

# FT-TER-006

**FICHAS TÉCNICAS  
DE ETAPAS DE PROCESO DE  
PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES  
DE LA INDUSTRIA TEXTIL**

## **INTERCAMBIO IÓNICO**

***SERIE: TRATAMIENTOS TERCARIOS***

|                      |  |
|----------------------|--|
| TÍTULO               | <b>INTERCAMBIO IÓNICO (FT-TER-006)</b> |
| Fecha de elaboración | Septiembre de 2015                     |
| Revisión vigente     |  |

**INTERCAMBIO IÓNICO (FT-TER-006)**

|                       |                         |                 |                            |
|-----------------------|-------------------------|-----------------|----------------------------|
| <b>Fecha</b>          | Septiembre 2015         |                 |                            |
| <b>Autores</b>        | Concepción Sánchez Ruiz |                 |                            |
| <b>Revisado</b>       |                         |                 |                            |
| <b>Modificaciones</b> | Fecha                   | Modificado por: | Objeto de la modificación: |
|                       |                         |                 |                            |

# ÍNDICE

---

**1.- INTRODUCCIÓN****2.- LOS PROCESOS DE INTERCAMBIO IÓNICO**

- 2.1.- Fundamentos de los procesos de intercambio iónico
- 2.2.- Tipos de resinas de intercambio iónico
- 2.3.- Factores que condicionan la eficiencia del intercambio iónico
- 2.4.- Cinética de los procesos de intercambio iónico

**3.- DISEÑO DE SISTEMAS DE INTERCAMBIO IÓNICO**

- 3.1.- Descripción de una unidad básica de intercambio iónico
- 3.2.- Ciclo de trabajo de un intercambiador iónico
- 3.3.- Tipos de sistemas de intercambio iónico
- 3.4.- Criterios de diseño de un sistema de intercambio iónico

**4.- ESPECIFICACIONES Y REFERENCIAS EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL****5.- PARÁMETROS Y ESTRATEGIAS DE CONTROL**

- 5.1.- Composición del agua de entrada al sistema
- 5.2.- Salinidad
- 5.3.- Materias en suspensión
- 5.4.- Temperatura
- 5.5.- Valor del pH

**6.- PROBLEMAS DE EXPLOTACIÓN****BIBLIOGRAFÍA****REFERENCIAS DE TECNOLOGÍA****ANEXO 1.- ASPECTOS QUE DEBEN CONSIDERARSE EN EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO IÓNICO****ANEXO 2.- ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES NECESARIAS****ANEXO 3.- DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE UNIDADES DE PROCESO**

---

## 1.- INTRODUCCIÓN

El intercambio iónico es la operación unitaria que permite la separación de especies iónicas disueltas mediante su transferencia desde la fase líquida a un material intercambiador sólido, en el que sustituyen a otros iones del mismo signo eléctrico, que a su vez pasan a la fase líquida. En el proceso, de naturaleza reversible, no se producen transformaciones químicas en las especies iónicas que intervienen ni en el material intercambiador, circunstancia que permite su recuperación tras el intercambio iónico. El interés por las aplicaciones del intercambio iónico reside precisamente en la posibilidad de reutilizar una y otra vez el material intercambiador. Para ello, el material debe ser previamente sometido a un proceso de regeneración antes de recuperar las condiciones de partida.

Muchas de las aplicaciones del intercambio iónico tienen por objeto la eliminación de una determinada especie iónica de una solución líquida, dando como resultado su separación específica y su concentración en la fase sólida. Las aplicaciones industriales de los procesos de intercambio iónico son numerosas: recuperación de cationes metálicos en disolución, separación de mezclas de especies iónicas, purificación de líquidos, liberación controlada de una especie química, recuperación de sales, etcétera. En el campo del tratamiento de aguas, los usos más habituales del intercambio iónico son los siguientes:

- Ablandamiento de aguas
- Desmineralización de aguas
- Eliminación de alcalinidad
- Eliminación de cationes de metales pesados disueltos en aguas de proceso
- Eliminación de aniones de ácidos fuertes tales como nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) y sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )
- Eliminación de amonio a bajas temperaturas

La inclusión del intercambio iónico entre las operaciones de tratamiento y depuración de aguas residuales permite la eliminación (y eventual recuperación) de componentes iónicos disueltos en un efluente antes de su vertido final o de su reutilización, asegurando la calidad requerida al agua en ambos casos. Además de aniones inorgánicos y cationes metálicos, también son susceptibles de ser eliminados mediante intercambio iónico las formas ionizadas de numerosas moléculas orgánicas, entre las que se encuentran los colorantes solubles en agua, resistentes a los tratamientos de depuración convencionales y responsables del color que presentan los efluentes de los procesos de tinción en los que se emplean.

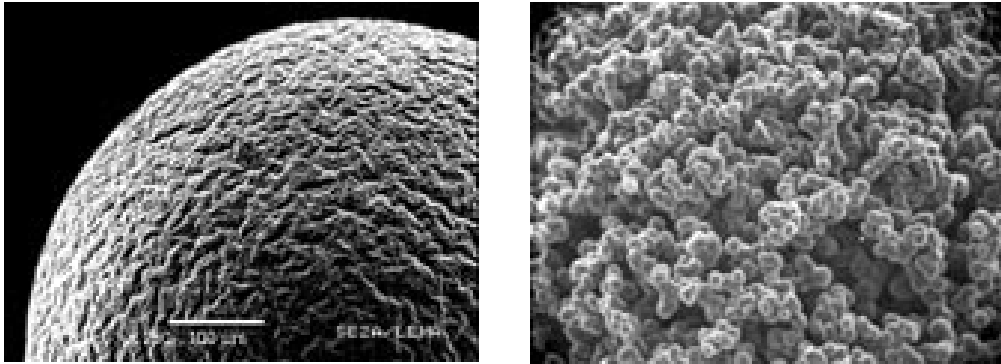
Aunque se conocen diversos materiales de origen natural con capacidad intercambiadora, tales como humus, arcillas y zeolitas, sus limitaciones operacionales hacen que en la práctica industrial del intercambio iónico se recurra habitualmente a resinas intercambiadoras sintéticas, específicamente diseñadas para la recuperación de iones en unas condiciones de trabajo (medio acuoso, temperatura, presión, pH...) determinadas. Las resinas de intercambio iónico se presentan normalmente en forma de partículas esféricas compuestas por un polímero reticulado al que se incorporan grupos funcionales específicos según la aplicación que se persiga. La selección del grupo funcional determinará la naturaleza de las especies iónicas con las que puede establecerse el intercambio entre la resina y la solución acuosa que la rodea.

## 2.- LOS PROCESOS DE INTERCAMBIO IÓNICO

### 2.1.- Fundamentos de los procesos de intercambio iónico

Un sistema de intercambio iónico consta de una fase sólida, insoluble (el material intercambiador de iones), rodeada por una fase líquida en la que se encuentra el soluto de interés que se pretende separar. El proceso de intercambio iónico se establece cuando la fase sólida incorpora dicho soluto a su estructura sin que se produzca una modificación permanente de la misma.

El intercambio iónico se establece siempre entre equivalentes químicos de especies iónicas del mismo signo eléctrico. La fase sólida puede ser una red cristalina o un gel. Si los iones intercambiados son positivos, el material de intercambio se denomina catiónico, y aniónico si las especies iónicas tienen carga negativa. Cationes tales como calcio, magnesio, bario, estroncio y radio pueden ser separados de una disolución acuosa mediante el empleo de una resina catiónica. Análogamente, aniones tales como fluoruro, nitrato, arseniato, seleniato, cromato, ácidos húmicos y fúlvicos pueden ser separados mediante una resina aniónica.



**Figura 1. Fotografías de microscopía de barrido mostrando la superficie de una partícula de resina macroporosa ácido débil (izquierda) y la estructura de una resina macroporosa ácido fuerte (derecha). (Tomado de [http://dardel.info/IX/resin\\_pictures.html](http://dardel.info/IX/resin_pictures.html))**

Los materiales de intercambio iónico más ampliamente aplicados al tratamiento de aguas son las resinas sintéticas. Se trata de materiales duraderos, cuyos grupos estructurales y funcionales se diseñan según las aplicaciones específicas que se pretendan obtener mediante el intercambio iónico. Habitualmente se presentan en forma de esferas que optimicen las propiedades mecánicas e hidráulicas del lecho.

Las resinas de intercambio iónico se fabrican a partir de una estructura reticular de material polimérico, que puede ser poliestireno o bien un polímero acrílico, que sirve como material estructural. A la estructura básica del polímero se incorporan determinados grupos funcionales ionizables; es decir, con características de ácido o de base. En solución acuosa, y en función de su selectividad hacia los iones contenidos en la disolución, los grupos funcionales de las resinas efectúan el proceso de intercambio sustituyendo sus contraiones por los iones de interés que se pretenden eliminar de la solución.

El proceso de intercambio entre la resina y la solución acuosa comprende etapas de difusión, adsorción, atracción electrostática y equilibrio ácido-base. El proceso es totalmente reversible, y bajo las condiciones de acidez o basicidad adecuadas, el equilibrio puede ser desplazado en sentido contrario, dando lugar a la forma química original de la resina (ácida, básica, sal). Esta propiedad permite que las resinas de intercambio iónico puedan ser utilizadas a lo largo de muchos ciclos de carga y regeneración. La economía de los procesos de tratamiento basados en intercambio iónico reside, precisamente, en el número de ciclos de regeneración que puedan conseguirse con una resina específica en unas condiciones de operación determinadas, y constituye un importante factor de diseño.

## 2.2.- Tipos de resinas de intercambio iónico

La mayor parte de los materiales de intercambio iónico que se utilizan actualmente en aplicaciones industriales son compuestos sintéticos denominados tradicionalmente resinas. Las resinas de intercambio se obtienen por copolimerización de estireno y vinilbenceno, o bien a partir de materiales acrílicos.

