

4. DISEÑO DE EQUIPO

4.1 Descripción del proceso.

El proceso propuesto para diseño de la planta piloto para el reciclaje de los componentes de las baterías de níquel cadmio consiste en las siguientes etapas.

1. Preparación de Materia Prima.
 - Selección y separación de baterías
 - Trituración de baterías
 - Uso de imanes para separar los componentes férricos
 - Separación de partes plásticas
2. Reacción.
 - Extracción ácida sólido-líquido de los metales presentes en las baterías.
3. Purificación.
 - Intercambio iónico selectivo, para separar al cadmio, y obtener el níquel
 - Concentración de las sales por medio de evaporación.

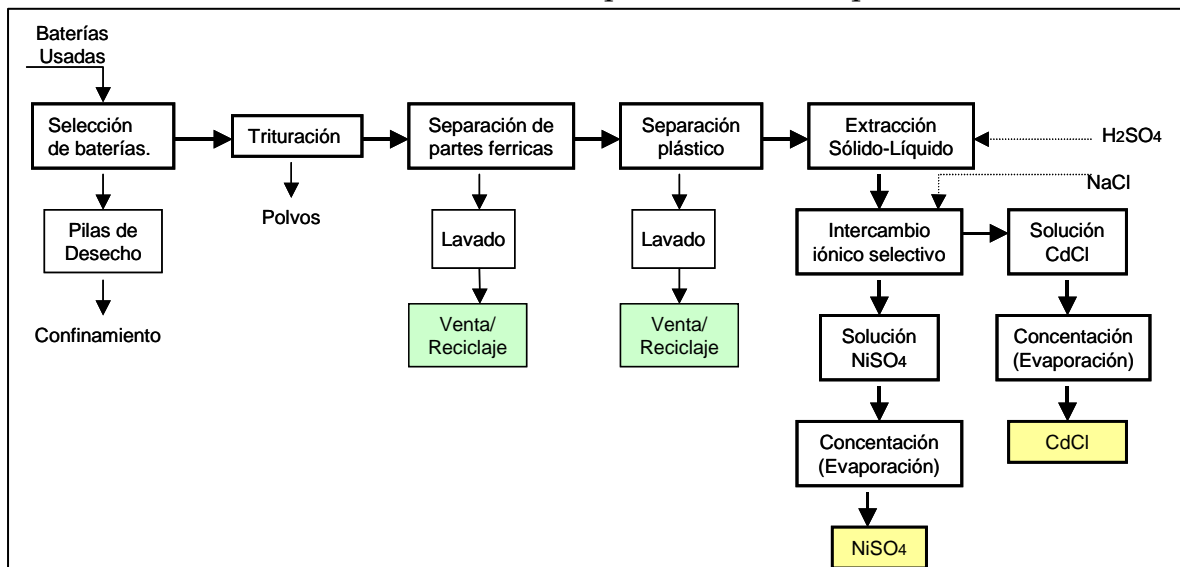


Figura 4.1 Planta piloto para el reciclaje de los componentes de las baterías níquel-cadmio.

4.1.1 Preparación de materia prima

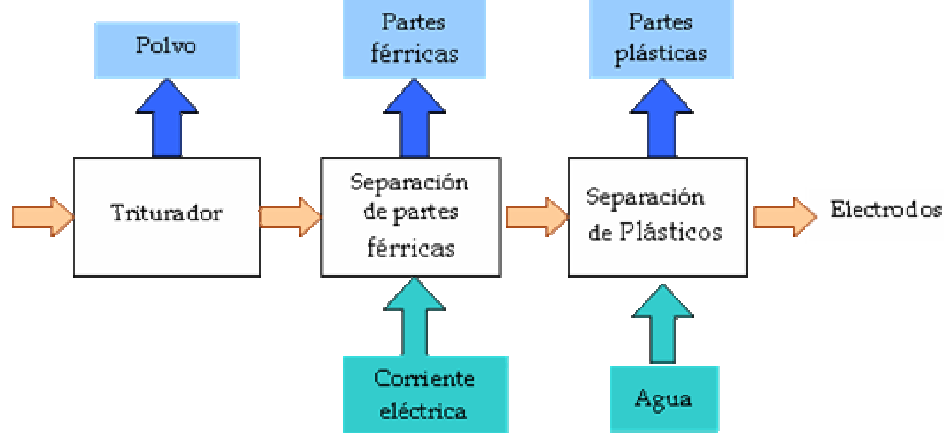


Figura 4.2 Esquema de entradas y salidas de la etapa de Preparación de Materia Prima

