



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

---

---

**CASO DE EVALUACIÓN ENTRE DOS TECNOLOGÍAS  
PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA DESMINERALIZADA:  
INTERCAMBIO IÓNICO VS. ELECTRODESIONIZACIÓN**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
I N G E N I E R A Q U Í M I C A**

**P R E S E N T A  
SOLEIL ORTIZ DE ZÁRATE CÓRDOVA**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. ALFONSO DURÁN MORENO**

**MÉXICO, D.F. FEBRERO 2014**





Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:** Profesor. María Rafaela Gutiérrez Lara

**VOCAL:** Profesor. Alfonso Durán Moreno

**SECRETARIO:** Profesor. Eduardo Flores Palomino

**1er. SUPLENTE:** Profesor. Federico Carlos Hernández Chavarría

**2° SUPLENTE:** Profesor. Jorge Alejandro Avella Martínez

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA:**

**Universidad Nacional Autónoma de México, Torre de Ingeniería 3er Piso Ala Sur. Ciudad Universitaria 04510, Coyoacán, México D.F.**

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**Dr. Alfonso Durán Moreno**

**SUSTENTANTE:**

---

**Soleil Ortiz de Zárate Córdova**

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
1.1. Problemática .....	9
1.2. Objetivo general .....	9
1.3. Objetivos particulares .....	9
<b>2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....</b>	<b>10</b>
2.1. El agua desmineralizada y sus usos.....	10
2.2. Calidad del agua .....	18
2.3. Tecnologías para la desmineralización de agua.....	25
<b>3. CASO DE ESTUDIO Y EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE DESMINERALIZACION DE AGUA.....</b>	<b>48</b>
3.1. Caso de estudio .....	48
3.2. Evaluación de las tecnologías .....	55
<b>4. DISCUSION DE RESULTADOS.....</b>	<b>75</b>
<b>5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>82</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>84</b>
<b>7. ANEXOS .....</b>	<b>86</b>
A)Evaluación de tecnologías .....	86
B)Estimado de inversión.....	95

## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1. Usos del agua desmineralizada en diferentes industrias (Lenntech, 2013).....</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2. Efectos del tratamiento inadecuado del agua a calderas (CONUEE, 2009). ....</i>	<i>13</i>
<i>Tabla 3. Calidad de agua desmineralizada.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 4. Límites de composición del agua de caldera para varias presiones de trabajo... </i>	<i>20</i>
<i>Tabla 5. Límites de contenido de parámetros en agua de alimentación .....</i>	<i>20</i>
<i>Tabla 6. Límites permitidos de sílice en el agua para caldera.....</i>	<i>24</i>
<i>Tabla 7. Análisis de agua obtenida en el sistema combinado de Ósmosis Inversa(OI) y electrodesionización en continuo (CEDI) .....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 8. Ventajas e inconvenientes de los diferentes tipos de materiales para membranas. (Cifuentes, 2008).....</i>	<i>47</i>
<i>Tabla 9. Calidad de agua de entrada a los sistemas de desmineralización.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 10. Calidad de agua de salida a los sistemas de desmineralización. ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabla 11. Descripción de los equipos principales de las UDAs. ....</i>	<i>53</i>
<i>Tabla 12. Condiciones de operación para el sistema elegido.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabla 13. Aspectos a considerar en la evaluación.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 14. Definición de filtros restrictivos.....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 15. Asignación de la ponderación de cada aspecto a evaluar .....</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 16. Aspectos y factores a ser evaluados en la evaluación de estudio.....</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 17. Escala de calificación de atributos. ....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 18. Puntuación de los criterios técnicos de proceso para ambas tecnologías. ....</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 19. Puntuación de los criterios técnicos complementarios para las tecnologías ....</i>	<i>64</i>
<i>Tabla 20. Puntuación de los criterios económicos-financieros para ambas tecnologías....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 21. Comparación de beneficios y costos de inversión entre CEDI e intercambio iónico convencional.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabla 22. Puntuación de los estratégicos-tácticos complementarios para las tecnologías</i>	<i>72</i>
<i>Tabla 23. Matriz de selección de la mejor tecnología para la desmineralización de agua. ..</i>	<i>74</i>
<i>Tabla 24. Aspectos a considerar en la evaluación. (Oliverio, 1998).....</i>	<i>92</i>
<i>Tabla 25. Matriz de Selección de Tecnología (Oliverio, 1998).....</i>	<i>93</i>
<i>Tabla 26. Aspectos a considerar en la evaluación. (Oliverio, 1998).....</i>	<i>94</i>
<i>Tabla 27. Factores para estimar el capital de inversión de los equipos basados en el costo de equipo entregado. (Peters, 1991) .....</i>	<i>96</i>
<i>Tabla 28. Costos obtenidos de una cotización utilizada para un sistema propuesto para el 2009. ....</i>	<i>98</i>

<b>Tabla 29. Costos directos obtenidos de una cotización echa para nuestro sistema propuesto para el 2009. ....</b>	<b>99</b>
<b>Tabla 30. Costos directos inicial total.....</b>	<b>99</b>
<b>Tabla 31. Descripción de los equipos principales del sistema de OI/OI+CEDI.....</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 32. Costo directo de inversión de OI/OI+CEDI.....</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 33. Costos directos inicial total.....</b>	<b>101</b>
<b>Tabla 34. Premisas Generales. ....</b>	<b>102</b>
<b>Tabla 35. Volumen de materia prima, Reactivos y servicios auxiliares (base diaria) Intercambio iónico. ....</b>	<b>102</b>
<b>Tabla 36. Precios unitarios de materias primas, reactivos y servicios auxiliares para intercambio iónico. ....</b>	<b>103</b>
<b>Tabla 37. Costos fijos directos para Intercambio iónico.....</b>	<b>103</b>
<b>Tabla 38. Volumen de materia prima, Reactivos y servicios auxiliares (base diaria) CEDI</b>	<b>103</b>
<b>Tabla 39. Precios unitarios de materia prima, reactivos y servicios auxiliares para CEDI</b>	<b>104</b>
<b>Tabla 40. Costos fijos directos para CEDI.....</b>	<b>104</b>
<b>Tabla 41. Costos variables de producción para el intercambio iónico.....</b>	<b>105</b>
<b>Tabla 42. Costos variables de producción para CEDI. ....</b>	<b>106</b>
<b>Tabla 43. Análisis económico del Intercambio Iónico. ....</b>	<b>107</b>
<b>Tabla 44. Análisis económico del CEDI .....</b>	<b>109</b>
<b>Tabla 45. Valores del valor presente durante el horizonte de evaluación para el intercambio iónico.....</b>	<b>111</b>
<b>Tabla 46. Valores del valor presente durante el horizonte de evaluación para el CEDI ....</b>	<b>112</b>
<b>Tabla 47. Análisis de sensibilidad de Intercambio Iónico (USD\$).....</b>	<b>113</b>
<b>Tabla 48. Análisis de sensibilidad de Intercambio Iónico (%). ....</b>	<b>114</b>
<b>Tabla 49. Análisis de sensibilidad de CEDI (USD\$). ....</b>	<b>115</b>
<b>Tabla 50. Análisis de sensibilidad de CEDI (%). ....</b>	<b>115</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1. Esquema de perlas de resinas catiónica y aniónica. ....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2. Perlas de resinas agotadas. Los iones H+ y OH- han sido liberados en el agua.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 3. Representación esquemática de la desmineralización.....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 4. Resina de intercambio catiónico que muestra esquemáticamente la matriz cargada negativamente y el intercambio con los iones positivos.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 5. Intercambio iónico. a. Corriente en paralelo y b. Contra corriente. Contratos de una columna de regeneración con cama empacada (con resinas cationes en forma H+, para remover Na+). (Applebaum, 1968).....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 6. Sistema de un desgasificador por tiro forzado (GLEGG, 2000). ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 7. Diagrama ilustrativo de cómo operan las tecnologías de desmineralización de tres generaciones. (Sanz, 2011).....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 8. Compartimiento de concentrado y del diluido de un módulo de CEDI. (CEDI UNIVERSITY, 2012).....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 9. Rangos de filtración de las tecnologías de membranas (Cifuentes, 2008).....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 10. Nivel de retención por las diferentes tecnologías de membranas. (Cifuentes, 2008) .....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 11. Esquemática de un sistema de Ósmosis Inversa (Cifuentes, 2008).....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 12. Diagrama del proceso actual de desmineralización de agua.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 13. Arreglo típico de un sistema de doble paso Ósmosis Inversa con CEDI. ....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 14. Diferentes rangos de puntuación a los criterios técnicos.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 15. Diferentes rangos de puntuación a los criterios técnicos complementarios.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 16. Puntuación de los criterios económicos-financieros. ....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 17. Diferentes rangos de puntuación a los criterios estratégico-tácticos. ....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 18. Factores relacionados de los criterios técnicos de proceso para ambas tecnologías.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 19. Factores relacionados de los criterios técnicos complementarios para ambas tecnologías.....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 20. Factores relacionados de los criterios económico-financieros para ambas tecnologías.....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 21. Factores relacionados de los criterios estratégico-tácticos para ambas tecnologías.....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 22. Gráfica de las tecnologías comparadas para la evaluación.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 23. Indicadores Económicos del Chemical Engineering (Chemical-Engineering, 2013). ....</i>	<i>100</i>
<i>Figura 24. Gráfica del análisis de sensibilidad de las variables con respecto al CAE para el intercambio iónico.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 25. Gráfica del análisis de sensibilidad de las variables con respecto al CAE para el OI/CEDI .....</i>	<i>116</i>

## RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo comparar dos tecnologías para el proceso de desmineralización de agua con la finalidad para decidir cuál de las dos tecnologías es la mejor opción en cuestiones del uso eficiente del agua, protección al ambiente, costos de inversión, operación y mantenimiento para un caso de estudio específico. Para la comparación de las tecnologías, se analizaron los fundamentos técnicos de operación, se seleccionó una metodología de evaluación y por último se realizó un análisis económico. Las tecnologías de desmineralización de agua que fueron evaluadas son la deionización por medio de resinas de Intercambio iónico y la de Ósmosis Inversa (doble paso) con Electrodesionización en continuo (2OI+CEDI).

Se analizaron estos casos debido a que la primera es utilizada prácticamente en todos los centros de trabajo del Sistema Nacional de Refinación (SNR), por lo que se cuenta con información histórica referente a su uso, operación y mantenimiento; además siendo de las tecnologías más utilizadas a nivel mundial.

Por otro lado, el sistema de electrodesionización en continuo, es una tecnología relativamente nueva (alrededor de 20 años), pero que ha logrado desarrollarse en varias industrias, como es el caso del sector energético, tanto a nivel nacional como mundial. Actualmente, una de sus principales características es que logra operar sin reactivos químicos adicionales, sólo con los químicos requeridos de limpieza del sistema de Ósmosis Inversa, haciendo que el costo de operación y los daños al ambiente sea menores comparados con los del Intercambio iónico.

Diariamente en la industria de nuestro país se utilizan miles de toneladas de reactivos químicos (aproximadamente 50,000 t/año)<sup>1</sup> considerados peligrosos, como son el ácido sulfúrico y el hidróxido de sodio, para la producción de agua desmineralizada (comúnmente utilizada para agua de alimentación a calderas).

El análisis realizado en esta tesis permitió demostrar que si es factible la sustitución de la tecnología de intercambio iónico por la de Ósmosis Inversa con electrodesionización en el SNR, considerando aspectos técnicos, económicos y ambientales.

---

<sup>1</sup> Basado en el consumo de las empresas generadoras de combustibles y energía eléctrica.

---

## 1. INTRODUCCIÓN

La necesidad de producción de agua desmineralizada especialmente con calidad necesaria para la generación de vapor en el sector de la industria de la refinación, ha propiciado el desarrollo y avance de diferentes tecnologías de tratamiento del agua.

Los principales objetivos para el desarrollo de nuevas tecnologías en el tratamiento para calderas son:

- Disminuir el costo del vapor producido
- Reducir el trabajo de mantenimiento
- Evitar daños en el equipo de producción de vapor
- Reducir las descargas tóxicas y minimizar el manejo de reactivos químicos

Estos objetivos están ampliamente relacionados con los costos de producción de agua desmineralizada, con la calidad del agua de alimentación y con la producción del sistema; ya que al tener un tratamiento adecuado, se podrán reducir los problemas haciendo al sistema más eficiente y económico.

El agua de alimentación a la caldera debe tener cierta calidad de tal forma que las impurezas y sales disueltas en ella se puedan concentrar en un número razonable de veces dentro del sistema sin que por ello se superen los límites permitidos por el fabricante. Si el agua no cumple este requerimiento será necesario utilizar un proceso conocido como desmineralización para eliminar todas estas impurezas y así evitar incrustaciones, corrosión, depósitos y proliferación orgánica en los equipos.

Existen distintas tecnologías para la desmineralización de agua dentro de las cuales se mencionan las siguientes: intercambio iónico, Ósmosis Inversa, electrodiálisis, electrodesionización. El Sistema Nacional de Refinación (SNR) en México cuenta con unidades desmineralizadoras las cuales se componen por unidades de intercambio iónico, ya que es una de las tecnologías más eficientes. Actualmente en el SNR, se quiere implementar nuevas tecnologías que ayuden a cumplir con sus políticas de preservación del medio ambiente.

En este trabajo se analizó un caso de estudio de una unidad desmineralizadora de agua para alimentación a calderas con una capacidad de 1,200 m<sup>3</sup>/h, se efectuó una comparación tecnológica de al menos dos tecnologías, estableciendo criterios de evaluación para dichas tecnologías, se analizaron los valores obtenidos para decidir cuál de estas tecnologías es mejor basándose principalmente en los criterios técnicos, económicos y ambientales.

### 1.1. Problemática

Actualmente en el Sistema Nacional de Refinación, la producción de agua con calidad para alimentación a calderas se realiza utilizando el proceso de desionización con resinas de intercambio iónico el cual produce aguas residuales con un alto contenido de sales y que requieren su neutralización. En el intercambio iónico se consumen grandes cantidades de ácido sulfúrico e hidróxido de sodio para la regeneración de las resinas de intercambio iónico. Considerando factores ambientales como la contaminación del agua, la producción de aguas residuales y los altos costos de operación en cuestiones de la producción del agua para alimentación a calderas, se busca sustituir la infraestructura actual con nuevas tecnologías para poder disminuir estos factores, por lo que se requieren tecnologías eficientes en consumo y producción.

### 1.2. Objetivo general

Determinar cuál es la tecnología más adecuada para la producción de agua desmineralizada para alimentación a calderas en el Sistema Nacional de Refinación, mediante una evaluación técnica, económica y ambiental, aportando elementos de juicio para la toma de decisiones, con el fin de la modernización de la infraestructura para a la desmineralización de agua.

### 1.3. Objetivos particulares

- Revisar los fundamentos teóricos de los procesos de desmineralización de agua que se utilizan en instalaciones industriales a la escala de las refinerías.
- Establecer los criterios necesarios para una adecuada evaluación de tecnologías de desmineralización de agua y su aplicación a un caso de estudio.
- Establecer los costos de inversión y operación de cada una de las tecnologías para el caso de estudio.
- Seleccionar la opción de desmineralización de agua más adecuada.

## 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 2.1. El agua desmineralizada y sus usos

La desmineralización es el proceso de remoción de las impurezas minerales o sales disueltas en el agua. Los iones cargados positivamente son llamados cationes y los cargados negativamente aniones; estos permiten que el agua o la solución conduzcan la electricidad y son denominados electrólitos. El término deionización es utilizado para designar el proceso de la remoción de estos iones.

El agua desmineralizada se puede producir a partir de la tecnología de intercambio iónico con resinas catiónicas y aniónicas. Las resinas de intercambio iónico necesitan ser regeneradas con un ácido o una sustancia cáustica. Para llevar a cabo el proceso de deionización así como una mejor operación, se plantean diversos sistemas de desmineralización como es el caso del sistema de Ósmosis Inversa de doble paso más un proceso continuo de Electrodesionización (2OI+CEDI).

El agua desmineralizada es muy corrosiva para los metales, incluso con el acero inoxidable, es por eso que en la mayoría de los casos es manejada en materiales plásticos o aleaciones especiales.

El agua desmineralizada es considerada como un agua de alta pureza con bajo contenido en sales y muy baja conductividad. La necesidad de producción de agua con estas características para una gran cantidad de usos en la industria, ha propiciado el desarrollo y avance de diferentes tecnologías de tratamiento de agua dirigidas a la eliminación de todas las impurezas presentes en el agua (Applebaum, 1968).

En la Tabla 1 se muestra un listado de los diferentes usos del agua desmineralizada en diversas industrias.

**Tabla 1.** Usos del agua desmineralizada en diferentes industrias (Lenntech, 2013).

Industria	Descripción
Eléctrica	El tratamiento de agua para la operación de calderas de alta presión y generación de vapor para la producción de energía eléctrica implica el diseño de plantas con alta disponibilidad, fiabilidad y calidad del agua producida.
Petrolera	Es utilizada principalmente para la operación de calderas, calderetas y turbinas. También es utilizada en agua para procesos. En ocasiones se usa para la limpieza de equipos que requieran una buena calidad, ya que algunos son equipos que requieran un trato específico.
Farmacéutica	Utilizada principalmente en la preparación de formas farmacéuticas estériles y no estériles, también para el lavado de equipo e instrumentación utilizados para su preparación
Investigación	Los laboratorios de investigación y desarrollo tecnológico en centros de investigación o en universidades, requieren agua de muy alta calidad para eliminar variables ocultas en los resultados de sus análisis. En los análisis clínicos, en trabajos con cultivos celulares o con fluidos con componentes bioquímicos es indispensable el uso de agua de la mejor calidad y pureza. La esterilización del agua también es importante para evitar la presencia de esporas y para controlar el crecimiento microbiano.
Electrónica	La fabricación de los productos electrónicos involucra el uso de agua de alta pureza, frecuentemente en grandes cantidades. En la industria de la microelectrónica, los procesos de fabricación son acumulativos, esto significa que cada proceso es afectado por el proceso anterior. Cuando las partículas y otras impurezas están presentes en los químicos, agua y gases utilizados en el proceso, el rendimiento del proceso disminuye.
Microelectrónica	La producción de semiconductores en la industria microelectrónica requiere el agua de alta pureza de mayor calidad.
Industria electro galvánica.	Hace uso del agua desmineralizada para el desengrasado, la galvanización, el bruñimiento y la conserva de materiales.
Alimentaria	El tratamiento para agua de consumo humano es muy importante en la industria alimentaria y en el sector doméstico. Por ejemplo, una aplicación importante de la industria alimentaria es el proceso de la melaza. La producción industrial de melaza cristalizada y melaza líquida sería prácticamente imposible sin el uso de resinas de intercambio iónico macroporosas. Las resinas también se utilizan para obtener el azúcar blanco a partir del azúcar sin refinar. Las diferentes resinas de intercambio iónico eliminan las sales minerales de los ácidos alimentarios y la gelatina, extrae sustancias amargas no deseadas del jugo de naranja o limón, eliminan específicamente determinados componentes del mosto como sales minerales o sustancias colorantes de la futa no deseadas, o purifica la glicerina en bruto eliminando las sales, ácidos y bases.

### 2.1.1. Agua de alimentación a calderas

Este trabajo está enfocado en la calidad de agua para alimentación a calderas en la industria petrolera y en particular del sector de refinación. A continuación se describirá con mayor profundidad el uso del agua de alimentación a calderas y los problemas que se generan por no contar con un buen tratamiento previo.

El tratamiento de agua para la operación de calderas de alta presión y generación de vapor para producción de energía eléctrica implica el diseño de plantas con alta capacidad, fiabilidad y calidad del agua producida. El diseño convencional se basa en la aplicación de procesos de intercambio iónico con columnas catiónicas y aniónicas seguidas de lechos mixtos para alcanzar valores de conductividad inferior a  $0.10 \mu\text{S/cm}$  y concentración de sílice ( $\text{SiO}_2$ )  $\leq 0.02 \text{ mg/L}$  (Sanz, 2011).

Las calderas son equipos que necesitan operar eficientemente para asegurar el costo, la seguridad y durabilidad de operación; y a todo lo anterior contribuye a la calidad del agua con que se alimenta.

El agua de alimentación de la caldera se utiliza para producir vapor. La presión del vapor ( $0.5\text{-}100 \text{ kg/cm}^2$ ) determina la temperatura y la capacidad energética, pero también la calidad del agua de alimentación.

Una de las reglas primordiales para la calidad de agua en generadores de vapor es “cuanto más alta sea la presión, más estricta deberá ser la calidad del agua de alimentación de la caldera” (Lenntech, 2013).

Cuando el agua de alimentación se calienta, se evapora y sale de la caldera como vapor destilado dejando impurezas atrás. Entre más agua se evapora en la caldera, se añade más líquido para reemplazarla. Como resultado de esto, la cantidad de sólidos disueltos al interior de la caldera aumenta gradualmente.

Las incrustaciones, y reducen el grado de transferencia de calor. Conforme la incrustación crece, el vapor y el agua son cada vez menos capaces de mantener estas superficies frías y comienzan a recalentarse, al grado de reducir la resistencia de metal de los tubos y causar su ruptura.

En la Tabla 2 se muestran los efectos del tratamiento inadecuado del agua de la caldera.

**Tabla 2.** Efectos del tratamiento inadecuado del agua a calderas (CONUEE, 2009).

Problema	Efecto	Observaciones
Sílice	Incrustación	Forma de recubrimiento duro y vidrioso en las superficies internas de la caldera. Se vaporiza en las calderas de alta presión y se deposita en los alabes de las turbinas.
Dureza		El $\text{CaSO}_4$ , $\text{MgSO}_3$ , $\text{CaCO}_3$ y $\text{MgCO}_3$ forman incrustaciones en los tubos de las calderas
Depósitos: incrustaciones y lodos	Se reduce la transferencia de calor	Pérdida de eficiencia, desperdicio de combustible.
Oxígeno	Corrosión	Causa erosión en las superficies metálicas de la caldera y las tuberías de condensado.
Dióxido de carbono		Es la causa principal del deterioro de las líneas de retorno de condensado.
Oxígeno y Dióxido de carbono		Su combinación es más corrosiva que cuando actúan aislados.
Alta concentración de sales en el agua de caldera	Arrastre de agua y espumado	Contaminación del sistema de distribución, vapor húmedo y depósitos en las tuberías, en alabes de turbina y asientos de válvulas.
Alta concentración cáustica	Fragilidad cáustica	Causa fisuras intercristalinas del metal de la caldera (tubos)
Reparaciones	Pérdidas económicas	Reparación de calderas dañadas y limpieza mecánica de calderas con incrustaciones severas.
Paros no programado		Se reduce la eficiencia y capacidad de toda la planta

A continuación se describen los problemas, asociados al tratamiento de agua, encontrados con mayor frecuencia en las calderas.

## 2.1.2. Corrosión

Las principales fuentes de corrosión en calderas son la corrosión por oxígeno y la corrosión caustica.

A continuación se describe en qué consiste cada uno de estos tipos de corrosión, cuales son los factores que la favorecen, que aspecto tiene y de qué manera pueden ser prevenidas.

### 2.1.2.1. Corrosión por oxígeno

En medio acuoso, el hierro se oxida a hidróxido ferroso por la acción del ion hidroxilo. Éste, por acción de oxígeno en disolución pasa a hidróxido férrico (de color rojizo), que implica corrosión. A elevadas temperaturas el hidróxido ferroso se convierte a una capa densa de protección de color negro denominada magnetita, que protege el metal del agua y del oxígeno.

La prevención de la corrosión por oxígeno se consigue mediante una adecuada desgasificación del agua de alimentación y la aplicación de un exceso de productos secuestrantes de oxígeno en el agua de la caldera.

Su función es eliminar químicamente el residual de oxígeno disuelto en el agua de alimentación tras la desgasificación mecánica. Su uso evita la corrosión por oxígeno en forma de "pitting" en la caldera (Behn, 2012).

Como productos secuestrantes de oxígeno se tiene: al sulfito de sodio y la hidracina.

**Sulfito de sodio:** Reacciona con el oxígeno formando sulfato de sodio. Debe dosificarse de forma continua en el agua de alimentación de la caldera, controlando la existencia de residual para eliminar el oxígeno. La formación de sulfato de sodio aumenta los sólidos disueltos y a presiones altas (>50 kg/cm<sup>2</sup>) se descompone en dióxido de azufre. La velocidad de reacción entre sulfito de sodio y oxígeno es rápida. Sin embargo a temperaturas bajas es necesario utilizar trazas de sulfato de cobalto (Catalizador) para acelerar la reacción. Para presiones mayores a 6 kg/cm<sup>2</sup> no es recomendable el sulfito de sodio.

La reacción química que se lleva a cabo entre el sulfito y el oxígeno disuelto en el agua es la siguiente:



**Hidracina:** Sustituye al sulfito en sistemas de alta presión. La ventaja principal es que no incrementa sólidos en la caldera. Actualmente el uso se circunscribe a los grandes sistemas de generación de vapor. La hidracina (al 35%) se alimenta directamente al agua de alimentación de 0,05 – 0,10 mg/L. A temperaturas inferiores a 150 °C la reacción es muy lenta, el uso de hidroquinona como catalizador aumenta la velocidad de la reacción 10 – 100 veces. A temperaturas superiores a 400 °C la hidracina se comienza a descomponer en amoniaco, que es corrosivo para el cobre y otras aleaciones (Behn, 2012).

La reacción química que se lleva a cabo entre la hidracina y el oxígeno es la siguiente:



### 2.1.2.2. Corrosión cáustica

La concentración de la sosa cáustica ocurre como resultado de una inertización con vapor (lo que permite que las sales se concentren en la superficie metálica de la caldera) o por la localización de la ebullición debajo de los depósitos porosos de la superficie de los tubos. La corrosión cáustica ocurre cuando la sosa se concentra y disuelve la capa protectora de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), causando una pérdida del metal y eventualmente fallas.

Las siguientes condiciones son necesarias para que pueda ocurrir este tipo de corrosión:

1. El metal debe de estar agrietado.
2. El agua de alimentación debe de contener concentraciones de sosa.
3. Por lo menos debe de haber presencia de trazas de sílice en el agua de alimentación.

La inertización con vapor es una condición que ocurre cuando una capa de vapor se forma entre el agua de alimentación y la pared del tubo. Bajo estas condiciones, insuficiente agua alcanza la superficie del tubo para poder tener una buena transferencia de calor. El agua que alcanza las paredes de la caldera es vaporizada rápidamente, dejando atrás la solución cáustica concentrada, lo que provoca la corrosión.

El ataque cáustico puede ser prevenido mediante un control fosfato/pH, el fosfato genera una solución “buffer” con el agua, reduciendo grandes cambios en el pH debido al aumento de las altas concentraciones de sosa cáustica.

El exceso de sosa cáustica con el fosfato disódico forma fosfato trisódico y agua como se muestra en la siguiente reacción:



Este tipo de corrosión se manifiesta en forma de cavidades profundas, semejantes a la corrosión por oxígeno, rellenas de óxidos de color negro, presentes solamente en las zonas de elevada liberación térmica (fogón, placa trasera y cámara trasera) de una caldera (Behn, 2012).

### 2.1.2.3. Corrosión de las líneas retorno de condensado

Las líneas de retorno de condensado, no forman parte de una caldera; sin embargo, su corrosión tiene efectos sobre las calderas y puede ser prevenida con un adecuado tratamiento de agua.

La corrosión en las líneas de retorno de condensado se produce por la acción del ácido carbónico que en estas se forma. Este tipo de corrosión tiene efectos sobre la caldera, ya que los óxidos producidos son arrastrados a la caldera con el agua de alimentación. Toda caldera cuya agua tiene un color rojizo presenta problemas de corrosión en las líneas de retorno de condensado.

La prevención de la corrosión en las líneas de retorno de condensado, puede ser conseguida mediante aminas neutralizantes que equilibran la acción del ácido carbónico y aminas filmicas que protegen las líneas (Behn, 2012).

### 2.1.3. Incrustaciones

La presencia de incrustaciones en una caldera es especialmente grave debido a que su baja conductividad térmica actúa como aislante térmico, provocando problemas de enfriamiento de las superficies metálicas y puede llegar a causar daños por sobrecalentamiento. A medida que aumenta el espesor de la capa de incrustaciones, para un mismo flujo de calor, aumenta la temperatura del metal.

Las incrustaciones corresponden a depósitos de carbonatos y silicatos de calcio y magnesio, formados debido a una excesiva concentración de estas sales en el agua de alimentación o bien, por regímenes de purga insuficientes.

La acción de dispersantes, lavados químicos o las dilataciones y contracciones de una caldera pueden ayudar a eliminar las incrustaciones, para prevenir su acumulación en el fondo del cuerpo de presión. En el caso de que estas incrustaciones no sean removidas, se corre el riesgo de alterar a la caldera y obstruir las líneas de purga de fondo, con lo que el problema puede tomarse aún más grave.

El arrastre de condensado en una caldera tiene relación con el suministro de vapor húmedo (con gotas de agua). El suministro de vapor húmedo puede tener relación con deficiencias mecánicas y químicas.

Las deficiencias mecánicas tienen relación con la operación debido a elevados niveles de agua, deficiencias de los separadores de gota, sobrecargas térmicas, variaciones bruscas en los consumos, entre las principales razones (Behn, 2012)

#### **2.1.4. Influencia de la estructura cristalina de las sales disueltas en las incrustaciones.**

Cuando se habla de la dureza del agua se hace referencia a la presencia de iones disueltos, en especial iones de calcio  $[Ca^{2+}]$  e iones de magnesio  $[Mg^{2+}]$  cuyas cargas netas son positivas (cationes).

