kg/hr de vapor (219.8 lb/hr).}$$

Cálculo de la superficie de calentamiento.-

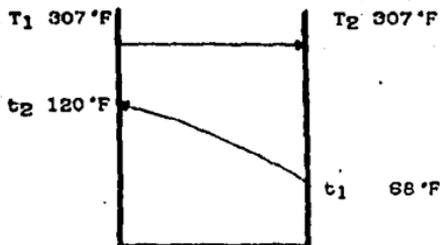
Debido a que la cantidad de calor a intercambiar es relativamente pequeña utilizaremos un intercambiador de calor de tipo doble tubo en flujo a contracorriente, el fluido frío (agua) circulará por el tubo interior y el fluido caliente (vapor) por el anillo (Figura 22). Los diámetros de los tubos exterior e interior serán 2 y 1 1/4 pulgadas respectivamente. (Debido a la disponibilidad de información este cálculo se realizará utilizando las unidades del sistema inglés)

Ecuación de diseño: $Q = U \cdot A \cdot \text{MLDT}$

donde:

- U es el coeficiente total de transferencia de calor
- A es superficie de transferencia de calor
- MLDT es la media logarítmica de las diferencias de temperatura

Perfil de temperaturas:



$$MLDT = ((T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)) / \ln((T_1 - t_2) / (T_2 - t_1))$$

$$MLDT = (187 - 239) / \ln(187 / 239)$$

$$= 211^\circ F$$

Cálculo del coeficiente transferencia de calor

$$U_c = (h_{i,c} + h_o) / (h_{i,c} + h_o) \text{ --- (a)}$$

donde:

- U_c es el coeficiente de transferencia limpio

- $h_{i,c}$, h_o son los coeficientes individuales de transferencia para el fluido interior y exterior respectivamente

Fluido frío, tubo interior (agua)

Tubo de 1 1/4", cédula 40, diámetro interno 1.38" (0.115 pie),
diámetro externo 1.68" (0.138 pie)

$$h_{i,c} = 3h(k/D)(c/k)^{1/3}(\mu/\mu_w)^{0.14}(DI/DE) \text{ --- (b)}$$

$$\text{Área de flujo, } a_p = \pi D^2 / 4$$

$$= (3.1416 * 0.115^2) / 4$$

$$= 0.0104 \text{ pie}^2$$

$$\text{Velocidad de masa, } G_p = W / a_p$$

$$= 3,704.8 \text{ lb/h} / 0.0104 \text{ pie}^2$$

$$= 356,230 \text{ lb/hr pie}^2$$

Calculo del No. de Reynolds, $NR = D \cdot G_{\rho} / \mu$

A temperatura promedio (84 F) la viscosidad es 0.75 cp (1.815 lb/pie hr). $(\mu/\mu_0)^{0.14} = 1.1$

$$\begin{aligned} NR &= 0.115 \cdot 366,230 / 1.815 \\ &= 22,571 \end{aligned}$$

De la figura 23 obtenemos el valor de $JH = 84$.

De la tabla 10 obtenemos el valor de $k = 0.365$

$$\begin{aligned} (c\mu/k)^{1/3} &= (1 \cdot 1.815 / 0.365)^{1/3} \\ &= 1.707 \end{aligned}$$

Aplicando la ecuación (b)

$$\begin{aligned} h_{\rho} &= 84 \cdot (0.365 / 0.115) \cdot 1.707 \cdot 1.1 \cdot (1.38 / 1.66) \\ &= 416.17 \text{ BTU/hr pie}^2 \text{ F} \end{aligned}$$

Fluido caliente, ánulo (vapor).

Tubo exterior de 2" de diámetro, cédula 40, diámetro interior 2.067" (0.1725 pie).

$$\begin{aligned} \text{Ares de flujo, } a_m &= \pi(D^2 - D_2^2) / 4 \\ &= 3.1416(0.1725^2 - 0.1382^2) / 4 \\ &= 0.00828 \text{ pie}^2 \end{aligned}$$

Para el caso por tratarse de vapor de agua el coeficiente de transferencia de calor h_{ρ} es 1500 BTU/hr pie² F.

Aplicando los valores obtenidos para coeficientes individuales de transferencia de calor en la ecuación (a), tenemos:

$$\begin{aligned} U_c &= (418.17 * 1500)/(418.17 + 1500) \\ &= 325.72 \text{ BTU/hr pie}^2 \text{ F} \end{aligned}$$

El factor de incrustación (Rd) para los intercambiadores vapor-agua es de 0.001, por lo que el coeficiente de transferencia de diseño (U_D) será:

$$\begin{aligned} 1/U_D &= (1/U_c) + R_d \\ &= (1/325.72) + 0.001 \\ &= 0.00407 \end{aligned}$$

Entonces $U_D = 245.67 \text{ BTU/hr pie F}$

Para obtener el área de transferencia (A) requerida aplicamos la ecuación:

$$\begin{aligned} A &= Q / (U_D * \text{MLDT}) \\ &= 199,370.4 / (245.67 * 212) \\ &= 3.82 \text{ pie}^2 \end{aligned}$$

La longitud (L) del intercambiador de doble tubo será:

$$\begin{aligned} L &= A / (* D) \\ &= 3.82 \text{ pie}^2 / (3.1416 * 0.138 \text{ pie}) \\ &= 8.81 \text{ pie} \end{aligned}$$

Esta longitud es poco manejable, y para optimizar espacio se utilizará una horquilla de 4.405 pies de longitud (figura 22).

