

# Trabajo Final de Máster



*Optimización de la planta de  
Electrodiálisis reversible de Heineken  
España S.A*

Universidad Politécnica de Valencia

Directores: Sancho Fernández, María Pino

Garrigós Jiménez, Marillanos

Estudiante: Martínez Martínez, Patricia

*Julio 2012*

## *Agradecimientos*

La elaboración del presente Trabajo Final de Máster ha sido posible gracias a la colaboración y supervisión de mis directoras María Pino Sancho Fernández y Marillanos Garrigós Jiménez, que compartieron conmigo sus conocimientos y experiencia.

También agradecerle a Heineken España S.A la oportunidad de formar parte de su equipo y completar mi formación para mi carrera profesional de la mano de unos grandes profesionales.

A mis compañeros del Máster de Seguridad Industrial y Medio Ambiental por su apoyo y los muchos momentos compartidos.

A mis amigos y amigas, en especial a mis compañeras de la universidad que siempre han estado a mi lado.

Y en especial a mi familia, por su apoyo incondicional y comprensión.

Gracias a todos.

# ÍNDICE

	<u>Página</u>
Índice de Tablas.....	1
Índice de Figuras.....	2
1. Objetivos.....	4
1.1 Motivación.....	5
1.2 Contribución del Trabajo Fin de Máster.....	5
1.3 Estructura del Trabajo Fin de Máster.....	6
2. Introducción.....	6
2.1 Industria cervecera.....	6
2.2 Producción de agua para la fabricación de cerveza.....	7
2.3 Técnicas alternativas para el tratamiento de aguas destinadas a consumo alimentario.....	7
2.4 Electrodiálisis.....	10
2.5 Celda elemental.....	10
2.6 Membranas de intercambio iónico.....	10
2.6.1 Membrana cationica.....	11
2.6.2 Membrana cationica gruesa.....	12
2.6.3 Membrana anionica.....	12
2.7 Espaciadores.....	13
2.8 Electroodos.....	15
2.9 Celda de ED.....	19
2.10 EDR.....	20
2.11 Limpieza de membranas y electrodos.....	21
2.11.1 Limpieza con ácido.....	21
2.11.2 Limpieza con cloruro sódico.....	22
2.12 Descripción de la planta de EDR de Heineken.....	22
2.13 Sistemas de alta recuperación.....	26
2.13.1 Fugas controladas.....	27
2.13.2 Reciclado del producto fuera de normas.....	27
2.13.3 Agua de refrigeración de los electrodos.....	27
2.13.4 Reciclado del concentrado.....	28

	<u>Página</u>
3. Materiales y métodos.....	29
3.1 Toma de datos del proceso.....	29
3.2 Toma de muestras.....	29
3.3 Métodos analíticos de caracterización de las muestras.....	30
3.3.1 Dureza temporal.....	30
3.3.2 Dureza total.....	31
3.3.3 Calcio.....	31
3.3.4 Magnesio.....	32
3.3.5 Sulfatos.....	32
3.3.6 Nitratos.....	33
3.3.7 Cloruros.....	33
3.3.8 Conductividad.....	33
3.3.9 pH.....	34
3.4 Seguridad y salud.....	35
4. Resultados y discusión.....	40
4.1 Histórico del funcionamiento de los módulos y gráficas de seguimiento... 40	40
4.1.1 Caracterización del agua.....	40
4.1.2 Análisis de rendimientos y porcentajes de agua de rechazo de cada módulo.....	44
4.2 Resultados de la optimización de los módulos.....	55
4.2.1 Módulo A.....	55
4.2.2 Módulo B.....	62
4.2.3 Módulo C.....	69
4.3 Resultados globales de la optimización de la planta.....	76
5. Conclusiones.....	80
6. Bibliografía.....	82
7. Nomenclatura.....	83

## ÍNDICE DE TABLAS

	<u>Página</u>
Tabla 1. Procesos de desalación .....	8
Tabla 2. Riesgos y medidas .....	38
Tabla 3. Características del agua alimento en el año 2011 .....	40
Tabla 4. Características del agua producto para cada módulo en el año 2011 .....	41
Tabla 5. Especificaciones RD 140/2003 .....	42
Tabla 6. Características agua producto final en el año 2011 .....	43
Tabla 7. Parámetros prefijados para la salmuera en cada módulo año 2011 .....	43
Tabla 8. Analíticas salmuera de salida de cada módulo año 2011. ....	44
Tabla 9. Condiciones de trabajo iniciales de los módulos en el 2011 .....	53
Tabla 10. Condiciones de trabajo iniciales de la planta de EDR en 2011 .....	54
Tabla 11. Características físico-químicas del agua producto antes y después de optimizar el módulo A .....	61
Tabla 12. Características físico-químicas del agua producto antes y después de optimizar el módulo B .....	68
Tabla 13. Características físico-químicas del agua producto antes y después de optimizar el módulo C .....	75
Tabla 14. Características físico-químicas del agua producto de la planta de EDR en el 2012 .....	76
Tabla 15. Condiciones de trabajo de los módulos optimizados .....	76
Tabla 16. Condiciones de trabajo de la planta de EDR optimizada .....	79

## ÍNDICE DE FIGURAS

	<u>Página</u>
Figura 1. Membrana catiónica.....	11
Figura 2. Membrana aniónica.....	12
Figura 3. Espaciadores de flujo desmineralizado y concentrado.....	13
Figura 4. Disposición de los espaciadores.....	14
Figura 5. Flujo a través de la celda elemental.....	15
Figura 6. Detalle del Electrodo.....	16
Figura 7. Electrodo, espaciador y membrana catiónica gruesa.....	16
Figura 8. Comportamiento disolución iónica con el efecto de C.C.....	19
Figura 9. Flujos a través de las membranas.....	19
Figura 10. Planta de electrodiálisis reversible de Heineken.....	22
Figura 11. Diagrama de bloques d la línea de aguas.....	23
Figura 12. Filtros carbón.....	24
Figura 13. Esquema de líneas de un módulo de EDR.....	25
Figura 14. Datos de proceso y puntos de toma de muestras.....	29
Figura 15. Conductímetro.....	34
Figura 16. Medidor de pH.....	34
Figura 17. Extintor y ducha de seguridad.....	36
Figura 18. Rendimiento módulo A año 2011.....	45
Figura 19. Porcentaje de rechazo del módulo A año 2011.....	46
Figura 20. Consumo energético del módulo A año 2011.....	47
Figura 21. Rendimiento módulo B año 2011.....	48
Figura 22. Porcentaje de rechazo del módulo B año 2011.....	49
Figura 23. Consumo energético del módulo B año 2011.....	50
Figura 24. Rendimiento módulo C año 2011.....	51
Figura 25. Porcentaje de rechazo de agua del módulo C año 2011.....	52
Figura 26. Consumo energético módulo C año 2011.....	53
Figura 27. Análisis del rendimiento del módulo A optimizado.....	56
Figura 28. Porcentaje de rechazo de agua del módulo A optimizado.....	58
Figura 29. Consumo de energía del módulo A optimizado.....	60
Figura 30. Análisis del rendimiento del módulo B optimizado.....	63
Figura 31. Porcentaje de rechazo de agua del módulo B optimizado.....	65

Figura 32. Consumo de energía del módulo B optimizado.....	67
Figura 33. Rendimiento módulo C optimizado.....	70
Figura 34. Porcentaje de rechazo de agua del módulo C optimizado.....	72
Figura 35. Consumo de energía del módulo C optimizado.....	74
Figura 36. Rendimientos 2011 y 2012.....	77
Figura 37. Porcentaje agua de rechazo 2011 y 2012.....	78
Figura 38. Consumo eléctrico 2011 y 2012.....	79

## **1. OBJETIVOS**

El presente Trabajo Fin de Máster se realiza con la finalidad de contribuir en el ahorro y optimización de los consumos de agua de la empresa Heineken España S.A, ya que se han convertido en la actualidad en objetivos primordiales, por mantener un compromiso de carácter medio ambiental.

De manera que los objetivos del presente trabajo serán la optimización del rechazo de agua de la planta de electrodiálisis que suministra el agua al proceso de elaboración de cerveza.

Con dicha optimización se buscará reducir el índice KPI en la planta de electrodiálisis reversible. Dicho índice representa el consumo de agua en fábrica y se define como los hectolitros de agua consumidos/hectolitros de cerveza producido.

Para ello se realizarán distintas pruebas modificando los lazos de control de los tres módulos de electrodiálisis reversible de los que consta la planta de tratamiento de aguas. Dichos lazos de control permiten la modificación del caudal de agua de alimentación, la presión diferencial de entrada y la conductividad de salmuera, lo que posibilitará:

- Estudiar y analizar del rendimiento de la pila, calculado como la relación entre el volumen de agua de alimentación y el volumen de agua producto.
- Estudiar y analizar el porcentaje de agua de rechazo respecto del agua alimento.
- Estudiar y analizar el consumo energético de la planta como  $\text{Kwh/m}^3$  de agua tratada.



### *1.1 Motivación*

La motivación de la realización de este Trabajo Final de Máster nace de la formación y docencia recibida en el Máster de Seguridad Industrial y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia.

Dentro de dicho Máster se ofrece la oportunidad de realizar prácticas en empresa a los estudiantes para poder desarrollar una labor profesional y contribuir en la experiencia personal del estudiante. La empresa donde se han realizado las prácticas correspondientes a este trabajo ha sido Heineken España S.A.

Heineken España S.A ofrece la posibilidad de desarrollar numerosos proyectos con el estudiante, pero finalmente se tomó la decisión de realizar el presente trabajo por dos motivos principales, uno por la necesidad de realizar una mejora en los módulos de electrodiálisis reversible en la planta de tratamiento de aguas de la fábrica, y el otro por la afinidad entre la mejora y la formación adquirida por el estudiante durante el máster en el campo de la tecnología de membranas.

### *1.2 Contribución del Trabajo Fin de Máster*

Las principales contribuciones de este Trabajo Fin de Máster pueden describirse en los siguientes puntos:

- Realizar una revisión bibliográfica sobre tecnología de membranas, y en particular la ED, en el sector alimentario.
- Analizar los datos experimentales y de proceso de la planta de Heineken España S.A.
- Proponer nuevos estándares de trabajo para la optimización de la planta de electrodiálisis reversible.

### *1.3 Estructura del Trabajo Fin de Máster*

Inicialmente se exponen los objetivos, la motivación y la contribución de este Trabajo, en el segundo apartado se describe brevemente la industria cervecera y las necesidades de realizar tratamientos de agua por ser un agua de consumo alimentario. A continuación se analizan las posibles técnicas aplicables para dicho tratamiento y se realiza una investigación de publicaciones que demuestren las diferentes opciones estudiadas y cuál de ellas es la más idónea. Además se desarrollará en detalle la técnica aplicada en este trabajo, la electrodiálisis reversible.

En el tercer apartado se exponen los materiales y métodos empleados para la realización del presente Trabajo Final de Máster, además de una parte de seguridad y salud en la manipulación de reactivos químicos.

A continuación, en el cuarto apartado, se incluye un histórico de la situación de los módulos antes de la optimización de los mismos y se presentan los resultados de la optimización obtenidos experimentalmente: resultados de las analíticas, parámetros de control de proceso, gráficas de seguimiento y tablas con los nuevos estándares de condiciones de trabajo.

En el quinto apartado se redactan las conclusiones extraídas tras los resultados obtenidos experimentalmente y se concretan los nuevos estándares de condiciones de trabajo.

## **2. INTRODUCCIÓN**

### *2.1 Industria cervecera*

El sector de la elaboración de cerveza en España ostenta una posición destacada tanto en el contexto europeo como mundial. España es el tercer productor de la Unión Europea y noveno del mundo.

España ocupa el tercer puesto de la Unión Europea (UE), por detrás de Alemania y Reino Unido, con una producción de 31,3 millones de hectolitros de cerveza. El consumo anual de cerveza alcanza los 34,2 millones de hectolitros, mientras que el consumo per cápita ronda los 79,26 litros.

En cuanto a la actividad comercial del país, España exporta 76,3 millones de litros de cerveza e importa 369 millones de litros. Actualmente, cuenta con 21 fábricas de cerveza y genera más de 7.037 empleos directos.

Heineken España S.A aporta a la producción total de España que resulta ser de 31,3 millones de hectolitros de cerveza, un total de 10,15 millones de hectolitros de cerveza, que en porcentaje resulta ser 32,4 %, y en concreto la fábrica de Valencia tiene un volumen de producción anual de 2,5 millones de hectolitros de cerveza.

### *2.2 Producción de agua para la fabricación de la cerveza*

La necesidad de producción de un agua de calidad en el sector alimentario, es imprescindible para la seguridad y salud del consumidor (*Directiva EU 98/83/EC*). Por ello, existe la necesidad de someter a tratamientos al agua destinada a consumo alimentario.

Muchas industrias del sector tienen el suministro directo de la red y con tan solo un descalcificador ya consiguen un agua de calidad para el proceso de fabricación. Sin embargo, las industrias que toman el agua de pozos, que son originalmente aguas subterráneas, contienen altos contenidos en minerales.

Por ello es preciso someter esta agua a una desmineralización previa a su uso en el proceso de fabricación de cerveza. A continuación se analizarán las técnicas utilizadas habitualmente para la producción de agua de calidad en el sector alimentario, a partir de la información extraída de bibliografía y artículos de investigación.

### *2.3 Técnicas alternativas para el tratamiento de aguas destinadas a consumo alimentario*

Los sistemas de desalación utilizados generalmente se suelen clasificar en dos grandes grupos en razón del tipo de proceso de separación en que se basan, o por decirlo más exactamente, por la fuerza impulsora que utilizan. Los dos grandes grupos son los sistemas de evaporación y los de membranas.

En el primer caso, se requiere calentar y evaporar el agua, y en una segunda fase, condensar el vapor. La fuerza impulsora en este caso es la diferencia de temperatura. En algunos de los sistemas de evaporación, la operación se realiza en varias etapas, por razones de efectividad energética.

En cambio, en el segundo grupo de procesos, se emplea un diferencial de presión o de diferencia de potencial a ambos lados de la membrana. En el primer caso, la presión fuerza al agua a atravesar la membrana, mientras que las sales son rechazadas. Y en el segundo caso, la diferencia de potencial fuerza a los iones a atravesar las membranas.

Las técnicas que utilizan como fuerza impulsora el diferencial de temperatura son la evaporación súbita multietapa (ESME), la evaporación multiefecto (EME) y la compresión de vapor (CV).

Y como técnicas que utilizan la diferencia de presión o tensión eléctrica se encuentran la ósmosis inversa y la electrodiálisis. En la Tabla 1 se resumen los procesos comentados:

**Tabla 1. Procesos de desalación**

Procesos	Tipo	Aplicación
<b>Térmicos</b>	Evaporación súbita multi-etapa (ESME)	Agua de mar
	Evaporación de múltiple efecto (EME)	Agua de mar
	Compresión de vapor (CV)	Agua de mar
<b>Con membranas</b>	Electrodiálisis (ED)	Aguas salobres (< 3000 ppm)
	Ósmosis inversa (OI)	Aguas salobres y de mar

Las técnicas basadas en la diferencia de temperatura requieren un mayor aporte energético que los procesos de membrana, por lo que implicarán un mayor coste económico, además de ser técnicas recomendadas para mayores contenidos en salinidad que el caso que aplica. Por ello las técnicas más adecuadas para la producción de agua en el sector alimentario son la ósmosis inversa y la electrodiálisis.

En la bibliografía existen diversos trabajos que señalan dichas técnicas como las más apropiadas, algunas de las cuales recomiendan la electrodiálisis en el sector alimentario como técnica para la desmineralización de aguas [1].

Las ventajas que presenta la electrodiálisis frente a la ósmosis inversa es el poco pretratamiento que requiere en la corriente de alimentación a los módulos de electrodiálisis, ya que los niveles de ensuciamiento de las membranas son menores gracias a la inversión de las polaridades de la pila de membranas, lo que permite que la vida útil de las membranas sea mayor. Otra ventaja que presenta es que el proceso de electrodiálisis no presenta limitaciones de presión osmótica [2].

Aunque también hay que considerar las desventajas que tiene el proceso frente a la ósmosis inversa, como son una menor eliminación de microorganismos o contaminantes orgánicos.

Otra técnica que también puede considerarse frente a la electrodiálisis reversible, es la electrodesionización, que es una combinación entre la electrodiálisis y el intercambio iónico. Este proceso funciona de una forma muy similar a la electrodiálisis pero permite realizar niveles de desionización más bajos, siendo una técnica relativamente nueva para el sector alimentario [3] 2004.

Tras identificar técnicas disponibles y analizar sus ventajas e inconvenientes, la electrodiálisis resulta ser la técnica seleccionada por Heineken España S.A por razones de innovación, ya que en todas sus fábricas tiene instalado como sistema de tratamiento de aguas la ósmosis inversa. En este caso se decantó por un tratamiento de electrodiálisis por algunas ventajas que presentaba frente a la ósmosis como:

- No requiere de un pretratamiento tan exhaustivo como en las otras técnicas.
- Permiten mayores niveles de cloro.
- Permite trabajar a mayores rangos de pH.
- Menor consumo de productos químicos.
- Menor consumo eléctrico.

## 2.4 Electrodiálisis

La Electrodiálisis (ED) es un proceso de separación electroquímica en el que los iones son transferidos a través de membranas selectivas de intercambio iónico por medio de corriente continua.

Las leyes primarias que controlan los procesos de ED son:

- Disociación de las sales en el agua
- Propiedades de las membranas
- Ley de Faraday
- Ley de Ohm

## 2.5 Celda elemental

Una celda de ED está formada por una sección repetitiva que se llama célula que está compuesta de:

- Una membrana catiónica
- Un espaciador de flujo de agua desmineralizada.
- Una membrana aniónica.
- Un espaciador de flujo de agua concentrada.

Una pila típica puede tener entre 300 y 500 pares de células entre dos electrodos (cátodo y ánodo).

## 2.6 Membranas de intercambio iónico

En los procesos de ED se utilizan dos tipos de membranas, las membranas aniónicas y la catiónicas. Cada membrana tiene la apariencia física de una lámina de plástico y está reforzada con un tejido de fibra sintética.

Ciertas propiedades son típicas de ambas membranas, aniónica y catiónica:

- Baja resistencia eléctrica
- Insolubles en disolución acuosa
- Semi-rígida para facilitar su manejo durante el montaje
- Resistencia al cambio de pH de 1 a 10
- Operación a temperaturas de hasta 46 °C

- Resistencia a la presión osmótica cuando trabaja con disoluciones salinas de 200 y 3000 ppm.
- Expectativas de larga vida, entre 6 y 7 años en función de las condiciones de operación.
- Impermeables al agua bajo presión.

### 2.6.1 Membranas catiónicas

La membrana catiónica es, esencialmente, una resina cambiadora de cationes, fabricada en forma de lámina, con un espesor aproximado de 0.5 mm. Las propiedades básicas de las membranas catiónicas son:

- Esencialmente impermeables al agua bajo presión
- Eléctricamente conductora
- Solo transfiere cationes y rechaza aniones

Durante el proceso de fabricación de una membrana catiónica, se fijan cargas negativas en toda la membrana. Las cargas negativas fijadas son grupos sulfonatos que repelen los iones negativos y permiten el paso a los iones cargados positivamente.

En la Figura 1 se muestra la estructura interna de una membrana catiónica:

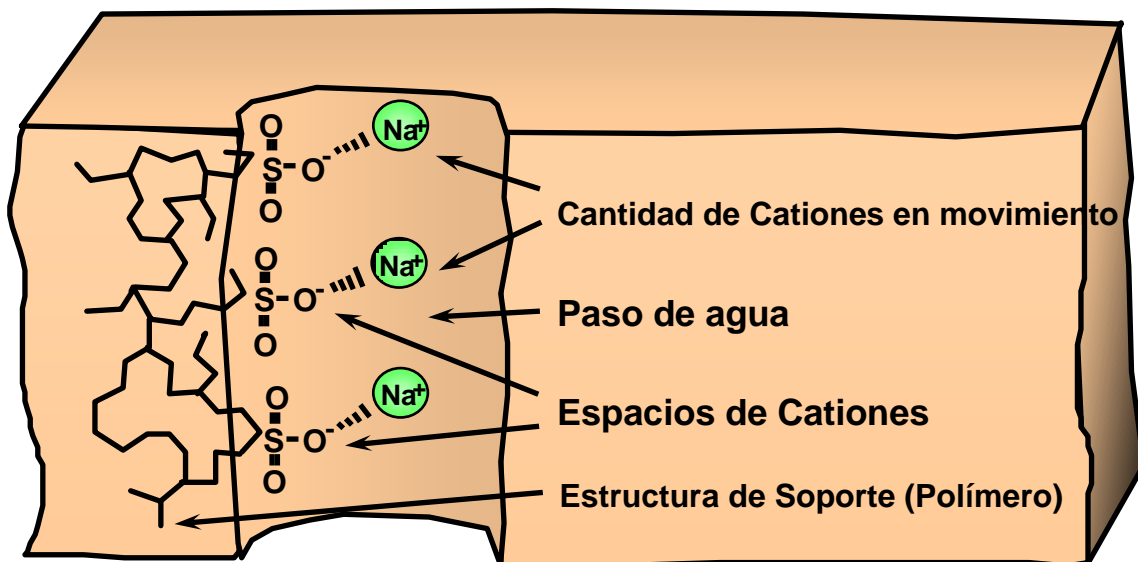


Figura 1. Membrana catiónica

2.6.2 Membrana catiónica gruesa

Una membrana catiónica gruesa tiene todas las propiedades de la membrana catiónica normal, pero está hecha con un espesor dos veces el de la normal, con miras a resistir mayores presiones diferenciales. Esta membrana es utilizada en el compartimiento de electrodo y como membrana interetapa.

2.6.3 Membrana aniónicas

La membrana aniónica es, esencialmente, una resina cambiadora de iones fabricada en forma de lámina, con un espesor aproximado de 0.5 mm. Las tres propiedades básicas de las membranas aniónicas son:

- Esencialmente impermeables al agua bajo presión.
- Eléctricamente conductora.
- Solo transfiere aniones y rechaza los cationes.

Durante la producción de la membrana aniónica, se fijan cargas positivas en la membrana matriz. Estas cargas positivas fijadas son de iones de amonio cuaternario que repelen los iones positivos y permite la transferencia de iones negativos a su través.