La carga positiva de estos cationes sólidos se balancea con la presencia de aniones (con carga neta negativa), de los cuales los más influyentes son los bicarbonatos  $[HCO_3^-]$  y los carbonatos  $[CO_3^{2-}]$ . Estos aniones tienen su origen en el dióxido de carbono  $[CO_2]$  disuelto naturalmente en el agua.

Los iones de signo opuesto se unen entre sí (debido a fuerzas electrostáticas naturales) mediante enlace iónicos siguiendo un esquema regular y ordenado que se manifiesta bajo la forma de un cristal, siendo éstos los responsables del aspecto sólido y consistente de las sales.

La cristalización ocurre bajo condiciones muy comunes en muchos campos de aplicación:

1. Sobresaturación de iones sólidos en solución (mayor cantidad de lo que la solución admite en estado de equilibrio)
2. Nucleación inicial de cristales debido a la combinación de iones de la solución con iones no pertenecientes a la fase líquida, (por ejemplo en superficies metálicas en contacto con la fase líquida)
3. Crecimiento de cristales por propio enlace iónico con otras sales precipitadas.
4. Otros factores como incrementos bruscos de temperatura, turbulencia en el sistema, naturaleza y estado de la superficie en contacto con la solución y presencia de otras impurezas.

Habitualmente las sales de calcio y magnesio, y otras análogas aunque en menor proporción, forman parte de las incrustaciones desarrolladas en tuberías, circuitos y maquinarias de transferencia de calor.

En especial los carbonatos de calcio, producto de la cristalización en fluidos sobresaturados con iones de calcio, pueden adoptar diferencias en las estructuras de sus cristales, en otras palabras, mantienen sus átomos componentes, aunque sus distribuciones especiales difieren significativamente. Básicamente se clasifican en dos formas distintas: calcita y aragonita.

Cada una de ellas adopta formas de cristalización distintas, propiedades que inciden en la manera en que dichos carbonatos afectan o no al crecimiento de las incrustaciones.

Las incrustaciones están compuestas fundamentalmente por calcita en mayor proporción, y por aragonita en menor proporción. Ambos son carbonatos de calcio con igual composición química, aunque distinta estructura cristalina.

Tanto en circuitos de agua como en maquinarias incrustadas en condiciones normales se advierte una proporción ampliamente superior de las calcitas frente a las aragonitas, debido a que las primeras son cristales poliformos y estables. Contrariamente a las aragonitas, cristales amorfos e inestables, las calcitas tienden a iniciar nucleaciones heterogéneas y a desarrollar el crecimiento de cristales sobre superficies, en especial las metálicas. En otras palabras, es mayor la tendencia a la incrustación de calcitas frente a lo propio con las aragonitas.

Químicamente, los cristales de aragonita son holgadamente más solubles que las calcitas, hecho que determina su incapacidad de formar incrustaciones y lo cual no contribuye al crecimiento o aglomeración de cristales.

De igual modo, manteniéndose en solución y siendo incapaces de contribuir al crecimiento de los cristales, las aragonitas favorecen no sólo la inhibición de la incrustación, si no también, y por efecto de erosión (facilitada por la fuerza del caudal) produce la remoción gradual de las calcitas adheridas (remoción de las incrustaciones ya existentes en el circuito) (Ionis, 2003).

## **2.2. Calidad del agua**

Toda el agua que es alimentada a calderas contiene mínimas concentraciones sólidos disueltos. Cuando el agua de alimentación se calienta, se evapora y sale de la caldera como vapor destilado dejando estos sólidos disueltos tras de sí.

Algunas de las sales incluidas dentro de los sólidos disueltos, son altamente solubles a bajas temperaturas, pero debido a la alta temperatura en la caldera, cambian su solubilidad, transformándose en compuestos con baja solubilidad y son precipitados. Tal es el caso del carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), un compuesto presente en la mayoría de las aguas de alimentación a calderas. La mayor parte de esta precipitación tiene lugar en donde el agua de la caldera está más caliente, es decir, donde el agua está en contacto con las zonas de mayor transferencia de calor. El material precipitado se deposita en la superficie caliente y forma incrustaciones, lo cual ocasiona la obstrucción en las redes de distribución, en los circuitos de calentamiento, así como la reducción en la cantidad de calor transmitido en la superficie de la caldera.

### 2.2.1. Calidad del agua de entrada a los sistemas de desmineralización

En este trabajo se tomó en consideración la calidad de agua proveniente de una mezcla entre agua clarificada (mediante un proceso de coagulación/floculación) y agua proveniente de una planta de tratamiento de aguas residuales. El agua cruda, (llamada así por que proviene de fuentes naturales sin tratamiento previo alguno), viene de cuerpos de agua (como ríos o lagunas) cercanas al centro de trabajo.

### 2.2.2. Calidad de agua desmineralizada

El agua desmineralizada es el agua a la cual mediante un proceso físico o químico se le han quitado los minerales y las sales disueltos.

El agua producto de los equipos desmineralizadores, considerados como valores estándares, tiene las características que se indican en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Calidad de agua desmineralizada

Parámetro	Contenido
Temperatura	≈ 30°C
pH	5.5-6.5
Conductividad	≤ 4 μS/cm a 25°C
Dureza	0 (mg CaCO <sub>3</sub> /L)
Sílice	≤ 0.02 (mg SiO <sub>2</sub> /L)

Parámetros propuestos por diversos fabricantes de calderas.

### 2.2.3. Parámetros medidos a la entrada de calderas de vapor.

En la Tabla 4 se muestran los valores sugeridos por la Asociación Americana de Fabricantes de Calderas (AMBA, por sus siglas en inglés) como límites de la composición del agua para obtener una buena calidad de vapor, para varias presiones de trabajo.

**Tabla 4.** Límites de composición del agua de caldera para varias presiones de trabajo

Presión en la caldera (kg/cm <sup>2</sup> )	Sólidos disueltos totales (mg/L)	Alcalinidad (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	Sólidos suspendidos (mg/L)	Sílice (mgSiO <sub>2</sub> /L)
0-20	3,500	700	300	125
21-30	3,000	600	250	90
31-42	2,500	500	150	50
43-52	2,000	400	100	35
53-63	1,500	300	60	20
64-70	1,250	250	40	8.0
71-105	1,000	200	20	2.5
106-140	750	150	10	1.0
Más de 140	500	100	5	0.5

Fuente: AMBA, Asociación Americana de Fabricantes de Calderas.

En la Tabla 5 se puede observar los límites de contenido en los parámetros en agua de alimentación dependiendo la presión de vapor generada, esto con el fin de indicar cuál será la calidad de agua requerida para una presión dada.

**Tabla 5.** Límites de contenido de parámetros en agua de alimentación

Presión en domo vapor (kg/cm <sup>2</sup> )	Hierro mg/L	Cobre mg/L	Dureza total mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	Sílice mg/L (SiO <sub>2</sub> )	Alcalinidad total mg/L (CaCO <sub>3</sub> )	Conductividad (µmho/cm)
0-20	0.100	0.050	0.300	150	350	3500
21-30	0.050	0.025	0.300	90	300	300
31-42	0.030	0.020	0.200	40	250	2500
43-52	0.025	0.020	0.200	30	200	2000
53-63	0.020	0.015	0.100	20	150	1500
64-70	0.020	0.015	0.050	8	100	1000
71-105	0.010	0.010	ND	2	ND	150
106-140	0.010	0.010	ND	1	ND	100

ND: No detectable Fuente: ASME, Comité de investigación.

#### 2.2.4. Parámetros que influyen en la calidad de agua desmineralizada

A continuación se definen los parámetros que tienen una influencia predominante en la calidad del agua desmineralizada y que sin su control o manejo adecuado resultan perjudiciales para la operación de los equipos generadores de vapor.

#### 2.2.4.1. pH

El potencial de hidrógeno o pH es una medida de la acidez o inversamente de la alcalinidad de una solución acuosa y tiene valores entre 0 y 14 en disolución acuosa. El pH indica la concentración de iones hidronio  $[H_3O^+]$  presentes en las soluciones acuosas. El pH se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidronio (Metcalf & Eddy, 2003).

$$pH = -\log_{10}[H^+]$$

El pOH se define como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidroxilo, la ecuación es la siguiente para el agua a 25°C:

$$pH + pOH = 14$$

#### 2.2.4.2. Cloruros

El ion cloruro por ser pequeño y sumamente móvil acelera las reacciones de corrosión, debido a su capacidad para penetrar e incrementar la velocidad de disolución del hierro y además contribuye al aumento del contenido de electrolitos. Los cloruros se concentran en relación a la cantidad de evaporación que se produce, por lo tanto el análisis de cloruro en el agua de la fuente y en el agua de caldera, sirve para estimar la cantidad de evaporación y la purga. Un contenido alto en el agua de alimentación causa picaduras serias en los tubos o en el domo de la caldera, el  $CO_2$  descargado de la caldera con el vapor puede causar una corrosión activa en las turbinas, líneas de vapor o equipos auxiliares. La concentración de cloruros, puede ser una indicación muy aproximada de la concentración relativa de todos los minerales disueltos en el agua (Escobar, 2010).

#### 2.2.4.3. Alcalinidad

La alcalinidad en el agua es el resultado de la presencia de los aniones como hidróxidos  $[OH^-]$ , carbonatos  $[CO_3^{2-}]$ , y bicarbonatos  $[HCO_3^-]$ , de los cationes como el calcio, magnesio, sodio, potasio, y amonio. De estos, los bicarbonatos de calcio y magnesio son los más comunes. Los boratos, silicatos, fosfatos y compuestos similares también pueden contribuir a la alcalinidad.

La alcalinidad se determina por medio de la titulación contra el ácido estándar; el resultado es expresado en términos de carbonato de calcio.

La alcalinidad del agua de alimentación a una caldera es importante, ya que, representa una fuente potencial de incrustación.

Con el fin de evitar la corrosión de las partes metálicas de la caldera debido a la presencia de oxígeno y anhídrido carbónico en el agua, se recurre a la medición del grado de alcalinidad o acidez (Metcalf & Eddy, 2003).

#### 2.2.4.4. Conductividad Eléctrica (CE)

La Conductividad Eléctrica del agua es una medida de la capacidad de una solución para conducir la corriente eléctrica. La conductividad aumenta conforme aumenta la concentración de iones, dado que la corriente eléctrica es transportada por los iones en la solución. La medición del valor de la CE es utilizada como un sustituto para medir la concentración de los Sólidos Disueltos Totales (SDT). Las medidas de conductividad se usan comúnmente para determinar la impureza del agua desmineralizada y los sólidos disueltos totales en agua para calderas. La determinación de los SDT es una medida primaria de la calidad del agua que permite evaluar y dictaminar riesgos para diferentes tipos y usos de agua.

Una conductividad baja indica que el agua contiene bajos contenidos de sales disueltas y que por lo tanto tiene una resistencia al flujo eléctrico.

La conductividad eléctrica en unidades del SI (Sistema Internacional) se expresa en mili Siemens por metro (mS/m) y en micro Ohm por centímetro ( $\mu\Omega/\text{cm}$ ). Con la ecuación se puede estimar aproximadamente los SDT con la medición de la CE (Metcalf & Eddy, 2003).

$$\text{SDT (mg/L)} \approx \text{CE (dS/m o } \mu\Omega/\text{cm)} \times (0.55 - 0.70)$$

#### 2.2.4.5. Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO)

La DQO es utilizada para medir el oxígeno equivalente de la materia orgánica en el agua residual que puede ser oxidada químicamente utilizando un oxidante fuerte como es el dicromato en una solución ácida.

La DBO es el parámetro comúnmente utilizado para determinar la contaminación orgánica en agua residual y agua superficial. Esta determinación involucra la medición del oxígeno disuelto utilizado por los microorganismos en la oxidación bioquímica de la materia orgánica. La razón por la que los resultados de las pruebas de DBO son utilizados es para determinar la cantidad aproximada de cantidad de oxígeno que será requerida para estabilizar biológicamente la materia orgánica presente.

La medición de DQO y DBO en una muestra de agua está directamente relacionada con su grado de contaminación, así como con la naturaleza de la materia orgánica. A

través de esta prueba es posible estimar que proporción total de la materia orgánica es biodegradable (Metcalf & Eddy, 2003).

#### 2.2.4.6. Dureza

La dureza del agua se debe principalmente a la presencia de los cationes de calcio y magnesio.

Cuando el agua llega a su punto de ebullición estas sales se precipitan en el fondo.

Existen dos tipos de durezas, según sea la forma en que se comporte el agua a llegar a su punto de ebullición:

- a) Dureza temporal formada por sales de calcio y magnesio. Cuando el agua llega a su punto de ebullición se precipitan en el fondo.
- b) Dureza permanente formada por sales solubles en el agua. Durante la ebullición no sufren cambios, pero a medida que el agua se evapora sufre un grado de concentración depositándose y formando incrustaciones.

La suma de la dureza temporal y la permanente se llama dureza total.

La dureza se expresa normalmente como cantidad equivalente de carbonato de calcio y se calcula a partir de la suma de las concentraciones de calcio y magnesio existente (mg/L) Puede ser expresado en concentraciones de  $\text{CaCO}_3$  (Metcalf & Eddy, 2003).

$$\text{Dureza (mg de CaCO}_3\text{/L)} = 2.50 [\text{Ca}^{2+}] + 4.16 [\text{Mg}^{2+}].$$

Donde:

$[\text{Ca}^{2+}]$ : Concentración de ion  $\text{Ca}^{2+}$  expresado en mg/L

$[\text{Mg}^{2+}]$ : Concentración de ion  $\text{Mg}^{2+}$  expresado en mg/L

#### 2.2.4.7. Sulfatos, nitratos y fosfatos

Los aniones de nitrato y fosfato usualmente están presentes en cantidades poco importantes. Los sulfatos pueden ser precipitados como sulfato de bario por la adición de carbonato de bario en vez de carbonato de sodio en el proceso de cal-carbonato.

El sulfato puede ser intercambiado por cloruros o hidróxidos mediante un proceso de intercambio aniónico. Igualmente los cloruros pueden ser intercambiados por hidróxidos. Sin embargo, la remoción completa de los sulfatos y cloruros sin la

formación de otros compuestos en su lugar, se puede lograr solamente por desmineralización (Metcalf & Eddy, 2003).

#### 2.2.4.8. Sílice

La reducción de sílice es requerida principalmente para propósitos de agua para alimentación de calderas así como para torres de enfriamiento. Los límites del sílice residual en el agua de alimentación varía con respecto a la presión de caldera y estos límites determinan qué método se debe de seleccionar para una remoción eficiente (Metcalf & Eddy, 2003).

Los límites de sílice en el agua de alimentación a calderas han disminuido constantemente a través de los años, en relación al aumento en la presión de calderas. Hoy en día, para calderas con presiones supercríticas (mayores a 225 kg/cm<sup>2</sup>), la sílice en el agua de alimentación debe mantenerse sobre 0.010 mg/L. La sílice causa depósitos no solamente en la caldera, también en las turbinas de vapor.

La sílice presente en el agua de alimentación puede formar incrustaciones duras (silicatos) o de muy baja conductividad térmica (silicatos de calcio y magnesio), en las calderas, equipos de transferencia así como en las turbinas de vapor, los límites recomendados dependen del contenido de sílice en el agua para calderas, dependiendo también de la presión de trabajo. A continuación se muestran en la Tabla 6.

**Tabla 6.** Límites permitidos de sílice en el agua para caldera

Presión de trabajo (kg/cm <sup>2</sup> )	Sílice permitido como SiO <sub>2</sub> (mg/L)
0-1	200
1-10	200
10-21	150
21-32	90
32-42	40
42-53	30
53 y más	20

Fuente: CONUEE.

#### 2.2.4.9. Temperatura y presión

La temperatura y la presión afectan a determinadas propiedades del agua y en particular a su viscosidad, como también la solubilidad de determinadas sales.

### **2.2.5. Tratamiento químico integral para calderas y calderetas**

La eficiencia y seguridad con que operan las calderas y calderetas de vapor, dependen en gran medida del control de las afectaciones por fenómenos de corrosión, incrustación y ensuciamiento en el sistema de generación de vapor, por lo que requieren tratamientos químicos como el uso de inhibidores de corrosión e incrustación, dispersantes de fierro y sólidos suspendidos, modificadores de tensión superficial y antiespumante; estos tratamientos deben de ser dosificados según del análisis del agua y la evaluación de testigos y probetas corrosimétricas.

## **2.3. Tecnologías para la desmineralización de agua**

### **2.3.1. Intercambio iónico**

El intercambio iónico es una operación de separación basada en la transferencia de materia de tipo líquido-sólido. Implica la transferencia de uno o más iones de la fase acuosa al sólido por intercambio o desplazamiento de iones de la misma carga, que se encuentran unidos por fuerzas electrostáticas a grupos funcionales superficiales. La eficacia del proceso depende del equilibrio sólido-líquido y de la velocidad de transferencia de materia. Los sólidos suelen ser de tipo polimérico, siendo las más habituales las resinas sintéticas.

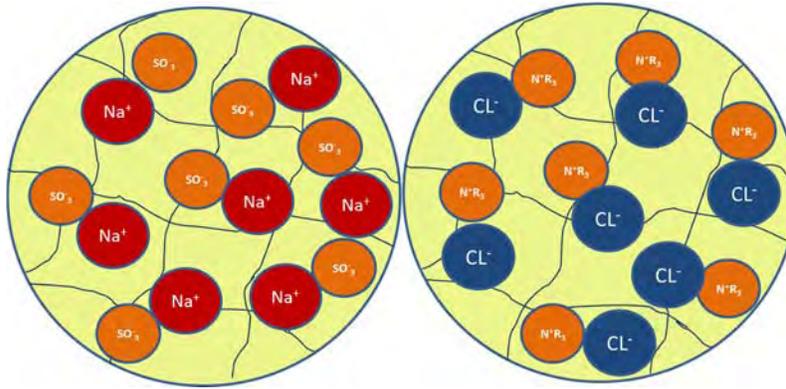
El proceso de la desmineralización del agua o de soluciones por intercambio iónico consiste en la conversión de sales en sus ácidos correspondientes por intercambiadores de cationes hidrógeno y la remoción de esos ácidos por un intercambiador aniónico. Los dos intercambiadores comúnmente se encuentran en una serie de columnas separadas, donde el agua o la solución pasa primero por una columna y después a través de la otra, convirtiéndose en un proceso de dos pasos. Usualmente el intercambiador catiónico precede al intercambiador aniónico. Los dos intercambiadores pueden estar también mezclados en columnas simples, a eso se le llama un intercambiador de cama mixta.

#### **2.3.1.1. Fundamentos de intercambio iónico**

Las sales disueltas en el agua se disocian en cationes y en iones aniones que permiten a la solución conducir la electricidad: las sustancias disueltas son llamadas electrolitos. Las soluciones están en un estado de electroneutralidad, lo que significa que las cargas positivas están en balance con las cargas negativas.

Los intercambiadores cambian por el tipo de solución en donde solamente una de las dos especies es móvil, por ejemplo, el intercambiador catiónico de ácido sulfónico tiene sitios inmóviles de intercambio iónico que consisten en los radicales aniónicos  $\text{SO}_3^-$  que están atados a los cationes móviles, como son el  $\text{H}^+$  o el  $\text{Na}^+$ . Un

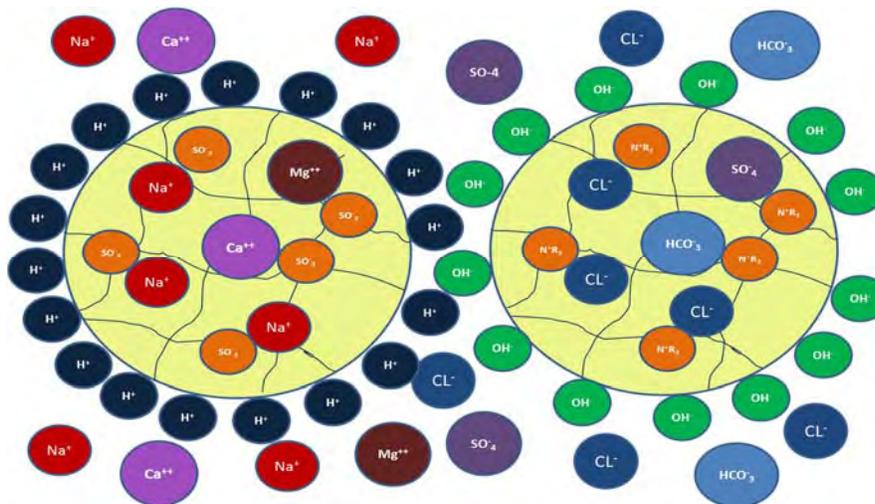
intercambiador aniónico tiene del mismo modo sitios catiónicos inmóviles que son atados a los aniones hidroxilo.



**Figura 1.** Esquema de perlas de resinas catiónica y aniónica.

Cuando ocurre el intercambio iónico, los cationes o los aniones en la solución son intercambiados en la superficie de la Figura 1, pero ambos (la solución y el intercambiador) permanecen en condiciones de electroneutralidad. En el caso del intercambio catiónico, un catión de calcio, que tiene dos cargas positivas ( $\text{Ca}^{2+}$ ), cuando deja el agua, debe de ser remplazado, en el intercambiador, dos cationes de hidrógeno, los cuales tienen dos cargas simples positivas ( $2\text{H}^+$ ).

El intercambio iónico entre intercambiadores sólidos y el agua con electrolitos toma lugar sin cambios estructurales en el material sólido; esto es, los sólidos no se disuelven en la solución. Los iones en la solución rápidamente se difunden dentro de la red molecular del intercambiador, ocupando los sitios de intercambio. Los iones en el intercambiador similarmente se difunden fuera del intercambiador dentro de la solución (Ver Figura 2).



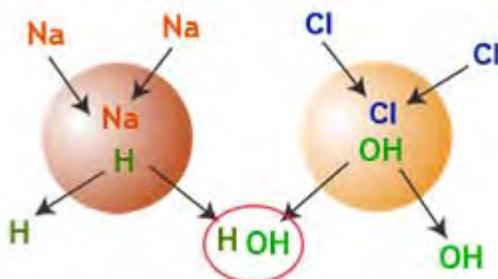
**Figura 2.** Perlas de resinas agotadas. Los iones  $\text{H}^+$  y  $\text{OH}^-$  han sido liberados en el agua.

Los materiales comúnmente utilizados en el intercambio iónico son las resinas sintéticas hechas por polimerización de varios compuestos orgánicos. Los compuestos frecuentemente más utilizados son el estireno y el divinil-benceno. La cadena larga de copolímeros contiene una mayor proporción de estireno (80-92%) y una proporción menor de divinil-benceno (8-20%). Las resinas de intercambio iónico convencional consisten en una matriz reticulada de polímero con una distribución relativamente uniforme de los sitios ion-activos a través de la estructura.

La utilidad del intercambio iónico proviene de la capacidad del material de ser regenerado. Como por ejemplo, en el ablandamiento de agua:



El intercambiador  $\bar{R}$  en la forma ion sodio es capaz de intercambiarse por calcio y viceversa ver Figura 3, para remover el calcio del agua dura y sustituirlo con una cantidad equivalente de sodio. Subsecuentemente, la resina cargada de calcio se debe de tratar con una solución de cloruro de sodio, regenerándola para que regrese a su forma de sodio, y que esté lista para otro ciclo de operación. La reacción de regeneración es reversible; ya que el intercambio iónico no es permanente (Applebaum, 1968).



**Figura 3.** Representación esquemática de la desmineralización

### 2.3.1.2. Síntesis de las resinas

La mayor parte de los materiales de intercambio iónico se fabrican usando un proceso de polimerización de suspensión, que utiliza estireno y divinil-benceno (DVB). El estireno y DVB, ambos líquidos en un principio, se colocan en un reactor químico con más o menos la misma cantidad de agua. Asimismo está presente un agente flotador para mantener todo disperso. El reactor químico tiene un agitador que comienza a mezclar la solución de agua/sustancia química orgánica. El estireno/DVB comienza a formar grandes glóbulos de material, y al aumentarse la velocidad de agitación, los glóbulos se dividen en gotas más pequeñas hasta alcanzar un tamaño de más o menos un milímetro. Inicia la reacción de

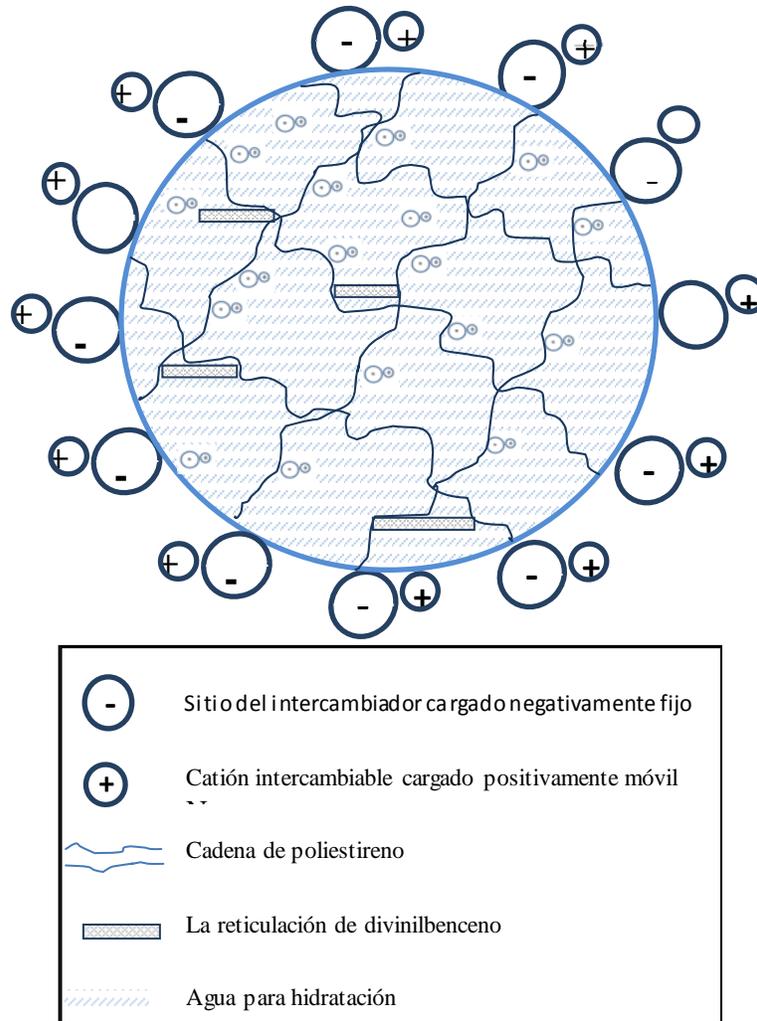
polimerización a través de la adición de peróxido de benzoilo, el cual hace que las moléculas de estireno/DVB formen las esferas pequeñas de plástico. El divinilbenceno es un agente entrecruzante que le proporciona a las esferas su fortaleza física, y sin el cual el estireno sería soluble en el agua.

Las esferas de poliestireno-DVB necesitan ser químicamente activadas para funcionar como material de intercambio iónico. Los grupos activados son ligados para proporcionarle funcionalidad química a la esfera. Cada grupo activo posee una carga eléctrica fija, la cual es balanceada por un número equivalente de iones de carga opuesta, los cuales tienen la libertad de intercambiarse con otros iones de la misma carga. Las resinas catiónicas fuertes se forman tratando a las esferas con ácido sulfúrico concentrado (un proceso conocido como sulfonación) para formar grupos sulfónico-ácidos permanentes, de carga negativa, a través de esferas. Aquí es importante el hecho de que los sitios de intercambio formados se encuentren ubicados en el seno de la esfera. El proceso de intercambio iónico no es un fenómeno de superficie; más del 99% de la capacidad de un material de intercambio iónico se encuentra en el interior de la esfera.

Las resinas aniónicas fuertes se activan en un proceso de dos pasos que consiste en la clorometilación seguida de la aminación. Este proceso de dos pasos comienza con el mismo material de estireno/DVB que se usa para las resinas catiónicas. La única diferencia es que la cantidad de DVB que se utiliza es menor para permitir una esfera más porosa. El primer paso de la reacción es la ligación de un grupo de clorometilo a cada uno de los anillos de benceno en la estructura de la esfera. Este material plástico intermedio clorometilizado debe reaccionar como una amina en un proceso conocido como aminación. El tipo de amina utilizada determina la funcionalidad de la resina. Una amina comúnmente utilizada es la trimetilamina (TMA), que crea un intercambiador aniónico fuertemente básico. El uso de dimetilamina (DMEA) producirá una resina aniónica (Avilla, 1999).

### **2.3.1.3. Propiedades físicas de las resinas**

La resina de intercambio catiónico contiene una matriz cargada negativamente e iones de intercambio positivo (Figura 4). Los materiales son vendidos como esferas o algunas veces granulados con un tamaño específico y una uniformidad para cubrir las necesidades de una aplicación en particular. La mayoría se preparan en forma esférica (perla), ya sea como resina convencional con un tamaño de partícula poli dispersa con una distribución que va de 0.3 mm a 1.2 mm (o como resina de tamaño de partícula uniforme con todas las perlas en un rango pequeño de tamaño de partícula (Avilla, 1999).



**Figura 4.** Resina de intercambio catiónico que muestra esquemáticamente la matriz cargada negativamente y el intercambio con los iones positivos.