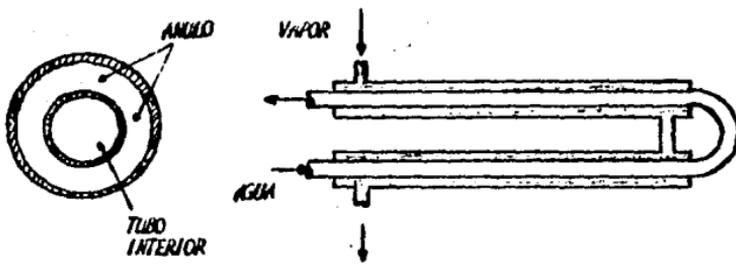


Figura 22. INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO "DOBLE TUBO"

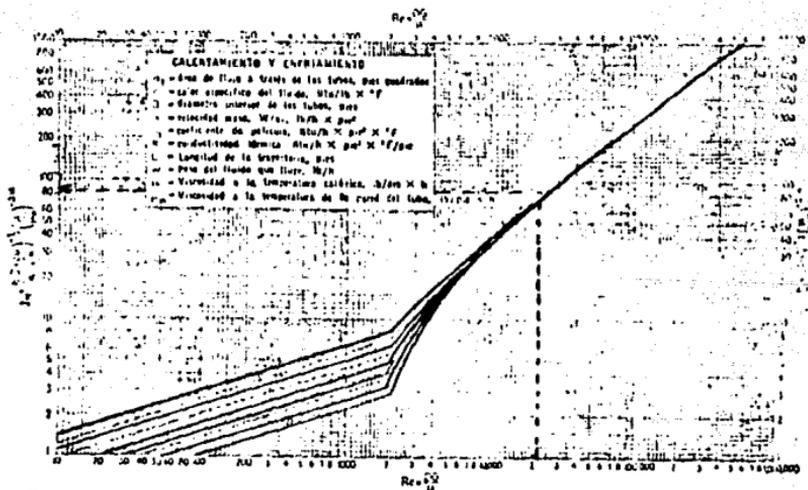


Figura 23. Curva de transferencia de calor lado de tubos. (Adaptada de Sieder y Tate)

IV. - DESCRIPCIÓN DEL PROCESO

Descripción del equipo.-

Para dar una descripción del equipo utilizado en la planta de agua ultrapure esta se dividió en módulos:

- 1.- Módulo de intercambio iónico en lecho mixto.
 - Dos columnas de intercambio, una en servicio, otra en regeneración.
 - Equipo de regeneración, tanques de dilución, intercambiador de calor.
- 2.- Tanque de almacenamiento de agua desmineralizada.
- 3.- Módulo de radiación ultravioleta
- 4.- Módulo de ultrafiltración.
 - Cartuchos de ultrafiltración
 - Sistema de regeneración

Materiales de construcción.-

Las columnas de intercambio, están constituidas por cilindros verticales de acero, con tapas abombadas, con recubrimiento interior de hule o de material plástico como el cloruro de polivinilo (PVC), para evitar el ataque del material por los regenerantes así como prevenir la contaminación del agua. Los

distribuidores y colectores internos serán de acero inoxidable.

Toda las tuberías que conduzcan agua ultrapura deberán ser de PVC o de acero al carbón con recubrimiento interno de hule.

El tanque de almacenamiento será de acero con recubrimiento interno de resina de PVC.

Los cartucho de ultrafiltración estarán construidos de material sintético como PVC o de resina polisulfonada.

Secuencia de operación.-

1.- Módulo de intercambio iónico.

a) Servicio:

La entrada de agua pulida, proveniente de la planta de servicios auxiliares del complejo petroquímico, se realiza a través de las válvulas V-13 y V-1 que la llevan al distribuidor interior de la unidad y en la parte superior (ver figura 24). Esto permite una distribución uniforme del agua sobre la cama de resinas, haciendo que el intercambio sea más eficiente. El efluente resultante deja la unidad a través de la válvula V-2.

b) Regeneración:

-Retrolavado. Con el fin de separar las resinas en dos zonas discretas para la regeneración, la resina aniónica de menor densidad se coloca en la parte superior, la catiónica mas densa deciendo hacia el fondo, la resina neutra quedará entre las dos, en esta operación se consigue tambien eliminar trazas de materiales finamente divididos que pudieran quedar atrapados entre las resinas y ademas precalentar la cama, para lo cual se introduce agua caliente (49 °C) que pasa por el intercambiador de calor EA-001 y entra a la columna por la valvula V-3, en la parte de abajo, y se permite su salida por el distribuidor superior a traves de la válvula V-4 (figura 25).

-Regeneración simultanea. Una vez separadas las resinas se introducen las soluciones de regenerantes, la solución de sosa al 4 % entrará por la válvula V-8; el ácido sulfúrico al 5 % para regenerar la resina catiónica entrará a la columna por la válvula v-5, los regenerantes gastados serán colectados por el colector interfacial y saldrán por la válvula v-7 (figura 26).

-Desplazamiento. En el mismo sentido en que entraron los regenerantes se introduce agua para eliminar el ácido y la sosa no consumida, esto se logra abriendo las válvulas V-13, V-5 y V-8. La salida del agua se realiza a través de de la Válvula V-7 (figura 27).

-Drenado. Se drena el agua abriendo la válvula V-11 e

inyectando aire por la válvula V-12 (figura 28).

-Mezclado. Para lograr un buen mezclado se recomienda que se drene el agua hasta que su nivel sea de 20-30 cm por arriba del nivel de las resinas, entonces se inyecte aire a presión por la válvula V-8 y permitiendo su salida por la válvula V-9 (Figura 29).

-Llenado. Se hace abriendo las válvulas V-13 y V-1 simultáneamente se desplaza el aire por la válvula V-9 (Figura 30).