En la Figura 2 se muestra la estructura interna de una membrana aniónica:

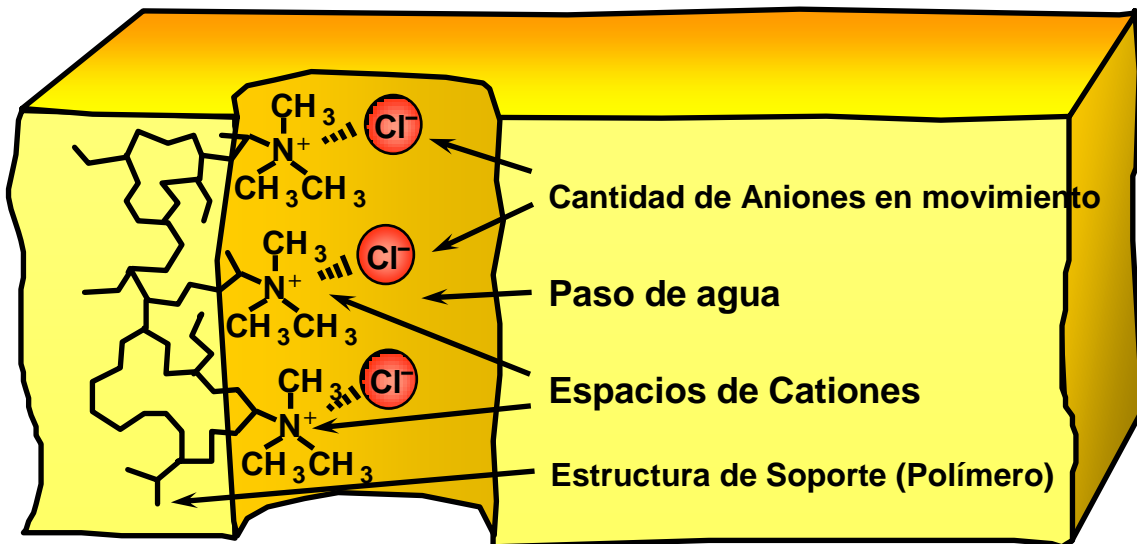


Figura 2. Membrana aniónica



Las membranas aniónicas tienen la misma forma, orificio de colectores y tamaño que la membrana catiónica. Las dos membranas pueden distinguirse visualmente por el color. La membrana catiónica es de color ámbar, mientras que la membrana aniónica tiene color blanquecino.

### 2.7 Espaciadores

Los espaciadores están formados por dos hojas de polietileno de baja densidad, con los orificios que forman los colectores alineados con los colectores de las membranas. El agua entra en un espaciador entre dos membranas por los caminos del flujo que están conectados con los orificios colectores de salida. Existen dos cortes en los orificios del espaciador que canalizan selectivamente el flujo de agua entre las membranas, para formar dos corrientes separadas de concentrado y desmineralizado.

En la Figura 3 se muestran esquemáticamente los espaciadores de flujo de desmineralizado y de concentrado:

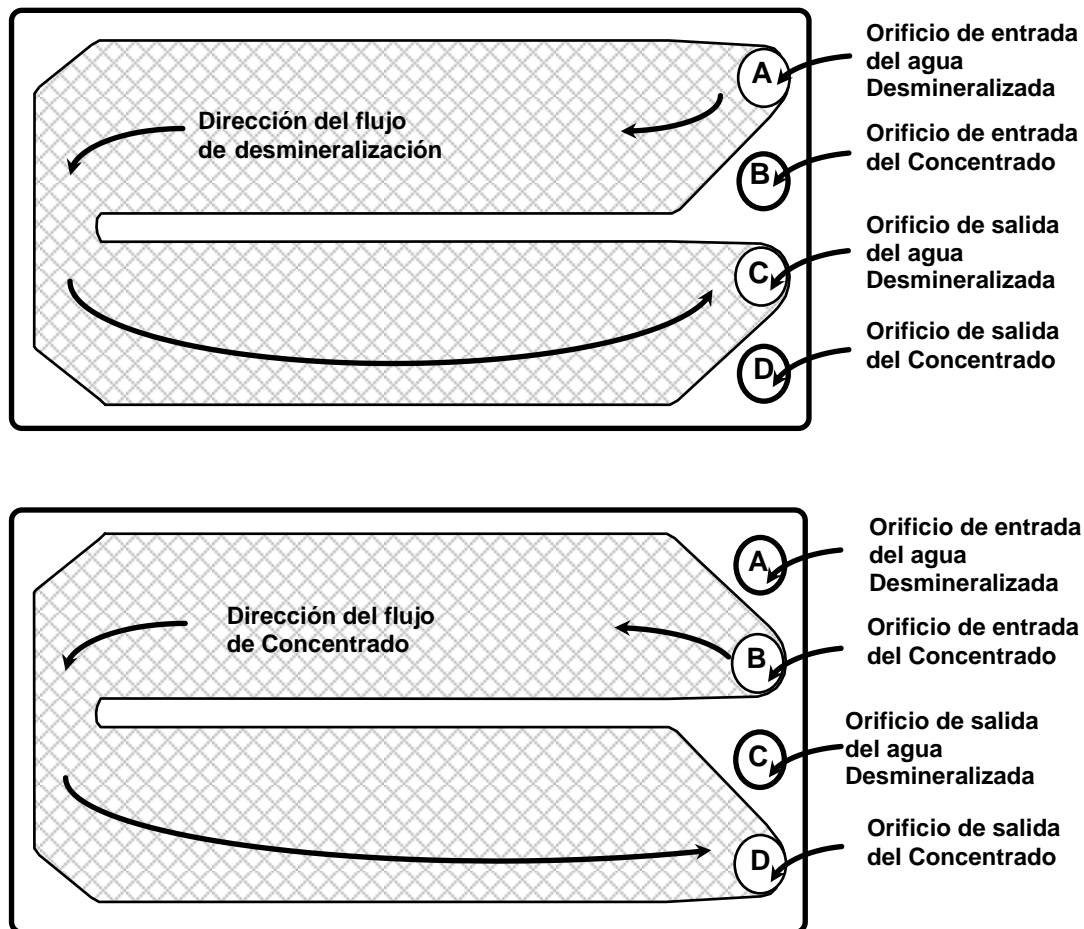
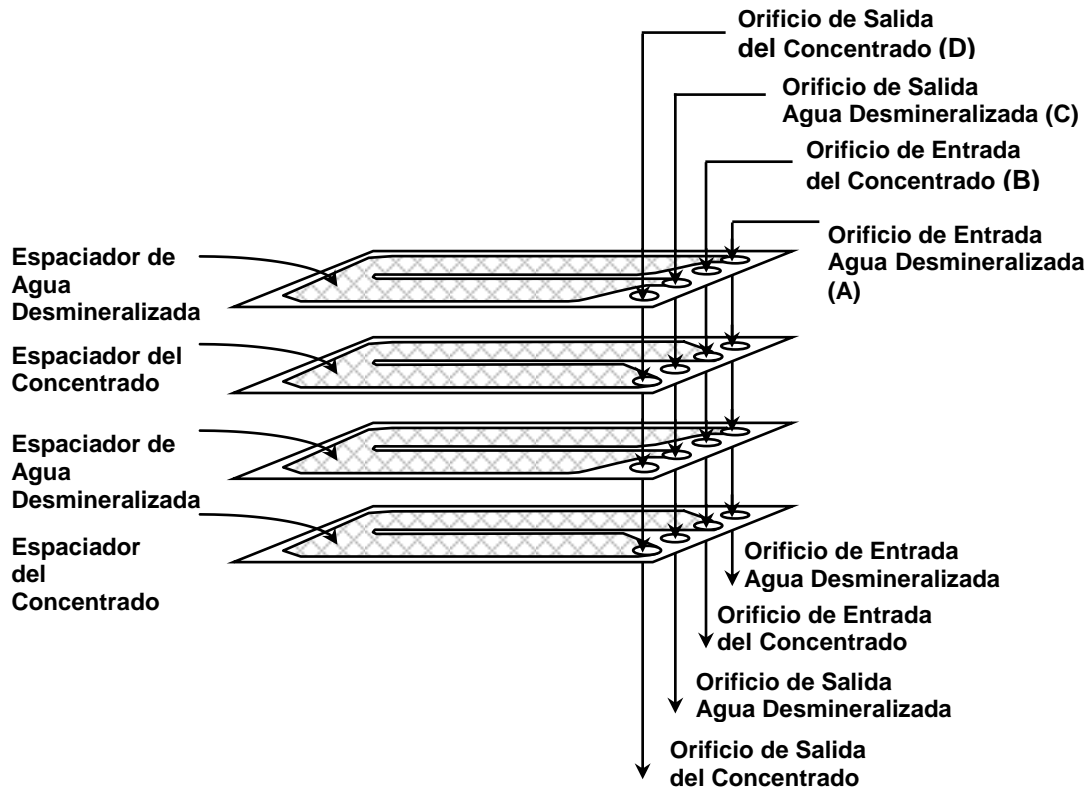


Figura 3. Espaciadores de flujo desmineralizado y concentrado

La disposición de los espaciadores en la pila, se muestra en la Figura 4:



**Figura 4. Disposición de los espaciadores**

El espaciador tiene una disposición de barreras cruzadas, que parecen bloquear el paso del agua, de manera que el flujo solo tiene un camino y se verá forzado a recorrer el espaciador salvando las barreras y efectuando un recorrido ondulante. Este tipo de flujo causa turbulencias en el agua, permitiendo mayor corriente eléctrica por unidad de área, y por tanto, mayor rendimiento del área de la membrana en la pila. La turbulencia creada en el flujo por las barreras, promueve la mezcla, lo cual ayuda a la transferencia de iones a la superficie de la membrana. La turbulencia disminuye el espesor de la capa límite y reduce las incrustaciones en la superficie de las membranas.

En la Figura 5 se muestra un esquema del flujo a través de la celda elemental:

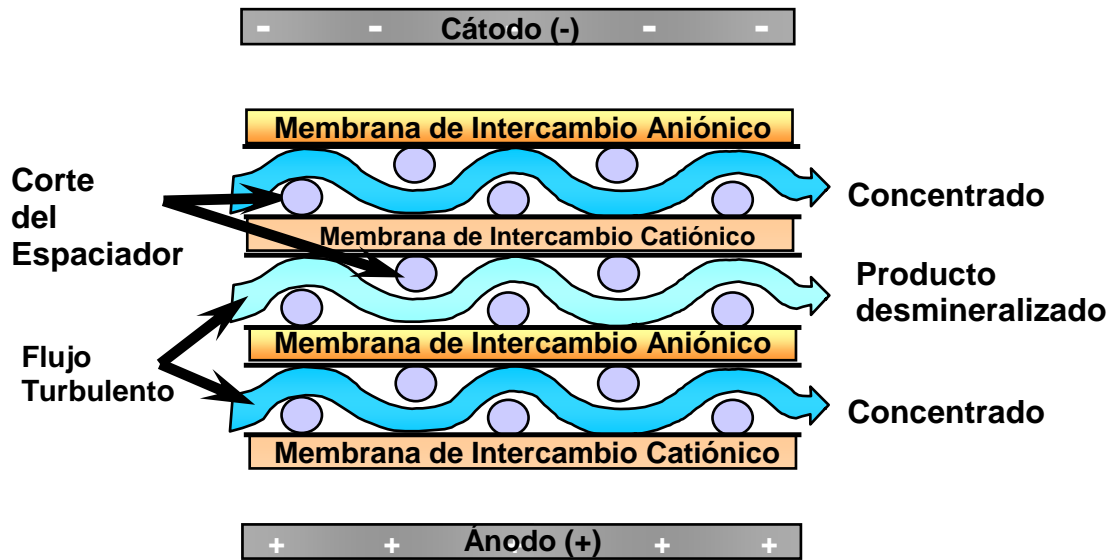


Figura 5. Flujo a través de la celda elemental.

### 2.8 Electrodo

Los electrodos metálicos localizados en los extremos superior e inferior de la pila, son usados para conducir la corriente continua. Los electrodos son normalmente de titanio recubierto de platino.

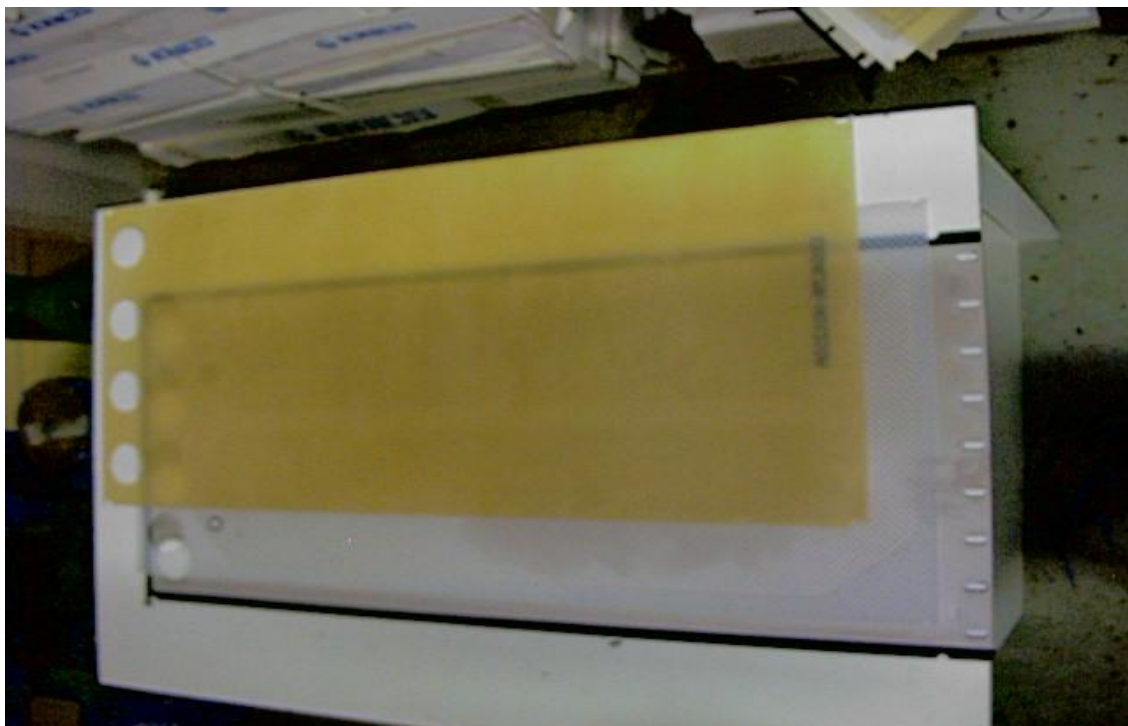
Las áreas oscuras del electrodo representan áreas aisladas que evitan cortocircuitos entre los electrodos a través de los colectores e inhiben el ataque del hidrógeno que podría tener lugar en los bordes de los orificios del espaciador. El aislamiento alrededor de los colectores y conducciones del flujo del electrodo es de un compuesto similar a la goma, y el aislamiento de los colectores bloqueados es de material no conductor.

En la Figura 6 se muestra la placa metálica que conforma el electrodo:



**Figura 6. Detalle del Electrodo (por cortesía de Heineken España S.A)**

Junto al electrodo se coloca un espaciador y una membrana catiónica gruesa, tal y como se muestra en la Figura 7:

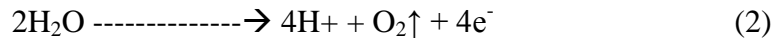


**Figura 7. Electrodo, espaciador y membrana catiónica gruesa (por cortesía de Heineken España S.A)**

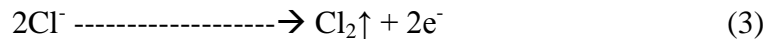
En el cátodo ocurre una reacción de disociación del agua, relacionada con la ganancia de electrones (reducción)



En el ánodo ocurre una reacción de disociación del agua, relacionada con la pérdida de electrones (oxidación)



En el ánodo también puede ocurrir una reacción de formación de gas cloro.



La vida de un electrodo depende generalmente de la composición iónica del flujo por electrodo y del amperaje transportado por unidad de área del electrodo. En general, altos amperajes y agua con contenido elevado de cloruros o alta tendencia incrustante, tenderán a acortar la vida del electrodo.

Un compartimiento de electrodo está formado por un electrodo, un espaciador de flujo de electrodo y una membrana catiónica gruesa.

El espaciador de electrodo tiene seis hojas frente a uno normal que tiene dos. Esto le da un espesor de alrededor 3mm y capacidad de pasar un gran caudal de agua por su interior, reduciendo incrustaciones y desgastes en el electrodo. La membrana catiónica gruesa se usa para compensar la ligera presión diferencial entre el compartimiento de electrodo (aprox. 0,15 Kg/cm<sup>2</sup>) y el flujo principal de la pila.

El espaciador de electrodo tiene canales preformados que evitan que el agua del compartimiento de electrodos entre en los flujos principales de la pila.

El afluente del compartimiento del ánodo (electrodo positivo), contiene oxígeno gas (O<sub>2</sub>), iones hidrogeno (H<sup>+</sup>), y en el caso de aguas que contengan cloro, gas cloro (Cl<sub>2</sub>). Los iones de hidrógeno reducen el pH del agua en este compartimiento, creando una atmósfera ácida. El afluente del cátodo (electrodo negativo), contiene hidrógeno gas

(H<sub>2</sub>), e iones hidroxilo (OH<sup>-</sup>). Estos iones OH<sup>-</sup>, aumentan el pH del agua en este compartimiento, creando una atmósfera incrustante o alcalina.

Después de salir de la pila, los dos flujos de electrodos son enviados a un separador de gas para eliminar y sacar al exterior, de un modo seguro, los gases producidos en la reacción de los electrodos.

### 2.9 Celda de ED

La celda de ED es una repetición de membranas aniónicas y catiónicas. Los espacios entre membranas representan los caminos de los flujos concentrados y desmineralizados respectivamente. Estos espaciadores están hechos de polietileno de baja densidad y están dispuestos en la pila de tal modo que todos los flujos desmineralizados están conectados juntos y todos los flujos de concentrado están interconectados.

Para comprender mejor este proceso, es importante conocer el efecto de la corriente continua (C.C) sobre una disolución iónica. Cuando se aplica un potencial de C.C en los electrodos en una disolución de NaCl (electrolito), ocurre lo siguiente:

- Los cationes (Na<sup>+</sup>) son atraídos hacia el electrodo negativo llamado cátodo.
- Los aniones (Cl<sup>-</sup>) son atraídos hacia el electrodo positivo llamado ánodo.

En la Figura 8 se representa cómo se comporta una disolución iónica con el efecto de una corriente continua.

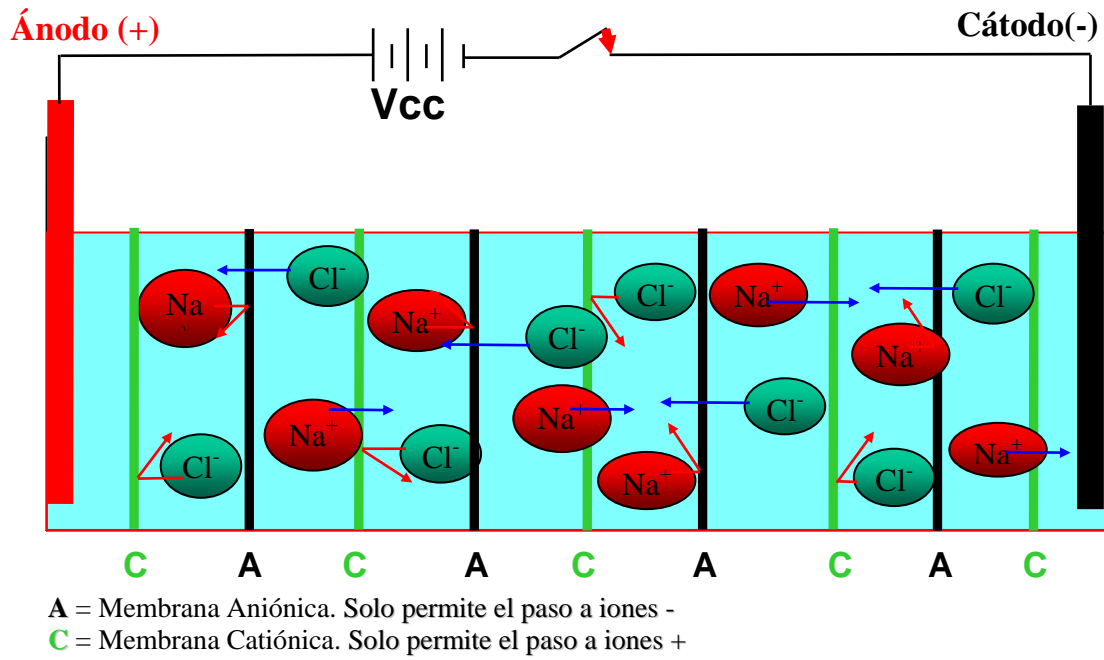


Figura 8. Comportamiento disolución iónica con el efecto de C.C

La corriente de agua entra en la pila y fluye en paralelo, solo por los compartimentos de desmineralización, mientras que la otra corriente, entra en la pila de membranas y fluye en paralelo solo a través de los compartimentos de concentración. A continuación se muestran (Figura 9) los flujos a través de una pila de membranas.

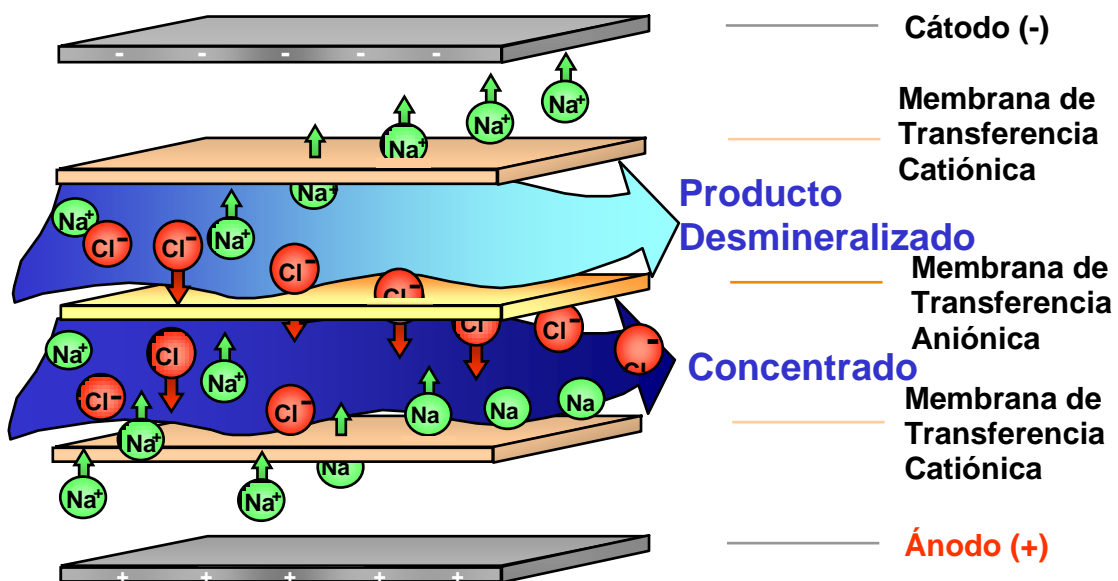


Figura 9. Flujos a través de las membranas

Debe advertirse que los flujos de agua fluyen entre las membranas y no por ellas. Cuando los flujos de agua pasan entre las membranas, los iones son eléctricamente transferidos a través de las membranas, desde la corriente desmineralizada a la concentrada bajo la influencia del potencial de C.C.