Selección de baterías.

Las baterías que se tratarán en la planta, serán únicamente las de níquel - cadmio, ya que la presencia de cualquier otro tipo de batería representa una contaminación de la materia prima, se deben seleccionar las que puedan ser tratadas.

Como procedimiento para asegurar lo anterior se debe verificar rutinariamente que las baterías que entran al proceso sean únicamente las de Ni-Cd, lo cual se logra con una revisión de las etiquetas de las baterías en las que forzosamente de acuerdo a lo establecido por la ley, deben estar mencionados sus componentes. Las baterías diferentes a las de Ni-Cd deben almacenarse separando las que se pueden enviar a reciclaje o podrían reciclarse en el futuro (NiMH, Li-ion) las que no sea posible enviar a reciclaje deben almacenarse para después ser enviadas a confinamiento.

Trituración de baterías.

En esta etapa las baterías pasan a una trituradora de cuchillas, se obtendrá el material cortado pero no demasiado fino, el objetivo de la trituradora es evitar el trabajo manual para abrir las baterías, no es para molerlas o convertirlas en

polvo, lo más conveniente es que las partes metálicas queden de aproximadamente 2 cm² de superficie, este proceso se realiza por lotes.

Separación de metales férricos.

En esta parte del proceso se separan las partes ferromagnéticas con la ayuda de imanes. El imán que se considera más apropiado, es suspendido a contra flujo (cross belt). Este tipo de imanes está especialmente diseñado para operaciones de reciclaje, ya que remueve todos los materiales férricos de la mezcla con otros reciclables.



Fig. 4.3 Imán suspendido

Las partes metálicas aquí separadas se podrán enviar a reciclaje. Para probar que las partes que se separan, no representan ningún peligro se sugiere realizar el lavado de las mismas, lo que garantizaría que no presenten metales pesados y por tanto no sean un residuo peligroso imposible de reciclar, el agua usada en este paso se puede usar nuevamente en el proceso.

Separación de Plásticos.

En esta parte se separarán los plásticos que conforman a las baterías por medio de flotación. Al ponerse en contacto el material triturado sin la materia férrica, con agua, los componentes de densidades más bajas es decir los plásticos, subirán a la superficie en dónde serán recogidos, para dejar los electrodos en solución. Los plásticos que se obtienen en esta etapa pueden ser enviados a reciclaje, para lo cual se recomienda el lavado de los mismos antes de enviarse a

fin de eliminar la contaminación a la que estuvieron expuestos al estar en contacto con materiales peligrosos (metales pesados).

4.1.2 Reacción

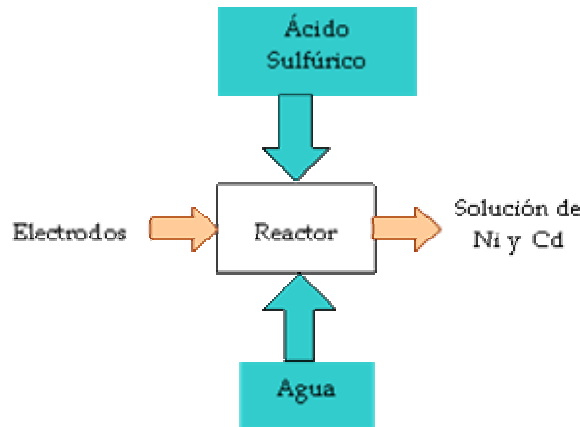
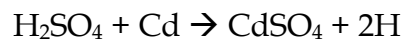
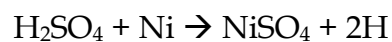


Figura 4.4 Esquema de entradas y salidas de la etapa de Reacción

Lixiviación Ácida.