Atendiendo a su porosidad, las resinas pueden clasificarse en resinas de tipo gel o microporosas, y resinas de tipo macroporoso, de retícula menos empacada. La porosidad de las resinas de tipo gel es del mismo rango que los tamaños iónicos, mientras que las resinas macroporosas exhiben una red de canalizaciones en su matriz estructural, conocidos como macroporos, que favorecen la adsorción y desorción de sustancias de mayor tamaño molecular, como compuestos orgánicos. El mayor grado de reticulación de las resinas de tipo gel les confiere una mayor resistencia a la degradación química y mejores propiedades mecánicas.

Las resinas de intercambio iónico se clasifican también según su estructura química y las propiedades ácidas o básicas que exhiban sus grupos funcionales. Atendiendo a ello, se definen cuatro categorías de resinas:

- **Resinas catiónicas ácido fuerte:** se caracterizan por tener grupos sulfónicos  $-SO_3^-$  como grupos funcionales. Los grupos sulfónicos se comportan como ácidos fuertes, que en disolución acuosa se presentan totalmente hidrolizados. Las resinas de esta categoría son monofuncionales, y sus propiedades químicas y físicas varían en función de la relación de copolimerización entre divinilbenceno y estireno, que oscila entre el 6 y el 16 %. Las resinas ácido fuerte atraen iones cargados positivamente, que intercambian por protones o sodio, dependiendo de su presentación en forma ácida o sal sódica.
- **Resinas catiónicas ácido débil:** Son resinas caracterizadas por la presencia del grupo carboxilo  $-COO^-$  como grupo funcional. Retienen cationes en equilibrio con otros ácidos débiles en la disolución, como bicarbonatos, pero no pueden intercambiar iones que se encuentren en equilibrio con aniones de ácidos fuertes. Su regeneración es más fácil, alcanzándose tasas próximas a la regeneración máxima.
- **Resinas aniónicas base fuerte:** Llevan iones de amonio cuaternario en su estructura como grupos funcionales. Se unen a los aniones disueltos, liberando alcalinidad a la disolución. Se subdividen en dos clases, denominadas respectivamente Tipo 1 y Tipo 2, en función de que incorporen a su estructura grupos alcohol  $-OH$ , lo que les hace diferir en varios aspectos. Las resinas aniónicas base fuerte de Tipo 1 son bases fuertes de menor capacidad de intercambio, con una baja eficiencia de regeneración. Las resinas aniónicas base fuerte de Tipo 2 incorporan los residuos alcohólicos y exhiben una basicidad algo menor, lo que eleva tanto su capacidad de intercambio como la eficiencia de la regeneración con respecto a las de Tipo 1.
- **Resinas aniónicas base débil:** Llevan grupos amino en su estructura. No son capaces de retener aniones de ácidos débiles, como silicatos o bicarbonatos. Son sensibles a la hidrólisis por parte de los iones del agua, lo que las hace más fácilmente regenerables.

En la Tabla 1 aparecen resumidas las principales características y reacciones de equilibrio de intercambio de las cuatro categorías de resinas descritas, así como la naturaleza de las soluciones que dan pie a su regeneración y el tipo de iones que son capaces de intercambiar.

**Tabla 1. Características de las resinas de intercambio iónico empleadas en los procesos de tratamiento de aguas (Crittenden et al., 2005). Los términos entre corchetes representan la parte estructural sólida de la resina.**

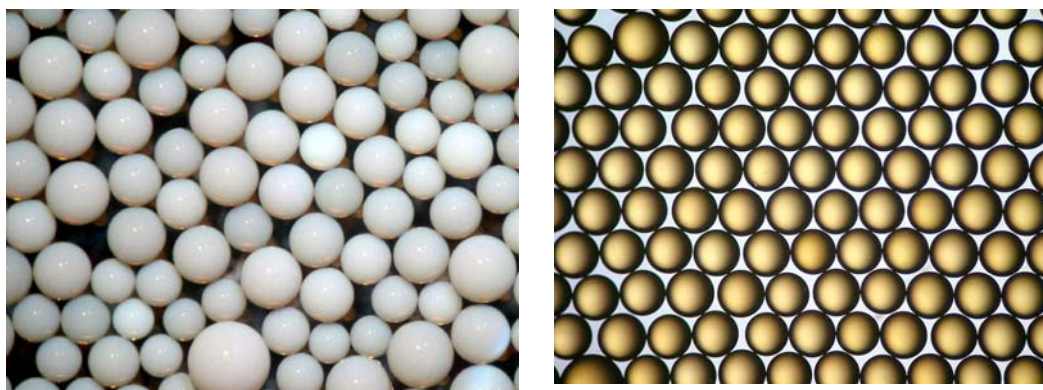
| Tipo de resina                | Reacción fundamental de intercambio iónico   | Iones regenerantes ( $X^+$ ) | pK        | Capacidad de intercambio, meq/l | Iones eliminados   |
|-------------------------------|--|------------------------------|-----------|---------------------------------|--|
| Catiónica ácido fuerte        | $n[RSO_3^-]X^+ + M^{n+} \leftrightarrow [nRSO_3^-]M^{n+} + nX^+$                                   | $H^+$ o $Na^+$               | < 0       | 1,7 – 2,1                       | Forma $H^+$ : cualquier catión<br>Forma $Na^+$ : cationes divalentes             |
| Catiónica ácido débil         | $n[R(COO^-)]X^+ + M^{n+} \leftrightarrow [nR(COO^-)]M^{n+} + nX^+$                                 | $H^+$                        | 4 - 5     | 4 – 4,5                         | Cationes divalentes<br>>> cationes monovalentes                                  |
| Aniónica base fuerte – Tipo 1 | $n[R(CH_3)_3N^+]X^- + A^{n-} \leftrightarrow [nR(CH_3)_3N^+]A^{n-} + nX^-$                         | $OH^-$ o $Cl^-$              | > 13      | 1 – 1,4                         | Forma $OH^-$ : cualquier anión<br>Forma $Cl^-$ : sulfato, nitrato, perclorato... |
| Aniónica base fuerte – Tipo 2 | $n[R(CH_3)_2(CH_3CH_2OH)N^+]X^- + A^{n-} \leftrightarrow [nR(CH_3)_2(CH_3CH_2OH)N^+]A^{n-} + nX^-$ | $OH^-$ o $Cl^-$              | > 13      | 2 – 2,5                         | Forma $OH^-$ : cualquier anión<br>Forma $Cl^-$ : sulfato, nitrato, perclorato... |
| Aniónica base débil           | $[R(CH_3)_2N]HX + HA \leftrightarrow [R(CH_3)_2N]HA + HX$  | $OH^-$                       | 5,7 – 7,3 | 2 - 3                           | Aniones divalentes<br>>> aniones monovalentes                                    |

X: catión no metálico; M: catión metálico; N: nitrógeno; A: anión

## 2.3.- Características de las resinas de intercambio iónico

### 2.3.1.- Presentación y propiedades físicas de las resinas de intercambio iónico

Las resinas de intercambio iónico se comercializan habitualmente como esferas o gránulos de determinados tamaño y distribución granulométrica, adaptados a las diversas necesidades de aplicación específicas. Para la mayor parte de las aplicaciones, las resinas se presentan con una distribución gaussiana de tamaños de partículas comprendidos entre 0,04 y 1,2 mm, o bien como partículas de tamaño uniforme. Al microscopio, las esferas presentan los aspectos típicos de la Figura 2.



**Figura 2. Aspecto microscópico de las esferas de resinas de intercambio iónico. Izquierda: esferas con tamaños de partícula de distribución Gaussiana (Amberlite 252); derecha: esferas de tamaño uniforme (Amberjet 1200) ([www.dow.com](http://www.dow.com))**

Los fabricantes proporcionan habitualmente tres parámetros específicos relacionados con el tamaño de las partículas: el rango de tamaños de partícula, el tamaño efectivo de la partícula y el coeficiente de uniformidad. El tamaño de las esferas condiciona numerosos aspectos operativos y el rendimiento que se consiguen durante el intercambio iónico. Dos circunstancias destacan especialmente:

- La tasa de intercambio iónico se reduce al aumentar el tamaño de las esferas
- La pérdida de carga a lo largo del lecho de esferas aumenta al reducirse el tamaño de las partículas, sometiendo a éstas a unas condiciones que pueden llegar a provocar su ruptura

Estos dos condicionantes opuestos hacen necesario alcanzar una solución de compromiso a la hora de determinar el tamaño idóneo de las partículas de resina para una columna y un régimen hidráulico dados. Los tamaños y granulometrías de las resinas, así como los restantes parámetros característicos, tales como el índice de huecos, la densidad o el hinchamiento en solución acuosa, son siempre suministrados por los fabricantes en las hojas de características.

### 2.3.2.- Capacidad de intercambio iónico

La capacidad de intercambio iónico de una resina es una medida de la cantidad de iones que es capaz de intercambiar en unas condiciones de trabajo concretas. Dado que los procesos de intercambio tienen lugar entre equivalentes químicos de las especies iónicas, la capacidad intercambiadora de las resinas se expresa habitualmente en equivalentes por unidad de masa o de volumen de resina. Otras unidades empleadas son la alcalinidad como  $\text{CaCO}_3$  por unidad de volumen de resina, o la masa de iones por unidad de volumen de resina. Por su parte, la cantidad de iones que se separan del agua se expresa como equivalentes por volumen de agua tratada.