#### 2.3.1.4. Propiedades químicas de la resina

**Capacidad.** La capacidad del intercambio iónico puede expresarse de diversas maneras. La capacidad total, por ejemplo, es el número total de sitios disponibles para el intercambio y se determina normalmente después de convertir la resina por la técnica de regeneración química para darle una forma iónica. Posteriormente el ion es químicamente removido por una cantidad medida de resina y cualitativamente determinada en una solución por métodos analíticos convencionales. La capacidad total es expresada con base en un peso seco, húmedo o un volumen húmedo. El agua consumida por la resina por consiguiente es el peso húmedo y la capacidad del volumen húmedo es dependiente de la naturaleza de la estructura del polímero así como del ambiente en donde las muestras fueron expuestas.

La capacidad de operación es la medición del funcionamiento útil en una columna bajo un conjunto de condiciones preestablecidas. Es dependiente de un número de factores incluyendo la capacidad de la resina (total), el nivel de regeneración, las composiciones de la solución tratada, el flujo a través de la columna, temperatura, tamaño de partícula y distribución.

**Selectividad.** Propiedad de los intercambiadores iónicos por la que un intercambiador muestra mayor afinidad por un ion que por otro. La selectividad de una resina por un ion determinado se mide con el coeficiente de selectividad,  $K$ .

Se define selectividad de una resina de intercambio como la afinidad que ésta presenta hacia un determinado tipo de ion. Las resinas de intercambio iónico presentan diferentes selectividades hacia los iones influenciada por las propiedades de la sustancia, los iones intercambiados, la solución en los que están presentes los iones, la magnitud de la carga, y el tamaño de los iones las resinas suelen ser más selectivas hacia los iones del mayor carga y en caso de igual carga, será más selectiva hacia los iones con mayor número atómico. No obstante esta relación se invierte en concentraciones altas. A continuación se detalla el orden de selectividad de las resinas de intercambio iónico, en orden decreciente (de mayor a menor selectividad):

- Resinas catiónicas de ácidos fuertes:  $\text{Ag}^+$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{H}^+$
- Resinas catiónicas de ácidos débiles:  $\text{H}^+$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$
- Resinas aniónicas de bases fuertes:  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{HSO}_4^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{HSO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{F}^-$
- Resinas aniónicas de bases débiles:  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{I}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$

**Cinética.** La velocidad con la que el intercambio iónico toma lugar. El proceso de intercambio iónico involucra una difusión a través de una capa de la solución que está en contacto directo con la resina y la difusión dentro de la partícula de resina. La velocidad de difusión de la capa es controlada a bajas concentraciones y la velocidad de difusión de partícula es controlada a altas concentraciones.

**Estabilidad.** Los agentes oxidantes fuertes, como el ácido nítrico o crómico, rápidamente degradan las resinas de intercambio iónico. La lenta degradación con el oxígeno y el cloro puede inducirse catalíticamente. Por esta razón, algunos iones metálicos, como el acero, manganeso y cobre, deben minimizarse en la solución oxidante. Con intercambiadores catiónicos, el ataque es principalmente en la estructura del polímero. Las resinas con un alto reticulado tienen una vida útil extensa gracias al gran número de sitios que deben de ser atacados antes de que la expansión reduzca el volumen útil basado en la capacidad y produzca propiedades

físicas inaceptables, como por ejemplo, la reducción por un aplastamiento fuerte y un aumento en la caída de presión. Con los intercambiadores aniónicos, el primer ataque ocurre en los grupos funcionales más susceptibles, lo que conduce a la pérdida total de la capacidad y a la conversión de la base fuerte a la base débil.

Los límites de la estabilidad térmica son impuestos por la fuerza del enlace carbono-hidrógeno en el caso de las resinas aniónicas. Esta fuerza es sensible al pH y a pH bajos mejora la estabilidad y la estabilidad de la hidrólisis de los enlaces disminuye.

**Resinas de intercambio catiónico.** Resinas de intercambio catiónico débiles se basan primordialmente en ácidos acrílicos o metacrílicos que han sido reticulados con un monómero disfuncional (usualmente divinil-benceno [DVB]).

Las resinas de ácido débil tienen una alta afinidad para el ión hidrógeno y son fácilmente regenerables con ácidos fuertes. La resina con regeneración ácida muestra una alta capacidad para los metales alcalinotérreos asociados con la alcalinidad y una capacidad limitada para los metales alcalinos. Ninguna separación significativa de sales ocurre con las sales neutras.

Las resinas de ácido fuerte son copolímeros sulfonados de estireno y DVB. Estos materiales están caracterizados por su habilidad de intercambiar cationes o separar las sales naturales y son útiles a lo largo todo el rango de pH.

**Resinas de intercambio aniónico.** Las resinas de base débil no contienen sitios iónicos cambiables y funcionan como adsorbedores ácidos, estas resinas son capaces de adsorber ácidos fuertes con una alta capacidad y son regenerables con sosa. Ellas son por lo tanto particularmente efectivas cuando se usa una combinación con un anión de base fuerte generando una amplia capacidad de operación y eficiencia de regeneración (Avilla, 1999).

### 2.3.1.5. Tipos de resinas de intercambio iónico

**Resinas catiónicas de ácido fuerte:** las resinas catiónicas fuertemente ácidas derivan su funcionalidad de los grupos sulfónicos  $\text{HSO}_3^-$ . Actualmente, estos son poliestirenos obtenidos de una copolimerización entre el estireno y el divinilbenceno soportada en forma de una emulsión en orden de obtener esferas perfectas en solidificación. Estos intercambiadores catiónicos de ácido fuerte funcionan a cualquier nivel de pH, dividen todas las sales, y requieren una cantidad sustancial de regenerante. Esta es la resina que se escoge para casi todas las aplicaciones de suavizado y como primera unidad en un desmineralizador de dos lechos, o como componente catiónico de un lecho mixto.

**Resinas catiónicas de ácido débil:** Las resinas catiónicas débilmente ácidas contienen grupos carboxílicos  $\text{HCO}_2$  como sitios de intercambio, éstas pueden ser ligadas a ciertos grupos de ácidos orgánicos como el ácido fórmico o el ácido acético. Estas pueden diferir de las resinas catiónicas de ácido fuerte en dos partes:

- Estas solamente retienen cationes como el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ... ligados a los bicarbonatos pero no pueden intercambiar cationes que están en equilibrio con los aniones fuertes ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ).
- Se pueden regenerar fácilmente (reacción de un ácido fuerte con sales de un ácido débil); la reacción es total, con niveles de regeneración que están cerca a la estequiometría.

La resina es altamente eficiente, y es regenerada con casi 100% de la cantidad estequiométrica de ácido, comparado con el 200% a 300% requerido para los cationes de ácido fuerte. Las resinas catiónicas débiles están sujetas a una mejor capacidad por un aumento en la velocidad de flujo, temperaturas bajas, y una proporción entre la dureza y la alcalinidad menor de 1.0. Se utilizan muy efectivamente en combinación con una resina catiónica de ácido fuerte que funciona en forma de hidrógeno, ya sea en configuración de lecho separado o lecho estratificado. En ambos casos, el agua del influente se pone en contacto con la resina catiónica de ácido débil donde se eliminan los cationes que están asociados con la alcalinidad. Los cationes restantes son eliminados por la resina catiónica de ácido fuerte. La resina catiónica de ácido débil es regenerada con el ácido de desecho de la unidad de ácido fuerte, facilitando un arreglo muy económico.

**Resinas aniónicas de base fuerte:** Las resinas aniónicas de basicidad fuerte derivan su funcionalidad de los sitios de intercambio de amonio cuaternario. Hay dos grupos principales de resinas aniónicas de base fuerte y son las de tipo 1 y tipo 2, dependiendo del tipo de amina que se utiliza durante el proceso de activación química. Químicamente, los dos tipos difieren en el tipo de especie de sitios de intercambio de amonio cuaternario que exhiben: los de tipo 1 tienen tres grupos de metilo; en los de tipo 2, un grupo de etanol reemplaza a uno de los grupos de metilo.

Las resinas de tipo 1 son adecuadas para la eliminación total de aniones en todas las aguas. Son más difíciles de regenerar y se hinchan más al pasar de la forma de cloruro a la de hidróxido que las de tipo 2. Son más resistentes a altas temperaturas y deben ser usadas en aguas de alta calidad y alto contenido de silicio.

Las resinas de tipo 2 también presentan la eliminación de todos los aniones, pero pueden ser menos efectivas en eliminar el silicio y dióxido de carbono de las aguas donde estos ácidos débiles constituyen más del 30% del total de aniones. Los aniones de tipo 2 brindan mejores resultados en aguas que contienen predominantemente ácidos de minerales libres, cloruros y sulfatos, como en el

efluente de una unidad de catión seguida por una unidad descarbonatadora. Las resinas de tipo 2 que funcionan en forma de cloruros son típicamente usadas en desalcalinizadores.

**Resinas aniónicas de base débil:** Las resinas aniónicas de basicidad débil contienen el grupo funcional de poliamina, que actúa como adsorbedor de ácido, eliminando los ácidos fuertes, acidez de mineral libre, de la corriente del efluente de cationes. Esta resina débilmente ionizada es regenerada de manera eficiente por cantidades de base casi estequiométricas, tales como el hidróxido de sodio, que restauran los sitios de intercambio a la forma de base libre. El paso de regeneración es esencialmente una neutralización de los ácidos fuertes que son recolectados en la resina y que puede usar desechos cáusticos de una unidad aniónica de base fuerte. Las resinas aniónicas débiles deben de ser usadas en aguas con niveles elevados de sulfatos o cloruros, o donde no se requiera la eliminación de la alcalinidad y del silicio (Avilla, 1999).

#### 2.3.1.6. Tecnologías de regeneración de intercambio iónico

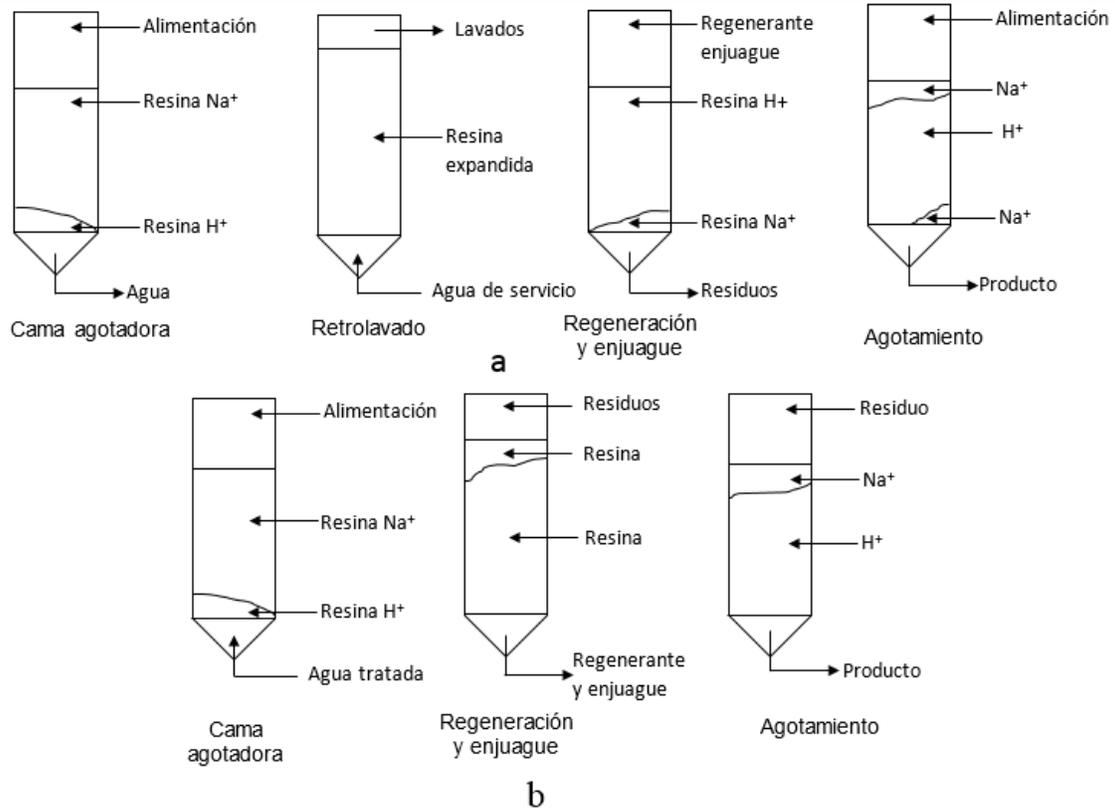
##### ***Sistema de regeneración en dirección de la corriente.***

Este es el sistema más simple donde la resina es regenerada en la misma dirección del flujo de servicio (hacia abajo). El recipiente contiene una altura libre que permite una expansión de la cama de resina cuando el retrolavado se lleva a cabo para remover los sólidos suspendidos y los restos de resina (Ver Figura 5).

##### ***Sistema de regeneración contra-corriente.***

En este sistema, el regenerante se aplica en la dirección opuesta al flujo de servicio. Esto tiene la ventaja de proveer agua de calidad (fuga iónica menor), una eficiencia química mayor y se reduce el desperdicio de agua. Para obtener un nivel menor de fuga de un sistema de regeneración de resina contra corriente, los iones contaminados deben retirarse del efluente final de la columna durante la regeneración y del enjuague. Esto requiere evitar condiciones que pueden quebrantar la configuración de la cama de resina. El retro lavado frecuentemente tiene que ser minimizado (Ver Figura 5).

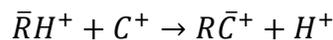
***Sistemas de cama empacada.*** Puede ser un servicio de flujo ascendente con regeneración de flujo descendente o servicio de flujo descendente sin regeneración de flujo ascendente (Ver Figura 5).



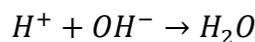
**Figura 5.** Intercambio iónico. a. Corriente en paralelo y b. Contra corriente  
 Contratadores de una columna de regeneración con cama empacada (con resinas cationes en forma  $\text{H}^+$ , para remover  $\text{Na}^+$ ). (Applebaum, 1968)

### 2.3.1.7. Aplicación de la resina

**Desmineralización.** La desmineralización con intercambio iónico es un proceso de dos pasos que involucra un tratamiento con ambas resinas: la catiónica y la aniónicas. El agua pasa primero por una columna de una resina catiónica fuerte que se encuentra en su forma hidrógeno ( $\bar{R}\text{H}^+$ ) para intercambiar el catión en la solución por iones hidrógeno:

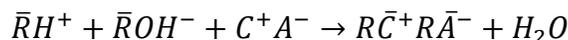


Donde  $\text{C}^+$  representa los cationes comunes, como por ejemplo,  $\text{Ca}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ . Este efluente pasa a una columna de resina aniónicas en forma de hidróxido ( $\bar{R}\text{OH}^-$ ) para remplazar los aniones en la solución por hidróxidos:



La eficiencia neta es la remoción de electrolitos.

Alternativamente, el agua con impurezas puede pasar a través de una cama mixta inmediata de resinas catiónicas y aniónicas donde ambos tipos de intercambio suceden simultáneamente:



La opción del sistema de intercambio iónico para desmineralización depende de la calidad de agua deseada, la operación y el capital económico, así como la composición del agua cruda (Applebaum, 1968).

#### **2.3.1.8. Características de las funciones del sistema**

El sistema es retro lavable. Esta es una función única de este diseño. Los sistemas contra-flujo tradicionales utilizan aire o agua como sujeción, también podrían ser retrolavables pero el diseño sería un desperdicio de espacio o agua, o de ambos. Los sistemas con cama empacada son compactos sin un desperdicio de espacio pero son frecuentemente difíciles o imposibles de un apropiado retro lavado.

El sistema consiste en un número variable de columnas de cámara sencillas o múltiples con un colector/distribuidor superior o inferior, y una o dos columnas auxiliares para el retrolavado de la resina. Porque los sólidos suspendidos tienden a acumularse en la parte baja de la cama, y la resina en la parte superior.

El sistema conserva las ventajas de las técnicas de contra flujo, con una carga de flujo ascendente y una regeneración en flujo descendente, usando una cama compacta estacionaria de resina. Esto permite una remoción de porciones de resina para una limpieza mecánica por el retro lavado cuando es necesario sin interrumpir el ciclo de operación (Applebaum, 1968).

#### **2.3.1.9. Desgasificación del Agua**

El agua puede contener gases como parte de material disuelta. El oxígeno y el nitrógeno están presentes en toda agua en contacto con la atmósfera, pero también el CO<sub>2</sub> que forma ácido carbónico. A un pH de 4.5 todo el CO<sub>2</sub> está como gas, y en otro extremo, por encima de pH 8.2, todo está ionizado (Ver Figura 6). (Applebaum, 1968).



**Figura 6.** Sistema de un desgasificador por tiro forzado (GLEGG, 2000).

#### 2.3.1.10. Descarbonatación por aireación

El agua descationizada tiene un pH ácido en el cual el  $\text{CO}_2$  está en equilibrio con el ácido carbónico del agua y se eliminan fácilmente por simple aireación.

La desgasificación es un proceso de transferencia de masa en el que la velocidad de desgasificación es proporcional al área superficial de la masa líquida en contacto con el gas que le rodea y a la diferencia de presiones parciales entre las dos fases. Por lo tanto, es conveniente producir la mayor área posible en forma de pequeñas gotas, por deslizamiento sobre la superficie de un material de relleno de gran área específica o haciendo burbujear el gas en el seno del líquido.

Para conseguir una diferencia de presiones parciales máximas hay que disminuir, tanto como sea posible, la presión parcial del gas a separar dentro de la fase gaseosa.

En los desgasificadores por aireación, empleados para eliminar el  $\text{CO}_2$  de soluciones acuosas, se utiliza una corriente intensa de aire, mientras el agua resbala sobre el material de una columna de relleno o bien desciende a través de platos perforados. En las líneas de desmineralización es más usual emplear torres de relleno con las que se consigue descender la concentración de  $\text{CO}_2$  en un 90-95%.

La eliminación del oxígeno del agua de aporte a calderas se puede realizar por desgasificación al vacío o por desgasificación térmica. Esta última es la más usual y se realiza generalmente mediante columnas de bandejas o por atomización del agua, alcanzándose concentraciones de oxígeno del orden de 0.005 mg/L (Applebaum, 1968).

### **2.3.2. Electrodesionización**

La necesidad de producción de agua de alta pureza para el uso de generación y distribución de vapor en calderas de alta presión en el sector de la energía, ha propiciado el desarrollo y avance de diferentes tecnologías de tratamiento del agua dirigidas a la eliminación de todas las impurezas presentes en el agua. En el campo de la deionización, después de la aplicación en primer lugar del proceso de intercambio iónico con resinas de intercambio iónico y posteriormente la aparición de los procesos de membrana basados en Ósmosis Inversa y electrodiálisis reversible, la electrodesionización en continuo (*Continuous Electrodeionization* CEDI, en inglés) representó un cambio radical en el diseño de instalaciones para la obtención del agua de alta pureza. (Sanz, 2011)

La electrodesionización en continuo (CEDI) es un proceso que emplea una combinación de membranas de intercambio iónico, resinas de intercambio iónico y un campo eléctrico de corriente continua para desionizar el agua. Los diseños estándar es para obtener agua purificada, agua para inyectables y agua de alta pureza emplean una combinación de Ósmosis Inversa y electrodesionización en continuo. Con este diseño el proceso CEDI puede producir agua con concentraciones de iones específicos cercanas o inferiores a los límites de detección. El proceso CEDI está en la actualidad ampliamente aceptado para la producción de agua de alta pureza en la industria energética, industria farmacéutica y microelectrónica.

#### **2.3.2.1. Descripción del proceso de Electrodesionización en Continuo (CEDI)**

La electrodesionización en continuo (CEDI) es un proceso continuo de producción de agua de alta pureza. En este proceso intervienen una pequeña cantidad de resinas de intercambio iónico, membranas semipermeables aniónicas y catiónicas alternas y una corriente eléctrica continua entre dos electrodos (cátodo y ánodo). El agua procedente de un sistema de ósmosis inversa, atraviesa el módulo donde debido al potencial eléctrico aplicado a los electrodos se provoca la migración de los iones, produciéndose la desionización y enviando así los iones al compartimiento del concentrado.

El paso de los cationes y aniones está limitado por las membranas catiónicas y aniónicas. De esta forma el agua es desionizada en las celdas del diluido o producto

y se concentran los iones en las celdas del concentrado. Las concentraciones de iones en el agua son bajas en la parte inferior del compartimiento del diluido o producto, por lo que el agua es ionizada en las zonas de alto voltaje y los protones e iones hidroxilo que se forman regeneran las resinas catiónicas y aniónicas, respectivamente, haciendo que las resinas regeneradas *in situ* puedan continuar desionizando el agua. (Sanz, 2011)

En la Tabla 7 se puede observar el análisis del agua resultado del sistema combinado de Ósmosis Inversa y electrodesionización en continuo.

**Tabla 7.** Análisis de agua obtenida en el sistema combinado de Ósmosis Inversa (OI) y electrodesionización en continuo (CEDI)

Componente	Salida OI/OI	Salida CEDI	Retención en CEDI%
Aniones(µg/L)			
Cloruro	750	≤0.02	≥99.99
Nitrato	58	≤0.02	≥99.96
Fosfato	27	≤0.02	≥99.92
Sulfato	210	≤0.05	≥99.97
Cationes (µg/L)			
Sodio	1100	0.24	≥99.97
Amonio	7	≤0.05	≥99.28
Potasio	26	≤0.02	≥99.92
Calcio	6	≤0.02	≥99.66
Trazas de metales (µg/L)			
Aluminio	0.22	≤0.003	≥99.63
Boro	13	≤0.05	≥99.61
Litio	0.05	≤0.002	≥96.00
Manganeso	0.03	≤0.002	≥93.33
Potasio	23	≤0.1	≥99.56
Rubidio	0.04	≤0.001	≥97.50
Sílice	110	≤0.5	≥99.54
Sodio	1300	0.26	≥99.98
Zinc	0.09	≤0.005	≥94.44

Fuente: Parámetros propuestos por diversos fabricantes de calderas.

### 2.3.2.2. Pretratamiento, sistema completo de producción de agua de alta pureza.

El agua de alimentación a un sistema de producción de alta pureza contiene diferentes concentraciones de compuestos y contaminantes a eliminar: Sales

solubles, partículas, compuestos orgánicos, sales incrustantes, óxidos de hierro y manganeso, coloides, microorganismos y pirógenos. En función del tipo de agua de alta pureza y su destino, se especifican diferentes concentraciones máximas para los constituyentes críticos.

De forma general los procesos empleados antes de la electrodesionización en continuo incluyen el pretratamiento previo al proceso de Ósmosis Inversa y el posterior acondicionamiento del permeado antes de su entrada en el proceso CEDI. La selección del pretratamiento a la Ósmosis Inversa plantea los primeros esquemas de selección de procesos de tratamiento que en los sistemas de Ósmosis Inversa sin CEDI posterior y en general viene regida por la calidad del agua de aporte. En función de la calidad del agua de aporte al pretratamiento y las especificaciones exigidas al agua de alta pureza, el proceso de Ósmosis Inversa se plantea en una o dos etapas. Debido a la sensibilidad de la electrodesionización a la dureza del agua, en los sistemas de ósmosis de un solo paso se considera de forma complementaria la reducción de la dureza mediante intercambio iónico en ciclo sodio. (Sanz, 2011)

### **2.3.2.3. Evolución de los Procesos de Desmineralización**

La electrodesionización continua puede considerarse como una tecnología segura, con un muy bajo uso de químicos para pulir el permeado de Ósmosis Inversa a un nivel mayor de pureza. La tecnología CEDI es un proceso que permite el suministro continuo de agua de alta pureza hasta 18 mega ohm-cm, sin la necesidad de emplear productos químicos para la regeneración de resinas.

#### 1ª Generación

Sistemas basados en resinas de intercambio iónico regeneradas mediante químicos.

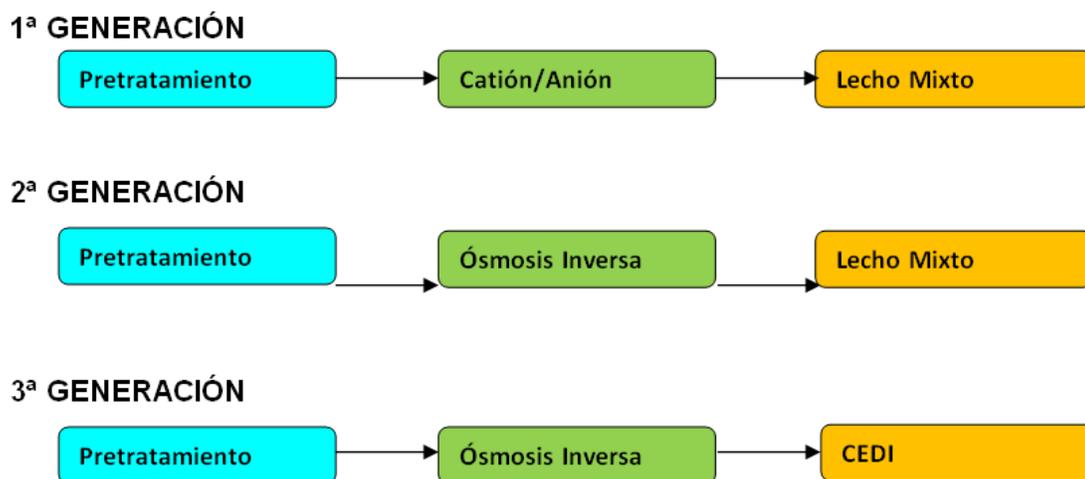
#### 2ª Generación

La necesidad de reducir el nivel de Carbono Orgánico Total, incorporó la Ósmosis Inversa en el proceso, la cual usa tecnología de membrana reduciendo considerablemente el uso de productos químicos.

#### 3ª Generación

La combinación de RO + Electrodesionización en continuo (CEDI) ha conseguido la eliminación casi total del uso de regenerantes químicos.

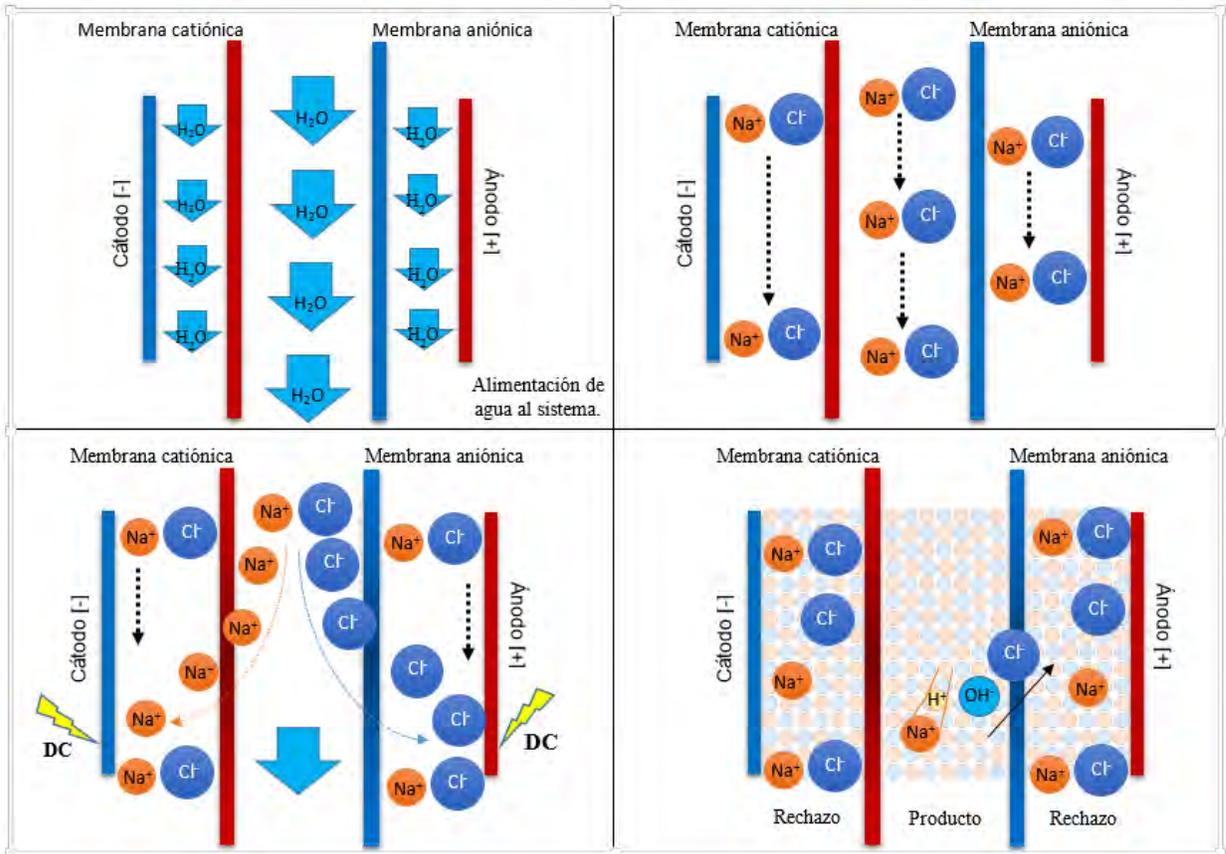
En la Figura 7 se muestran las tres generaciones de sistemas para la desmineralización de agua a lo largo del tiempo.



**Figura 7.** Diagrama ilustrativo de cómo operan las tecnologías de desmineralización de tres generaciones. (Sanz, 2011)

Al igual que los procesos de Ósmosis Inversa sustituyen los procesos de intercambio iónico basados en las cadenas de desmineralización con columnas catión y anión, la electrodesionización sustituye el proceso de intercambio iónico basado en los lechos mezclados de resina catiónica y aniónica destinados a obtener la máxima calidad de pureza del agua. En ambos casos las consideraciones de prevención de riesgos en la manipulación de los regenerantes químicos y del impacto ambiental por los vertidos de la regeneración han sido los motores de cambio de la sustitución de las tecnologías de intercambio iónico.

