



UNIVERSIDAD DE MURCIA

DEPARTAMENTO DE QUIMICA - FISICA

**“Caracterización, evaluación y optimización de una
planta de desalación por Electrodiálisis Reversible”**

D. Ramón Valerdi Pérez

1999

Capítulo 4

MATERIALES Y METODOS

SUMARIO: 4.1.Introducción. 4.2.Materiales. 4.3.Metodo de Operación de la Planta.

4.1. INTRODUCCION

El objeto del diseño, operación y optimización de una planta piloto EDR debe ser la total reproducibilidad, a una escala superior, de todos los parámetros de la misma, es decir, se debe mantener el mismo tipo de membranas, el mismo número de etapas hidráulicas y el mismo número de etapas eléctricas, utilizándose la capacidad de producción requerida para el posterior dimensionamiento de bombas, tuberías, válvulas, etc., así como número de etapas o grupos dispuestos en serie, de acuerdo con la cantidad de sales a eliminar.

El empleo de etapas hidráulicas adicionales proporciona una disminución en el contenido salino del agua producto, con respecto al agua de alimentación, ya que se admite por los fabricantes que en cada etapa hidráulica se produce una reducción de entre un 40 y un 50% del contenido salino del agua de alimentación a dicha etapa. Por

otra parte, se emplean las etapas eléctricas para ejercer un control de la corriente eléctrica empleada para la eliminación de sales. La cantidad de corriente necesaria para transferir una cantidad de sales específica viene determinada por la Ley de Faraday, mientras que las necesidades de voltaje vienen controladas por la Ley de Ohm.

Si la planta piloto EDR utiliza un solo grupo de membranas (una etapa hidráulica y otra eléctrica) y el proceso de evaluación y optimización contempla la obtención del máximo ahorro de agua, la recirculación e inversión de polaridad no proporcionan información real ni completa sobre la operación de la futura planta que se va a diseñar a una escala superior. Este hecho ocurre porque en la planta piloto EDR el consumo energético que se produce y la elevada concentración salina de la corriente de concentrado a recircular, para simular los sistemas de alta recuperación (máximo ahorro de agua), como se verá posteriormente, producen un consumo energético superior al esperado. Sin embargo, el consumo que se produce en la operación de la planta diseñada a mayor escala es menor, ya que se puede efectuar una mayor dilución del contenido salino del agua de desecho a recircular. En un sistema EDR todas las etapas hidráulicas deben invertir la polaridad al mismo tiempo.

La mayoría de los estudios piloto EDR se deben realizar, de acuerdo con la capacidad de la planta, en un periodo de tiempo de entre 500 a 2000 h de funcionamiento, con el objeto de generar una base de datos sobre la eficiencia del proceso y características de la operación. Durante éste periodo de tiempo se recogen los datos de amperaje y voltaje aplicables a cada etapa, siendo fundamentales en la posterior monitorización del sistema. Así, por ejemplo, si para obtener un determinado porcentaje de eliminación de sales, es necesario un aumento de voltaje, puede ser indicativo de un aumento de la resistencia de la pila debido a la aparición de incrustaciones o de ensuciamiento de membranas.

La operación de una planta ED/EDR requiere el control de determinados parámetros experimentales, que son:

A) pH y Caudal en:

- Agua de alimentación.
- Corriente de diluido.
- Corriente de concentrado.
- Corriente de recirculado.

- Corriente del lavado de electrodos.

B) Presión en:

- Corriente de alimentación.
- Corriente de diluido.
- Corriente de concentrado.

C) Temperatura en:

- Agua de alimentación.

D) Parámetros Eléctricos:

- Voltaje y amperaje aplicado a cada etapa.

E) Conductividad en:

- Agua de alimentación.
- Corriente de diluido.
- Corriente de concentrado.
- Corriente de recirculado.

F) Calidad de Agua en:

- Corriente de alimentación.
- Corriente de diluido.
- Corriente de concentrado.

4.2. MATERIALES

El sistema de operación de la planta (Figura 4.1) está constituido por los siguientes materiales:

- **Depósitos.** Cuatro depósitos de alimentación, con un total de 1200 litros de capacidad, un depósito para la recogida de desecho, (300 litros de capacidad) y otro para la recogida de producto (300 litros de capacidad), que también se emplea como tanque de mezclado de agua producto y desecho, cuando es necesario la reutilización como agua de alimentación para ahorro de consumo. Todos los depósitos son de fibra de vidrio (Figura 4.2).
- **Depósito desaireador.** Se emplea para la recogida del agua de lavado de electrodos. Consta de un pequeño bidón de plástico de unos 10 litros de capacidad, en cuya entrada se sitúa una trompa de vacío que succiona aire para favorecer el desprendimiento de los gases provenientes de los compartimentos electródicos; éste

depósito no se llena, sino que conforme cae el agua, ésta pasa al desagüe quedando los gases en la parte superior del mismo de donde son evacuados al exterior.

- **Tuberías.** Las de conducción son de PVC, de diámetros de media y una pulgada, y las de conexión a la pila y al depósito desaireador son de goma reforzada.
- **Llaves reguladoras.** Son llaves de esfera de PVC con diámetro acorde con la tubería.
- **Bombas.** Se emplearon dos bombas de 0,52 C.V. de potencia, marca GRUNDFOS, tipo CHI-2. Una para alimentación y otra para recirculación y permiten el inyectado de líquidos a presión, hasta 3 atm.
- **Filtro de cartucho.** De 5 μm para filtrado del agua de alimentación.
- **Rotámetros.** Son de flotador, uno de escala 0-150 l/h, para medir el caudal del agua de alimentación, dos de escala 0-100 l/h, para medir los caudales de producto y desecho y otro de escala 0-50 l/h, para medir el caudal de recirculación de desecho.
- **Electroválvulas.** Cuatro, de PVC, situadas a la entrada de la pila, dos en cada canal de alimentación, son del tipo de las empleadas en las instalaciones de riego por goteo. Dos válvulas motorizadas de tres vías de cuerpo de acero inoxidable, situadas a la salida de la planta. Tanto unas como otras cambian para conmutar canales de producto y desecho sincrónicamente con los cambios de polaridad. Tanto las válvulas motorizadas como las electroválvulas pueden funcionar de forma manual y automática.
- **Manómetros.**
 - Dos de escala 0 - 5 atm, situados, uno a la salida de la bomba de alimentación, otro a la salida de la bomba de recirculación.
 - Dos de escala 0 - 4 atm, uno antes y otro después del filtro de cartuchos.
 - Dos de escala 0 - 2 atm, uno a la entrada de cada canal de alimentación a la pila.
 - Dos de escala 0 - 2 atm, situados, uno a la salida del canal de producto y otro en la del canal de desecho.
 - Uno de escala 0 - 2 atm, situado a la entrada de la corriente de lavado de electrodos.
- Transmisor de presión, instalado para el control informatizado de la presión de entrada a la pila, situado a la entrada de alimentación a la planta, marca DESIN Instruments, modelo TPN-12.

- **pH-metro digital.** Con transmisor de medida marca DESIN Instruments, modelo TPH-3659, situado a la salida del canal de desecho.
- **Pila EDR.** Marca IONICS® tipo Aquamite I, con seis etapas hidráulicas y dos eléctricas (Figura 4.3). Las características técnicas de la pila se recogen en la Tabla 4.1. Su esquema el correspondiente a circulación de fluidos se han mostrado en las Figuras 3.4 y 3.5.

Tabla 4.1

Características técnicas de la pila EDR

Tipo	Filtro - prensa	Ionics® Aquamite I
Pila EDR	Número	1
	Membranas intercambiadoras	100 celdas electrodiálíticas/pila
	Tamaño de las membranas	23 cm x 25,5 cm ²
	Espaciador MK I	Espesor: 1 mm
		Longitud del canal de flujo: 348 cm
	Area efectiva de membrana	220 cm ²
	Etapas eléctricas	2
Etapas hidráulicas	3 / etapa eléctrica	
Condiciones de operación	Velocidad de flujo de agua en la pila	2 – 7 cm/s
	Densidad de corriente (mA/cm ²)	Etapas I: 2 – 9
		Etapas II: 2 – 5
	Rango de presión	0,4 – 2,0 atm
Rango de voltaje (en cada etapa)	30 – 110 V	
Agua de alimentación estándar	Sal	Cloruro de sodio
	Concentración	Baja salinidad: 3330 mg/l
		Media salinidad: 7190 mg/l
Temperatura	Entrada: 20°C	
	Salida: 20 – 25°C	

- **Cuadro de control y maniobra** (Figura 4.4). Consta de los siguientes elementos:
 - Interruptor de puesta en marcha de la bomba de alimentación (1).
 - Interruptor de puesta en marcha de la bomba de recirculación (2).
 - Interruptor que conmuta el funcionamiento manual o automático del sistema eléctrico de la planta (3).
 - Interruptor para cambio de polaridad cuando se opera la planta en funcionamiento manual (4).
 - Controles de accionamiento manual de la primera válvula motorizada (5).
 - Controles de accionamiento manual de la segunda válvula motorizada (6).
 - Potenciómetro que permite fijar el voltaje aplicado a la primera etapa eléctrica de la pila (7).
 - Pantalla de visualización de la intensidad aplicada a la primera etapa eléctrica de la pila (8).
 - Pantalla de visualización del voltaje seleccionado para la primera etapa eléctrica de la pila (9).
 - Potenciómetro que permite fijar el voltaje aplicado a la segunda etapa eléctrica de la pila (10).
 - Pantalla de visualización de la intensidad aplicada a la segunda etapa eléctrica de la pila (11).
 - Pantalla de visualización del voltaje seleccionado para la segunda etapa eléctrica de la pila (12).
 - Temporizador electrónico (modelo XTD100) que permite la selección de los tiempos de inversión de polaridad en las dos etapas eléctricas de la pila cuando se opera en modo automático (13).
 - Interruptor de inicio de los ciclos de inversión de polaridad de la pila cuando se opera en modo automático (14).
 - Interruptor de parada de los ciclos de inversión de polaridad de la pila cuando se opera en modo automático (15).
 - Señal visual (luz roja) indicativa de la falta de agua en los depósitos de alimentación. Actúa tanto en modo de funcionamiento manual como automático. Si se activa, se produce la desconexión de la bomba de alimentación (16).

El cuadro de control y maniobra permite la lectura, para cada etapa eléctrica de la pila, de la intensidad y el voltaje. En él se encuentra un potenciómetro para la primera etapa eléctrica y otro para la segunda, que posibilitan la selección del voltaje aplicado a cada una de ellas. El cuadro de control y maniobra permite el control sincronizado de las electroválvulas de entrada de alimentación a la pila y de las válvulas motorizadas de salida de producto y desecho de la misma, así como, el control de los tiempos de inversión de polaridad. También contiene las conexiones para la toma de datos informatizada de los voltajes e intensidades para cada etapa eléctrica, de la presión de entrada de alimentación a la pila y del pH de recirculación de desecho.

- **Conductivímetro.** Marca WTW, modelo LF-539, para determinación manual, mediante estudio de muestras de las conductividades del agua de alimentación, producto y desecho.
- **Sistema de adquisición de datos.** Consta de los siguientes elementos:
 - Cuatro acondicionadores de señal, DESIN Instruments, modelo PM-311, destinados a traducir una variable eléctrica en una señal eléctrica proporcional, aislada galvánicamente de la entrada, y enviarla al medidor o controlador.
 - Un módulo de adquisición de señales analógicas y digitales, DESIN Instruments, modelo DAS-8000 (Figura 4.5). Este módulo puede funcionar de forma autónoma o supervisada desde un ordenador. Admite hasta 8 entradas analógicas configurables (Pt-100, 0..4/20 mA, 0..10/50 mV) y 8 tipos distintos de termopares provenientes de convertidores 0..4/20 mA, no linealizados. Además, dispone de 8 entradas digitales para capturar datos lógicos (pulsadores de reconocimiento de alarmas, contactos, detectores de proximidad, etc.) y de 8 salidas digitales, pudiendo ser utilizadas como salidas de alarmas de las entradas analógicas, o gobernadas por medio de mando remoto por comunicación con la unidad central (Figura 4.6). Dispone de frontal extraíble con display y teclado para monitorizar las medidas (Figura 4.7). Se comunica con el ordenador de control con un puerto en serie RS-232 (Figura 4.8).
- **Sistema informático.** Ordenador con software PROASIS® DAS-Win para gestión de datos y medidas adquiridas por el modulo DAS-8000. Gestiona alarmas, históricos, registradores gráficos y sinópticos. Esta organizado por menús y cada

una de sus ventanas posee un tipo de utilidad y/o visualiza la información de forma diferente.

- **Sistema de análisis de agua.** Se efectuó mediante electroforesis capilar, empleando un equipo marca Waters, con software de control Millennium 2010 (ver Apéndices 1 y 2). En la Figura 4.9 se aprecia una vista completa del equipo que incluye el analizador iónico, el ordenador y la impresora, mientras que un detalle del compartimento del analizador iónico aparece en la Figura 4.10

4.3. METODO DE OPERACION DE PLANTA

El diagrama de flujo de la planta aparece reflejado en la Figura 4.11. Antes de iniciar el proceso de alimentación a la pila, ésta debe estar húmeda con el fin de que membranas y separadores se compacten, para evitar pérdidas de agua por los laterales de la misma cuando este en funcionamiento. También se tiene que realizar la medida de la conductividad del agua de alimentación con el conductivímetro.

La bomba de alimentación se pone en marcha mediante el interruptor correspondiente situado en el cuadro de control y maniobra. La alimentación se inicia aumentando gradualmente la presión hasta un valor de 3 atm. La presión de alimentación se mantiene en éste valor hasta la total desaireación de todas las tuberías exteriores y conductos interiores de la pila, así como, de los compartimentos de lavado de electrodo. Esta operación se lleva a cabo por un tubo de desaireación colocado en la parte superior de la instalación. Durante la operación de desaireación de la planta no se aplica ningún voltaje a la pila y las corrientes de salida de la pila están conectadas al tanque de mezclado, del cual se vuelve a elevar el agua a los depósitos de alimentación. La duración de éste proceso es de unos 15 minutos aproximadamente.

Transcurrido éste tiempo se baja la presión de alimentación, poco a poco, hasta el valor deseado, esperando unos 5 minutos a la estabilización del caudal de alimentación. En éste instante se produce el encendido del sistema de adquisición de datos, mediante la conexión del ordenador con el software de control, produciéndose la toma de datos en intervalos de 30 segundos. Llegados a éste punto se puede operar de tres modos diferentes que se detallan a continuación, de acuerdo con los procesos de trabajo que se persiguen.

4.3.1 Funcionamiento sin inversión de polaridad

Si se trabaja sin inversión de polaridad, las cuatro electroválvulas situadas a la entrada de la pila permanecerán abiertas y entrará agua de alimentación por los dos conductos de entrada de la misma, mientras que, las dos válvulas motorizadas de salida estarán en una posición tal que enviarán la corriente de salida de producto y la de desecho al tanque de mezclado, para proceder a su elevación al depósito de alimentación. En ésta situación se inicia la aplicación del voltaje deseado, de igual valor para cada etapa eléctrica, cuyas cuantías se fijan mediante dos potenciómetros (uno para cada etapa), de forma simultánea y paulatina, sin subidas bruscas, que puedan provocar excesos de tensión que dañarían las membranas (por ejemplo, podrían quemarse). Este voltaje se mantiene constante con ayuda de los potenciómetros, al valor adecuado, para todo el proceso de barrido de presiones, durante toda la experiencia.

4.3.2 Funcionamiento con inversión de polaridad

Si se trabaja con inversión de polaridad, hay que efectuar previamente la programación de los ciclos de inversión cada 15 minutos (ver 5.1.3), con ayuda del temporizador situado en el cuadro de control y maniobra.

En la Figura 4.11 se observan las cuatro electroválvulas colocadas a la entrada de la pila (dos por cada conducto de alimentación de la misma) que permanecerán abiertas, para posibilitar la entrada de agua por los dos conductos de alimentación de la pila. Las dos válvulas motorizadas, situadas a la salida de la pila, se hallan sincronizadas en una posición tal que, canalizan la corriente de salida de producto y de desecho siempre por las mismas conducciones independientemente de la polaridad aplicada a la pila. Estas corrientes de producto y desecho se descargarán en sus respectivos depósitos, o bien, serán enviadas al tanque de mezclado para proceder a su elevación al depósito de alimentación.

En éste punto se conecta el programador temporal de inversiones, situado en el cuadro de control y maniobra, empezando a transcurrir el tiempo de los ciclos de inversión de polaridad. Simultáneamente a la conexión del programador de inversiones, se selecciona con ayuda de los dos potenciómetros, el voltaje que se ha de aplicar a las dos etapas eléctricas de la pila (el mismo para ambas etapas). Este voltaje se mantiene

constante, al valor seleccionado, para todo el proceso de barrido de presiones, durante toda la experiencia.

4.3.3 Funcionamiento con inversión de polaridad y recirculación

Como ya se ha indicado la inversión de polaridad requiere efectuar previamente la programación de los ciclos de inversión cada 15 minutos (ver 5.1.3). En cada ciclo de inversión de polaridad, de las cuatro electroválvulas situadas a la entrada de la pila (Figura 4.11), dos de las conectadas con uno de los dos canales de alimentación de la pila permanecerán abiertas, mientras que, de las otras dos que están conectadas con el otro canal, estarán una abierta y la otra cerrada. Con ésta disposición de las electroválvulas entra agua por los dos conductos de alimentación de la pila. Cuando se conecte la recirculación de desecho, ésta corriente entrará por el canal que contenga las dos electroválvulas abiertas, según el modo de inversión de polaridad en el que este la pila. Las dos válvulas motorizadas de salida se encuentran sincronizadas de la misma forma que en el caso anterior, descargándose la corriente de salida de producto y la de desecho en sus depósitos respectivos.

En ésta situación se procede a la conexión del programador temporal de inversiones, a la vez que se inicia de la aplicación del voltaje deseado (el mismo para las dos etapas eléctricas de la pila) con ayuda de los dos potenciómetros situados en el cuadro de control y maniobra. Este voltaje permanece constante, al valor adecuado, para todo el proceso de barrido de presiones, durante toda la experiencia.

Cuando se haya recogido en el tanque de desecho la cantidad suficiente (transcurrida una hora aproximadamente), desde el cuadro de control y maniobra se conecta la bomba de recirculación de desecho y se regula su presión de entrada a la planta para obtener un caudal máximo de 18 l/h, que no se puede superar debido a las limitaciones de diseño de la pila.

Cuando hay inversión de polaridad (15 minutos) se toman muestras para la medida de conductividades, de producto y desecho, transcurridos de 3 a 5 minutos del cambio de polaridad. Cuando la inversión de polaridad no tiene lugar, el muestreo se efectúa cada 15 minutos, para cada voltaje de trabajo aplicado, empezando a contar el tiempo al cabo de 3 a 5 minutos de fijar el mismo.

El tiempo total de funcionamiento de la planta durante las todas las experiencias de evaluación realizadas fue de 500 horas.

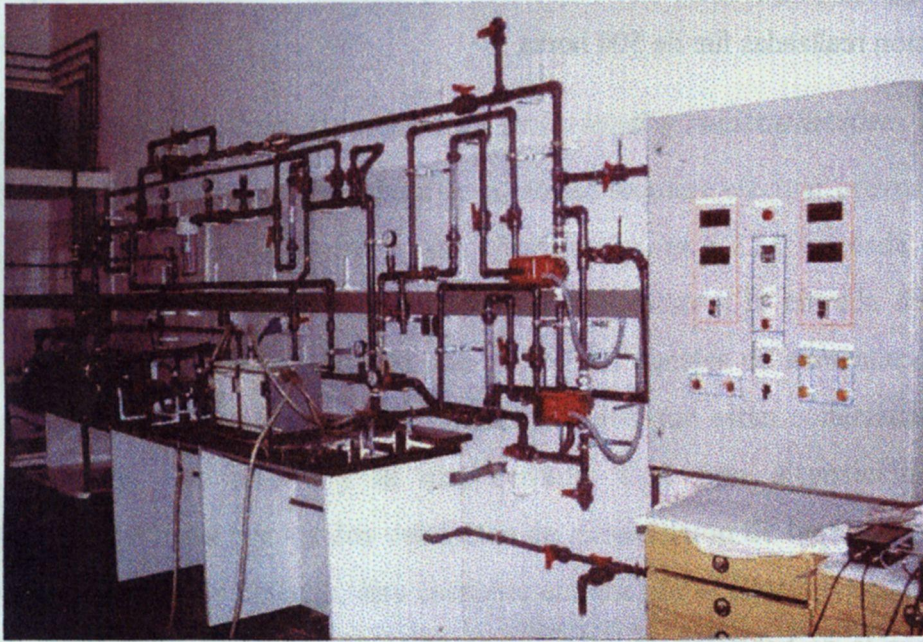


Figura 4.1
Vista general de la planta.



Figura 4.2
Depósitos, de desecho conectado a la bomba de recirculación, y de producto y mezcla conectado a la bomba de elevación a los depósitos de alimentación.

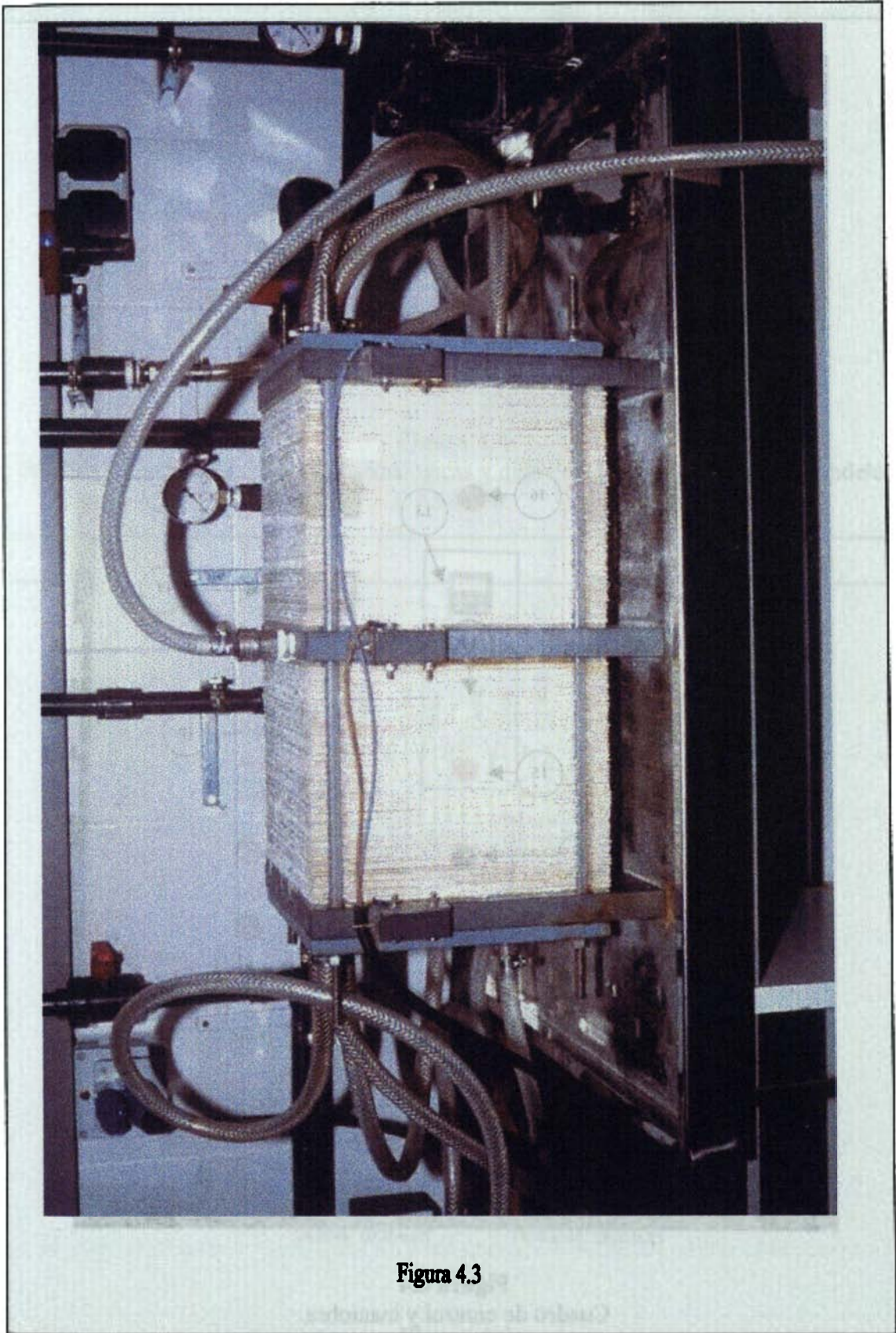


Figura 4.3

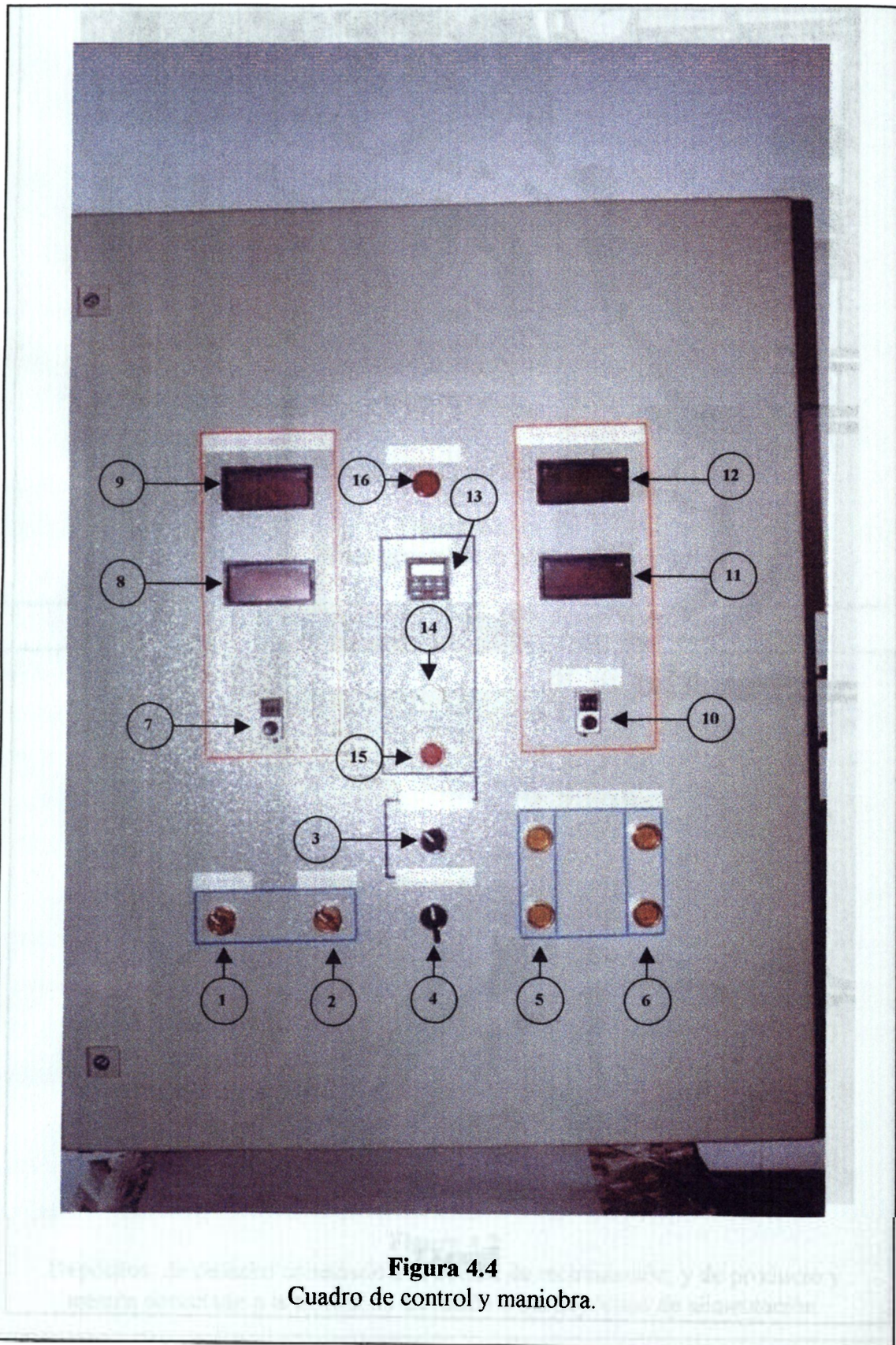


Figura 4.4
Cuadro de control y maniobra.