La capacidad intercambiadora de una resina se define para diferentes condiciones operativas:

- La **capacidad máxima** de una resina representa el número total de iones intercambiables por unidad de masa de la resina (seca o húmeda). Se expresa habitualmente como miliequivalentes por gramo (meq/g). La capacidad máxima de intercambio está determinada por el número de grupos funcionales y la naturaleza química de los mismos. Cuando los grupos funcionales de la resina están constituidos por especies débilmente ionizables (grupo carboxilo, grupo amino...) la capacidad máxima de intercambio dependerá, además, del pH de la disolución, que condiciona el grado de ionización de los grupos funcionales.
- La **capacidad efectiva** de una resina alude precisamente a su posible ionización incompleta, y será por tanto una fracción de la capacidad máxima.
- La **capacidad dinámica** de una resina alude a la capacidad de intercambio que presenta una resina en la que aún no se ha alcanzado el equilibrio entre fases. La capacidad dinámica es función del tiempo de contacto entre la resina y el agua tratada.
- La **capacidad operativa**, o capacidad útil, cuantifica la respuesta real de la resina en condiciones operacionales. Se estima como la diferencia entre los sitios activos de la resina al final y al comienzo de una etapa de producción. También se expresa en equivalentes por unidad de masa o volumen de la resina. La capacidad operativa depende de una serie de factores tales como la capacidad total, el nivel de regeneración que presente la resina, la composición del agua tratada, el caudal de operación a través de la columna, la temperatura, el tamaño de las esferas de resina y su distribución. En condiciones operacionales normales la capacidad útil de una resina suele encontrarse entre el 40 y el 70 % de su capacidad total.

Algunos valores típicos de capacidades de intercambio para diferentes materiales intercambiadores de iones se exponen en la Tabla 2. Las resinas ácido fuerte y base fuerte presentan capacidades de intercambio inferiores a las resinas ácido débil y base débil. Sin embargo, en la selección de la resina idónea deberá tenerse en cuenta el balance entre capacidad de intercambio y capacidad de regeneración.

Los valores de las distintas capacidades de intercambio proporcionados por los fabricantes suelen referirse al volumen de resina húmeda, que depende del grado de hidratación (cantidad de agua que retiene en los intersticios), que a su vez varía con la forma química que presente la resina (ácido, base, sal). La hidratación y esponjamiento de las resinas en solución acuosa puede producir un notable cambio de volumen, factor que deberá ser tenido en consideración a la hora de dimensionar los recipientes (columnas) que vayan a contenerlas.

**Tabla 2. Algunos rangos típicos de capacidad de intercambio para diversos materiales intercambiadores de iones (Nalco Chemical Company, 1998)**

| Material intercambiador | Capacidad (kg/m <sup>3</sup> material) |
|-------------------------|--|
| CATIÓNICOS              |  |
| Inorgánicos (zeolitas)  |  |
| Naturales               | 100 - 175                              |
| Sintéticas              | 420 - 565                              |
| Orgánicos               |  |
| Carbón sulfonado        | 175 - 250                              |
| Sintéticos              |  |
| Fenólicos               | 210 - 635                              |
| Basados en estireno     | 700 - 1000                             |
| ANIÓNICOS               |  |
| Inorgánicos             |  |
| Óxidos metálicos        | Poco utilizados                        |
| Orgánicos               |  |
| Resinas sintéticas      | 350 - 770                              |



**Tabla 3. Valores típicos de la capacidad de intercambio de diversos tipos de resinas intercambiadoras en función de su porosidad (Dégremont, 2001)**

| Tipo de resina                | Capacidad de intercambio, en equivalentes por litro de resina |             |
|-------------------------------|---|-------------|
|                               | Gel   | Macroporosa |
| Catiónica ácido fuerte        | 1,4 – 2,2   | 1,7 – 1,9   |
| Catiónica ácido débil         | 3,5 – 4,2   | 2,7 – 4,8   |
| Aniónica base fuerte – Tipo 1 | 1,2 – 1,4   | 1,0 – 1,1   |
| Aniónica base fuerte – Tipo 2 | 1,3 – 1,5   | 1,1 – 1,2   |
| Aniónica base débil           | 1,4 – 2,0   | 1,2 – 1,5   |

### 2.3.3.- Selectividad de las resinas de intercambio iónico

Cuando las resinas de intercambio iónico se ponen en contacto con una solución acuosa se establece un estado de equilibrio entre los iones de interés contenidos en la solución y los que quedan retenidos por la resina. Dichos equilibrios, en los que los grupos funcionales de la resina se consideran uno de los reactivos, se representan genéricamente mediante las reacciones fundamentales expuestas en la Tabla 1. Desde este punto de vista, el estado de equilibrio puede ser descrito mediante una constante, que se denomina coeficiente de selectividad. El valor del coeficiente de selectividad es específico para un par resina-ion, y para cada especie iónica se define como la relación entre los iones que permanecen en disolución con respecto a los iones en la fase sólida. Se trata de un coeficiente adimensional que refleja la preferencia de una resina por una especie iónica determinada.

En la práctica, las resinas de intercambio iónico exhiben una afinidad selectiva hacia las especies iónicas presentes en la disolución acuosa. En función del grado de afinidad por uno u otro ion, los procesos de intercambio en la resina se ven favorecidos o dificultados, lo que condiciona la elección de las resinas para aplicaciones concretas.

La selectividad de las resinas es una propiedad intrínseca de cada una de ellas, que está condicionada por las propiedades físicas y químicas tanto de la resina como de la especie iónica de interés. Entre las características del ion que la condicionan se encuentran la valencia iónica y el radio iónico. En lo que respecta a las resinas, condicionan su selectividad propiedades tales como la distribución de los tamaños de poro en su estructura y el tipo de grupos funcionales mono o polisustituidos en las cadenas de polímeros que la integran.

En disoluciones acuosas diluidas ( $SST < 1000$  mg/L) y temperaturas en el rango ambiente, y en ausencia de impedimentos estéricos derivados de su estructura porosa o de un excesivo tamaño de la especie iónica, las resinas de intercambio iónico presentan generalmente mayor afinidad por los iones de valencia más alta. El anión cromato es una excepción a esta regla: la selectividad hacia este anión divalente es inferior a la de aniones monovalentes como yoduro y nitrato. La preferencia por los iones de mayor carga se reduce al elevarse la fuerza iónica de la disolución. Para iones de igual carga, la selectividad de una resina aumenta con el número atómico y el radio iónico, y disminuye al aumentar el diámetro de la esfera de hidratación del ion.

**Tabla 4. Algunos coeficientes de selectividad relativos para resinas intercambiadoras catiónicas ácido fuerte y aniónicas base fuerte (Dégremont, 2001)**

| Resina catiónica ácido fuerte |   | Resina aniónica base fuerte      |   |
|-------------------------------|---|----------------------------------|---|
| Catión                        | Coefficiente de selectividad relativo al litio, $K_{Li+}$ | Anión                            | Coefficiente de selectividad relativo al cloro, $K_{Cl-}$ |
| Li <sup>+</sup>               | 1,0   | HPO <sub>4</sub> <sup>=</sup>    | 0,01  |
| H <sup>+</sup>                | 1,3   | CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>     | 0,03  |
| Na <sup>+</sup>               | 2,0   | OH <sup>-</sup>                  | Tipo 1: 0,06<br>Tipo 2: 0,65                              |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | 2,6   | SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>     | 0,15  |
| K <sup>+</sup>                | 2,9   | CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> | 0,2   |
| Mg <sup>2+</sup>              | 3,3   | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>    | 0,4   |
| Zn <sup>2+</sup>              | 3,5   | Cl <sup>-</sup>                  | 1,0   |
| Cu <sup>2+</sup>              | 3,8   | CN <sup>-</sup>                  | 1,3   |
| Cd <sup>2+</sup>              | 3,9   | Br <sup>-</sup>                  | 3   |
| Ca <sup>2+</sup>              | 5,2   | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>     | 4   |
| Ba <sup>2+</sup>              | 11,5  | I <sup>-</sup>                   | 8   |

Los fabricantes proporcionan valores de selectividad específicos para cada resina en términos del coeficiente de selectividad, que a su vez depende de la valencia, del tipo de resina y de su grado de saturación, y de la naturaleza y concentración del ion de interés en la disolución acuosa. En la Tabla 4 se recogen algunos valores de los coeficientes de selectividad relativa típica para resinas de tipo ácido fuerte y base fuerte.

## 2.4.- Cinética de los procesos de intercambio iónico

La velocidad a la que tiene lugar el proceso de intercambio de especies iónicas entre las fases sólida y líquida está regulada tanto por las diferencias de concentración entre ambas fases como por el equilibrio eléctrico neutro que debe mantenerse en ellas.

Uno de los principales factores que controla la reacción de intercambio iónico es el tiempo de difusión que se requiere para alcanzar el equilibrio iónico entre las fases líquida y sólida. La transferencia de iones entre ambas fases está controlada por difusión, según un esquema clásico en tres etapas:

- Transferencia desde el seno de la solución hasta la capa límite estacionaria que rodea a la esfera de resina. Este proceso es independiente del tamaño de las esferas de resina.
- Transferencia a través de la capa límite hasta la superficie de la esfera. La velocidad de este proceso es inversamente proporcional al radio de la esfera.
- Transferencia del ion hacia el interior de la esfera de resina. La velocidad de esta etapa es inversamente proporcional a  $1/r^2$

Durante la fase de trabajo, la etapa a) en la resina es más rápida que la b), que se hace limitante del proceso. Con esferas de resina de menor tamaño, el área superficial aumenta, y con ella la transferencia a través de la capa límite.

En la fase de regeneración de la resina, la elevada concentración del ion en la fase líquida hace aumentar la velocidad de la etapa b), y etapa de difusión intrapartícula c) se hace limitante. Las esferas de menor tamaño presentan la ventaja de poseer un menor recorrido en su interior, lo que favorece la etapa c). El resultado de optar por un menor tamaño de partícula, por tanto, favorece las etapas de difusión en la resina, tanto durante los períodos de operación como en los de regeneración.