Después de las etapas anteriores se tienen los electrodos de níquel y cadmio que serán enviados a tratamiento químico, éste se realiza en un reactor agregando ácido sulfúrico, la concentración del ácido en el reactor debe ser 4M, el reactor opera a temperatura ambiente, la temperatura de reacción alcanza los 100°C, el proceso se realiza por lotes. El tiempo de residencia es de 30 minutos. El agua se usa en esta etapa para diluir el ácido que se debe almacenar concentrado, los electrodos se encuentran en solución gracias al agua agregada para separar las partes plásticas en la etapa precedente. Si es necesario se agrega más agua en esta etapa para lograr la concentración deseada del ácido. Al final de la reacción de lixiviación se tendrá una solución muy concentrada de sales de níquel y cadmio, cationes que posteriormente serán separados. Las reacciones que ocurren en esta fase son las siguientes:



Para lograr una concentración homogénea en el reactor, favorecer la reacción y contrarrestar la cristalización, el proceso de lixiviación se lleva a cabo en agitación continua.

4.1.3 Purificación

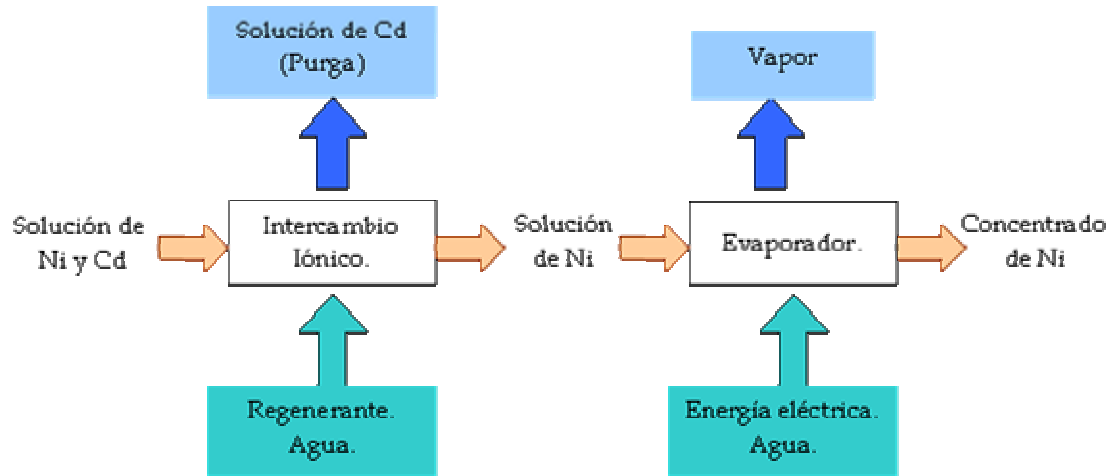


Figura 4.5 Esquema de entradas y salidas de la etapa de Purificación.

Intercambio Iónico Selectivo.

En esta etapa el factor determinante del desempeño adecuado del proceso es la resina empleada. Las resinas son selectivas es decir tienen preferencia a captar algún ión específico. Se pueden usar resinas selectivas para los iones de Cd^+ o para los iones de Ni^+ , existe mayor variedad de resinas selectivas de este tipo, (llamadas quelantes) que atrapan preferentemente iones de níquel.

El diseño del equipo esta hecho para resinas selectivas de iones de Cd^+ , sin embargo este diseño es fácilmente modificable, seleccionando otro tipo de resina o ingresando los valores correspondientes a otro tipo de resina en la hoja de cálculo del diseño (CADIPREBAT).