Las placas superior e inferior son de acero, y se usan con tirantes para comprimir la pila entera, sellando de este modo las membranas y los espaciadores para proveer caminos de concentrado y desmineralizado y evitar fugas laterales de agua en las pilas.

### 2.10 EDR

Los sistemas de electrodiálisis reversible (EDR) están diseñados para producir agua desmineralizada sin adición constante de productos químicos durante la operación normal. El sistema E.D.R utiliza la inversión de polaridad eléctrica para controlar continuamente las incrustaciones y la suciedad de las membranas, de manera que en estos sistemas la polaridad de los electrodos se invierte 3 o 4 veces cada hora.

El cambio de polaridad invierte la dirección del movimiento de iones dentro de la pila de membranas, controlando de este modo la formación de la película de suciedad y la formación de incrustaciones. Con la inversión de polaridad se consigue que los flujos que anteriormente ocupaban compartimentos desmineralizados, se conviertan en flujos concentrados y los que anteriormente ocupaban los compartimentos de concentrado, ahora llegan a ser desmineralizados. El efecto de esta inversión crea un breve periodo de tiempo en el cual la salinidad del flujo de desmineralizado (agua producto) es mayor que el nivel especificado. Esta cantidad de agua de salinidad superior a la deseada se llama producto fuera de normas (*Off-Spec*).



### *2.11 Limpieza de membranas y electrodos*

El proceso de limpieza química de los electrodos es una rutina de mantenimiento preventivo usado para eliminar las incrustaciones o ensuciamiento del compartimento de los electrodos mediante inyección de ácido en los mismos.

La limpieza y enjuague de membranas y del bastidor hidráulico de posibles incrustaciones o contaminantes, normalmente se realiza con carácter mensual o cuando sea necesario en caso de problemas. Dependiendo el tipo de contaminación se utilizarán disoluciones de HCl y/o NaCl.

Durante el proceso de limpieza de la unidad se suspende la operación normal. La disolución química de limpieza se bombea al interior del sistema desde el tanque de limpieza química con la ayuda de la bomba de salmuera.

El caudal de limpieza fluye a través de la línea de alimentación de salmuera comunicándose los flujos de diluido y concentrado, tanto de entrada como de salida, y estableciéndose un circuito cerrado.

#### *2.11.1 Limpieza con ácido*

Se recomienda una limpieza con ácido periódicamente en todas las unidades. La concentración de ácido a recircular por el sistema debe ser del 5 % aproximadamente. La frecuencia recomendada de limpieza varía entre las 200 a las 2000 horas. En concreto en la planta de Heineken Valencia, se realiza a las 300 horas, aunque actualmente se realizará con más frecuencia por la subida del *Set Point* de salmuera.

El ácido clorhídrico elimina las incrustaciones de carbonato cálcico y dióxido de carbono. El ácido clorhídrico elimina el sulfato cálcico y el estroncio mejorando su solubilidad. Cuando se sospecha de la existencia de graves incrustaciones de sulfato, se recomienda dejar a la unidad con la disolución ácida en su interior durante toda la noche para conseguir su máxima efectividad. El ácido clorhídrico también ayuda a eliminar los iones de hierro, aluminio, manganeso y otros metales pesados. También ayuda a eliminar depósitos de suciedades ligeras de la superficie de la membrana y polielectrolitos aniónicos y antiincrustantes.

### 2.11.2 Limpieza con cloruro sódico

La utilidad de la disolución salina es eliminar los contaminantes orgánicos de las membranas de intercambio iónico. Este tipo de tratamiento se realiza usualmente en unidades que tratan agua procedente de ríos, lagos, fuentes o de tratamientos biológicos de depuradoras urbanas, que contienen carga orgánica. Normalmente una limpieza básica debe ir acompañada posteriormente de una limpieza ácida.

### 2.12 Descripción de la planta de electrodiálisis reversible de Heineken



**Figura 10. Planta de electrodiálisis reversible de Heineken (por cortesía de Heineken España S.A)**

El fabricante de los módulos de ED es la empresa IONICS IBÉRICA. La planta tiene una capacidad total de 7.536 m<sup>3</sup>/d, con 1 módulo (A) de 128 m<sup>3</sup> Agua tratada/HI de cerveza producido y con 2 módulos (B y C) de 93 m<sup>3</sup> agua tratada/HI de cerveza producido cada uno.

La planta de tratamiento de aguas está provista de 3 módulos de electrodiálisis reversible, que se denominarán módulos A, B y C. El módulo A consta de 4 líneas de forma que cada línea posee dos pilas que contienen 600 pares de células de la misma forma que en los módulos B y C, pero al tener una línea más, este módulo permitirá

alcanzar mayores valores de producción. Los módulos B y C constan de tres líneas de forma que cada línea posee dos pilas que contienen 600 pares de células cada una.

Previamente a la descripción de la planta de EDR, se realizará un análisis de toda la línea de aguas que recorre la fábrica. En la Figura 11 se recoge la información en un diagrama de bloques de la línea de aguas.

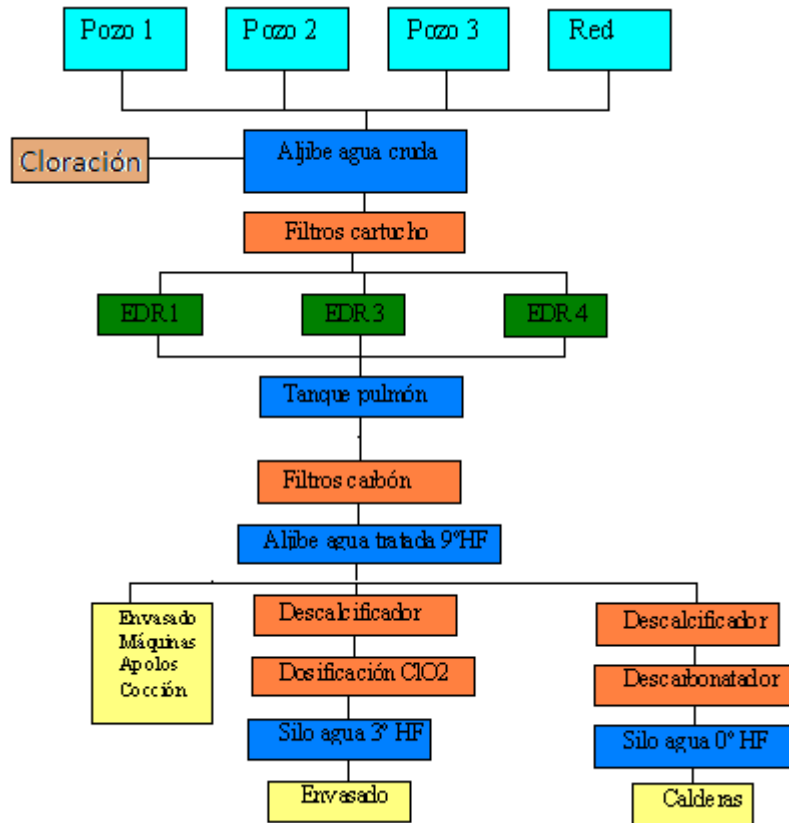


Figura 11. Diagrama de bloques de la línea de aguas

El agua de abastecimiento se obtiene de tres pozos subterráneos (pozo 1, pozo 2 y pozo 3), cada uno de los cuales posee unas características diferentes. El agua de los pozos se bombea hasta un aljibe de agua cruda donde se realiza una mezcla y cloración del agua. Seguidamente, el agua que sale del aljibe lo realiza en función de la demanda. Previamente a la entrada de las pilas de electrodiálisis reversible, el agua pasa por unos de filtros cartucho, para la eliminación de sólidos en suspensión y materia coloidal. A continuación atraviesa las líneas de las pilas de electrodiálisis reversible, y a su salida esta agua desmineralizada pasa a un tanque pulmón donde se almacena un periodo corto de tiempo para posteriormente pasar al aljibe de agua tratada hasta demanda. Cuando

hay demanda de agua ésta sale del aljibe de agua tratada y atraviesa unos filtros de carbón para la eliminación de restos de cloro, trihalometanos, etc.

El agua, una vez atraviesa los filtros de carbón es un agua de 9° HF, de manera que con estas características es apta para la fabricación de la cerveza y para las líneas de envasado, principalmente para los pasteurizadores y para cocción.

La Figura 12 muestra los filtros carbón para obtener el agua de 9° HF.

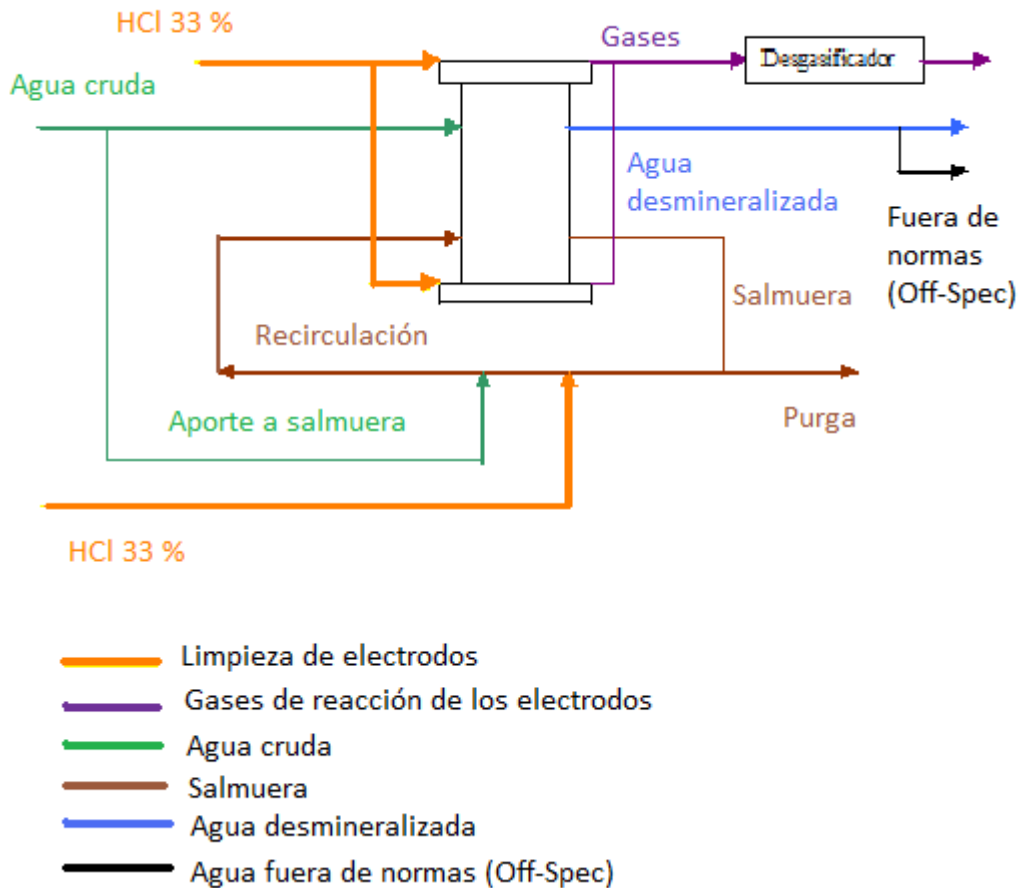


**Figura 12. Filtros carbón (por cortesía de Heineken España S.A)**

Parte del agua del aljibe de agua tratada pasa por un post-tratamiento de descalcificación y desinfección con  $\text{ClO}_2$  para ablandar el agua hasta 3 °HF para su uso en las líneas de envasado en los que se requiere agua más blanda.

Otro punto en fábrica, que también requiere de abastecimiento de agua, son las calderas, que necesitan agua de 0 °HF. Para ello el agua que se capta del aljibe de agua tratada se somete a un tratamiento de descalcificación y posteriormente a un proceso de descarbonatación para la eliminación completa de  $\text{CaCO}_3$ .

Una vez detallada la línea de aguas en fábrica desde su captación hasta sus puntos de consumo, se realizará una descripción más detallada de lo que sucede en la etapa de EDR. En la Figura 13 se presenta un esquema del funcionamiento de los módulos.



**Figura 13. Esquema de las líneas de un módulo de EDR**

Como ya se citó anteriormente, el agua que viene del aljibe pasa en primer lugar por unos filtros de cartucho, y a continuación entra en la pila de EDR. Esta agua fluye sin mezclarse con el flujo de salmuera dando lugar al transporte de iones del flujo de agua cruda al de salmuera gracias a la fuerza impulsora que es la corriente continua que aplican los electrodos. Así, se obtienen dos flujos de salida, el flujo desmineralizado y el flujo de salmuera. El flujo de salmuera es un circuito cerrado que se purga en función del *Set Point* establecido, realizándose un aporte de agua cruda para mantener constante ese *Set Point*.

La adición de ácido, tanto al agua de refrigeración de los electrodos como en el circuito de salmuera, se realizará fundamentalmente para evitar incrustaciones. Al electrodo que se le adiciona el ácido será al cátodo, porque el afluente del cátodo (electrodo negativo), contiene hidrógeno gas ( $H_2$ ), e iones hidroxilos ( $OH^-$ ), y estos iones  $OH^-$  aumentan el pH del agua en este compartimiento, creando una atmósfera incrustante o alcalina.

Tanto la salmuera purgada como el agua fuera de especificaciones y el agua de los electrodos, tras que esta última haya pasado por el desgasificador para que los gases de reacción ( $H_2$ ,  $O_2$  y  $Cl_2$ ) de los electrodos se saquen al exterior, se envían a un foso de pluviales y se mezclan posteriormente con el agua tratada de la EDAR para finalmente verter a final de río, cumpliendo las especificaciones de vertido.

La característica fundamental de la EDR es el cambio de polaridad de la pila. Los circuitos de salmuera y agua se invierten y durante ese periodo de tiempo el agua que se obtiene como agua producto, será agua fuera de especificaciones, además de que esta inversión evita que se generen incrustaciones en el circuito de salmuera y reduce la frecuencia con la que se deben realizar los ciclos de limpieza.

### 2.13 Sistemas de alta recuperación

La recuperación de agua se ha convertido en una consideración importante cuando se diseña y especifica un sistema desalinizador. La recuperación de agua se define como la cantidad de agua producida respecto a la cantidad total de agua usada.

$$\% \text{recuperación} = X = \frac{Q_{\text{aguaproducida}}}{Q_{\text{aguaa limento}}} \times 100 \quad (\text{ec.1})$$

$$Q_{\text{aguaa limento}} = Q_{\text{agua}} + Q_{\text{rechazo}} \quad (\text{ec.2})$$

Se considera agua de rechazo:

- Fugas controladas en las membranas
- Agua fuera de especificaciones.
- Agua de refrigeración de los electrodos
- Agua de aportación al circuito de salmuera

A continuación se describen las tres principales contribuciones al agua rechazo.

### 2.13.1 Fugas controladas

Estas fugas, son fugas asumidas en el diseño de los módulos y que el propio fabricante advierte. Dichas fugas suelen estar en torno a los 7 l/h.

### 2.13.2 Reciclado del producto fuera de normas

Durante la inversión de la unidad de EDR, los flujos de desmineralizado y concentrado se intercambian en la pila de membranas. La salinidad del compartimento originalmente de concentrado cambia su valor de 10.000 ppm al valor del producto de aproximadamente 250 ppm, el tiempo que tardará en alcanzar dicha concentración se denomina periodo “*Off-Spec*”.

En los sistemas de EDR estándar, tanto los flujos de agua como la polaridad de las pilas se invierten simultáneamente. De este modo el perfil de salinidad del agua producto durante este periodo se desecha puesto que su salinidad es mayor que la requerida por las especificaciones.

Sin embargo, retrasando la inversión de las válvulas de salida durante un periodo de tiempo controlado, se puede disminuir el promedio de salinidad del *Off-Spec* a un punto donde, en la mayoría de los casos, es más baja que la salinidad del agua de alimentación, siendo ésta una línea de mejora futura.

El *Off-Spec* puede ser, entonces, enviado nuevamente al sistema de alimentación, no siendo ahora, una fuente de desecho.

### 2.13.3 Agua de refrigeración de los electrodos

Cuando se combinan los flujos del ánodo y el cátodo, se neutralizan químicamente el uno al otro con un pH y salinidad resultante aproximadamente igual que la del agua de alimentación. Los gases que portan estos flujos combinados son sacados al exterior, después de lo cual el líquido es enviado normalmente al deshecho. Sin embargo, puesto que este líquido es esencialmente el mismo que el de alimentación, puede retornar al

tanque de alimentación, junto al Off-Spec y así incrementar la recuperación del sistema, mientras que se reduce la cantidad total de agua de desecho. En grandes sistemas, el flujo de electrodos representa una cantidad relativamente pequeña de la cantidad total de agua que está siendo tratada. Sin embargo, en sistemas más pequeños, el flujo de electrodos puede representar una parte significativa del agua tratada.

En los módulos de EDR de Heineken el flujo de agua de refrigeración a los electrodos representa una cantidad pequeña del orden de 1 m<sup>3</sup>/h.

#### *2.13.4 Reciclado del concentrado*

Entre todas las fuentes que constituyen el agua de rechazo, se actuará sobre el volumen de agua de aportación al circuito de salmuera, ya que actuar sobre otros componentes o no es viable o supone un mayor coste económico.

La modificación a realizar consistirá fundamentalmente en reducir el volumen de aportación de agua cruda al circuito de salmuera, aumentando la conductividad del concentrado. Para aumentar la conductividad se realiza un estudio de las posibilidades de que la salmuera pueda funcionar a mayores concentraciones sin dañar las membranas.

La única desventaja que presenta este sistema es que habrá que realizar ciclos de limpieza más frecuentemente para eliminar posibles incrustaciones en la superficie de las membranas.

Para llevar a cabo esta medida lo que se hará en primer lugar es modificar en los lazos de control el caudal de recirculación, de manera que al disminuir su valor se trabaja a mayores concentraciones, de manera que el volumen de aportación de agua cruda al circuito de salmuera será menor, de forma que se reduce el porcentaje de agua de rechazo.



### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 Toma de datos del proceso

Diariamente se realiza una toma de datos de proceso a través del programa de control y de la instrumentación instalada. Los principales parámetros de proceso medidos son la presión de entrada y salida de las pilas ( $\text{Kg/cm}^2$ ), presión en los electrodos ( $\text{Kg/cm}^2$ ), presión de entrada y salida del filtro ( $\text{Kg/cm}^2$ ), la presión de la bomba de alimentación ( $\text{Kg/cm}^2$ ), el caudal de aportación a la salmuera ( $\text{m}^3/\text{h}$ ), la presión diferencial ( $\text{cmH}_2\text{O}$ ) y el caudal de agua de alimentación ( $\text{m}^3/\text{h}$ ).

#### 3.2 Toma de muestras

La toma de muestras se realiza bajo el cuadro de control, donde se puede tomar una muestra de alimentación (M1), de la salmuera de entrada (M2), y de agua producto (M3). Se recoge aproximadamente 1 litro de cada una de estas corrientes, para ser posteriormente analizadas.

Otros datos de proceso de interés son la presión de entrada ( $P_e$ ), la presión de salida ( $P_s$ ), la presión de alimentación ( $P_a$ ) y el caudal de aportación al circuito de salmuera ( $Q_a$ ), tal y como se muestran en la Figura 14.

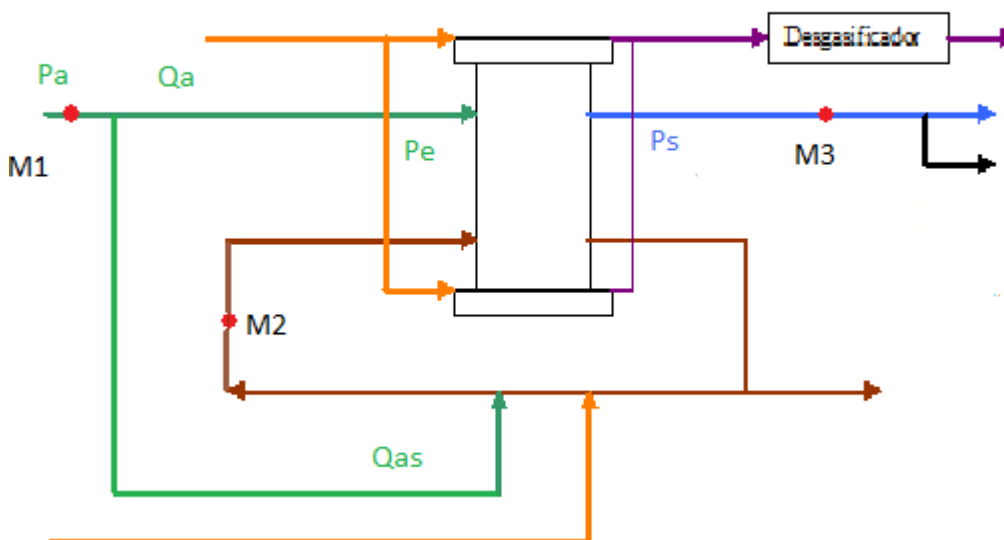


Figura 14. Datos de proceso y puntos de toma de muestras

### 3.3 Métodos analíticos de caracterización de las muestras

A continuación se describen los materiales y métodos que se utilizan diariamente para la caracterización del agua producto, salmuera de salida y alimento de las pilas.

En todos los casos se trata de métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales (*American Public Health Association and American Water Works Association*).