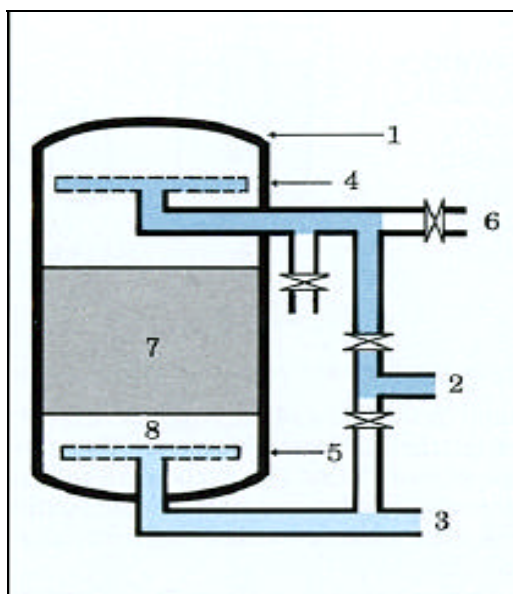
### 3.- DISEÑO

#### 3.1.- Descripción de una unidad básica de intercambio iónico

Los sistemas de intercambio iónico se explotan habitualmente bajo la configuración de lecho, fijo o móvil, contenido en un depósito adecuadamente configurado para favorecer la circulación del agua en su interior. Los equipos de tratamiento consisten en una o varias vasijas cilíndricas cerradas, en cuyo interior la resina entra en contacto con el agua a tratar y la solución regenerante, alternativamente.

La Figura 3 muestra el esquema simplificado de una columna de intercambio iónico. Habitualmente, la columna no se rellena en su totalidad con la resina, sino que se deja suficiente espacio libre sobre el lecho para permitir la expansión del mismo que, dependiendo del tipo de resina, puede oscilar entre el 30% y el 100% del volumen del lecho compactado. El agua de alimentación al intercambiador, y también las soluciones regenerantes, acceden a su interior por la parte superior, distribuyéndose uniformemente a través del lecho en toda la sección de la columna. El agua tratada se recoge en la parte inferior mediante un sistema de drenaje adecuado. El equipo dispone además de los circuitos, válvulas y bombas precisos para el correcto desarrollo del ciclo de operación-regeneración de la resina.

Las columnas de intercambio deben diseñarse considerando la pérdida de carga que se produce en el lecho, optimizando sección/altura o seleccionando cuidadosamente el tamaño de partícula. También deben procurar la distribución homogénea del líquido (agua de alimentación o solución regenerante) en el conjunto del lecho mediante el correcto dimensionamiento de los caudales de trabajo y de los sistemas de difusores.



#### LEYENDA

1. Cuerpo de la columna intercambiadora
2. Entrada de agua de alimentación
3. Salida de agua tratada
4. Distribuidor del agua de alimentación
5. Colector de agua tratada
6. Conducto de descarga del regenerante
7. Lecho de resina
8. Capa inerte de soporte del lecho

Figura 3. Esquema general de una columna de intercambio iónico con lecho fijo. (Dégremont, 2001)

### 3.2.- Ciclo de trabajo de un intercambiador iónico

En las aplicaciones de intercambio iónico a escala industrial, los intercambiadores se utilizan en procesos cíclicos de operación hasta el agotamiento de la capacidad de intercambio de la resina, momento en el que se procede a la subsiguiente regeneración de la misma. En la práctica, el rendimiento técnico y económico de un proceso de intercambio iónico depende tanto de la capacidad intercambiadora de la resina como de la cantidad de regenerante que precise en cada ciclo de operación y de la duración del ciclo de trabajo.

En el campo del tratamiento de aguas, un ciclo de trabajo típico consta de las siguientes fases o etapas:

1. **Retrolavado** del lecho mediante un flujo ascendente de agua limpia, destinado a la eliminación de los posibles finos y restos de partículas que se acumulan en el lecho de resina durante la fase de operación, así como a favorecer una reclasificación del material del lecho, evitando la formación de canales preferenciales.
2. **Regeneración de la resina:** a medida que transcurre la fase de operación, las resinas ven reducirse su capacidad de intercambio y es preciso volver a ponerlas en condiciones de servicio óptimas mediante el empleo de soluciones regeneradoras que restauren su forma iónica original y arrastran la especie iónica de interés desde la estructura de la resina.
3. **Enjuagado:** tras la etapa de regeneración es preciso retirar el exceso de solución regenerante que haya podido quedar retenida en los poros de las partículas de resina y en los intersticios del lecho. Habitualmente se efectúa un enjuague lento, a baja velocidad, después del empleo de cada solución regenerante, finalizando esta etapa con un enjuague rápido para eliminar los últimos residuos de solución.
4. **Operación:** el agua que va a ser tratada se hace circular a través del lecho, recogándose a su salida con la composición iónica modificada. La especie iónica de interés queda incorporada a la fase sólida.

La fase de regeneración de una columna de lecho fijo habitualmente requiere un tiempo mínimo de entre una y dos horas (Kirk-Othmer, 1999).

### 3.3.- Tipos de sistemas de intercambio iónico

Los sistemas de intercambio iónico admiten múltiples configuraciones en función de factores tales como el número y disposición de las columnas de intercambio, el tipo de resina que contengan, el sentido del flujo de regeneración, el régimen de operación, las características del lecho, las de la solución a tratar, etcétera. En función de estas características se pueden establecer distintas clasificaciones, algunas de las cuales se señalan a continuación.

#### 3.3.1.- En función de la composición del lecho

Los lechos de partículas de resina pueden estar constituidos por uno o varios tipos de resina, mezcladas o depositadas según diversas configuraciones.

- **Lechos unitarios:** Con un solo tipo de resina, son los lechos convencionales de intercambio iónico. Las partículas pueden encontrarse en forma de lecho compacto, como en los sistemas Upcore™ de Dowex, o de lecho suspendido, como en los modernos sistemas SIX®, de PWN Technology, o MIEX®, de Ixom Watercare, con partículas magnéticas.
- **Lechos mixtos:** Una resina catiónica ácido fuerte y una resina aniónica base fuerte se mezclan íntimamente mediante agitación con aire comprimido en una única columna. La mezcla de ambos tipos de intercambiadores en un solo lecho lo hace equivalente a un tren de dos columnas, aunque la calidad del agua que se obtiene en un lecho mixto es superior a la que se obtiene con dos columnas unitarias secuenciales. A pesar de su mayor eficiencia, los lechos mixtos presentan el inconveniente de ser más sensibles a la presencia de impurezas en el agua de alimentación, además de requerir un proceso de regeneración más complejo que las columnas unitarias. Por estas razones, su utilización preferencial es la de afino de aguas previamente tratadas en un sistema convencional de dos columnas o en una unidad de ósmosis inversa.

### 3.3.2.- En función del sentido del flujo de regeneración

La etapa de regeneración de las resinas es muy importante en la evaluación global de la eficiencia de un sistema de intercambio iónico. Muchas columnas de intercambio operan en flujo descendente, y la solución que las regenera lo hace en la misma dirección (co-corriente). Los primeros sistemas de tratamiento mediante intercambio iónico operaban de este modo. Tiene como principal inconveniente la mayor fuga de iones que se produce, así como la posible acumulación de iones en las capas más inferiores del lecho, lo que puede dar lugar a un agua de menor calidad para ciertas aplicaciones.

Se obtiene un mejor rendimiento de regeneración haciendo pasar el regenerante a contracorriente del flujo de operación. La regeneración puede ser tanto en flujo ascensional como descendente. Con flujo ascensional pueden emplearse sistemas de vacío. Por otra parte, el flujo ascensional de la solución regenerante provoca la disrupción del lecho y da lugar a su expansión, lo que daría como resultado una distribución pobre de la solución a causa del bajo contacto con las partículas fluidificadas del lecho. Por ello, en los sistemas de regeneración contracorriente es necesario mantener el lecho compactado durante la inyección de la solución regenerante. Se han desarrollado diversos métodos de bloqueo del lecho para evitar su expansión, que pueden agruparse en tres tipos:

- Bloqueo del lecho mediante agua
- Bloqueo del lecho mediante aire comprimido
- Bloqueo mecánico del lecho, mediante el empleo de diafragmas, placas y otros dispositivos.

El empleo de un régimen de regeneración en contracorriente favorece el ahorro de reactivos, ya que se requiere una menor cantidad para lograr la regeneración de la resina, lo que se traduce en un menor volumen de aguas de lavado que tratar. El ahorro se estima en hasta un 20% para resinas aniónicas, y un 40% para resinas catiónicas (Dégremont, 2001). Consecuentemente, con el mismo consumo de reactivos, la regeneración contracorriente da lugar a la producción de agua tratada de mejor calidad que la regeneración co-corriente.

### 3.3.3.- En función del número y naturaleza de las columnas

En función del objetivo que se persiga, los procesos de intercambio iónico pueden requerir desde un único intercambiador, provisto de una resina catiónica o aniónica, hasta esquemas complejos que requieren de múltiples columnas para completar el proceso de tratamiento.

Si se precisa eliminar sustancias iónicas cargadas tanto positiva como negativamente, deberá emplearse al menos un intercambiador catiónico seguido de otro aniónico, pudiendo aumentar el número de unidades en función de las necesidades de calidad del agua tratada. Según la elección de resinas que se efectúe, son posibles diferentes esquemas (Corbitt, 2003):

- Resina ácido fuerte / Resina base fuerte
- Resina ácido fuerte / Resina base débil
- Resina ácido débil / Resina base débil
- Resina ácido fuerte / Resina base débil / Resina base fuerte
- Resina ácido fuerte / Resina base débil / Resina base fuerte / Resina base débil

Además, a estos esquemas de columnas unitarias pueden añadirse columnas de lechos mixtos para el afino de la calidad del agua producida. Las combinaciones posibles son muy numerosas y dependerán de la aplicación concreta del sistema. Además deberán tenerse en cuenta las líneas de reserva precisas para cubrir los períodos de regeneración de las resinas intercambiadoras. Puede encontrarse información detallada acerca de este aspecto en Kirk-Othmer (1999), Dégremont (2001) o Crittenden *et al.* (2005).

### 3.3.4.- En función del régimen de funcionamiento del sistema

Los procesos discontinuos (batch) en columnas verticales producen un alto grado de dilución de las especies iónicas. La alternancia entre etapas de operación y regeneración da lugar a una gradación de concentraciones en el seno del lecho, además de requerir la neutralización de las abundantes aguas de lavado.