Conviene usar una resina que atrape los iones de Cd^+ en vez de los de Ni^+ , ya que el metal de interés es el Ni, y de esta manera se estaría obteniendo directamente una solución de Ni^+ eliminando la contaminación por Cd, de otro modo el Ni se obtendría al regenerar la resina, el cual es un método indirecto.



El proceso se lleva a cabo a través del paso del efluente del reactor por una columna empacada con la resina, a la salida se obtiene una solución del metal que no captó la resina, pudiendo ser níquel o cadmio dependiendo de la resina usada. La solución a la salida contiene sólo un metal con trazas del otro.

La resina se tiene que regenerar, para ser reutilizada, el agente de regeneración depende del tipo de resina, pudiendo ser cloruro de sodio, ácido sulfúrico etc. En el proceso de regeneración se obtendrá el metal atrapado en la resina.

Evaporación.

A la salida de la columna empacada se tendrá una solución de sulfato de níquel que se evaporará a través de operaciones de transferencia de masa, en un evaporador atmosférico en el que mediante de inyección de aire y calentamiento de la solución (sin exceder 80°C), se obtendrá la solución seca o concentrada.

El tiempo en el que se ejecutara este proceso de acuerdo al diseño realizado depende totalmente de la capacidad del evaporador, es decir de la tasa de evaporación que proporcione dicho equipo, se optó por este método de operación porque este equipo puede quedarse funcionando fuera del tiempo de operación diaria de la planta, durante un turno de operación se realiza la selección extracción y separación de los metales, y la concentración de la solución y obtención de producto puede dejarse en operación, lo cual da mayor libertad de selección de equipo ya que no se restringe a una capacidad específica muy demandante que elevaría los costos .

4.2 Diseño de Equipo

4.2.1 Bases de Diseño.

Para realizar el diseño se toma en cuenta que cantidad de baterías se procesará por día, por lo tanto se tomó como base el procesado de **100 Kg** de baterías por día.

Se considera que el tiempo de operación será de ocho horas por día.

Todas las etapas del proceso se realizarán por lotes. En base al tiempo de operación se realizó una estimación del tiempo que se emplearía en cada etapa para lograr completar el proceso en un día de operación. Así se asignó un tiempo determinado para cada etapa como se muestra a continuación.

Tabla 4.1 Tiempo asignado a cada etapa del proceso para el diseño de equipo.

Etapa	Tiempo (hr)
Separación de baterías	1
Triturador	1.5
Separador de férricos	1
Separador de plásticos	1
Reacción de lixiviación	1.5
Intercambio Iónico	1
Evaporación ¹	22.74

4.2.2 Triturador

Los trituradores son equipos que se utilizan para alterar tamaño y forma de una materia. El objetivo de la reducción de tamaño es obtener un producto que sea razonablemente uniforme y cuya reducción de tamaño sea considerable con respecto al tamaño original (Perry, 1999)

¹ El tiempo para la etapa de evaporación depende de la tasa de evaporación reportada por el fabricante.

Para el diseño se consideró la capacidad requerida de acuerdo al tiempo designado, y las especificaciones proveedores.

4.2.3 Separación magnética

La separación magnética es frecuentemente usada en procesos de reciclaje en los que se quieren recuperar materiales que poseen propiedades magnéticas.

El separador magnético crossbelt, es un tipo de magneto suspendido que tiene la ventaja de no requerir limpiarse, y por lo tanto detener el proceso para realizar ese procedimiento. Este magneto se instala sobre la banda transportadora de la mezcla y atrae material con propiedades magnéticas separándolo en un ángulo recto al de la banda, como se muestra en la figura 4.6.