#### 3.3.1 Dureza Temporal

Los valores de la dureza temporal indican el contenido de hidróxidos, carbonatos o bicarbonatos alcalinos o alcalinotérreos en el agua.

La medida de la dureza temporal se efectúa con una valoración ácido-base, en presencia de naranja de metilo (viraje a pH 4,3), con lo que se valoran los bicarbonatos y la mitad de los carbonatos.

Material y reactivos:

- Frasco Erlenmeyer de 250 ml
- Probeta de 100 ml
- Bureta de 25 ml, con precisión de  $\pm 0,03$  ml
- Pipetas aforadas
- Ácido clorhídrico 0,1N
- Naranja de metilo al 0,1 %

Procedimiento:

Se toman 100 cc del agua problema y se le añaden 3 gotas de naranja de metilo a la muestra, seguidamente se valora con ácido clorhídrico hasta viraje de color amarillo a color rosado, anotándose el volumen de ácido gastado.

Cálculos

$$\text{Dureza total (mg/l CaCO}_3\text{)} = V_{\text{Ácido}} \cdot 50 \quad (\text{ec.3})$$

### 3.3.2 Dureza Total

Análisis por el método complexométrico que consiste en medir el contenido de sales cálcicas y magnésicas totales que el agua posee.

Material y reactivos:

- Bureta de 25 ml con precisión  $\pm 0,03$  ml
- Frasco Erlenmeyer de 250 cc.
- Probeta de 100 cc.
- Disolución complexón-Mg
- Disolución EDTA 0,01 M
- Disolución indicadora de Negro de Eriocromo
- Disolución tampón pH 10

Procedimiento:

Se toman 100 cc del agua problema, se le añaden 2 cc de disolución tampón, 1 cc de disolución complexon-Mg y 3 o 4 gotas de disolución indicadora de Negro de Eriocromo.

Se valora con la disolución EDTA hasta que el color varíe de rosa-rojizo inicial a azul.

Cálculos:

$$\text{Dureza total (}^{\circ}\text{HF)} = V_{\text{EDTA}} \cdot 10 \quad (\text{ec.4})$$

$^{\circ}\text{HF}$  = Grados franceses (mg  $\text{CaCO}_3$ /litro)

$V_{\text{EDTA}}$  = Volumen consumido de EDTA en la valoración (cc)

### 3.3.3 Calcio

Material y reactivos:

- Frasco Erlenmeyer de 250 ml
- Probeta de 100 ml
- Bureta de 25 ml, con precisión de  $\pm 0,03$  ml
- Pipetas aforadas
- Disolución de KOH 1 N

- Disolución EDTA 0,01 N
- Indicador Murexida

Procedimiento:

Se toman 100 cc del agua problema y se le añaden 3 cc de KOH, y una pequeña cantidad de Murexida en polvo. A continuación se valora con EDTA hasta que el color varíe de color rojizo oscuro inicial a un magenta brillante.

Cálculos:

$$\text{ppm de Ca}^{++} = V_{\text{EDTA}} \cdot 4 \quad (\text{ec.5})$$

$V_{\text{EDTA}}$  = Volumen consumido de EDTA en la valoración (cc)

### 3.3.4 Magnesio

El contenido en magnesio se obtendrá realizando los siguientes cálculos:

$$\text{ppm de Mg}^{++} = [(V_{\text{EDTA}})_{\text{dureza total}} - (V_{\text{EDTA}})_{\text{Ca}}] \cdot 2,4 \quad (\text{ec.6})$$

$(V_{\text{EDTA}})_{\text{dureza total}}$  = Volumen consumido de EDTA en determinar dureza total

$(V_{\text{EDTA}})_{\text{Ca}}$  = Volumen consumido de EDTA en determinar contenido en calcio

### 3.3.5 Sulfatos

El contenido de sulfatos se realiza mediante espectrofotometría. Al añadir el reactivo, se produce un enturbiamiento si los sulfatos están presentes, y este enturbiamiento es proporcional a la cantidad de sulfatos presentes, medida después por un método turbidimétrico.

Materiales y reactivos:

- Equipo de análisis de espectrofotometría HACH, modelo 2000
- Cubetas de cristal de 25 ml de capacidad con tapón de goma
- Reactivo Sulfaver-4

### 3.3.6 Nitratos

Se basa en la utilización de reactivos especiales y preparados, produciendo reacciones coloreadas específicas que son medidas después por un método calorimétrico.

Materiales y reactivos:

- Equipo de análisis HACH, modelo 2000
- Cubetas de cristal de 25 ml de capacidad con tapón de goma
- Reactivo NITRAVER

### 3.3.7 Cloruros

Materiales y reactivos:

- Frasco Erlenmeyer de 250 ml
- Probeta de 100 ml
- Bureta de 25 ml, con precisión de  $\pm 0,03$  ml
- Pipetas aforadas
- Disolución de  $\text{AgNO}_3$  0,1 N
- Disolución de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  al 10 %

Procedimiento:

Se toman 100 cc del agua problema y se le añade 1 ml de disolución de  $\text{K}_2\text{CrO}_4$  al 10 %, el agua adquiere un color amarillo. A continuación se valora con  $\text{AgNO}_3$  0,1 N, gota a gota, con la bureta, agitando el frasco hasta que el color amarillo pase a rojizo.

Cálculos:

$$\text{mg/ml de Cl}^- = V_{\text{AgNO}_3} \cdot 35,5 \quad (\text{ec.7})$$

$V_{\text{AgNO}_3}$  = Volumen consumido de  $\text{AgNO}_3$  para determinar cloruros

### 3.3.8 Conductividad

Mediante un conductímetro se mide la conductividad de las tres muestras. Se medirá de menor a mayor concentración de sales para evitar contaminaciones cruzadas entre las muestras, y teniendo la precaución de enjuagar con agua desionizada el recipiente donde se colocará la muestra.

En la Figura 15 se muestra una imagen del equipo para medir la conductividad



**Figura 15. Conductímetro**

### 3.3.9 pH

Con un medidor de pH, se medirá el pH de las tres muestras. Y también se medirán de menor a mayor concentración para evitar contaminaciones cruzadas.

En la Figura 16 se muestra el equipo de medir pH.



**Figura 16. Medidor de pH**

### 3.4 Seguridad y salud

El principio de protección de los trabajadores respecto de enfermedades y accidentes en el trabajo es un punto fundamental a tener en cuenta en cualquier tipo de actividad empresarial.

En este punto se plasmarán los riesgos asociados al puesto de trabajo donde se ha desarrollado dicho proyecto, y las medidas de seguridad que se tienen que asumir según la Ley 31/1995, de 8 de Noviembre, de Prevención de Riesgos Laborales [4].

Se realiza un análisis de los principales focos de peligro que tiene el puesto de trabajo, tanto en cuanto a las instalaciones que rodean el puesto de trabajo, como los peligros asociados a las funciones que se desempeñan.

Uno de los peligros es la manipulación de reactivos químicos durante la realización de los análisis. Los principales reactivos que se utilizan son ácido clorhídrico 0,1 N [5], hidróxido sódico 1 N [6], EDTA 0,01 N [7], nitrato de plata 0,1 N [8] y cromato potásico al 10% [9].

Se utilizarán los siguientes equipos de protección individual (EPI); gafas de protección visual y guantes, y en cuanto a medidas colectivas, se utilizarán campanas de ventilación.

Y además se cuenta con otros elementos de seguridad en la planta, como son extintores y duchas de seguridad como se muestra en la Figura 17.










**Figura 17. Extintor y ducha de seguridad (por cortesía de Heineken España S.A)**




En la Tabla 2 se recogen los principales riesgos identificados y las medidas preventivas adoptadas durante la realización del presente Trabajo Final de Máster.



Tabla 2. Riesgos y medidas

Reactivo	Función	Factor de riesgo	Consecuencias	Medidas preventivas
HCl Fecha de revisión por Panreac (15/01/2011) CAS [7647-01-0]	Determinación de la dureza temporal mediante una reacción de ácido-base	-Corrosivo  - Irritante   	Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves (H314)  Puede irritar las vías respiratorias (H335)	-No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol (P260)  -Lavarse concienzudamente tras la manipulación (P264)  -Utilizar en un lugar bien ventilado (P271)  -Llevar guantes, prendas, gafas, mascarara de protección (P280)
NaOH Fecha de revisión por Panreac (15/01/2011) CAS [1310-58-3]	Determinación de la cantidad de Calcio mediante reacción ácido-base.	-Corrosivo  	Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves (H314)	No respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol (P260)  Lavarse tras la manipulación (P264)  Llevar guantes, prendas, gafas, mascarara de protección (P280)

Reactivo	Función	Factor de riesgo	Consecuencias	Medidas preventivas
<b>EDTA</b> Fecha de revisión por Panreac (15/09/2011) CAS [60-00-4]	Determinación de calcio y magnesio.	-Irritante 	- Provoca irritación ocular grave (H319)	-Lavarse concienzudamente tras la manipulación (P264) -Llevar guantes, prendas, gafas, máscara de protección (P280)
<b>AgNO<sub>3</sub></b> Fecha de revisión por Panreac (15/09/2011) CAS [7761-88-8]	Determinación de cloruros	-Comburente  -Corrosivo  -Peligroso para el medio ambiente 	-Puede agravar un incendio. Comburente (H272) -Provoca quemaduras graves en la piel y lesiones oculares graves (H314) -Muy tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos (H410)	-Mantener alejado de fuentes de calor, chispas, llama abierta o superficies calientes. No fumar (P210) -Mantener o almacenar alejado de la ropa/materiales combustibles (P220) -Lavarse concienzudamente tras la manipulación (P264) -Llevar guantes, prendas, gafas, máscara de protección (P280)

Reactivo	Función	Factor de riesgo	Consecuencias	Medidas preventivas
<p><b>K<sub>2</sub>CrO<sub>4</sub></b>                      Fecha de revisión por Panreac (15/09/2011)                      CAS [7789-00-6]</p>	<p>Determinación de cloruros</p>	<p>-Carcinogénico</p>  <p>-Tóxico</p>  <p>-Peligroso para el medio ambiente</p> 	<p>-Puede provocar cáncer por inhalación (H350i)                      -Puede provocar defectos genéticos (H340)                      -Puede provocar una reacción alérgica en la piel (H317)                      -Tóxico para los organismos acuáticos, con efectos nocivos duraderos (H411)</p>	<p>-Evitar respirar el polvo/el humo/el gas/la niebla/los vapores/el aerosol (P261)                      -Pedir instrucciones especiales antes de uso (P201)                      -No manipular la sustancia antes de haber leído y comprendido todas las instrucciones de seguridad (P202)                      -Llevar guantes/prendas/gafas /máscara de protección (P280)</p>

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

##### 4.1 Histórico del funcionamiento de los módulos y gráficas de seguimiento

Para una correcta justificación del por qué de la optimización de los módulos de la planta de electrodiálisis reversible, se realizará previamente un estudio de la planta de EDR de Heineken en cuanto a rendimientos, que se definen como la relación entre el caudal de agua producto y el caudal de agua alimento, porcentajes de rechazo de agua y consumo energético, de manera que se justificarán las posteriores acciones de optimización de la planta, ya que a través de la implementación de un sistema de alta recuperación se pueden alcanzar mayores rendimientos en la planta.

Para ello se caracterizará el agua de entrada a los módulos, el agua producto y la salmuera con los métodos citados en el punto 3.3. Y se realizará un estudio en cuanto a los parámetros de funcionamiento de la planta.

##### 4.1.1 Caracterización del agua

En la Tabla 3 se muestran las características del agua de entrada a las pilas en el año 2011, donde fundamentalmente se observa que está compuesta por iones bicarbonato, iones calcio e iones magnesio.

**Tabla 3. Características del agua alimento en el año 2011**

Parámetros	Valores
<b>Dureza Total (mg/l)</b>	385 ± 10
<b>Calcio (mg/l)</b>	100 ± 5
<b>Magnesio (mg/l)</b>	31 ± 5
<b>Cloruros (mg/l)</b>	80 ± 10
<b>Nitratos (mg/l)</b>	50 ± 5
<b>Sulfatos (mg/l)</b>	100 ± 10
<b>Dureza Temporal (mg/l)</b>	260 ± 5
<b>pH</b>	7,3 ± 0,5
<b>Cloro libre (mg/l)</b>	0,12 ± 0,01

Las características del agua producto de cada uno de los módulos se corresponden con los resultados de la Tabla 4:

**Tabla 4. Características del agua producto para cada módulo en el año 2011.**

Parámetros	Módulo A	Módulo B	Módulo C
<b>Dureza Total (mg/l)</b>	74	88	76
<b>Calcio (mg/l)</b>	20	22	20
<b>Magnesio (mg/l)</b>	5,7	7,9	6,2
<b>Cloruros (mg/l)</b>	31,9	24,8	24,9
<b>Nitratos (mg/l)</b>	16,2	14,9	13,6
<b>Sulfatos (mg/l)</b>	7	15	9
<b>Dureza Temporal (mg/l)</b>	100	100	100
<b>pH</b>	6,8	6,8	6,8
<b>Cloro libre (mg/l)</b>	0,1	0,05	0,1

Observando los resultados de los parámetros característicos del agua producto, se aprecia que las características del agua de salida son muy similares entre los módulos A y C. Sin embargo, el módulo B presenta una ligera desviación, dando valores ligeramente superiores. Esto es debido a una fuga cruzada que se localizó en una válvula diversificadora a la salida de una de las pilas. Las consecuencias son pequeñas fugas entre el circuito de diluido y concentrado, de manera que se alteran ligeramente las características del agua producto. A pesar de este inconveniente, el agua producto sigue cumpliendo las especificaciones. Además, hay que tener en cuenta que este módulo, al igual que el módulo C, suelen trabajar de apoyo con el módulo A. Esto es debido a que el módulo A trabaja mejor energéticamente, es decir, es más eficiente desde el punto de vista energético, ya que dispone de mayor número de pilas y tiene una única bomba para la impulsión de fluidos.

El Real Decreto 140/2003, establece que un agua de consumo humano será salubre y limpia cuando no contenga ningún tipo de microorganismo, parásito o sustancia, en una cantidad o concentración que pueda suponer un riesgo para la salud humana, y cumpla con los requisitos especificados en la Tabla 5.

**Tabla 5. Especificaciones RD 140/2003**

Parámetros	Unidades	R.D./ 140/2003	Parámetros	Unidades	R.D./ 140/2003
<b>Color</b>	mg/l Pt/Co	15	<b>Sulfatos</b>	mg/l	250
<b>Olor</b>	I.D.	3	<b>Nitratos</b>	mg/l	50
<b>Sabor</b>	I.D.	3	<b>Nitritos</b>	mg/l	0.1
<b>Turbidez</b>	UNF	5	<b>Amonio</b>	mg/l	0.5
<b>Cloro residual</b>	micro S/cm	1	<b>Flúor</b>	mg/l	1.5
<b>Conductividad</b>	Uds.pH	2.500	<b>Sodio</b>	mg/l	200
<b>pH</b>	mg/l	6.5 - 9.5	<b>Potasio</b>	mg/l	-
<b>Calcio</b>	mg/l	-	<b>Aluminio</b>	mg/l	0.20
<b>Magnesio</b>	mg/ l CO <sub>3</sub> CA	-	<b>Trihalometanos</b>	mg/l	0.15
<b>Dureza total</b>	mg/l	-	<b>Bacterias coliformes</b>	UFC/ 100 ml	0
<b>Carbonatos</b>	mg/l	-	<b>Escherichia coli</b>	UFC/ 100 ml	0
<b>Bicarbonatos</b>	mg/l	-	<b>Enterococos</b>	UFC/ 100 ml	0
<b>Cloruros</b>	mg/l	250	<b>Clostridios Perfringens</b>	UFC/100 ml	0

La mezcla de las aguas producto de los 3 módulos de EDR donde se observa, que se cumplen las especificaciones requeridas, y presenta las características que se recogen en la Tabla 6:

**Tabla 6. Características agua producto final en el año 2011**

<b>Parámetros</b>	<b>Agua producto</b>
<b>Dureza Total (mg/l)</b>	79,9
<b>Calcio (mg/l)</b>	20,7
<b>Magnesio (mg/l)</b>	6,6
<b>Cloruros (mg/l)</b>	27,2
<b>Nitratos (mg/l)</b>	14,9
<b>Sulfatos (mg/l)</b>	10,3
<b>Dureza Temporal (mg/l)</b>	100
<b>pH</b>	6,8
<b>Cloro libre (mg/l)</b>	0,8

A continuación se muestran las analíticas promedio realizadas a la salmuera para cada uno de los módulos en la Tabla 8, sus características dependerán de los parámetros prefijados en la Tabla 7, para el funcionamiento de cada modulo.

**Tabla 7. Parámetros prefijados para la salmuera en cada módulo año 2011.**

<b>MÓDULO</b>	<b>Set Point CONDUCTIVIDAD (µs/cm)</b>
A	4600
B	4600
C	4600

Tabla 8. Analíticas salmuera de salida de cada módulo año 2011.

Parámetros	Módulo A	Módulo B	Módulo C
Dureza Total (mg/l)	2500	2000	2000
Calcio (mg/l)	676	612	588
Magnesio (mg/l)	40	55	50
Cloruros (mg/l)	600	570	540
Nitratos (mg/l)	400	388	330
Sulfatos (mg/l)	1010	960	925
Dureza Temporal (mg/l)	910	800	1040
pH	6,8	6,8	6,9
Cloro libre (mg/l)	0,22	0,24	0,12
Índice de Langelier	0,99	0,93	0,93

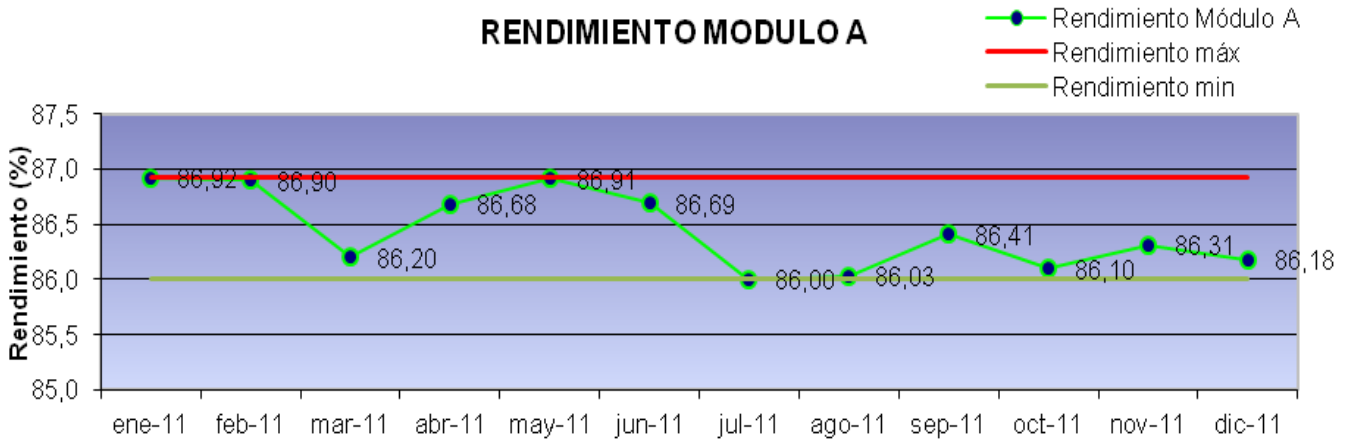
#### 4.1.2 Análisis de rendimientos y porcentajes de agua de rechazo de cada módulo

A continuación se realiza un análisis de los rendimientos y el porcentaje de agua de rechazo, para cada uno de los módulos en el año 2011, y un promedio total del conjunto de los tres módulos para obtener el rendimiento total de la planta de tratamiento de aguas.

Se considera agua de rechazo, el agua que se emplea en aportación al circuito de salmuera, el agua de los electrodos para refrigeración, las fugas controladas en la pila de membranas y el agua fuera de especificaciones que se genera durante los primeros instantes del cambio de polaridad de la pila. Sin embargo el porcentaje que se refleja en el siguiente análisis tan solo contempla el agua de aportación al circuito de salmuera, ya que ésta va a ser la variable de proceso a optimizar.

En la Figura 18 se observa el rendimiento del módulo A durante el año 2011:



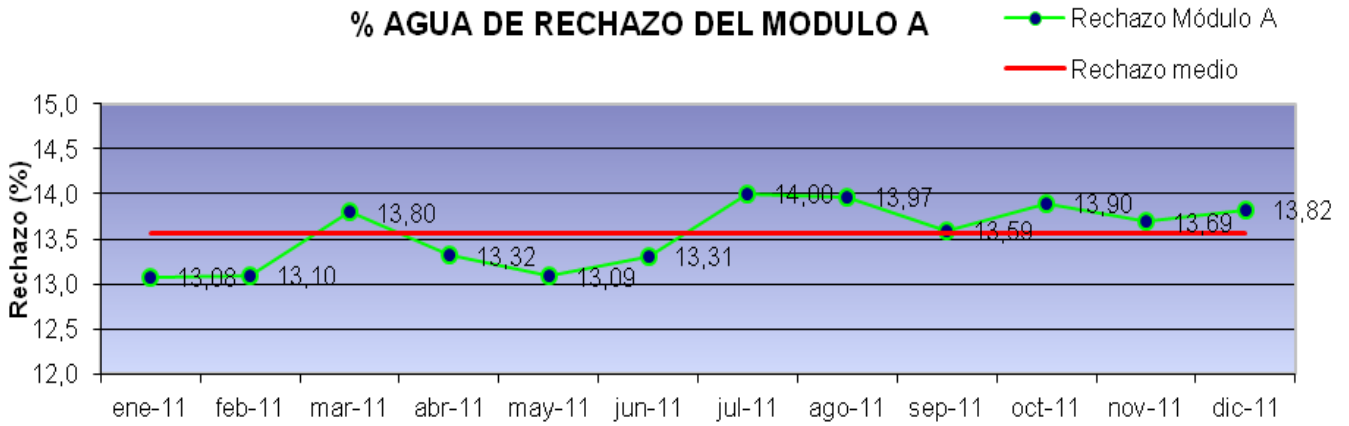


**Figura 18. Rendimiento módulo A**

El rendimiento se mantiene en torno al  $86,44 \pm 0,38$  %, de forma que se fija tras un análisis del histórico de resultados, que el valor máximo para el rendimiento del módulo 4 se corresponde con el 86,92 %, que es un máximo que se obtuvo en el mes de Enero del 2011, y un valor mínimo que se corresponde con el valor obtenido en Julio del 2011 del 86,00 %.