-Enjuague. Se realiza abriendo las válvulas V-13 y V-1 para la entrada del agua y permitiendo su salida por la válvula V-10. La función de esta operación es eliminar cualquier remanente de regenerante que pudiera existir en la cama de resina (figura 31).

-Preparación de regenerantes. Dado que el sistema es pequeño las soluciones de regenerantes serán preparadas a las concentraciones requeridas directamente en tanques de dilución y de allí bombeadas a la columna. Para la preparación de solución de sosa al 4 % se utilizará sosa al 50 % y agua caliente proveniente del cambiador de calor EA-001. Para la preparación de la solución de ácido sulfúrico al 5 % se cuenta con ácido sulfúrico al 98 % y agua desmineralizada.

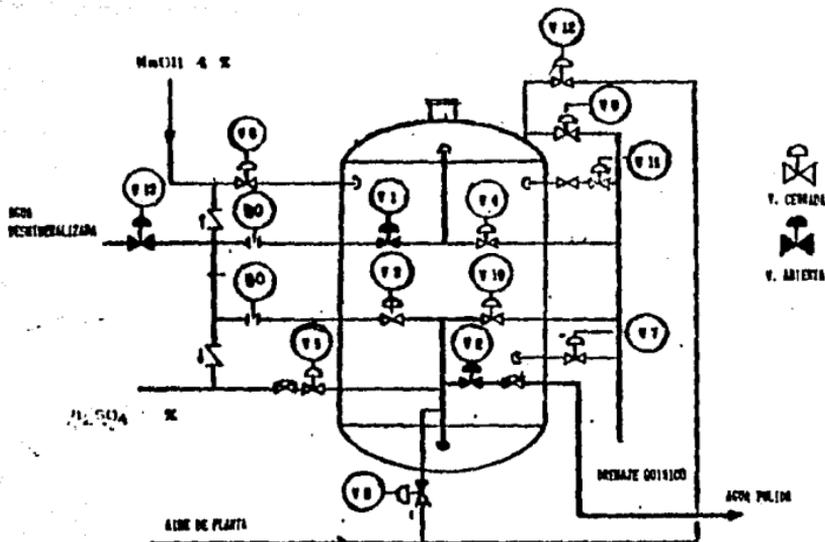


Figura 24. SERVICIO

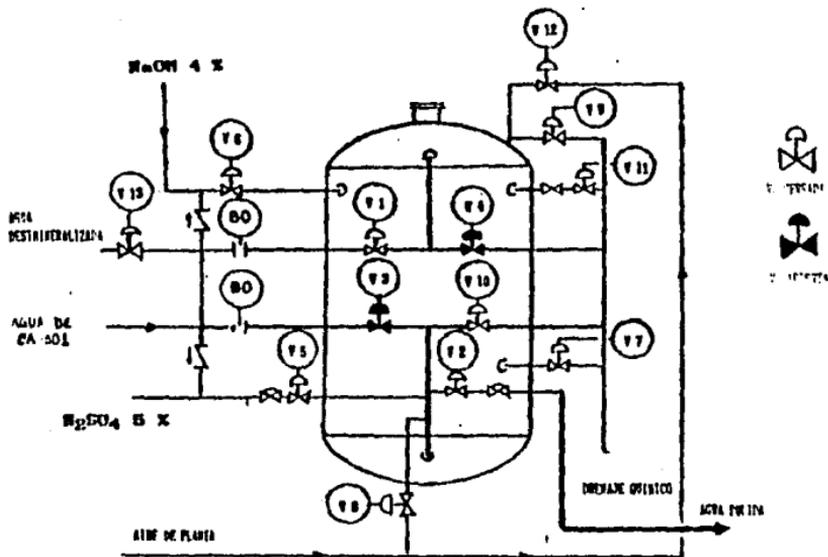


Figura 25 RETROLAVADO

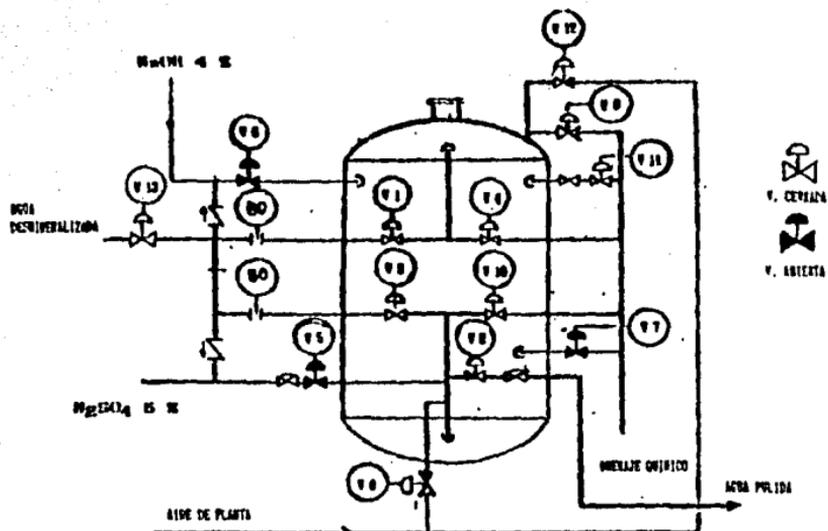


Figura 26. REGENERACION SIMULTANEA

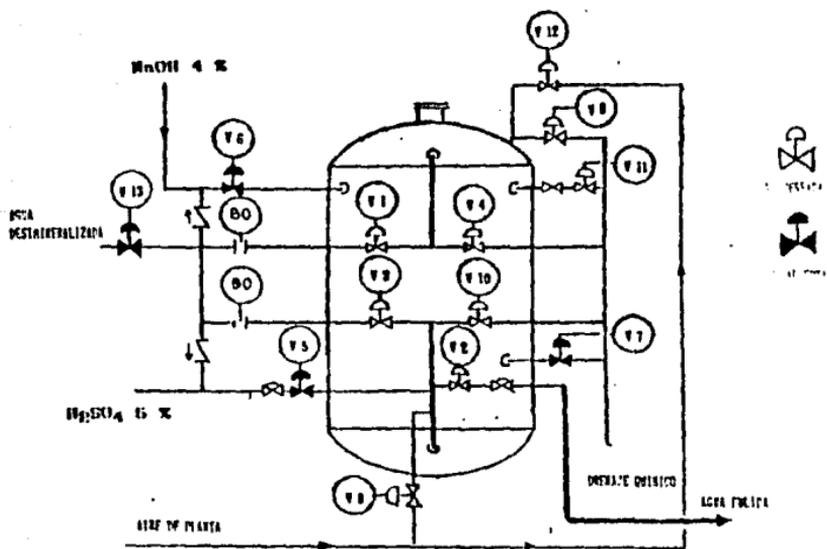


Figura 27. DESPLAZAMIENTO

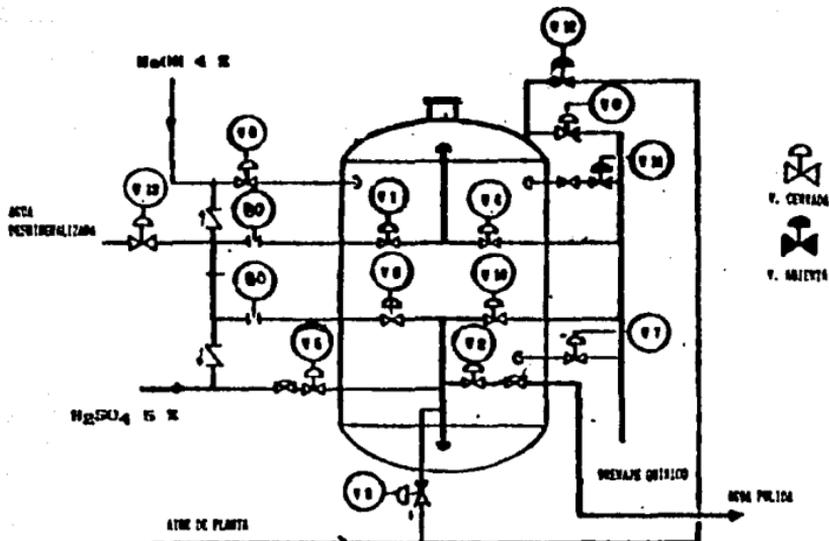