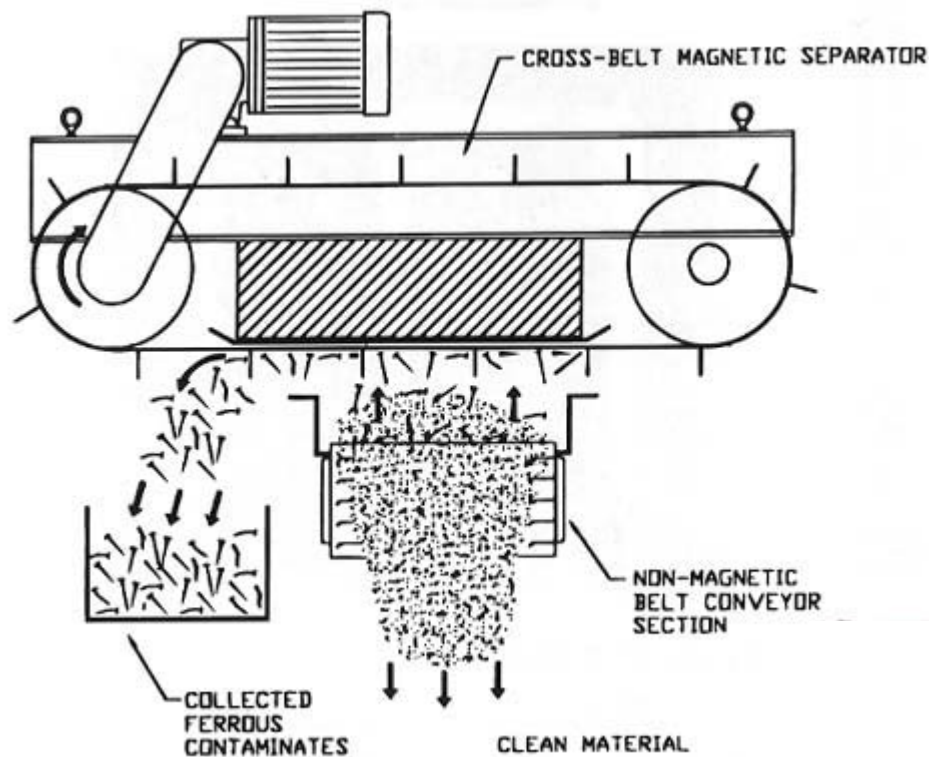


Figura 4.6 Separador magnético suspendido cross belt. (Fuente: Veco plan World Wide World Class <http://www.vecoplanllc.com/Conveyors/RMH/rmhmagmetdiagflash.html>)

El diseño y selección de equipo se hace de acuerdo a la aplicación, es importante conocer la capacidad los parámetros necesarios son:



De=Profundidad de la carga (in)

F=Factor de profundidad de la carga (dado por el proveedor)

V=Velocidad de la banda (ft/min)

W=Ancho de la banda (ft)

C= capacidad ft³/min

$$De = F \left(\frac{C}{WV} \right) \quad \text{(Ecuación 4.1)}$$

4.2.4 Diseño de equipo de separación por gravedad (Flotación)

La flotación es una operación de separación sólido -sólido, en la que las propiedades químicas superficiales de los sólidos determinan la factibilidad de la separación (Perry, 1999). El proceso se lleva a cabo mediante la preparación de una suspensión con la mezcla de sólidos que deben tener un tamaño relativamente fino y agua.

La separación se logra mediante la adición de burbujas de gas que generalmente son de aire, a la fase líquida. Las burbujas pegadas a la partícula, y la fuerza boyante de la combinación de partículas y burbujas de gas son lo suficientemente grandes para provocar que la partículas suba a la superficie (Metcalf, 2003). Las partículas hidrofílicas es decir polares quedan en la suspensión y las hidrofóbicas suben a la superficie.

Mediante la adición de agentes se puede favorecer la separación, modificando la estructura superficial de las partículas, ya que dichos agentes se adsorben selectivamente a la superficie de algún componente de la mezcla (Perry, 1999).