El valor del rendimiento no se mantiene constante por diversos motivos. Por un lado, hay que tener en cuenta las horas de funcionamiento del módulo, ya que es necesario para obtener un valor real y representativo, que el módulo funcione en continuo en ciclos de 24 h. Otros factores son posibles deterioros en los electrodos, o bien que coincida con que el módulo se encuentre en su máximo de horas para el cual es necesario realizar una parada para realizar un ciclo de limpieza y eliminar posibles incrustaciones en la membranas. Otro motivo que puede afectar al rendimiento son posibles fugas cruzadas entre los circuitos de diluido y concentrado a través de las válvulas diversificadoras que son las que permiten revertir los flujos de los circuitos.

A continuación, en la Figura 19, se representan los valores obtenidos para el agua de rechazo a lo largo del 2011 en el módulo A.

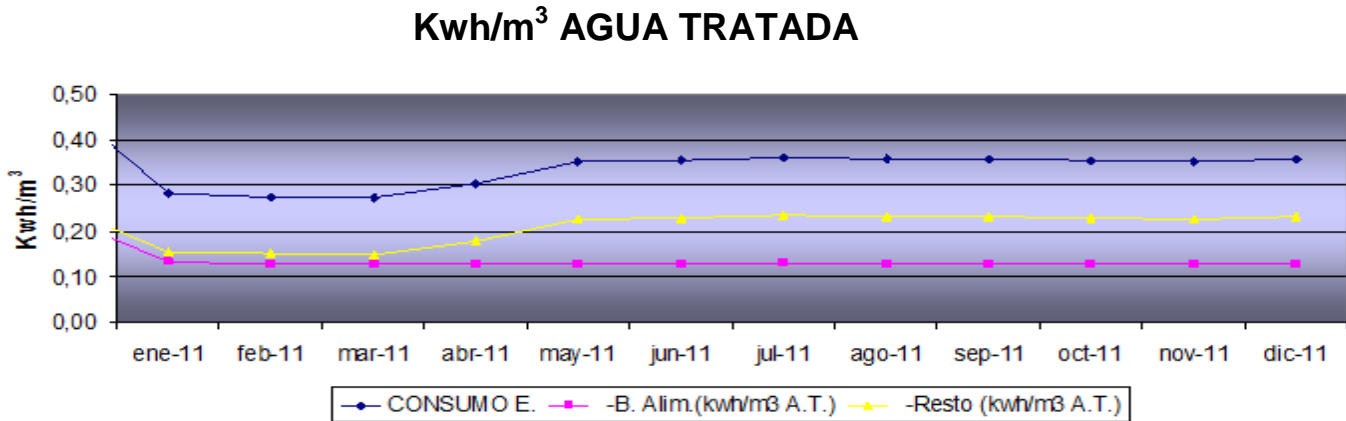


**Figura 19. Porcentaje de rechazo del módulo A**

Realizando un promedio del año se obtiene un porcentaje de agua de rechazo entorno al  $13,55 \pm 0,36$  %. Se puede observar en el gráfico que no se mantiene una regularidad en los valores del índice de rechazo. Estas irregularidades pueden deberse a varios motivos, como alguna incidencia técnica, el deterioro en algún electrodo que obligue a aislar alguna de las líneas, o que coincida con algún ciclo de limpieza, tal y como ya se citó anteriormente.

Cuando dichas irregularidades no se encuentran justificadas por ninguno de los posibles motivos enumerados, es cuando esos valores que se encuentran por encima del valor que se fija como el punto óptimo de funcionamiento, se convierten en indicios que llevan a plantearse realizar una optimización de los módulos.

Respecto al consumo energético del módulo A, en la Figura 20 se representa el consumo total (consumo E), el consumo de la bomba de alimentación (B.Alim) del módulo y el resto de Kwh/m<sup>3</sup> consumidos que comprende el resto de equipos que hay en la planta que tienen un consumo energético.

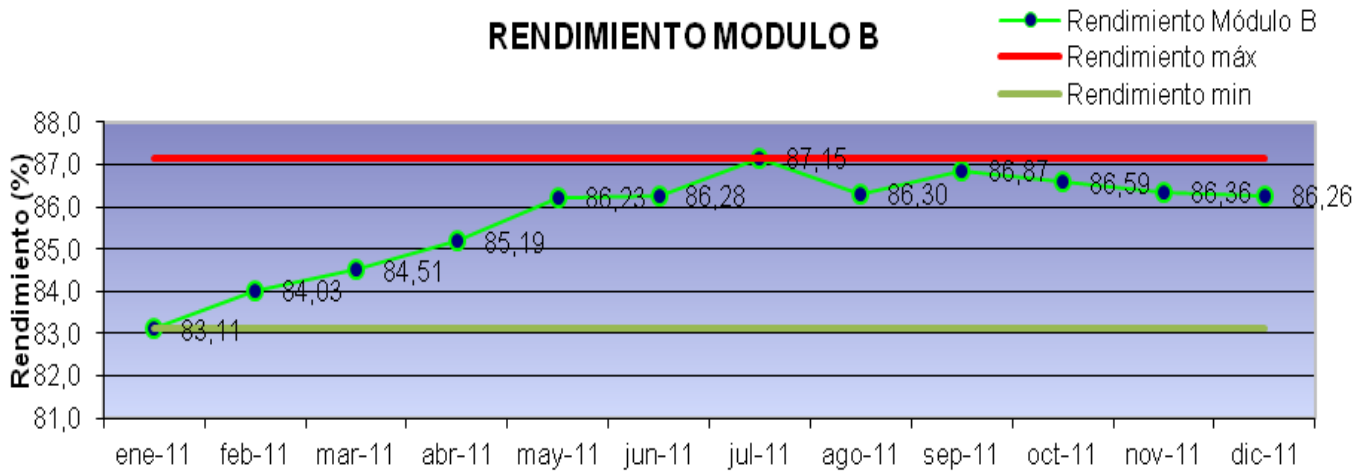


**Figura 20. Consumo energético del módulo A**

Observando los consumos para el módulo A a lo largo del 2011 se obtiene un valor promedio de 0,36 Kwh/m<sup>3</sup>. Este valor resulta más bajo que en los otros dos módulos porque tiene una bomba para alimentar las 4 líneas, y aunque el consumo de la bomba sea el mismo en los tres módulos hay que recordar que el módulo A está provisto de una línea más que los otros dos módulos, por lo que produce una mayor cantidad de m<sup>3</sup> de agua producto con la misma bomba.

Los valores obtenidos al inicio del año resultan ligeramente inferiores porque el módulo no trabajó en ciclos de 24 h en continuo para obtener un valor real y representativo.

Análogamente se presentan los resultados para el módulo B en las Figuras 21, 22 y 23.



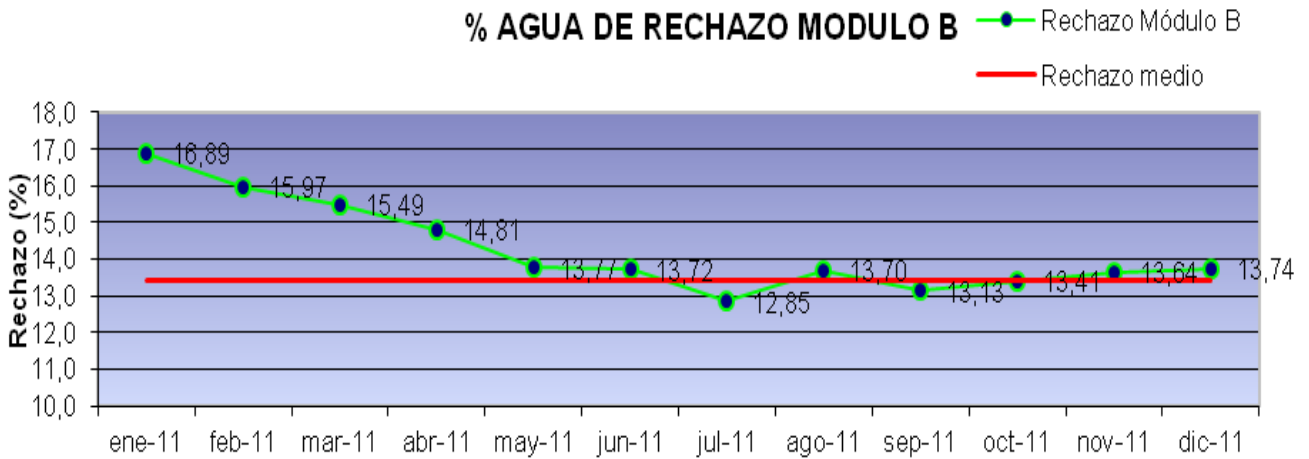
**Figura 21. Rendimiento módulo B**

El rendimiento del módulo B se mantiene en torno al  $86,4 \pm 1,25$  %. El valor máximo para el rendimiento del módulo B se corresponde con el 87,15 %, valor que se obtuvo en el mes de Julio del 2011.

El rendimiento en los primeros meses del año es bajo debido a que el módulo no trabajó en ciclos de 24 horas, no llegando a trabajar el 100 % de su capacidad, además de un problema de avería que hubo en las pilas que obligó a aislar una de las líneas porque era necesario la sustitución de uno de los electrodos.

Se consideran más representativos los valores de mitad a final de año porque el módulo trabajaba en continuo el número suficiente de horas para alcanzar el estado estacionario y alcanzar valores mayores del rendimiento. Estos valores del rendimiento se mantienen en una tendencia constante.

A continuación se representan los valores obtenidos para el agua de rechazo a lo largo del 2011 en el modulo B

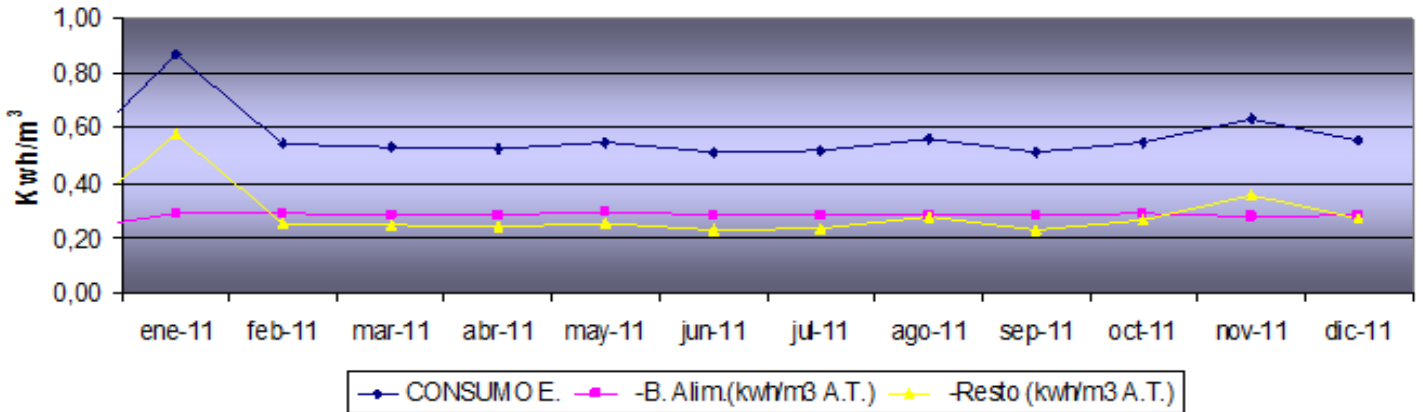


**Figura 22. Porcentaje de rechazo de módulo B**

Realizando un promedio del año se obtiene un porcentaje de agua de rechazo entorno al  $14,26 \pm 1,20$  %, aunque el límite tecnológico, que es el límite para el que se cumplen las especificaciones que requiere el agua producto, se fijará en 13,70 %, ya que el promedio no se ajusta a las condiciones de correcto funcionamiento del módulo, porque los primeros meses del año se obtuvieron valores de rechazo elevados por no funcionar en ciclos completos de 24 horas y algunas incidencias técnicas como ya se ha comentado anteriormente.

En la Figura 23 se representan los diferentes consumos energéticos para el módulo B.

### Kwh/m<sup>3</sup> AGUA TRATADA

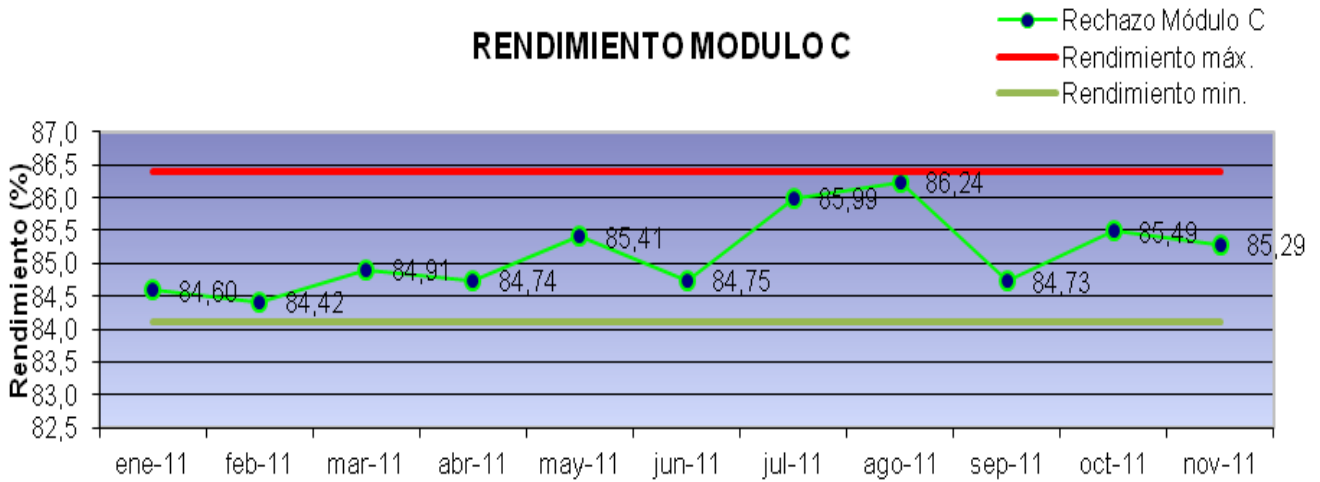


**Figura 23. Consumo energético del módulo B**

Respecto al consumo energético se obtiene un valor promedio de 0.56 Kwh/m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta las desviaciones a primeros de año por la avería ya citada anteriormente.

A lo largo del año el consumo energético se mantiene relativamente constante, excepto un ligero pico en el mes de noviembre que puede deberse a motivos similares a los de principio de año, o bien coincidir con un ciclo de limpieza o algún tipo de incidencia técnica que forzara el aislamiento de alguna de las líneas, disminuyendo la producción y aumentando el valor de Kwh/m<sup>3</sup>.

En la Figura 24 se puede realizar un análisis de los rendimientos a lo largo del 2011 para el módulo C.



**Figura 24. Rendimiento módulo C**

A lo largo del 2011 el rendimiento del módulo C se mantiene en torno al  $85,42 \pm 0,82$  %, se determina analizando un histórico de resultados y se observa que el valor máximo para el rendimiento del módulo C se corresponde con el 86,40 %, valor que se obtuvo en el mes de Mayo del 2010.

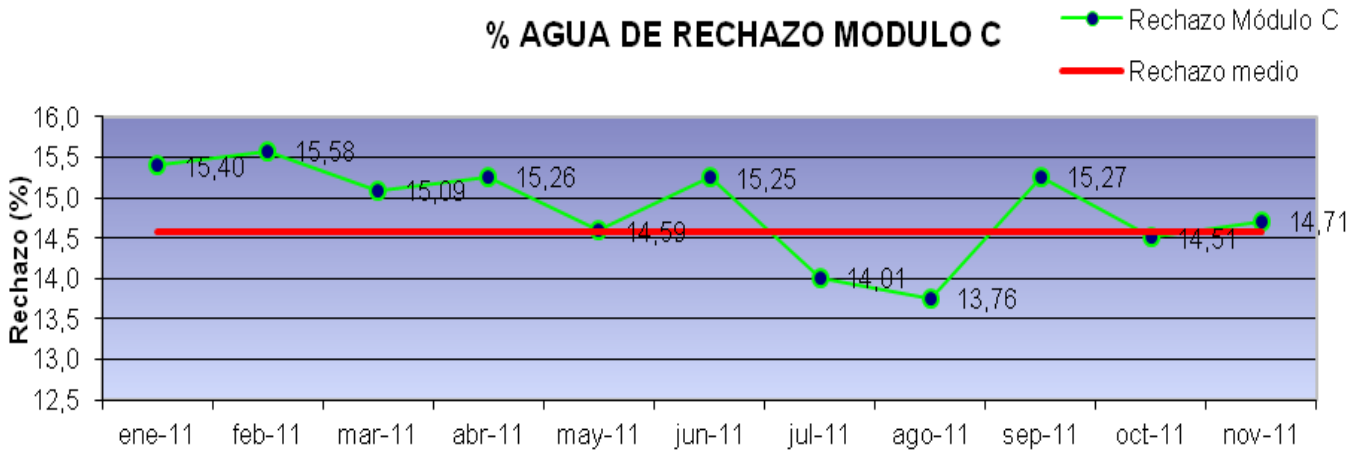
El valor mínimo se corresponderá con el valor de rendimiento donde el agua producto todavía se encuentre dentro de especificaciones, que se corresponde con un valor del rendimiento del 84,1%.

Respecto al valor obtenido en Diciembre del 2011, no se tendrá en consideración ya que el módulo no trabajó las horas suficientes para alcanzar los valores de rendimiento y rechazo en estado estacionario.

Se observa que el valor del rendimiento a lo largo del 2011 es un valor sostenido para el módulo C, pero picos como los obtenidos en los meses de Julio y Agosto plantean la posibilidad de hacer modificaciones y estudios en los módulos para obtener mejores rendimientos.

Las caídas de rendimiento pueden deberse a posibles fugas cruzadas entre los circuitos de diluido y concentrado, o bien por incrustaciones en las membranas, o cualquiera de los otros motivos ya citados anteriormente.

A continuación se representan los valores obtenidos para el agua de rechazo a lo largo del 2011 en la Figura 25.



**Figura 25. Porcentaje agua de rechazo módulo C**

Realizando un promedio del año se obtiene un porcentaje de agua de rechazo entorno al  $14,58 \pm 0,82$  %, fijándose como rechazo medio y límite tecnológico para el funcionamiento óptimo del módulo. Todos los valores representados implican que el módulo tiene que haber estado trabajando en continuo las suficientes horas para alcanzar el estado estacionario.

Se observa que dicho límite no se mantiene constante, obteniendo incluso valores que se encuentran por debajo, que suponen rendimientos más altos para el módulo. Es por ello que se decide buscar los parámetros óptimos de funcionamiento que permitan que los módulos operen siempre en condiciones óptimas de trabajo y se obtengan valores del porcentaje de agua de rechazo por debajo del límite tecnológico.

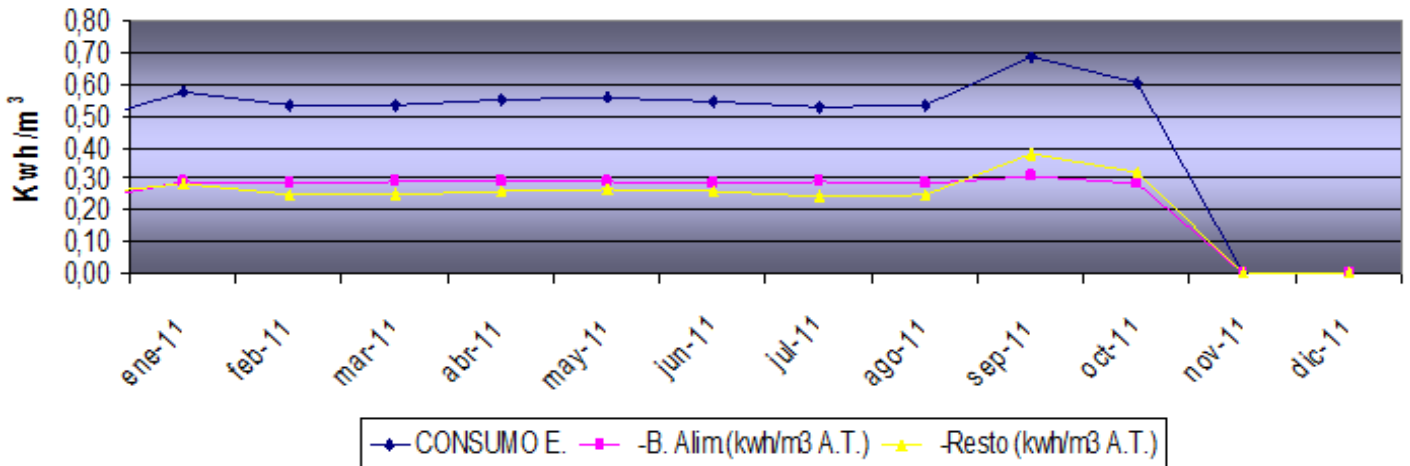
Los valores que se encuentran por encima del límite tecnológico pueden deberse a las mismas causas por las que se obtienen las bajadas de rendimiento, que el módulo no trabajase el número de horas suficiente para alcanzar el estado estacionario, estar



trabajando en condiciones cerca de un ciclo de limpieza, incrustaciones en la superficie de las membranas, fugas cruzadas entre los circuitos, etc.

En la Figura 26 se representa el consumo total del módulo C.

**Kwh/m<sup>3</sup> AGUA TRATADA**



**Figura 26. Consumo energético del módulo C**

El promedio de consumo para el 2011 resultó ser de 0,57 Kwh/m<sup>3</sup> en el módulo C. Se observa dos picos en los últimos meses, esto fue debido a una incidencia técnica que elevó el consumo energético como consecuencia de incrustaciones que se habían generado en la superficie de las membranas.