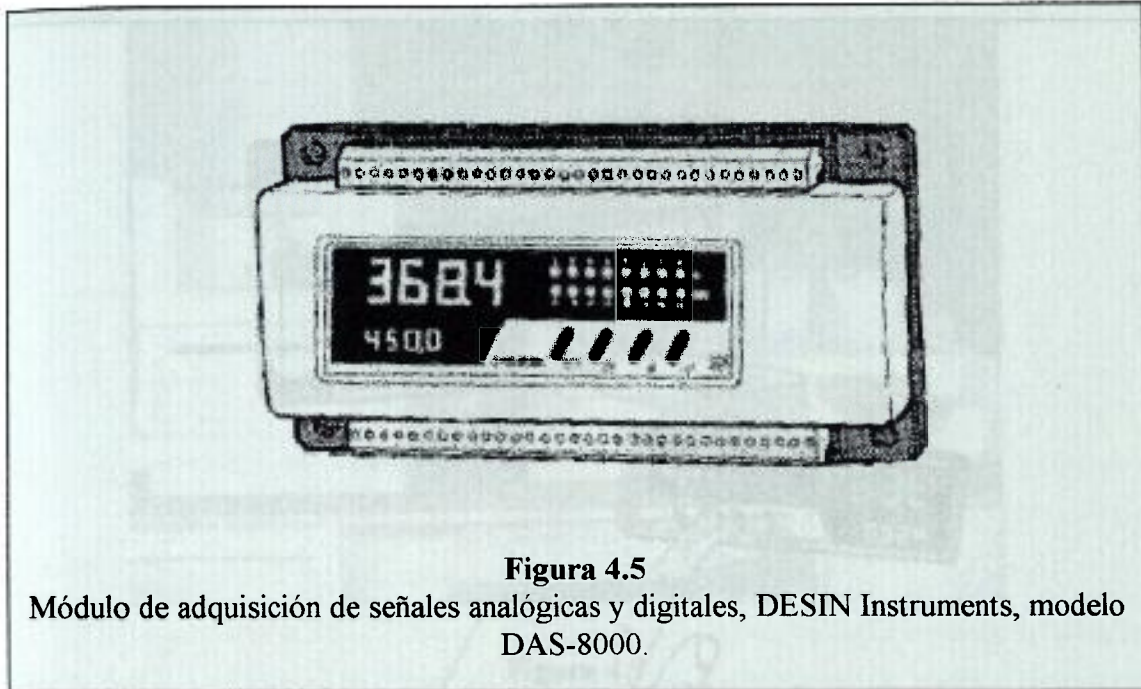


Figura 4.5
Módulo de adquisición de señales analógicas y digitales, DESIN Instruments, modelo DAS-8000.

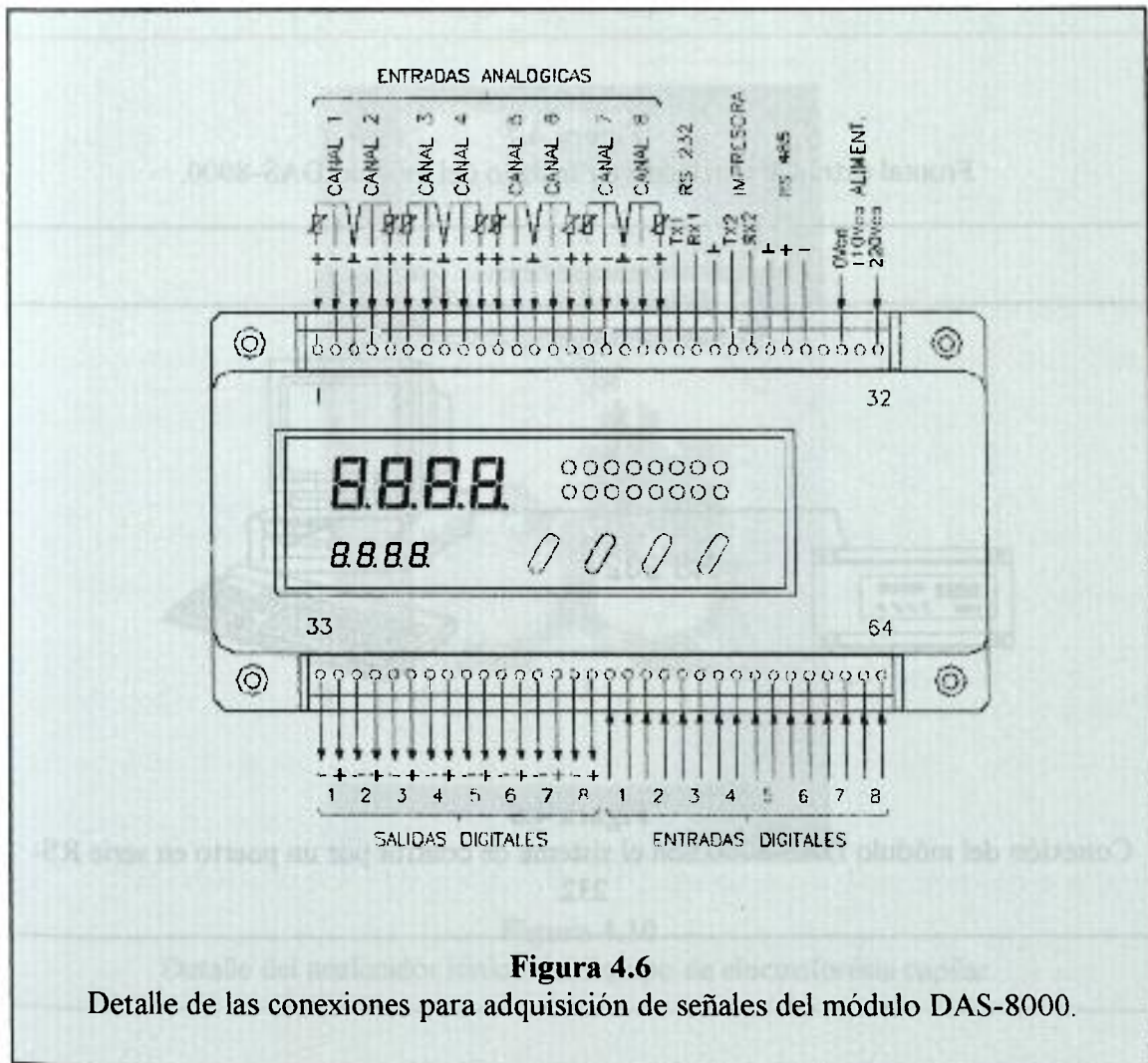
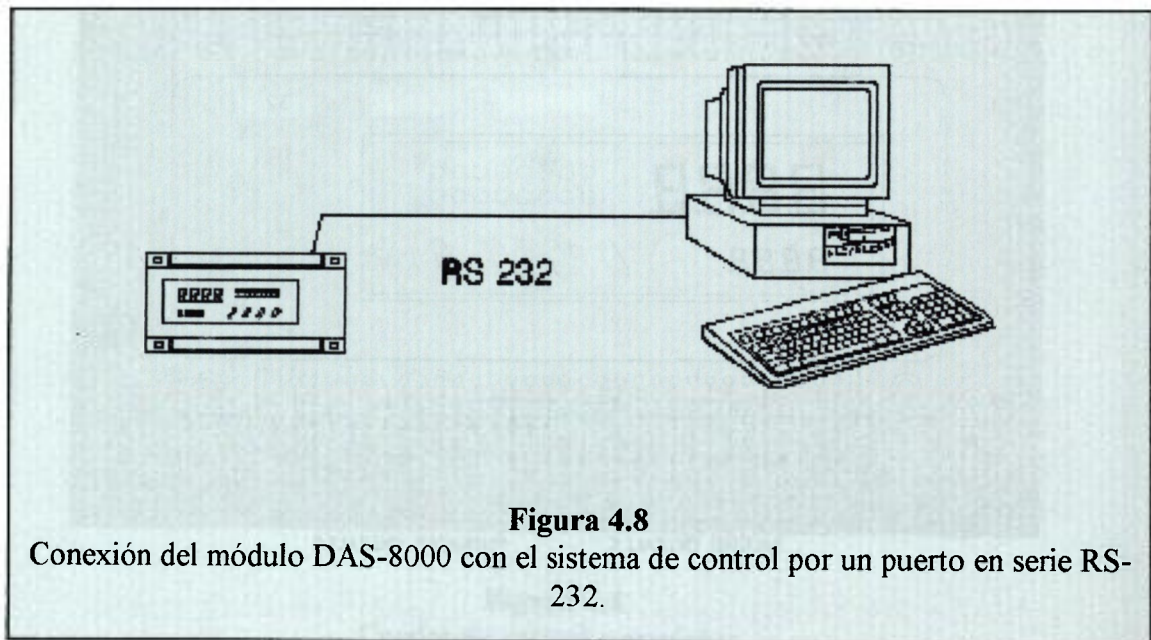
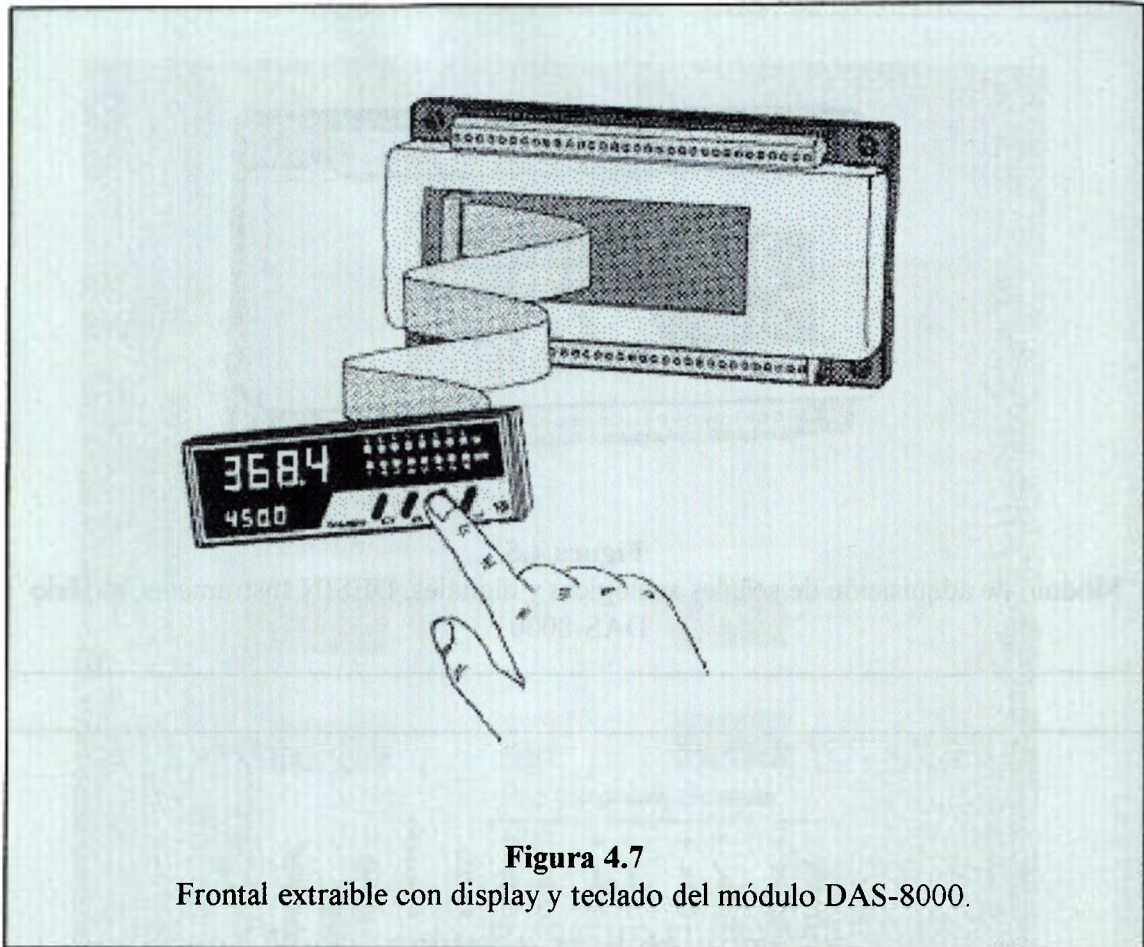
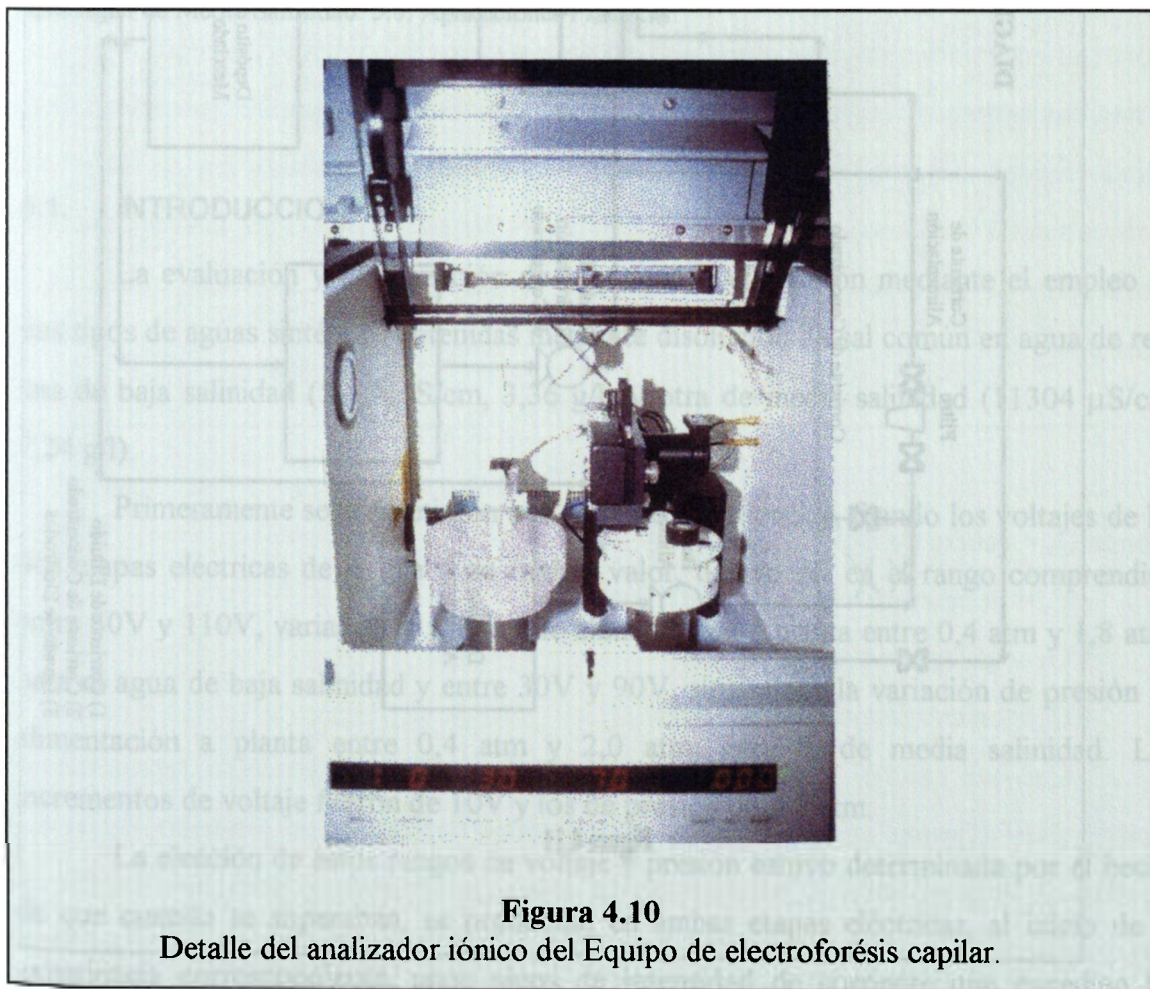
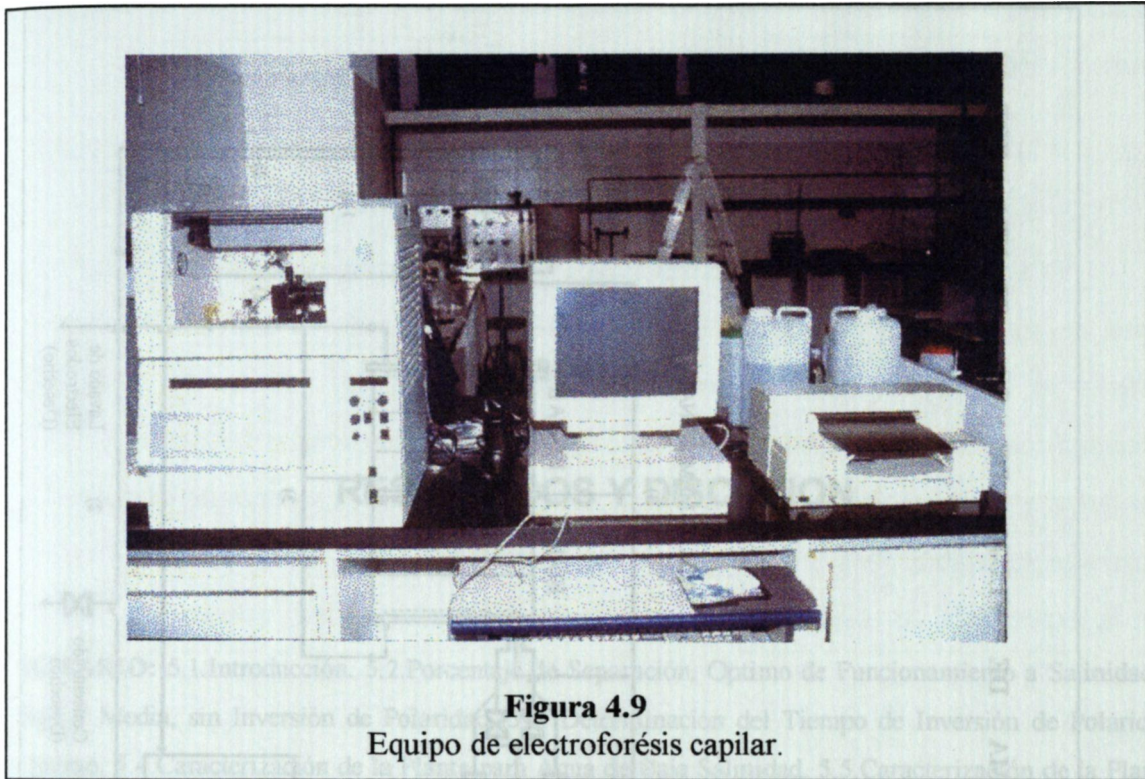


Figura 4.6
Detalle de las conexiones para adquisición de señales del módulo DAS-8000.





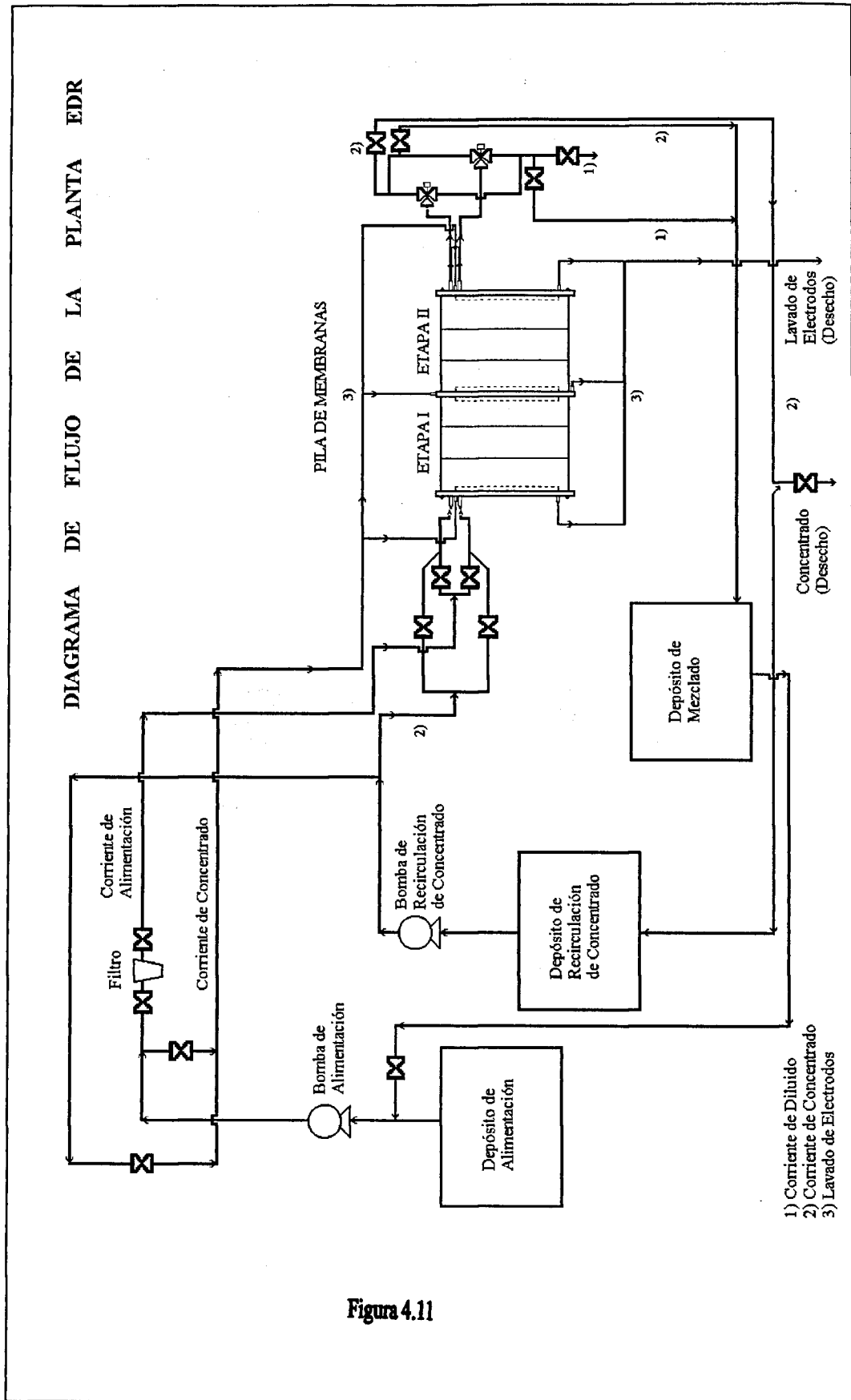


Figura 4.11

Capítulo 5

RESULTADOS Y DISCUSION

SUMARIO: 5.1.Introducción. 5.2.Porcentaje de Separación, Optimo de Funcionamiento a Salinidades Baja y Media, sin Inversión de Polaridad. 5.3. Determinación del Tiempo de Inversión de Polaridad Optimo. 5.4.Caracterización de la Planta para Agua de Baja Salinidad. 5.5.Caracterización de la Planta para Agua de Media Salinidad. 5.6. Aplicaciones Prácticas.

5.1. INTRODUCCION

La evaluación y optimización de la planta se efectuaron mediante el empleo de dos tipos de aguas sintéticas obtenidas mediante disolución de sal común en agua de red: una de baja salinidad ($5247 \mu\text{S/cm}$, $3,36 \text{ g/l}$) y otra de media salinidad ($11304 \mu\text{S/cm}$, $7,24 \text{ g/l}$).

Primeramente se acometieron una serie de experiencias, fijando los voltajes de las dos etapas eléctricas de la pila a un mismo valor, dentro del ~~en el~~ rango comprendido entre 30V y 110V, variando la presión de alimentación a planta entre 0,4 atm y 1,8 atm, para el agua de baja salinidad y entre 30V y 90V, situándose la variación de presión de alimentación a planta entre 0,4 atm y 2,0 atm, para la de media salinidad. Los incrementos de voltaje fueron de 10V y los de presión de 0,2 atm.

La elección de éstos rangos de voltaje y presión estuvo determinada por el hecho de que cuando se superaban, se producían en ambas etapas eléctricas, al inicio de la experiencia correspondiente, unos picos de intensidad de corriente que excedían las

características de diseño, que fija unos límites de tolerancia para la misma de 10A en la primera etapa eléctrica y de 5A en la segunda.

5.2. PORCENTAJE DE SEPARACION. OPTIMO DE FUNCIONAMIENTO A SALINIDADES BAJA Y MEDIA, SIN INVERSION DE POLARIDAD

El sistema se opera sin recirculación y sin inversión de polaridad, suministrando agua de alimentación para el sistema de lavado de electrodos a una presión 0,1 atm inferior a la de alimentación de planta, registrándose los valores del caudal de alimentación, caudal de producto y caudal de desecho, así como las conductividades de producto y desecho, mediante la toma de muestras cuando los valores de intensidad de corriente se estabilizaban, lo que ocurría transcurridos 2 o 3 minutos desde el comienzo de la experiencia correspondiente. Los valores de conductividad, que corresponden al STD, se transforman en concentraciones mediante la expresión [Standart Methods - 1995]:

$$\text{Concentración} = \text{Conductividad} \times 0,64 \quad (5.1-1)$$

donde la concentración viene expresada en ppm y la conductividad en $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los datos obtenidos aparecen recogidos en las Tablas 5.1 a 5.16 y corresponden a los valores de conductividad de producto, conductividad de desecho, concentración de producto, concentración de desecho, caudal de alimentación, caudal de producto, caudal desecho y porcentaje de separación. El porcentaje de separación, %S, se define mediante la ecuación:

$$\%S = \left[1 - \frac{Q_p \times C_p}{Q_a \times C_a} \right] \times 100 \quad (5.1-2)$$

donde Q_a = caudal de alimentación.

C_a = concentración de alimentación.

Q_p = caudal de producto.

C_p = concentración de producto.

Con los valores dados en las Tablas 5.1 a 5.16 se efectúa la representación gráfica tridimensional correspondiente al porcentaje de separación obtenido, frente a la presión de alimentación y al voltaje aplicado. Las representaciones gráficas obtenidas son las correspondientes a la Figura 5.1 para baja salinidad y a la Figura 5.2. para media salinidad.