Por el contrario, los sistemas de intercambio iónico de operación en continuo limitan el grado de dilución de las especies de interés a niveles mínimos, lo que es especialmente interesante en el caso de que el intercambio iónico se aplique a la recuperación de un constituyente presente en la solución acuosa. En los sistemas de operación en continuo las fases de operación y regeneración de la resina intercambiadora se suceden a lo largo de un circuito cerrado a lo largo del cual son transportados el lecho de partículas y la solución regeneradora en contracorriente. Entre los sistemas de intercambio iónico continuos más conocidos se encuentran el proceso Asahi, el circuito de Higgins y el proceso CIE-Dégremont. La utilización de este tipo de sistemas está generalmente restringida a la recuperación de sustancias con valor añadido en procesos industriales tales como el refinado de hidrocarburos o la concentración de iones radiactivos.

### 3.4.- Criterios de diseño de un sistema de intercambio iónico

El objetivo del diseño de un sistema de intercambio iónico es el de asegurar producción de agua en calidad y cantidad, con los menores costes de inversión y el menor consumo posible de reactivos regenerantes. Un diseño óptimo del sistema depende de la elección adecuada de múltiples parámetros, que se describen a continuación.

#### 3.4.1.- Consideraciones de partida

Como punto de partida para el diseño de un sistema de intercambio iónico, Corbitt (2003) destaca las siguientes consideraciones:

- Los requisitos para el agua de alimentación y su grado de tratamiento previo; en especial, en lo referente los sólidos disueltos.
- Los requisitos de calidad para el agua tratada
- La presencia de materia coloidal o de partículas que puedan colmatar el sistema
- El tipo y configuración de las columnas de intercambio, con especial atención al sistema de regeneración.

#### 3.4.2.- Selección del sistema de regeneración de la resina

Un sistema de regeneración contracorriente debería proporcionar una calidad del agua con una conductividad menor de 2  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y una concentración residual de sílice como  $\text{SiO}_2$  entre 0,020 y 0,050 mg/l. Dependiendo de la composición del agua de alimentación y de las condiciones de regeneración, la conductividad puede reducirse hasta 0,2  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Se considera que la resina está agotada con un valor de 4  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En las mismas condiciones, los sistemas de regeneración co-corriente producen un agua con una conductividad muy superior y pérdidas iónicas unas diez veces superiores (Dow Water & Process Solutions).

#### 3.4.3.- Selección del tipo de resina y del esquema de tratamiento

La configuración del sistema de intercambio iónico depende de la composición del agua de alimentación, de la calidad que se requiera al agua producida, y de consideraciones de tipo económico.

Las resinas catiónicas ácido fuerte se emplean para el ablandamiento en forma de sal sódica, y para la desmineralización de las aguas cuando la dureza temporal del agua de alimentación es inferior al 40% del contenido total en cationes. Esta regla general puede obviarse en sistemas de tratamiento pequeños con HCl como regenerante de la resina.

Las resinas catiónicas ácido débil se emplean como resina unitaria para la eliminación de la alcalinidad en su forma ácida, y para el ablandamiento de aguas salobres en su forma de sal sódica. La elección de una resina catiónica ácido débil es preferible frente a la opción de una resina ácido fuerte cuando la dureza temporal supera el 40%, por ser una opción ventajosa en términos de capacidad de operación y de eficiencia de regeneración (Dow Water & Process Solutions).

Con respecto a las resinas aniónicas, las base fuerte de tipo 1 se recomiendan como resinas unitarias para tratar aguas con un bajo contenido en ácidos inorgánicos y cuando se requieran bajas (< 20 ppb en operación contracorriente) pérdidas de sílice. La resina puede ser regenerada a temperaturas de hasta 50 °C para una eliminación más eficaz de la sílice. Las resinas base fuerte de tipo 2 se adaptan especialmente bien a sistemas pequeños. Si bien los aniones de las resinas tipo 2 tienen una mayor eficiencia operativa y

en regeneración que las tipo 1, están limitadas a temperaturas por debajo de los 35°C y producen mayores pérdidas de sílice.

Por último, las resinas aniónicas base débil se emplean como etapa única para obtener agua parcialmente desionizada sin eliminación de CO<sub>2</sub> ni SiO<sub>2</sub>. Para la desmineralización completa debe recurrirse al sistema en dos etapas aniónica base débil y aniónica base fuerte, que proporciona los costes de explotación óptimos. La combinación de base débil y base fuerte es idónea para tratar aguas de baja alcalinidad o sometidas a desgasificación, en las que la presencia de ácidos inorgánicos (Cl<sup>-</sup> + NO<sub>3</sub><sup>-</sup> + SO<sub>4</sub><sup>=</sup>) supere el 60% del contenido aniónico total.

Las resinas aniónicas base débil son especialmente aptas para el tratamiento de la materia orgánica, compuestos de elevado peso molecular y carácter débilmente ácido.

En la Tabla 5 se recogen algunos valores típicos de diseño para los distintos tipos de resinas.

**Tabla 5. Valores típicos de diseño para un intercambiador iónico de lecho fijo, aplicado a tratamientos de aguas (Perry et al., 2001)**

| Tipos de resina  | Cargas superficiales mínima y máxima (m/h) | Altura mínima del lecho (m) | Temperatura máxima de operación (°C) | Capacidad efectiva (eq/l)    | Regenerante (g/l resina)  |
|--|--|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|
| Catiónica ácido débil                                  | 3 – 20                                     | 0,6                         | 120                                  | 0,5 – 2,0                    | 110% teórico (HCl o H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                                |
| Catiónica ácido débil                                  | 3 – 30                                     | 0,6                         | 120                                  | 0,5 – 1,5                    | 80-250 NaCl<br>35-200 H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub><br>66 °Bé<br>80-500 HCl 20 °Bé |
| Aniónica base débil                                    | 3 – 17                                     | 0,75                        | 40                                   | 0,8 – 1,4                    | 35 – 70 NaOH  |
| Aniónica base fuerte                                   | 3 – 17                                     | 0,75                        | 50                                   | 0,35 – 0,7                   | 70 – 140 NaOH   |
| Mezcla equivalente de catiónica y aniónica base fuerte | Máx. 40                                    | 1,2                         | 50                                   | 0,2 – 0,35 (según la mezcla) | El mismo que catiónica y aniónica por separado                                      |

#### 3.4.4.-Estimación del consumo de reactivos regenerantes

La eficiencia química de regeneración para una resina de intercambio iónico es un parámetro adimensional que se define a partir de la relación:

$$\text{Volumen de resina (litros)} = (\text{Salinidad del agua (eq/m}^3\text{)}) \cdot (\text{Volumen tratado (m}^3\text{)}) \cdot (\text{Capacidad operativa (eq/l)})^{-1} \quad [1]$$

Dado que el empleo de regenerante por parte de la resina no es el teórico, la eficiencia química es siempre mayor que la unidad, empeorando a medida que su valor aumenta. En porcentajes, los valores de eficiencia de regeneración oscilan entre 105% y 300%, dependiendo del tipo de resina, del flujo de regeneración adoptado y del reactivo regenerante que se utilice.

En la Tabla 6 se recogen valores orientativos de los consumos de reactivos regenerantes necesarios para devolver las resinas a su estado operativo. Aunque mayores consumos de reactivos regenerantes incrementan la capacidad operativa y reducen las pérdidas iónicas, la eficiencia química del sistema en su conjunto empeora.

**Tabla 6. Rangos de consumo de regenerante para dos tipos de resinas fuertes (Dégremont, 2001)**

| Tipo de resina         | Regenerante                     | Cantidad de producto puro, g/l resina |
|------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|
| Catiónica ácido fuerte | NaCl                            | 80 -300                               |
|                        | H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>  | 80 - 250                              |
|                        | HCl                             | 40 - 200                              |
| Base ácido fuerte      | NaOH                            | 40 - 100                              |
|                        | NH <sub>3</sub>                 | 30 - 60                               |
|                        | Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> | 60 - 130                              |
|                        | NaOH                            | 40 - 200                              |

### 3.4.5.- Retrolavados y expansión del lecho

Los lechos de resinas intercambiadoras se someten periódicamente a un retrolavado con el fin de eliminar las partículas acumuladas en los huecos y de reclasificar las esferas de resina en el lecho mediante su agitación. El retrolavado de las columnas debe llevarse a cabo de tal forma que se asegure el óptimo funcionamiento hidráulico del lecho durante los ciclos de operación y regeneración.

El retrolavado se efectúa haciendo ascender un caudal uniforme de agua en la columna, de forma que se produzca la fluidificación suficiente en el lecho para desprender las partículas y finos acumulados durante los ciclos de producción. Un volumen de agua típico para retrolavado sería el equivalente a dos desplazamientos completos del volumen de resguardo de la columna. El lecho de resina debe ser expandido a lo largo de la columna, hasta una altura próxima al colector de salida del agua de retrolavado en la parte superior de la columna.

La expansión de las resinas de intercambio iónico depende del tamaño de las esferas de resina, de su densidad y de la temperatura del agua de retrolavado, por lo que constituye un valor característico para cada resina comercial. El porcentaje de expansión de una columna de intercambio iónico puede calcularse de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Expansión del lecho} = 100 \times (\text{Altura del lecho fluidificado} / \text{Altura del lecho en reposo}) \quad [2]$$

Los fabricantes proporcionan las curvas de expansión en retrolavado de cada resina en sus hojas de especificaciones técnicas. Mediante su empleo es posible establecer el valor del caudal idóneo de retrolavado para el porcentaje de expansión del lecho preestablecido. En procesos de tratamiento de aguas es habitual emplear valores de expansión del lecho comprendidos entre el 50 % y el 80% (Perry, 2001), pudiendo llegar a darse casos del 100%.