Las tablas 9 y 10 resumen las condiciones y resultados del funcionamiento de la planta en el año 2011:

**Tabla 9. Condiciones de trabajo iniciales de los módulos en el 2011**

MÓDULO	SET POINT CONDUCTIVIDAD (µS/cm)	RENDIMIENTO (%)	RECHAZO (%)	CONSUMO ELÉCTRICO (Kwh/m <sup>3</sup> )
A	4600	86,17	13,55	0,36
B	4600	86,59	13,70	0,56
C	4600	85,42	14,58	0,57

**Tabla 10. Condiciones de trabajo iniciales de la planta de EDR en 2011**

Planta EDR	Año 2011
Alimentación (m <sup>3</sup> )	1.177.593
Producto (m <sup>3</sup> )	1.015.597
Rechazo (m <sup>3</sup> )	16.196
% Rendimiento	86.06
% Rechazo	13.94

Tras esta exposición de resultados de la situación de cada módulo individualmente y del conjunto de la planta, se concluye que la planta está bien gestionada pero podrían realizarse mejoras que se transformarían en beneficios para la compañía.

Realizar un análisis individual de cada uno de los módulos ha permitido observar que se pueden alcanzar mayores valores de rendimientos, que supondrán una disminución en el agua de rechazo. Esta disminución en el porcentaje del agua de rechazo supone un mejor compromiso con el medio ambiente y un beneficio económico para la empresa. De estos motivos surge la necesidad de formar un equipo de investigación para la optimización de la planta de EDR de Heineken.

Como ya se citó anteriormente, existen varias formas de actuación para la optimización de los módulos que aconseja el fabricante, y de entre todas ellas se opta por las más viable, que es la recirculación del concentrado. Con dicha recirculación se conseguirá aumentar los rendimientos de los módulos a la vez que resultará un ahorro en volumen de agua, en forma de volumen de aportación de agua cruda al circuito de concentrado o circuito de salmuera.

De manera que en Marzo del 2012 comienza el estudio de la optimización de los módulos empezando por el módulo A, que es el módulo que funciona de base y servirá de referencia para la posterior optimización de los otros dos módulos.

#### 4.2 Resultados de la optimización de los módulos

Una vez analizada la situación de la planta, se empieza con los ensayos para conseguir una optimización de los módulos e intentar aumentar sus rendimientos con su correspondiente disminución en el agua de rechazo.

Esta optimización se basa fundamentalmente en reducir el volumen de aportación de agua cruda al circuito de salmuera, recirculando parte del concentrado, y dicha reducción se alcanza realizando un estudio de las posibilidades de que la salmuera pueda funcionar a mayores concentraciones sin dañar las membranas.

La única desventaja que presenta este sistema es que habrá que realizar ciclos de limpieza más frecuentemente para eliminar posibles incrustaciones en la superficie de las membranas.

Para llevar a cabo esta medida, lo que se hará en primer lugar es modificar en los lazos de control el valor de la concentración de la salmuera, de manera que al aumentar su valor y al trabajar a mayores concentraciones, el volumen de aportación de agua cruda al circuito de salmuera será menor, de forma que se reduce el porcentaje de agua de rechazo.

##### 4.2.1 Módulo A

La experimentación partió del modulo A, se comenzó subiendo el valor del *Set point* de la conductividad de la corriente de concentrado o salmuera diariamente.

Los resultados obtenidos en rendimiento y rechazo resultan ser los que se recogen en las Figuras 27 y 28.

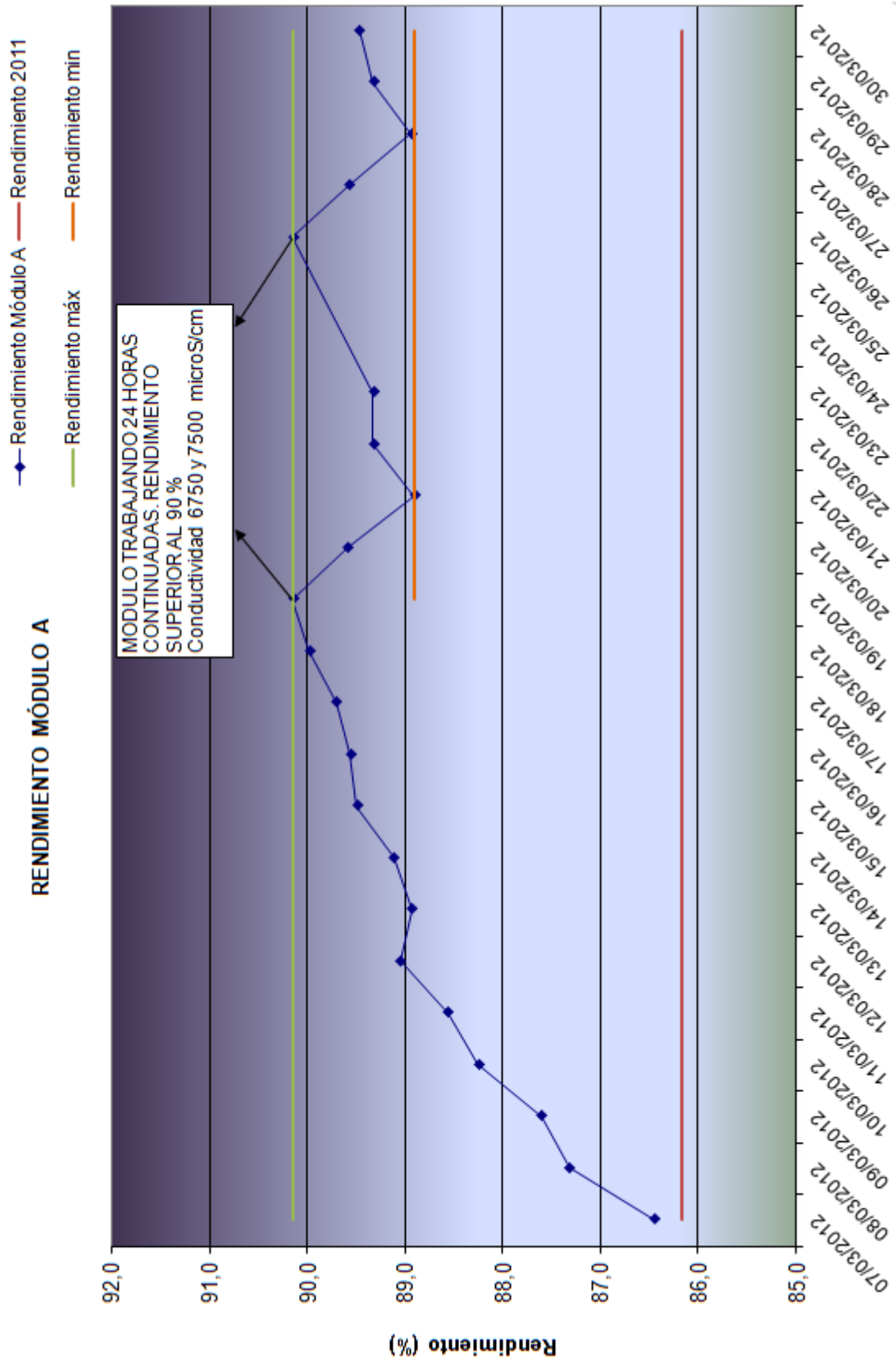


Figura 27. Análisis del rendimiento del módulo A optimizado

La situación inicial de la que se parte es un valor del rendimiento del 86,5 % para un valor de la conductividad en el circuito de salmuera de 4600 microS/cm.

Dicho valor se encuentra cerca del valor medio del rendimiento en el 2011, y a continuación se puede observar la evolución que va llevando la optimización del módulo.

Cada día se aumenta el valor de la conductividad en torno a unos 250 microsS/cm en el circuito de salmuera, de forma que se iba reduciendo el volumen de aportación a dicho circuito, con lo que el rendimiento aumentaba. Todos estos días se realizaron analíticas para confirmar que el agua producto que se iba generando se encontraba dentro de especificaciones y que el aumento de la conductividad no dañara las membranas.

El día 19 de Marzo se alcanza un máximo del rendimiento del 90,15 % con un valor de la conductividad de 6750 microS/cm. Las analíticas del agua producto demostraban que todavía había un poco de margen para probar aumentando un poco más la conductividad en el circuito de salmuera. Se aumenta la conductividad hasta 7500 microS/cm obteniendo el mismo máximo, rebajar el *Set Point* nuevamente a 6750 microS/cm para no forzar tanto las membranas y evitar incrustaciones excesivas.

De manera que el nuevo rendimiento medio para el módulo A tras la optimización resultará ser del 90,52 % para un valor de la conductividad de 6750 microS/cm. El rendimiento medio del módulo aumentó un 4,02 %.

A continuación se realiza el análisis del porcentaje de agua de rechazo en la Figura 28.

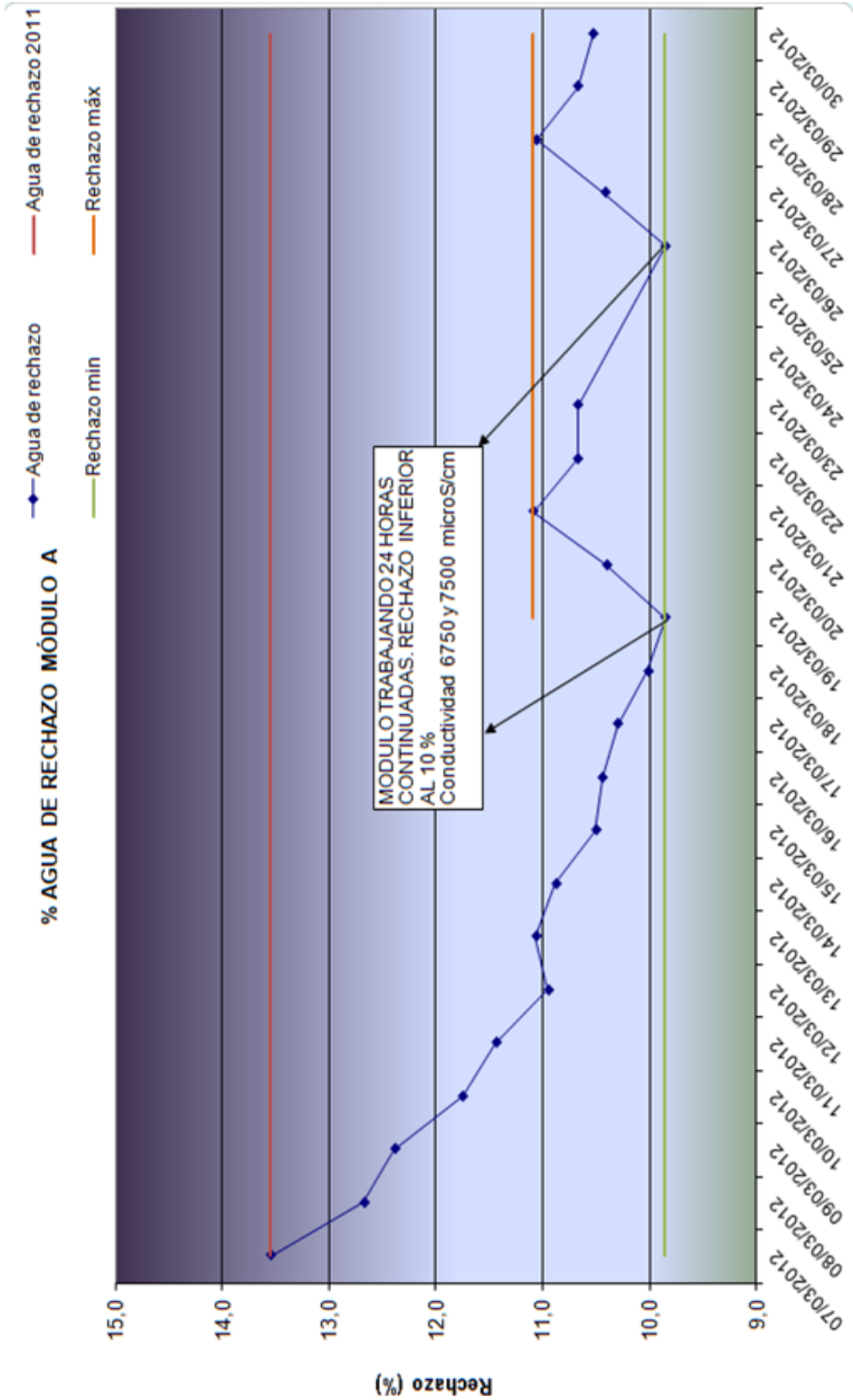


Figura 28. Porcentaje de rechazo del módulo A optimizado.

Tras los resultados obtenidos en la parte de rendimientos se justifica de la misma forma la evolución que ha seguido el proceso de optimización para el rechazo del agua. De manera que se obtienen dos picos del porcentaje de rechazo del 9,85 %, que supondrán un ahorro en volumen de aportación de agua en el conjunto total de la planta de EDR.

En la figura se observa el valor medio del rechazo del 2011 del 13,55 % y el descenso que sigue tras las pertinentes modificaciones. Hasta llegar a reducir dicho porcentaje en un 4,1 % en volumen de aportación de agua al circuito de salmuera, porque el nuevo rendimiento medio del módulo será de 9,45 %.

En cuanto a consumo energético en la Figura 29, se compara el consumo medio del 2011 con los consumos obtenidos durante la optimización.

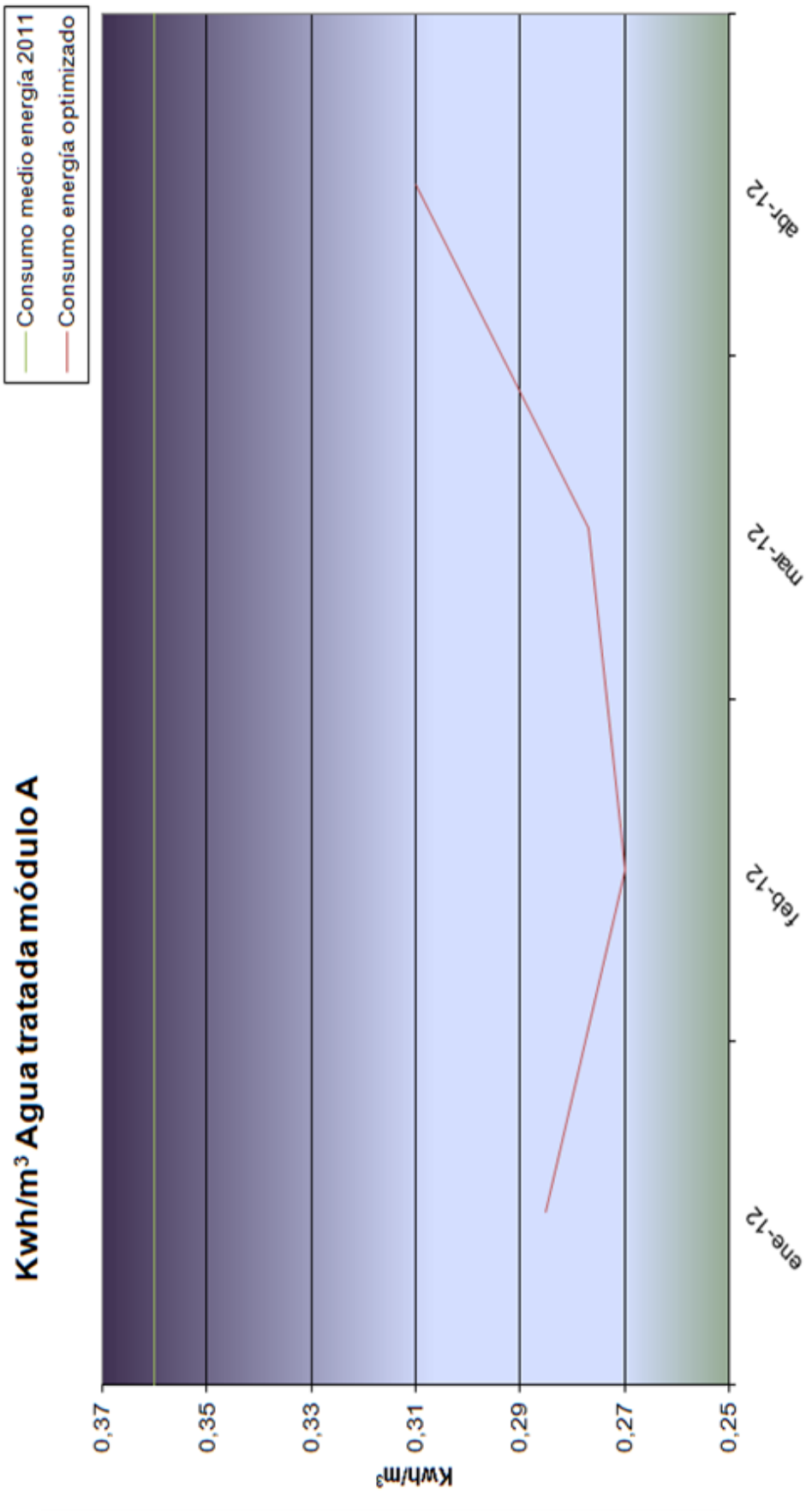


Figura 29. Consumo de energía del módulo A optimizado



Se observa en la Figura 29 un descenso muy marcado. Esto es debido al aumento de rendimiento así como el descenso del porcentaje de agua de rechazo que implican un aumento en la producción del módulo de manera que una mayor producción de m<sup>3</sup> para los mismos Kwh produce un marcado descenso del consumo específico.

En el año 2011 el consumo medio resulta ser de 0,36 kwh/m<sup>3</sup> y se consigue reducir hasta 0,28 kwh/m<sup>3</sup>, suponiendo un ahorro de 0,08 kwh/m<sup>3</sup>.

En cuanto a las características físico-químicas del agua producto y de la salmuera del módulo A, se adjunta la Tabla 11 con los resultados antes y después de la optimización.

**Tabla 11. Características físico-químicas del agua producto antes y después de optimizar el módulo A**

	10/03/2012		10/04/2012	
	Agua producto	Salmuera	Agua producto	Salmuera
<b>Conductividad (µS/cm)</b>	287	4600	306	7450
<b>Calcio mg/l</b>	20	676	18,4	1192
<b>Dureza temporal (mg CaCO<sub>3</sub>/l)</b>	120	910	100	1535
<b>pH</b>	6,8	6,89	6,88	6,78
<b>Índice de Langelier</b>		1,14		1,36

Tras la caracterización del agua producto del módulo A, se observa que los valores se encuentran dentro de los límites que fija el Real Decreto 140/2003 (Tabla 5), y respecto al índice de Langelier se observa un ligero aumento que implicará un mayor control pero sigue estando dentro de las recomendaciones del fabricante que resultan ser que por debajo de 1,5 no habrán graves problemas de incrustaciones.

Vistos los resultados obtenidos que tras la optimización del módulo A se obtienen mayores valores del rendimiento, menores porcentajes de agua de rechazo y menores consumos energéticos, se procederá a realizar una expansión horizontal a los módulos B y C.

#### 4.2.2 Módulo B

Se parte subiendo el valor del *Set Point* de la conductividad diariamente pero las subidas del *Set Point* se realizaron con intervalos mayores, ya que se utiliza de referencia el comportamiento tecnológico que del módulo A. Los resultados que se van obteniendo en rendimiento y rechazo resultan ser los que se recogen en las Figuras 30, 31 y 32.

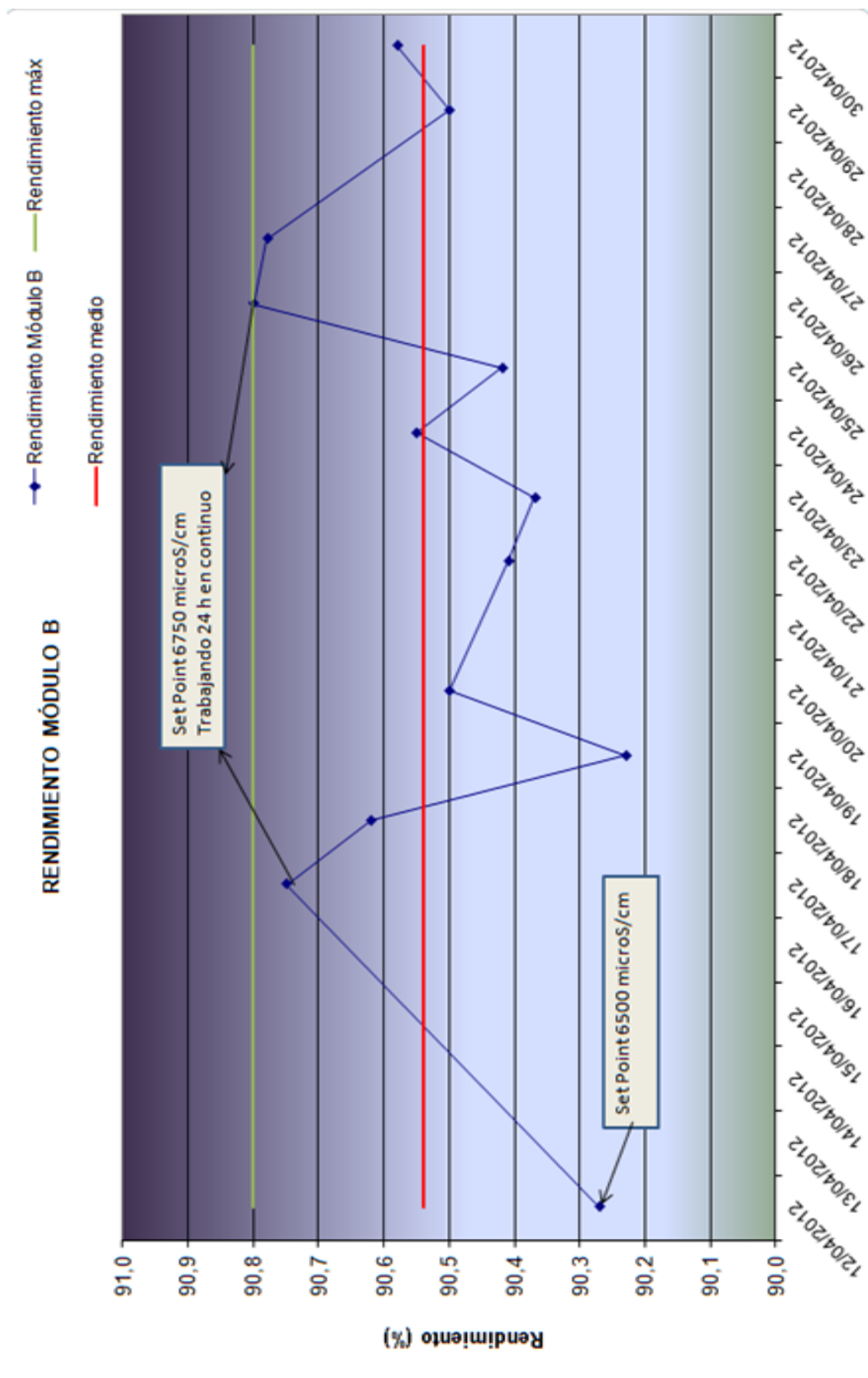


Figura 30. Rendimiento módulo B optimizado

Inicialmente se parte de un valor de conductividad de 4600 microS/cm con un rendimiento medio del 86,48 %. Dicho valor no se ha incluido en la Figura 31 para que se aprecie mejor la evolución durante el periodo de optimización, por lo que se parte de un valor del rendimiento del 90,27 % para un valor de la conductividad en el circuito de salmuera de 6500 microS/cm que será la primera modificación.