Figura 28. DRENADO

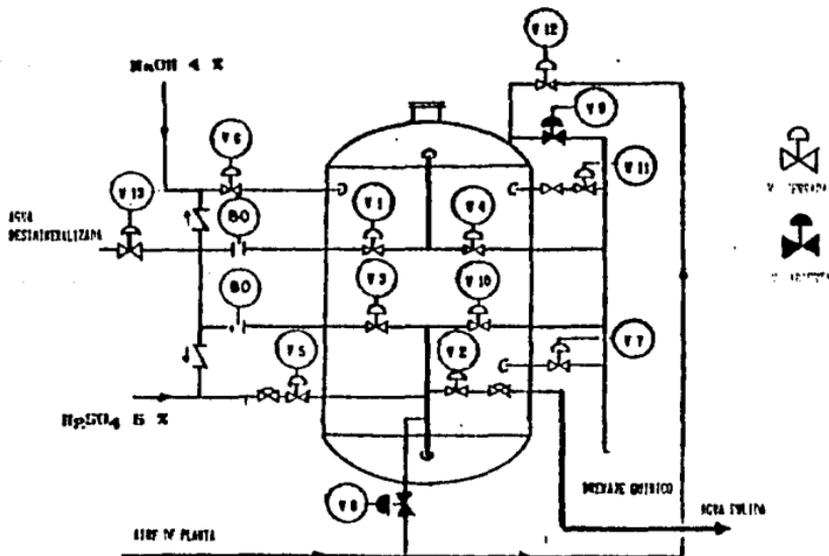


Figura 29. MEZCLADO CON AIRE

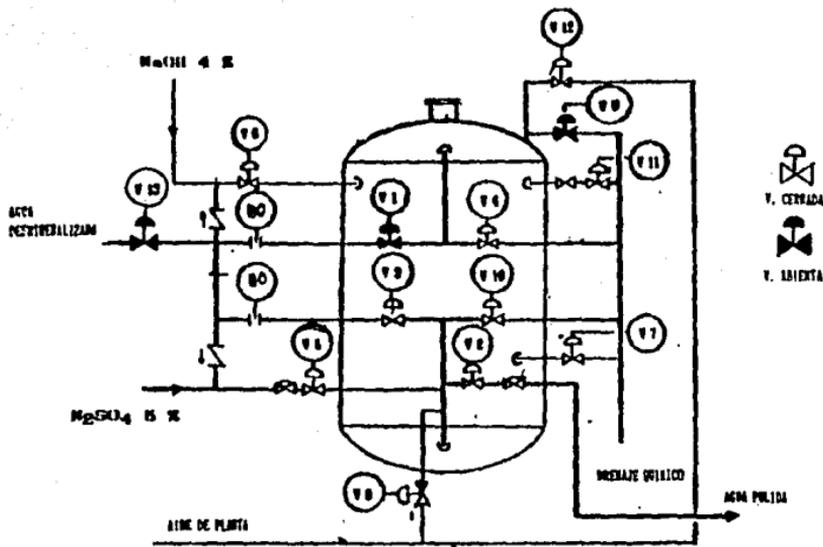


Figura 30. LLENADO

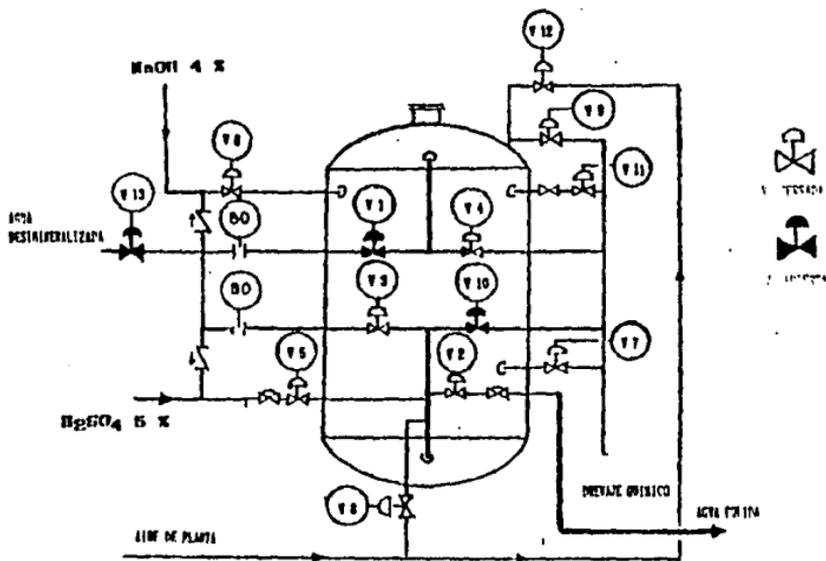


Figura 31. ENJUAGUE

2.- Almacenamiento.

Una vez que el agua ha pasado por la columna de desmineralización, el agua puede pasar a almacenamiento o directamente al módulo de radiación ultravioleta, esto último será lo más común pues el tanque de almacenamiento solo se utilizará cuando se programe la preparación de catalizador en la planta de alcohol isopropílico.

3.- Módulo de Radiación Ultravioleta.

Antes de ser sometida a la ultrafiltración, el agua es pasada por este equipo que destruye los organismos vivos que el agua puede contener (ver figura 20).

4.- Módulo de ultrafiltración.

a) - Servicio normal. El agua que viene de el módulo de radiación ultravioleta, entra al sistema por la válvula que distribuye el agua a los cartuchos de ultrafiltración, el permeato es captado por el recolector y abandona el sistema como agua ultrapura. (Figura 32).