### 3.4.6.- Dimensionamiento del sistema

Los requisitos de calidad del agua tratada en los sistemas de intercambio, así como el método de regeneración seleccionado (co-corriente o contracorriente) condicionan los consumos de regenerante. Estos valores, junto con la composición del agua de alimentación al sistema, definen la capacidad operativa de la resina, de acuerdo con la ecuación [1].

Pueden obtenerse estimaciones más precisas de la capacidad operativa de la resina mediante ensayos a escala piloto, haciendo uso de las curvas características que proporcionan los fabricantes, o bien recurriendo a programas específicos de diseño de sistemas de intercambio iónico, tales como PureDesign, de Purolite ([http://www.purolite.com/RelId/606742/ISvars/default/PureDesign\\_3\\_12\\_2\\_-\\_Download\\_Calculator.htm](http://www.purolite.com/RelId/606742/ISvars/default/PureDesign_3_12_2_-_Download_Calculator.htm)) o CADIX, de Dow (<http://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions/resources/design-software/cadix-software>).

Con el fin de compensar las condiciones de operación no ideales, así como el envejecimiento de las resinas, se recomienda aplicar un factor de seguridad a los valores de capacidad operativa estimados. Los valores típicos son de un 5% para las resinas catiónicas, y un 10% para las resinas aniónicas. Una vez conocido el valor de la capacidad operativa de la resina, el volumen que se requiere puede ser obtenido mediante la ecuación [1] a partir del volumen de agua tratado por ciclo.



Los depósitos deben construirse con materiales adecuados, tales como acero al carbono o fibra de vidrio. Los sistemas de distribución y colección en su interior deben asegurar una óptima distribución de los fluidos en todas las fases del ciclo de trabajo del intercambiador, que también estará condicionada por la relación entre la altura del lecho y la sección de la columna.

En las Tablas 7 a 11, a continuación, se exponen una serie de valores orientativos de distintos parámetros de diseño de un sistema de intercambio iónico, optimizados para las resinas monodispersas Dowex Marathon. Dichos valores deben considerarse una referencia aproximada de las magnitudes. Los valores específicos de cada resina deberán ser proporcionados por el fabricante.

**Tabla 7. Algunos valores típicos para el dimensionamiento de una columna de intercambio (Dow Water and Process Solutions)**

| Parámetro                            | Valores de referencia            |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| Diámetro máximo                      | 3,5 metros                       |
| Pérdida de carga máxima en el lecho  | 1 bar                            |
| Relación (Altura del lecho/diámetro) | 2/3 – 3/2                        |
| Espacio libre para expansión         | 80 – 100% de la altura del lecho |

**Tabla 8. Porcentajes de hinchamiento de las resinas (Dow Water and Process Solutions)**

| Tipo de resina         | Porcentaje de hinchamiento |
|------------------------|----------------------------|
| Catiónica ácido fuerte | 5 – 8%                     |
| Catiónica ácido débil  | 15 – 20%                   |
| Aniónica base fuerte   | 15 – 25%                   |
| Aniónica base débil    | 15 – 25%                   |

**Tabla 9. Alturas del lecho según distintas configuraciones del sistema de intercambio iónico (Dow Water and Process Solutions)**

| Configuración del sistema                 | Profundidad del lecho, mm |
|---|---------------------------|
| Co-corriente, resina única                | 800                       |
| Contracorriente, resina única             | 1200                      |
| Lecho estratificado, aniónica base fuerte | 800                       |
| Lecho estratificado, aniónica base débil  | 600                       |

**Tabla 10. Velocidades de flujo en distintas etapas del ciclo (Dow Water and Process Solutions)**

|   | Velocidad de flujo (m/h) |
|---|--------------------------|
| Operación: Enjuague rápido              | 5 – 60                   |
| Operación: afinado del condensado       | 75 – 120                 |
| Regeneración co-corriente: enjuague     | 1 – 10                   |
| Regeneración contra-corriente: enjuague | 5 – 20                   |

**Tabla 11. Volúmenes de agua precisos para las operaciones de enjuague (Dow Water and Process Solutions)**

| Tipo de resina         | Volumen de agua para enjuague |
|------------------------|-------------------------------|
| Catiónica ácido fuerte | 2 – 6 BV                      |
| Catiónica ácido débil  | 3 – 6 BV                      |
| Aniónica base fuerte   | 3 – 6 BV                      |
| Aniónica base débil    | 2 – 4 BV                      |

BV: Volumen del lecho (bed volume)

### 3.4.7.- Número de líneas

El número de líneas de intercambio operando simultáneamente puede ser calculado a partir del caudal de alimentación y del volumen tratado por ciclo.

El esquema más sencillo, de dos líneas, de las cuales una está en operación y otra en reserva, es aplicable a la mayor parte de los casos. Para plantas de tratamiento grandes, con caudales superiores a 400 m<sup>3</sup>/h, puede ser más apropiado el esquema de dos líneas operativas en paralelo y una línea en reserva, con el fin de reducir el tamaño del intercambiador y mejorar las condiciones hidrodinámicas en su interior (Dow Water & Process Solutions).

La estimación del número de líneas óptimo puede efectuarse mediante la fórmula [3], redondeando el resultado al número entero inferior (Dow Water & Process Solutions).

$$\text{Nº de líneas} = (\text{Tiempo de operación} + \text{Tiempo de regeneración}) / \text{Tiempo de regeneración} \quad [3]$$

### 3.4.8.- Consideraciones económicas

Los sistemas de intercambio iónico se adquieren habitualmente como sistemas a medida y llave en mano, por lo que no resulta sencillo efectuar estimaciones generales de tipo económico.

Los costes de inversión de los sistemas de intercambio iónico son, en general, menores que para otros sistemas de tratamiento terciario basados en membranas o que requieren algún tipo de equipo especial. En cuanto a los costes de explotación, el consumo energético del sistema no tendrá un peso determinante, sino que las mayores partidas serán las destinadas al consumo de resinas y de reactivos para su regeneración. En el caso de que se obtenga algún tipo de residuo peligroso durante el ciclo de trabajo, deberán incluirse también los costes asociados a su disposición final. En la práctica, son la frecuencia e intensidad de las etapas de regeneración de la resina los principales factores a considerar. Una frecuencia de regeneración demasiado elevada puede hacer al sistema económicamente inviable.

Corbitt (2003) ha elaborado una relación de aspectos que deben considerarse durante el análisis económico de la viabilidad de un proceso de intercambio iónico para el tratamiento de aguas residuales:

1. ¿El proceso permitirá la recuperación y reutilización de algún reactivo?
2. ¿Es posible eliminar solo los constituyentes indeseables del agua residual que hacen imposible su tratamiento en otras instalaciones como, por ejemplo, una planta de tratamiento municipal?
3. ¿Existen otros procesos para efectuar la misma operación de forma más económica?
4. ¿Se ha previsto el modo de gestión del residuo concentrado proveniente de la regeneración periódica de las unidades de intercambio iónico?
5. ¿Se ha incluido el coste de compra y preparación de los reactivos de regeneración en la evaluación económica del sistema?
6. ¿Se ha incluido el coste de tratamiento y gestión de los residuos de regeneración en la evaluación económica del sistema?
7. Para la resina de intercambio seleccionada, ¿cuál es el coste anual de los aditivos y de las sustituciones periódicas? (El ciclo de vida de la resina depende fuertemente de su naturaleza y de las características del agua residual)
8. ¿Cuál es el coste estimado del equipamiento necesario para operar el sistema de intercambio iónico?

#### 4.- ESPECIFICACIONES Y REFERENCIAS EN EL TRATAMIENTO DE EFLUENTES DE LA INDUSTRIA TEXTIL

El principal inconveniente para el empleo de los sistemas de intercambio iónico en el tratamiento de efluentes textiles reside en el hecho de que solo son aptos para tratar moléculas ionizables y solubles en agua, lo que restringe su campo de aplicación a determinadas familias de colorantes. Los resultados de los ensayos llevados a cabo para la eliminación de color en efluentes textiles son bastante escasos en la literatura, y se limitan a experimentos llevados a cabo en laboratorio. Los mejores resultados se obtienen con las resinas aniónicas base débil, con las que en algunos casos logra eliminarse por completo el color en las soluciones. En la Tabla 12 se han resumido los resultados de los experimentos localizados en la literatura.

En cualquier caso, una aplicación del intercambio iónico a efluentes textiles a escala real exige un tratamiento previo de los mismos que reduzca los valores de salinidad, sólidos en suspensión y materia orgánica hasta valores operativos para un sistema de estas características.

Además de la decoloración de efluentes, ya llevada a cabo en otros sectores, como puede ser el refinado de azúcar de caña, el intercambio iónico puede emplearse también para el ablandamiento y/o desmineralización de aguas de proceso, para su regeneración en el marco de un esquema Zero Limit Discharge. Se dispone de alguna referencia al respecto en India, en donde la estación de tratamiento y regeneración Angeripalayam Common Effluent Treatment Plant, de Tamil Nadu, trata los efluentes de 75 empresas de tinción con un esquema consistente en un tratamiento biológico de biomembrana seguido de cloración, intercambio iónico y ósmosis inversa en dos etapas.