Tabla 5.1
Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 30 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)						
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,80
Conductividad producto: Cd(p) (μS/cm)	2814,75	2180,75	1325,75	942,00	862,00	899,25	1036,25
Conductividad desecho: Cd(d) (μS/cm)	7621,01	8657,41	9792,00	10503,86	10508,24	10626,96	10891,85
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	1801,44	1395,68	848,48	602,88	551,68	575,52	663,20
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	4877,45	5540,74	6266,88	6722,47	6725,28	6801,25	6970,79
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	53,00
Porcentaje de separación: %S	72,69	77,71	86,28	90,05	90,96	90,45	88,61

Tabla 5.2
Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 40 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)						
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,80
Conductividad producto: Cd(p) (μS/cm)	2387,50	1595,50	1000,00	805,25	773,50	823,75	950,50
Conductividad desecho: Cd(d) (μS/cm)	8554,32	9858,73	10704,80	11208,80	11144,45	11258,94	11571,32
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	1528,00	1021,12	640,00	515,36	495,04	527,20	608,32
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	5474,76	6309,59	6851,07	7173,63	7132,45	7205,72	7405,65
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	53,00
Porcentaje de separación: %S	76,83	83,69	89,65	91,49	91,89	91,25	89,55

Tabla 5.3

Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 50 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)						
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,80
Conductividad producto: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2221,00	1411,75	914,50	771,00	739,75	744,00	739,00
Conductividad desecho: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	8626,06	9965,09	10696,18	11136,98	11072,38	11245,49	11744,94
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	1421,44	903,52	585,28	493,44	473,44	476,16	472,96
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	5520,68	6377,66	6845,55	7127,67	7086,32	7197,12	7516,76
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	53,00
Porcentaje de separación: %S	78,45	85,57	90,54	91,85	92,25	92,10	91,88

Tabla 5.4

Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 60 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)						
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,80
Conductividad producto: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1939,25	1131,50	742,25	660,25	639,25	656,25	666,25
Conductividad desecho: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	8401,64	9742,32	10343,12	10700,88	10626,72	10777,43	11238,10
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	1241,12	724,16	475,04	422,56	409,12	420,00	426,40
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	5377,05	6235,08	6619,59	6848,56	6801,10	6897,56	7192,38
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	53,00
Porcentaje de separación: %S	81,18	88,44	92,32	93,02	93,30	93,03	92,79

Tabla 5.5
Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 70 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad producto: Cd(p) ($\mu S/cm$)	1746,25	926,75	572,50	494,25	430,50	463,50	471,00	456,50
Conductividad desecho: Cd(d) ($\mu S/cm$)	9024,19	10427,48	10999,02	11373,80	11344,69	11490,79	11630,78	12017,69
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	1117,60	593,12	366,40	316,32	275,52	296,64	301,44	292,16
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	5775,48	6673,59	7039,37	7279,23	7260,60	7354,11	7443,70	7691,32
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S	83,06	90,53	94,08	94,78	95,49	95,08	94,94	94,98

Tabla 5.6
Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 80 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad producto: Cd(p) ($\mu S/cm$)	1731,25	936,75	717,00	623,75	574,50	570,75	578,00	576,75
Conductividad desecho: Cd(d) ($\mu S/cm$)	9332,81	10725,89	11138,40	11532,13	11484,61	11678,01	11819,41	12190,51
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	1108,00	599,52	458,88	399,20	367,68	365,28	369,92	369,12
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	5973,00	6864,57	7128,57	7380,56	7350,15	7473,93	7564,43	7801,93
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S	83,20	90,43	92,58	93,41	93,98	93,94	93,80	93,66

Tabla 5.7
Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 90 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)						
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,80
Conductividad producto: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1581,75	809,00	638,50	535,00	517,50	504,25	483,88
Conductividad desecho: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	9428,38	10810,39	11166,25	11575,84	11487,30	11693,98	12247,18
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	1012,32	517,76	408,64	342,40	331,20	322,72	309,68
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	6034,16	6918,65	7146,40	7408,54	7351,87	7484,15	7838,19
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	53,00
Porcentaje de separación: %S	84,65	91,73	93,39	94,35	94,58	94,64	94,65

Tabla 5.8
Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 100 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)						
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,80
Conductividad producto: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1388,25	731,25	541,25	454,63	414,25	415,50	388,13
Conductividad desecho: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	9612,35	10880,11	11261,85	11655,05	11593,52	11785,13	12356,53
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	888,48	468,00	346,40	290,96	265,12	265,92	248,40
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	6151,90	6963,27	7207,59	7459,23	7419,85	7542,48	7908,18
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	53,00
Porcentaje de separación: %S	86,53	92,53	94,40	95,20	95,66	95,59	95,73

Tabla 5.9
Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 110 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad producto: Cd(p) (μS/cm)	1338,25	737,50	466,25	383,75	342,75	343,25	335,50	336,00
Conductividad desecho: Cd(d) (μS/cm)	10752,61	12025,00	12522,34	12945,54	12871,17	13087,07	13270,51	13694,81
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	856,48	472,00	298,40	245,60	219,36	219,68	214,72	215,04
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	6881,67	7696,00	8014,30	8285,15	8237,55	8375,72	8493,13	8764,68
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S	87,01	92,46	95,18	95,95	96,41	96,35	96,40	96,31

Tabla 5.10
Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 30 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Conductividad producto: Cd(p) (μS/cm)	1571,64	1434,69	1207,97	1153,11	1792,30	3306,66	4450,70	5147,53	5403,66
Conductividad desecho: Cd(d) (μS/cm)	21600,62	22959,00	23554,61	24214,23	23184,63	21602,52	20341,08	19890,24	19358,33
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	1005,85	918,20	773,10	737,99	1147,07	2116,26	2848,45	3294,42	3458,34
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	13824,40	14693,76	15074,95	15497,11	14838,16	13825,61	13018,29	12729,75	12389,33
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00
Porcentaje de separación: %S	92,85	93,12	94,14	94,29	91,19	83,52	77,59	73,46	72,39

Tabla 5.11
Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 40 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Conductividad producto: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1276,14	1198,69	922,47	853,61	1224,30	1972,66	3011,70	4228,03	4705,16
Conductividad desecho: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	21913,50	23237,91	23901,29	24595,41	23894,63	23321,90	22240,56	21174,07	20312,95
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	816,73	767,16	590,38	546,31	783,55	1262,50	1927,49	2705,94	3011,30
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	14024,64	14872,26	15296,82	15741,06	15292,56	14926,02	14233,96	13551,40	13000,29
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00
Porcentaje de separación: %S	94,19	94,25	95,52	95,77	93,98	90,17	84,84	78,20	75,96

Tabla 5.12
Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 50 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Conductividad producto: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1104,64	924,69	829,47	689,61	943,30	1481,16	2075,70	2982,03	3405,16
Conductividad desecho: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	22095,09	23561,73	24014,21	24804,14	24245,88	23955,39	23476,08	22913,76	22089,62
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	706,97	591,80	530,86	441,35	603,71	947,94	1328,45	1908,50	2179,30
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	14140,86	15079,51	15369,10	15874,65	15517,36	15331,45	15024,69	14664,81	14137,35
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00
Porcentaje de separación: %S	94,97	95,57	95,97	96,58	95,36	92,62	89,55	84,62	82,60

Tabla 5.13
Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 60 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Conductividad producto: Cd(p) (μS/cm)	620,14	513,19	430,47	301,11	263,30	405,16	911,20	1363,03	1629,16
Conductividad desecho: Cd(d) (μS/cm)	22608,09	24048,05	24498,71	25298,59	25095,88	25342,23	25013,22	25174,25	24516,82
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	396,89	328,44	275,50	192,71	168,51	259,30	583,17	872,34	1042,66
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	14469,18	15390,75	15679,18	16191,10	16061,36	16219,03	16008,46	16111,52	15690,76
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00
Porcentaje de separación: %S	97,18	97,54	97,91	98,51	98,71	97,98	95,41	92,97	91,67

Tabla 5.14
Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 70 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Conductividad producto: Cd(p) (μS/cm)	735,64	640,69	544,97	442,11	400,30	498,16	751,70	1030,03	1198,16
Conductividad desecho: Cd(d) (μS/cm)	22485,79	23897,36	24359,68	25119,14	24924,63	25222,37	25223,76	25639,20	25105,85
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	470,81	410,04	348,78	282,95	256,19	318,82	481,09	659,22	766,82
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	14390,91	15294,31	15590,19	16076,25	15951,76	16142,31	16143,21	16409,09	16067,74
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00
Porcentaje de separación: %S	96,65	96,93	97,36	97,81	98,03	97,52	96,22	94,69	93,88

Tabla 5.15
Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 80 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Conductividad producto: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	805,14	757,69	621,97	508,11	478,30	595,66	886,70	1161,03	1323,16
Conductividad desecho: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	22412,21	23759,09	24266,18	25035,14	24827,13	25096,70	25045,56	25456,29	24935,02
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	515,29	484,92	398,06	325,19	306,11	381,22	567,49	743,06	846,82
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	14343,81	15205,82	15530,35	16022,49	15889,36	16061,89	16029,16	16292,03	15958,41
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00
Porcentaje de separación: %S	96,34	96,37	96,98	97,48	97,65	97,03	95,54	94,01	93,24

Tabla 5.16
Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 90 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
Conductividad producto: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	705,64	632,19	504,97	415,11	364,30	453,16	745,20	989,53	1154,66
Conductividad desecho: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	22517,56	23907,41	24408,25	25153,50	24969,63	25280,37	25232,34	25695,75	25165,30
Concentración producto: Cc(p) (ppm)	451,61	404,60	323,18	265,67	233,15	290,02	476,93	633,30	738,98
Concentración desecho: Cc(d) (ppm)	14411,24	15300,74	15621,28	16098,24	15980,56	16179,43	16148,70	16445,28	16105,79
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00
Porcentaje de separación: %S	96,79	96,97	97,55	97,94	98,21	97,74	96,25	94,90	94,10

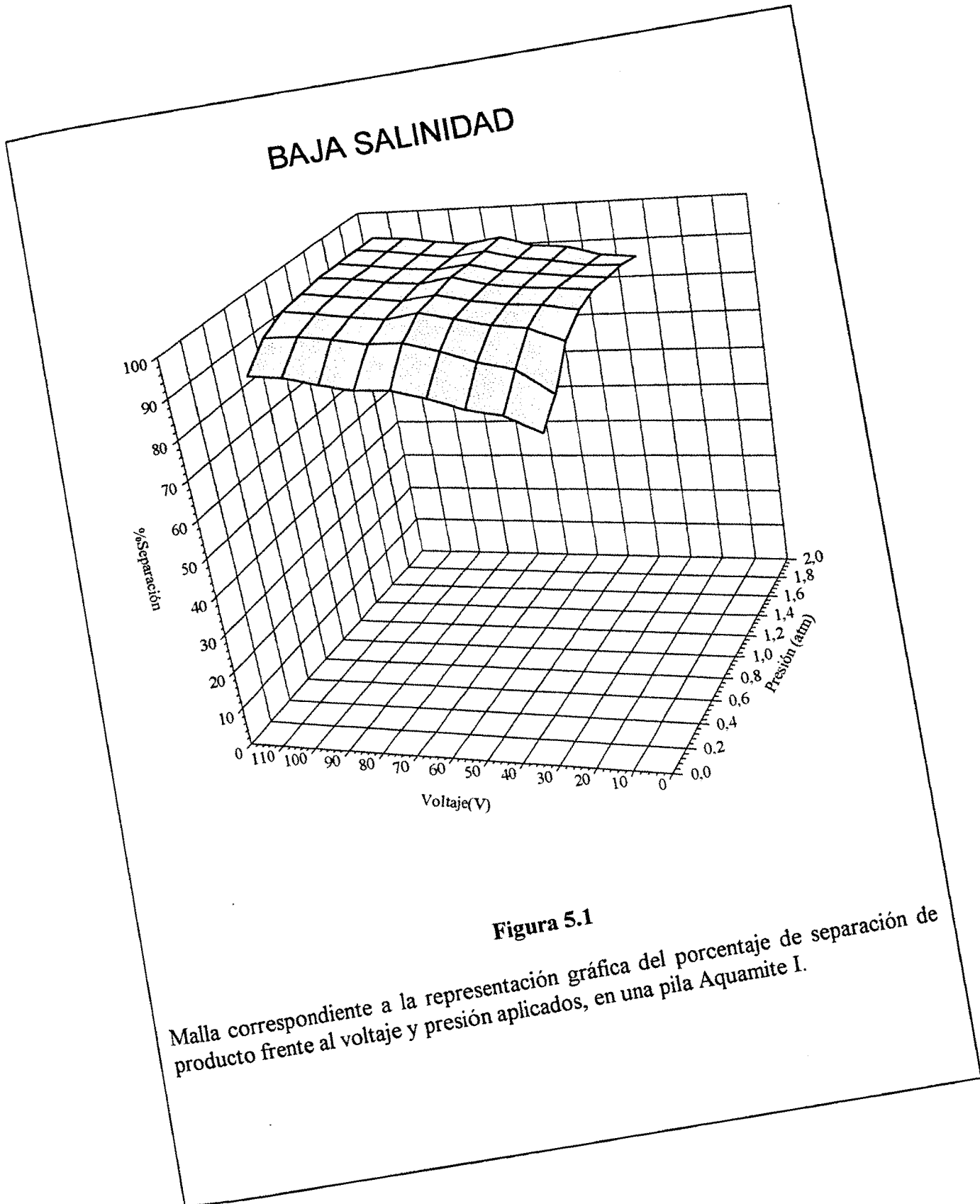
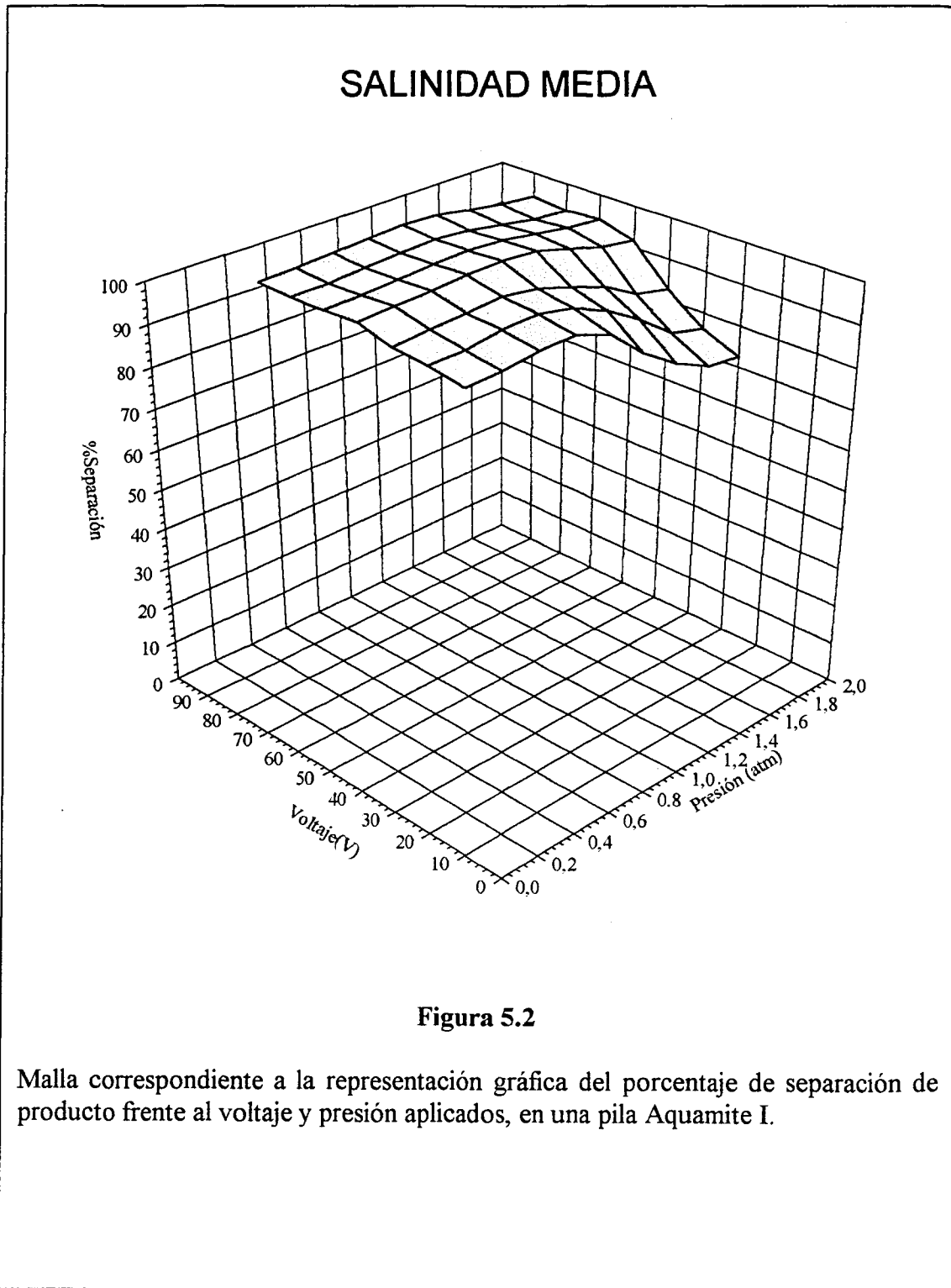


Figura 5.1

Malla correspondiente a la representación gráfica del porcentaje de separación de producto frente al voltaje y presión aplicados, en una pila Aquamite I.



Se observa que el porcentaje de separación es máximo a una presión de 1,2 atm y un voltaje de 70V para el agua de baja salinidad y de 60V para la de salinidad media, siendo sus valores 95,49% y 98,71% respectivamente.

5.3. DETERMINACION DEL TIEMPO DE INVERSION DE POLARIDAD OPTIMO

Para la determinación del tiempo de inversión de polaridad óptimo, a éstos valores de voltaje, para los que se obtiene el máximo porcentaje de separación, se realizan experiencias, para los dos tipos de aguas, variando la presión de alimentación en el rango entre 0,4 y 1,8 atm y los tiempos de inversión de polaridad en el intervalo comprendido entre 5 a 30 minutos, en incrementos de 5 minutos, registrándose las conductividades de producto y desecho para cada inversión de polaridad, los caudales de alimentación, producto y desecho, así como los valores de pH del agua de alimentación, y también del agua producto y de la de desecho en cada inversión. Se obtuvieron los valores mostrados en las Tablas 5.17 a 5.28.

Con éstos valores se efectúa la representación gráfica tridimensional del porcentaje de separación obtenido, frente a la presión de alimentación y al tiempo de inversión de polaridad aplicado, para los dos tipos de aguas estudiados, (Figura 5.3) y (Figura 5.4), empleándose las ecuaciones (5.1-1) y (5.2-2) para el cálculo de las concentraciones y porcentajes de separación, respectivamente. Se pueden apreciar, en cada caso, dos máximos de porcentaje de separación.

La representación gráfica de los valores de porcentaje de separación frente al tiempo de inversión de polaridad, para el agua de baja salinidad se da en la Figura 5.5 y para el agua de media salinidad, en la Figura 5.6. Se observa que para los dos tipos de aguas tratados, el porcentaje de separación es máximo para un tiempo de inversión de 15 minutos en todo el rango de presiones, exhibiendo el mayor valor para la presión de alimentación de 1,2 atm. A ésta presión el valor del porcentaje de separación es de 96,92% para baja salinidad y del 99,11% para media salinidad.

Las aguas empleadas como alimentación para estos experimentos tenían unos valores de pH de 8,02 para el agua de baja salinidad y 7,57 para media salinidad, a las que corresponden unos valores de Índice de Langelier (L.I.) de +0,05 y de -0,42 respectivamente, valores alejados del máximo recomendado de +1,8 [Standart Methods - 1995], a partir del cual el agua de alimentación necesita pretratamiento ácido (H_2SO_4),

para evitar la precipitación de las sales de Ca^{+2} (CaCO_3) sobre las membranas de los compartimentos de desecho de la pila.

Por otra parte, hay que considerar también, la existencia del fenómeno de polarización que tiene lugar cuando se obtiene un agua producto con una conductividad excesivamente baja y se le aplica a la pila un amperaje por encima de la intensidad de corriente límite. Este fenómeno se debe a la disociación de las moléculas de agua en cationes H^+ y aniones OH^- dentro de los compartimentos de agua producto, sobre la superficie de la membrana aniónica, de forma especial en aquellos que están próximos al final de la última etapa eléctrica de la pila. En esta situación tiene lugar el paso, a los dos compartimentos de desecho contiguos, por ambos lados, al de producto, de iones H^+ hacia un lado y de OH^- , hacia otro, provocando estos últimos un aumento de basicidad y la consiguiente subida del pH en la corriente de desecho con respecto al valor medido antes de producirse el fenómeno. Esta posibilidad ha de ser tenida en cuenta, ya que provoca la formación de incrustaciones de CaCO_3 al hacerlo precipitar sobre la cara de la membrana aniónica en contacto con el compartimento de desecho. Por todo ello y dado que las aguas producto que se obtuvieron en ambas experiencias tenían, en general, valores de conductividad bajos cuando nos encontrábamos en los valores de máximo porcentaje de separación, se efectuó la representación gráfica de los valores del pH de desecho promedio frente al tiempo de inversión de polaridad, para el agua de baja salinidad (Figura 5.7) y de media salinidad (Figura 5.8), encontrándose que, en ambos casos, se producían unos valores mínimos de pH promedio para el tiempo de inversión de polaridad de 15 minutos, en todo el rango de presiones contemplado para los voltajes de 70V y de 60V. Los pH de las aguas producto, en éste intervalo de tiempo, son poco más ácidos que los de la alimentación, lo cual suele ser norma general en los sistemas EDR [Venderbosch - 1986].

En una tercera fase, se procedió a la realización de las experiencias de caracterización de la pila con las aguas citadas anteriormente, pero con inversión de polaridad para los rangos de presión y voltaje anteriores, aplicando el mismo voltaje a las dos etapas eléctricas de la pila. Se registraron para cada experiencia, los valores de intensidad de corriente para cada etapa eléctrica, y de conductividad de producto y desecho para cada inversión de polaridad, así como los caudales de alimentación, producto y desecho. Los valores de conductividad se transformaban en los de

concentración mediante la ecuación (5.1-1) y los porcentajes de separación se calcularon mediante la ecuación (5.1-2).

Para cada experiencia y para cada inversión de polaridad se calculó la potencia consumida por la pila según la expresión:

$$P = V \times I \quad (5.1-3)$$

donde V es el voltaje aplicado e I es la intensidad.

En el tratamiento posterior de todos los datos, para la obtención de las representaciones tridimensionales y curvas correspondientes a los dos tipos de agua de alimentación anteriores, se tomaron los valores promedio de intensidades de ambas etapas, conductividades, concentraciones, porcentajes de separación y potencias para cada inversión de polaridad.

Finalmente se obtuvo el coste de operación de la pila, considerando un precio de 15 pts para el kilowatio-hora, para cada voltaje y presión aplicados, mediante la expresión:

$$Coste_{(p)} = \frac{Pot_{(p)} \times 15}{Q_p} \quad (5.1-4)$$

donde:

$Coste_{(p)}$ = coste de producto en pts/m³.

$Pot_{(p)}$ = potencia consumida por la pila en kw.

Q_p = caudal de producto en m³/h.

Tabla 5.17

Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 70 V, conductividad de alimentación 5300 $\mu\text{S/cm}$ (3392,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 5 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1769,90	1329,38	908,51	787,04	649,56	684,21	673,22	685,42
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	2127,66	555,14	201,00	127,21	151,80	155,34	161,41	198,70
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	1948,78	942,26	554,75	457,13	400,68	419,78	417,32	442,06
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	9037,76	9992,55	10632,53	11043,76	11113,05	11249,24	11407,34	11742,99
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	8658,94	10907,56	11491,64	11883,55	11735,25	11930,89	12082,93	12422,57
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	8848,35	10450,06	11062,08	11463,66	11424,15	11590,06	11745,14	12082,78
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1132,73	850,80	581,44	503,71	415,72	437,90	430,86	438,67
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1361,70	355,29	128,64	81,41	97,15	99,42	103,30	127,17
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	1247,22	603,05	355,04	292,56	256,44	268,66	267,08	282,92
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5784,16	6395,23	6804,82	7068,01	7112,35	7199,51	7300,70	7515,52
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5541,72	6980,84	7354,65	7605,47	7510,56	7635,77	7733,08	7950,44
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	5662,94	6688,04	7079,73	7336,74	7311,46	7417,64	7516,89	7732,98
pH(p+) / pH(p-)	7,99 / 7,87	7,99 / 7,87	7,98 / 7,86	7,97 / 7,85	7,96 / 7,84	7,94 / 7,82	7,93 / 7,80	7,91 / 7,78
pH(d+) / pH(d-)	8,42 / 8,39	8,42 / 8,38	8,41 / 8,37	8,40 / 8,36	8,40 / 8,36	8,38 / 8,34	8,36 / 8,32	8,34 / 8,31
pH(p)	7,93	7,93	7,92	7,91	7,90	7,88	7,86	7,84
pH(d)	8,40	8,40	8,39	8,38	8,38	8,36	8,34	8,32
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	82,83	86,41	90,60	91,68	93,19	92,73	92,77	92,46
Porcentaje de separación: %S(-)	79,35	94,33	97,92	98,66	98,41	98,35	98,27	97,82
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	81,09	90,37	94,26	95,17	95,80	95,54	95,52	95,14

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.18

Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 70 V, conductividad de alimentación 5300 $\mu\text{S/cm}$ (3392,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 10 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1706,00	1268,71	848,58	728,36	590,41	625,86	615,47	629,03
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	2063,77	494,47	141,08	68,53	92,65	96,99	103,66	142,31
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	1884,89	881,59	494,83	398,45	341,53	361,42	359,56	385,67
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	9105,41	10064,25	10705,29	11118,45	11186,98	11324,45	11483,58	11821,73
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	8726,60	10979,26	11564,40	11958,24	11809,19	12006,10	12159,17	12501,31
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	8916,00	10521,75	11134,85	11538,34	11498,09	11665,28	11821,37	12161,52
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1091,84	811,98	543,09	466,15	377,86	400,55	393,90	402,58
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1320,81	316,46	90,29	43,86	59,30	62,07	66,34	91,08
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	1206,33	564,22	316,69	255,01	218,58	231,31	230,12	246,83
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5827,46	6441,12	6851,39	7115,81	7159,67	7247,65	7349,49	7565,91
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5585,02	7026,72	7401,22	7653,27	7557,88	7683,91	7781,87	8000,84
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	5706,24	6733,92	7126,30	7384,54	7358,77	7465,78	7565,68	7783,37
pH(p+) / pH(p-)	7,73 / 7,63	7,73 / 7,63	7,72 / 7,62	7,71 / 7,61	7,71 / 7,61	7,68 / 7,58	7,64 / 7,54	7,62 / 7,51
pH(d+) / pH(d-)	8,29 / 8,12	8,28 / 8,10	8,27 / 8,09	8,26 / 8,08	8,25 / 8,07	8,22 / 8,05	8,18 / 8,03	8,15 / 8,01
pH(p)	7,68	7,68	7,67	7,66	7,66	7,63	7,59	7,56
pH(d)	8,20	8,19	8,18	8,17	8,16	8,13	8,10	8,08
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	83,45	87,03	91,22	92,30	93,81	93,35	93,39	93,08
Porcentaje de separación: %S(-)	79,97	94,95	98,54	99,28	99,03	98,97	98,89	98,44
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	81,71	90,99	94,88	95,79	96,42	96,16	96,14	95,76

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.19

Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 70 V, conductividad de alimentación 5300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3392,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 15 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1654,48	1219,79	800,26	681,04	542,71	578,80	568,89	583,55
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2012,24	445,55	92,76	21,21	44,95	49,93	57,08	96,83
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1833,36	832,67	446,51	351,12	293,83	314,36	312,99	340,19
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	9159,97	10122,07	10763,97	11178,67	11246,61	11385,10	11545,06	11885,23
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	8781,16	11037,08	11623,08	12018,46	11868,81	12066,76	12220,65	12564,81
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	8970,56	10579,57	11193,52	11598,57	11557,71	11725,93	11882,85	12225,02
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1058,86	780,67	512,17	435,87	347,34	370,43	364,09	373,47
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1287,83	285,15	59,37	13,57	28,77	31,95	36,53	61,97
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	1173,35	532,91	285,77	224,72	188,05	201,19	200,31	217,72
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5862,38	6478,12	6888,94	7154,35	7197,83	7286,47	7388,84	7606,55
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5619,94	7063,73	7438,77	7691,82	7596,04	7722,73	7821,22	8041,48
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	5741,16	6770,93	7163,86	7423,08	7396,93	7504,60	7605,03	7824,01
pH(p+) / pH(p-)	7,54 / 7,43	7,49 / 7,38	7,44 / 7,33	7,40 / 7,28	7,38 / 7,26	7,37 / 7,25	7,36 / 7,23	7,36 / 7,23
pH(d+) / pH(d-)	8,24 / 7,96	8,19 / 7,94	8,14 / 7,92	8,10 / 7,91	8,07 / 7,89	8,05 / 7,87	8,03 / 7,85	8,02 / 7,83
pH(p)	7,48	7,43	7,38	7,34	7,32	7,31	7,29	7,29
pH(d)	8,10	8,06	8,03	8,00	7,98	7,96	7,94	7,92
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	83,95	87,53	91,72	92,80	94,31	93,85	93,89	93,58
Porcentaje de separación: %S(-)	80,47	95,45	99,04	99,78	99,53	99,47	99,39	98,94
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	82,21	91,49	95,38	96,29	96,92	96,66	96,64	96,26

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila, (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.20

Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 70 V, conductividad de alimentación 5300 $\mu\text{S/cm}$ (3392,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 20 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1683,10	1246,97	827,11	707,33	569,21	604,95	594,77	608,82
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	2040,87	472,73	119,61	47,50	71,45	76,07	82,96	122,10
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	1861,99	859,85	473,36	377,42	320,33	340,51	338,87	365,46
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	9129,65	10089,94	10731,37	11145,21	11213,48	11351,40	11510,90	11849,95
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	8750,84	11004,95	11590,48	11985,00	11835,68	12033,06	12186,49	12529,53
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	8940,25	10547,45	11160,92	11565,11	11524,58	11692,23	11848,70	12189,74
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1077,19	798,06	529,35	452,69	364,30	387,17	380,65	389,64
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1306,16	302,55	76,55	30,40	45,73	48,69	53,10	78,14
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	1191,67	550,31	302,95	241,55	205,01	217,93	216,87	233,89
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5842,98	6457,56	6868,07	7132,94	7176,63	7264,90	7366,98	7583,97
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5600,54	7043,17	7417,91	7670,40	7574,84	7701,16	7799,35	8018,90
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	5721,76	6750,37	7142,99	7401,67	7375,73	7483,03	7583,17	7801,43
pH(p+) / pH(p-)	7,38 / 7,13	7,41 / 7,16	7,40 / 7,14	7,41 / 7,14	7,41 / 7,13	7,37 / 7,12	7,28 / 7,04	7,24 / 7,01
pH(d+) / pH(d-)	8,14 / 8,03	8,13 / 7,97	8,13 / 7,97	8,11 / 7,93	8,10 / 7,91	8,09 / 7,90	8,02 / 7,89	7,98 / 7,87
pH(p)	7,25	7,28	7,27	7,27	7,27	7,24	7,16	7,12
pH(d)	8,08	8,05	8,05	8,02	8,00	7,99	7,95	7,92
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	83,67	87,26	91,44	92,53	94,03	93,57	93,62	93,31
Porcentaje de separación: %S(-)	80,20	95,17	98,76	99,50	99,25	99,19	99,11	98,66
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	81,93	91,21	95,10	96,01	96,64	96,38	96,36	95,98

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.21

Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 70 V, conductividad de alimentación 5300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3392,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 25 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1731,77	1293,17	872,75	752,02	614,26	649,39	638,76	651,77
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2089,53	518,94	165,24	92,19	116,50	120,52	126,95	165,05
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1910,65	906,06	518,99	422,11	365,38	384,95	382,85	408,41
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	9078,13	10035,34	10675,95	11088,33	11157,17	11294,12	11452,84	11789,98
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	8699,32	10950,35	11535,06	11928,12	11779,37	11975,78	12128,43	12469,56
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	8888,72	10492,84	11105,51	11508,23	11468,27	11634,95	11790,63	12129,77
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1108,33	827,63	558,56	481,30	393,13	415,61	408,81	417,13
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1337,30	332,12	105,76	59,00	74,56	77,13	81,25	105,63
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	1222,82	579,88	332,16	270,15	233,84	246,37	245,03	261,38
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5810,00	6422,62	6832,61	7096,53	7140,59	7228,24	7329,82	7545,59
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5567,56	7008,22	7382,44	7634,00	7538,80	7664,50	7762,19	7980,52
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	5688,78	6715,42	7107,52	7365,27	7339,69	7446,37	7546,01	7763,05
pH(p+) / pH(p-)	7,43 / 7,26	7,39 / 7,24	7,36 / 7,22	7,34 / 7,21	7,32 / 7,20	7,30 / 7,18	7,29 / 7,16	7,25 / 7,11
pH(d+) / pH(d-)	8,14 / 8,04	8,12 / 8,03	8,10 / 8,02	8,09 / 8,01	8,08 / 8,00	8,06 / 7,98	8,04 / 7,96	8,00 / 7,95
pH(p)	7,34	7,31	7,29	7,27	7,26	7,24	7,22	7,18
pH(d)	8,09	8,07	8,06	8,05	8,04	8,02	8,00	7,97
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	83,20	86,78	90,97	92,05	93,56	93,10	93,14	92,83
Porcentaje de separación: %S(-)	79,72	94,70	98,29	99,03	98,78	98,72	98,64	98,19
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	81,46	90,74	94,63	95,54	96,17	95,91	95,89	95,51

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.22

Valores correspondientes a la experiencia de baja salinidad a 70 V, conductividad de alimentación 5300 µS/cm (3392,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 30 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) (µS/cm)	1763,83	1323,61	902,81	781,47	643,94	678,67	667,74	680,07
Conductividad: Cd(p-) (µS/cm)	2121,59	549,38	195,31	121,63	146,18	149,80	155,93	193,34
Cond. promedio pila: Cd(p) (µS/cm)	1942,71	936,50	549,06	451,55	395,06	414,23	411,83	436,71
Conductividad: Cd(d+) (µS/cm)	9044,18	9999,36	10639,44	11050,86	11120,07	11256,38	11414,59	11750,47
Conductividad: Cd(d-) (µS/cm)	8665,37	10914,37	11498,55	11890,65	11742,27	11938,04	12090,18	12430,05
Cond. promedio pila: Cd(d) (µS/cm)	8854,78	10456,87	11069,00	11470,75	11431,17	11597,21	11752,38	12090,26
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1128,85	847,11	577,80	500,14	412,12	434,35	427,35	435,24
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1357,82	351,60	125,00	77,85	93,56	95,87	99,79	123,74
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	1243,33	599,36	351,40	288,99	252,84	265,11	263,57	279,49
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5788,28	6399,59	6809,24	7072,55	7116,85	7204,08	7305,34	7520,30
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5545,84	6985,20	7359,07	7610,01	7515,06	7640,34	7737,71	7955,23
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	5667,06	6692,40	7084,16	7341,28	7315,95	7422,21	7521,52	7737,77
pH(p+) / pH(p-)	7,48 / 7,34	7,46 / 7,33	7,44 / 7,32	7,42 / 7,31	7,43 / 7,33	7,39 / 7,31	7,36 / 7,29	7,34 / 7,28
pH(d+) / pH(d-)	8,18 / 8,06	8,17 / 8,05	8,16 / 8,04	8,15 / 8,03	8,15 / 8,01	8,12 / 8,00	8,10 / 7,99	8,08 / 7,98
pH(p)	7,41	7,39	7,38	7,36	7,38	7,35	7,32	7,31
pH(d)	8,12	8,11	8,10	8,09	8,08	8,06	8,04	8,03
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	82,88	86,47	90,66	91,74	93,25	92,79	92,83	92,52
Porcentaje de separación: %S(-)	79,41	94,39	97,98	98,71	98,47	98,41	98,33	97,87
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	81,15	90,43	94,32	95,23	95,86	95,60	95,58	95,20

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.23

Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 60 V, conductividad de alimentación 11300 $\mu\text{S/cm}$ (7232,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 5 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1041,36	909,60	717,24	626,30	560,47	569,14	742,99	1030,60
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	514,28	417,19	440,82	269,63	261,26	526,53	1354,29	1955,96
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	777,82	663,40	579,03	447,96	410,87	547,84	1048,64	1493,28
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	22162,09	23579,56	24150,50	24884,71	24724,41	25130,89	25235,25	25638,41
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	22720,18	24161,50	24486,15	25338,65	25098,42	25185,80	24428,34	24346,39
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	22441,14	23870,53	24318,33	25111,68	24911,42	25158,35	24831,80	24992,40
Concentración: Cc(p+) (ppm)	666,47	582,14	459,03	400,83	358,70	364,25	475,52	659,58
Concentración: Cc(p-) (ppm)	329,14	267,00	282,12	172,56	167,21	336,98	866,74	1251,82
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	497,80	424,57	370,58	286,70	262,96	350,61	671,13	955,70
Concentración: Cc(d+) (ppm)	1041,36	909,60	717,24	626,30	560,47	569,14	742,99	1030,60
Concentración: Cc(d-) (ppm)	514,28	417,19	440,82	269,63	261,26	526,53	1354,29	1955,96
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	777,82	663,40	579,03	447,96	410,87	547,84	1048,64	1493,28
pH(p+) / pH(p-)	7,94 / 7,82	7,93 / 7,81	7,92 / 7,80	7,91 / 7,79	7,90 / 7,78	7,88 / 7,76	7,87 / 7,74	7,86 / 7,73
pH(d+) / pH(d-)	8,37 / 8,40	8,36 / 8,40	8,35 / 8,39	8,34 / 8,38	8,34 / 8,38	8,32 / 8,36	8,30 / 8,34	8,29 / 8,32
pH(p)	7,88	7,87	7,86	7,85	7,84	7,82	7,81	7,80
pH(d)	8,39	8,38	8,37	8,36	8,36	8,34	8,32	8,31
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	95,26	95,64	96,52	96,90	97,24	97,16	96,26	94,69
Porcentaje de separación: %S(-)	97,66	98,00	97,86	98,66	98,72	97,38	93,18	89,91
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	96,46	96,82	97,19	97,78	97,98	97,27	94,72	92,30

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.24

Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 60 V, conductividad de alimentación 11300 $\mu\text{S/cm}$ (7232,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 10 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	902,93	778,17	587,42	499,17	432,33	442,71	617,87	908,42
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	375,85	285,77	311,00	142,50	133,12	400,11	1229,17	1833,78
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	639,39	531,97	449,21	320,84	282,73	421,41	923,52	1371,10
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	22308,66	23734,89	24308,13	25046,50	24884,59	25293,84	25400,41	25809,00
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	22866,75	24316,82	24643,79	25500,45	25258,60	25348,75	24593,50	24516,98
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	22587,70	24025,85	24475,96	25273,48	25071,59	25321,29	24996,96	25162,99
Concentración: Cc(p+) (ppm)	577,88	498,03	375,95	319,47	276,69	283,34	395,44	581,39
Concentración: Cc(p-) (ppm)	240,54	182,89	199,04	91,20	85,20	256,07	786,67	1173,62
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	409,21	340,46	287,49	205,34	180,94	269,70	591,05	877,51
Concentración: Cc(d+) (ppm)	902,93	778,17	587,42	499,17	432,33	442,71	617,87	908,42
Concentración: Cc(d-) (ppm)	375,85	285,77	311,00	142,50	133,12	400,11	1229,17	1833,78
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	639,39	531,97	449,21	320,84	282,73	421,41	923,52	1371,10
pH(p+) / pH(p-)	7,54 / 7,44	7,53 / 7,43	7,52 / 7,42	7,51 / 7,41	7,51 / 7,41	7,49 / 7,39	7,47 / 7,37	7,46 / 7,35
pH(d+) / pH(d-)	8,10 / 8,27	8,08 / 8,26	8,07 / 8,25	8,06 / 8,24	8,05 / 8,23	8,03 / 8,20	8,01 / 8,16	7,99 / 8,13
pH(p)	7,49	7,48	7,47	7,46	7,46	7,44	7,42	7,40
pH(d)	8,19	8,17	8,16	8,15	8,14	8,12	8,09	8,06
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	95,89	96,27	97,15	97,53	97,87	97,79	96,89	95,32
Porcentaje de separación: %S(-)	98,29	98,63	98,49	99,29	99,35	98,01	93,81	90,54
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	97,09	97,45	97,82	98,41	98,61	97,90	95,35	92,93

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.25

Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 60 V, conductividad de alimentación 11300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (7232,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 15 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	793,07	673,86	484,39	398,28	330,63	342,38	518,57	811,45
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	265,99	181,46	207,97	41,61	31,42	299,77	1129,86	1736,82
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	529,53	427,66	346,18	219,95	181,03	321,08	824,22	1274,14
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	22424,98	23858,16	24433,24	25174,91	25011,71	25423,16	25531,49	25944,38
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	22983,07	24440,09	24768,90	25628,86	25385,72	25478,07	24724,58	24652,37
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	22704,03	24149,13	24601,07	25401,89	25198,72	25450,61	25128,04	25298,38
Concentración: Cc(p+) (ppm)	507,57	431,27	310,01	254,90	211,60	219,12	331,88	519,33
Concentración: Cc(p-) (ppm)	170,23	116,13	133,10	26,63	20,11	191,86	723,11	1111,56
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	338,90	273,70	221,55	140,77	115,86	205,49	527,50	815,45
Concentración: Cc(d+) (ppm)	793,07	673,86	484,39	398,28	330,63	342,38	518,57	811,45
Concentración: Cc(d-) (ppm)	265,99	181,46	207,97	41,61	31,42	299,77	1129,86	1736,82
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	529,53	427,66	346,18	219,95	181,03	321,08	824,22	1274,14
pH(p+) / pH(p-)	7,24 / 7,13	7,22 / 7,11	7,20 / 7,09	7,19 / 7,07	7,18 / 7,06	7,17 / 7,05	7,16 / 7,03	7,15 / 7,02
pH(d+) / pH(d-)	7,94 / 8,22	7,92 / 8,17	7,90 / 8,12	7,89 / 8,08	7,87 / 8,05	7,85 / 8,03	7,83 / 8,01	7,81 / 8,00
pH(p)	7,19	7,17	7,15	7,13	7,12	7,11	7,10	7,09
pH(d)	8,08	8,05	8,01	7,98	7,96	7,94	7,92	7,90
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	96,39	96,77	97,65	98,03	98,37	98,29	97,39	95,82
Porcentaje de separación: %S(-)	98,79	99,13	98,99	99,79	99,85	98,51	94,31	91,04
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	97,59	97,95	98,32	98,91	99,11	98,40	95,85	93,43

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.26

Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 60 V, conductividad de alimentación 11300 $\mu\text{S/cm}$ (7232,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 20 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	856,79	734,36	544,15	456,80	389,62	400,57	576,16	867,69
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	329,71	241,96	267,73	100,13	90,41	357,97	1187,46	1793,06
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	593,25	488,16	405,94	278,46	240,01	379,27	881,81	1330,38
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	22357,52	23786,66	24360,68	25100,44	24937,98	25348,15	25455,46	25865,86
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	22915,60	24368,60	24696,33	25554,38	25311,99	25403,06	24648,56	24573,84
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	22636,56	24077,63	24528,51	25327,41	25124,99	25375,61	25052,01	25219,85
Concentración: Cc(p+) (ppm)	548,35	469,99	348,25	292,35	249,35	256,37	368,74	555,32
Concentración: Cc(p-) (ppm)	211,01	154,85	171,34	64,08	57,86	229,10	759,97	1147,56
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	379,68	312,42	259,80	178,22	153,61	242,73	564,36	851,44
Concentración: Cc(d+) (ppm)	856,79	734,36	544,15	456,80	389,62	400,57	576,16	867,69
Concentración: Cc(d-) (ppm)	329,71	241,96	267,73	100,13	90,41	357,97	1187,46	1793,06
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	593,25	488,16	405,94	278,46	240,01	379,27	881,81	1330,38
pH(p+) / pH(p-)	7,25 / 7,00	7,23 / 6,98	7,22 / 6,96	7,21 / 6,94	7,20 / 6,92	7,16 / 6,91	7,13 / 6,89	7,11 / 6,88
pH(d+) / pH(d-)	8,01 / 8,12	7,95 / 8,11	7,95 / 8,11	7,91 / 8,09	7,89 / 8,08	7,88 / 8,07	7,87 / 8,00	7,85 / 7,96
pH(p)	7,13	7,11	7,09	7,08	7,06	7,04	7,01	7,00
pH(d)	8,07	8,03	8,02	8,00	7,98	7,98	7,94	7,91
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	96,10	96,48	97,36	97,74	98,08	98,00	97,10	95,53
Porcentaje de separación: %S(-)	98,50	98,84	98,70	99,50	99,56	98,22	94,02	90,75
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	97,30	97,66	98,03	98,62	98,82	98,11	95,56	93,14

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.27

Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 60 V, conductividad de alimentación 11300 $\mu\text{S/cm}$ (7232,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 25 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	962,26	834,50	643,05	553,66	487,25	496,89	671,49	960,78
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	435,18	342,09	366,63	196,99	188,04	454,29	1282,79	1886,15
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	698,72	588,30	504,84	375,32	337,64	475,59	977,14	1423,46
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	22245,85	23668,32	24240,58	24977,16	24815,94	25224,00	25329,63	25735,89
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	22803,93	24250,25	24576,23	25431,11	25189,95	25278,91	24522,72	24443,87
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	22524,89	23959,29	24408,40	25204,14	25002,95	25251,46	24926,17	25089,88
Concentración: Cc(p+) (ppm)	615,84	534,08	411,55	354,34	311,84	318,01	429,76	614,90
Concentración: Cc(p-) (ppm)	278,51	218,94	234,65	126,07	120,35	290,75	820,98	1207,13
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	447,18	376,51	323,10	240,21	216,09	304,38	625,37	911,02
Concentración: Cc(d+) (ppm)	962,26	834,50	643,05	553,66	487,25	496,89	671,49	960,78
Concentración: Cc(d-) (ppm)	435,18	342,09	366,63	196,99	188,04	454,29	1282,79	1886,15
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	698,72	588,30	504,84	375,32	337,64	475,59	977,14	1423,46
pH(p+) / pH(p-)	7,31 / 7,14	7,28 / 7,13	7,26 / 7,12	7,24 / 7,11	7,22 / 7,10	7,20 / 7,08	7,19 / 7,06	7,18 / 7,04
pH(d+) / pH(d-)	8,02 / 8,12	8,01 / 8,10	8,00 / 8,08	7,99 / 8,07	7,98 / 8,06	7,96 / 8,04	7,94 / 8,02	7,93 / 7,98
pH(p)	7,23	7,21	7,19	7,18	7,16	7,14	7,13	7,11
pH(d)	8,07	8,06	8,04	8,03	8,02	8,00	7,98	7,96
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	95,62	96,00	96,88	97,26	97,60	97,52	96,62	95,05
Porcentaje de separación: %S(-)	98,02	98,36	98,22	99,02	99,08	97,74	93,54	90,27
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	96,82	97,18	97,55	98,14	98,34	97,63	95,08	92,66

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.28

Valores correspondientes a la experiencia de media salinidad a 60 V, conductividad de alimentación 11300 $\mu\text{S/cm}$ (7232,00 ppm). Tiempo de inversión de polaridad 30 minutos. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1030,37	899,17	706,93	616,21	550,30	559,10	733,06	1020,90
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	503,29	406,76	430,51	259,54	251,09	516,50	1344,36	1946,26
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	766,83	652,97	568,72	437,87	400,70	537,80	1038,71	1483,58
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	22173,73	23591,89	24163,01	24897,55	24737,12	25143,82	25248,36	25651,95
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	22731,81	24173,82	24498,66	25351,50	25111,13	25198,73	24441,45	24359,93
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	22452,77	23882,86	24330,84	25124,52	24924,13	25171,28	24844,90	25005,94
Concentración: Cc(p+) (ppm)	659,44	575,47	452,44	394,37	352,19	357,83	469,16	653,38
Concentración: Cc(p-) (ppm)	322,11	260,33	275,53	166,11	160,70	330,56	860,39	1245,61
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	490,77	417,90	363,98	280,24	256,45	344,19	664,77	949,49
Concentración: Cc(d+) (ppm)	1030,37	899,17	706,93	616,21	550,30	559,10	733,06	1020,90
Concentración: Cc(d-) (ppm)	503,29	406,76	430,51	259,54	251,09	516,50	1344,36	1946,26
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	766,83	652,97	568,72	437,87	400,70	537,80	1038,71	1483,58
pH(p+) / pH(p-)	7,34 / 7,20	7,32 / 7,19	7,30 / 7,18	7,28 / 7,17	7,27 / 7,17	7,25 / 7,17	7,23 / 7,16	7,22 / 7,16
pH(d+) / pH(d-)	8,04 / 8,16	8,03 / 8,15	8,02 / 8,14	8,01 / 8,13	7,99 / 8,13	7,98 / 8,10	7,97 / 8,08	7,96 / 8,06
pH(p)	7,27	7,26	7,24	7,23	7,22	7,21	7,19	7,19
pH(d)	8,10	8,09	8,08	8,07	8,06	8,04	8,02	8,01
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	95,31	95,69	96,57	96,95	97,29	97,21	96,31	94,74
Porcentaje de separación: %S(-)	97,71	98,05	97,91	98,71	98,77	97,43	93,23	89,96
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	96,51	96,87	97,24	97,83	98,03	97,32	94,77	92,35

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

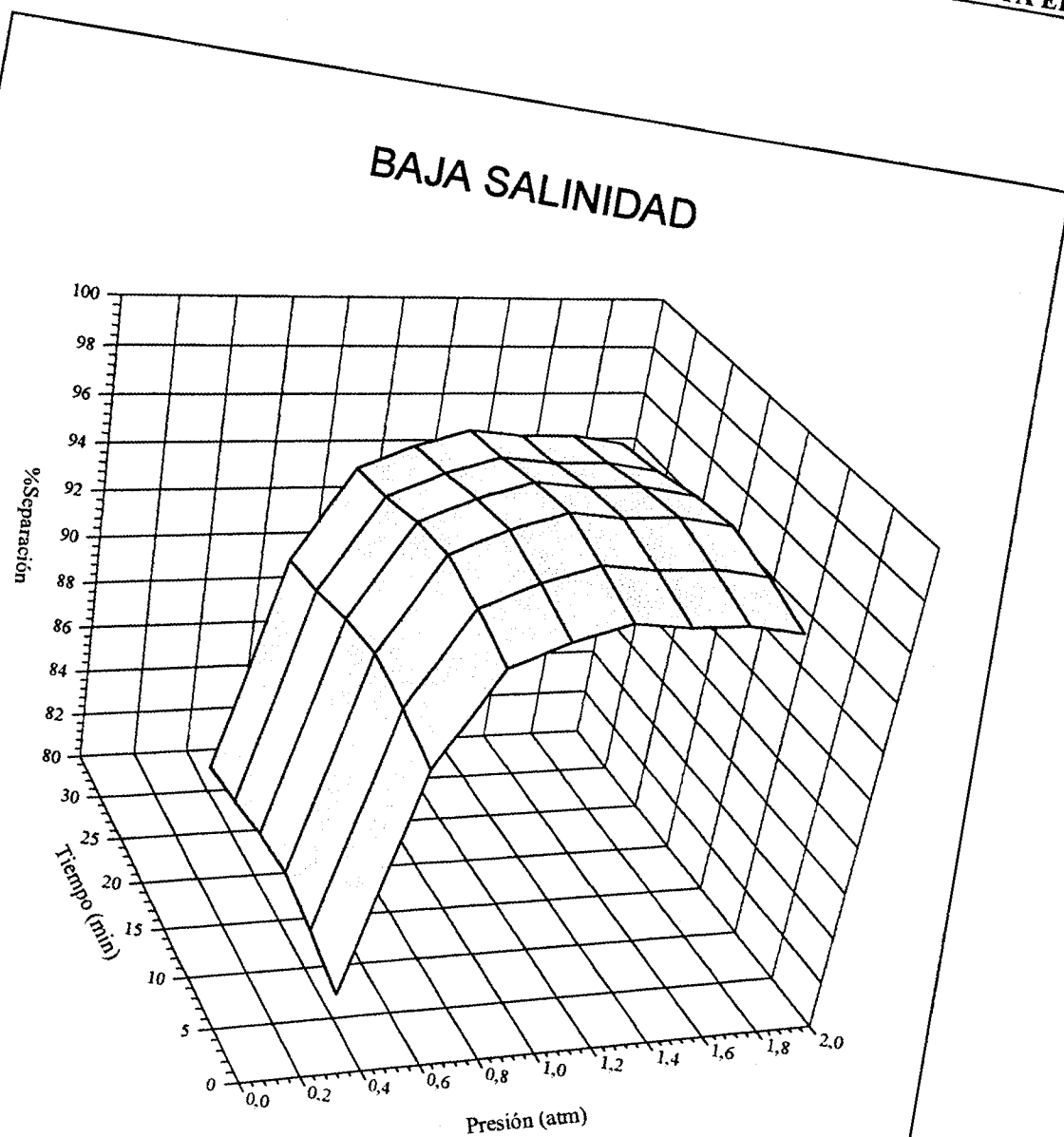
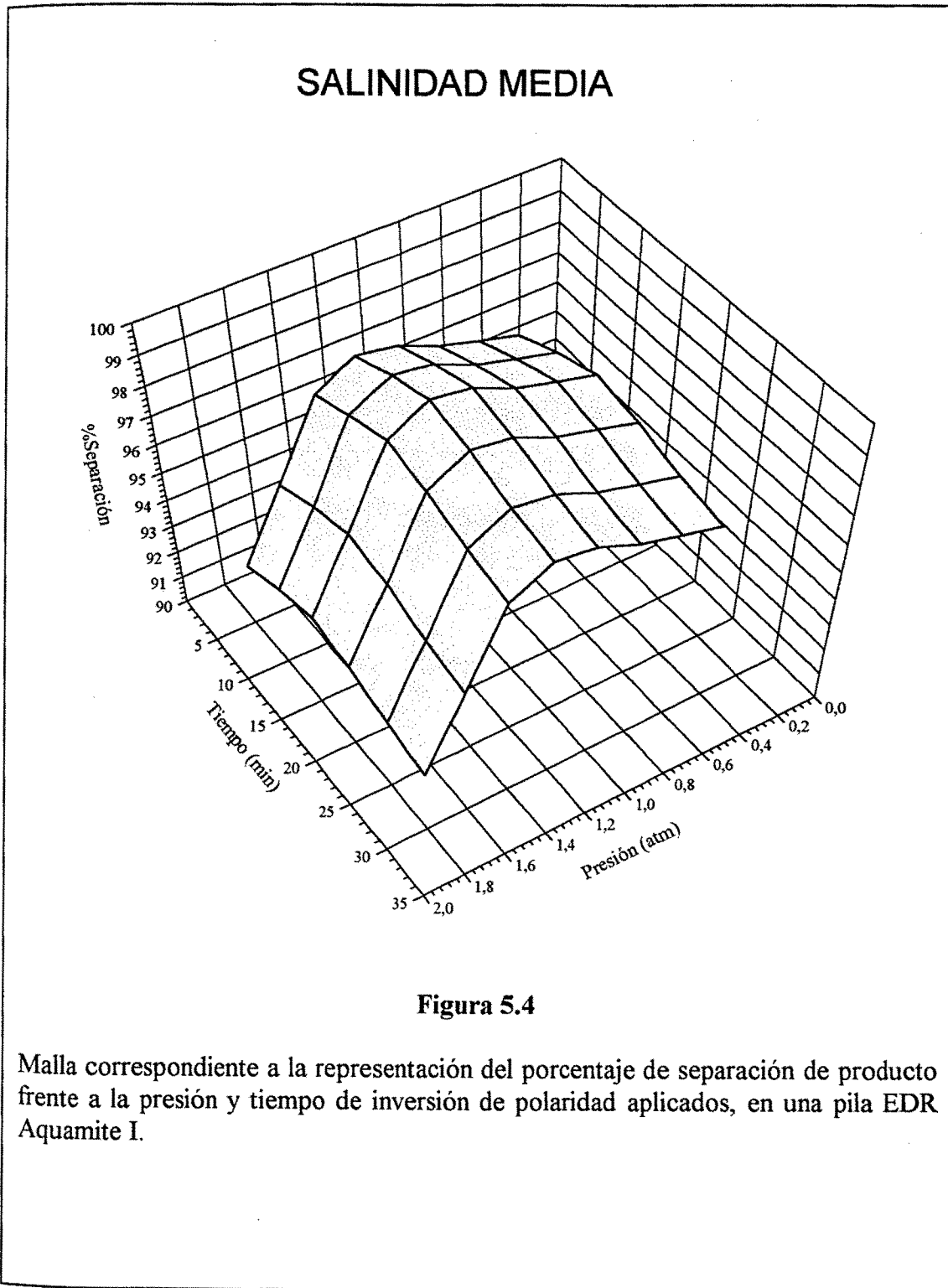


Figura 5.3

Malla correspondiente a la representación del porcentaje de separación de producto frente a la presión y tiempo de inversión de polaridad aplicados, en una pila EDR Aquamite I.