b) - Regeneración. Los cartuchos deben ser limpiados y sometidos a retrolavado con una solución de peróxido de hidrógeno al 8 % cada 3 días. Cuando un cartucho requiera

limpieza se cierran la válvula de entrada de agua y la de salida de agua ultrapura (ver figura 33), introduciendo la solución regenerante y permitiendo que esta salga hacia el drenaje, como se indica en la figura 33.

Figura 32 **SERVICIO NORMAL**

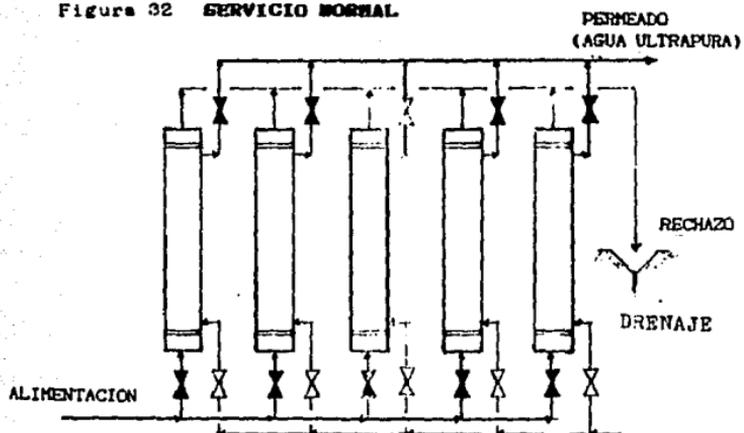
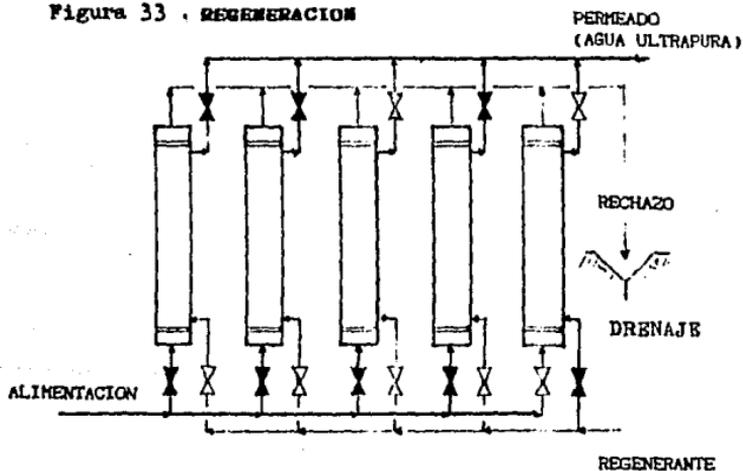


Figura 33 **REGENERACION**



| | |
|-----------------------------------|------|
| TESIS PROFESIONAL | UNAM |
| FACULTAD DE QUIMICA | |
| FIG. 32. 33. MOD. ULTRAFILTRACION | |
| JOSE LUIS STONE A. | 1966 |

| | | | |
|--|------------|--------|-----------|
| PLANTA: Sistema de producción de Agua Ultra pura | HOJA | | DE |
| LOCALIZACION: Morelos, Ver. | EDICION | FECHA | HECHA POR |
| | Preliminar | Oct/87 | JLSA |
| CLAVE: IM-001 A/B | | | |
| NO. DE UNIDADES: 2 | | | |