La migración de los cationes y aniones en los compartimientos de diluido y concentrado se muestran en detalle en la Figura 8.



**Figura 8.** Compartimiento de concentrado y del diluido de un modulo de CEDI. (CEDI UNIVERSITY, 2012)

La configuración de los módulos del tipo plato y marco incluyen en la actualidad después de nuevos desarrollos de los módulos CEDI, resinas de intercambio iónico, catiónicas y aniónicas separadas en las celdas del diluido o producto. (Sanz, 2011)

#### 2.3.2.4. Procesos de desmineralización convencionales vs. Nuevas tecnologías

Los sistemas de desmineralización convencional se basan en la regeneración química de las resinas de intercambio iónico para remover los sólidos disueltos.

Los químicos para la regeneración son costosos, de manejo peligroso y, aunque se neutralizan previamente para descargarlos a cuerpos de agua, esto implica una cantidad significativa de sólidos disueltos enviados al ambiente.

La tecnología de punta en los sistemas de tratamiento de aguas utiliza membranas de Ósmosis Inversa para realizar la desmineralización de un volumen de agua. Los sistemas de Ósmosis Inversa no requieren productos químicos para regeneración y también remueven compuestos químicos que contribuyen al contenido de carbón orgánico total que pasará a través de las resinas de intercambio iónico.

La CEDI es un proceso continuo, que no utiliza químicos de regeneración, no contamina el ambiente y requiere poca atención por parte del operador. Los sistemas EDI normalmente operan entre el 90 y el 95% de recuperación de agua. (Sanz, 2011)

### **2.3.3. Tratamiento del agua con membranas**

Para utilizar la tecnología de Electrodesionización se debe implementar un pretratamiento para poder cumplir con la calidad de agua. Por lo que se explicarán brevemente los diferentes tipos de filtración requeridos para generar agua de alta pureza.

Desde su introducción a finales de los años 50, las membranas han ido aumentando su campo de aplicación dentro del tratamiento de aguas. La evolución en el desarrollo de las membranas ha mejorado su rendimiento y efectividad y ha contribuido a la reducción de los costos de operación.

#### **2.3.3.1. Intervalo de Filtración**

Las distintas tecnologías de membrana se diferencian fundamentalmente en el intervalo de filtración. En la Figura 9 se muestran los intervalos de filtración de las distintas tecnologías y se comparan con compuestos habituales:

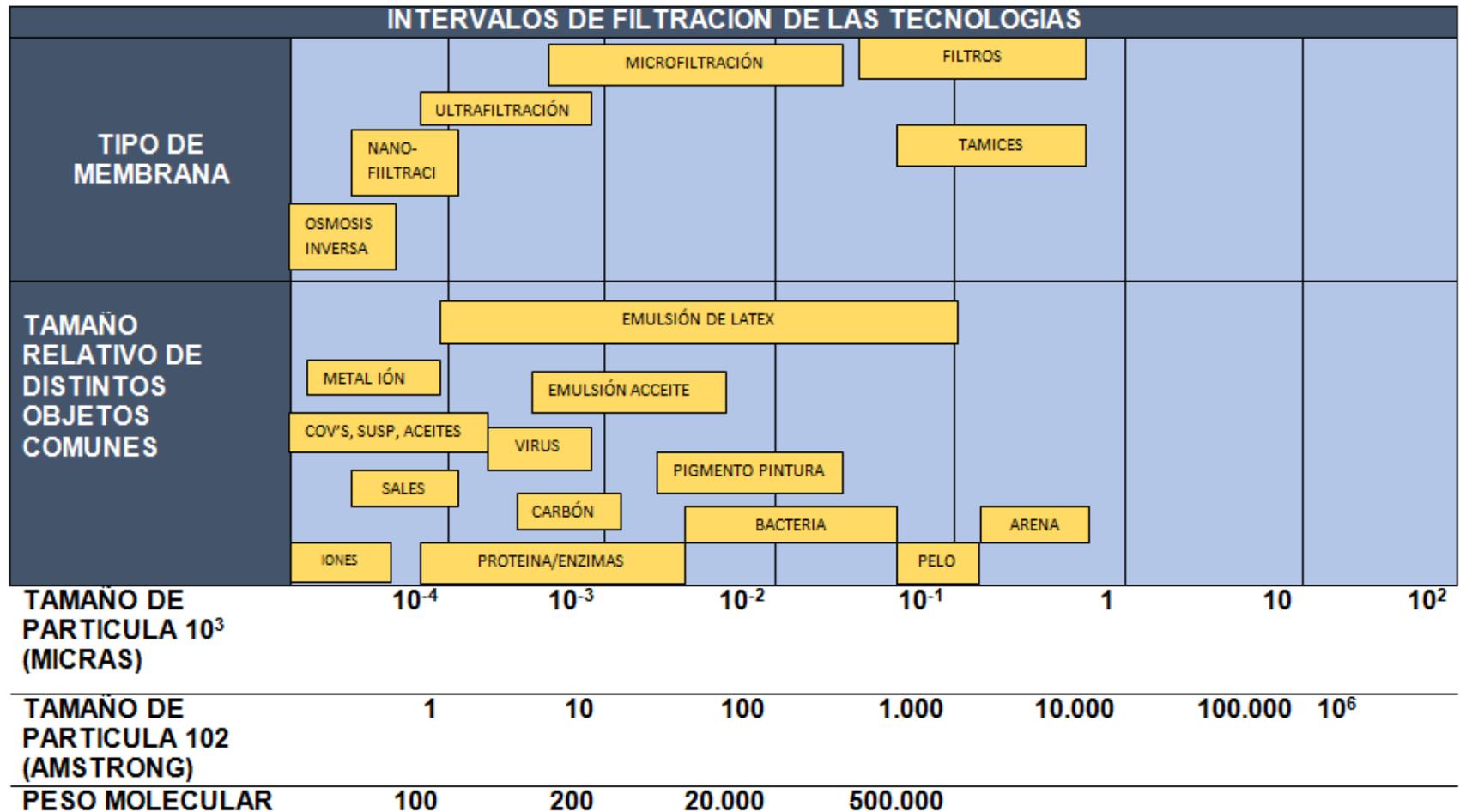
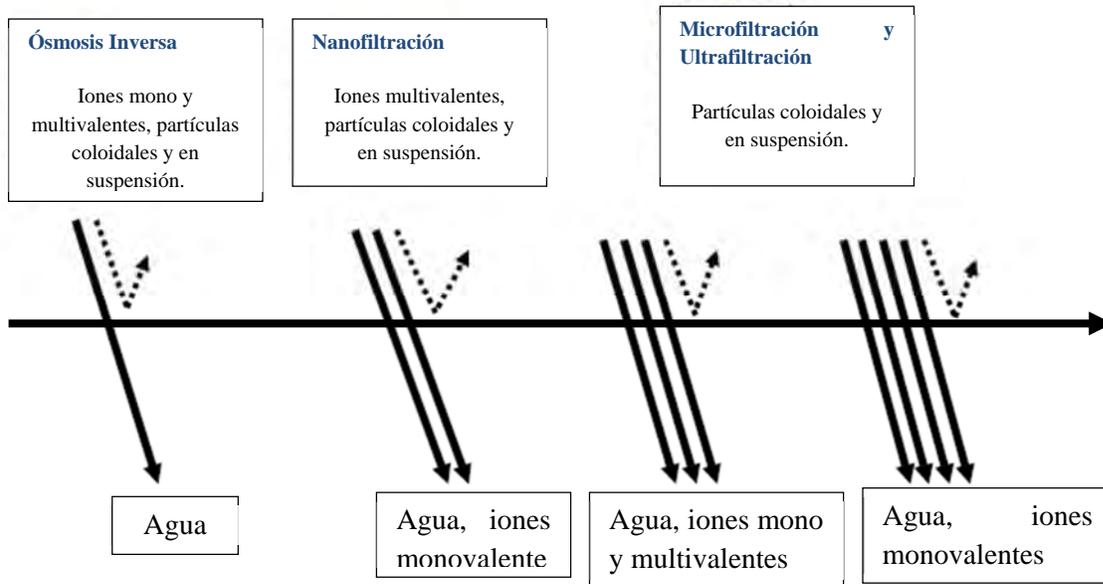


Figura 9. Rangos de filtración de las tecnologías de membranas (Cifuentes, 2008).

Las tecnologías de filtración se diferencian por el nivel de retención y por las especies que dejan pasar y aparecen en la corriente de producto, tal y como puede verse en la Figura 10.



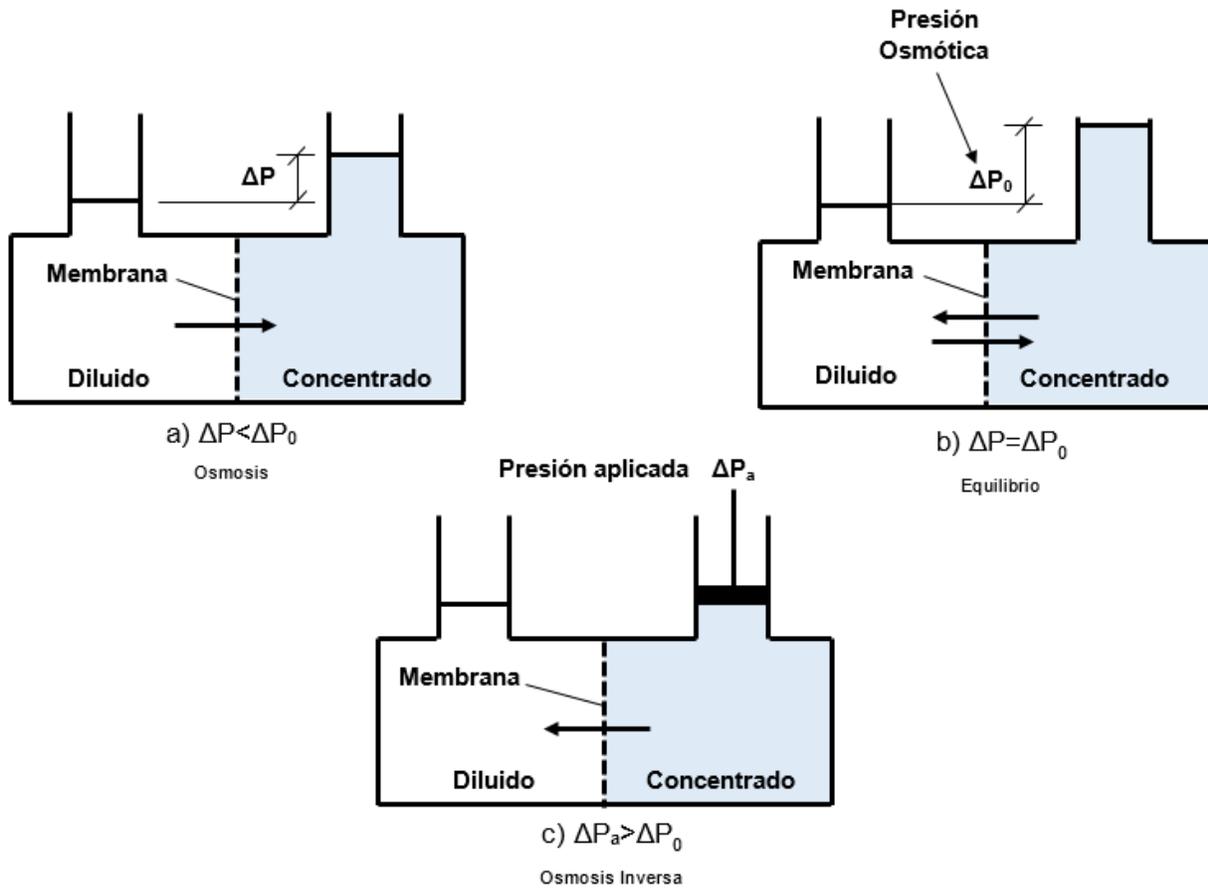
**Figura 10.** Nivel de retención por las diferentes tecnologías de membranas. (Cifuentes, 2008)

### 2.3.3.2. Ósmosis Inversa

La Ósmosis Inversa es una modificación de proceso natural de ósmosis, que se lleva a cabo cuando dos disoluciones de una sustancia con distinta concentración se ponen en contacto y tiene lugar el fenómeno de difusión: las concentraciones de las disoluciones tienden a igualarse a través de una membrana. La fuerza que hace que las moléculas pasen de un lado a otro de la membrana se denomina presión osmótica.

La Ósmosis Inversa utiliza un tipo especial de membranas llamadas semipermeables, que tienen la propiedad de dejar pasar el agua pero no las sales. Si se ponen en contacto dos soluciones con diferente concentración a través de una membrana semipermeable y se aplica una presión suficiente a la solución concentrada es posible invertir el proceso de ósmosis, de manera que el agua pase de la solución más concentrada a la más diluida. Este proceso, conocido como ósmosis inversa, requiere de la aplicación de una presión suficiente para

contrarrestar la presión osmótica e invertir el proceso de ósmosis que se daría de forma natural. En la Figura 11 se esquematiza el proceso:



**Figura 11.** Esquematización de un sistema de Ósmosis Inversa (Cifuentes, 2008).

Un sistema de OI está formado por los siguientes elementos:

- Filtros tipo cartucho con las membranas semipermeables.
- Módulos funcionales. La disposición de la OI consiste en módulos o tubos de presión en cuyo interior se alojan los filtros con las membranas.
- Equipo de bombeo, con o sin sistema de recuperación de energía.
- Tanque de desplazamiento de salmuera.
- Sistema de lavado químico de membranas.
- Sistema de almacenamiento y dosificación de bisulfito sódico para la eliminación del cloro.
- Sistema de almacenamiento y dosificación de antiincrustante para prevenir las incrustaciones en la superficie de las membranas.

### **2.3.3.3. Membranas**

El elemento fundamental en la Ósmosis Inversa en las membranas, que se disponen en módulos en el interior de unos cartuchos sujetos a presión y que se arreglan en módulos. Existen diversas configuraciones de membranas, siendo las más utilizadas actualmente en el tratamiento de agua, las de fibra hueca y las de arrollamiento en espiral (Cifuentes, 2008).

### **2.3.3.4. Tipos de módulos**

Se llaman módulos porque se fabrican con cientos de miles de membranas de fibra hueca doblada en forma de U y colocada paralelamente a un tubo central. Las membranas se fijan en ambos extremos mediante resina epoxi para dar estabilidad al haz.

La solución de aporte se introduce a presión en el tubo central, repartiéndose homogéneamente a través de todo el haz de fibra. Cuando la solución entra en contacto con la superficie exterior de la fibra, donde se encuentra la capa activa, una parte de la misma atraviesa la fibra, moviéndose por su interior hueco hasta un extremo abierto.

Cada módulo contiene láminas rectangulares de membrana semipermeable dobladas por la mitad, de forma que la capa activa quede en su exterior. Entre las dos mitades se coloca un tejido provisto de diminutos canales para recoger el permeado que atraviesa la membrana y conducirlo hasta el tubo central de acumulación. Encima de la capa activa se coloca una malla provista de canales de distribución para repartir homogéneamente la solución de aporte sobre toda la superficie de la membrana.

El paquete así formado se enrolla alrededor del tubo central, dando lugar a un cilindro al que se le colocan dos dispositivos prácticos en los extremos para evitar su deformación, tras lo que se recubre el conjunto con una resina epoxi con fibra de vidrio para darle la rigidez y resistencia mecánicas necesarias.

Los módulos se interconectan en serie dentro de un tubo destinado a soportar la presión de trabajo.

En el interior de cada tubo de presión puede instalarse hasta 7 u 8 módulos, alcanzándose longitudes totales superiores a los 7 metros.

Actualmente los módulos espirales son los más utilizados, debido a que pueden estar normalizados y pueden ser sustituidos por otras marcas. Los módulos de fibra hueca, por el contrario, no son intercambiables (Cifuentes, 2008).

### 2.3.3.5. Material de las membranas

Respecto al material de las membranas, los más utilizados son el acetato de celulosa y la poliamida. En la Tabla 8 se resumen las ventajas e inconvenientes de cada una de ellas:

**Tabla 8.** Ventajas e inconvenientes de los diferentes tipos de materiales para membranas. (Cifuentes, 2008)

	<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
Acetato de celulosa	Alta permeabilidad Alto porcentaje de rechazo de sales Tolerancia de cloro libre Bajo costo	Alta Sensibilidad a la hidrólisis Posibilidad de degradación Alto riesgo de disolución de la membrana Aumento de paso de sales con el tiempo Elevadas presiones de trabajo
Poliamida	Alto porcentaje de rechazo de sales Ausencia de hidrólisis No biodegradabilidad Alta estabilidad química Constancia de paso de sales a lo largo de tiempo Presiones de trabajo reducidas	Sensibilidad frente a los oxidantes Fácil ensuciamiento y aparición de desarrollos biológicos Alto costo

### **3. CASO DE ESTUDIO Y EVALUACIÓN TÉCNICA DEL PROCESO DE DESMINERALIZACIÓN DE AGUA**

El presente caso de estudio se basa en la comparación de las tecnologías de intercambio iónico y electrodesionización para la desmineralización de agua.

Actualmente una de las cuestiones más importantes dentro de la Industria, es la política ambiental, el reúso y uso eficiente del agua. Por lo que dentro de esta evaluación tecnológica se mencionarán algunos puntos referentes a esta cuestión tomándola en cuenta para hacer la evaluación.

#### **3.1. Caso de estudio**

A continuación se muestran las bases de estudio establecidas para comparar con datos reales las dos tecnologías.

Para propósitos de este estudio se definió que la unidad desmineralizadora de agua consistirá en una producción de 1,200 m<sup>3</sup>/h (capacidad de diseño estándar para una Refinería promedio) y la calidad de agua de entrada y salida se detalla en la Tabla 9 y Tabla 10.

**Tabla 9.** Calidad de agua de entrada a los sistemas de desmineralización.

Parámetro	Unidades	Valor Máximo
Calcio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	76.63
Magnesio	mg CaCO <sub>3</sub> /L	63.26
Sodio	mg/L	100
Potasio	mg/	0
Bario	mg/L	≤0.05
Aluminio	mg/L	≤0.05
Hierro	mg/L	≤0.05
Cloruros	mg/L	76.63
Sulfatos	mg/L	10
Nitratos	mg/L	7
Bicarbonatos	mg/L	170
Sílice	mgSiO <sub>2</sub> /L	9.8
Estroncio	mg/L	0
Manganeso	mg/L	≤0.05
Sólidos disueltos totales	mg/L	550
Sólidos suspendidos totales	mg/L	≤2
Índice de ensuciamiento	SDI	≤3
Turbidez	NTU	≤0.05
pH	nominal	7.78
Temperatura	°C	25-30
Demanda química de oxígeno	mg/L	≤10
Sulfuro coloidal	mg/L	Ausente
Grasas y aceites	mg/L	Ausente
Carbono orgánico total	mg/L	≤2

**Tabla 10.** Calidad de agua de salida a los sistemas de desmineralización.

Parámetro	Contenido
Temperatura	≈ 30°C
pH	5.5-6.5
Conductividad	≤ 4 μS/cm a 25°C
Dureza	0 (mg de CaCO <sub>3</sub> /L)
Sílice	≤ 0.02 (mg/L)

### **a) Intercambio iónico**

Las siguientes bases de diseño de la tecnología de intercambio iónico fueron obtenidas para bases prácticas del proyecto.

#### ***Descripción del sistema y su operación***

##### ***Tanques de intercambio iónico***

La columna está construida en múltiples unidades de cámaras.

Cada columna tiene un plato de boquilla ascendente y descendente, las boquillas han sido diseñadas de tal manera que asegura la eficiente distribución del líquido durante la fase de carga y la fase de regeneración. En una unidad de cámara múltiple, un plato intermedio de boquillas separa las cámaras individuales.

##### ***Transferencia de resina y torre de retro lavado***

Si el agua alimentada no contiene cantidades excesivas ( $\leq 2.0$  mg/L) de sólidos suspendidos, la torre de retro lavado no necesita estar permanentemente conectada a los tanques de intercambio iónico: las mangueras flexibles pueden estar conectadas cuando sea necesario. Para un sistema multi-unidad, se necesitan no más de 2 torres de retro lavado (una para la resina de intercambio catiónico y otra para el aniónico).

##### ***Carga.***

La carga se realiza en flujo ascendente, la cama de resina completamente compactada para que no haya la oportunidad de que la resina desclasifique.

##### ***Regeneración.***

La regeneración y el desplazamiento de enjuague se realizan en flujo descendente, la cama de resina permanece compactada por gravedad.

##### ***Tipo sándwich (MBD)***

Cuando la carga iónica es de baja a moderada, las resinas fuertemente ácidas y fuertemente básicas pueden ser combinadas en la misma columna, divididas en 2 cámaras. Este arreglo, también conocido como sistema sándwich, es particularmente

útil para plantas de tamaño pequeño a grande cuando el espacio del piso es limitado, ya que resulta un diseño muy compacto.

. Si la calidad del agua tratada es buena, esta puede ser usada como una unidad pulidora para flujo en paralelo o contra flujo en plantas de deionización regenerada.

### ***La tecnología del proceso.***

En la fase de la carga, todas las columnas de intercambio iónico operan en modo en flujo ascendente. Las columnas individuales están diseñadas como columnas multi-cámara y contienen la misma resina o difieren en la fuerza de disociación. Las columnas (o sus cámaras superiores en una columna multi-cámara) están casi completamente llenadas para evitar una desclasificación de la cama de la resina durante el servicio.

El grado de deionización depende estrechamente de una cama de resina estable y compacta. La cama absorbe las impurezas iónicas, que garantizan una utilización eficiente de los productos químicos regenerantes y una alta capacidad de la resina, dada por las capas de la cama que no están distribuidas durante la regeneración.

#### **1) Operación de servicio intermitente.**

Aunque el sistema es relativamente insensible a los servicios intermitentes de operación al cambio del caudal, frecuentemente los interruptores pueden afectar la estabilidad de la cama o camas de la resina. Una recirculación parcial del agua de la salida del intercambiador iónico (o de la unidad pulidora) regresa a la entrada del intercambiador catiónico y por lo tanto se recomienda cuantas interrupciones se esperan.

#### **2) Recirculación**

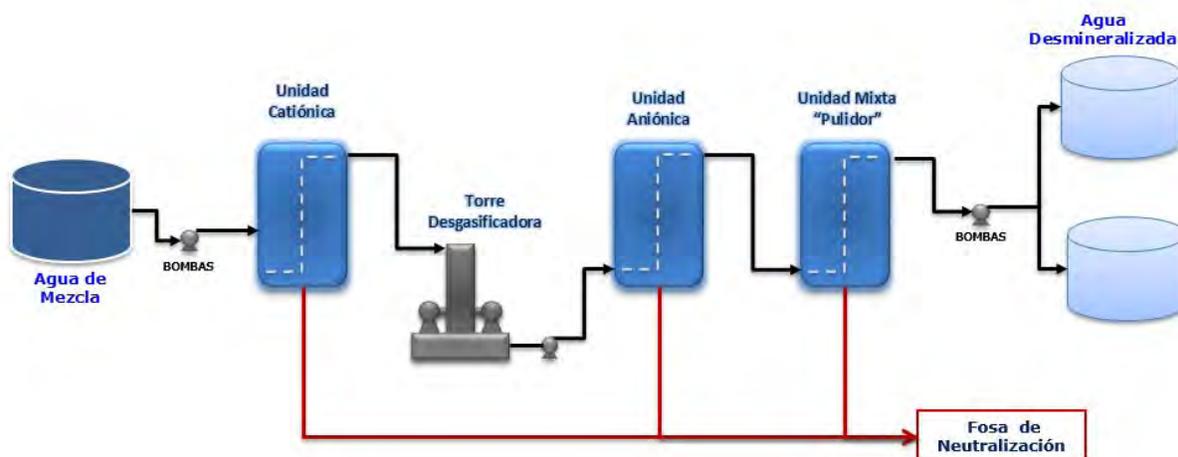
La recirculación durante el servicio ofrece un incremento notable en la calidad del agua tratada y en la última etapa, para reducir la cantidad del agua de servicio tratada.

#### **3) Regeneración.**

En toda la columna de una instalación, las soluciones regenerantes y el flujo de agua de enjuague van de la parte superior a los fondos.

**Descripción del tren de tratamiento de agua**

Después de una etapa de pretratamiento, se utilizará el sistema de intercambio iónico, el cual se muestra en la Figura 12.



**Figura 12.** Diagrama del proceso actual de desmineralización de agua.

- **Sistema de clarificación del agua cruda.** El actual sistema de clarificación está compuesto por dos equipos clarificadores, los cuales están encargados de acondicionar la calidad del agua que entra, los parámetros principales de acondicionamiento para la calidad del agua es la cantidad de sólidos suspendidos totales los cuales afectan la turbidez del agua.
- **Intercambiadores iónicos.** El sistema de Unidades Desmineralizadoras de Agua (en lo sucesivo UDAs) es parte del sistema de tratamiento con el que se cuenta para dar suministro en calidad y cantidad de agua al sistema de generación de vapor, considerando que los requerimientos de calidad de agua de alimentación a las calderas debe ser de acuerdo a la calidad del vapor que se requiere.
- **Sistema de neutralización.** El agua proveniente de la regeneración de las columnas cationicas y aniónicas, de cada tren es enviada a la fosa de neutralización. El análisis de la regeneración de la planta indica que el efluente ácido es mayor que el alcalino y en una mezcla de ellos el pH es ácido (3-5), por lo que se necesita neutralizar este efluente antes de enviarlo al cuerpo de agua.

En la Tabla 11 se pueden observar la descripción de los equipos principales del sistema de intercambio iónico del presente caso de estudio.

**Tabla 11.** Descripción de los equipos principales de las UDAs.

Características	Unidades	Unidad catiónica	Unidad aniónica	Lecho mixto
Servicios	-	Intercambiador Catiónico.	Intercambiador Aniónico.	Desionizador de Lecho Mixto.
Flujo normal de diseño por tren	m <sup>3</sup> /h tren	200	200	200
Presión de Diseño por Unidad	kg/cm <sup>2</sup>	5.4	6	5.8
Temperatura de diseño	°C	53.2	53.2	53.2
Tipo de Resina	-	Amberjet 1200Na	Amberjet 4200Cl Amberlite IRA-96RF	Amberjet 1200Na; Amberjet 4200Cl .
Volumen de resina por unidad	L	268,650	107,100 ; 100,080	31,500 ; 31,500
Recubrimiento interior del intercambiador	-	A516-70 con Recubrimiento de goma.	A516-70 con Recubrimiento de goma.	A516-70 con Recubrimiento de goma.
Sodio Na <sup>+</sup>	mg/L	15	18	9
Hidrógeno H <sup>+</sup>	mg/L	476	---	---
Calcio Ca <sup>+2</sup>	mg/L	0	0	0
Magnesio Mg <sup>2+</sup>	mg/L	0	0	0
Hidroxilo OH <sup>-</sup>	mg/L	0	14	6
Carbonato CO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mgCaCO <sub>3</sub> /L	0	4	3
Cloruro Cl <sup>-</sup>	mg/L	280	0	0
Sulfato SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	mg/L	205	0	0
Sílice SiO <sub>2</sub>	mg/L	45	0.25	0.15
DBO libre	mg/L	150	---	---

La tecnología utilizada en esta unidad para generar agua desmineralizada es el sistema iónico Amberpack, el cual se compone de 3 unidades desmineralizadoras divididas en 3 trenes de desmineralización (Catiónico, Aniónico y Mixto), de los cuales dos se mantienen operando y el otro en regeneración. Por diseño, cada tren

de desmineralización está formado por una unidad de catión débil, un catión fuerte, un desgasificador y un anión estratificado o mixto.

### **b) Electrodesionización en Continuo (CEDI)**

#### ***Arreglo elegido para la desmineralización por medio de CEDI.***

Para el presente trabajo se consideró una capacidad de diseño de 1,200 m<sup>3</sup>/h (4 trenes en operación más uno en espera o *stand-by*). Se optó por un diseño conservador, estructurado en torno al sistema estándar de OI con el fin tener una solución completa y flexible.

El siguiente proyecto incluye:

1. Etapa de filtración y dosificación de reactivos químicos.
  - 1.1 Dosificación de químico bisulfito de sodio
  - 1.2 Dosificación de químico anti incrustante.
2. Trenes de desmineralización (4+1), cada uno consiste en:
  - 2.1 Ósmosis Inversa de primer paso.
  - 2.2 Ósmosis Inversa de segundo paso
  - 2.3 CEDI (Unidad de electrodesionización)

Cada tren con capacidad de producir 300 m<sup>3</sup>/h.

#### ***Calidad de agua tratada***

El agua producto a la salida del equipo CEDI tendrá las siguientes características.