📄 Los datos requeridos para el diseño son:

- 📄 Flujo de agua (mgd)
- 📄 Concentración de sólidos suspendidos en la alimentación (mg/l)
- 📄 Concentración promedio



- Variación en concentración.
- Dosis de polímeros, Lb/ton sólidos secos (si se utilizan)
- Parámetros de diseño, del laboratorio o planta piloto
 - Proporción Aire-sólido (A/S)
 - Presión de aire, P (psig)
 - Tiempo de detención en el tanque de flotación, DTFT, (hr)
 - Carga de sólidos, ML, (lb/ft²/día)
 - Carga hidráulica, HL, (gpm/ft²)
 - Tiempo de detención en tanque de presión. DTPT(min)
 - Concentración flotante, Cf, (%)

Para el diseño del equipo de flotación, en primer lugar se seleccionó la tasa Aire-Sólidos (A/S), en base a los parámetros típicos de diseño mostrados en la tabla 4.2, se asume una presión de entre 40 y 60psig. El flujo de recirculación se calcula mediante la ecuación 4.2.

$$R = \frac{\left(\frac{A}{S}\right)(Q)(C_o)}{1.3s_a(.5P - 1)} \quad \text{(Ecuación 4.2)}$$

A/S= tasa aire/sólidos

s_a = solubilidad del aire a condiciones estándar, cc/L

P = presión absoluta, atmósferas

R= flujo reciclado, gd

Q= flujo de alimentación, gd

Co = Concentración de sólidos suspendidos en la alimentación, mg/l



Tabla 4.2 Parámetros típicos de diseño para Flotación. (Fuente: Harris, 1982)

Parámetros de Flotación con Aire			
Parámetro	Unidad	Valores típicos.	
		Clarificación	
P	Presión de aire	psig	40-70
R	Effluent recycle	%	30-120
DTFT	Tiempo de detención	hr	0.25-0.5
A/S	Proporción Aire-sólido	lb Aire/lb solid	0.25-0.6
HL	Carga hidráulica	gpm/ft ²	1 - 4
DTPT	Tiempo de detención (tanque de presión)	min	1 - 3

Se calcula el área superficial requerida tomando en cuenta la carga de sólidos, luego tomando en cuenta la carga hidráulica y se selecciona el mayor valor entre los dos.

$$S_A = \frac{(Q)(C_o)(8.3)}{ML} \quad (\text{Ecuación 4.3})$$

S_A = área superficial, ft²

ML = solids loading rate, lb/ft² / día

R = flujo reciclado, gd

Q = flujo de alimentación, gd

HL = carga hidráulica, gpm/ft²

$$S_A = \frac{(Q + R)(10^6)}{(HL) * 60 * 24} \quad (\text{Ecuación 4.4})$$

Posteriormente se determina el volumen del tanque de flotación ($VOLFT$)

$$VOLFT = (Q + R) * \frac{1}{7.48} * \frac{1}{24} * DTFT \quad (\text{Ecuación 4.5})$$

$DTFT$ = tiempo de detención en el tanque, hr

R = flujo reciclado, gd

Q = flujo de alimentación, gd

4.2.5 Reactor Agitado.

El mezclado con impulsores se usa para mezclar químicos, para mantener material en suspensión y para aireación (Metcalf, 2003). En este caso se logra una concentración homogénea que favorece la reacción, así como contrarresta la cristalización.

Este tipo de mezcladores de impulsores, esta constituido por una flecha accionada por un reductor de velocidad y un motor eléctrico. Se usan dos tipos de impulsores:

- 🌀 Impulsores de flujo radial e
- 🌀 Impulsores de flujo axial.

El tipo de agitador que se propone usar es de flujo axial, agitación lenta para soluciones de viscosidad de baja a moderada.