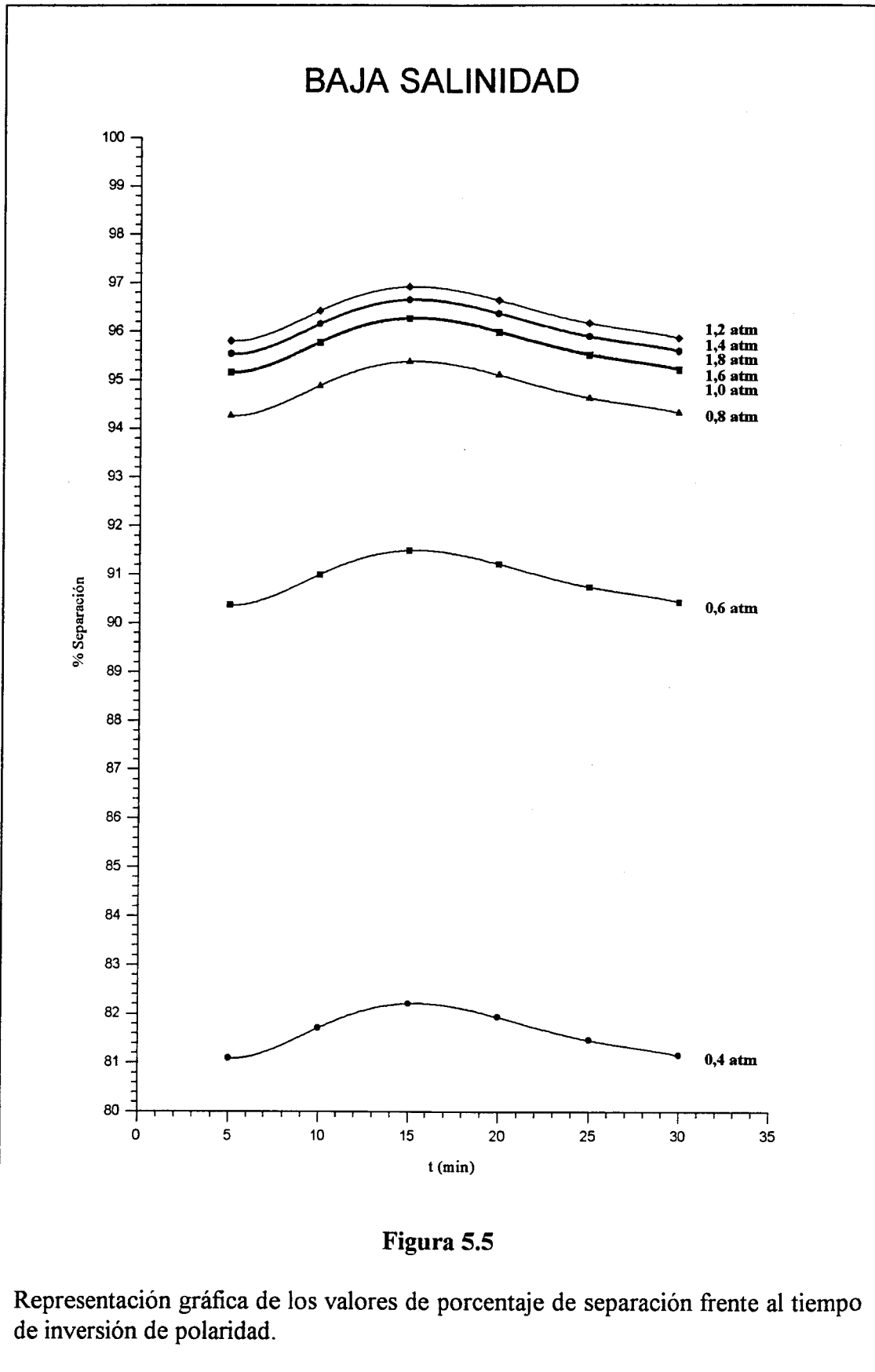
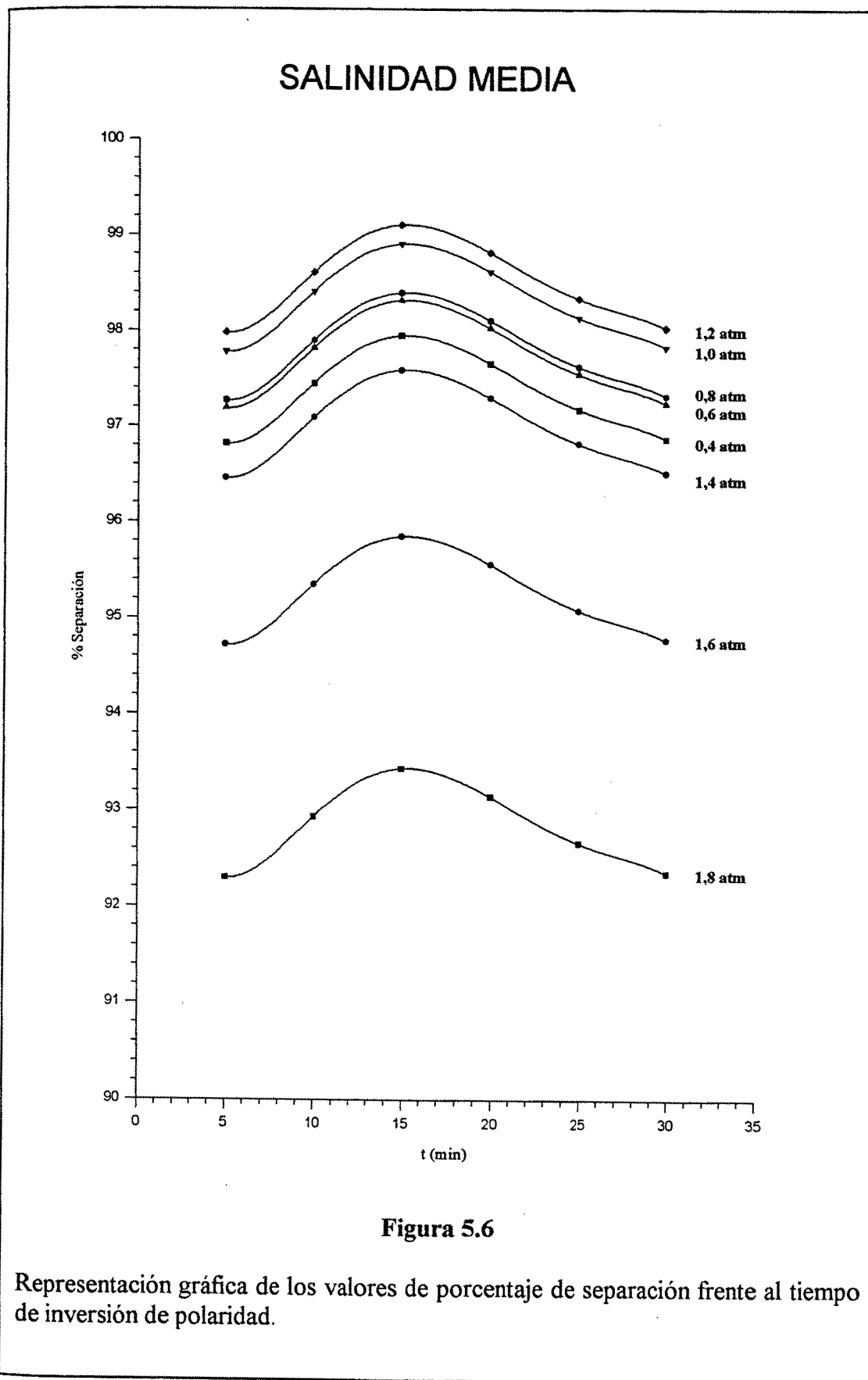


Figura 5.5

Representación gráfica de los valores de porcentaje de separación frente al tiempo de inversión de polaridad.



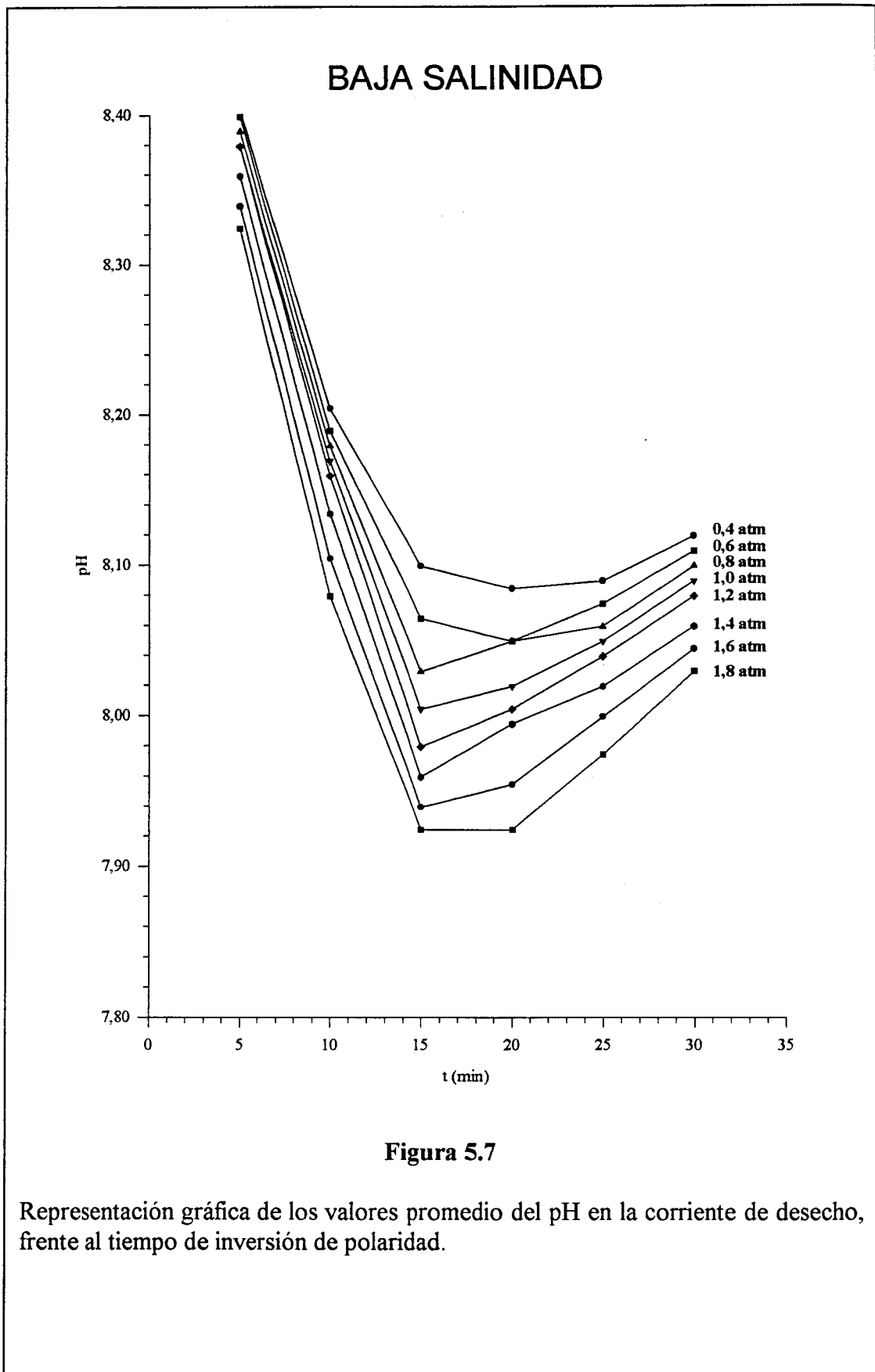


Figura 5.7

Representación gráfica de los valores promedio del pH en la corriente de desecho, frente al tiempo de inversión de polaridad.

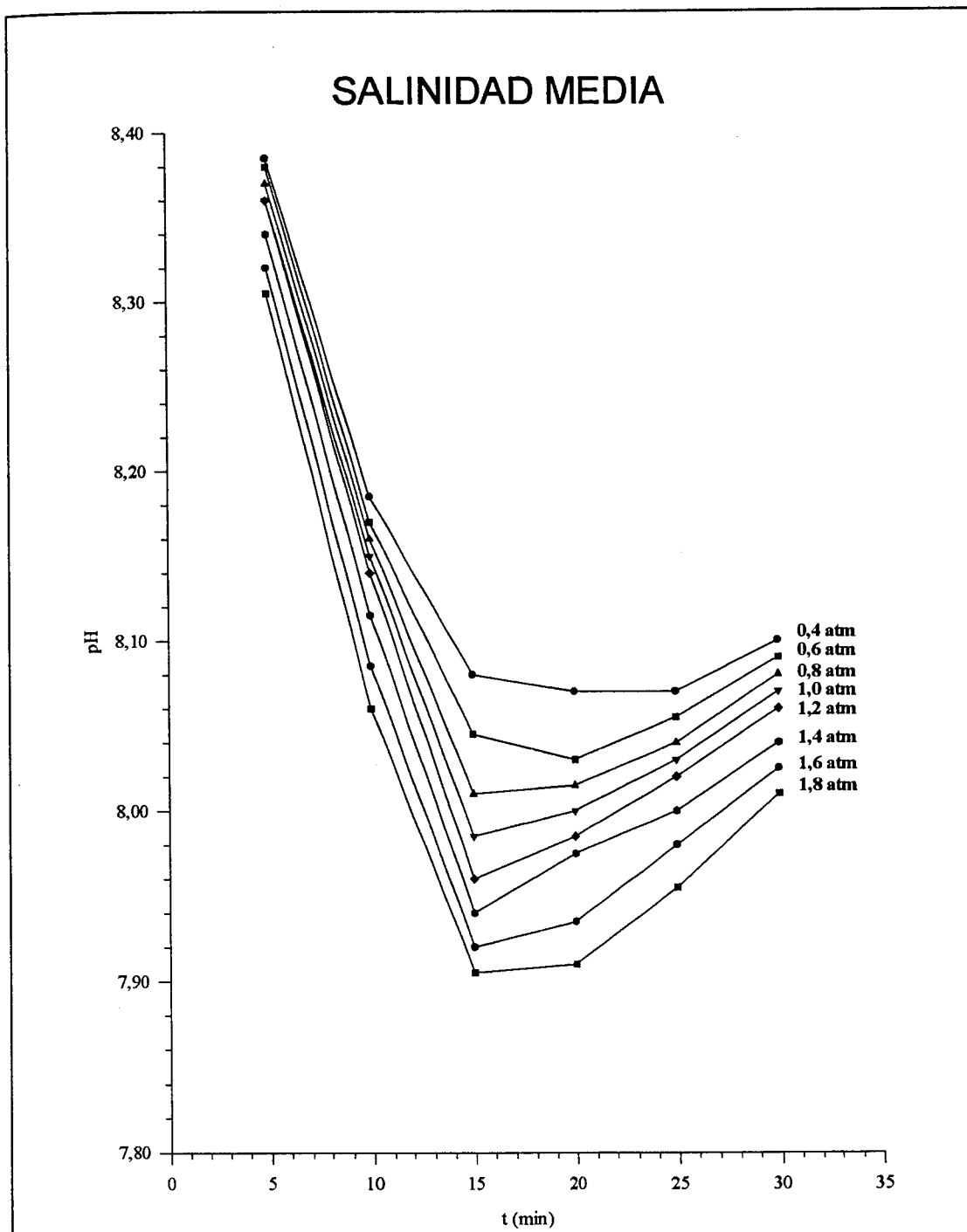


Figura 5.8

Representación gráfica de los valores promedio del pH en la corriente de desecho, frente al tiempo de inversión de polaridad.

5.4. CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA PARA AGUA DE BAJA SALINIDAD

Para el agua de baja salinidad, todos los valores obtenidos y calculados aparecen en las Tablas 5.29 a 5.37. En cada una de las tablas, a la temperatura de trabajo (20°C) y para los diferentes valores de tensiones eléctricas aplicadas a las etapas de la pila, se dan los valores promedio de ambas etapas, para polaridad positiva y negativa, de la intensidad, de la potencia, de la conductividad de producto, de la conductividad de desecho, de la concentración de producto, de la concentración de desecho y del porcentaje de separación. También se dan los valores promedio para la pila, de la intensidad, de la potencia, de la conductividad de producto, de la conductividad de desecho, de la concentración de producto, de la concentración de desecho y del porcentaje de separación, así como los valores de caudales de alimentación, producto y desecho, y el valor del coste de producto.

5.4.1 Optimo de funcionamiento a baja salinidad. Porcentaje de separación

Calculados los porcentajes de separación para cada voltaje y presión aplicados, se efectuó la representación tridimensional del porcentaje de separación hallado frente a la presión de alimentación y al voltaje aplicado a ambas etapas de la pila (Figura 5.9), obteniéndose un máximo relativo del porcentaje de separación con un valor del 95,4%, a una presión de 1,2 atm y un voltaje de 70V.

Analizando las curvas bidimensionales asociadas a ésta representación, correspondientes a cortes de la superficie citada mediante planos paralelos al plano coordenado porcentaje de separación-voltaje (Figura 5.10), se observa que, en general, se produce un aumento del porcentaje de separación conforme aumenta el voltaje aplicado, pasando por un valor máximo a 70V, para cada presión de alimentación. Si se analizan los cortes mediante planos paralelos al plano coordenado porcentaje de separación-presión (Figura 5.11), se observa la existencia de un valor máximo para la presión de 1,2 atm al ir aumentando el voltaje.

Tabla 5.29

Caracterización de una planta EDR Aquamite I para baja salinidad.

Valores correspondientes a 30 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 5320 $\mu\text{S/cm}$ (3404,80 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Intensidad: I(+) (A)	0,50	0,54	0,57	0,58	0,64	0,66	0,67	0,67
Intensidad: I(-) (A)	0,34	0,46	0,58	0,72	0,78	0,85	0,95	1,05
Intensidad promedio pila: I (A)	0,42	0,50	0,57	0,65	0,71	0,76	0,81	0,86
Potencia: Pot(+) (w)	15,00	16,20	16,95	17,55	19,05	19,95	20,10	20,10
Potencia: Pot(-) (w)	10,20	13,80	17,25	21,45	23,55	25,65	28,50	31,50
Potencia promedio pila: Pot (w)	12,60	15,00	17,10	19,50	21,30	22,80	24,30	25,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1820,17	1232,21	1158,34	1154,66	1156,04	1154,71	1315,68	1408,05
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	2511,44	2091,86	1493,16	729,34	567,96	643,79	962,79	1340,85
Conductividad promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	2165,80	1662,04	1325,75	942,00	862,00	899,25	1139,23	1374,45
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	9025,70	10151,02	10373,44	10621,34	10524,96	10688,60	10605,71	10781,96
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	8293,77	9135,07	9966,88	11162,66	11260,04	11347,11	11071,51	10875,79
Conductividad promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	8659,74	9643,04	10170,16	10892,00	10892,50	11017,86	10838,61	10828,88
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1164,91	788,62	741,34	738,98	739,86	739,01	842,03	901,15
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1607,32	1338,79	955,62	466,78	363,50	412,03	616,19	858,15
Concentración promedio pila (p): Cc(p) (ppm)	1386,11	1063,71	848,48	602,88	551,68	575,52	729,11	879,65
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5776,45	6496,65	6639,00	6797,66	6735,97	6840,70	6787,65	6900,46
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5308,01	5846,44	6378,80	7144,10	7206,43	7262,15	7085,77	6960,51
Concentración promedio pila (d): Cc(d) (ppm)	5542,23	6171,55	6508,90	6970,88	6971,20	7051,43	6936,71	6930,48
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	82,40	87,45	88,06	87,85	87,93	87,78	85,93	84,58
Porcentaje de separación: %S(-)	75,72	78,70	84,61	92,32	94,07	93,19	89,70	85,31
Porcentaje de separación promedio pila: %S	79,06	83,08	86,33	90,08	91,00	90,48	87,82	84,95
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	10,50	8,65	7,54	6,96	6,39	5,90	5,52	5,23

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.30

Caracterización de una planta EDR Aquamite I para baja salinidad.

Valores correspondientes a 40 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 5300 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3392 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Intensidad: I(+) (A)	0,97	1,05	1,14	1,20	1,25	1,35	1,35	1,45
Intensidad: I(-) (A)	0,42	0,61	0,76	0,90	1,05	1,13	1,30	1,35
Intensidad promedio pila: I (A)	0,69	0,83	0,95	1,05	1,15	1,24	1,32	1,40
Potencia: Pot(+) (w)	38,60	42,00	45,80	48,20	50,00	54,00	53,80	58,00
Potencia: Pot(-) (w)	16,60	24,40	30,20	35,80	42,00	45,20	51,80	54,00
Potencia promedio pila: Pot (w)	27,60	33,20	38,00	42,00	46,00	49,60	52,80	56,00
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1834,06	1500,24	1351,23	1135,86	1074,89	1117,01	1118,19	1116,00
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1610,17	1044,40	648,77	474,64	472,11	530,49	688,31	785,00
Conductividad promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1722,11	1272,32	1000,00	805,25	773,50	823,75	903,25	950,50
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	8969,82	9790,62	10094,94	10599,81	10581,38	10691,40	10819,99	11141,81
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	9206,88	10329,34	10947,92	11441,37	11334,87	11447,37	11387,43	11603,96
Conductividad promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	9088,35	10059,98	10521,43	11020,59	10958,13	11069,39	11103,71	11372,89
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1173,80	960,15	864,79	726,95	687,93	714,89	715,64	714,24
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1030,51	668,42	415,21	303,77	302,15	339,51	440,52	502,40
Concentración promedio pila (p): Cc(p) (ppm)	1102,15	814,29	640,00	515,36	495,04	527,20	578,08	608,32
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5740,69	6266,00	6460,76	6783,88	6772,09	6842,50	6924,79	7130,76
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5892,40	6610,78	7006,67	7322,48	7254,31	7326,32	7287,96	7426,53
Concentración promedio pila (d): Cc(d) (ppm)	5816,55	6438,39	6733,71	7053,18	7013,20	7084,41	7106,37	7278,65
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	82,20	84,67	86,02	88,00	88,73	88,13	88,00	87,73
Porcentaje de separación: %S(-)	84,38	89,33	93,29	94,98	95,05	94,36	92,61	91,37
Porcentaje de separación promedio pila: %S	83,29	87,00	89,65	91,49	91,89	91,25	90,30	89,55
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	23,00	19,15	16,76	15,00	13,80	12,83	12,00	11,35

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.31
 Caracterización de una planta EDR Aquamite I para baja salinidad.
 Valores correspondientes a 50 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 5310 $\mu\text{S/cm}$ (3398,40 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Intensidad: I(+) (A)	1,17	1,33	1,41	1,52	1,58	1,68	1,77	1,85
Intensidad: I(-) (A)	0,45	0,62	0,81	0,95	1,11	1,20	1,31	1,41
Intensidad promedio pila: I (A)	0,81	0,97	1,11	1,23	1,34	1,44	1,54	1,63
Potencia: Pot(+) (w)	58,50	66,25	70,50	75,75	78,75	83,75	88,75	92,75
Potencia: Pot(-) (w)	22,50	30,75	40,50	47,25	55,25	60,25	65,25	70,25
Potencia promedio pila: Pot (w)	40,50	48,50	55,50	61,50	67,00	72,00	77,00	81,50
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1750,03	1572,71	1261,70	1134,53	1032,71	955,90	962,06	997,35
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	1731,69	1079,19	567,30	407,47	446,79	532,10	551,44	776,62
Conductividad promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	1740,86	1325,95	914,50	771,00	739,75	744,00	756,75	886,99
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	9079,38	9726,80	10225,79	10624,23	10656,62	10921,95	11049,28	11331,43
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	9098,80	10310,05	11068,99	11549,58	11389,01	11468,18	11591,30	11639,62
Conductividad promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	9089,09	10018,42	10647,39	11086,91	11022,81	11195,07	11320,29	11485,52
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1120,02	1006,53	807,49	726,10	660,93	611,78	615,72	638,31
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1108,28	690,68	363,07	260,78	285,95	340,54	352,92	497,04
Concentración promedio pila (p): Cc(p) (ppm)	1114,15	848,61	585,28	493,44	473,44	476,16	484,32	567,67
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5810,80	6225,15	6544,51	6799,51	6820,23	6990,05	7071,54	7252,11
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5823,23	6598,43	7084,16	7391,73	7288,97	7339,64	7418,43	7449,36
Concentración promedio pila (d): Cc(d) (ppm)	5817,02	6411,79	6814,33	7095,62	7054,60	7164,84	7244,99	7350,74
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	83,05	83,96	86,97	88,04	89,20	89,86	89,69	89,06
Porcentaje de separación: %S(-)	83,23	88,99	94,14	95,70	95,33	94,36	94,09	91,48
Porcentaje de separación promedio pila: %S	83,14	86,47	90,56	91,87	92,26	92,11	91,89	90,27
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	33,75	27,98	24,49	21,96	20,10	18,62	17,50	16,52

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.32
Caracterización de una planta EDR Aquamite I para baja salinidad.

Valores correspondientes a 60 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 5340 $\mu\text{S/cm}$ (3417,60 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Intensidad: I(+) (A)	1,32	1,52	1,55	1,64	1,77	1,87	1,97	2,08
Intensidad: I(-) (A)	0,40	0,56	0,84	0,98	1,09	1,21	1,33	1,43
Intensidad promedio pila: I (A)	0,86	1,04	1,19	1,31	1,43	1,54	1,65	1,75
Potencia: Pot(+) (w)	79,20	91,20	92,70	98,40	106,20	112,20	118,20	124,50
Potencia: Pot(-) (w)	24,00	33,60	50,10	58,80	65,40	72,60	79,80	85,50
Potencia promedio pila: Pot (w)	51,60	62,40	71,40	78,60	85,80	92,40	99,00	105,00
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1614,31	1526,20	1208,14	1012,72	964,38	938,16	922,25	906,12
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	1580,98	736,80	276,36	307,78	314,12	374,34	421,75	552,21
Conductividad promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	1597,64	1131,50	742,25	660,25	639,25	656,25	672,00	729,16
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	9284,85	9847,22	10357,25	10847,45	10809,52	11013,48	11171,43	11530,70
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	9320,14	10780,14	11488,71	11744,64	11622,35	11740,19	11832,09	12024,85
Conductividad promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	9302,49	10313,68	10922,98	11296,05	11215,94	11376,83	11501,76	11777,77
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1033,16	976,77	773,21	648,14	617,20	600,42	590,24	579,92
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1011,83	471,55	176,87	196,98	201,04	239,58	269,92	353,41
Concentración promedio pila (p): Cc(p) (ppm)	1022,49	724,16	475,04	422,56	409,12	420,00	430,08	466,67
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5942,30	6302,22	6628,64	6942,37	6918,10	7048,63	7149,71	7379,64
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5964,89	6899,29	7352,77	7516,57	7438,30	7513,72	7572,54	7695,90
Concentración promedio pila (d): Cc(d) (ppm)	5953,60	6600,76	6990,71	7229,47	7178,20	7281,17	7361,13	7537,77
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	84,45	84,52	87,59	89,38	89,97	90,11	90,17	90,11
Porcentaje de separación: %S(-)	84,77	92,53	97,16	96,77	96,73	96,05	95,51	93,97
Porcentaje de separación promedio pila: %S	84,61	88,52	92,38	93,08	93,35	93,08	92,84	92,04
Coste de producto: Coste(p) (pis/m ³)	43,00	36,00	31,50	28,07	25,74	23,90	22,50	21,28

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.33
 Caracterización de una planta EDR Aquamite I para baja salinidad.
 Valores correspondientes a 70 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 5200 $\mu\text{S/cm}$ (3328 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Intensidad: I(+) (A)	1,39	1,43	1,57	1,69	1,82	1,95	2,05	2,12
Intensidad: I(-) (A)	0,43	0,78	0,95	1,11	1,22	1,33	1,46	1,60
Intensidad promedio pila: I (A)	0,91	1,10	1,26	1,40	1,52	1,64	1,75	1,86
Potencia: Pot(+) (w)	97,30	99,75	109,90	118,65	127,40	136,51	143,15	148,41
Potencia: Pot(-) (w)	30,10	54,25	66,50	77,35	85,40	93,10	101,85	112,00
Potencia promedio pila: Pot (w)	63,70	77,00	88,20	98,00	106,40	114,80	122,50	130,20
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1551,92	1338,30	925,90	806,48	671,45	703,89	692,58	775,24
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	1499,37	515,20	219,10	182,02	189,55	223,11	249,42	417,26
Conductividad promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	1525,65	926,75	572,50	494,25	430,50	463,50	471,00	596,25
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	9062,67	9763,83	10389,98	10791,76	10860,68	10994,99	11149,79	11377,96
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	9118,31	10736,58	11248,24	11586,52	11463,07	11614,65	11734,77	11877,78
Conductividad promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	9090,49	10250,20	10819,11	11189,14	11161,88	11304,82	11442,28	11627,87
Concentración: Cc(p+) (ppm)	993,23	856,51	592,58	516,14	429,73	450,49	443,25	496,16
Concentración: Cc(p-) (ppm)	959,60	329,73	140,22	116,50	121,31	142,79	159,63	267,05
Concentración promedio pila (p): Cc(p) (ppm)	976,42	593,12	366,40	316,32	275,52	296,64	301,44	381,60
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5800,11	6248,85	6649,59	6906,72	6950,84	7036,79	7135,87	7281,90
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5835,72	6871,41	7198,87	7415,37	7336,36	7433,38	7510,25	7601,78
Concentración promedio pila (d): Cc(d) (ppm)	5817,91	6560,13	6924,23	7161,05	7143,60	7235,09	7323,06	7441,84
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	84,65	86,06	90,24	91,31	92,83	92,38	92,42	91,31
Porcentaje de separación: %S(-)	85,17	94,63	97,69	98,04	97,97	97,58	97,27	95,32
Porcentaje de separación promedio pila: %S	84,91	90,35	93,96	94,68	95,40	94,98	94,85	93,32
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	53,08	44,42	38,91	35,00	31,92	29,69	27,84	26,39

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.34
Caracterización de una planta EDR Aquamite I para baja salinidad.