RECIPIENTES

(HOJA DE DATOS DE PROCESO)

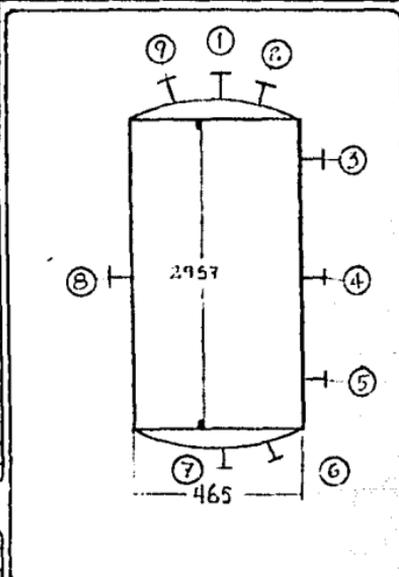
| | |
|---|--|
| SERVICIO: Intercambiador iónico (lecho mixto) | POSICION: vertical |
| TIPO DE FLUIDO: Agua pulida | FLUJO 6.28 m ³ /hr DENSIDAD 1.0 g/cm ³ |
| TEMPERATURA: OPERACION 38°C | MAXIMA DISEÑO 48°C |
| PRESION: OPERACION 4.08 kg/cm ² | MAXIMA DISEÑO 5.28 kg/cm ² |
| DIMENSIONES: LONGITUD 2.857 m | DIAMETRO 0.465 m CAP. TOTAL 0.503 m ³ |
| NIVEL: MAXIMO: | NORMAL: |
| MINIMO: | |
| ALARMA ALTO NIVEL: | ALARMA BAJO NIVEL: |
| MATERIALES: CASCARON A.C. CABEZAS A.C. | |
| MALLA SEPARADORA: ESPESOR | |
| TIPO CIRCULAR: DIAMETRO | |
| TIPO RECTANGULAR: LONGITUD | |
| CORROSION PERM.: | |
| AISLAMIENTO: no | |
| RECUBRIMIENTO INTERNO: Hule | |

BOQUILLAS

| No. | REQ. | D. N. | SERVICIO |
|-----|------|-------|--------------------|
| 1 | 1 | | Entrada de agua |
| 2 | 1 | | venteo |
| 3 | 1 | | Entrada Sosa |
| 4 | 1 | | Salida al drenaje |
| 5 | 1 | | Entrada Reg. ácido |
| 6 | 1 | | Salida al drenaje |
| 7 | 1 | | Salida agua U. P. |
| 8 | 1 | | Mirilla |
| 9 | 1 | | Registro |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

NOTAS

El material de construcción de los internos del intercambiador (soportes, distribuidoras, colectores) será acero inoxidable



ESCALA

no

COTAS

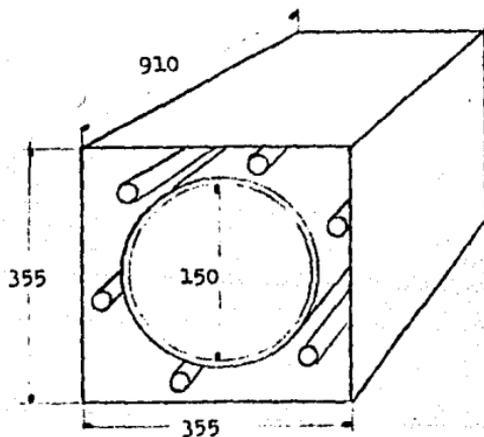
mm

| | | | |
|--|------------|--------|-----------|
| PLANTA: Sistema de producción de Agua Ultra pura | HOJA DE | | |
| LOCALIZACION: Morelia, Ver. | EDICION | FECHA | HECHA POR |
| | Preliminar | Oct/87 | JLSA |
| CLAVE: UVV-001 | | | |
| NO. DE UNIDADES: 1 | | | |

MÓDULO DE RADIACION ULTRAVIOLETA

(HOJA DE DATOS DE PROCESO)

| | | |
|---|------------------------------|------------------------------|
| SERVICIO: Radiación ultravioleta | | |
| TIPO DE FLUIDO: agua ultra pura | FLUJO 6.25 m ³ /h | DENSIDAD 1 g/cm ³ |
| TEMPERATURA: OPERACION 39 C | MAXIMA | DISEÑO |
| PRESION: OPERACION 3.73 kg/cm ² | MAXIMA | DISEÑO |
| DIMENSIONES: LONGITUD 0.91 m | DIAMETRO 0.15 m CAE. | TOTAL 0.016 m |
| MATERIALES: Tubo teflón, Protección reflectora de aluminio pulido | | |



NOTAS

El proveedor deberá proporcionar todas las conexiones, válvulas, en materiales compatibles con el sistema.

Acat. no.