- Temperatura:  $\approx 30^{\circ}\text{C}$
- pH: 5.5 – 6.5
- Conductividad:  $<4 \mu\text{S/cm}$  a  $25^{\circ}\text{C}$
- Dureza: 0 (mg CaCO<sub>3</sub>/L)
- Sílice:  $<0.02$  (mg SiO<sub>2</sub>/L)

#### ***Datos operativos de diseño***

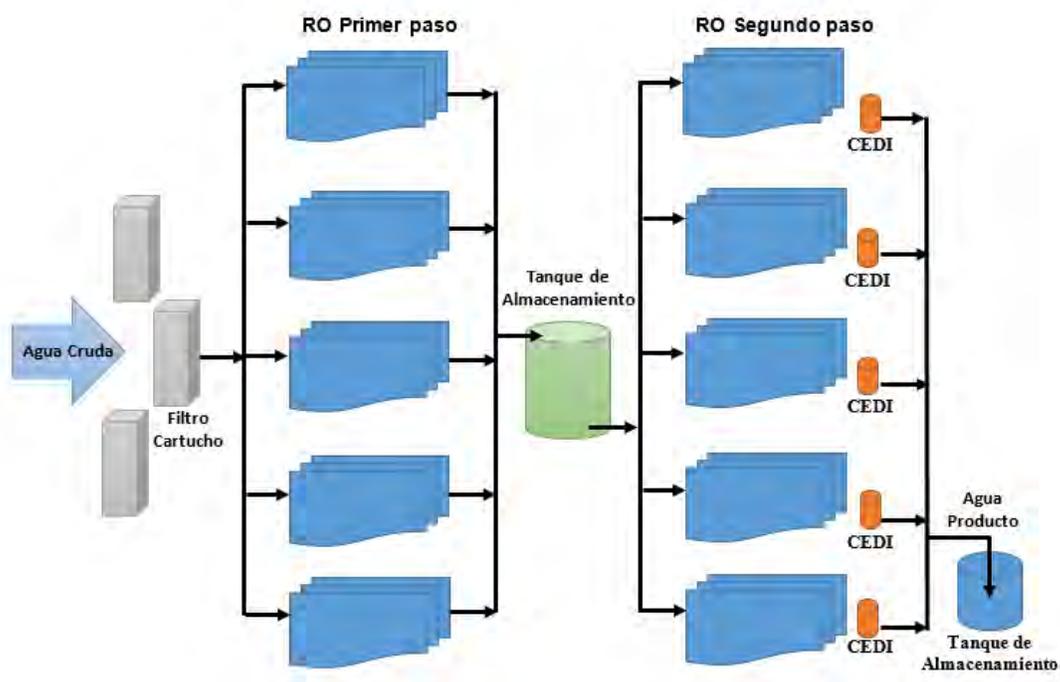
La planta de tratamiento por OI garantiza un funcionamiento óptimo de acuerdo con los parámetros que aparecen en el siguiente diseño siempre que se cumplan las siguientes premisas marcadas en la Tabla 12.

**Tabla 12.** Condiciones de operación para el sistema elegido.

Parámetro	Valor
Temperatura del agua	30°C
Presión de alimentación al equipo	3 - 4 Bar
Índice de atascamiento del agua (SDI)	< 3
Hierro total	< 0.1 mg/L
Manganeso	< 0.1 mg/L
Rango de pH en operación	2 - 11
Tolerancia al cloro libre	< 0.1 mg/L

**Línea de tratamiento propuesta.**

El arreglo propuesto para el presente caso de estudio se muestra en la Figura 13.

**Figura 13.** Arreglo típico de un sistema de doble paso Ósmosis Inversa con CEDI.**3.2. Evaluación de las tecnologías**

De acuerdo en la metodología mostrada en el Anexo A) se evaluaron las tecnologías consideradas para este caso de estudio, definiendo los aspectos, subaspectos y factores de impacto, otorgándoles valores en escala de calificaciones para poder

generar una matriz e indicar cuál de las dos tecnologías obtuvo el mayor puntaje, para generar un criterio acerca de cuál de las tecnologías es mejor.

### 3.2.1. Definir los aspectos a considerar dentro de la evaluación

En la Tabla 13 se muestran los aspectos a considerar en la evaluación del caso de estudio.

**Tabla 13.** Aspectos a considerar en la evaluación.

Aspectos	Decisión
1. Evaluación técnica del proceso	Si
2. Evaluación de aspectos técnicos complementarios	Si
3. Evaluación económico-financiera	Si
4. Evaluación contractual	No
5. Evaluación de aspectos plausibles	No
6. Evaluación de aspectos estratégicos	Si
7. Evaluación de aspectos normativos	No

El aspecto contractual no se tomó en consideración ya que es una evaluación para determinar que tecnología es mejor para fines didácticos.

Los aspectos plausibles no fueron considerados ya que puede asumirse que este es un proyecto en donde las diferentes tecnologías tienen los mismos efectos macro-económicos, políticos y sociales.

Los aspectos normativos no fueron considerados para la evaluación debido a que dentro de las refinerías, la calidad del agua está referida a normas específicas y a que el sistema está considerando los límites permisibles de dichas normas. Cabe aclarar que la tecnología de electrodesionización presenta una ligera ventaja ambiental ya que disminuye en forma considerable el uso de químicos disminuyendo el impacto en la descarga de efluentes, sin embargo, su impacto no se medirá fuera de la unidad, si no tan sólo en términos económicos.

### 3.2.2. Identificación de los subaspectos o factores que pueden ser utilizados como criterios restrictivos (filtros)

De un análisis de los subaspectos y factores que conforman un aspecto, se seleccionaron los criterios restrictivos (filtros) mostrados en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Definición de filtros restrictivos

<b>Filtros</b>	<b>Valor</b>
Capacidad de la unidad	1200m <sup>3</sup> /h
Temperatura	≈ 30°C
Conductividad	<4 μS/cm a 25°C
pH	5.5-6.5
Dureza	0.0005 mg CaCO <sub>3</sub> /L
Sílice	<0.02 mgSiO <sub>2</sub> /L

Se tomaron en cuenta estos filtros dado que es de suma importancia los parámetros de salida de ambas plantas desmineralizadoras, ya que necesitan cumplir ambas con la calidad de agua hacia calderas y por consiguiente las dos deben de ser de la misma capacidad para poder cumplir con la demanda de agua desmineralizada de la Refinería.

### 3.2.3. Ponderación de los criterios utilizados para la evaluación.

La Tabla 15 muestra el porcentaje de ponderación que se le asigna a cada criterio, basado en la importancia que tiene cada una de estas para la decisión final de la selección de la mejor opción.

La ponderación citada en la Tabla 16 se considera porcentajes con base en la importancia que se le otorga a cada criterio para la toma de la decisión final.

**Tabla 15.** Asignación de la ponderación de cada aspecto a evaluar

<b>Criterios</b>	<b>Porcentaje de ponderación</b>
Criterios técnicos de proceso	40%
Criterios técnicos complementarios de proceso	10%
Criterios económicos-financieros	45%
Criterios estratégico-tácticos	5%
<b>Total</b>	<b>100%</b>

Es de resaltar que en este caso se dio mayor peso a los aspectos económico-financieros, ya que en este grupo se evalúa la economía intrínseca del proceso, en la cual de acuerdo al enfoque de sistemas como caja negra se deben de ver reflejadas las ventajas de las tecnologías. Es decir, si una tecnología es líder debe de mostrar ventajas tanto en los rendimientos de productos como en el consumo de servicios auxiliares. A los criterios técnicos de proceso se les otorgó un puntaje mayor dado que estos aspectos son de suma importancia para la toma de decisiones.

En los criterios técnicos de proceso se tiene uno de los porcentajes más altos dado que es de los criterios más importantes y de los cuales se tiene más información, en lo referente a la ponderación de los aspectos, el que tiene el puntaje más alto es el de flexibilidad del proceso y esto dado a que tiene que ver con la flexibilidad del sistema con respecto a las calidades de entrada y salida de ambas tecnologías como también su capacidad de operación. Uno de los subaspectos más importantes es el consumo de servicios auxiliares y reactivos químicos, ya que es uno de los principales problemas de la tecnología de intercambio iónico, es el uso de reactivos químicos para la regeneración de las resinas y un tratamiento posterior del agua de retrolavado, y es un excelente punto de comparación con la tecnología de electrodesionización, dado que esta tecnología no requiere el uso de químicos para la regeneración de resinas, pero si requiere un excedente de energía eléctrica. En la parte de concordancia del proceso con las bases de diseño se calificó con un bajo porcentaje dado a que ambas tecnologías son requeridas para un mismo fin y las calidades de agua de entrada son las mismas y producen una misma calidad de agua.

En lo referente a los criterios técnico complementarios se le asignó uno de los valores más bajos debido a que este criterio está más enfocado a las exigencias a los proveedores, indicando cuales serían las garantías que requiere la empresa por parte de los proveedores y en referente al sub aspecto de la experiencia técnica-administrativa del licenciador tiene que ver con el número, capacidad y fecha de plantas diseñadas, en operación y en construcción, por mencionar los aspectos principales.

Los criterios económico-financiero tienen el mayor puntaje dado que se cuenta con suficiente información acerca de los costos de inversión, operación y mantenimiento para ambas tecnologías, también este criterio arroja resultados cuantitativos para evaluar las tecnologías. En el subaspecto de la rentabilidad es el de mayor valor ya que se compara un factor llamado Costo Anual Equivalente (CAE) y este indica que tecnología tiene mayor ventaja de acuerdo a los factores de costos de inversión, operación y mantenimiento.

Los criterios estratégico-tácticos para este caso fueron valorados en un porcentaje muy bajo debido a que estos subaspectos fueron relacionados con el plan de negocios de PEMEX, de éste se tomaron como ejemplo algunos puntos que podrían aplicar a las tecnologías evaluadas. El punto de partida fue la sustentabilidad que puede ofrecer cada tecnología y aquí se considera el criterio de la protección al ambiente para la aplicación de cualquiera de las dos tecnologías.

**3.2.4. Seleccionar para cada aspecto, los subaspectos (SA) i y factores (Fi) a ser evaluados.**

Del análisis de los subaspectos y factores que conforman un aspecto se los citados en la Tabla 16 (cabe mencionar que no se hace la diferencia entre subaspecto y factor).

**Tabla 16.** Aspectos y factores a ser evaluados en la evaluación de estudio.

Aspecto	Subaspecto y/o factores
Aspectos técnicos de proceso	Concordancia del proceso con las bases de diseño. <ul style="list-style-type: none"> <li>• Capacidad</li> <li>• Especificaciones de efluente</li> <li>• Flexibilidad con respecto a cambios</li> </ul> Flexibilidad del proceso <ul style="list-style-type: none"> <li>• Calidad de influente (carga)</li> <li>• Capacidad de operación (hidráulico)</li> <li>• Automatización</li> </ul> Consumo de servicios auxiliares y reactivos químicos. Riesgos de fallas en equipos de proceso
Aspectos técnicos complementarios	Supervisión en arranque, pruebas de garantías, y operación Experiencia técnica-administrativa del licenciador.
Aspectos económico-financieros	Economía del proceso <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversión directa</li> <li>• Costos de operación</li> <li>• Mantenimiento</li> <li>• Capital de trabajo</li> </ul> Rentabilidad <ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo Anual Equivalente</li> </ul> Sensibilidad de la rentabilidad <ul style="list-style-type: none"> <li>• Inversión directa</li> <li>• Costos de operación</li> <li>• Mantenimiento</li> </ul>
Aspectos estratégico-tácticos	Eficiencia operativa Sustentabilidad de negocio (reúso del agua) Operación segura y confiable

### 3.2.5. Puntajes o pesos en fracción para los subaspectos y factores.

Para definir los puntajes o pesos en fracción para cada uno de los aspectos considerados son definidos de la siguiente manera:

$$1 = \sum W_i \text{ (para los subaspectos considerados)}$$

$$1 = \sum w_i \text{ (para los factores considerados en cada subaspecto)}$$

En la Tabla 17 se muestra la escala de calificación para cada uno de los atributos siendo el 5 la calificación más alta y el cero un atributo no disponible.

**Tabla 17.** Escala de calificación de atributos.

Descripción	Calificación
Atributo no disponible	0
Calificación mínima / Atributo muy pobre	1
Calificación media / Atributo promedio	3
Calificación máxima / Atributo muy bueno	5

#### **A) Criterios técnicos de proceso**

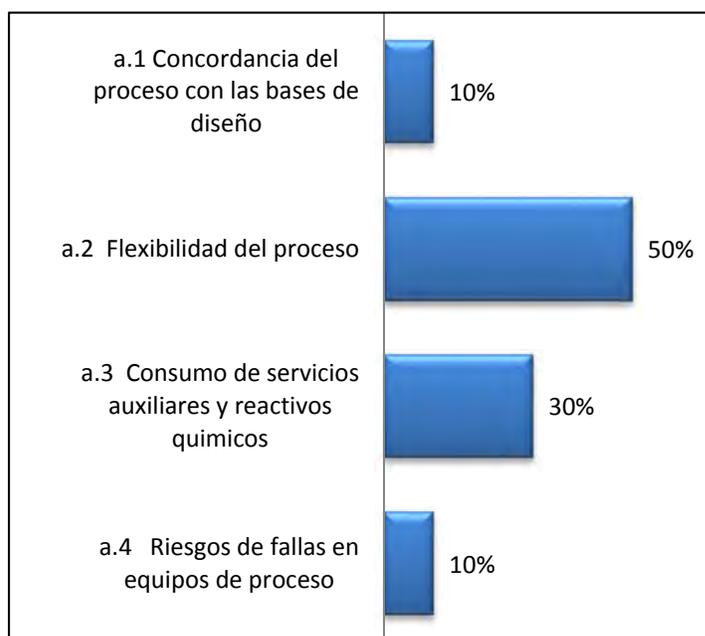
Este criterio de comparación da una guía en la cual se indica cuál de las dos tecnologías tiene mayor flexibilidad de acuerdo al proceso.

En la Tabla 18 se enlistan los criterios técnicos considerados para las dos tecnologías así como la puntuación establecida.

**Tabla 18.** Puntuación de los criterios técnicos de proceso para ambas tecnologías.

Criterios Técnicos de Proceso	Intercambio Iónico	CEDI
<b>a.1 Concordancia del proceso con las bases de diseño</b>		
a.1.1 Capacidad	5	5
a.1.2 Especificaciones de efluente	5	5
a.1.3 Flexibilidad con respecto a cambios	5	3
<b>a.3 Flexibilidad del proceso</b>		
a.3.1 Calidad de influente (carga)	5	3
a.3.2 Capacidad de operación (hidráulico)	5	5
a.2.3 Automatización	2	5
<b>a.4 Consumo de servicios auxiliares y reactivos químicos</b>	1	4
<b>a.5 Riesgos de fallas en equipos de proceso</b>	4	3

En la Figura 14 se muestran los porcentajes dados a cada uno de los criterios técnicos.



**Figura 14.** Diferentes rangos de puntuación a los criterios técnicos.

**i) Intercambio Iónico.**

Los aspectos técnicos del proceso resultaron favorables para la tecnología de intercambio iónico ya que es un proceso que se ha utilizado durante más de 50 años en las industrias, por lo que es mundialmente conocido y confiable.

Es comprensible que en los tres subaspectos del punto de concordancia del proceso con las bases de diseño (a.1) haya obtenido la máxima puntuación, ya que es un proceso que en la mayoría de las empresas es utilizada, dado a la amplia experiencia en su uso, fácil manejo y de mantenimiento relativamente simple. También es un sistema con una gran flexibilidad, porque cuenta con diversos arreglos y tipos de resinas que se adaptan a las especificaciones requeridas de la calidad de agua de entrada y salida.

En términos de rendimiento (remoción) es 95% eficiente y por lo general no requiere un pretratamiento tan sofisticado.

Un gran inconveniente de este proceso es la cantidad de químicos utilizados en la regeneración de las resinas, que produce subproductos que deben ser tratados y enviados a efluentes, por lo que en este aspecto se le otorga la calificación de uno.

Otro inconveniente de la tecnología es el requerimiento de una gran infraestructura que se da por el requerimiento de los tanques de intercambio iónico y reactivos químicos, así como la necesidad de un gran número de tuberías y válvulas para el retrolavado y dosificación de reactivos químicos para la regeneración de las resinas.

Los principales riesgos de fallas en el equipo son el sistema de instrumentación y control (que son necesarios para una buena operación), ya que en la mayoría de los casos no se le da un buen mantenimiento y esto genera problemas a largo plazo para el sistema generando altos costos por su reparación o lo que es peor una mala operación, requiriendo más reactivos y generando menos producto.

**ii) Electrodesionización en Continuo**

En la evaluación de los aspectos técnicos del proceso CEDI, presentaron algunos inconvenientes, ya que es una tecnología relativamente nueva (1980's) y por lo mismo aún no es implementada en diversas empresas. En cuestiones de capacidad y rendimientos es bastante eficiente, ya que remueven casi un 99% de sales y soporta grandes flujos, dependiendo del arreglo. En el subaspecto de la flexibilidad con respecto a cambios (a.1.3) obtiene una calificación baja ya que al contar con relativamente poco tiempo en su desarrollo aún no se han propuesto diversas

configuraciones para ser flexible con las demandas de los clientes; otro punto que obtuvo una calificación baja es en la calidad del influente (a.3.1), esto porque las membranas son delicadas y requieren cierta calidad para que no haya falla alguna, por lo que forzosamente hay que agregar un sistema de doble paso de Ósmosis Inversa y esto aumenta todos los parámetros como son químicos, equipos, servicios auxiliares, costos, por mencionar los principales.

La CEDI utiliza una regeneración libre de reactivos químicos. Esto significa un ambiente de trabajo más seguro porque no hay necesidad de almacenar ácidos y bases peligrosos. Existen menos regulaciones debido a la ausencia de estos productos químicos corrosivos y no hay residuos de neutralización o problemas de disposición.

La CEDI es un proceso continuo. Las resinas de intercambio iónico son regeneradas continuamente por el campo eléctrico de corriente directa. No hay ruptura de iones como sucede en las operaciones de intercambio iónico, por lo tanto la calidad del agua se mantiene a un nivel alto constante de pureza. El campo eléctrico también provee un ambiente bacteriostático dentro de la celda CEDI, evitando el crecimiento de la bacteria y otros organismos.

Se requiere solamente una cantidad relativamente pequeña de energía eléctrica para generar agua de alta pureza. La ausencia de ácido y sosa de regeneración significa menor atención por parte del operador y menor costo de operación.

El CEDI es significativamente más pequeño que el proceso de intercambio iónico. Esto significa que requieren menos espacio en la planta para producir la misma cantidad de agua.

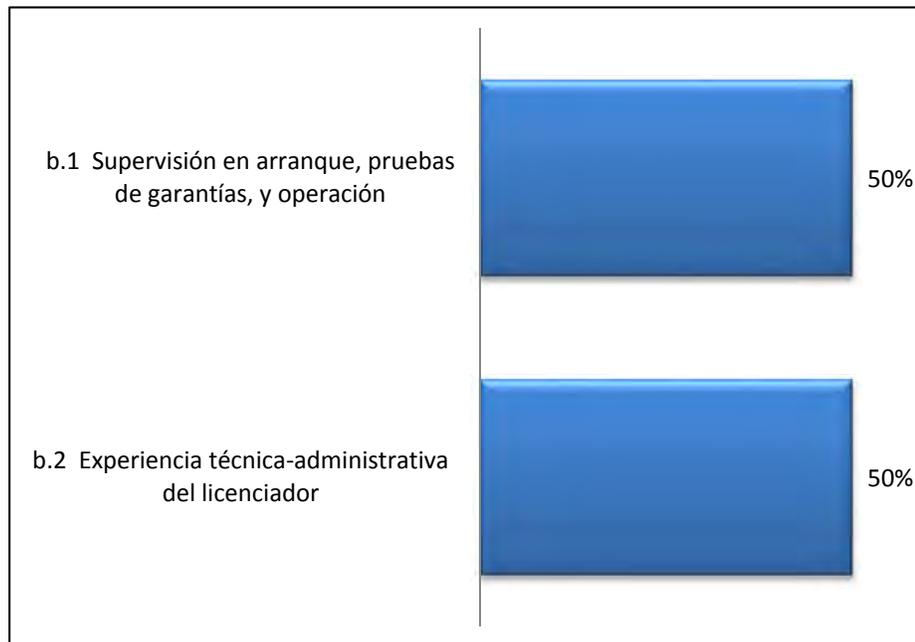
**B) Criterios complementarios**

En este criterio fueron comparados criterios técnicos para complementar los anteriores, haciendo hincapié en aspectos más específicos relacionados con la tecnología. En la Tabla 19 se muestra la puntuación dada a los criterios técnicos complementarios para las tecnologías.

**Tabla 19.** Puntuación de los criterios técnicos complementarios para las tecnologías

Criterios Técnicos Complementarios	Intercambio Iónico	CEDI
<b>b.1 Supervisión en arranque, pruebas de garantías, y operación</b>	<b>5</b>	<b>4</b>
<b>b.2 Experiencia técnica-administrativa del licenciador</b>	<b>5</b>	<b>3</b>

En la Figura 15 se observa el porcentaje dado para cada uno de los criterios técnicos complementarios.



**Figura 15.** Diferentes rangos de puntuación a los criterios técnicos complementarios.

Los resultados obtenidos para cada tecnología se muestran a continuación:

**i) Intercambio Iónico**

Este criterio muestra los parámetros que deben de seguir los proveedores de las tecnologías y lo que incluye sus paquetes. En el caso del intercambio iónico es una tecnología que da gran confiabilidad, debido a que lleva bastante tiempo en el mercado y a que se tiene un amplio conocimiento de la misma. En la parte de experiencia técnica-administrativa tiene un gran potencial por la misma patente razón del tiempo y experiencia acumulados, este criterio tiene que ver con el número, la capacidad y fecha de plantas diseñadas, en operación y en construcción. Para el caso de esta tecnología está instalada en la mayoría de las instalaciones del Sistema Nacional de Refinación utilizando este sistema para el tratamiento de agua de alimentación a calderas, por la CFE (Comisión Federal de Electricidad) y otras industrias.

**ii) Electrodesionización en Continuo**

Para este criterio la tecnología de electrodesionización obtuvo una puntuación más baja que el intercambio iónico, por tratarse de una tecnología relativamente joven y aún en México no se ha implementado en gran número de industrias. También obtuvo una puntuación baja debido a que los arreglos que presenta son estrictos y no deja gran flexibilidad operativa (haciendo más estrecha su compra o mantenimiento), ya que es una tecnología que por el momento presenta una sola patente perteneciente a una compañía.

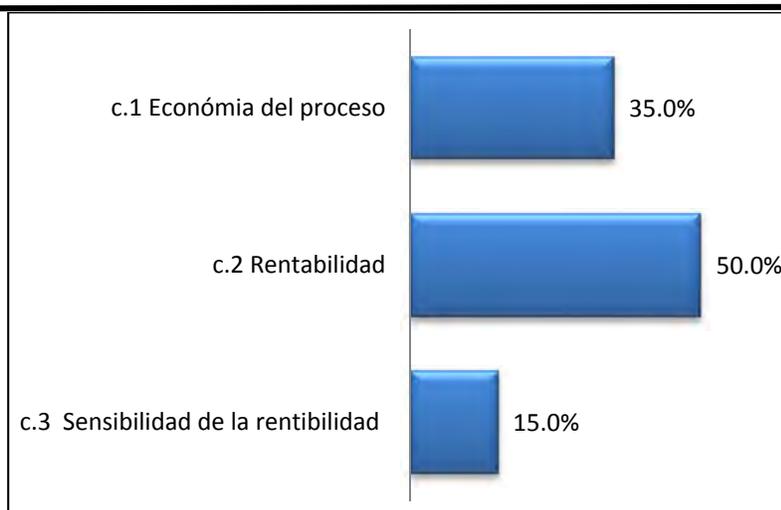
**C) Criterios Económico-Financieros**

En la Tabla 20 se muestra la puntuación otorgada para cada criterio económico-financiero para ambas tecnologías.

**Tabla 20.** Puntuación de los criterios económicos-financieros para ambas tecnologías.

<b>Criterios Económico-Financieros</b>	<b>Intercambio Iónico</b>	<b>CEDI</b>
<b>c.1 Económica del proceso</b>		
<i>c.3.1 Inversión directa</i>	<b>5</b>	<b>3</b>
<i>c.3.2 Costos de operación</i>	<b>3</b>	<b>4</b>
<i>c.3.3 Mantenimiento</i>	<b>4</b>	<b>5</b>
<i>c.3.4 Capital de trabajo</i>	<b>3</b>	<b>5</b>
<b>c.2 Rentabilidad</b>		
<i>c.2.1 Costo Anual Equivalente (CAE)</i>	<b>3</b>	<b>5</b>
<b>c.3 Sensibilidad de la rentabilidad</b>		
<i>c.3.1 Inversión</i>	<b>5</b>	<b>3</b>
<i>c.3.2 Costos de operación</i>	<b>2</b>	<b>5</b>
<i>c.3.3 Mantenimiento</i>	<b>2</b>	<b>4</b>

En la Figura 16 se muestran los diferentes porcentajes otorgados a los criterios económico-financieros.



**Figura 16.** Puntuación de los criterios económicos-financieros.

Para la evaluación de este criterio se obtuvo un análisis más detallado de los costos de inversión inicial, costos variables de producción, costos fijos directos e indirectos que se encuentran desarrollados en el Anexo B) Como se puede observar en el criterio de parámetros de rentabilidad del proyecto solamente se utilizó el Costo Anual Equivalente (CAE) a continuación se dará una breve explicación acerca de este parámetro y por qué se utilizó (Baca, 2007).

Las situaciones que se pueden presentar al interior de una empresa para tomar decisiones económicas son muy diversas. En ocasiones es necesario seleccionar la mejor alternativa desde el punto de vista económico, pero no existen ingresos en el análisis. Algunas de las situaciones donde sólo se presentan costos para el análisis económico son:

1. Seleccionar entre dos o más equipos alternativos para un proceso industrial o comercial, que elabora una parte de un producto o servicio. El equipo no elabora un producto o servicio final que se pueda vender para obtener ingresos.
2. Seleccionar entre dos o más procesos alternativos para el tratamiento de contaminantes producidos por una industria. Es forzoso instalar el proceso de tratamiento, ya que si lo exige la ley, pero esa inversión no producirá ingresos.
3. Se requiere remplazar un sistema de procesamiento manual de datos por un sistema computarizado. O bien, se requiere sustituir el procesamiento de datos, que actualmente se realiza con computadoras personales, por un procesamiento en red. La inversión que este cambio requiere no producirá

ingresos; no obstante, son inversiones necesarias en muchas industrias y negocios.

Las situaciones de inversión que se pueden presentar en la vida cotidiana son muy diversas. Anteriormente se mostraron los métodos para tomar decisiones cuando existe una sola alternativa de inversión, que son el Valor Presente Neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). En general, este tipo de inversiones se efectúan en instalaciones industriales que producen bienes o servicios. También se han presentado métodos de toma de decisiones económicas cuando se consideran varias alternativas a la vez, y el problema bajo análisis sólo contiene datos de costos como la técnica del CAE.

Estos métodos son útiles si las inversiones se efectúan en el interior de las empresas y los objetivos del análisis son tomar decisiones y presupuestar un beneficio o un costo anual.

### *i) Intercambio Iónico*

Para esta tecnología se puede observar que los costos de inversión, operación, mantenimiento y capital de trabajo resultaron ser más elevados que la tecnología de electrodesionización y esto se debe a diferentes aspectos como son:

- Uso de reactivos químicos para la regeneración de resinas.
- Resinas catiónicas y aniónicas en grandes cantidades, como también como el remplazo de éstas después de cierto tiempo (5 años de preferencia)
- Tanques adicionales para el almacenamiento de los reactivos químicos, agua de retrolavado y para el lavado de las resinas.

Estos puntos hacen que se incrementen los costos de inversión y operación y por consiguiente aumentando el costo anual equivalente.

### *i) Electrodesionización en Continuo*

Para esta tecnología no se puede considerar solamente el puro sistema de electrodesionización dado que sus requerimientos de calidad de agua de entrada son estrictos para el cuidado de las membranas y es por eso que también se debe agregar un sistema de doble paso de Ósmosis Inversa y esto incrementa el costo, porque requiere de químicos adicionales para el tratamiento de las membranas. Otro punto importante a mencionar para este sistema es que el arreglo de Ósmosis Inversa y electrodesionización deben de estar bajo techo, en el análisis económico

de este caso de estudio no se consideró este factor ya que los costos de inversión no incluyen obra civil y tampoco se consideró puesta en cero.

Dado que los costos de inversión, operación, mantenimiento y capital de trabajo son bajos considerados con lo del intercambio iónico, se obtuvo un costo anual equivalente lo que resulta que esta tecnología sea económicamente más viable.

### ***Uso del Costo Anual Equivalente***

Se ha presentado la aplicación del CAE para seleccionar la mejor de entre varias alternativas de inversión, y cuando los datos disponibles son costos en su mayoría.

También se determinó que el CAE es sólo una forma de expresar el resultado de la decisión, ya que la obtención del valor presente de los costos del problema conduce a seleccionar la mejor alternativa económica, analizando la conveniencia de elevar la inversión a cambio de la elevación de las ganancias (o ahorros). Esta técnica se utilizó para analizar inversiones productivas, esto es, aquellas donde se invierte y se produce un ingreso directo debido a esa inversión.

Existe otro tipo de problemas en ingeniería económica, para los cuales son útiles las técnicas del CAE y de análisis incremental: decisiones de remplazo de activo.

Todo tipo de activos (excepto los terrenos), adquiridos por cualquier empresa productora de bienes o servicios deben ser remplazados en algún momento de su vida.

Un activo puede ser remplazado por dos causas principales: obsolescencia tecnológica o deterioro. La obsolescencia tecnológica, en general, se refiere al hecho de que en el momento en que se piensa en el remplazo se sabe de la existencia de, al menos, un equipo alternativo disponible en el mercado que supera al que actualmente está en uso, ya sea porque tiene una mayor eficiencia de producción, disminuye costos como mano de obra, mantenimiento o piezas rechazadas, genera más ventas por que produce mejor calidad, o simplemente porque ya no se necesita el equipo que está en uso.

En cuanto a la necesidad de remplazo por deterioro, implica que el activo actual ha sido tan utilizado que sus costos de mantenimiento, la calidad que produce y los paros en su funcionamiento son tan altos que es necesario remplazarlos. Es probable que no exista en el mercado una mejor tecnología disponible, pero el remplazo es necesario porque el equipo en uso está casi inservible.