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Intensidad: I(+) (A)	1,35	1,59	1,80	1,83	2,05	2,20	2,29	2,43
Intensidad: I(-) (A)	0,67	0,86	1,00	1,27	1,34	1,44	1,59	1,69
Intensidad promedio pila: I (A)	1,01	1,22	1,40	1,55	1,69	1,82	1,94	2,06
Potencia: Pot(+) (w)	108,00	126,80	144,00	146,80	163,60	175,60	182,80	194,00
Potencia: Pot(-) (w)	53,60	68,40	80,00	101,20	106,80	115,60	127,60	135,60
Potencia promedio pila: Pot (w)	80,80	97,60	112,00	124,00	135,20	145,60	155,20	164,80
Conductividad: Cd(p+) ($\mu S/cm$)	1603,91	1330,45	1115,35	1042,35	946,79	905,68	893,06	1038,86
Conductividad: Cd(p-) ($\mu S/cm$)	1325,96	543,05	318,65	205,15	202,21	235,82	262,94	487,87
Conductividad promedio pila: Cd(p) ($\mu S/cm$)	1464,93	936,75	717,00	623,75	574,50	570,75	578,00	763,36
Conductividad: Cd(d+) ($\mu S/cm$)	8595,86	9336,74	9717,07	10037,00	10066,51	10277,13	10421,17	10530,65
Conductividad: Cd(d-) ($\mu S/cm$)	8890,16	10267,30	10684,50	11102,54	10997,24	11140,50	11252,91	11299,96
Conductividad promedio pila: Cd(d) ($\mu S/cm$)	8743,01	9802,02	10200,79	10569,77	10531,88	10708,81	10837,04	10915,30
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1026,50	851,49	713,83	667,11	605,95	579,63	571,56	664,87
Concentración: Cc(p-) (ppm)	848,61	347,55	203,93	131,29	129,41	150,93	168,28	312,24
Concentración promedio pila (p): Cc(p) (ppm)	937,56	599,52	458,88	399,20	367,68	365,28	369,92	488,55
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5501,35	5975,52	6218,93	6423,68	6442,57	6577,36	6669,55	6739,61
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5689,70	6571,07	6838,08	7105,63	7038,23	7129,92	7201,86	7231,97
Concentración promedio pila (d): Cc(d) (ppm)	5595,53	6273,29	6528,50	6764,65	6740,40	6853,64	6935,71	6985,79
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	83,50	85,59	87,77	88,33	89,48	89,80	89,84	87,89
Porcentaje de separación: %S(-)	86,36	94,12	96,51	97,70	97,75	97,34	97,01	94,31
Porcentaje de separación promedio pila: %S	84,93	89,85	92,14	93,01	93,62	93,57	93,42	91,10
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	67,33	56,31	49,41	44,29	40,56	37,66	35,27	33,41

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.35
 Caracterización de una planta EDR Aquamite I para baja salinidad.
 Valores correspondientes a 90 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 5250 $\mu\text{S/cm}$ (3360 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Intensidad: I(+) (A)	1,46	1,67	1,82	1,90	2,12	2,21	2,36	2,46
Intensidad: I(-) (A)	0,70	0,93	1,16	1,40	1,48	1,68	1,79	1,94
Intensidad promedio pila: I (A)	1,08	1,30	1,49	1,65	1,80	1,94	2,07	2,20
Potencia: Pot(+) (w)	131,40	150,30	163,80	171,00	190,80	197,55	211,95	220,95
Potencia: Pot(-) (w)	63,00	83,70	104,40	126,00	133,20	150,75	160,65	175,05
Potencia promedio pila: Pot (w)	97,20	117,00	134,10	148,50	162,00	174,60	186,30	198,00
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1683,00	1568,36	1099,20	943,34	866,02	800,63	768,24	960,85
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	1480,50	576,46	177,80	126,66	168,98	207,87	229,26	499,74
Conductividad promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	1581,75	1072,41	638,50	535,00	517,50	504,25	498,75	730,30
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	9026,83	9601,03	10290,26	10731,20	10729,98	10984,75	11165,92	11238,62
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	9241,23	10773,27	11409,10	11770,62	11601,27	11748,74	11877,38	11882,44
Conductividad promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	9134,03	10187,15	10849,68	11250,91	11165,63	11366,74	11521,65	11560,53
Concentración: Cc(p+) (ppm)	1077,12	1003,75	703,49	603,74	554,25	512,40	491,67	614,95
Concentración: Cc(p-) (ppm)	947,52	368,94	113,79	81,06	108,15	133,04	146,73	319,83
Concentración promedio pila (p): Cc(p) (ppm)	1012,32	686,34	408,64	342,40	331,20	322,72	319,20	467,39
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5777,17	6144,66	6585,77	6867,97	6867,19	7030,24	7146,19	7192,72
Concentración: Cc(d-) (ppm)	5914,39	6894,89	7301,82	7533,20	7424,81	7519,20	7601,52	7604,76
Concentración promedio pila (d): Cc(d) (ppm)	5845,78	6519,78	6943,79	7200,58	7146,00	7274,72	7373,86	7398,74
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	83,51	83,82	88,52	89,94	90,84	91,41	91,67	89,34
Porcentaje de separación: %S(-)	85,50	94,05	98,14	98,65	98,21	97,77	97,52	94,45
Porcentaje de separación promedio pila: %S	84,51	88,94	93,33	94,29	94,52	94,59	94,59	91,89
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	81,00	67,50	59,16	53,04	48,60	45,16	42,34	40,14

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.36
Caracterización de una planta EDR Aquamite I para baja salinidad.

Valores correspondientes a 100 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 5300 $\mu\text{S/cm}$ (3392 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Intensidad: I(+) (A)	1,51	1,66	1,79	1,91	2,07	2,23	2,34	2,47
Intensidad: I(-) (A)	0,57	0,84	1,07	1,28	1,40	1,51	1,65	1,75
Intensidad promedio pila: I (A)	1,04	1,25	1,43	1,59	1,73	1,87	1,99	2,11
Potencia: Pot(+) (w)	151,00	165,50	179,00	190,50	206,50	223,00	233,50	247,00
Potencia: Pot(-) (w)	57,00	84,50	107,00	127,50	139,50	151,00	164,50	175,00
Potencia promedio pila: Pot (w)	104,00	125,00	143,00	159,00	173,00	187,00	199,00	211,00
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1558,27	1342,61	930,49	785,77	677,72	662,29	643,33	794,93
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	1218,23	421,65	152,01	123,48	150,78	168,71	208,38	453,84
Conductividad promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	1388,25	882,13	541,25	454,62	414,25	415,50	425,85	624,39
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	9261,84	9976,91	10605,83	11045,39	11077,84	11277,49	11446,81	11590,09
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	9621,87	11065,33	11551,13	11888,29	11736,53	11913,66	12020,94	12066,34
Conductividad promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	9441,85	10521,12	11078,48	11466,84	11407,19	11595,58	11733,87	11828,22
Concentración: Cc(p+) (ppm)	997,29	859,27	595,51	502,89	433,74	423,87	411,73	508,76
Concentración: Cc(p-) (ppm)	779,67	269,85	97,29	79,03	96,50	107,97	133,36	290,46
Concentración promedio pila (p): Cc(p) (ppm)	888,48	564,56	346,40	290,96	265,12	265,92	272,55	399,61
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5927,57	6385,23	6787,73	7069,05	7089,82	7217,60	7325,96	7417,66
Concentración: Cc(d-) (ppm)	6158,00	7081,81	7392,72	7608,51	7511,38	7624,74	7693,40	7722,46
Concentración promedio pila (d): Cc(d) (ppm)	6042,79	6733,52	7090,23	7338,78	7300,60	7421,17	7509,68	7570,06
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	84,88	86,28	90,37	91,70	92,90	92,96	93,09	91,26
Porcentaje de separación: %S(-)	88,18	95,69	98,43	98,70	98,42	98,21	97,76	95,01
Porcentaje de separación promedio pila: %S	86,53	90,98	94,40	95,20	95,66	95,59	95,43	93,14
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	86,67	72,12	63,09	56,79	51,90	48,36	45,23	42,77

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.37

Caracterización de una planta EDR Aquamite I para baja salinidad.

Valores correspondientes a 110 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 5170 $\mu\text{S/cm}$ (3308,80 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
Intensidad: I(+) (A)	1,33	1,46	1,64	1,64	1,79	1,97	2,04	2,11
Intensidad: I(-) (A)	0,55	0,80	0,94	1,20	1,31	1,37	1,52	1,67
Intensidad promedio pila: I (A)	0,94	1,13	1,29	1,42	1,55	1,67	1,78	1,89
Potencia: Pot(+) (w)	146,45	160,92	180,94	180,45	197,18	216,96	224,57	232,15
Potencia: Pot(-) (w)	60,35	87,67	102,85	131,96	143,81	150,44	167,03	183,66
Potencia promedio pila: Pot (w)	103,40	124,30	141,90	156,20	170,50	183,70	195,80	207,90
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	1458,73	1052,87	752,93	612,49	531,66	521,71	496,93	648,48
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	1104,12	422,13	179,57	155,01	153,84	164,79	174,07	371,60
Conductividad promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	1281,42	737,50	466,25	383,75	342,75	343,25	335,50	510,04
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	9099,58	10035,70	10533,58	10970,46	10967,93	11161,13	11338,45	11483,06
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	9475,05	10781,12	11229,81	11552,72	11440,20	11621,16	11764,63	11869,65
Conductividad promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	9287,32	10408,41	10881,70	11261,59	11204,06	11391,14	11551,54	11676,36
Concentración: Cc(p+) (ppm)	933,59	673,84	481,88	392,00	340,26	333,89	318,04	415,03
Concentración: Cc(p-) (ppm)	706,64	270,16	114,92	99,20	98,46	105,47	111,40	237,83
Concentración promedio pila (p): Cc(p) (ppm)	820,11	472,00	298,40	245,60	219,36	219,68	214,72	326,43
Concentración: Cc(d+) (ppm)	5823,73	6422,85	6741,49	7021,10	7019,48	7143,12	7256,61	7349,16
Concentración: Cc(d-) (ppm)	6064,03	6899,92	7187,08	7393,74	7321,72	7437,54	7529,36	7596,57
Concentración promedio pila (d): Cc(d) (ppm)	5943,88	6661,38	6964,29	7207,42	7170,60	7290,33	7392,99	7472,87
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00
Porcentaje de separación: %S(+)	85,49	88,97	92,01	93,37	94,29	94,32	94,53	92,69
Porcentaje de separación: %S(-)	89,02	95,58	98,10	98,32	98,35	98,21	98,08	95,81
Porcentaje de separación promedio pila: %S	87,25	92,27	95,05	95,84	96,32	96,26	96,31	94,25
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	86,17	71,71	62,60	55,79	51,15	47,51	44,50	42,14

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

5.4.2 Estudio de la concentración del producto

Otra representación tridimensional interesante corresponde a la concentración de producto calculada, frente al caudal de producto obtenido y al voltaje aplicado a la pila (Figura 5.12), la cual muestra un valor mínimo para la concentración de 275,52 ppm. Las gráficas de la Figura 5.13, corresponden a los cortes de la superficie en estudio, mediante planos paralelos al plano coordinado concentración de producto-caudal; se aprecia que para cada voltaje aplicado, se produce una disminución de la concentración de producto al aumentar el caudal, hasta alcanzar un valor mínimo en $5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$, a partir del cual la concentración de producto aumenta.

5.4.3 Intensidad de corriente en la pila. Curvas corriente-voltaje. Densidad de corriente límite y polarización

La representación de la intensidad de corriente promedio obtenida para la pila, frente a la presión de alimentación y al voltaje aplicado (Figura 5.14), permite el estudio de las curvas de la intensidad promedio de corriente frente al voltaje aplicado para cada presión de alimentación (curvas corriente-voltaje), que se obtienen mediante cortes de la superficie citada con planos paralelos al plano coordinado intensidad-voltaje (Figura 5.15). En ellas se representan los puntos experimentales para los distintos voltajes de trabajo a los que se ajustan curvas polinómicas de orden 6 y coeficiente de correlación $r^2 = 0,999$ para todas. Se observa que conforme aumenta la presión aplicada a cada voltaje, aumenta la intensidad promedio de corriente y que al aumentar el voltaje aplicado, a una presión dada, la intensidad promedio aumenta hasta el voltaje de 90V, a partir del cual disminuye debido a la disminución de portadores de carga, merced a la mayor intensidad del campo eléctrico aplicado.

La obtención de la intensidad de corriente límite para cada presión aplicada (I_{lim}), hallada como el valor por extrapolación de la intersección de los dos tramos rectilíneos obtenidos en el rango de voltaje entre 50 y 90V, se corresponde con el valor de la intensidad para el voltaje de 70V en cada caso. La Figura.5.16 ilustra ésta determinación para las curvas intensidad-voltaje correspondiente a una presión de alimentación de 1,2 atm (óptimo). Los valores de la I_{lim} para las diferentes presiones se dan en la Tabla 5.38.

Tabla 5.38
Valores correspondientes a la intensidad de corriente límite I_{lim} para baja salinidad a 70 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
I_{lim} (A)	0,91	1,10	1,26	1,40	1,52	1,64	1,75	1,86

Se puede concluir que a partir de 70V y en todos los casos, se inicia el proceso polarización.

Los cortes de la superficie de la Figura 5.14 mediante planos paralelos al plano coordinado intensidad-presión, dan la representación de la intensidad de corriente promedio obtenida frente a la presión aplicada, para cada voltaje (Figura 5.17). Las gráficas corresponden a los puntos experimentales para las distintas presiones de trabajo, a los que se ajustan curvas polinómicas de segundo grado, con coeficientes de correlación mayores que 0,999 en todos los casos, cuyos coeficientes aparecen recogidos en la Tabla 5.39.

Tabla 5.39
Coeficientes correspondientes al ajuste polinómico de intensidad frente a presión aplicada para baja salinidad ($I = b_0 + b_1(\Delta P) + b_2(\Delta P)^2$)

	ΔV (voltios)								
	30	40	50	60	70	80	90	100	110
b_2 (A/atm ²)	-0,077	-0,117	-0,135	-0,138	-0,158	-0,180	-0,180	-0,180	-0,150
b_1 (A/atm)	0,483	0,758	0,875	0,926	1,011	1,131	1,181	1,149	0,995
b_0 (A)	0,238	0,412	0,489	0,524	0,542	0,597	0,647	0,618	0,577

Para las densidades de corriente, definidas como el cociente entre las intensidades promedio de corriente, expresadas en amperios, y el área efectiva de membrana de la pila expresada en m² (2,2 m²), calculada como el producto del área efectiva de una membrana (220 cm²) por el número de celdas electrodiálíticas (100), se comprueba que satisfacen la ecuación general (3.13-1):

$$i_{lim} = \alpha \times Q_p^{0,5} \tag{5.2-1}$$

donde, i_{lim} , es la densidad de corriente límite (A/m^2), α , es un constante y Q_p , es el caudal de producto (m^3/h). Los valores de α aparecen recogidos en la Tabla 5.40.

Tabla 5.40

Valores correspondientes a la constante α de la ecuación (5.2-1). Voltaje 70 V.
Temperatura 20°C

	ΔP (atm)							
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80
α ($A \times h^{0,5}/m^{2,5}$)	3,08	3,10	3,11	3,11	3,09	3,10	3,10	3,11

De la ecuación (5.2-1) se sigue inmediatamente que

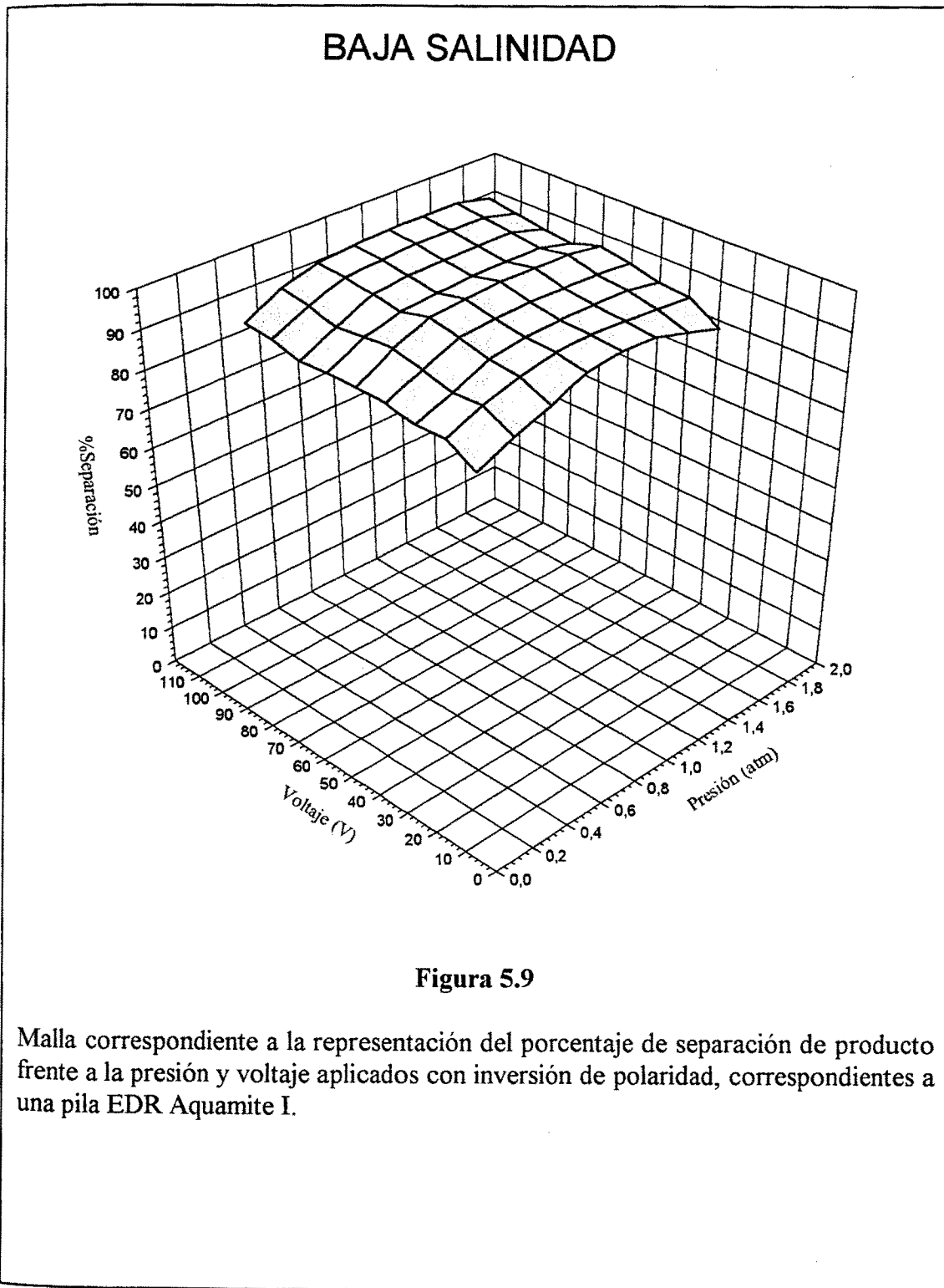
$$\frac{i_p}{i_{p^*}} = \left(\frac{Q_p}{Q_{p^*}} \right)^{0,5} \quad (5.2-2)$$

donde i_p e i_{p^*} son las densidades de corriente (A/m^2) correspondientes a los caudales de producto Q_p y Q_{p^*} (m^3/h) para presiones de trabajo ΔP y ΔP^* consecutivas, para todos los voltajes dados en el experimento y cuyos valores se recogen en la Tabla 5.41.

Tabla 5.41

Valores correspondientes al cociente (i_p/i_{p^*}) de la ecuación (5.2-2) para baja salinidad.
Temperatura 20 °C

ΔV (voltios)	$\left(\frac{Q_{0,4}}{Q_{0,6}} \right)^{0,5}$ = 0,83	$\left(\frac{Q_{0,6}}{Q_{0,8}} \right)^{0,5}$ = 0,87	$\left(\frac{Q_{0,8}}{Q_{1,0}} \right)^{0,5}$ = 0,90	$\left(\frac{Q_{1,0}}{Q_{1,2}} \right)^{0,5}$ = 0,92	$\left(\frac{Q_{1,2}}{Q_{1,4}} \right)^{0,5}$ = 0,93	$\left(\frac{Q_{1,4}}{Q_{1,6}} \right)^{0,5}$ = 0,94	$\left(\frac{Q_{1,6}}{Q_{1,8}} \right)^{0,5}$ = 0,94
30	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,84	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,88	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,88	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94
40	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,91	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94
50	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,84	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94
60	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,91	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,93	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94
70	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94
80	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94
90	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94
100	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94
110	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,88	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,91	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94



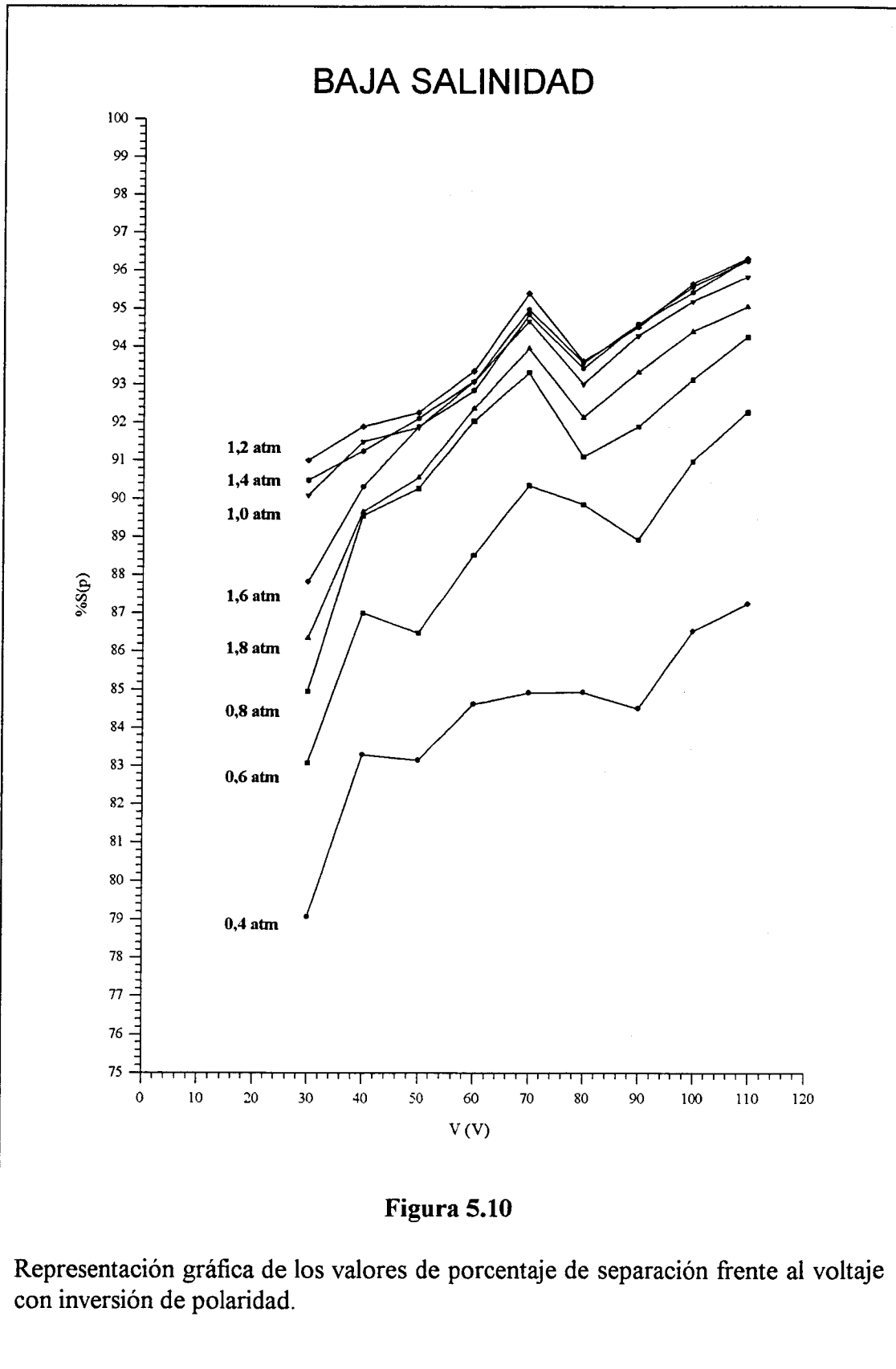


Figura 5.10

Representación gráfica de los valores de porcentaje de separación frente al voltaje con inversión de polaridad.