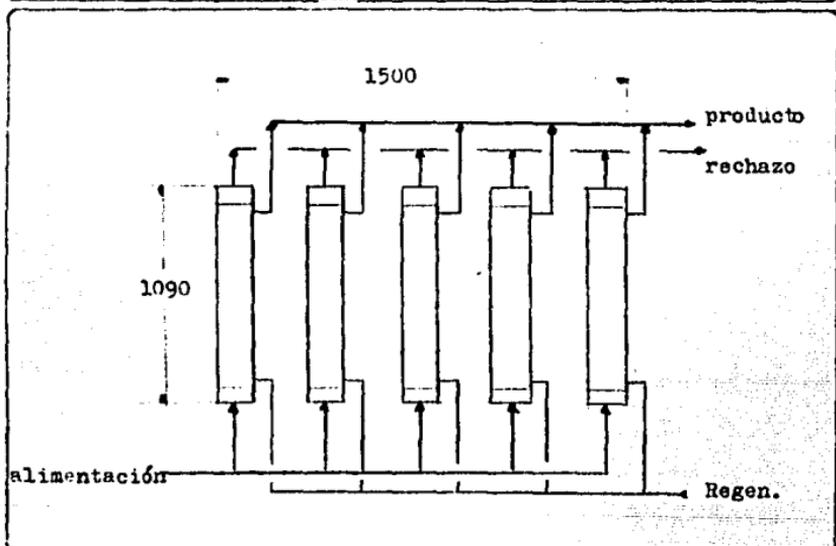
Zacala no.

| | | | | |
|--|------------|--------|-----------|---------|
| PLANTA: Sistema de producción de Agua Ultra pura | | | HOJA | DE |
| LOCALIZACION: Morelos. Ver. | EDICION | FECHA | HECHA POR | AP. POR |
| | Preliminar | Oct/87 | JLSA | |
| CLAVE: UFL-001 | | | | |
| NO. DE UNIDADES: 1 | | | | |

MODULO DE ULTRAFILTRACION

(HOJA DE DATOS DE PROCESO)

| | |
|--|---|
| SERVICIO: Ultrafiltración | |
| TIPO DE FLUIDO: agua ultra pura | FLUJO 8.25 m ³ /h DENSIDAD 1 g/cm ³ |
| TEMPERATURA: OPERACION 38 °C | MAXIMA DISEÑO |
| PRESION: OPERACION 3.73 kg/cm ² | MAXIMA DISEÑO |
| DIMENSIONES: LONGITUD 1.09 m | DIAMETRO DEL CARTUCHO 0.078 m |
| MATERIALES: Coraza polisulfona | |



NOTAS

El proveedor deberá proporcionar todas las conexiones, válvulas, medidores, en materiales compatibles con el sistema (teflon, acero inoxidable, etc.)

| | | | | |
|--|------------|--------|-----------|---------|
| PLANTA: Bstansa de produccion de Agua Ultra pura | HOJA | | DE | |
| LOCALIZACION: Morelos, Ver. | EDICION | FECHA | HECHA POR | AP. POR |
| | Preliminar | Oct/87 | JLSA | |
| CLAVE: TV-003 | | | | |
| NO. DE UNIDADES: 1 | | | | |

RECIPIENTES
(HOJA DE DATOS DE PROCESO)

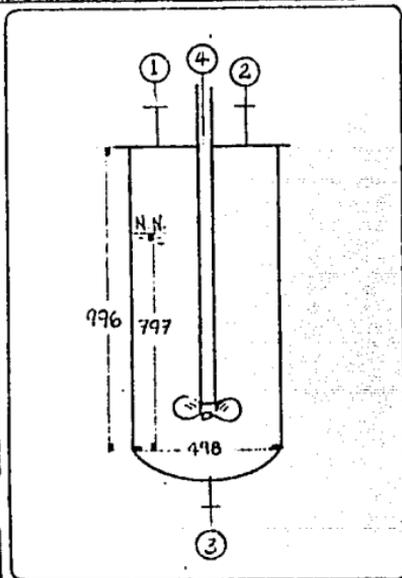
| | | |
|--|--------------------|---------------------------------|
| SERVICIO: Tanque Prep. Sol. H_2SO_4 (5%) | POSICION: vertical | |
| TIPO DE FLUIDO: Solucion ácida | FLUJO | DENSIDAD 0.98 g/cm ³ |
| TEMPERATURA: OPERACION 38 °C | MAXIMA | DISENO 40 °C |
| PRESION: OPERACION atmosférica | MAXIMA | DISENO |
| DIMENSIONES: LONGITUD 0.696 m | DIAMETRO 0.488 m | CAP. TOTAL 0.194 m ³ |
| NIVEL: MAXIMO: | NORMAL: 0.787 m | MINIMO: |
| ALARMA ALTO NIVEL: | ALARMA BAJO NIVEL: | |
| MATERIALES: CASCARON A.I., CABEZAS A.I. | | |
| MALLA SEPARADORA: ESPESOR | | |
| TIPO CIRCULAR: DIAMETRO | | |
| TIPO RECTANGULAR: LONGITUD | | |
| CORROSION PERM.: | | |
| AISLAMIENTO: no | | |
| RECUBRIMIENTO INTERNO: | | |