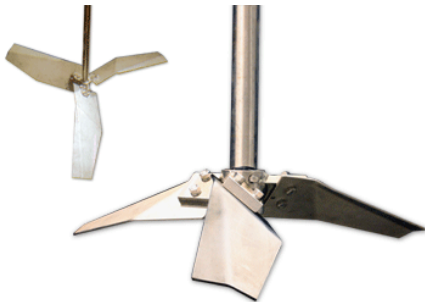


Figura 4.7 Impulsores Low shear hydrofoil (Fuente: Philadelphia mixer catalog)

Las variables requeridas y las ecuaciones utilizadas se muestran a continuación:

P= potencia requerida, W

m= viscosidad dinámica, Ns/m²

V= volumen del tanque, m³

G= gradiente de velocidad, 1/s

Q= Pumping Capacity,

$$Q = N_Q nD^3 \quad (\text{Ecuación 4.6})$$

$$P = N_{pp} nD^3 \quad (\text{Ecuación 4.7})$$



4.2.6 Intercambio Iónico.

El intercambio iónico es el intercambio reversible de iones entre un medio sólido de intercambio iónico y una solución (Harris, 1982). Un sistema de intercambio iónico consiste de una resina de intercambio que puede ser regenerada y enjuagada. Los regenerantes más usados son el ácido sulfúrico y la sosa cáustica. Los intercambiadores iónicos se clasifican de acuerdo a su funcionalidad y a las propiedades físicas de la matriz de soporte (Perry, 1999).

Existe gran variedad de resinas, éstas se pueden clasificar como acídicas fuertes y débiles, las resinas básicas fuertes y débiles además de las resinas especiales o selectivas (NCMS, 1994). Para la separación selectiva de metales pesados se utilizan resinas quelantes, que contienen ácido iminodiacético especial para algunos complejos metálicos (Perry, 1999). Las resinas de este tipo se usan frecuentemente en terminado de metales o pulido, y también son ampliamente usadas en recuperación de cobre y níquel en soluciones (NCMS, 1994). Generalmente las resinas quelantes no se pueden usar en pH menores a 4 por lo que típicamente se requiere ajuste de pH antes del proceso de intercambio iónico.

Las resinas de intercambio iónico cuando se ponen en operación se encuentran generalmente en recipientes denominados columnas. Las columnas básicas consisten en una cama de resina que se retiene en la misma, mediante filtros a la entrada y a la salida de la columna, y distribuidores de flujo de servicio y de regeneración (NCMS, 1994).

El sistema de intercambio iónico se opera por ciclos, consistentes en las siguientes etapas.

- 🍷 Servicio,- La solución líquida conteniendo los iones se pasa a través de la columna de intercambio iónico hasta que los sitios de intercambio se agotan.



- 🍷 Retrolavado- La cama de resina se lava (generalmente con agua) en sentido inverso al flujo en el servicio, a fin de ordenar, expandir y reacomodar la cama de resina
- 🍷 Regeneración- La resina se regenera mediante el paso de una solución concentrada del ion que se encontraba originalmente asociado a la resina, generalmente se trata de un mineral fuerte ácido o básico.
- 🍷 Enjuague- El exceso de regenerante se remueve de la columna, usualmente mediante el paso de agua a través de la cama.

Para el diseño de la columna se toma en cuenta el ciclo que comprende las etapas mencionadas.

1. Datos requeridos para el diseño.

- 🍷 Flujo de líquido (máximo, mínimo y promedio)
- 🍷 Concentración de aniones y cationes
- 🍷 Concentración permisible o deseada en el efluente.

2. Parámetros de Diseño:

- 🍷 Tipo de resina
- 🍷 Capacidad de la resina
- 🍷 Dosis de regenerante y tipo
- 🍷 Flujo de corriente a tratar
- 🍷 Flujo de enjuague
- 🍷 Flujo de regenerante
- 🍷 Tiempo de lavado y frecuencia.
- 🍷 Profundidad de la columna (24-30 in mínimo)
- 🍷 Tiempo de operación por día

Las ecuaciones usadas en el diseño son las siguientes:

$$S_v = \frac{REC}{IRC} \quad \text{(Ecuación 4.8)}$$

$$ST = \frac{SV}{SFR} \quad \text{(Ecuación 4.9)}$$



Sv= service volume, gal/ft³

REC= capacidad, lg/ft³

IRC =ion removal concentration, lb/gal

St= tiempo de servicio

SFR = Service flow rate, gpm/ft³

$$Vol = \left[\frac{IRC(Q)(10^6)}{REC} \right] \times \left[\frac{St}{(60)(24)} \right] \quad \text{(Ecuación 4.10)}$$