**Tabla 12. Resumen de resultados experimentales de decoloración de soluciones mediante intercambio iónico.**

| Colorante   | Resina  | Condiciones experimentales  | Resultados  | Referencia                       |
|---|---|---|---|----------------------------------|
| C. I. Basic Blue 3  | Catiónica, poliestireno (Lewatit MonoPlus SP 112)                           | Ensayos batch. Concentración inicial 100 – 1000 mg/l; tiempo de contacto: 1 – 96 minutos. | Capacidad operativa @ 20 °C: 205 mg/g; decoloración total de la solución en 1 h | Wawrzkievicz, 2013               |
| Varios colorantes reactivos   | Aniónica base fuerte S6328 y base débil MP62 (Bayer)                        | Ensayos batch. Varias concentraciones y pH  | 100 – 800 volúmenes de lecho hasta agotamiento de la resina                     | Karcher <i>et al.</i> , 2002     |
| Azo LanasyN Navy y phtalocyanine Acid Blue 249                                    | Aniónica base débil (Purolite A847)   | Ensayos batch con ambos simultáneos, a pH ácidos.   | Superior con cada uno por separado. Estiman capacidad dinámica mediante FT-IR.  | Kauspediene <i>et al.</i> , 2013 |
| Efluente textil real sometido a tratamiento FQ (4910 µmho/cm) y EQ (5200 µmho/cm) | Catiónica (Amberlite IR 120) y aniónica (Amberlite IRA 400) en relación 1:2 | Dos columnas en laboratorio.  | Eliminación de cloruro, nitrato y sulfato; reducción total de color; 48 µmho/cm | Raghu y Basha, 2006              |

El esquema de tratamiento está dirigido a la regeneración completa de todo el caudal de entrada, con el fin de reutilizarlo en los procesos productivos textiles y de evitar los problemas asociados al vertido de los

efluentes. El valor añadido que supone el gran volumen de agua recuperado para usos industriales puede compensar los costes de explotación asociados al tratamiento,

La empresa Europrogetti (Italia; [www.europrogetti-italy.com](http://www.europrogetti-italy.com)) diseña y comercializa intercambiadores iónicos especialmente destinados al tratamiento terciario de efluentes textiles para su reutilización, en un esquema de Zero Limit Discharge. El objetivo principal que se persigue con la etapa de intercambio iónico posterior al tratamiento biológico es el de eliminar todo el color remanente, de forma que el agua producida pueda volver a ser utilizada en los baños de tintura, para lavados o aclarados, para la limpieza de la maquinaria, etcétera. Los intercambiadores, totalmente automatizados, se equipan con resinas aniónicas base débil macroporosas. Los factores que determinan la duración del ciclo de trabajo, así como la calidad del agua tratada, son:

- La cantidad de color y la naturaleza del colorante.
- La DQO del efluente secundario, comprendida entre 100-120 mg/l. Parte queda adsorbida sobre la resina, acelerando la saturación de la misma y compitiendo con la eliminación de color. El aumento de la DQO implica una reducción de la duración del ciclo de trabajo y puede provocar un aumento de color en el agua tratada.
- Un pH demasiado alcalino influye negativamente sobre la reducción del color.
- Una salinidad por encima de 15.000 mg/l provoca la re-elución del color a consecuencia de la acción competitiva de las elevadas concentraciones de aniones cloruro y sulfato.

Donde esto sea posible, el intercambio iónico también permite recuperar materiales en disolución que pueden ser recuperados para el proceso productivo. Es el caso, por ejemplo, del cloruro sódico y de la sal de Glauber.

## 5.- PARÁMETROS Y ESTRATEGIAS DE CONTROL

### 5.1.- Composición del agua de entrada al sistema

La naturaleza y composición del agua de alimentación del sistema de intercambio iónico es un factor condicionante del rendimiento de la operación. Los componentes del agua de alimentación que es preciso conocer y controlar son:

- El contenido total en sales inorgánicas disueltas
- Los sólidos suspendidos
- La temperatura
- El pH
- La materia orgánica disuelta
- Aceites y grasas
- Polielectrolitos
- Hierro, manganeso y aluminio

### 5.2.- Salinidad

Es un factor crítico para el funcionamiento correcto de un sistema de intercambio iónico, y la causa más frecuente de un mal funcionamiento. Los efectos que un cambio de concentración de sales produce en el sistema se resumen en la Tabla 13.

**Tabla 13. Algunos efectos de la variación en la concentración de sales sobre el funcionamiento de un sistema de intercambio iónico. Adaptado de Dardel (2015).**

| Modificación   | Efecto sobre el sistema de intercambio iónico   |
|--|---|
| Cambio en la composición salina del agua de alimentación | Variación en la calidad del agua tratada. El volumen de resina puede desajustarse. La producción de CO <sub>2</sub> puede verse modificada. |
| Incremento en la concentración de silicatos              | Aumenta la fuga de sílice en el efluente. Para su control es preciso modificar las condiciones de regeneración de la resina                 |
| Mayor concentración de sales disueltas                   | Ciclos de operación más breves. Se reduce el volumen de agua tratada por ciclo. La calidad del agua tratada se ve alterada.                 |
| Menor concentración de sales disueltas                   | Ciclos de operación prolongados. Aumenta el volumen de agua tratada por ciclo. Es posible espaciar la regeneración de la resina.            |

Debe mantenerse una monitorización permanente del agua de alimentación a las columnas de intercambio, así como de sus posibles fluctuaciones. En caso de una modificación sensible en la concentración de sales disueltas en el agua de alimentación, la capacidad de intercambio del sistema debe ser estimada de nuevo, ajustando sus condiciones de operación (frecuencia de regeneración) a las nuevas circunstancias. Cuando se prevean variaciones periódicas de la concentración en sales (vinculadas a cambios en las etapas de producción, al régimen de trabajo en la factoría, al empleo cambiante de materias primas, etcétera), deberán estimarse las condiciones de trabajo del sistema y la duración del ciclo de operación bajo todos los supuestos, y reajustar el sistema en consecuencia (Dardel, 2015).

Aunque son capaces de soportar salinidades muy elevadas, los sistemas de intercambio iónico no se aplican habitualmente al tratamiento de aguas con contenidos salinos superiores a 20 meq/L, si bien pueden darse excepciones en aplicaciones concretas. La razón es el rápido agotamiento de la capacidad de intercambio de la resina, lo que implica ciclos de operación muy cortos y la necesidad de efectuar operaciones de regeneración demasiado frecuentes, con un elevado consumo de aguas de enjuague y reactivos que hace inasumibles los costes. Para aguas de salinidad alta son más adecuados otros sistemas de separación, tales como la ósmosis inversa o la evaporación de efectos múltiples.

### 5.3.- Materias en suspensión

El agua de alimentación de un sistema de intercambio iónico debe carecer de materia en suspensión o, al menos, haberla reducido hasta límites que no provoquen el atascamiento del lecho de la resina intercambiadora, con la consiguiente pérdida de carga y la necesidad de aumentar la frecuencia de retrolavado del lecho.

La cantidad de materia en suspensión tolerable en un sistema de intercambio iónico varía en función del esquema de regeneración de las columnas de intercambio y de la duración del ciclo de operación. Algunos criterios de admisión son (Dardel, 2015):

- Para columnas que se regeneran en co-corriente, el retrolavado del lecho se efectúa antes de cada regeneración, lo que permite eliminar las posibles materias sólidas acumuladas en el lecho. Con ciclos de trabajo que no superen las 24 horas, estas columnas pueden tolerar la presencia de algunos miligramos por litro de sólidos en suspensión. No obstante, si se prolonga la duración del ciclo, la acumulación de sólidos suspendidos puede generar pérdidas de carga en el lecho.
- Las columnas que se regeneran en contracorriente no se someten a retrolavado al final de cada ciclo, con el fin de mantener la correcta estratificación del lecho. Por ello, en presencia de sólidos suspendidos es preciso monitorizar la posible pérdida de carga en el lecho, en cuyo caso sí sería preciso efectuar su retrolavado.
- Las columnas de lechos compactados no se someten a retrolavado *in situ*, por lo que son especialmente sensibles a la presencia de materias en suspensión. Como valor indicativo, su concentración debe estar por debajo de 1 mg/l.

Los límites admisibles para la materia en suspensión pueden expresarse como la cantidad total que se acumula durante un ciclo de operación con respecto a la sección de la columna. Algunos valores máximos sugeridos por Dardel (2015) se recogen en la Tabla 14.

**Tabla 14. Valores límite de la carga de sólidos suspendidos admisible por diversos tipos de columnas de intercambio iónico (Dardel, 2015)**

| Sistema de regeneración de la columna       | Carga máxima admisible por ciclo<br>(kg · m <sup>-2</sup> ) |
|---|---|
| Co-corriente                                | 6   |
| Flujo dividido                              | 6   |
| Contracorriente con bloqueo por aire o agua | 2   |
| Condensados                                 | 2   |
| Upcore™ y similares                         | 0,5   |
| Amberpack™ y similares                      | 0,2   |
| ADI™, ADN™                                  | 0,1   |

#### 5.4.- Temperatura

También la temperatura del agua (o de la solución regenerante) que accede a una columna de intercambio iónico afecta al rendimiento de los sistemas. Como norma general, la capacidad efectiva de todas las resinas aumenta con la temperatura, hasta determinados límites operativos que dependen de la naturaleza y composición de las resinas.

Las resinas catiónicas son eficaces a temperaturas elevadas, incluso por encima de 100 °C, pero su degradación se ve acelerada por el estrés térmico. Por el contrario, y debido a su composición química, las resinas aniónicas presentan una mayor sensibilidad a las temperaturas elevadas, ya que el calor puede deteriorar sus grupos funcionales. La mayor o menor porosidad de los materiales también condiciona la resistencia al calor. En la Tabla 15 se incluyen algunos límites orientativos de temperaturas de trabajo y regeneración para resinas aniónicas de diversos tipos, situándose en todos los casos por debajo de 60 °C. Los valores de las temperaturas de trabajo específicos para cada resina se proporcionan en las hojas de características suministradas por el fabricante.