BOQUILLAS

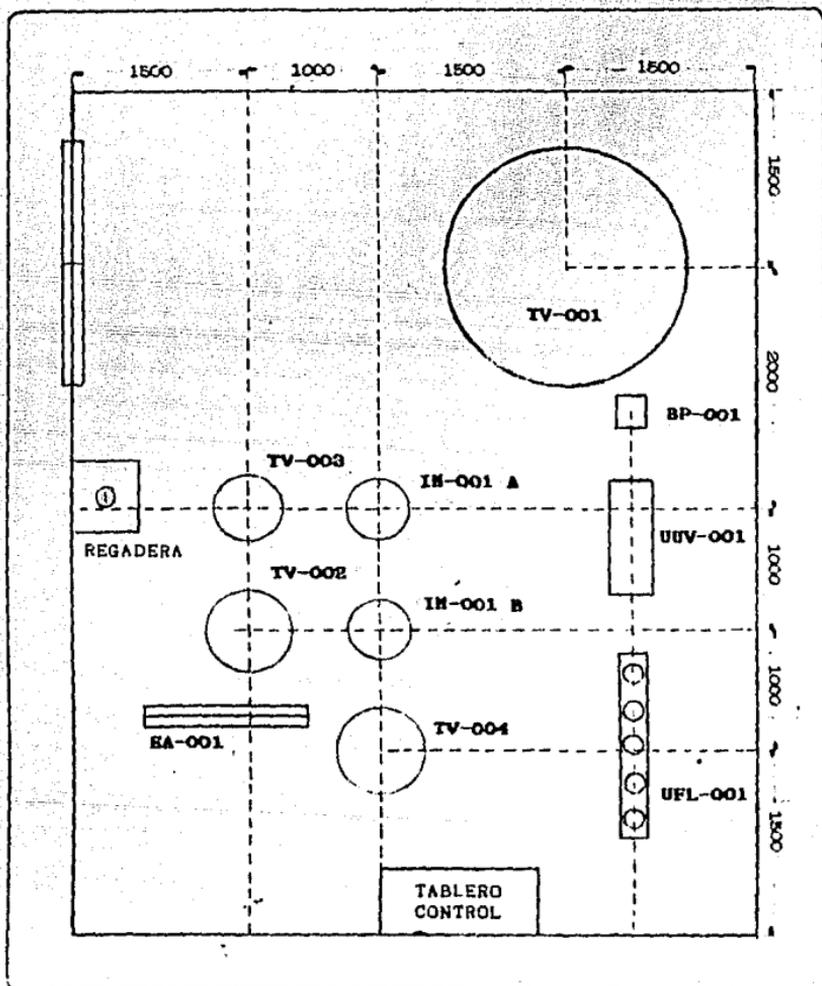
| No. | REG. | D. N. | SERVICIO |
|-----|------|-------|--------------------|
| 1 | 1 | | Entrada de agua |
| 2 | 1 | | Entrada ácido Con. |
| 3 | 1 | | Salida ácido Dil. |
| 4 | 1 | | Agitador |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |
| | | | |

NOTAS

El material de construcción podrá ser acero inoxidable o plástico.



| | | |
|--------|----|--|
| ESCALA | no | |
| COTAS | mm | |
| | | |
| | | |



| | | |
|-------------|-------------------------------|------|
| ESCALA 1:40 | TRIS PROFESIONAL | UNAM |
| ACOTA. mm | FACULTAD DE QUIMICA | |
| | PLANO DE LOCALIZACION GENERAL | |
| | JOSE LUIS STONE A. | 1988 |

V. - CONCLUSIONES

De lo planteado en los capítulos anteriores se concluye que el presente trabajo puede ser de gran utilidad para las personas interesadas en el diseño de sistemas de tratamiento de agua, para servicio de las industrias electrónica y farmacéutica principalmente. Así mismo como material de consulta y apoyo en la Facultad de Química para comprender mejor las técnicas de cálculo relacionadas con los sistemas de intercambio iónico y ultrafiltración.

Dado el notable incremento de la demanda de agua ultrapura en los últimos 15 años, (tendencia que continúa), el presente trabajo es oportuno, indicando los principales parámetros de diseño para la producción de este tipo de agua, no solo para el caso particular de la producción de alcohol isopropílico, en donde la duración y eficacia del catalizador involucrado en el proceso depende de la calidad del agua, sino para cualquier industria que requiera agua de alta pureza.

Por último, es necesario señalar la importancia de dos aspectos fundamentales para el diseño de sistemas de tratamiento de aguas: la calidad del agua que se espera tener, tanto a la entrada como a la salida del sistema, y una vez hecha la selección del método de producción a utilizar, una cuidadosa elección de los materiales de construcción, principalmente para sistemas de producción de agua de alta pureza.

VI.- BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Applebaum, S. B., "Demineralization by Ion Exchange", Academic Press, 1968
- 2.- Kern Q., Donald, "Procesos de Transferencia de Calor", Cia. Editorial Continental, S. A. de C. V., 1962
- 3.- Reyes Zavala, R., "Criterios de Diseño de Sistemas de Pretratamiento y Tratamiento de Agua en Plantas Industriales", Oct. 1981
- 4.- Lest, J., "Ultra-Pure Water, A New Utility", Solid State Tech., enero, 1974
- 5.- Rohm and Haas Co., "Engineering Manual for the Amberlite Ion Exchange Resins", Philadelphia, Pa., 1973.
- 6.- Sinigolli, P., O'Rourke, J., "High Purity Water Design Requirements", Ultrapure Water, Sep./Oct., 1984.
- 7.- Owens, D., "The Importance of Water Analysis to Ion Exchange", Ultrapure Water, Sep./Oct., 1984.
- 8.- Rohm and Haas Co., "Deionization With Amberlite Ion Exchange Resins in Monobed Ion Exchange Resin Systems", Philadelphia, Pa., 1974

9.- C. F. Frith Jr., "State-of-the-Art for Electronic Grade Ultrapure Water, Manufacturing and Distribution, Part-I", The Journal of Environmental Sciences, Jul./Ags., 1984

10.- C. F. Frith Jr., "State-of-the-Art for Electronic Grade Ultrapure Water, Manufacturing and Distribution, Part-II", The Journal of Environmental Sciences, Sep./Oct., 1984.

11.- Romicon Co., Ultrafiltration Handbook, Woburn, Ma., 1983.

12.- H. C. Rechen, "Piping System Design and Materials for Optimal Performance in Ultrapure Water Transmission", UltrapureWater, Ene./Feb., 1985

13.- J. S. Nordin, "Design and Maintenance of Ultrapure Water Systems for the Electronic Industry.", Plymouth, Pn., 1982.