Vol= volumen de resina ft³

Q=flujo total, mgd

$$V_R = \frac{RL * Vol * 100}{RC(8.34)(SpG)} \quad \text{(Ecuación 4.11)}$$

V_R= volumen de regenerante, gal

RL = Nivel de regenerante, lb/ft³

RC= Concentración del regenerante %

$$VRW = RW * Vol \quad \text{(Ecuación 4.12)}$$

VRW= volumen de agua de enjuague, gal

RW= agua enjuague, gal/ft³

Vol= volumen de enjuague

$$VBW = BW * Vol \quad \text{(Ecuación 4.13)}$$

VBW = backwater requirements, gal

BW= Backwash water, gal/ft³

$$EC = ST + BT + RT + WT + OMT \quad \text{(Ecuación 4.14)}$$

EC= Exchange cycle time, min



BT= Back wash time, min

RT= Regeneration time, min

WT = Rinse time, min

OMT= Operation and maintenance time, hr

ST= Service time

$$BT = \frac{BW}{BR} \quad \text{(Ecuación 4.15)}$$

$$RT = \frac{V_R}{RRF} * \frac{1}{Vol} \quad \text{(Ecuación 4.16)}$$

$$WT = \frac{RW}{RRW} \quad \text{(Ecuación 4.17)}$$

BR= rate of backwashing, gpm/ft³

RRF=rate of regenerant flow, gpm /ft³

RRW=rate of rinse water flow, gpm/ft³

BW= Backwash water, gal/ft³

RW=rinse water, gal/ft³

RRW=rate of rinse water flow, gpm/ft³

4.2.7 Evaporación.

La evaporación es la operación que consiste en concentrar una solución que consta de un soluto no volátil y una solución no volátil. La evaporación se lleva a cabo mediante la vaporización de una porción del solvente con el fin de producir una solución muy concentrada (McCabe, 2001). Es diferente al proceso de cristalización ya que el principal objetivo es producir una solución concentrada en vez de formar cristales. En este proceso el licor concentrado es el producto valioso y el vapor se condensa y desecha.

Propiedades importantes para evaporar líquidos.



- Concentración. La alimentación al evaporador debe estar lo suficientemente diluida para conservar muchas de las propiedades físicas del agua.
- Espuma. Algunas soluciones forman espumas en el proceso de evaporación.
- Materiales de Construcción.

Evaporador Atmosférico:

Es un dispositivo que evapora agua a la atmósfera. Los evaporadores comerciales consisten en una bomba que mueve la solución, un soplador que mueve aire, una fuente de calor, una cámara de evaporación en la cual la solución y el aire se pueden mezclar y un eliminador de humedad que remueve cualquier líquido entrante en la corriente de aire (NCMS, 1994). La cámara de evaporación se llena usualmente de material de empaque o de paneles finos para aumentar la interfase agua aire. En operación, la temperatura de la solución que se está evaporando se eleva y la solución caliente se introduce al compartimiento de evaporación.

Ventajas:

1. Bajos costos capitales
2. Operación simple y requerimientos bajos de mantenimiento
3. Se pueden lograr tasas de recuperación altas (90%-100%)
4. No se necesitan agentes reactivos extras
5. No se generan lodos de desecho, y cuando se generan las cantidades son muy bajas.

Los aspectos negativos principales de esta tecnología son:

1. Los requerimientos de energía son relativamente altos (se requiere calentar la solución constantemente, y en los meses de invierno se puede perder gran cantidad de calor al ambiente.
2. Debido a que la humedad se desecha a la atmósfera, no se puede reciclar como agua tal y como ocurre en los evaporadores al vacío (NCMS, 1994).



La mayoría de los evaporadores comerciales hoy en día traen integrada su propia fuente de calor. También existen procesos de recuperación de químicos, en los que existe un tanque previo de calentamiento o tanque de transferencia de calor.