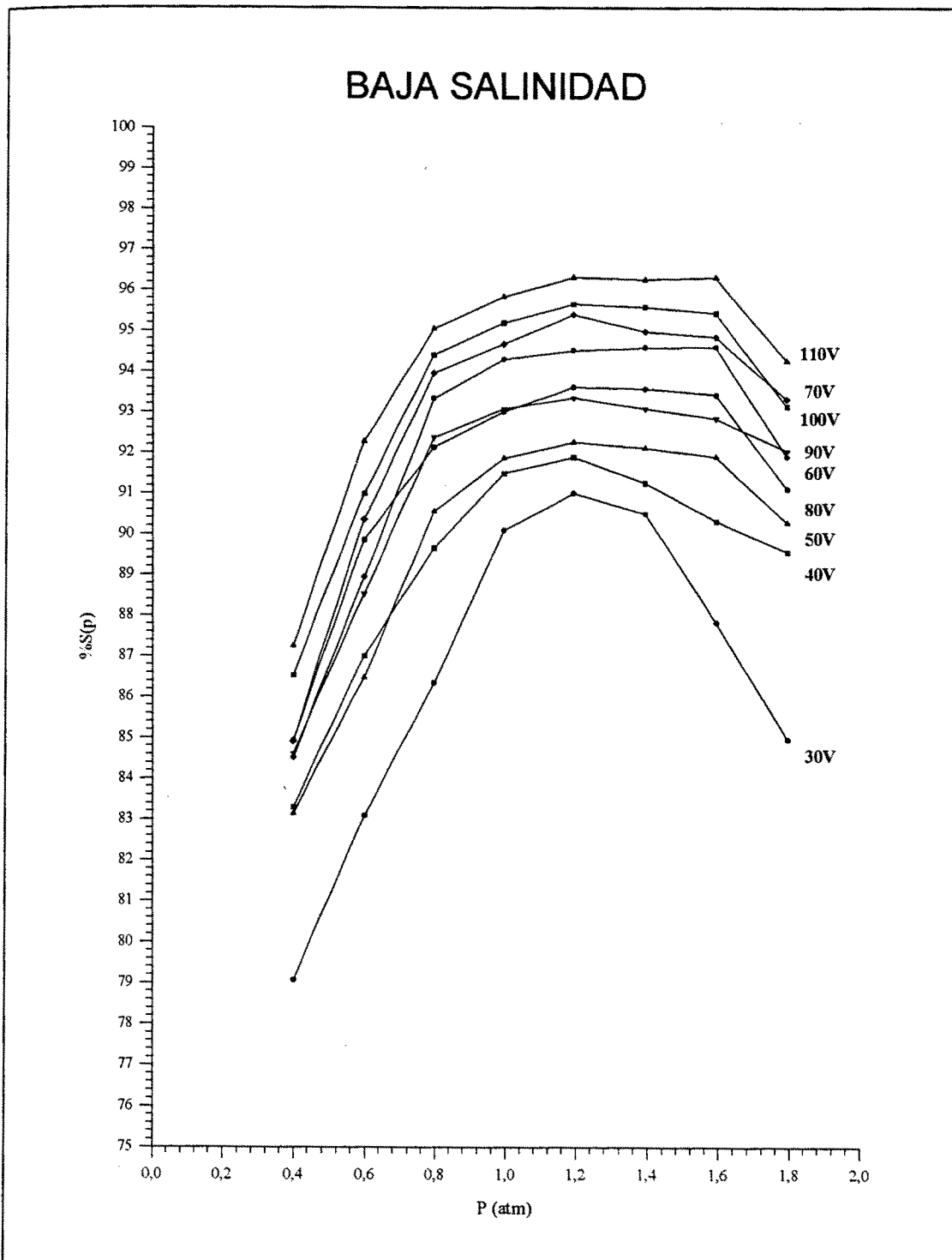
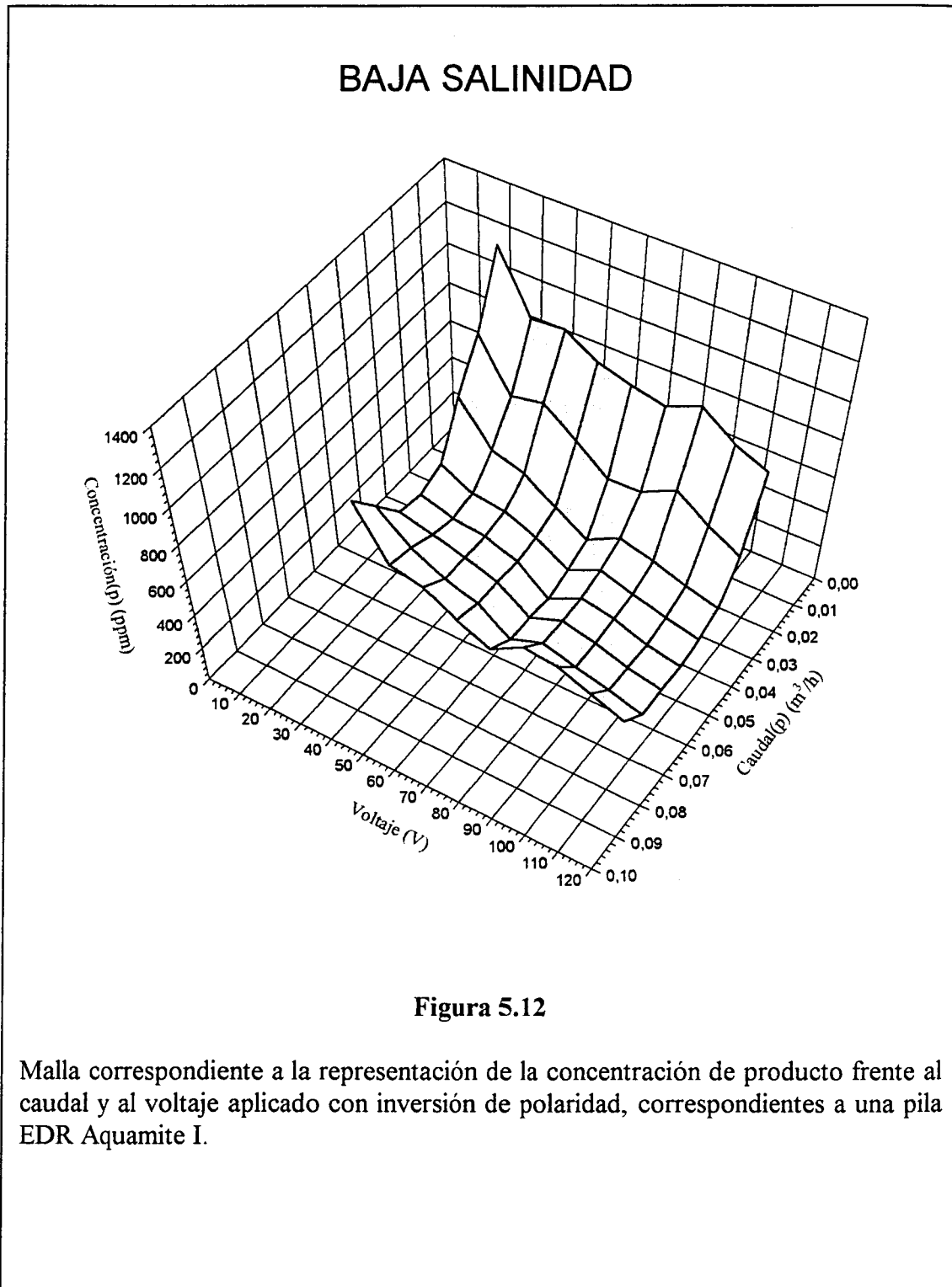


Figura 5.11

Representación gráfica de los valores de porcentaje de separación frente a la presión con inversión de polaridad.



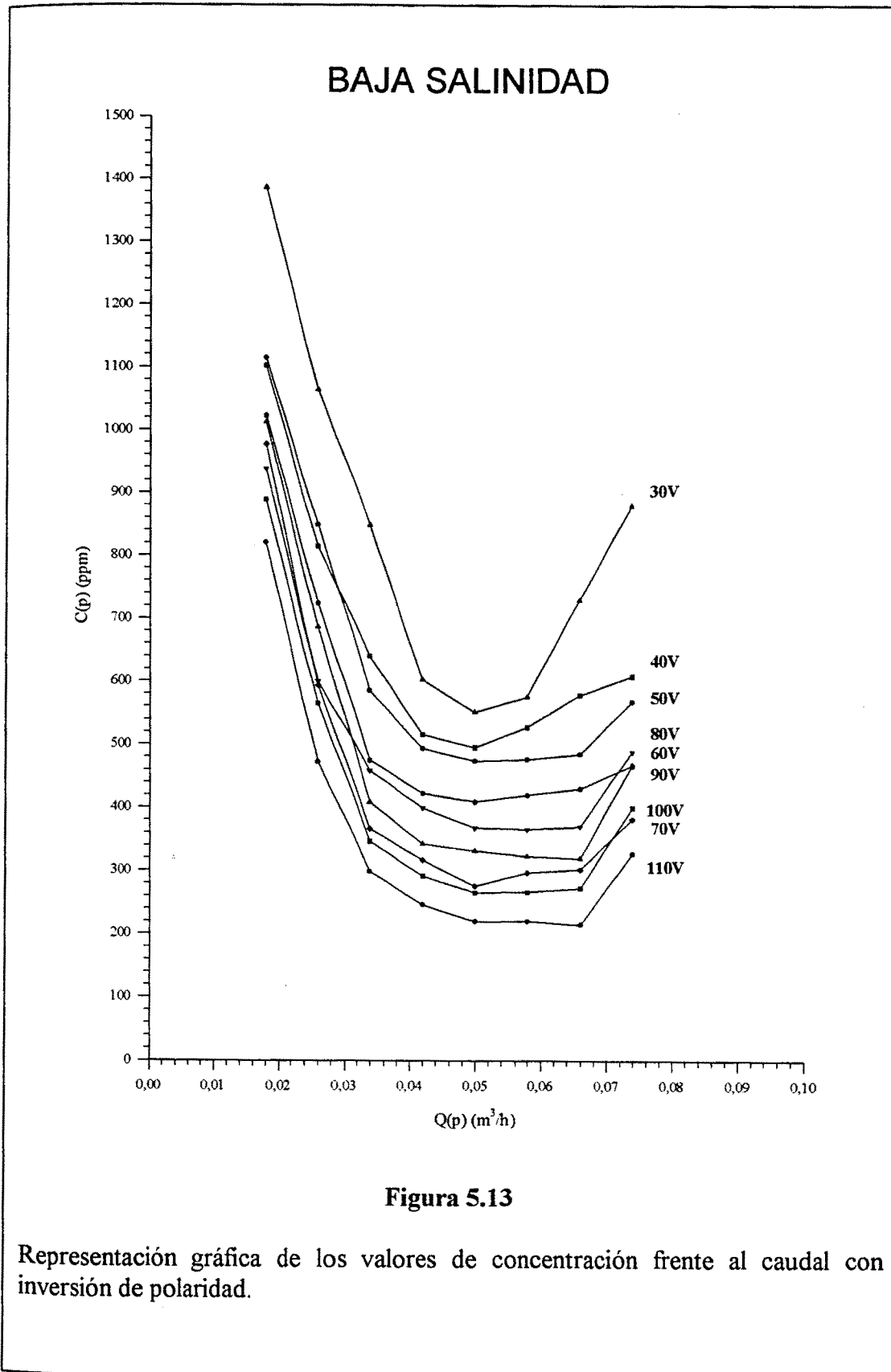
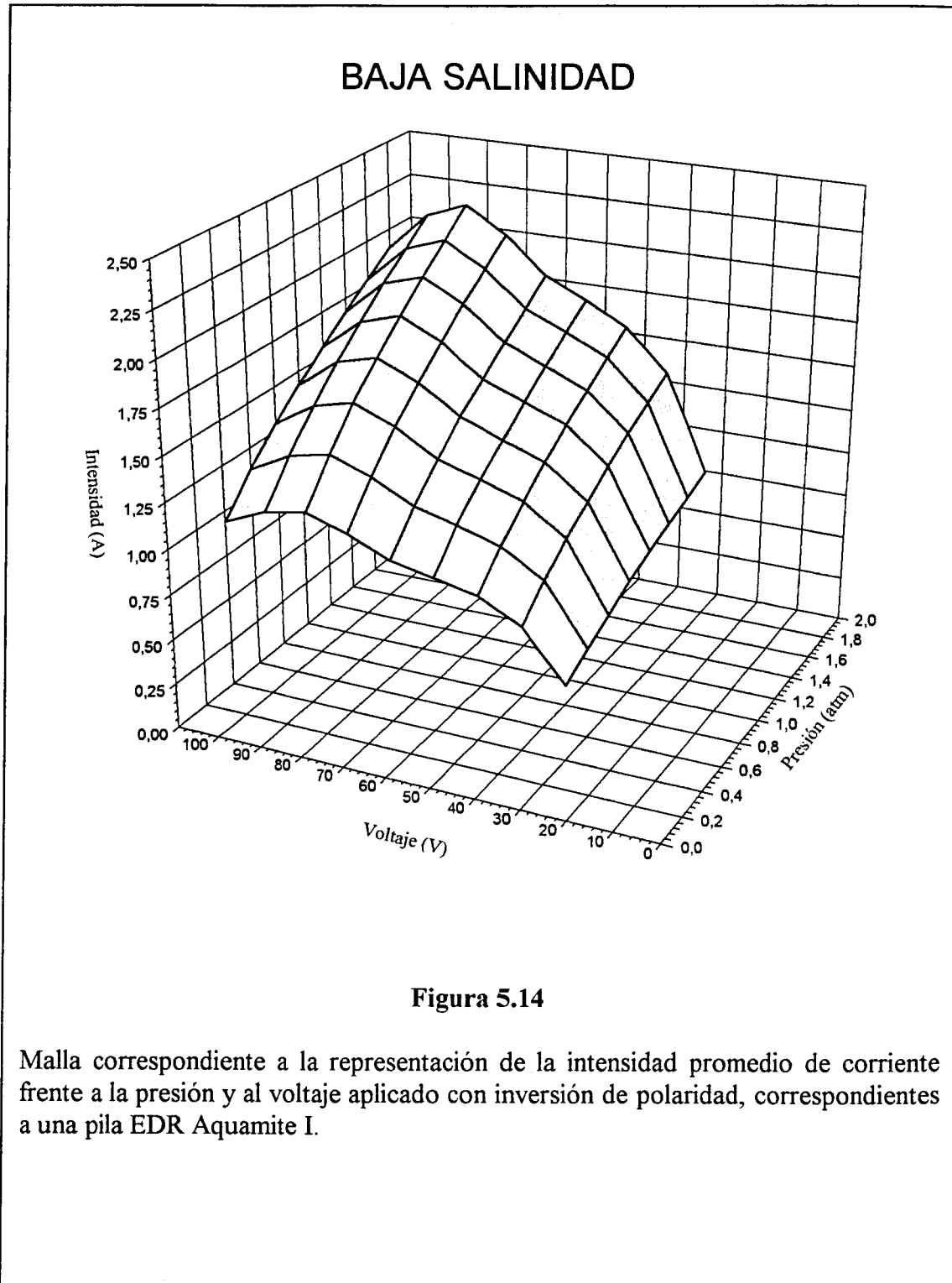
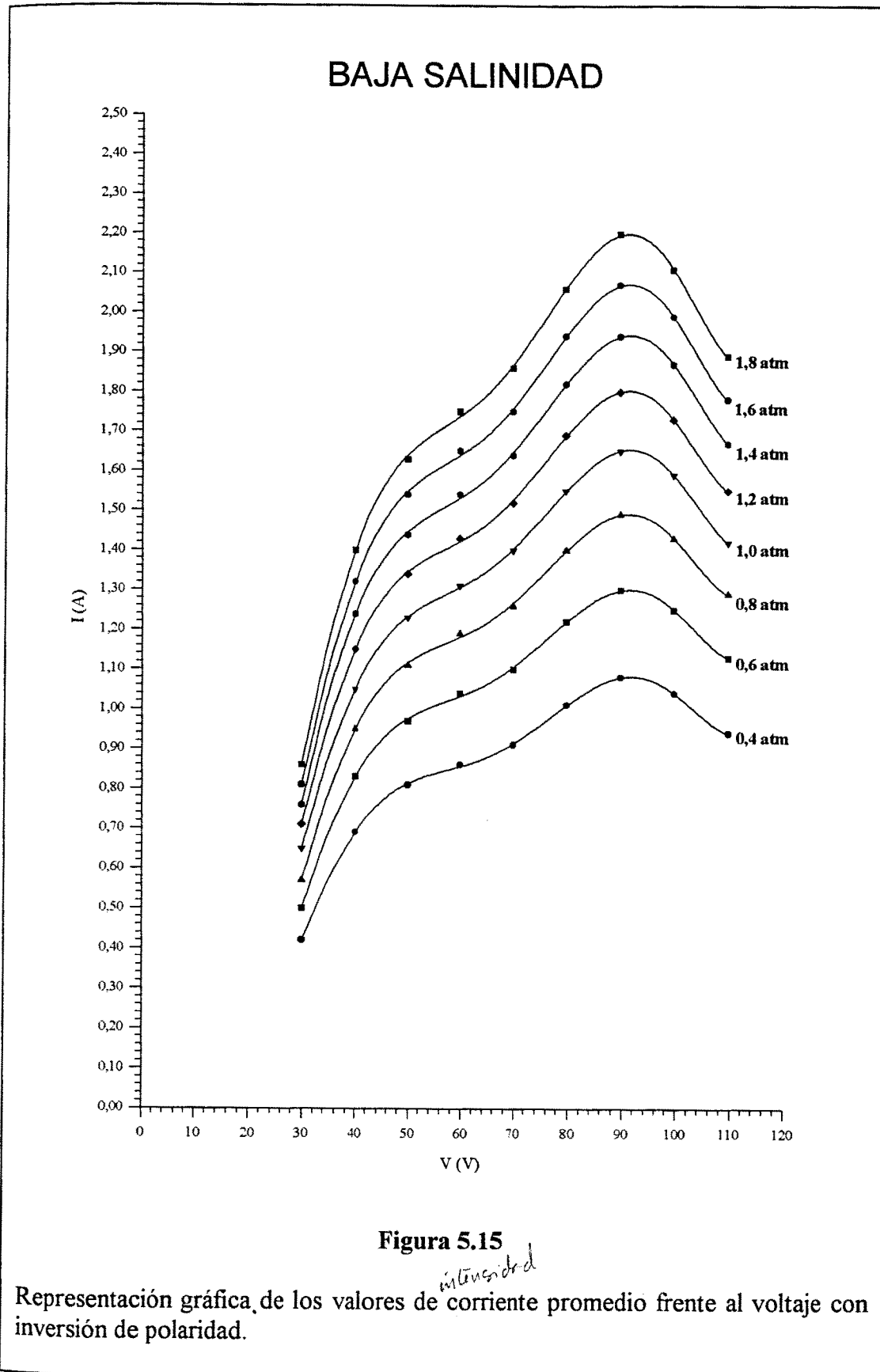
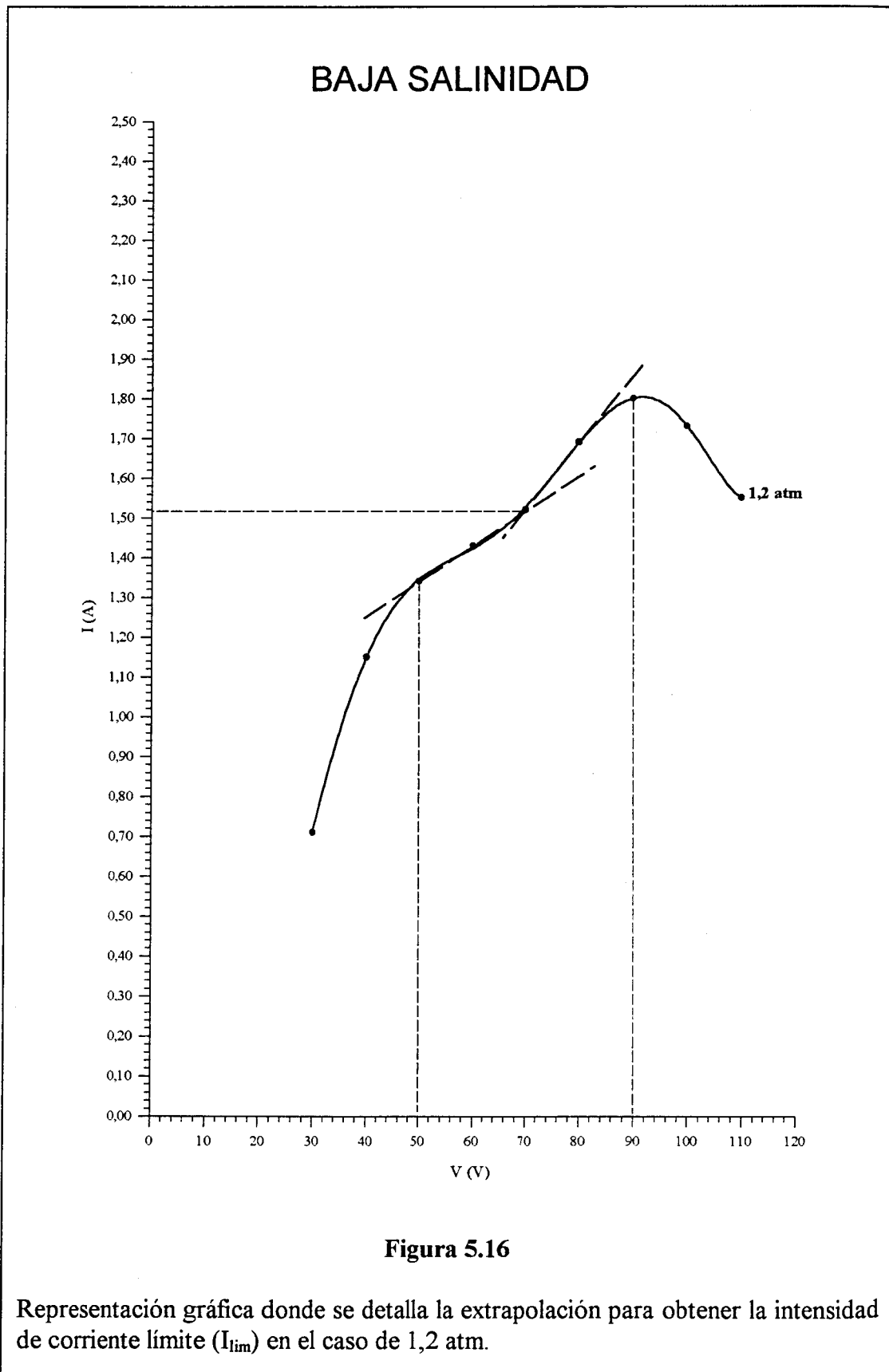


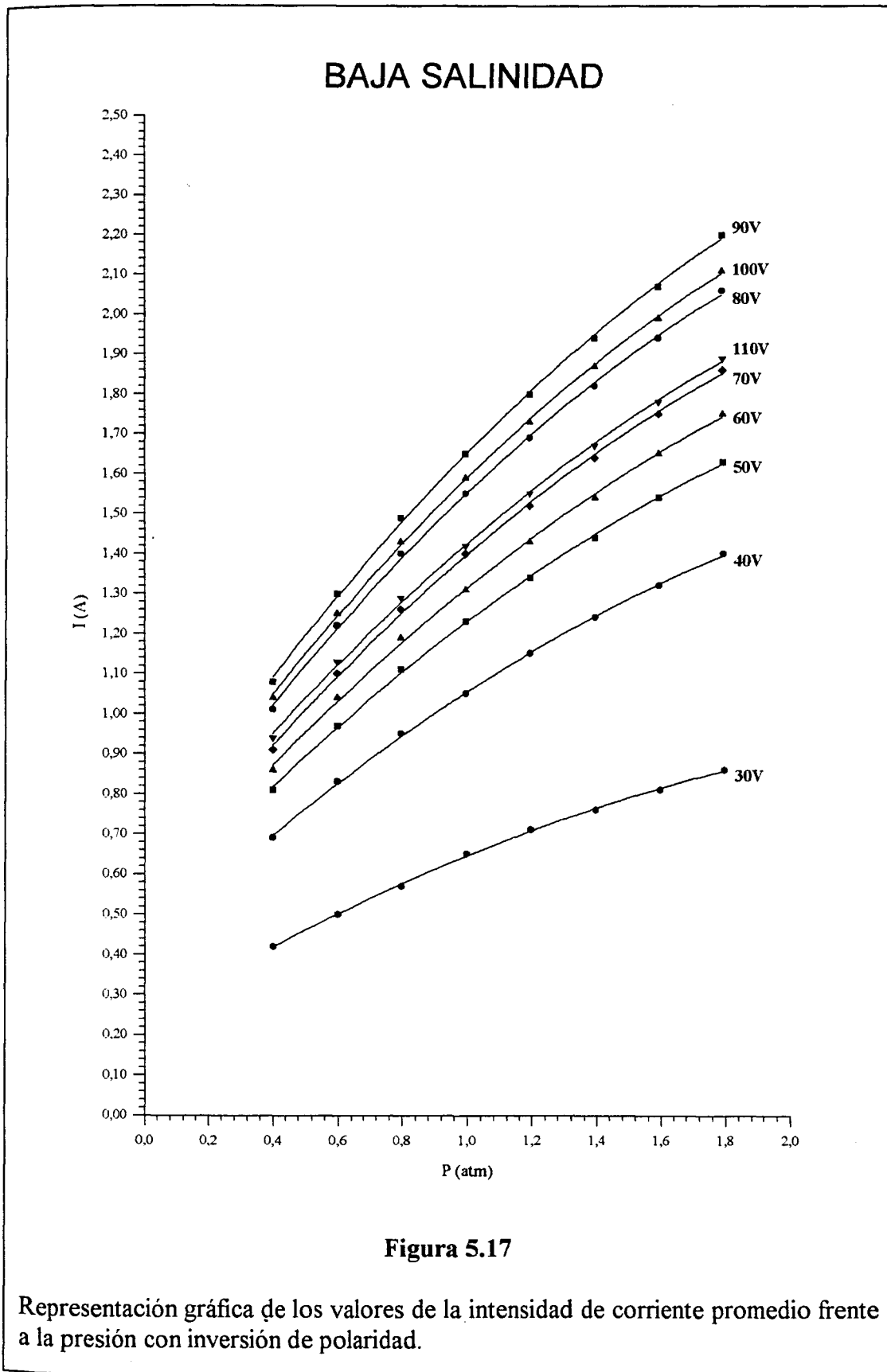
Figura 5.13

Representación gráfica de los valores de concentración frente al caudal con inversión de polaridad.









Por otra parte se observa que para un voltaje dado, la relación entre el caudal de alimentación a la pila, Q_a (m^3/h), y el cociente entre la densidad de corriente promedio, i (A/m^2) y la conductividad de la corriente de desecho, $Cond(d)$ ($\mu S/cm$), es lineal como se aprecia en la Figura 5.18. La Tabla 5.42 recoge los parámetros de ajuste de cada recta y su coeficiente de correlación.

Tabla 5.42

Dependencia lineal entre $i/Cond(d)$ y el caudal de alimentación Q_a : $i/Cond(d)=b_0 + b_1Q_a$

	ΔV (voltios)								
	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$b_1 \times 10^{-4}$ ($A \times cm \times h / \mu S \times m^5$)	1,52	2,38	2,63	2,83	3,02	3,64	3,56	3,41	3,03
$b_0 \times 10^{-5}$ ($A \times cm / \mu S \times m^2$)	1,62	2,61	3,12	3,21	3,45	3,96	4,08	3,78	3,51
r^2	0,993	0,998	0,999	0,998	0,999	0,999	0,998	0,999	0,999

5.4.4 Eficiencia de la corriente

La representación tridimensional de la eficiencia de la corriente promedio frente a la presión de alimentación y al voltaje de la pila, calculada mediante la ecuación (2.7-1) (Figura 5.19). La red de curvas obtenida mediante cortes de la superficie citada por planos paralelos al plano coordenado eficiencia-voltaje (Figura 5.20), muestra una curva correspondiente a 1,8 atm con eficiencias próximas al 100%, a un voltaje de 30V, debido a que la corriente real que se traslada por las celdas (numerador de la ecuación 2.7-1) es igual a la medida registrada en la pantalla del cuadro de control y maniobra. Todas las curvas exhiben un comportamiento decreciente de la eficiencia respecto del voltaje aplicado, hasta alcanzar un valor mínimo a 90V, a partir del cual se registra un ligero aumento y una estabilización hasta el voltaje máximo aplicado (Figura 5.20).

De las curvas que se obtienen mediante cortes de la superficie anterior por planos paralelos al plano coordenado eficiencia-presión (Figura 5.21), se observa que la eficiencia de la corriente aumenta al aumentar la presión, para todos los voltajes aplicados, excepto el de 30V, que registra una práctica estabilización a partir de 1,4 atm.

El valor de la eficiencia de la corriente para el máximo porcentaje de separación obtenido que corresponde a 70V y 1,2 atm fue del 46,1%.

5.4.5 Potencia consumida

Otra representación tridimensional interesante corresponde a la potencia promedio calculada frente al caudal de producto y al voltaje aplicado a la pila (Figura 5.22), la cual permite el estudio de las curvas de potencia consumida frente al voltaje aplicado a cada caudal de producto obtenido, halladas mediante cortes de la superficie por planos paralelos al plano coordenado potencia-voltaje (Figura 5.23). En ellas se representan los puntos experimentales para los distintos voltajes de trabajo a los que se ajustan curvas polinómicas de orden 6 y coeficiente de correlación $r^2 = 0,999$, observándose que al aumentar el voltaje aplicado aumenta la potencia consumida para un caudal de producto determinado, y que conforme aumenta el caudal de producto obtenido, aumenta la potencia consumida para un valor de voltaje dado.

Las curvas que se obtienen mediante cortes de la superficie anterior por planos paralelos al plano coordenado potencia-caudal, son las correspondientes a la potencia frente al caudal, para cada voltaje aplicado (Figura 5.24). Se dan los puntos experimentales para los distintos caudales de trabajo, a los que se ajustan curvas polinómicas de segundo grado y coeficiente de correlación $r^2 = 0,999$, cuyas constantes aparecen en la Tabla 5.43, pudiéndose deducir que para un voltaje dado, el aumento del caudal del producto provoca un aumento del consumo de potencia, que es mayor conforme aumenta el voltaje, y que al aumentar el voltaje, aumenta la potencia consumida, aunque lo hace mínimamente a partir de 90V.

5.4.6 Costes de producción

La última representación tridimensional corresponde al coste calculado por m^3 de producto frente al caudal del mismo y el voltaje aplicado (Figura 5.25). El estudio de las curvas, obtenidas mediante cortes de la superficie correspondiente por planos paralelos al plano coordenado coste-voltaje, dan el coste frente al voltaje aplicado para cada caudal de producto obtenido, con ajustes polinómicos de orden 6 y $r^2 = 0,999$; se observa que para un caudal de producto determinado (ΔP fijo), el aumento del voltaje aplicado da lugar a un aumento del coste de operación de la pila (Figura 5.26), mientras que para un voltaje determinado, conforme aumenta el caudal, disminuye el coste, siendo el coste

correspondiente al mínimo relativo de concentración de producto en el óptimo (70V, 1,2 atm; caudal $5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$) de 31,92 pts/m³. La otra representación que se obtiene mediante cortes de la superficie en estudio, con planos paralelos al plano coordenado corriente-voltaje (Figura 5.27), da el coste frente al caudal de producto obtenido para cada voltaje aplicado, con ajustes polinómicos de orden 3 y $r^2 = 0,999$, cuyos coeficientes aparecen recogidos en la Tabla 5.44. Se puede observar que conforme aumenta el caudal de producto obtenido, disminuye el coste para un voltaje determinado y que a un caudal de producto dado, aumenta el coste de operación de la pila, para un aumento de voltaje aplicado.