Todo remplazo requiere de una inversión adicional, la cual se espera que sea compensada con la disminución o eliminación de los problemas que presenta el activo en uso, básicamente se desea disminuir los costos, así como elevar la producción y la calidad.

Siempre se encontrará que la vida residual del activo en uso es más corta que la vida residual del activo nuevo, lo cual es lógico. El problema de vidas desiguales se resuelve con el concepto de vida útil, que significa el número de años que el propietario piensa mantener en uso al activo, o el número de daños del periodo de análisis que desea fijar el tomador de la decisión, es decir, el tomador de la decisión puede “cortar” artificialmente el tiempo para efectos de la planeación económica que está efectuando el valor del salvamento del activo usado, ya sea en el tiempo cero, es decir, su valor de mercado en el momento del remplazo.

En el caso de estudio fue necesario el uso del factor CAE debido a que es la sustitución de un equipo que tendrá el mismo propósito y como se trata de una etapa secundaria en un proceso mayor, por lo que los beneficios no se verán relacionados directamente. Es por eso que no se puede hacer un análisis con los factores VPN, TIR, entre otros (Baca, 2007).

En la Tabla 21 se muestra una comparación de los costos de inversión y beneficios entre ambas tecnologías.

**Tabla 21.** Comparación de beneficios y costos de inversión entre CEDI e intercambio iónico convencional.

<b>CEDI Beneficios-Costos de Operación</b>		
Tecnología	Intercambio Iónico	CEDI
Electricidad	X	X
Gestión de vertido	X	
Regeneración con químicos	X	
Regeneración con agua lavado	X	
Rechazo		X
Mano de obra para regeneración		X
Rango costo de mantenimiento	1	0.20
Rango costo de operación	1	0.65
<b>CEDI Beneficios-Costo de Inversión</b>		
	Intercambio Iónico	CEDI
Equipos	X	X
Resinas o paquetes de celdas	X	X
Bombas de regeneración	X	
Tanques de Almacenamiento	X	
Sistema de neutralización	X	
Intercambiador de calor	X	
Control	X	X
Rango de instalación	1	0.25
Rango superficie de implantación	1	0.15
Rango costo de inversión	1	0.30

En el anexo B) se muestra como fueron desarrollados los diferentes factores para la evaluación de los criterios económico-financieros.

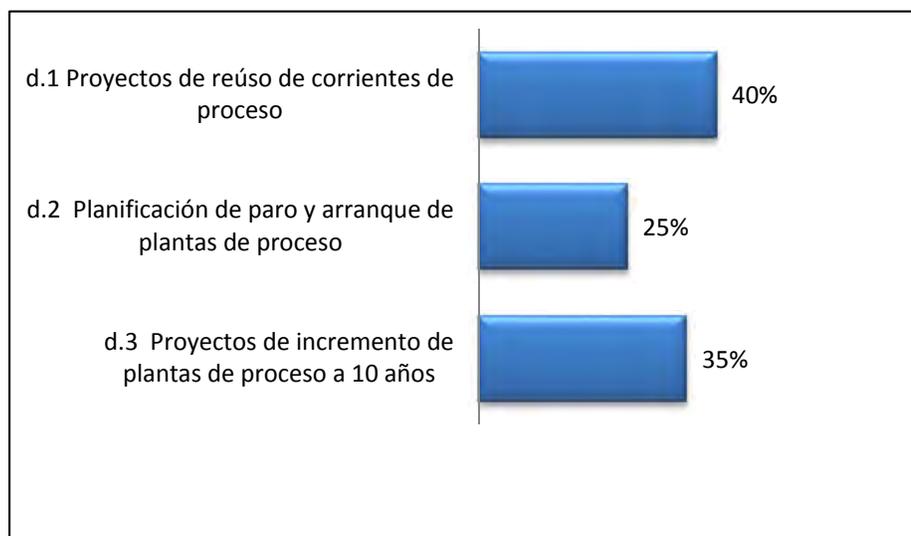
**D) Criterios estratégico-tácticos**

En la Tabla 22 se muestra la puntuación otorgada a los criterios estratégico-tácticos complementarios para ambas tecnologías.

**Tabla 22.** Puntuación de los estratégicos-tácticos complementarios para las tecnologías

Criterios Estratégico Tácticos	Intercambio Iónico	CEDI
d.1 Eficiencia operativa	4	5
d.2 Sustentabilidad de negocio (reúso del agua)	2	5
d.3 Operación segura y confiable	2	5

En la Figura 17 se muestra en porcentaje dado a cada uno de los criterios estratégico-tácticos.



**Figura 17.** Diferentes rangos de puntuación a los criterios estratégico-tácticos.

**i) Intercambio Iónico**

Para el caso de la tecnología de Intercambio Iónico se obtuvieron puntajes bajos dado los criterios analizados anteriormente, principalmente en el caso de sustentabilidad, debido a que en esta tecnología se utilizan grandes cantidades de reactivos químicos y agua de retrolavado.

Respecto a esta tecnología se requiere forzosamente una fosa de neutralización después del sistema de intercambio iónico dado que sus efluentes arrastran ácido y sosa de la regeneración de las resinas y este tipo de agua la mayoría de veces es neutralizada y posteriormente tirada al drenaje lo que resulta un gasto innecesario, pudiendo ser reutilizada dentro del sistema del uso del agua dentro de la refinería.

**ii) Electrodesionización en Continuo**

El CEDI tiene un puntaje alto en este criterio, por que se refiere a la forma en que se implementan proyectos para el reúso de corrientes de proceso, y es necesario efectuar un proyecto alterno para el tratamiento posterior de los efluentes, ya que solamente se cuenta con agua altamente concentrada pero que cumple con los requerimientos de la calidad de agua a efluentes. También se considera que se podría utilizar como una corriente de recirculación al sistema de Ósmosis Inversa haciendo de esto un proceso altamente eficiente.

Una de las ventajas ambientales del sistema de electrodesionización es que tiene la flexibilidad de una sustentabilidad de negocio en lo relacionado con el reúso del agua, ya que la corriente de concentrado no contiene nada más que sales y estas pueden ser fácilmente tratadas por un sistema de tratamiento de aguas residuales. Para después volver a incorporarlas al sistema o si no fuera este el caso, como no contiene reactivos tóxicos, puede ser vertidos sin un tratamiento posterior al drenaje.

**3.2.6. Generar la matriz con los resultados de la evaluación y hacer los cálculos pertinentes para obtener la evaluación total de cada alternativa tecnológica.**

En la Tabla 23 se muestra los valores otorgados a cada uno de los criterios para ambas tecnologías generando una matriz de calificación total de la tecnología para conocer el resultado para ambas.

$$(Calificación\ Total\ de\ Tecnología)_i = \sum_{k=1}^{nA} P_k \left( \sum_{j=1}^{nSAk} (W_j \sum_{i=1}^{nFj} w_i C_i) \right)$$

Tabla 23. Matriz de selección de la mejor tecnología para la desmineralización de agua.

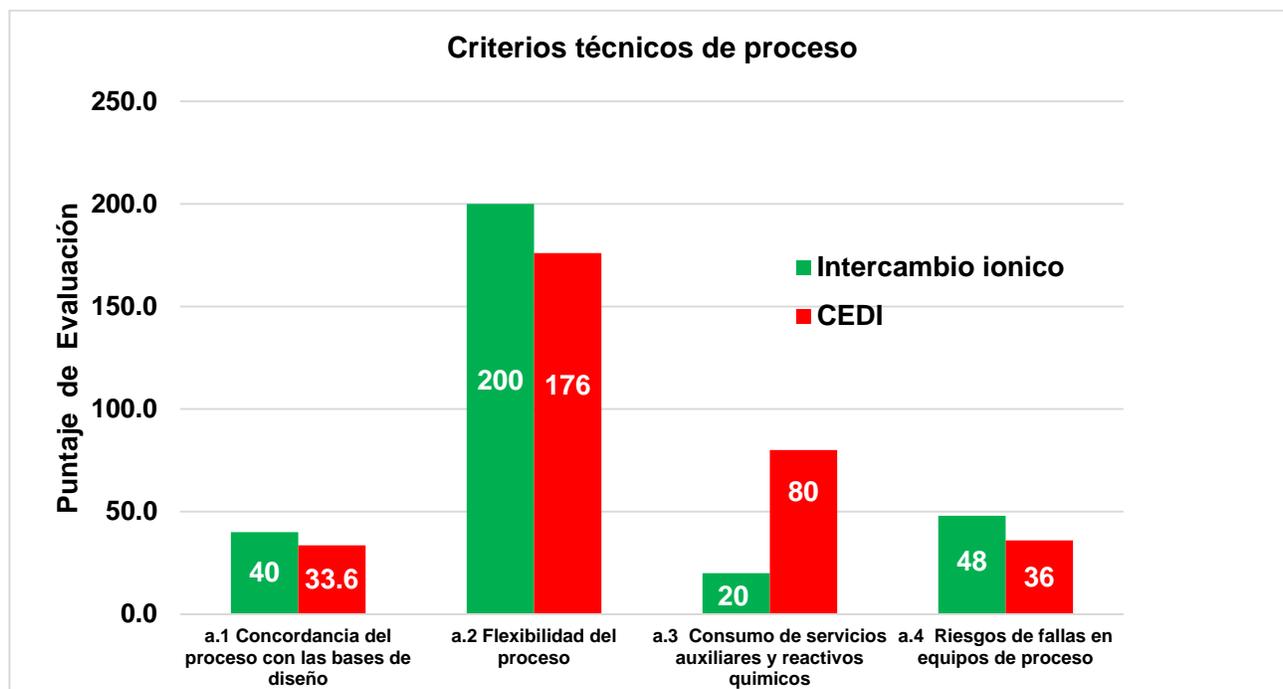
Matriz de selección de la tecnología óptima.		Intercambio iónico	CEDI
Criterios y aspectos a evaluar	Max. Puntaje	Puntaje	Puntaje
<b>CRITERIOS TÉCNICOS DE PROCESO</b>			
<b>a.1 Concordancia del proceso con las bases de diseño</b>	40	40	33.6
a.1.1 Capacidad	12	12	12
a.1.2 Especificaciones de efluente	12	12	12
a.1.3 Flexibilidad con respecto a cambios	16	16	9.6
<b>a.2 Flexibilidad del proceso</b>	200	200	176
a.3.1 Calidad de influente (carga)	60	60	36
a.3.2 Capacidad de operación (hidráulico)	140	140	140
<b>a.3 Consumo de servicios auxiliares y reactivos químicos</b>	100	20	80
<b>a.4 Riesgos de fallas en equipos de proceso</b>	60	48	36
<b>Subtotal Evaluación Técnica de Proceso</b>	400	308	325.6
<b>CRITERIOS TÉCNICOS COMPLEMENTARIOS</b>			
<b>b.1 Supervisión en arranque, pruebas de garantías, y operación</b>	50	50	40
<b>b.2 Experiencia técnica-administrativa del licenciador</b>	50	50	30
Subtotal Evaluación Aspectos Técnicos Complementarios	100	100	70
<b>CRITERIOS ECONÓMICO FINANCIERO</b>			
<b>c.1 Económica del proceso</b>	157.5	256.5	243
c.3.1 <i>Inversión directa</i>	135	135	81
c.3.2 <i>Costos de operación</i>	135	81	108
c.3.3 <i>Mantenimiento</i>	40.5	32.4	40.5
c.3.4 <i>Capital de trabajo</i>	13.5	8.1	13.5
<b>c.2 Rentabilidad</b>	225	135	225
c.2.1 <i>Costo Anual Equivalente (CAE)</i>	225	135	225
<b>c.3 Sensibilidad de la rentabilidad</b>	67.5	40.5	54
c.3.1 <i>Inversión</i>	22.5	22.5	13.5
c.3.2 <i>Costos de operación</i>	22.5	9	22.5
c.3.3 <i>Mantenimiento</i>	22.5	9	18
Subtotal Evaluación Económico-financiero	450	432	522
<b>CRITERIOS ESTRATÉGICOS TÁCTICOS</b>			
<b>d.1 Eficiencia operativa</b>	20	16	20
<b>d.2 Sustentabilidad de negocio (reuso del agua)</b>	15	6	15
<b>d.3 Operación segura y confiable</b>	15	6	15
Subtotal Aspectos Estratégico-Tácticos	50	28	50
<b>TOTAL SELECCIÓN DEL ESCENARIO ÓPTIMO DE OPERACIÓN</b>	<b>1,000</b>	<b>868</b>	<b>967.6</b>

#### 4. DISCUSION DE RESULTADOS

A continuación se mostraran más a detalle los resultados obtenidos a partir de la matriz de selección de tecnologías.

##### a) Criterios técnicos de proceso.

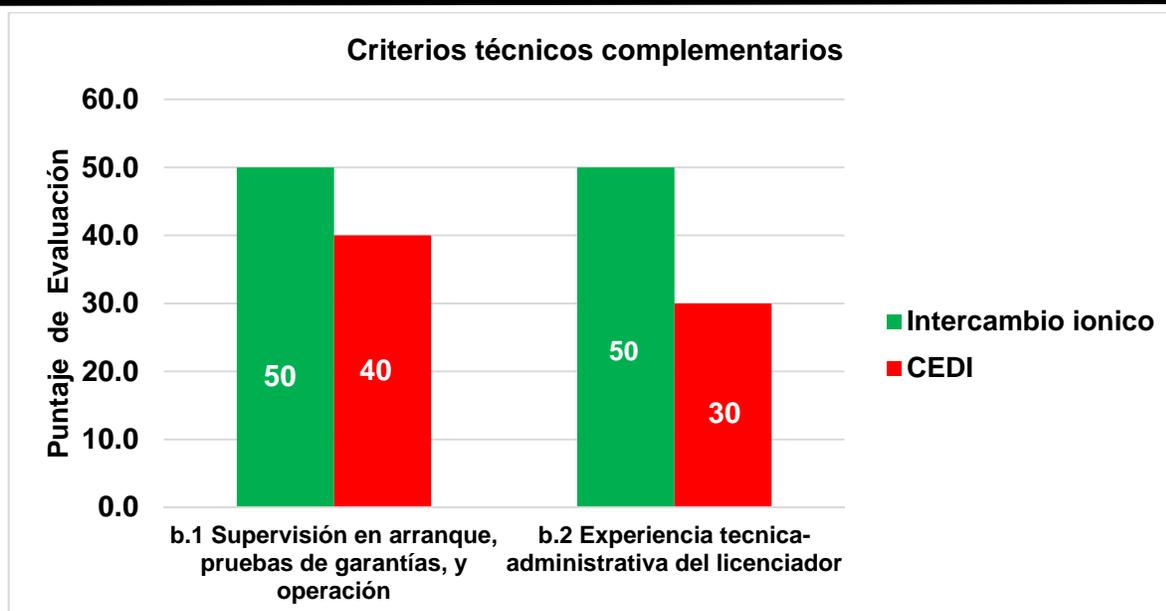
En la Figura 18 se muestra el desglose de los factores para el criterio técnico de proceso, en la cual se puede observar que el factor que más importancia tiene es el factor del consumo de servicios auxiliares y reactivos químicos, la tecnología del CEDI está por 60 puntos sobre la tecnología de intercambio iónico, como se explicó anteriormente la atracción de esta tecnología es el desuso casi total de reactivos químicos y este factor es uno de los influentes para poder tomar la decisión de cuál de las dos tecnologías es la mejor opción. Otro factor que influye es la flexibilidad del proceso y la tecnología del intercambio iónico tiene una ventaja numérica de 24 puntos por arriba del proceso del CEDI y esto se debe a que el sistema de intercambio iónico posee una flexibilidad mayor debido a que puede operar a flujos muy altos comparados con el CEDI, comparando los demás factores se puede observar que ambas tecnologías tienen puntajes numéricamente parecidos y esto se debe a que técnicamente funcionan para el mismo principio, en cuestiones del factor de riesgos de fallas en equipos de proceso el intercambio iónico tiene una ventaja dado a que es una tecnología robusta y cuenta con un amplia experiencia en aplicaciones industriales se tiene menor cantidad de riesgos por fallas y es por eso que tiene una ventaja de 12 puntos sobre el CEDI. En total la tecnología del CEDI obtuvo 17.6 puntos más que el intercambio iónico, como se puede observar no es una gran diferencia pero en la matriz general esta diferencia es de gran importancia para la decisión final.



**Figura 18.** Factores relacionados de los criterios técnicos de proceso para ambas tecnologías.

#### **b) Criterios técnicos complementarios.**

En la Figura 19 se muestran los factores utilizados para la evaluación del criterio técnico complementario, donde se puede observar que para ambos factores la tecnología de intercambio iónico supera al CEDI por una ventaja total de 30 puntos y esto se debe a que es una tecnología que presenta una gran experiencia técnica y esto hace que se tenga una confiabilidad del producto a nivel industrial.



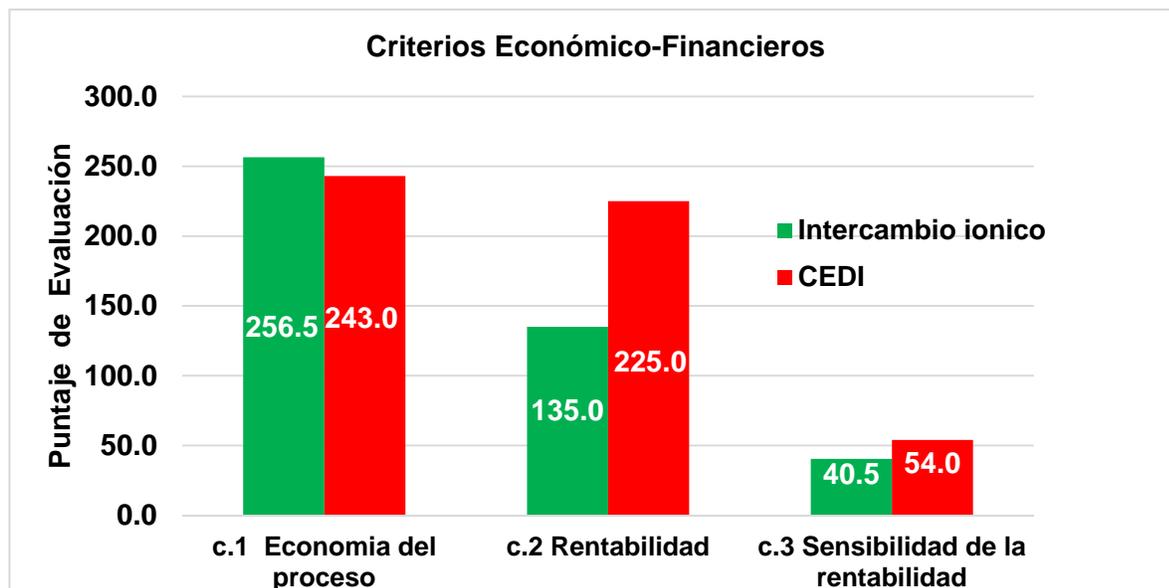
**Figura 19.** Factores relacionados de los criterios técnicos complementarios para ambas tecnologías.

### c) Criterios Económico-Financieros

En la Figura 20 se muestran los factores relacionados de los criterios económicos-financieros; se observa que el factor de la economía del proceso obtuvo 13.5 puntos más que el intercambio iónico, esto se debe a que el factor engloba los costos de inversión inicial, costos de operación, mantenimiento y capital de trabajo, dado a los resultados obtenidos del análisis económico citado en el Anexo B) en este anexo se desglosa el resultado del análisis económico de cómo esta tecnología obtuvo la calificación mayor.

En cuestiones de la rentabilidad el CEDI tiene una ventaja de 90 puntos, esto se debe a que a lo largo del horizonte de evaluación de nuestro caso de estudio esta tecnología resulta más rentable debido a la disminución del consumo de reactivos y servicios auxiliares lo que provoca que el costo se reduzca tan drásticamente. En cuestiones del factor de la sensibilidad de la rentabilidad, que se pueden observar en el Anexo V, tiene como resultado que para el caso de la tecnología del intercambio iónico el parámetro más sensible con respecto al criterio de rentabilidad, que en este caso es el CAE, son los costos de operación y para la tecnología del CEDI viene siendo los costos de inversión. En los resultados determinados de este factor se muestra que el CEDI resulta 13.5 puntos por arriba del intercambio iónico lo que se puede deber a que de los dos parámetros del análisis el costo de inversión solamente se ve afectado al inicio del proyecto y es por eso que no resulta tan impactante como los costos de operación, que se ven afectados a lo largo del horizonte de

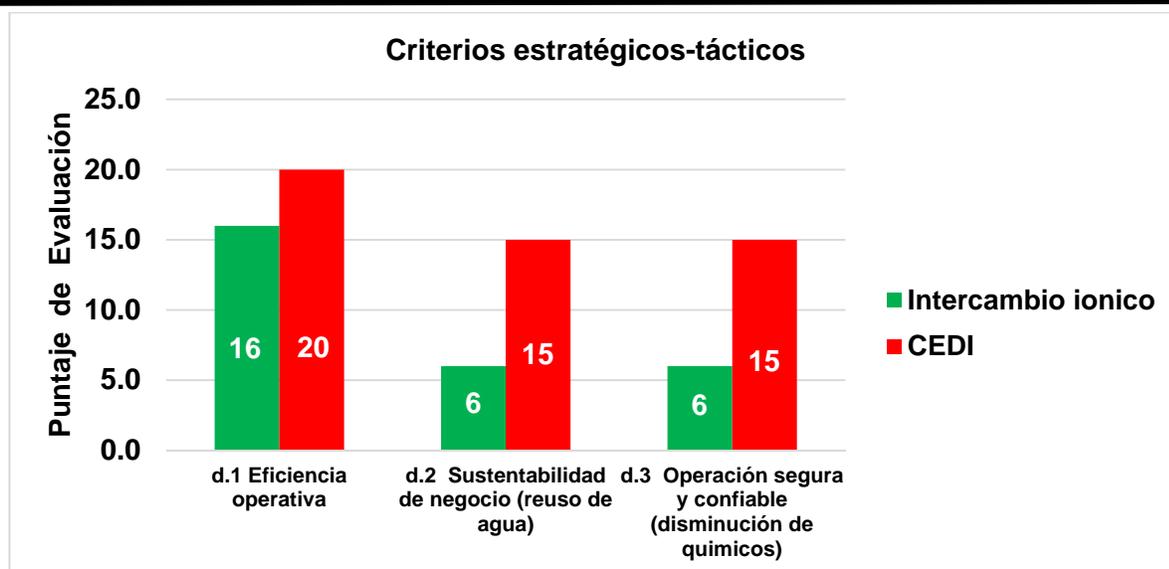
evaluación. En el puntaje total de los criterios económico-financiero el CEDI está 90 puntos por arriba del intercambio iónico, provocando un criterio más a favor de la tecnología del CEDI.



**Figura 20.** Factores relacionados de los criterios económico-financieros para ambas tecnologías.

#### d) Criterios estratégico-tácticos

En la Figura 21 se muestran los factores relacionados de los criterios estratégicos-tácticos, estos dependen en cómo se verá afectado el entorno de la tecnología con respecto a la eficiencia, sustentabilidad y la operación del proceso. La tecnología del CEDI obtuvo puntajes más altos sobre la tecnología del intercambio iónico, debido a que en el horizonte del proyecto, el CEDI obtiene mayores beneficios por la disminución del consumo de químicos por lo que sus costos de operación son menores. En cuestiones de la sustentabilidad, debido al desuso de los químicos, no se requiere de la neutralización del agua de regeneración y retrolavado, por lo tanto no generan más residuos peligrosos. Con el sistema de CEDI cabe la posibilidad de la recirculación de la corriente concentrada y generar un sistema optimizado cero descargas, esto reflejándose en la puntuación entre las dos tecnologías.



**Figura 21.** Factores relacionados de los criterios estratégicos-tácticos para ambas tecnologías.

e) Evaluación total.

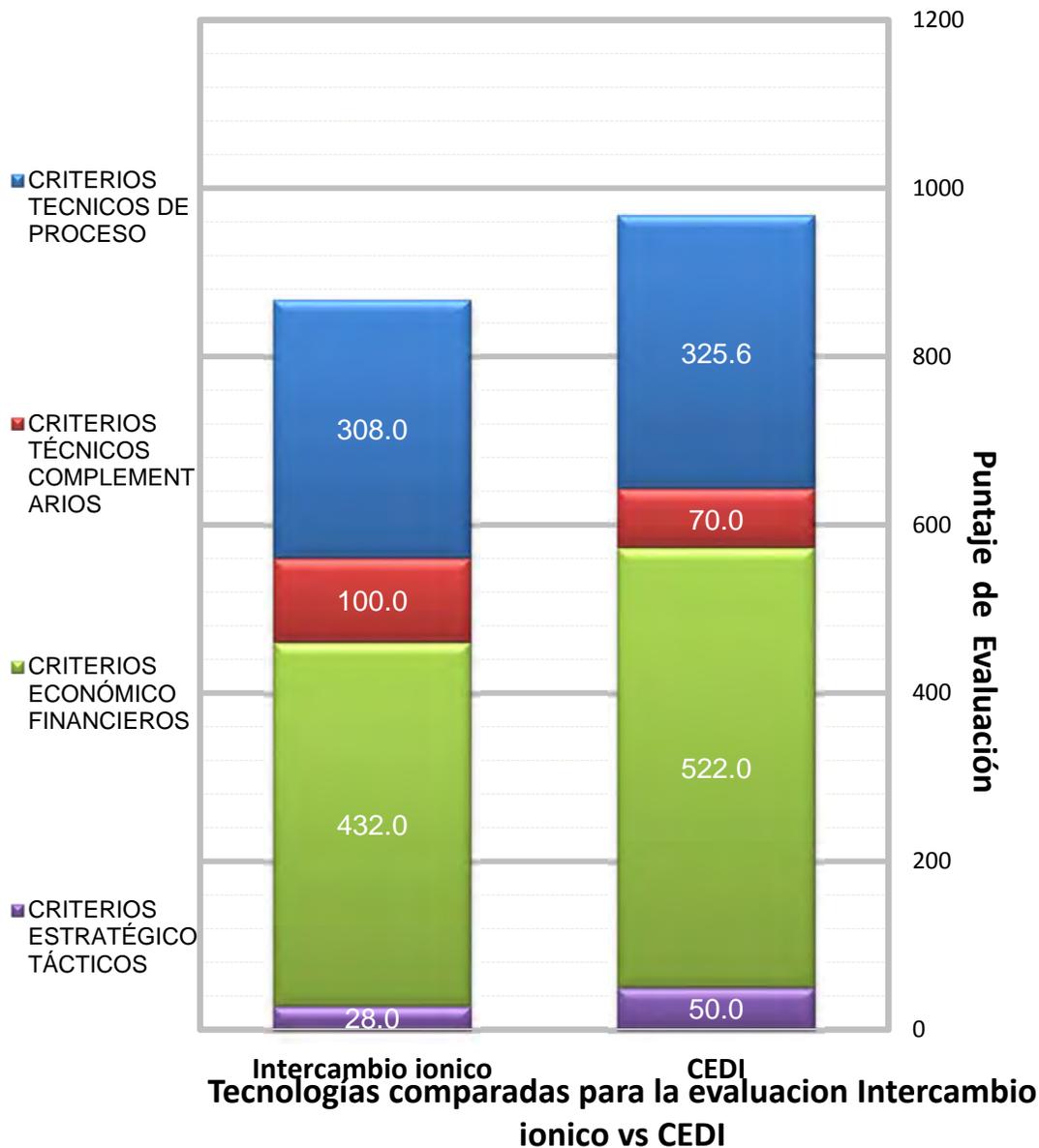


Figura 22. Gráfica de las tecnologías comparadas para la evaluación.

Como se puede observar en la Figura 22 la comparación se mantuvo en un orden bastante similar. Ambas muestran fortalezas y debilidades en algunos aspectos pero presentan equilibrio tecnológico. La tecnología de intercambio iónico sigue siendo utilizada mundialmente y genera confianza por la antigüedad de su operación y por el amplio conocimiento de ella; además en el transcurso del tiempo se le han efectuado varias optimizaciones para un mejor uso.

La tecnología de CEDI es aún una tecnología relativamente joven y aun no se cuenta con gran conocimiento sobre su operación y sus optimizaciones por lo que el consumidor no tiene una confianza plena en el sistema, aunque a lo largo de los años se demostrará que es una tecnología que aparte de ofrecer una gran eficiencia, el desuso completo de reactivos será uno de los aspectos más importantes de esta tecnología, por lo que no solamente disminuye en grandes cantidades el uso de reactivos químicos y resinas, sino que también impacta benéficamente en la disminución del deterioro del medio ambiente y al cumplimiento de la normatividad en materia de descargas, sin que implique la aplicación de un tratamiento posterior.

## 5. CONCLUSIONES

El proceso de intercambio iónico se ha utilizado en la industria por más de tres décadas, por lo que es una tecnología ampliamente conocida y de alta confiabilidad dentro del mercado. Este proceso requiere una etapa de regeneración con un tratamiento de una solución de un ácido fuerte y una solución alcalina, lo que conlleva volúmenes considerablemente grandes de aguas residuales. La tecnología de CEDI no involucra químicos y no requiere de lavados para el flujo de neutralización (aunque si se implementa un sistema de doble paso de Ósmosis Inversa va a requerir el uso de químicos para un mejor tratamiento de las membranas pero en cantidades menores que los requeridos en el intercambio iónico) después de la regeneración con químicos, a reserva del almacenamiento de los químicos, su correspondiente equipo de bombeo y válvulas, tubería resistente a corrosión, se espera que se reduzca el costo por equipo y costos de operación.