Durante los primeros días de la experimentación no fue posible mantener el módulo en funcionamiento durante ciclos completos de trabajo de 24 horas por lo que se iban obteniendo valores no representativos.

El día 17 de Abril se modifica el valor de la conductividad de la corriente de salmuera hasta los 6750 microS/cm y se deja el módulo trabajando durante 24 horas, de manera que se obtiene un valor de rendimiento del 90,75 %.

Los días posteriores el módulo no funcionó el número suficiente de horas como para obtener resultados válidos para el ensayo, hasta las fechas 26 y 27 de Abril donde se pone en marcha el módulo nuevamente durante un periodo lo suficientemente largo como para tener en consideración los resultados obtenidos.

Todos estos días se realizaron analíticas para confirmar que el agua producto que se iba generando se encontraba dentro de especificaciones y que el aumento de la conductividad no dañara las membranas.

El día 26 de Abril se alcanza un máximo del rendimiento del 90,80 % con un valor de la conductividad de 6750 microS/cm. De forma que no se plantea seguir aumentado el valor de la conductividad por los mismos motivos que en el módulo A, por seguridad de la instalación.

De manera que el nuevo rendimiento medio para el módulo B tras la optimización resultará ser del 90,54 % para un valor de la conductividad de 6750 microS/cm. El rendimiento medio del módulo habrá aumentado un 4,06 %.

A continuación se realiza el análisis del porcentaje de agua de rechazo en la Figura 31.

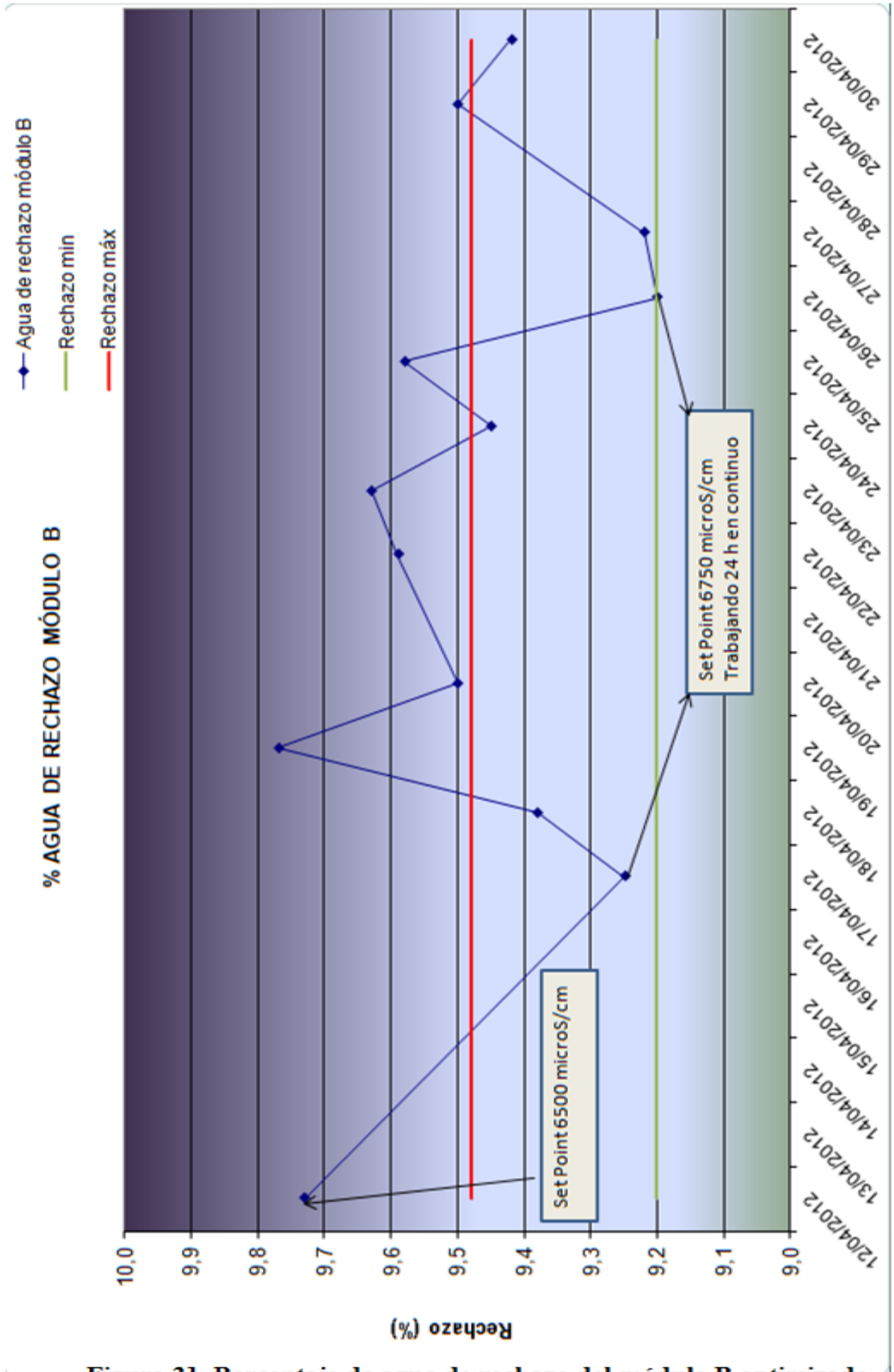


Figura 31. Porcentaje de agua de rechazo del módulo B optimizado

Tras los resultados obtenidos en la parte de rendimientos se justifica de la misma forma la evolución que ha seguido el proceso de optimización para el rechazo del agua. De manera que se obtienen dos picos del porcentaje de rechazo del 9,2 % y 9,22 %, que supondrán un ahorro en el volumen de aportación de agua en el conjunto total de la planta de EDR.

El valor medio del rechazo del 2011 es del 13,70 %, no se ha incluido en la Figura 31 para poder apreciar mejor la evolución de la optimización del módulo. Se observa un marcado descenso al principio como consecuencia del cambio del valor de la conductividad en el circuito de salmuera, pero no llegan a ser valores representativos porque el módulo no trabaja en ciclos completos de 24 horas.

Sin embargo los días 17 y 26 de Abril el módulo funciona durante 24 horas originando valores óptimos y representativos de la mejora, hasta llegar a reducir el porcentaje de agua de rechazo en un 4,5 % en volumen de aportación de agua al circuito de salmuera.

Y en cuanto a consumo energético en la Figura 32, se compara el consumo medio del 2011 con los consumos obtenidos durante la optimización:

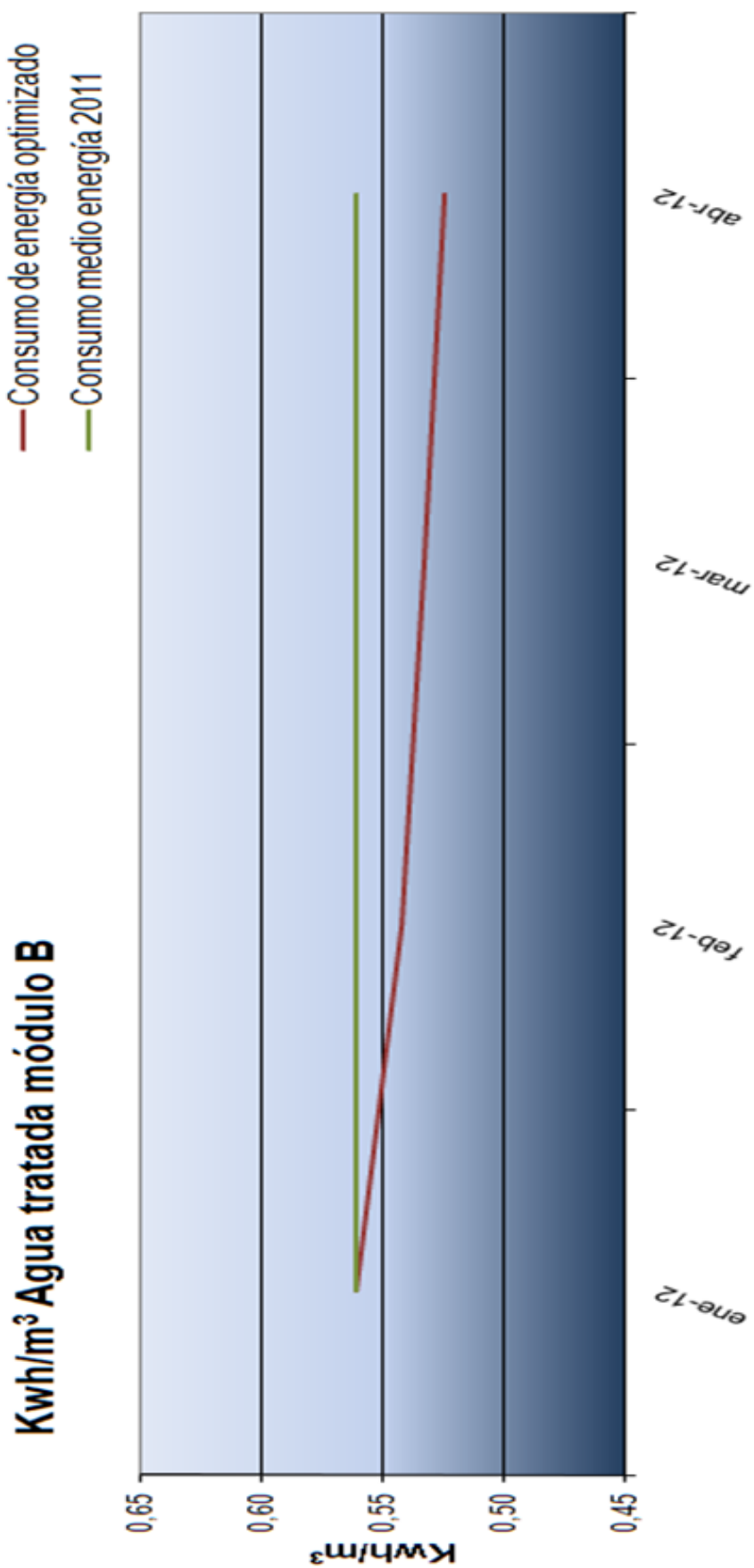


Figura 32. Consumo de energía del módulo B optimizado

Se observa en la Figura 32 la evolución del consumo energético un descenso, esto es debido a que el aumento de rendimiento como el descenso del porcentaje de agua de rechazo implican un aumento en la producción del módulo de manera que una mayor producción de m<sup>3</sup> para los mismos Kwh produce un marcado descenso del consumo.

En el año 2011 el consumo medio resulta ser de 0,56 kwh/m<sup>3</sup> y se consigue reducir hasta 0,52 kwh/m<sup>3</sup>, suponiendo un ahorro de 0,04 kwh/m<sup>3</sup>.

En cuanto a las características físico-químicas del agua producto y de la salmuera del módulo B, se adjunta la Tabla 12 con los resultados antes y después de la optimización.

**Tabla 12. Características físico-químicas del agua producto antes y después de optimizar el módulo B**

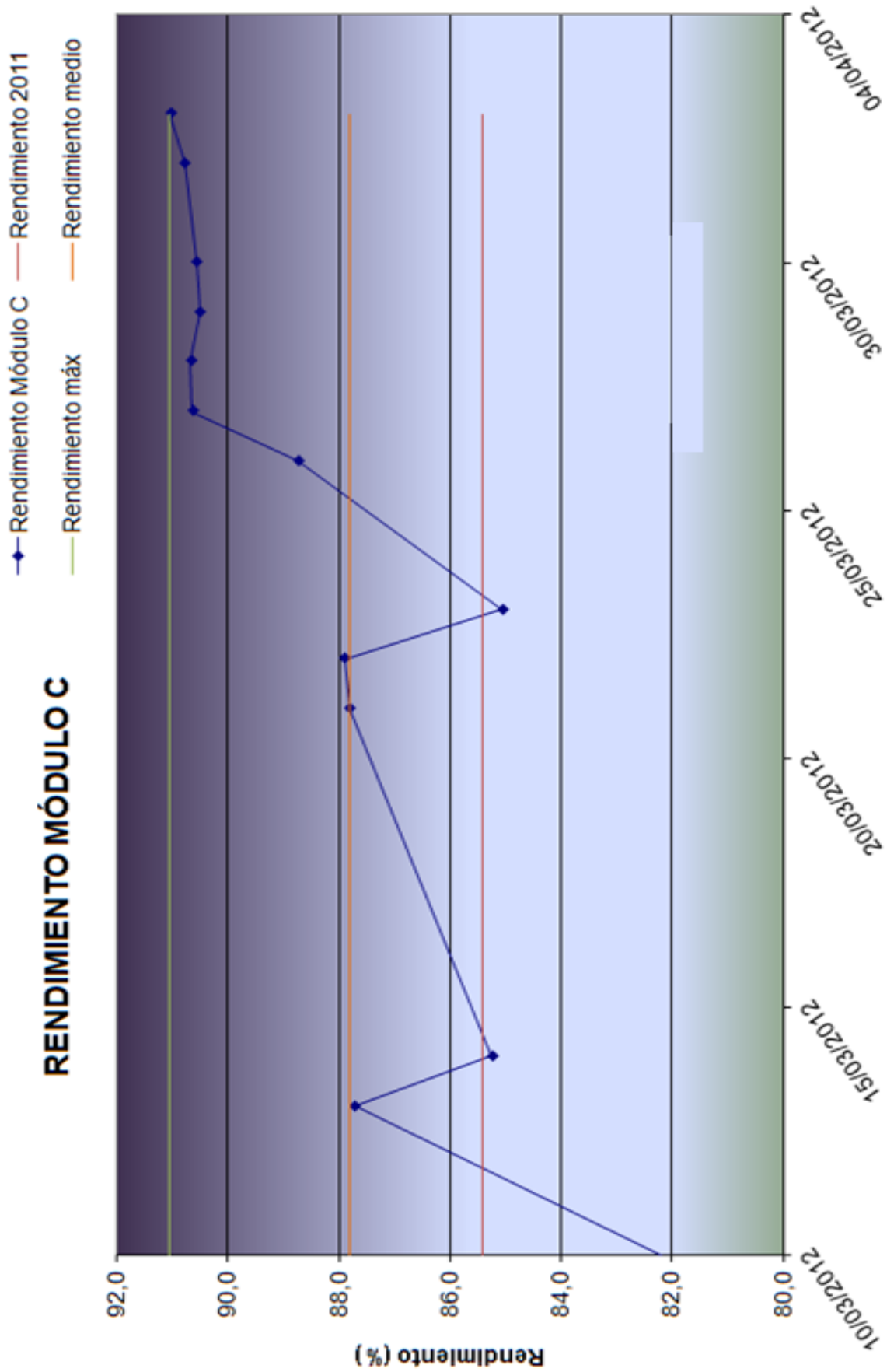
	04/04/2012		26/04/2012	
	Agua producto	Salmuera	Agua producto	Salmuera
<b>Conductividad (µS/cm)</b>	339	4600	351	7180
<b>Calcio mg/l</b>	25,2	770	26	1216
<b>Dureza temporal (mg CaCO<sub>3</sub>/l)</b>	100	1100	110	1680
<b>pH</b>	6,92	6,88	6,88	6,78
<b>Índice de Langelier</b>		1,19		1,47

Tras la caracterización del agua producto del módulo B, se observa que los valores se encuentran dentro de los límites que fija el Real Decreto 140/2003 (Tabla 5), y respecto al índice de Langelier se observa un ligero aumento que implicará un mayor control pero sigue estando dentro de las recomendaciones del fabricante que resultan ser que por debajo de 1,5 no habrán graves problemas de incrustaciones.



#### 4.2.3 Módulo C

Se parte subiendo el valor del *Set Point* de la conductividad diariamente, pero como cuenta con la experiencia del módulo A, las subidas del *Set Point* se realizan con intervalos mayores, de forma que los resultados obtenidos en rendimiento, Figura 33, y rechazo, Figura 34, resultan ser:



**Figura 33. Rendimiento módulo C optimizado**

Inicialmente se parte de un valor de conductividad de 4600 microS/cm con un rendimiento medio del 85,42 % del histórico del 2011.

Durante los primeros días de marzo el módulo se encuentra funcionando en las condiciones iniciales que se corresponden con un valor de la conductividad de 4600 microS/cm. El día 27 se realiza la primera subida en el valor de la conductividad hasta 6000 microS/cm, obteniendo un rendimiento del orden del 90%.

Los días posteriores se eleva el valor del *Set Point* hasta 7000 microS/cm, obteniendo valores de rendimiento de 91,05 % de máximo.

Todos estos días se realizaban analíticas para confirmar que el agua producto que se iba generando se encontraba dentro de especificaciones y que el aumento de la conductividad no dañara las membranas.

De manera que el nuevo rendimiento medio para el módulo C tras la optimización resultará ser del 90,12 % para un valor de la conductividad de 7000 microS/cm. El rendimiento medio del módulo habrá aumentado un 2,37 %.

A continuación se realiza el análisis del porcentaje de agua de rechazo en la Figura 34.

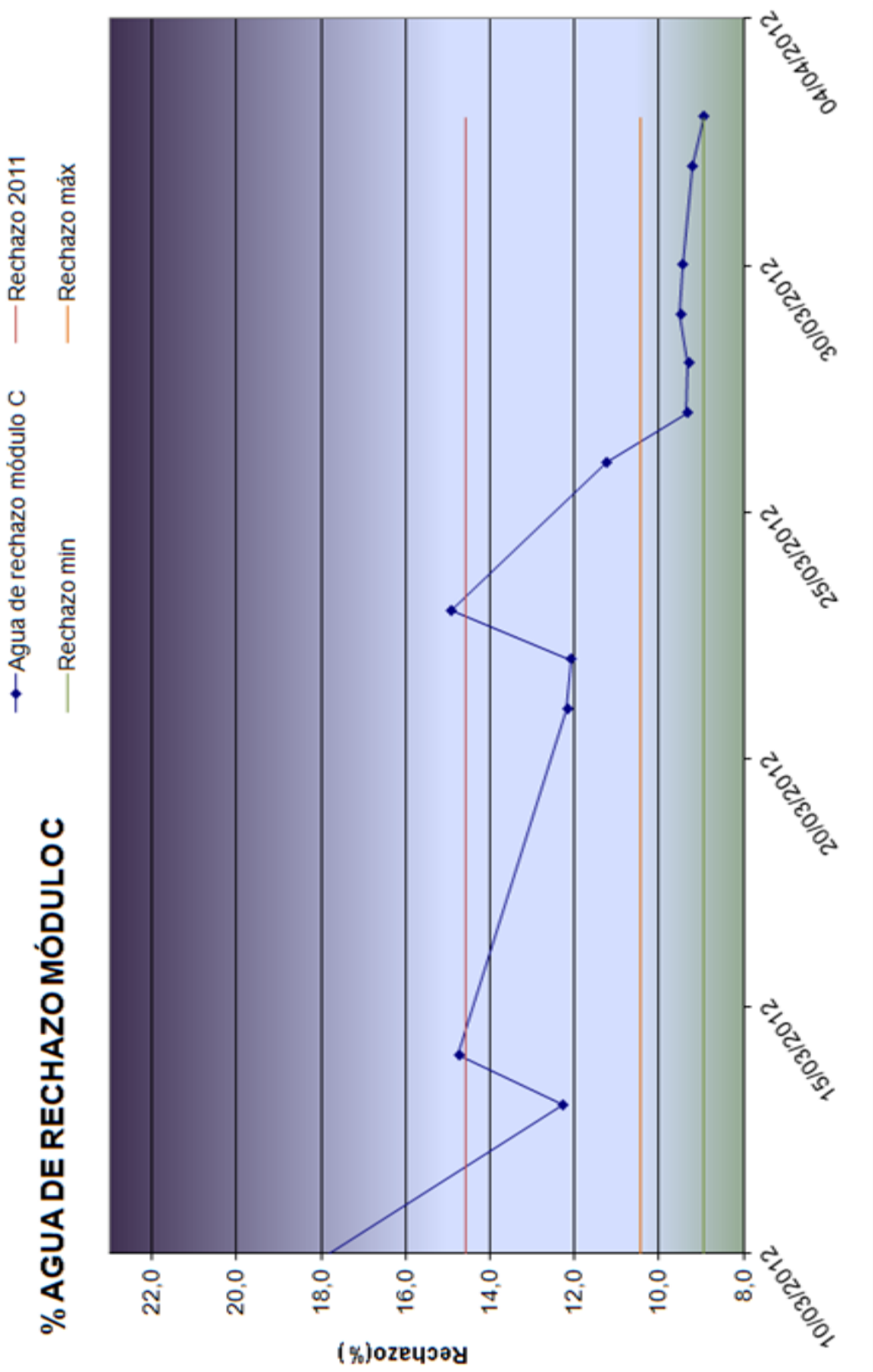


Figura 34. Porcentaje de agua de rechazo módulo C optimizado.

Tras los resultados obtenidos en la parte de rendimientos se justifica de la misma forma la evolución que ha seguido el proceso de optimización para el rechazo del agua. De manera que se obtienen un claro descenso del porcentaje de agua de rechazo con valores de conductividad en el circuito de salmuera de 7000 microS/cm y habiendo trabajado el módulo ciclos completos de 24 horas.

El valor medio del rechazo del 2011 es del 14,58 %, teniendo en cuenta que las modificaciones en el proceso comienzan a partir del día 23 de Marzo, el nuevo rendimiento medio del módulo sería de 10,45 %, habiendo reducido el porcentaje de agua de rechazo en un 4,13 %.