**Tabla 15. Cargas orgánicas y temperaturas máximas de trabajo para distintas resinas aniónicas (Dardel, 2015)**

| Tipo de resina aniónica             | Temperatura máxima (°C) | Carga orgánica máxima (g KMnO <sub>4</sub> /l resina) | Máximo valor del índice de ensuciamiento N |
|-------------------------------------|-------------------------|---|--|
| BF estirénica tipo 1, gel           | 60                      | 2   | 3  |
| BF estirénica tipo 2, gel           | 35                      | 3   | 6  |
| BF estirénica tipo 1, macroporosa   | 60                      | 4   | 6  |
| BF estirénica tipo 2, macroporosa   | 35                      | 5   | 10   |
| BF acrílica                         | 35                      | 8   | 15   |
| BF acrílica macroporosa             | 60                      | 15  | 18   |
| BF selectiva a nitrato, macroporosa | 35                      | 2   | 3  |
| Acrílica bifuncional                | 25                      | 10  | 15   |
| BD estirénica, macroporosa          | 60                      | 12  | 12   |
| BD acrílica, gel                    | 60                      | 25  | 20   |
| BD selectiva a boro                 | 40                      | 5   | 6  |

BF: Base fuerte; BD: Base débil

### 5.5.- Valor del pH

Aunque la mayor parte de las resinas presenta estabilidad química para cualquier valor de pH comprendido entre 0 y 14, su funcionamiento se ve afectado por el valor de este parámetro. Las resinas catiónicas no trabajan bien a pH muy bajo (exceso de H<sup>+</sup>), mientras que las resinas aniónicas no funcionan bien a pH alto (exceso de OH<sup>-</sup>), ya que en ambos casos el exceso de iones mantendría el sistema en un estado de regeneración continua e impediría el intercambio.

Las resinas de intercambio se diseñan para trabajar en un rango de pH óptimo. En la Tabla 16 se indican algunos rangos típicos de pH para la fase de servicio de los distintos tipos genéricos de resinas. Los valores para cada resina individual son especificados por el fabricante en la hoja de características.

**Tabla 16. Rangos de pH de operación para distintas categorías de resinas de intercambio iónico (Kirk-Othmer, 1999).**

| Tipo de resina | Rango de pH de operación |
|----------------|--------------------------|
| Ácido débil    | 6 – 14                   |
| Ácido fuerte   | 4 – 14                   |
| Básica débil   | 0 – 7                    |
| Básica fuerte  | 0 – 9                    |

### 6.- PROBLEMAS DE EXPLOTACIÓN

La presencia de ciertas especies químicas en el agua de alimentación puede provocar problemas de operación en los equipos de intercambio iónico. La presencia de hierro y manganeso da lugar a la aparición de precipitados que producen el atascamiento de los huecos entre partículas y originan pérdidas de carga, reducción de la capacidad intercambiadora y en la calidad del agua tratada. Las aguas de alimentación deben ser sometidas a una eliminación previa de estos metales, que garantice que su concentración se mantiene por debajo del nivel recomendado. Las resinas deben ser limpiadas con HCl para eliminar los precipitados. También la presencia de aluminio y bario en el agua de alimentación pueden provocar la aparición de precipitados.

Los oxidantes fuertes, como cloro y ozono, degradan la estructura de las resinas, deteriorando la calidad del agua producida. Su utilización como desinfectantes para la desinfección o la prevención del bioensuciamiento debe hacerse en condiciones de dosificación mínimas. En caso de no ser precisos, es recomendable eliminar el exceso de oxidante mediante filtros previos de carbón activo.

Otros compuestos que pueden dar lugar a oclusiones y atascamientos son los aceites y grasas y los polielectrolitos. Su presencia en el agua de alimentación da lugar a la reducción de la capacidad de intercambio de las resinas, ciclos cada vez más cortos y pérdida de calidad en el agua producida. Su eliminación requiere una cuidadosa limpieza de las resinas.

## BIBLIOGRAFÍA

- Chougule, M. B., Sonaje, N. P. (2013). Cost-benefit analysis of wastewater recycling plant for textile wet processing. *International Journal of Computational Engineering Research* 3(2) 27-31
- Corbitt, R. (2003). *Manual de referencia de la ingeniería ambiental*. McGraw-Hill/Interamericana de España. ISBN: 9788448135966
- Coulson, J. M. (1999). *Coulson & Richardson's Chemical Engineering*. (6ª ed.) Oxford: Butterworth Heinemann. ISBN: 0-7506-4444-3
- Crittenden, J. G., Trussell, R. R., Hand, D. W., Howe K. J., Tchobanoglous, G. (2005). "MWH's Water Treatment: Principles and Design", 2ª edición. John Wiley & Sons, Inc. ISBN: 978-0-471-11018-7
- Dardel, F. (2015). "Ion Exchange". En: <http://dardel.info/IX/index.html> (consultado en octubre de 2015)
- Dégremont (2001). *Mémento technique de l'eau*. Rueil-Malmaison (Francia): Ondeo Degrémont.
- Karcher, S., Kornmuller, A., Jekel, M. (2001). Anion exchange resins for removal of reactive dyes from textile wastewaters. *Water Research*, 36(19) 4717-4724.
- Kauspediene, D., Gefeniene, A., Kazlauskienė, F., Ragauskas, R., Selskienė, A. (2013). Simultaneous removal of azo and phthalocyanine dyes from aqueous solutions using weak base anion exchange resin. *Water Air Soil Pollution* 224, 1769-1782
- Kirk-Othmer (1999). *Encyclopedia of Chemical Technology* (5ª ed.) Entrada: "Ion Exchange". New York: John Wiley and Sons. ISBN: 9780471238966
- Nalco Chemical Company (1988). "The NALCO Water Handbook". New York: McGraw-Hill ISBN 0-07-045872-3
- Pang, Y. L., Abdullah, A. Z. (2013). Current status of textile industry wastewater management and research progress in Malaysia: A review. *Clean Soil Air Water*, 41(8) 751-764
- Perry, R. H. (ed.) (2001). *Manual del ingeniero químico*. 7ª ed., (4ª ed. en español). Madrid: McGraw-Hill, 2001. ISBN: 84-481-3008-1
- Raglu, S., Basha, C. A. (2007). Chemical or electrochemical techniques, followed by ion exchange, for recycle of textile dye wastewater. *Journal of Hazardous Materials* 149(2) 324-30
- reactive dyes. *Dyes and Pigments* 51, 111-125
- Seader, J. D., Henley, E. J. (1998). *Separation Process Principles*. New York: John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-58626-9
- Wawrzkiwicz, M. (2013). Removal of C.I. Basic Blue 3 dye by sorption onto cation exchange resin, functionalized and non-functionalized polymeric sorbents from aqueous solutions and wastewaters. *Chemical Engineering Journal* 217:414-425



## REFERENCIAS DE TECNOLOGÍA

---

Dowex Ion Exchange Resins. Dow Water and Process Solutions. [www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions](http://www.dow.com/en-us/water-and-process-solutions)

Nalco Chemical Company. Ion Exchange Processes. [www.nalco.com](http://www.nalco.com)

Indion Ion Exchange. [www.indianionexchange.com](http://www.indianionexchange.com)

Europrogetti Italy. Filtri a resine decoloranti. [www.europrogetti-italy.com](http://www.europrogetti-italy.com)

Purolite Corporation. [www.purolite.com](http://www.purolite.com)

Rohm and Haas ion exchange resins. <http://www.lenntech.es/productos/rohms-haas.htm>

Lanxess Lewatit ion exchange resins. <http://lpt.lanxess.com/en/lewatit/>

Mitsubishi ion exchange resins. <http://www.diaion.com/>

MIEX® Magnetic ion Exchange. <http://www.miexresin.com/>

SIX® Suspended ion Exchange. <http://pwntechnologies.com/portfolio-item/six-suspended-ion-exchange-process/>

Dégremont Technologies. <http://www.degremont-technologies.com/Ion-Exchange-Skids>

## ANEXO 1.- ASPECTOS QUE DEBEN CONSIDERARSE EN EL DISEÑO DE UN SISTEMA DE INTERCAMBIO IÓNICO (Corbitt, 2003)

1. Basándose en los componentes a eliminar, ¿cuál es la mejor secuencia para las unidades de intercambio iónico?
2. Basándose en los componentes a eliminar, ¿cuáles son las resinas idóneas?
3. Basándose en los posibles ahorros en mano de obra, ¿deben regenerarse las unidades de forma manual o automática?
4. ¿Debe situarse un tanque de almacenamiento con suficiente capacidad a la salida del equipo para cubrir las horas en las que se encuentre en regeneración, o debe disponerse de una línea de reserva? ¿Puede regenerarse el sistema de intercambio iónico durante las horas sin producción?
5. ¿Se han equilibrado los tipos y tamaños de las resinas de intercambio catiónico y aniónico para permitir la regeneración simultánea de todo el sistema?
6. Respecto a los requerimientos de espacio del sistema de intercambio iónico, ¿se ha tenido en cuenta la accesibilidad a las válvulas de control, conductos, equipos de bombeo de reactivos, depósitos para los reactivos y el acceso de vehículos de suministro?
7. ¿Se han tomado precauciones frente a los posibles vertidos de reactivos en la zona de operación?
8. ¿Cuál es la situación del panel de control en relación a las unidades de proceso?
9. ¿Está correctamente dimensionado el sumidero del residuo de regeneración?
10. ¿Se han elegido los materiales correctos para las columnas de intercambio, los depósitos de almacenamiento de reactivos, tuberías, bombas, válvulas y resto de equipos auxiliares?
11. ¿Es posible retirar cualquier pieza del equipo sin necesidad de desmantelarlo?
12. ¿Está el equipo correctamente identificado con etiquetas, números de válvula, codificación de tuberías y numeración de bombas de acuerdo con las instrucciones de operación y mantenimiento suministradas por el fabricante?

## ANEXO 2

# ESTIMACIÓN DE SUPERFICIES NECESARIAS

### ESTIMACIÓN DE SUPERFICIE NECESARIA PARA INTERCAMBIADORES

*Este apartado está en blanco de forma intencionada.*

## ANEXO 3 DESCRIPCIÓN GRÁFICA DE UNIDADES DE PROCESO





Figura 2.- Unidad de intercambio iónico en una sola columna (Europrogetti Recovery Water Technology [www.europrogetti-italy.com](http://www.europrogetti-italy.com))



Figura 3.- Sistema de intercambio iónico para desmineralización de agua de calderas. Dos líneas sistema Up Flow Dégremont. Caudal:  $2 \times 48 \text{ m}^3/\text{h}$ . (Dégremont, 2001)