Del criterio técnico se concluye que la tecnología del intercambio iónico aún sigue siendo favorecida dado el hecho que lleva largo tiempo en la industria, esto va aunado a que es un proceso ampliamente utilizado, su operación y mantenimiento son más sencillos por lo que lo hace más confiable dado el nivel de conocimiento que se tiene. También cada vez se optimiza más el proceso generando arreglos más eficientes, y con requerimientos mínimos. Aunque aún el uso de químicos para la regeneración de las resinas sigue siendo uno de los problemas más desfavorables de esta tecnología.

Con respecto a los aspectos económicos se hizo un análisis más detallado en donde se puede observar que aunque la tecnología del CEDI genera altos costos de inversión, a la larga se va retribuyendo ya que no utiliza químicos y hay ahorros en sus costos de operación, almacenamiento y mantenimiento. En el anexo B) se detalla este análisis, determinando que en la comparación económica el CEDI ofrece una mejor alternativa tecnológica.

Como resultado de la comparación, la tecnología del CEDI obtuvo la mayor calificación en la matriz de evaluación por una diferencia de 99.9 puntos por lo que se concluye que la tecnología de CEDI puede sustituir a la tecnología de intercambio iónico por lo que su mayor atractivo será el desuso completo de los reactivos químicos (50,000 ton/año en el SNR) y en consecuencia al desuso del tratamiento posterior de los efluentes, esto se traduce a menores costos de operación, mantenimiento, control, etc., como también una gran ventaja en cuestiones del cuidado del medio ambiente.

Con el análisis de sensibilidad se varían los parámetros financieros más importantes como la Inversión, Insumos, Operación y mantenimiento para poder determinar el grado de sensibilidad del proyecto. En nuestro caso de estudio el análisis de sensibilidad se basó en

el uso del CAE como el indicador de rendimiento. Para el caso de la tecnología por intercambio iónico, su análisis indica que el parámetro más sensible a estas variaciones son los insumos y esto implica que los valores del CAE son tan grandes por el incremento que otorgan los insumos. En el caso del sistema OI/CEDI el parámetro que más influye en los cambios del CAE es la inversión, y como ya que es una tecnología que actualmente cuenta con poca participación en la industria y la patente aun pertenece a pocas compañías lo que sigue siendo exclusiva. Con respecto a ambas tecnologías se puede concluir que el CAE de la tecnología por intercambio iónico es más grande dado a un gran consumo de los insumos dígase reactivos y respecto al sistema de OI/CEDI el parámetro más importante para la obtención del CAE es la inversión, pero aun con ese aumento el indicador es más pequeño por lo que el sistema de OI/CEDI es más factible económicamente.

En los criterios estratégicos-tácticos, se mencionan aspectos relacionados con proyectos a futuro para la optimización de las plantas. Ambas tecnologías son aplicables estos criterios dado que las dos pueden ser optimizables a lo largo del tiempo, ya que las tecnologías tienen una flexibilidad de diseño, que es por eso que ambas son utilizadas.

La tecnología de intercambio iónico sigue siendo utilizada por una amplia gama de industrias, por su gran trayectoria a lo largo de los años, lo que la hace una tecnología confiable y de fácil manipulación.

La electrodesionización es una tecnología que no utiliza reactivos químicos para la generación de sus resinas, ni tampoco más agua para los retrolavados, por lo que la hace una tecnología más limpia y de bajo costo.

---

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Applebaum, S. B. (1968). *Demineralization by ion exchange in water treatment and chemical processing of other liquids*. New York and London: Academic Press, London.pp.
- Associaton, A. W. (2005). *Water treatment plant design*. McGraw-Hil, Denver, Colorado.pp.
- Avilla, J. (1999). *Lo esencial del intercambio iónico* [En línea]. Actualizada: 2011. [Fecha de consulta: Julio 2013]. Disponible en: <http://www.agualatinoamerica.com/>: <http://www.agualatinoamerica.com/docs/pdf/5-6-02avilla.pdf>
- Baca, G. (2007). *Fundamentos de Ingenieria económica*. México, Mc Graw Hill.pp.
- Behn, A. O. (2012). Thermal [En línea]. Actualizada: 2012. [Fecha de consulta: 01 de Enero de 2012]. Disponible en: [http://www.thermal.cl/prontus\\_thermal/site/artic/20110602/asocfile/20110602102250/articulo\\_\\_\\_tratamiento\\_de\\_agua\\_en\\_calderas.pdf](http://www.thermal.cl/prontus_thermal/site/artic/20110602/asocfile/20110602102250/articulo___tratamiento_de_agua_en_calderas.pdf)
- CEDI UNIVERSITY. (Mayo de 2012). *CEDI UNIVERSITY* [En línea]. Actualizada: 2013. [Fecha de consulta Junio 2013] Disponible en: [http://www.cediuniversity.com/index.php?option=com\\_content&task=view&id=25&Itemid=27](http://www.cediuniversity.com/index.php?option=com_content&task=view&id=25&Itemid=27)
- Cifuentes, N. (2008). *Tratamiento de aguas con membranas. Tesis porfesional de maestría*. España.pp.
- Chemical-Engineering. (2014). Rockville, MD, USA, Economic Indicators, 60, 2014.
- Escobar, D. V. (2010). *Analisis y mejora del tratamiento de agua para la prevención de incrustaciones en las caldera utilizadas en la planta de emulsion de la mina de carbones del Cerrejón LLC*. Tesis profesional de maestria. Escuela de proceso y energia, Universidad Nacional de Colombia, Medellin.pp.
- GLEGG. (2000). *Manual de procesos químicos*. GLEGG.
- Ionis. (2003). *Naturaleza del agua: Incrustación y Corrosión* [En línea] Acualizada: 2013. [Fecha de consulta septiembre 2013]. Disponible en: <http://www.ionis.com.ar/>: <http://www.ionis.com.ar/agua/index.htm>
- Lenntech, B. (2013). *Lenntech water treatment solutions* [En línea]. Actualziada: 2013.[Fecha de consulta septiembre 2013] Disponible en: <http://www.lenntech.es/agua-de-alimentacion-de-la-caldera.htm>
- Metcalf, & Eddy. (2003). *Waste Water Engineering: Treatment and reuse*. McGraw-Hill Companies, Londres, Inglaterra.pp.

- Oliverio, M. L. (1998). *Evaluación de tecnologías en la industria de refinación del petróleo*. Instituto Mexicano del Petróleo, México.pp.
- Peters, M. (1991). *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. McGraw-Hill, Colorado, USA. pp.
- Pizzi, N. G. (2002). *Water treatment Operator*. American Water Works Association, EUA.pp.
- Sanz, G. &. (Mayo de 2011). Electrodesionización en continuo (CEDI) para aplicaciones industriales: calderas de alta presión. VEOLIA Waters Systems Ibérica.
- T., T. R. (2005). Mobile services. Meet variable demineralized water requirements in the power industry. *Tech Talk* (pág. 3). Virginia: Ecolochem Inc .

## 7. ANEXOS

### A) Evaluación de tecnologías

En este anexo se explicará cómo se seleccionó la metodología para la evaluación de estas tecnologías.

Existen reportadas en la literatura un gran número de metodologías de evaluación de tecnologías de proceso para la industria de refinación del petróleo. En general, se clasifican en función del uso, es decir, el fin último que se la va a dar resultado de la evaluación. De acuerdo a este criterio las metodologías pueden ser clasificadas en: (Oliverio, 1998)

- Metodologías para la evaluación de proyectos
- Metodologías para la evaluación de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico
- Metodologías para la evaluación de alternativas tecnológicas en proyectos de inversión.
- Metodologías para la valuación de tecnologías.
- Metodologías para la evaluación de tecnologías.

Para el propósito de este trabajo, se utilizará una metodología para la evaluación integral de alternativas tecnológicas, que integre los diferentes aspectos requeridos para la evaluación de plantas auxiliares.

#### I. Modelo de evaluación de tecnología de tipo matricial para la evaluación de alternativas tecnológicas en proyectos de inversión

La metodología de evaluación desarrollada en este capítulo puede ser clasificada como una mezcla de técnicas tanto cuantitativas como cualitativas, lo que da una gran flexibilidad.

Este modelo de evaluación consiste de la ejecución de cuatro etapas:

- a) Identificación de criterios o aspectos que afectan la selección de la alternativa tecnológica.
- b) Clasificación de todos los criterios identificados.
- c) Formulación de un modelo en términos de la clasificación.
- d) Cuantificación de los términos del modelo.

Para la primera etapa, se indican los aspectos o criterios más importantes para la evaluación de tecnologías:

- 
- a) Aspectos técnicos del proceso.
  - b) Aspectos técnicos complementarios.
  - c) Aspectos económico- financieros.
  - d) Aspectos contractuales
  - e) Aspectos plausibles
  - f) Aspectos estratégico-tácticos.
  - g) Aspectos normativos

A continuación se describen los aspectos y factores incluidos en la metodología de la propuesta.

**a) Aspectos técnicos del proceso.**

En este inciso se consideran las características de la tecnología desde el punto de vista de proceso a nivel de ingeniería básica. Esto se realiza a través del análisis comparativo entre las alternativas tecnológicas ofertadas, estableciendo sus ventajas y desventajas, y tomando en cuenta el techo tecnológico como referencia. Los aspectos técnicos del proceso tienen repercusiones en el comportamiento económico del proyecto, así como posibles efectos en el medio ambiente, y puede establecer una ventaja competitiva; por lo que se requiere de una ampliación detallada de este aspecto.

En la etapa de la evaluación técnica del proceso, el análisis debe centrarse en las diferencias técnicas de los procesos de las alternativas tecnológicas que se estén evaluando. De ser posible, estas diferencias deben de ser cuantificadas considerando su efecto en la rentabilidad del proyecto. Se proponen los siguientes subaspectos y factores a considerar en esta evaluación.

a.1 Concordancia del proceso con las bases de diseño.

- Capacidad y factor de servicio
- Especificaciones de materias primas
- Especificaciones de productos
- Condiciones en límites de batería
- Disponibilidad de servicios auxiliares
- Consideraciones de diseño
- Flexibilidad

a.2 Características relevantes del proceso.

- Esquema de proceso
- Equipo

- 
- Condiciones de operación
  - Rendimientos
  - Características especiales de los productos
  - Pre o post tratamientos necesarios
  - Integración térmica

a.3 Actualización del proceso (obsolescencia)

a.4 Flexibilidad del proceso

- Materia prima
- Capacidad de operación (caso crítico)
- Número de equipos de relevo
- Automatización
- Efecto en la inversión y en gastos de operación

a.5 Consumo de materias primas

a.6 Consumo de servicios auxiliares

a.7 Consumo de químicos y catalizadores

a.8 Mano de obra requerida

- Operación
- Mantenimiento
- Laboratorio

a.9 Tratamiento de efluentes

- Normas
- Sistemas de tratamiento

a.10 Impacto ecológico de la tecnología

a.11 Riesgos implícitos en la tecnología y sistemas de seguridad

***b) Aspectos técnicos complementarios.***

En este aspecto se agrupan los criterios que no corresponden propiamente a las características de la tecnología, pero que tienen un efecto en la confianza de que ésta tenga un buen funcionamiento en la fase operativa de la planta. Se evalúa básicamente la experiencia de los diferentes tecnólogos, su capacidad organizacional, el tipo y alcance de los servicios ofertados, así como el contenido del paquete tecnológico (paquete de ingeniería básica, paquete de ingeniería de detalle, etc.), entre otros.

Los subaspectos y factores a considerar en esta evaluación son los siguientes:

b.1 Experiencia técnica-administrativa del licenciador

- 
- Número, capacidad y fecha de plantas diseñadas, en operación y en construcción (para plantas nuevas y modernizadas)
  - Número de plantas en fase de diseño
  - Experiencia en fabricación de equipos especiales (o referencias)
- b.2 Experiencia general de los licenciadores en ingeniería, en construcción, en operación, y en coordinación de proyectos
- b.3 Información técnica
- Alcance del Paquete de Diseño de Proceso o del Paquete de Ingeniería Básica (dependerá de los servicios solicitados)
  - Calidad de la información técnica suministrada
- b.4 Servicios profesionales adicionales y experiencia
- Procura (nacional y en el extranjero)
  - Supervisión de la expedición y embarque (nacional y en el extranjero)
  - Supervisión técnica durante la construcción
  - Supervisión de la ingeniería de detalle
  - Capacitación del personal
  - Soporte de sistemas de control para la automatización del proceso
  - Supervisión en arranque, pruebas de garantías, y operación
- b.5 Características generales
- Estructura organizacional
  - Recursos materiales y humanos
  - Disponibilidad de horas-hombre
- b.6 Programas de trabajo de los servicios ofertados
- Paquete tecnológico
  - Servicios profesionales adicionales

### **c) Aspectos económico-financieros**

Dada la estrecha relación que existe entre los criterios económicos y los financieros, se propone que éstos sean agrupados en un sólo aspecto. Esto permite tener flexibilidad en la profundidad de los cálculos, ya que en ciertos proyectos no es posible determinar con un grado de confiabilidad adecuado los parámetros de rentabilidad de los proyectos, ni los criterios clásicos de evaluación financiera. Desde el punto de vista de los inversionistas privados este aspecto es de vital importancia, ya que define el nivel de recuperación de la inversión y las utilidades esperadas cuando la planta esté en operación.

Los subaspectos y factores a considerar son los siguientes:

c.1 Inversión en terreno, edificios, materiales y equipo

c.2 Capital de trabajo

c.3 Economía intrínseca del proceso

- Materias primas
- Productos
- Servicios auxiliares
- Catalizadores
- Reactivos químicos
- Mantenimiento
- Mano de obra
- Depreciación

c.4 Costos y forma de pago de los servicios de ingeniería, licenciamiento y servicios profesionales adicionales

c.5 Parámetros de rentabilidad del proyecto

- Tasa interna de retorno (TIR)
- Valor presente neto (VPN)
- Flujo de efectivo descontado (FFD)
- Relación beneficio/costo
- Valor de rescate
- Tasa de rendimiento promedio
- Periodo de retorno de la inversión (PRI)

c.6 Sensibilidad de la rentabilidad del proyecto a:

- Materia prima
- Precio del producto
- Inversión
- Nivel de producción (punto de equilibrio)
- Financiamiento externo

**d) Aspectos estratégico-tácticos**

---

Dada la importancia que la estrategia tiene sobre el buen funcionamiento de una organización, se propone que esta sea considerada en la metodología de evaluación. Este aspecto es de gran importancia ya que la tecnología; y ésta a su vez, como es sabido, debe ser congruente con la estrategia general del negocio. Además, se incluyen en este grupo a los criterios tácticos (en donde se pueden considerar aspectos de logística), ya que estos pueden tener un efecto en el buen desempeño del negocio.

En la evaluación de tecnologías es esencial la consideración de los aspectos estratégico-tácticos que son normalmente establecidos por la alta dirección. Entre estos se pueden citar:

d.1 Usar tecnologías de punta. Este criterio se refiere al establecimiento de la condición de usar sólo tecnologías que vayan a la vanguardia, ya sea porque se desea proteger de una prematura obsolescencia o bien porque se desea dar una imagen del liderazgo en el campo.

d.2 Usar tecnologías que incluyan en la transferencia la ventaja comercial de participar en forma directa en ciertos mercados nacionales o internacionales.

d.3 Usar tecnologías que provengan de un tecnólogo con el cual se haya tenido o se tenga un contrato previo. Este criterio se refiere a la conveniencia de lograr una mejor negociación en cuanto al precio de las regalías con un tecnólogo conocido o por la ventaja implícita de tener plantas de la misma tecnología, lo cual implica una aceleración de la curva de aprendizaje para la nueva planta y posibles ahorros en el mantenimiento y reposición de equipo.

d.4 Seleccionar tecnologías que sean ofertadas como “llave en mano”. Este criterio se refiere a que puede ser definido por la alta dirección la conveniencia, para un tipo de proyecto específico, de solo contratar tecnologías “llave en mano”, ya sea porque no se cuenta con el equipo de expertos para poder integrar el paquete tecnológico, o porque no se desee correr el riesgo de la dilución de responsabilidad cuando este es desagregado.

d.5 Congruencia de la tecnología con la estrategia tecnológica de la organización.

## **II. Desarrollo de la Metodología de Evaluación**

### ***(1) Definir los aspectos que se considerarán como parte de la evaluación***

En la Tabla 24 se describen los pasos que se deben seguir como procedimiento de evaluación:

**Tabla 24.** Aspectos a considerar en la evaluación. (Oliverio, 1998)

Aspectos (A <sub>i</sub> )	Decisión
Evaluación técnica del proceso	Si/No
Evaluación de aspectos técnicos complementarios	Si/No
Evaluación económico-financiera	Si/No
Evaluación contractual	Si/No
Evaluación de aspectos plausibles	Si/No
Evaluación de aspectos estratégicos	Si/No
Evaluación de aspectos normativos	Si/No

**(2) Identificar los subaspectos y factores que pueden ser utilizados como criterios restrictivos.**

Nota: No se considerará este paso. Se optará por una evaluación de tipo matricial.

**(3) Se procede a asignar el peso o puntaje a cada uno de los aspectos considerados (P<sub>i</sub>).**

Para establecer el puntaje de los aspectos se toma de base la siguiente ecuación:

Dónde:  $\Sigma P_i$  = Puntaje máximo.

**(4) Seleccionar para cada aspecto, los subaspectos {(SA)<sub>i</sub>} y factores (F<sub>i</sub>) que van a ser evaluados.**

Los aspectos seleccionados para este rubro se enlistan en la Tabla 25 considerando los diferentes criterios establecidos anteriormente.

**Tabla 25.** Matriz de Selección de Tecnología (Oliverio, 1998)

<b>SUBASPECTOS (SA<sub>i</sub>)</b>
<b>CRITERIOS TÉCNICOS DE PROCESO</b>
a.1 Concordancia del proceso con las bases de diseño
a.2 Flexibilidad del proceso
a.4 Consumo de servicios auxiliares y reactivos químicos
a.5 Riesgos de fallas en equipos de proceso
Subtotal Evaluación Técnica de Proceso
<b>CRITERIOS TÉCNICOS COMPLEMENTARIOS</b>
b.1 Supervisión en arranque, pruebas de garantías, y operación
b.2 Experiencia técnica-administrativa del licenciador
Subtotal Evaluación Aspectos Técnicos Complementarios
<b>CRITERIOS ECONÓMICO FINANCIEROS</b>
c.1 Economía del proceso
c.2 Rentabilidad
<i>c.2.1 Costo Anual equivalente</i>
c.3 Sensibilidad de la rentabilidad
Subtotal Evaluación Económico-Financiera
<b>CRITERIOS ESTRATÉGICO TÁCTICOS</b>
d.1 Eficiencia operativa
d.2 Sustentabilidad de negocio (reúso de agua)
d.3 Operación segura y confiable (disminución de químicos)
Subtotal Aspectos Estratégico-Tácticos

**(5) Puntajes o pesos en fracción para los subaspectos y factores.**

Para definir los puntajes en fracción de los aspectos considerados sobre los subaspectos y factores se consideraron las siguientes ecuaciones:

$$1 = \sum W_i \text{ (para los subaspectos considerados)}$$

$$1 = \sum w_i \text{ (para los factores considerados en cada subaspecto)}$$

Dado que esta evaluación es un método semi-cualitativo se le asignaron valores de ponderación conforme a la información que se tiene para cada uno de los criterios.

**(6) Establecer una escala de calificación (Ci), y características máximas y mínimas de los factores considerados.**

Esta forma de asignar calificación permite una mejor diferenciación de los factores a calificar.

**Tabla 26.** Aspectos a considerar en la evaluación. (Oliverio, 1998)

Descripción	Calificación (Ci)
Atributo no disponible	0
Calificación mínima (pobre en este atributo)	1
Calificación media (atributo promedio)	3
Calificación máxima (excelente en este atributo)	5

Para definir la calificación máxima y mínima se recomiendan los siguientes criterios:

- (a) Usar como calificación máxima la mejor opción de las alternativas tecnológicas.
- (b) Usar como calificación mínima lo mínimo esperado, por ejemplo: la tasa interna de retorno (TIR)
- (c) Para algunos factores la máxima calificación puede ser establecida en función de los servicios esperados, ejemplo: contenido del paquete de diseño de proceso (o paquete de ingeniería básica), garantías, etc.

**(7) Calificar los factores considerados usando la escala descrita en el punto anterior.**

**(8) Generar la matriz con los resultados de la evaluación y hacer los cálculos pertinentes para obtener la evaluación total de cada alternativa tecnológica. Estos cálculos pueden ser representados con la siguiente ecuación:**

$$(\text{Calificación Total de Tecnología})_i = \sum_{k=1}^{nA} P_k \left( \sum_{j=1}^{nSAk} (W_j \sum_{i=1}^{nFj} w_i C_i) \right)$$

Donde:

$P_k$ = Porcentaje del aspecto k

$n_A$ = Número de aspectos considerados.

$n_{SA_k}$ = Número de subaspectos considerados para cada aspecto k.

$n_{F_j}$ = Número de factores considerados para cada subaspecto j.

$W_j$ = Fracción de subaspecto j.

$w_i$ = Fracción del factor i.

$C_i$ = Calificación del factor i.

**(9) *Recomendar la tecnología que obtenga mayor puntuación (Oliverio, 1998).***

### **B) Estimado de inversión**

El diseño aceptable de una planta debe representar una planta que pueda producir un producto que se venderá como un beneficio.

Para poder calcular los estimados de inversión son necesarios los factores que afectan los costos de inversión y producción; en la siguiente tabla se muestran desglosados estos factores.

**Tabla 27.** Factores para estimar el capital de inversión de los equipos basados en el costo de equipo entregado. (Peters, 1991)

	Planta de procesamiento de sólidos	Planta de procesamiento solido-fluidos	Planta de procesamiento de fluidos	% Planta de procesamiento solido-fluidos
<b>Costos Directos</b>				
Equipo Mayor (entregado en sitio)	100	100	100	33.11%
Instalación del Equipo Mayor	45	39	47	12.91%
Instrumentación y control	18	26	36	8.61%
Tuberías	16	31	68	10.26%
Sistema eléctrico	10	10	11	3.31%
Edificios	25	29	18	9.60%
Mejoramiento de sitio	15	12	10	3.97%
Servicios	<u>40</u>	<u>55</u>	<u>70</u>	<u>18.21%</u>
<b>COSTO TOTAL DIRECTO DE LA PLANTA</b>	<b>269</b>	<b>302</b>	<b>360</b>	<b>60.04%</b>
<b>Costos Indirectos</b>				
Ingeniería y Supervisión	33	32	33	25.40%
Gastos de construcción	39	34	41	26.98%
Gastos legales	4	4	4	3.17%
Pago al contratista	17	19	22	15.08%
Contingencia	<u>35</u>	<u>37</u>	<u>44</u>	<u>29.37%</u>
<b>COSTO TOTAL INDIRECTO DE LA PLANTA</b>	<b>128</b>	<b>126</b>	<b>144</b>	<b>25.05%</b>
Inversión de capital fijo	397	428	504	85.09%
Capital de trabajo	<u>70</u>	<u>75</u>	<u>89</u>	<u>14.91%</u>
	-	-	-	<b>14.91%</b>
<b>INVERSIÓN TOTAL</b>	<b>467</b>	<b>503</b>	<b>593</b>	<b>100.00%</b>

---

A partir de estos índices se puede dar un estimado de costos de inversión para cada tecnología.

A continuación se mencionará como se fue desarrollando el análisis económico para la evaluación de las tecnologías de intercambio iónico y CEDI.

### **I. Costos de inversión, operación y mantenimiento.**

En este criterio lo que se calcula, es cuánto dinero es necesario para poner en operación una planta. Una gran cantidad de dinero se requiere para comprar e instalar la maquinaria necesaria y el equipo necesario.

#### **a) Intercambio iónico.**

Para la tecnología de intercambio iónico se obtuvo mostrada en la Tabla 28 información con respecto a su costo de inversión y las bases de diseño ya mencionadas.

**Tabla 28.** Costos obtenidos de una cotización utilizada para un sistema propuesto para el 2009.

Descripción de equipos	Cant.	UM	Costo Total (USD)	Unit (USD)
Sistema de filtración 1x100%	1	sist	\$746,600	\$746,600
Unidad desmineralizadora catiónica débil 4x 50%	4	sist	\$1,339,700	\$334,925
Unidad desmineralizadora catiónica fuerte 4x50%	4	sist	\$1,236,000	\$309,000
Torre descarbonatadora 1x100%	1	sist	\$139,300	\$139,300
Unidad desmineralizadora aniónica débil 4x50%	4	sist	\$1,649,900	\$412,475
Unidad desmineralizadora aniónica fuerte 4x50%	4	sist	\$1,959,300	\$489,825
Unidad pulido lecho mixto 3x100%	3	sist	\$1,097,900	\$365,966.67
Sistema de regeneración 1x100%	1	sist	\$371,900	\$371,900
Equipamiento de neutralización	1	sist	\$39,300	\$39,300
Bomba portátil de achique de recuperación de químicos	2	pza	\$8,400	\$4,200
Sistema de control	1	paq	\$790,500	\$790,500
Partes sueltas para la interconexión de patines y/o sistemas hasta el límite de baterías	1	lote	\$198,500	\$198,500
Supervisión de instalación del sistema	1	serv	\$414,500	\$414,500
Ingeniería	1	sist	\$626,400	\$626,400
Capacitación	1	serv	\$34,700	\$34,700
Manual de instalación operación y mantenimiento	1	lote	\$13,900	\$13,900
Libro de documentos finales	1	lote	\$50,000	\$50,000
Partes de repuesto	1	lote	\$591,000	\$591,000
Embalaje e identificación	1	serv	\$24,500	\$24,500
Flete a sitio	1	lote	\$69,400	\$69,400

Dado a que la cotización fue hecha para otro sistema más complejo se requieren menor cantidad de equipo, teniendo un costo total resumido en la Tabla 29.

**Tabla 29.** Costos directos obtenidos de una cotización hecha para nuestro sistema propuesto para el 2009.

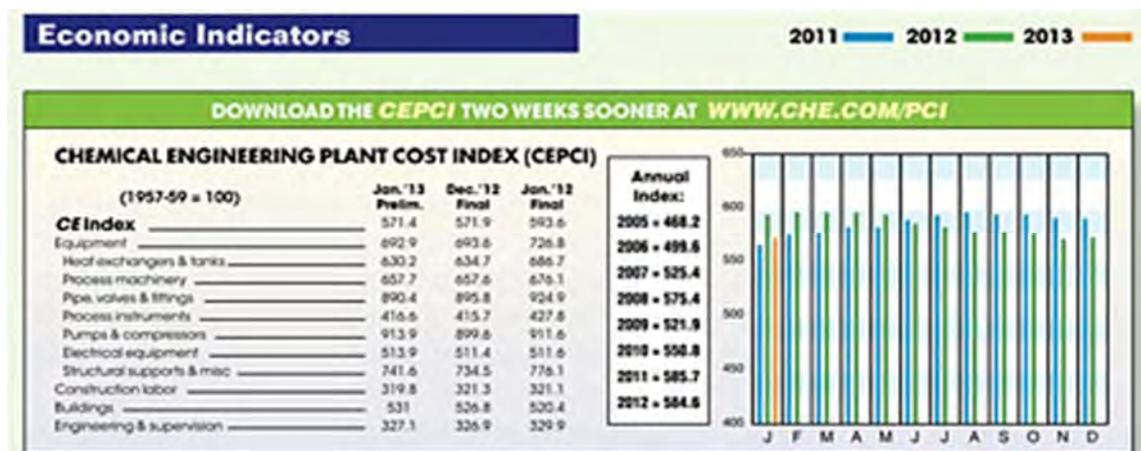
Descripción de equipos	Cant.	um	Costo total (USD)
Unidad desmineralizadora catiónica débil 4x50%	3	sist	\$1,339,700
Unidad desmineralizadora catiónica fuerte 4x50%	3	sist	\$1,236,000
Torre descarbonatadora 1x100%	1	sist	\$139,300
Unidad desmineralizadora aniónica débil 4x50%	3	sist	\$1,649,900
Unidad desmineralizadora aniónica fuerte 4x50%	3	sist	\$1,959,300
Unidad pulido lecho mixto 3x100%	3	sist	\$1,097,900
Sistema de regeneración 1x100%	1	sist	\$371,900
Equipamiento de neutralización	1	sist	\$39,300
Bomba portátil de achique de recuperación de químicos	2	pza	\$8,400
Sistema de control	1	paq	\$790,500
Partes sueltas para la interconexión de patines y/o sistemas hasta el límite de baterías	1	lote	\$198,500
Supervisión de instalación del sistema	1	serv	\$414,500
Embalaje e identificación	1	serv	\$24,500
Flete a sitio	1	serv	\$69,400
<b>Total</b>			<b>\$7,792,875</b>

Considerando que los sistemas a comparar requieren una infraestructura especial, pero solamente se están comparando las tecnologías es por eso que se considerara el factor de la Tabla 30 Donde se considera como edificios y obra civil, incluyendo servicios, teniendo un 3% aproximadamente de los costos directos de operación por lo que se obtiene lo siguiente:

**Tabla 30.** Costos directos inicial total.

Costo directo	\$7,792,875
Costos de edificios y obra civil	\$535,388.36
<b>Total (USD)</b>	<b>\$8,328,263.36</b>

Esta cotización se elaboró en Diciembre de 2009 para un sistema de la misma capacidad, por lo que se requiere traer estos costos a la actualidad, utilizando los índices de costos de planta (Chemical-Engineering, 2013) citados en la Figura 23.