En cuanto a consumo energético en la Figura 35, se compara el consumo medio del 2011 con los consumos obtenidos durante la optimización:

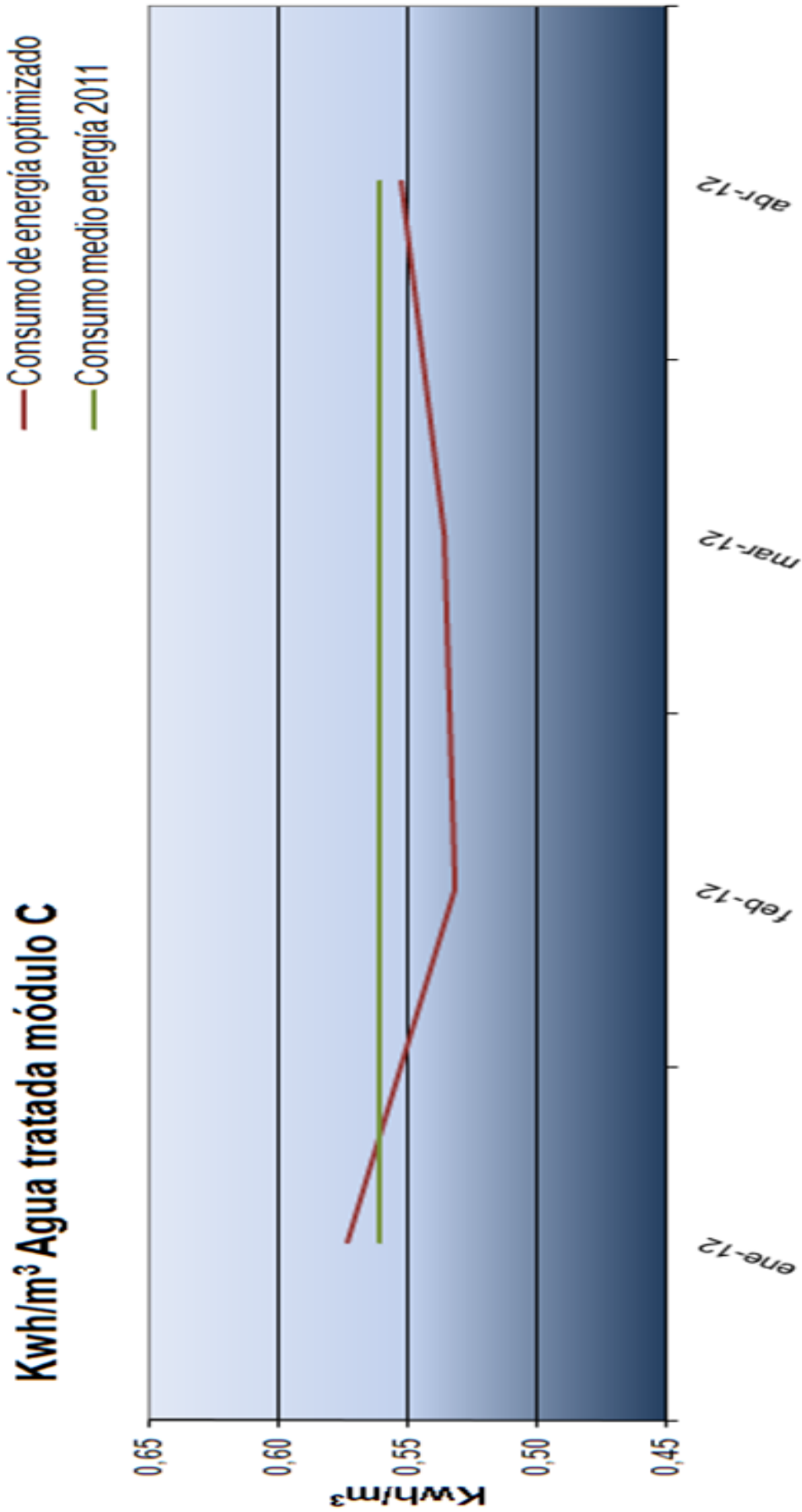


Figura 35. Consumo de energía del módulo C optimizado

Se observa en la Figura 35 la evolución del consumo energético un descenso, esto es debido a que el aumento de rendimiento como el descenso del porcentaje de agua de rechazo implican un aumento en la producción del módulo de manera que una mayor producción de m<sup>3</sup> para los mismos Kwh produce un marcado descenso del consumo.

En el año 2011 el consumo medio resulta ser de 0,56 kwh/m<sup>3</sup> y se consigue reducir hasta 0,53 kwh/m<sup>3</sup>, suponiendo un ahorro de 0,03 kwh/m<sup>3</sup>.

En cuanto a las características físico-químicas del agua producto y de la salmuera del módulo C, se adjunta la Tabla 13 con los resultados antes y después de la optimización.

**Tabla 13. Características físico-químicas del agua producto antes y después de optimizar el módulo C**

	10/03/2012		30/03/2012	
	Agua producto	Salmuera	Agua producto	Salmuera
<b>Conductividad (µS/cm)</b>	330	4780	355	7320
<b>Calcio mg/l</b>	24,2	760	24	1180
<b>Dureza temporal (mg CaCO<sub>3</sub>/l)</b>	108	1125	105	1125
<b>pH</b>	6,89	6,72	6,87	6,72
<b>Índice de Langelier</b>		1,19		1,26

Tras la caracterización del agua producto del módulo C, se observa que los valores se encuentran dentro de los límites que fija el Real Decreto 140/2003 (Tabla 5), y respecto al índice de Langelier se observa un ligero aumento que implicará un mayor control pero sigue estando dentro de las recomendaciones del fabricante que resultan ser que por debajo de 1,5 no habrán graves problemas de incrustaciones.

### 4.3 Resultados globales de la optimización de la planta

En cuanto a las características físico-químicas del agua producto y de la salmuera, se adjunta la Tabla 14 con los resultados antes y después de la optimización.

**Tabla 14. Características físico-químicas del agua producto de la planta de EDR tras la optimización**

	05/03/2012		30/03/2012	
	Agua producto	Salmuera	Agua producto	Salmuera
<b>Conductividad (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)</b>	353	4600	355	6800
<b>Calcio mg/l</b>	27,2	588	24	1180
<b>Dureza temporal (mg <math>\text{CaCO}_3/\text{l}</math>)</b>	105	880	105	1125
<b>pH</b>	7	6,89	6,87	6,72
<b>Índice de Langelier</b>		0,92		1,26

Se observa que todos los valores cumplen los estándares de calidad que establece el Real Decreto 140/2003 (Tabla 5), y que el índice de Langelier se encuentra por debajo del límite recomendado por el fabricante, que está fijado en 1,5, para graves problemas de incrustaciones.

En la Tabla 15 se adjuntan los nuevos estándares de trabajo para cada uno de los módulos de la planta de EDR.

**Tabla 15. Condiciones de trabajo de los módulos optimizados**

MÓDULO	SET POINT CONDUCTIVIDAD ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ )	RENDIMIENTO (%)	RECHAZO (%)	CONSUMO ELÉCTRICO (Kwh/m3)
A	6750	90,52	9,48	0,28
B	6750	90,57	9,23	0,54
C	7000	90,12	9,88	0,53

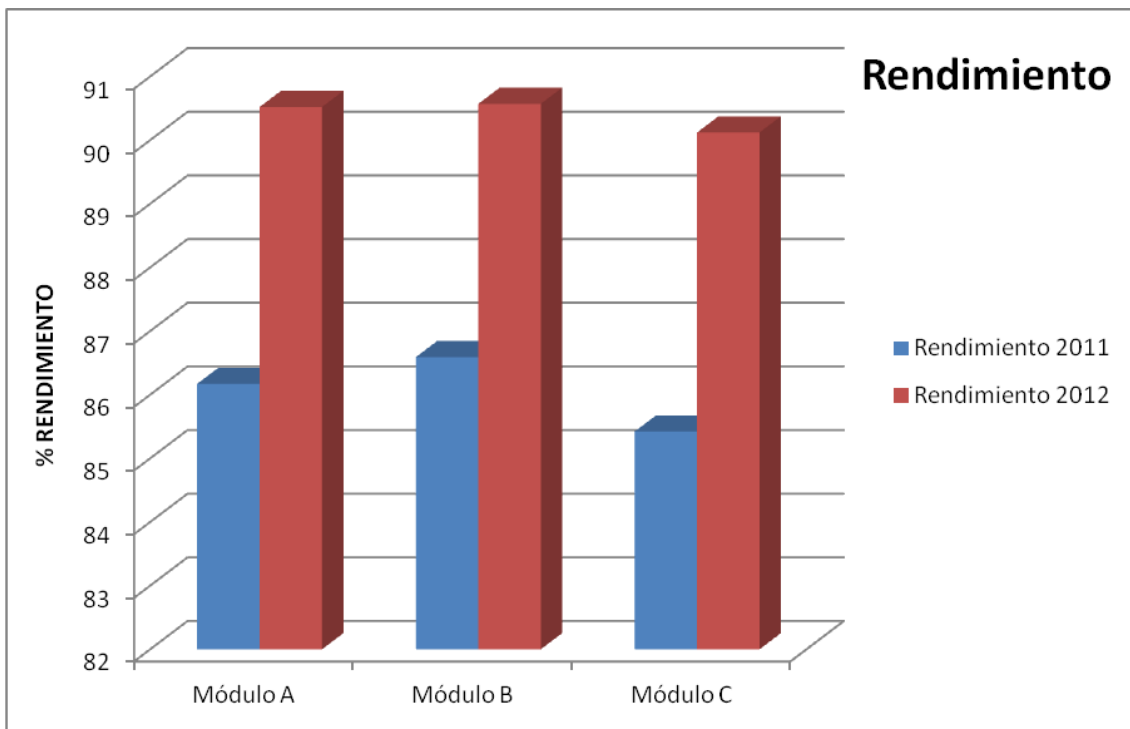
Tal y como queda plasmado en la Tabla 15, el aumento del rendimiento y la disminución del porcentaje de rechazo han sido considerablemente significativos, consiguiendo reducir los consumos eléctricos por módulo y reduciendo el porcentaje de agua de rechazo.



El *Set Point* de la conductividad para los módulos A y B es menor simplemente por consideraciones técnicas, ya que los valores obtenidos del índice de Langelier han resultado mayores y podrían causar daños en las membranas.

Para poder hacer una comparación más visual de los cambios que han experimentado los parámetros se van a representar los promedios de las variables sobre las que se ha actuado en cada módulo durante 2011 y los meses de 2012 hasta la actualidad.

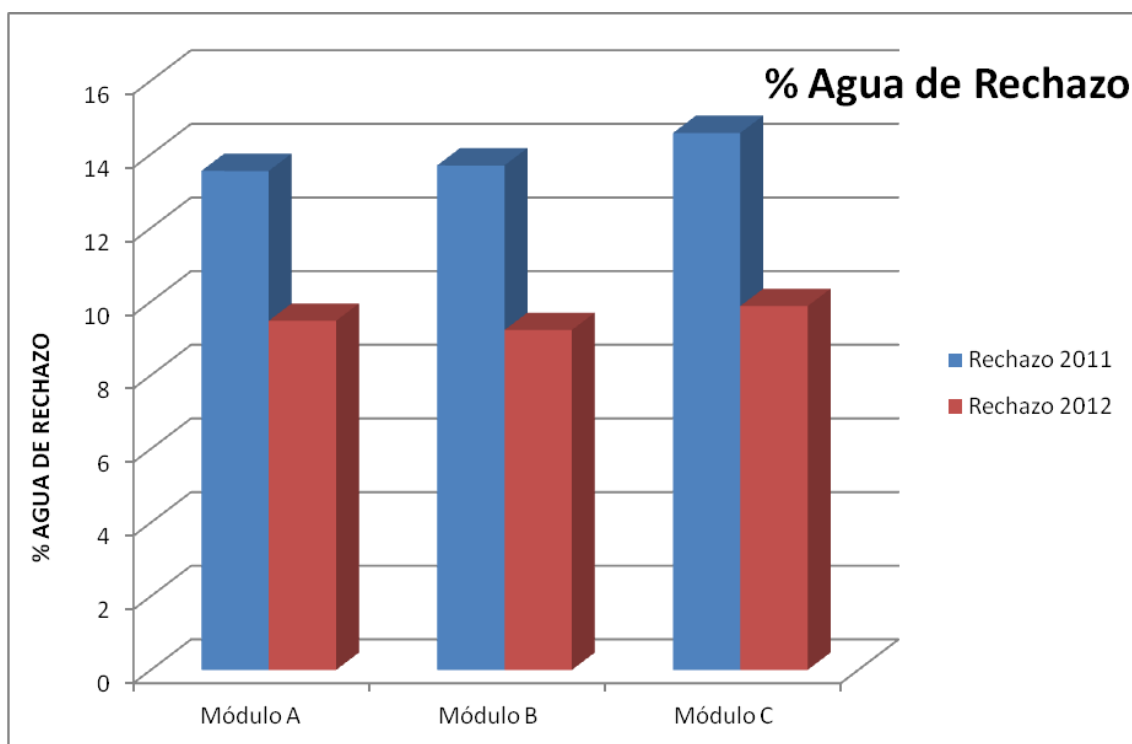
En primer lugar, en la Figura 36 se representa el rendimiento de cada módulo antes y después de la optimización.



**Figura 36. Rendimientos 2011 y 2012**

El incremento del rendimiento que han experimentado los módulos son muy significativos, hasta aumentar en 4 % el valor del rendimiento en el caso del módulo A.

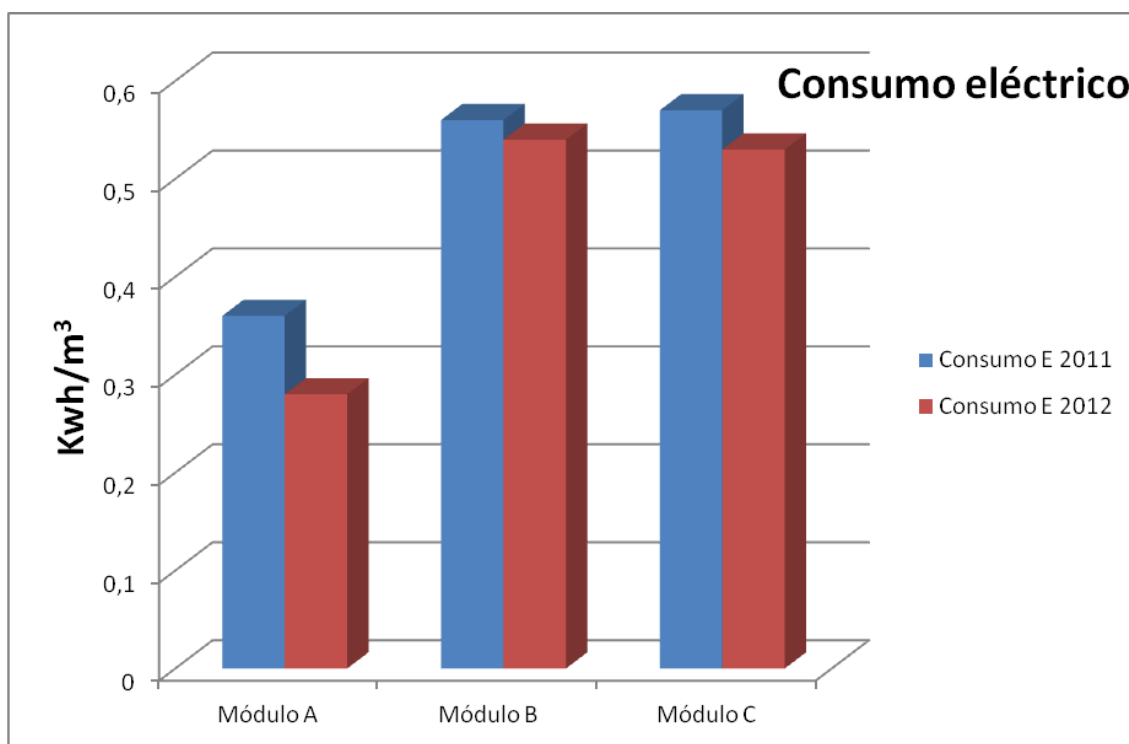
Respecto al porcentaje de agua de rechazo, los cambios se recogen en la Figura 37.



**Figura 37. Porcentaje agua de rechazo 2011 y 2012**

Los niveles de rechazo que se consiguen en 2012 han sido significativamente menores a los de 2011 hasta conseguir disminuir el porcentaje de agua de rechazo hasta un 4%, consiguiendo el compromiso medio ambiental y el ahorro económico esperado por parte de la compañía.

El otro parámetro de interés es el consumo eléctrico, en la Figura 38 se comparan los consumos que de cada módulo antes y después de la optimización.



**Figura 38. Consumo eléctrico 2011 y 2012**

El consumo eléctrico disminuye en todos los módulos como consecuencia de su mayor productividad. Sobre todo en el módulo A donde el consumo se reduce hasta un 0,08 Kwh/m<sup>3</sup>.

A continuación se recoge (Tabla 16) los principales resultados de 2012 y se comparan con los datos de 2011. Para ser más precisos se compararán los volúmenes acumulados correspondientes a los meses de Marzo, Abril y Mayo de cada año.

**Tabla16. Condiciones de trabajo de la planta de EDR optimizada**

Planta EDR	Año 2011	Año 2012
Alimentación (m <sup>3</sup> )	308.945	277.119
Producto (m <sup>3</sup> )	266.358	250.526
Rechazo (m <sup>3</sup> )	42.587	29.306
% Rendimiento	86,21	90,40
% Rechazo	13,79	9,60

Tras esta mejora en los módulos, los resultados muestran un claro ahorro en volumen de agua y una mejora muy significativa en cuanto a rendimientos y rechazo. Esta disminución en el porcentaje del agua de rechazo supone un mejor compromiso con el medio ambiente y un beneficio económico para la empresa.

Dicho beneficio económico se puede estimar a partir del ahorro de agua, de forma que teniendo en cuenta el precio del metro cúbico se calculará el importe que supondría para la compañía si su suministro de agua proviniese de la red de abastecimiento de agua.

Teniendo en cuenta que en 2011 el volumen de agua de rechazo fue de 42.587 m<sup>3</sup> y en 2012 ha sido de 29.306 m<sup>3</sup>, se ha ahorrado un total de 13.281 m<sup>3</sup>, teniendo en cuenta el precio del agua de 0,313 euros/m<sup>3</sup>, esto supondría un ahorro de 4156,95 euros, siendo el coste específico del agua 0,017 euros/m<sup>3</sup>.

## **5. CONCLUSIONES**

La valoración global de este Trabajo Final de Máster es que se ha conseguido el objetivo principal, que consistía en la optimización de los módulos de EDR de Heineken.

Tras una serie de valoraciones técnicas sobre el plan de actuación, se decidió actuar sobre el volumen de aportación de agua en los módulo de EDR de la planta de aguas de Heineken.

De manera que partiendo de un histórico de datos de la planta y una primera toma de decisiones sobre los planes de actuación, se determinó el plan de actuación para mejorar los rendimientos de los módulos y reducir el porcentaje de agua de rechazo. Las mejoras implican un beneficio económico y medio ambiental muy importante para la compañía.

Mediante las modificaciones llevadas a cabo se ha conseguido aumentar el rendimiento, disminuir el rechazo y disminuir el consumo eléctrico de la planta de EDR, de manera que se parte de un valor promedio del rendimiento en 2011 del 86,06% alcanzando tras la optimización un valor del rendimiento del 90,4%, respecto al rechazo se parte de un

valor promedio en 2011 del 13,94% y se alcanza un nuevo valor del 9,6%, y finalmente el consumo eléctrico de la planta de EDR era en 2011 de 0,497 Kwh/m<sup>3</sup> y tras la optimización resulta ser del 0,450 Kwh/m<sup>3</sup>.

Estas mejoras han supuesto un ahorro de 13.281 m<sup>3</sup> de agua en la planta de EDR y un ahorro económico estimado de 4156,95 euros. En estos beneficios económicos habría que tener en consideración que los ciclos de limpieza de los módulos serán más frecuentes para mantener la vida útil de las membranas, y este sería un coste a considerar.

En conclusión, la mejora realizada ha aportado un gran beneficio tanto medio ambiental como económico.

Como líneas futuras de trabajo para seguir aumentando estos beneficios serían las planteadas en el inicio de este estudio, aunque el reciclado del producto fuera de normas (*Off-Spec*) sería una de las mejores futuras líneas de trabajo.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Fundación Instituto Euro mediterráneo del Agua. “Desalación de aguas”. Aspectos tecnológicos, Medioambientales, Jurídicos y Económicos. 2010.

Veza, J.M. “Introducción a la desalación de aguas”. Universidad de las Palmas de Gran Canaria. Vicerrectorado de I+D+i. Consejo Insular de agua de Gran Canaria. 2002.

[1] R. K. Nagarale; G.S Gohil; Vinod K.Shahi. Advances in Colloid and Interface Science. Vol (119). pp 97-130 (2005). “Recent developments on ion-exchange membranes and electro-membrane processes”

[2] H. Strathmann. Desalination. Vol. (264). pp 268-288 (2012). “Electrodialysis, mature technology with a multitude of a new applications”

[3] Ionics Inc. Feature article (2004). “Membrane technology benefits the food processing industry”

[4] Ley 31/1995, de 8 de Noviembre, de Prevención de Riesgos Laborables

[5] Ficha de Seguridad del ácido clorhídrico. <http://pub.panreac/msds/ESP/1023.Htm> (6/7/2012)

[6] Ficha de Seguridad del hidróxido potásico. <http://pub.panreac/msds/ESP/1517.Htm> (6/7/2012)

[7] Ficha de Seguridad del EDTA. <http://pub.panreac/msds/ESP/1026.Htm> (6/7/2012)

[8] Ficha de Seguridad del nitrato de plata. <http://pub.panreac/msds/ESP/1464.Htm> (6/7/2012)

[9] Ficha de Seguridad del dicromato potásico. <http://pub.panreac/msds/ESP/1499.Htm> (6/7/2012)

## 7. NOMENCLATURA

KPI: hectolitro de agua consumida/hectolitro de cerveza producida.

ppm: partes por millón (mg/l)

ED: electrodiálisis

C.C: Corriente continua

EDR: Electrodiálisis reversible

Off-Spec: Fuera de especificaciones

Set Point: Valor de consigna

°HF: Grados Frnaceses (mg CaCO<sub>3</sub>/l)

X: porcentaje de rendimiento

Q: caudal m<sup>3</sup>/d

M1: muestra 1

M2: muestra 2

M3: muestra 3

Pe: Presión de entrada (Kg/cm<sup>2</sup>)

Ps: Presión de salida (Kg/cm<sup>2</sup>)

Pa: Presión de alimento (Kg/cm<sup>2</sup>)

Qa: Caudal de alimentación (m<sup>3</sup>/d)

V: Volumen (ml)