**Figura 23.** Indicadores Económicos del Chemical Engineering (Chemical-Engineering, 2013).

Utilizando los Índices del año 2009 al año 2012 y la ecuación (1) para obtener el índice del año y así poder obtener el costo actual.

$$(1) \text{ Costo actual} = \frac{\text{Indice 2012}}{\text{Indice 2009}} * \text{Costo del año 2009}$$

Del costo directo inicial total llevándolo del año 2009 al año 2012:

$$\text{Costo actual} = \frac{584.6}{521.9} * \$8,328,263.36 = \$9,329,000.00$$

### b) Electrodesionización en Continuo

Dado que nuestro sistema como ya se ha mencionado necesariamente requiere de un sistema de doble paso de ósmosis inversa. Los costos de inversión de igual manera lo incluyen como equipo principal. Su descripción se muestra en la Tabla 31.

**Tabla 31.** Descripción de los equipos principales del sistema de OI/OI+CEDI

DESCRIPCION DE EQUIPOS
1. Etapa de Filtración y dosificación de químicos
1.1. Dosificación de químico bisulfito de sodio
1.2. Dosificación de químico anti incrustante
2. Trenes de desmineralización (4 + 1), cada uno consistente en:
2.1. Ósmosis Inversa de primer paso
2.2. Ósmosis Inversa de segundo paso
2.3. CEDI
3. CIP de limpieza/Flush común
4. Tablero de Control Central
5. Tablero de Distribución y Potencia

La cotización antes mencionada incluye 3 costos indirectos, para hacer el cálculo del costo de inversión total, se tomaron en cuenta el porcentaje de los factores de Ingeniería, Capital de trabajo y mantenimiento por lo que el costo directo inicial de todo el sistema se muestran en la Tabla 32.

**Tabla 32.** Costo directo de inversión de OI/OI+CEDI

Índice	Costo (USD)
Costo total de la cotización	\$14,000,000.00
Ingeniería (6%)	\$840,000.00
Capital de trabajo (3%)	\$350,000.00
Mantenimiento (6%)	\$840,000.00
Total	\$11,970,000.00

Como ya se mencionó los sistemas a comparar requieren una infraestructura especial, pero como solamente se están comparando las tecnologías se considerará el factor de la Tabla 33 donde se considera como edificios y obra civil incluyendo servicios un 3% aproximadamente de los costos directos de operación por lo tanto se obtiene lo siguiente:

**Tabla 33.** Costos directos inicial total.

Costo directo	\$11,970,000.00
Costos de edificios y obra civil	\$822,366.41
<b>Total (USD)</b>	<b>\$12,792,366.41</b>

La cotización se hizo en julio de 2010 para un sistema de la misma capacidad, se requiere traer estos costos a la actualidad por lo que se utilizan los datos descritos en la Figura 23.

Utilizando los Índices del año 2010 al año 2012 y utilizando la ecuación (1) se obtiene el siguiente costo actual.

$$\text{Costo actual} = \frac{584.6}{550.8} * \$12,792,366.41 = \$13,577,000.00$$

## II. Premisas generales para el cálculo del costo anual equivalente

**Tabla 34.** Premisas Generales.

Premisas Generales		
Tipo de cambio	12.90	peso/dólar
Tasa de descuento	12.00%	
Horizonte de evaluación	21	años
Operación anual	365	días

a) Intercambio Iónico.

**Tabla 35.** Volumen de materia prima, Reactivos y servicios auxiliares (base diaria) Intercambio iónico.

Volumen de Materia Prima, Reactivos y Servicios Auxiliares (base diaria)		
Agua de Mezcla	28,800.00	m <sup>3</sup> /d
Agua Neutralizada	1,440.00	m <sup>3</sup> /d
Ácido Sulfúrico	12,869.00	kg/d
Sosa	10,692.00	kg/d
Energía Eléctrica	6,946.56	KW/d
Vapor de baja presión	32,760.00	kg/d
Resina Catiónica Fuerte	31.08	kg/d
Resina Aniónica Fuerte	17.21	kg/d
Resina Aniónica Débil	22.86	kg/d

**Tabla 36.** Precios unitarios de materias primas, reactivos y servicios auxiliares para intercambio iónico.

Precios Unitarios		
Agua de Mezcla	2.06	USD/m <sup>3</sup>
Agua Neutralizada	1.16	USD/m <sup>3</sup>
Ácido Sulfúrico 98%	0.14	USD/kg
Sosa	0.69	USD kg
Energía Eléctrica	0.10	USD/kW-h
Vapor de baja presión	9.30	USD/ton
Resina Catiónica Fuerte	91.45	USD/kg
Resina Aniónica Fuerte	33.86	USD/kg
Resina Aniónica Débil	117.68	USD/kg

**Tabla 37.** Costos fijos directos para Intercambio iónico.

<b>Costos de Mantenimiento</b>	\$279,870.00	USD/año	Considera un 3% del ISBL y 1% del OSBL de la inversión
<b>Costos Generales de Planta</b>	-	USD/año	Representan el 65% de los Costos de Operación (Mano de Obra + Mantenimiento) Dado a que nuestro caso de estudio ambas tecnologías requieren la misma cantidad de mano de obra esta se considerará 0.
<b>Capital de trabajo</b>	\$1,399,350.00	USD/mes	Costo de Reactivos por un mes

b) Electrodesionización en continuo

**Tabla 38.** Volumen de materia prima, Reactivos y servicios auxiliares (base diaria) CEDI.

Volumen de Materia Prima, Reactivos y Servicios Auxiliares (base diaria)		
Agua de Mezcla	28,800	m <sup>3</sup> /d
Agua Neutralizada	576	m <sup>3</sup> /d
Meta bisulfito de sodio	2	kg/d
Anti- Incrustante	19	kg/d
Ácido Sulfúrico	588	kg/d
Sosa caustica	294	kg/d
Coagulante	1,472	kg/d
Energía Eléctrica	273,995.37	KW/d
Resina Catiónica Fuerte	42.50	kg/d
Resina Aniónica Fuerte	38.75	kg/d

**Tabla 39.** Precios unitarios de materia prima, reactivos y servicios auxiliares para CEDI

<b>Precios (USD)</b>		
Agua de Mezcla	2.06	USD/m <sup>3</sup>
Agua Neutralizada	1.156488	USD/m <sup>3</sup>
Meta bisulfito de sodio	0.315	USD/kg
Anti- Incrustante	9.2	USD/kg
Ácido Sulfúrico	0.14	USD/kg
Sosa caustica	0.69	USD/kg
Coagulante	3.3	USD/kg
Energía Eléctrica	0.10	USD/kW-h
Resina Catiónica Fuerte	91.45	USD/kg
Resina Aniónica Fuerte	33.86	USD/kg

**Tabla 40.** Costos fijos directos para CEDI

<b>Costos de Mantenimiento</b>	\$407,310.00	MXN/año	Considera un 3% del ISBL y 1% del OSBL de la inversión
<b>Costos Generales de Planta</b>	-	MXN/año	Representan el 65% de los Costos de Operación (Mano de Obra + Mantenimiento) Dado a que nuestro caso de estudio ambas tecnologías requieren la misma cantidad de mano de obra esta se considerará 0.
<b>Capital de trabajo (el primer mes)</b>	\$2,036,550.00	MXN/mes	Costo de Reactivos por un mes

### III. Costos de operación

#### a) Intercambio Iónico

**Tabla 41.** Costos variables de producción para el intercambio iónico.

<b>Intercambio iónico</b>				
<b>Flujo de producción</b>		<b>m<sup>3</sup>/a</b>	<b>10,512,000</b>	
<b>costos variables de operación (variables)</b>				
<b>Materias primas</b>	<b>CVU</b>	<b>U/m</b>	<b>Consumo</b>	<b>Importe</b>
Agua Mezcla (PTAR+Clarificador)	\$2.06	\$USD/m <sup>3</sup>	10,512,000.0 0	\$21,654,720.0 0
Agua Neutralizada	\$1.1565	\$USD/m <sup>3</sup>	525,600.00	\$607,850.29
<b>Químicos</b>	<b>CVU</b>	<b>U/m</b>	<b>Consumo</b>	<b>Importe</b>
Ácido sulfúrico	\$0.1400	\$ USD /kg	4,697,185.00	\$657,605.90
Sosa	\$0.6900	\$ USD /kg	3,902,580.00	\$2,692,780.20
Resina catiónica fuerte	\$91.4521	\$ USD /kg	11,343.75	\$1,037,409.45
Resina aniónica fuerte	\$33.8588	\$ USD /kg	6,281.25	\$212,675.86
Resina aniónica débil	\$117.676 1	\$ USD /kg	42,951.77	\$5,054,395.78
<b>Energéticos y otros</b>	<b>CVU</b>	<b>U/m</b>	<b>Consumo</b>	<b>Importe</b>
Energía eléctrica	\$0.1000	\$ USD /kW-h	2,535,494.40	\$253,549.44
Vapor de baja (19)	\$9.3023	\$ USD /ton	11,957,400.0 0	\$111,231.63
<b>Costos variables de operación unitarios (variables)</b>				
<b>Costos variables de operación total anual (variables)</b>			<b>\$USD/a</b>	<b>\$32,282,218.5 5</b>

## b) CEDI

Tabla 42. Costos variables de producción para CEDI.

OI/OI+CEDI				
Flujo de producción		m <sup>3</sup> /a	10,512,000	
Costos variables de operación (variables)				
Materias primas	CVU	U/M	Consumo	Importe
Agua Mezcla(PTAR+Clarificador)	\$2.06	\$USD/m <sup>3</sup>	28,800	\$59,328
Agua Neutralizada	\$1.1565	\$USD/m <sup>3</sup>	576	\$666.14
Químicos	CVU	U/M	Consumo	Importe
Metabisulfito de sodio	\$0.3150	\$USD/kg	839.50	\$264.44
Anti incrustante	\$9.2000	\$USD/kg	6,935.00	\$63,802.00
Ácido sulfúrico	\$0.1400	\$USD/kg	214,795.20	\$30,071.33
Sosa caustica	\$0.6900	\$USD/kg	107,397.60	\$74,104.34
Coagulante	\$3.2946	\$USD/kg	537,280.00	\$1,770,108.53
Resina catiónica fuerte	\$91.4521	\$USD/kg	15,512.50	\$1,418,650.28
Resina aniónica fuerte	\$33.8588	\$USD/kg	14,143.75	\$478,891.02
Energéticos y otros	CVU	U/M	CONSUMO	IMPORTE
Energía eléctrica	\$0.1000	\$USD/kW-h	100,008,308.74	\$10,000,830.87
Costos variables de operación unitarios (variables)				
Costos variables de operación total anual (variables)			\$USD/a	\$13,896,716

## IV. Análisis económico.

En las y se muestra el análisis económico para las tecnologías de intercambio iónico y el sistema de Ósmosis Inversa más CEDI en un horizonte de evaluación, donde se muestran los costos variables, costos fijos, los costos directos e indirectos.

## a) Intercambio Iónico

Tabla 43. Análisis económico del Intercambio Iónico.

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	
Horizonte de evaluación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
<b>Materia prima</b>	<b>Consumo</b>	<b>Unidades</b>																				
Agua mezcla (PTAR+clarificador)	11,326,680.00		-	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	11,326,680.00	
Agua neutralizada	525,600.00		-	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	525,600.00	
<b>Químicos</b>	<b>Consumo</b>	<b>Unidades</b>																				
Ácido sulfúrico	4,697,185.00	M <sup>3</sup> /a	-	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	4,697,185.00	
Sosa	3,902,580.00	M <sup>3</sup> /a	-	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	3,902,580.00	
Resina catiónica fuerte	11,343.75	Kg/a	-	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	11,343.75	
Resina aniónica débil	42,951.77	Kg/a	-	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	42,951.77	
Resina aniónica fuerte	6,281.25	Kg/a	-	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	6,281.25	
<b>Energéticos y otros</b>																						
Energía eléctrica	2,535,494.40	Kw/a	-	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	2,535,494.40	
Vapor de baja (19)	11,957,400.00	Ton/a	-	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	11,957,400.00	
<b>Importes anuales (\$USD)</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>	<b>2015</b>	<b>2016</b>	<b>2017</b>	<b>2018</b>	<b>2019</b>	<b>2020</b>	<b>2021</b>	<b>2022</b>	<b>2023</b>	<b>2024</b>	<b>2025</b>	<b>2026</b>	<b>2027</b>	<b>2028</b>	<b>2029</b>	<b>2030</b>	<b>2031</b>	<b>2032</b>	<b>2033</b>	
<b>Horizonte de evaluación</b>	<b>0</b>	<b>0%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	
<b>Costos variables de producción (USD\$ anuales)</b>																						
<b>Materia prima</b>	<b>Costo</b>	<b>Unidades</b>																				
Agua mezcla (PTAR+clarificador)	\$28,068,566.68			\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	\$28,068,566.68	
Agua neutralizada	\$525,601.16			\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	\$607,850.29	
<b>Químicos</b>	<b>Costo</b>	<b>U/m</b>																				
Ácido sulfúrico	\$657,605.90	\$USD/a	-	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	\$657,605.90	
Sosa	\$2,692,780.20	\$USD/a	-	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	\$2,692,780.20	
Resina catiónica fuerte	\$1,037,409.45	\$USD/a	-	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	\$1,037,409.45	
Resina aniónica débil	\$5,054,395.78	\$USD/a	-	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	\$5,054,395.78	
Resina aniónica fuerte	\$212,675.86	\$USD/a	-	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	\$212,675.86	
<b>Energéticos y otros</b>	<b>Costo</b>	<b>U/m</b>																				
Energía eléctrica	\$253,549.44	\$USD/a	-	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	\$253,549.44	

Año	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	
Horizonte de evaluación	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
Vapor de baja (19)	\$111,231.63	USD/t	-	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63	\$111,231.63
<b>Total costos variables de producción</b>		38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23	38,696,065.23
<b>Costos fijos de la planta (\$USD)</b>																						
Costos fijos directos																						
Mantenimiento preventivo 3%		859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40
<b>Total costos fijos directos</b>	859,655.40	-	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40	859,655.40
<b>Balance de pérdidas (\$USD)</b>																						
Costo total en efectivo de operación	-	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64	39,555,720.64
Inversiones totales y capital de trabajo	28,655,180.13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Valor presente</b>	<b>28,655,180.13</b>	<b>35,317,607.71</b>	<b>31,533,578.31</b>	<b>28,154,980.64</b>	<b>25,138,375.57</b>	<b>22,444,978.19</b>	<b>20,040,159.09</b>	<b>17,892,999.19</b>	<b>15,975,892.14</b>	<b>14,264,189.41</b>	<b>12,735,883.40</b>	<b>11,371,324.46</b>	<b>10,152,968.27</b>	<b>9,065,150.24</b>	<b>8,093,884.14</b>	<b>7,226,682.27</b>	<b>6,452,394.89</b>	<b>5,761,066.86</b>	<b>5,143,809.70</b>	<b>4,592,687.23</b>	<b>4,100,613.60</b>	

## b) Electrodesionización en continuo.

Tabla 44. Análisis económico del CEDI

Año			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Horizonte de evaluación			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
% operación			0%	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<b>Balance de materia</b>																							
Materia prima	Consumo	Unidades																					
Agua mezcla (PTAR+clarificador)	31,032.00	-		31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00	31,032.00
Agua neutralizada	620.64	-		620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64	620.64
Químicos	Consumo	Unidades																					
Metabisulfito de sodio	839.50	M <sup>3</sup> /a	-	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50	839.50
Anti incrustante	6,935.00	M <sup>3</sup> /a	-	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00	6,935.00
Ácido sulfúrico	214,795.20	Kg/a	-	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20	214,795.20
Sosa caustica	107,397.60	Kg/a	-	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60	107,397.60
Coagulante	537,280.00			537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00	537,280.00
Resina catiónica fuerte	15,512.50			15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50	15,512.50
Resina aniónica fuerte	14,143.75	Kg/a	-	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75	14,143.75
<b>Energéticos y otros</b>																							
Energía eléctrica	100,008,308.74	Kw/a	-	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74	100,008,308.74
Importes anuales (\$USD)			2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
Horizonte de evaluación			0	0%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<b>Costos variables de producción (USD\$ anuales)</b>																							
Materia prima	Costo	Unidades																					
Agua mezcla (ptar+clarificador)	\$76,900.18			\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18	\$76,900.18
Agua neutralizada	\$621.80			\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76	\$717.76

Químicos	Costo	U/m																					
Metabisulfito de sodio	\$264.44	\$USD/a	-	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44	\$264.44
Anti incrustante	\$63,802.00	\$USD/a	-	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00	\$63,802.00
Acido sulfurico	\$30,071.33	\$USD/a	-	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33	\$30,071.33
Sosa caustica	\$74,104.34	\$USD/a	-	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34	\$74,104.34
Coagulante	\$1,770,108.53	\$USD/a		\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53	\$1,770,108.53
Resina catiónica fuerte	\$1,418,650.28	\$USD/a		\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28	\$1,418,650.28
Resina aniónica fuerte	\$478,891.02	\$USD/a	-	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02	\$478,891.02
<b>Energéticos y otros</b>	<b>Costo</b>	<b>U/m</b>																					
Energía eléctrica	\$10,000,830.87	\$USD/a	-	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87	\$10,000,830.87
<b>Total costos variables de producción</b>			-	<b>13,914,340.76</b>																			
<b>Costos fijos de la planta (\$USD)</b>																							
Costos fijos directos																							
Mantenimiento preventivo 3%	482,023.06		-	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06	482,023.06
Mano de obra de operación	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Gastos de laboratorio	-		-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Total costos fijos directos</b>			-	<b>482,023.06</b>																			
<b>Balance de pérdidas (\$USD)</b>																							
Costo total en efectivo de operación			-	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83	14,396,363.83
Inversiones totales y capital de trabajo			16,067,435.39	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
<b>Valor presente</b>			<b>16,067,435.39</b>	<b>12,853,896.27</b>	<b>11,476,693.10</b>	<b>10,247,047.41</b>	<b>9,149,149.47</b>	<b>8,168,883.46</b>	<b>7,293,645.95</b>	<b>6,512,183.88</b>	<b>5,814,449.89</b>	<b>5,191,473.12</b>	<b>4,635,243.86</b>	<b>4,138,610.59</b>	<b>3,695,188.02</b>	<b>3,299,275.02</b>	<b>2,945,781.27</b>	<b>2,630,161.85</b>	<b>2,348,358.79</b>	<b>2,096,748.92</b>	<b>1,872,097.25</b>	<b>1,671,515.40</b>	<b>1,492,424.47</b>

En la Tabla 45 se muestran el valor presente durante el horizonte de evaluación, se obtiene este criterio utilizando la ecuación (2) para poder calcular el CAE.

**a) Valor presente de los costos para el intercambio iónico**

$$(2) \text{ Valor presente de los Costos} = \sum \frac{\text{Costos de operación y producción}}{(1+\text{tasa de descuento})^{\text{año}}}$$

**Tabla 45.** Valores del valor presente durante el horizonte de evaluación para el intercambio iónico

Horizonte de evaluación	Valor Presente
2013	\$28,655,180
2014	\$35,317,608
2015	\$31,533,578
2016	\$28,154,981
2017	\$25,138,376
2018	\$22,444,978
2019	\$20,040,159
2020	\$17,892,999
2021	\$15,975,892
2022	\$14,264,189
2023	\$12,735,883
2024	\$11,371,324
2025	\$10,152,968
2026	\$9,065,150
2027	\$8,093,884
2028	\$7,226,682
2029	\$6,452,395
2030	\$5,761,067
2031	\$5,143,810
2032	\$4,592,687
2033	\$4,100,614

Obteniendo los valores presentes a lo largo del horizonte de evaluación en los 20 años se obtiene el CAE utilizando la ecuación (3)

$$(3) \text{ CAE} = (\text{Costos de Inversión} + \text{Valor presente de los costos}) * f_{\text{Costos}}$$

$$(3) f_{costo} = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1}$$

Obteniendo así un CAE de:

$$CAE = \$252,549,488.60 * \frac{(1 + 0.12)^{20} * 0.12}{(1 + 0.12)^{20} - 1} = \$43,392,041$$

### b) CEDI

A continuación se muestran el valor presente durante el horizonte de evaluación, se obtiene este criterio utilizando la ecuación (2) para poder calcular el CAE.

**Tabla 46.** Valores del valor presente durante el horizonte de evaluación para el CEDI

Horizonte de evaluación	VALOR PRESENTE
2013	\$16,067,435.39
2014	\$12,853,896.27
2015	\$11,476,693.10
2016	\$10,247,047.41
2017	\$9,149,149.47
2018	\$8,168,883.46
2019	\$7,293,645.95
2020	\$6,512,183.88
2021	\$5,814,449.89
2022	\$5,191,473.12
2023	\$4,635,243.86
2024	\$4,138,610.59
2025	\$3,695,188.02
2026	\$3,299,275.02
2027	\$2,945,781.27
2028	\$2,630,161.85
2029	\$2,348,358.79
2030	\$2,096,748.92
2031	\$1,872,097.25
2032	\$1,671,515.40
2033	\$1,492,424.47

Obteniendo los valores presentes a lo largo del horizonte de evaluación en los 20 años se obtiene el CAE utilizando la ecuación (3)

Obteniendo así un CAE de:

$$CAE = \$103,800,744 * \frac{(1 + 0.12)^{20} * 0.12}{(1 + 0.12)^{20}} = \$16,547,452$$

## V. Análisis de sensibilidad

Para este caso de estudio se desarrolló un análisis de sensibilidad de las dos tecnologías para ver cuál de las variables (Inversión, Operación o insumos) era más sensible con respecto a nuestro índice de costo anual equivalente, variando estas variables de un -20% a un 20%. A continuación se observaran estas variaciones.

a) Intercambio Iónico.

En la Tabla 47 y Tabla 48 se muestra como varían los índices económicos con respecto al CAE para el intercambio iónico.

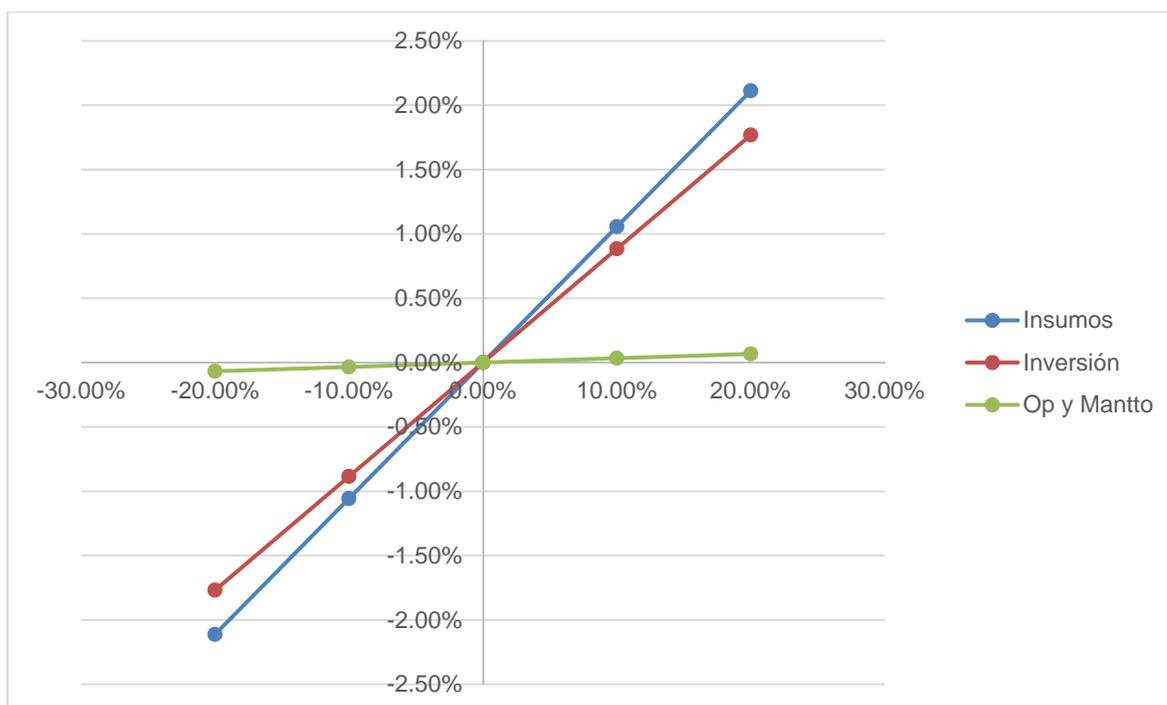
**Tabla 47.** Análisis de sensibilidad de Intercambio Iónico (USD\$).

	Análisis de Sensibilidad para CAE Intercambio Iónico (USD\$)				
	-20.00%	-10.00%	0.00%	10.00%	20.00%
Insumos	\$42,475,658.06	\$42,933,849.63	\$43,392,041.19	\$43,850,232.76	\$44,308,424.33
Inversión	\$42,624,777.08	\$43,008,409.14	\$43,392,041.19	\$43,775,673.25	\$44,159,305.30
Op y Mantto	\$43,362,768.68	\$43,377,404.94	\$43,392,041.19	\$43,406,677.45	\$43,421,313.70

**Tabla 48.** Análisis de sensibilidad de Intercambio Iónico (%).

	Análisis de Sensibilidad para CAE Intercambio Iónico (%)				
	-20.00%	-10.00%	0.00%	10.00%	20.00%
Insumos	-2.11%	-1.06%	0.00	1.06%	2.11%
Inversión	-1.77%	-0.88%	0.00	0.88%	1.77%
Op y Mantto	-0.07%	-0.03%	0.00	0.03%	0.07%

En la Figura 24 se observan las variaciones de los índices de insumos, inversión y operación y mantenimiento con respecto al indicador económico del CAE.



**Figura 24.** Gráfica del análisis de sensibilidad de las variables con respecto al CAE para el intercambio iónico.

## b) Electrodesionización en continuo

En la Tabla 49 y Tabla 50 se muestra como varían los índices económicos con respecto al CAE para el intercambio iónico.

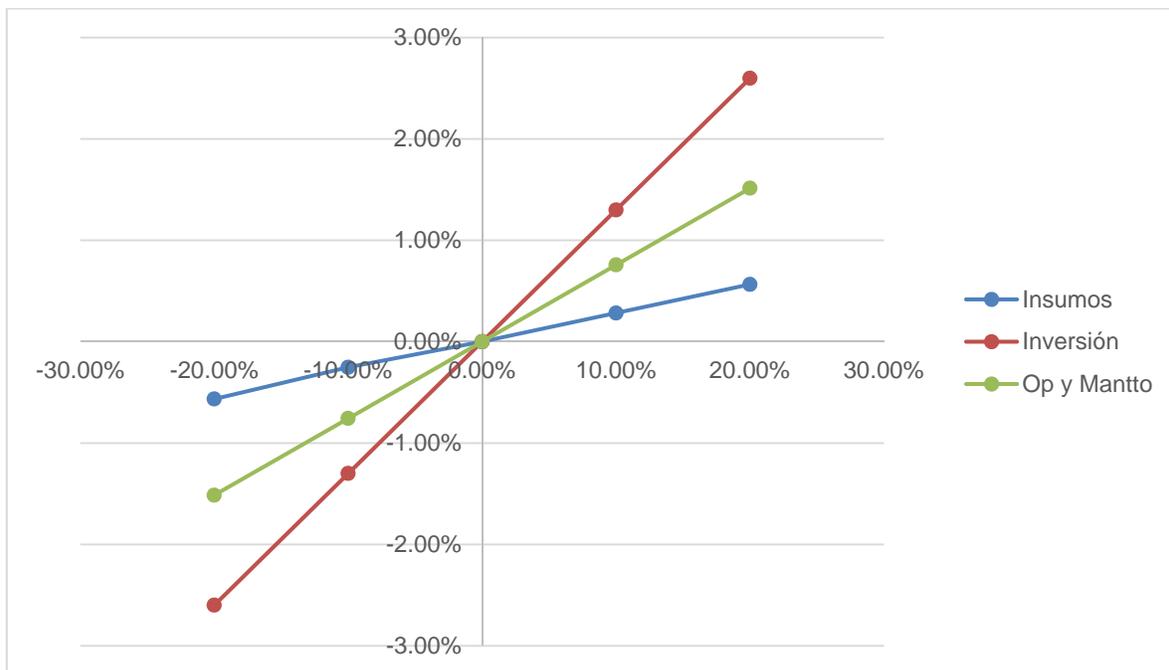
**Tabla 49.** Análisis de sensibilidad de CEDI (USD\$).

	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA CAE OI/CEDI (USD\$)				
	-20.00%	-10.00%	0.00%	10.00%	20.00%
<b>Insumos</b>	\$16,453,892.49	\$16,505,684.62	\$16,547,452.47	\$16,594,232.47	\$16,641,012.46
<b>Inversión</b>	\$16,117,234.74	\$16,332,343.61	\$16,547,452.47	\$16,762,538.84	\$16,977,670.20
<b>Op y Mantto</b>	\$16,296,839.67	\$16,422,146.07	\$16,547,452.47	\$16,672,758.87	\$16,798,065.28

**Tabla 50.** Análisis de sensibilidad de CEDI (%).

	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA CAE OI/CEDI (%)				
	-20.00%	-10.00%	0.00%	10.00%	20.00%
<b>Insumos</b>	-0.57%	-0.25%	0.00	0.28%	0.57%
<b>Inversión</b>	-2.60%	-1.30%	0.00	1.30%	2.60%
<b>Op y Mantto</b>	-1.51%	-0.76%	0.00	0.76%	1.51%

En la Figura 25 se observan las variaciones de los índices de insumos, inversión y operación y mantenimiento con respecto al indicador económico del CAE.



**Figura 25.** Gráfica del análisis de sensibilidad de las variables con respecto al CAE para el OI/CEDI