Tabla 5.43

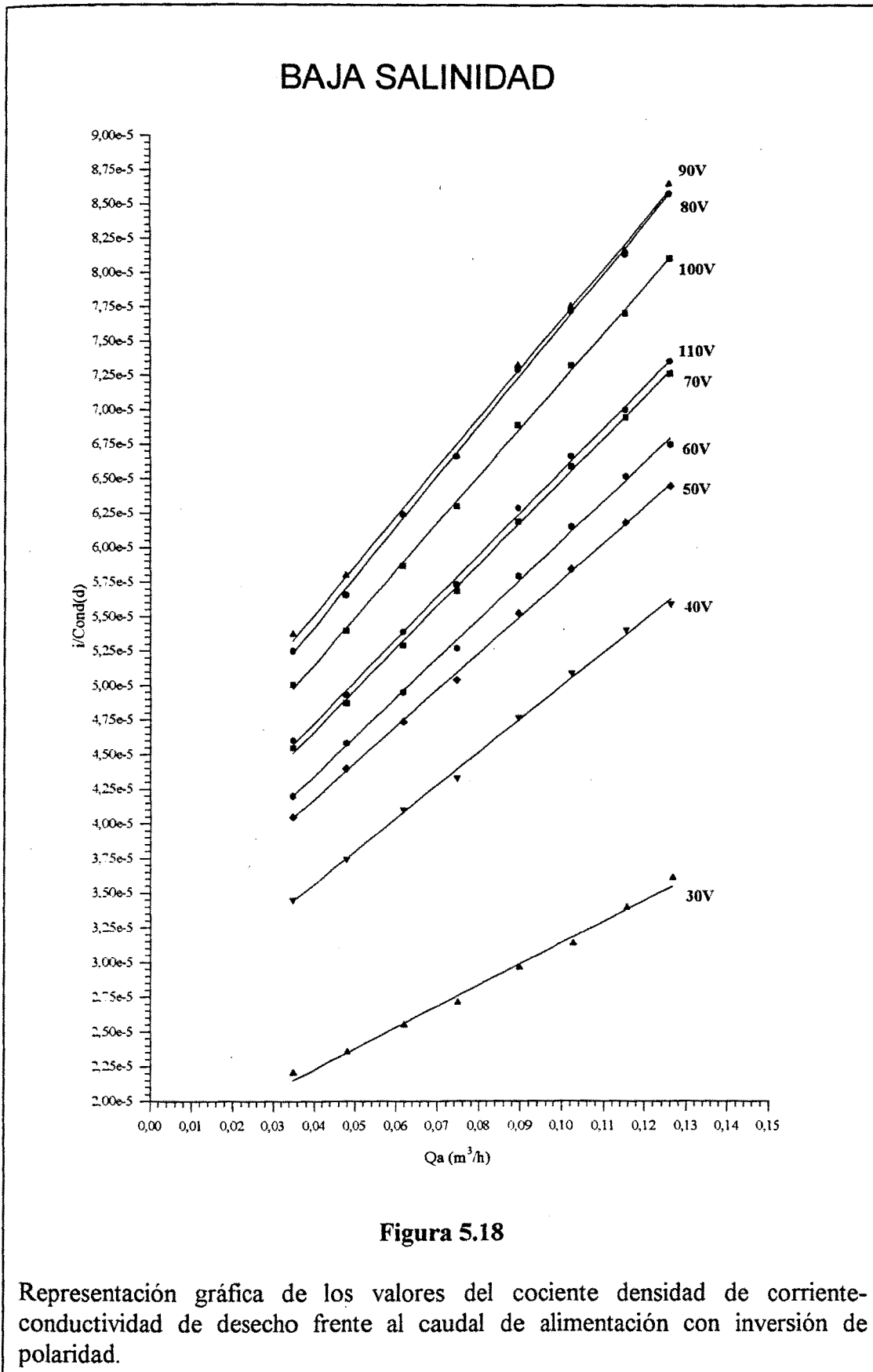
Coefficientes correspondientes al ajuste polinómico de potencia frente al caudal de trabajo para baja salinidad ($\text{Pot} = b_0 + b_1(Qp) + b_2(Qp)^2$)

	ΔV (voltios)								
	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$b_2 \times 10^4$ ($w \times h^2/m^6$)	-0,145	-0,294	-0,423	-0,519	-0,690	-0,900	-1,013	-1,125	-1,033
$b_1 \times 10^3$ ($w \times h/m^3$)	0,368	0,770	1,110	1,410	1,797	2,298	2,698	2,918	2,779
b_0 (w)	6,416	14,946	22,240	28,618	34,341	43,244	52,924	56,001	57,962

Tabla 5.44

Coefficientes correspondientes al ajuste polinómico del coste frente al caudal de producto obtenido para baja salinidad ($\text{Coste}(p) = b_0 + b_1(Qp) + b_2(Qp)^2 + b_3(Qp)^3$)

	ΔV (voltios)								
	30	40	50	60	70	80	90	100	110
$b_3 \times 10^5$ ($\text{pts} \times h^3/m^{12}$)	-0,394	-0,721	-1,063	-1,198	-1,486	-1,916	-2,412	-2,717	-2,592
$b_2 \times 10^4$ ($\text{pts} \times h^2/m^9$)	0,703	1,356	2,004	2,335	2,871	3,679	4,600	5,104	4,966
$b_1 \times 10^3$ ($\text{pts} \times h/m^6$)	-0,460	-0,941	-1,392	-1,680	-2,057	-2,623	-3,240	-3,540	-3,505
$b_0 \times 10^2$ (pts/m^3)	0,167	0,359	0,528	0,663	0,815	1,035	1,255	1,351	1,344



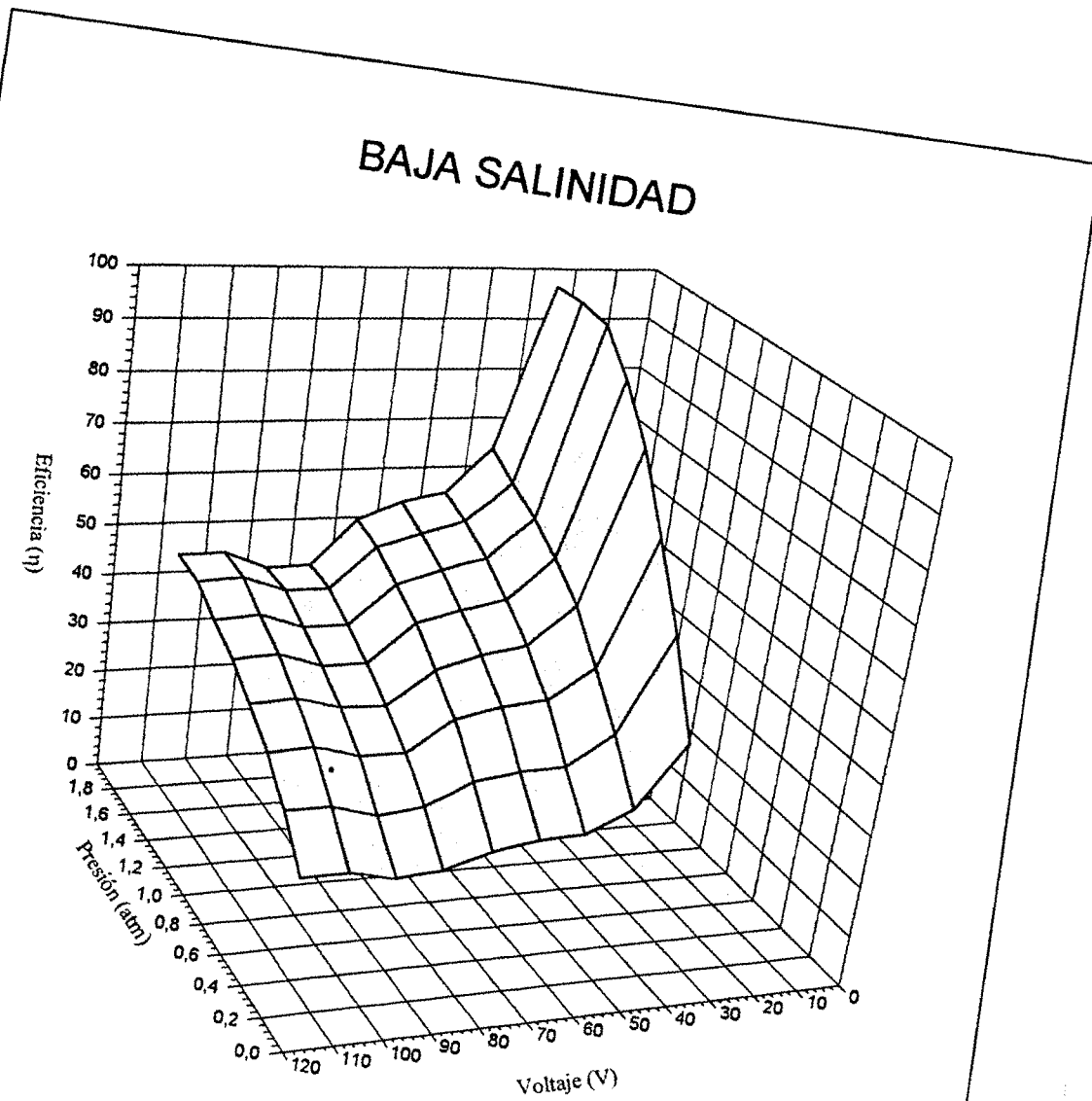
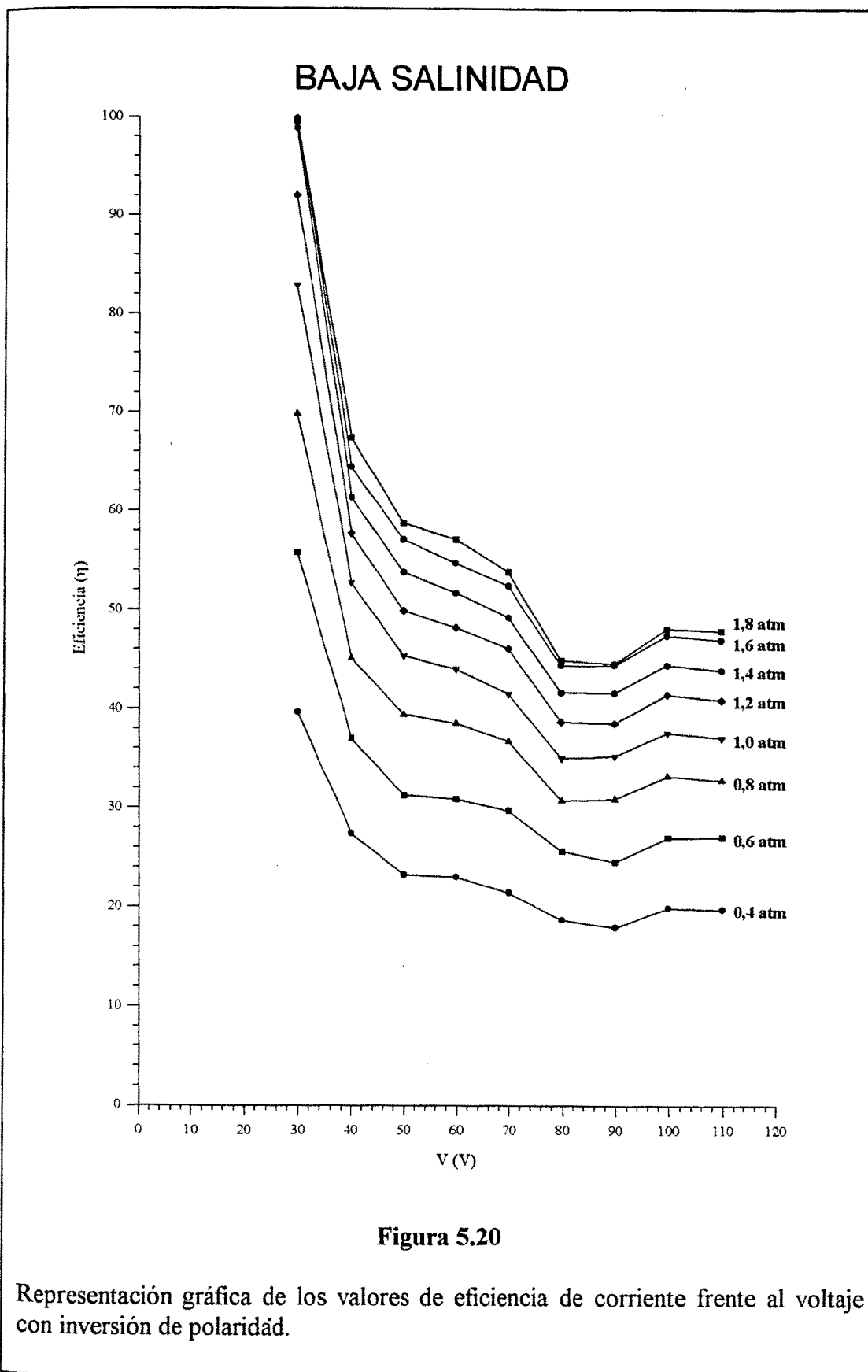


Figura 5.19

Malla correspondiente a la representación de la eficiencia de corriente frente a la presión y al voltaje aplicado con inversión de polaridad, correspondientes a una pila EDR Aquamite I.



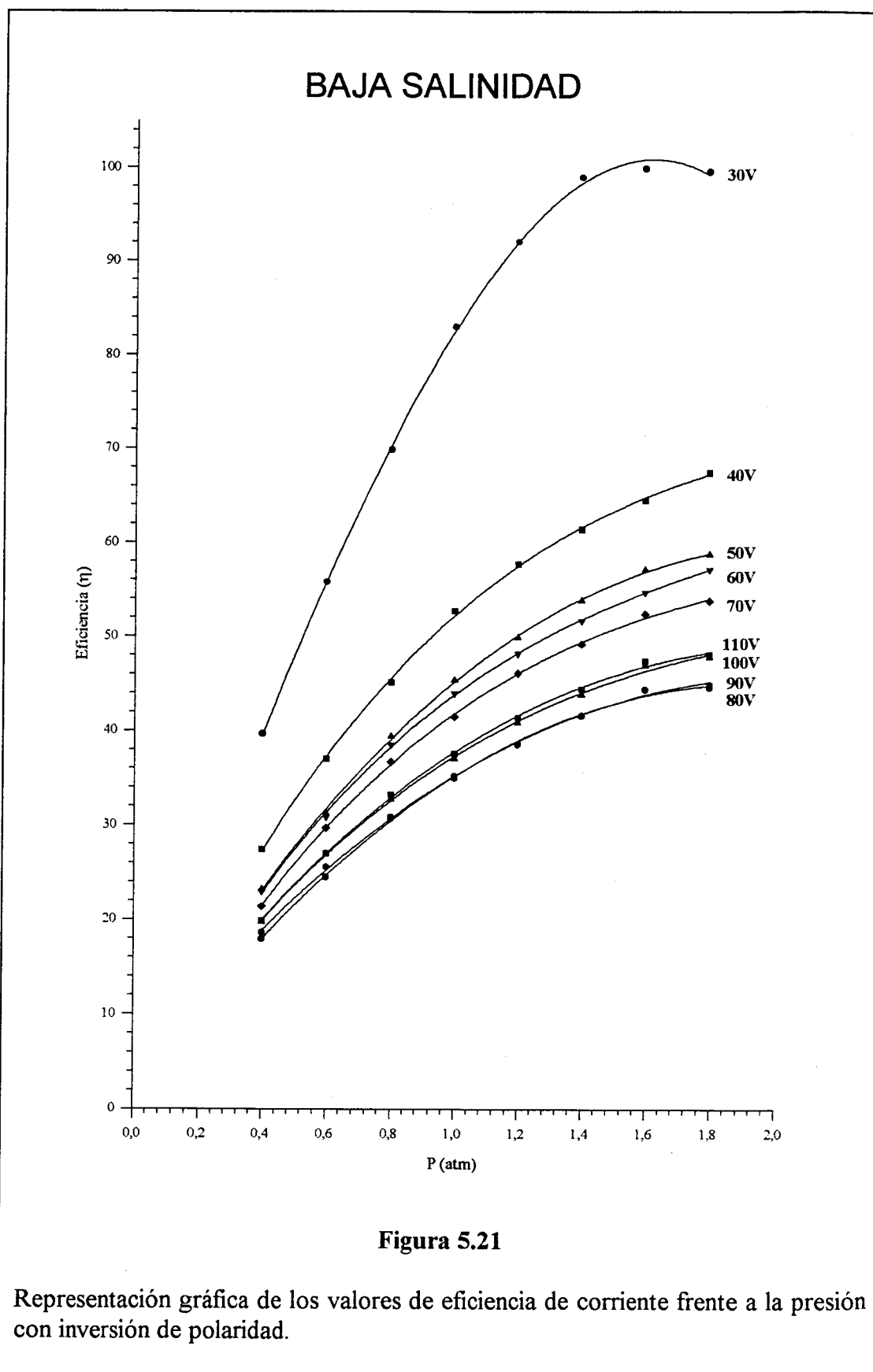
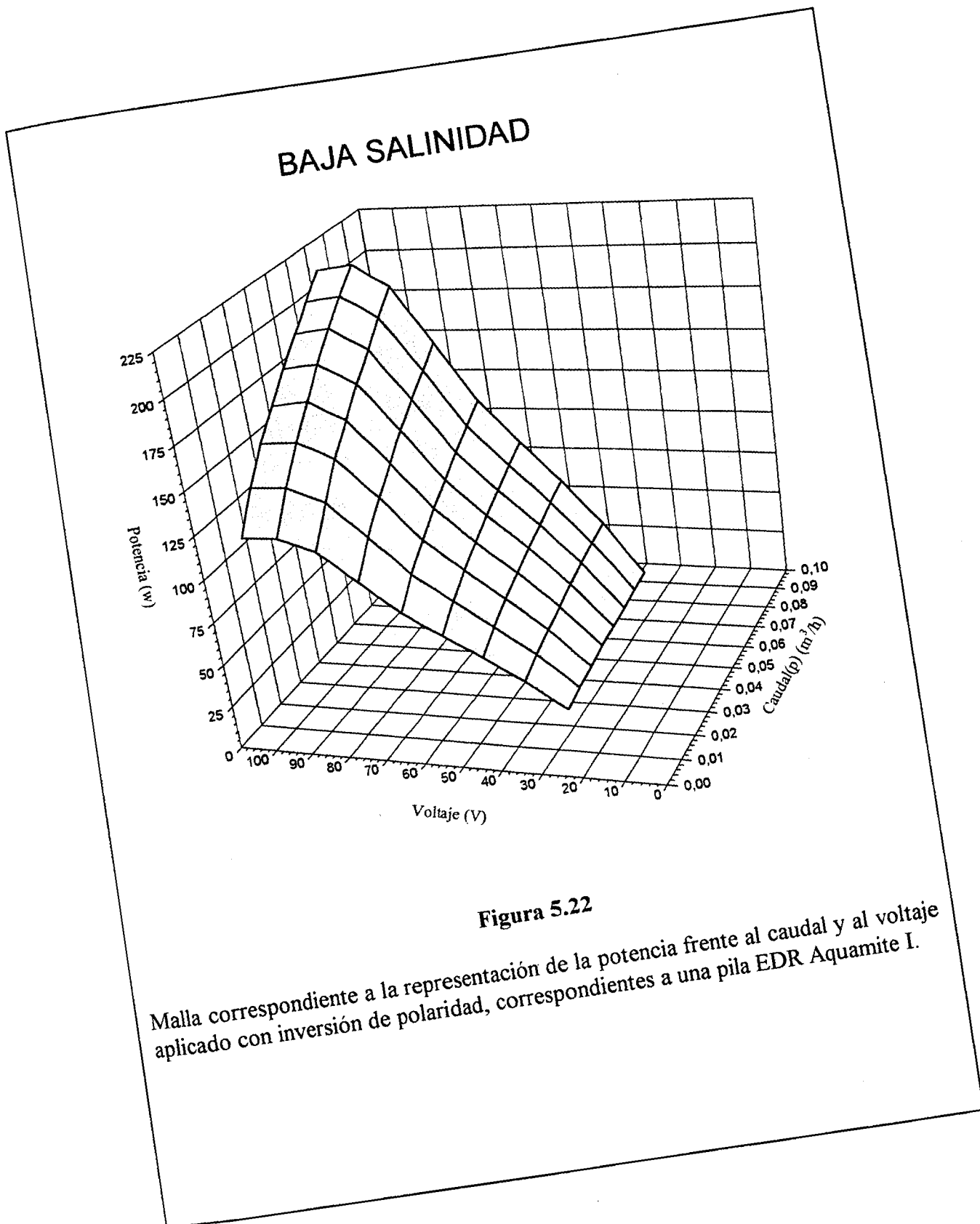
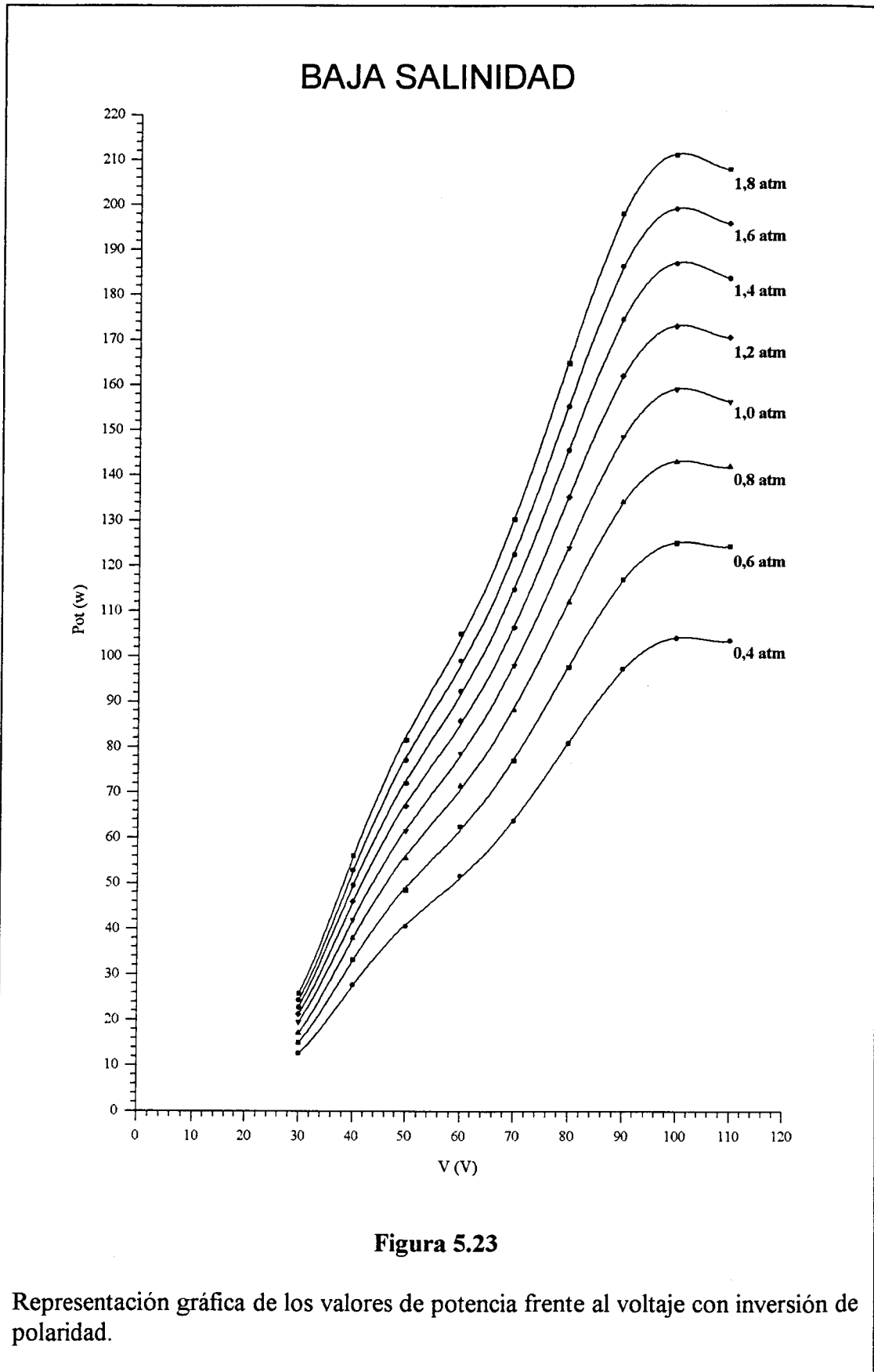


Figura 5.21

Representación gráfica de los valores de eficiencia de corriente frente a la presión con inversión de polaridad.



**Figura 5.23**

Representación gráfica de los valores de potencia frente al voltaje con inversión de polaridad.

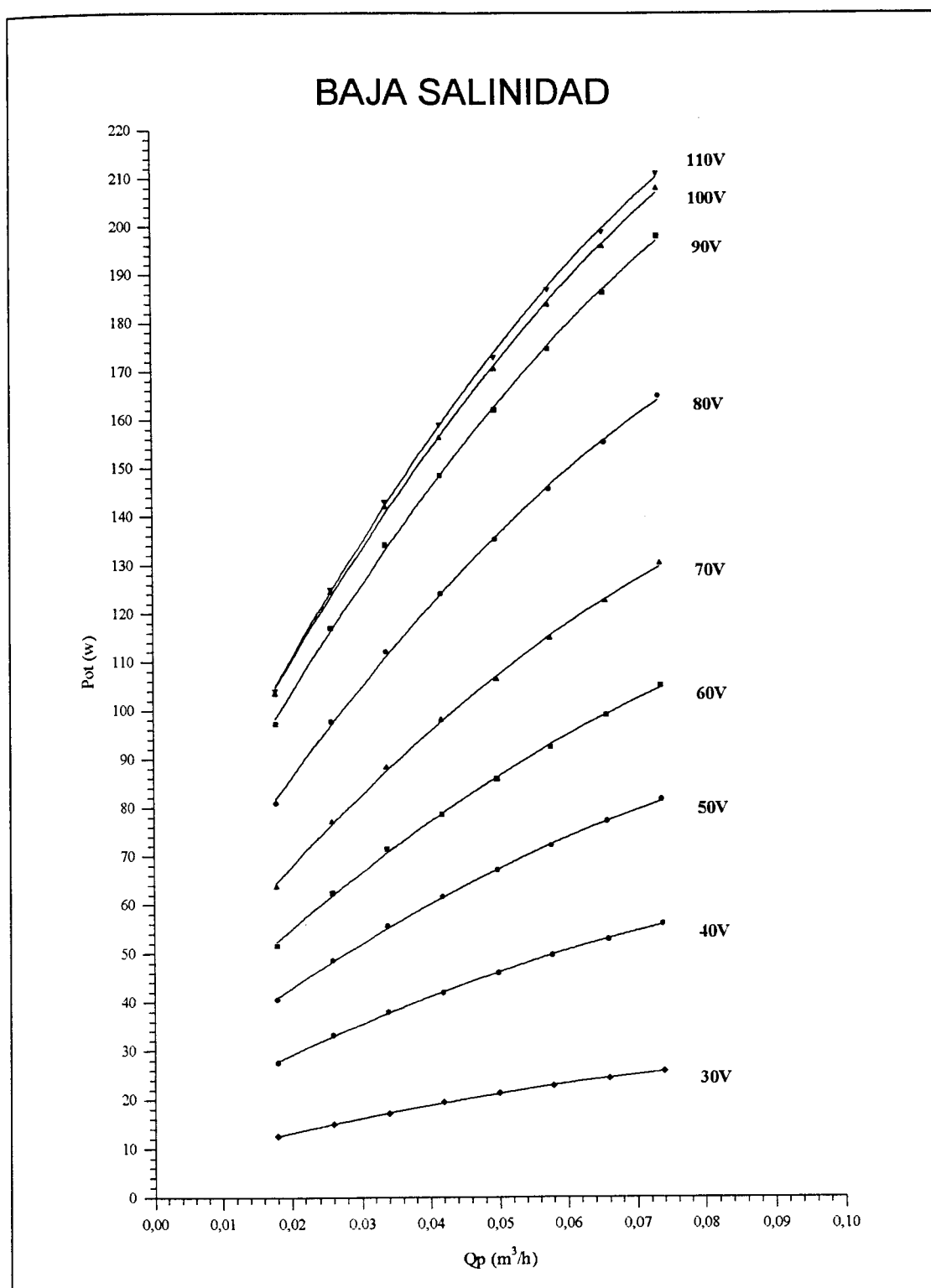
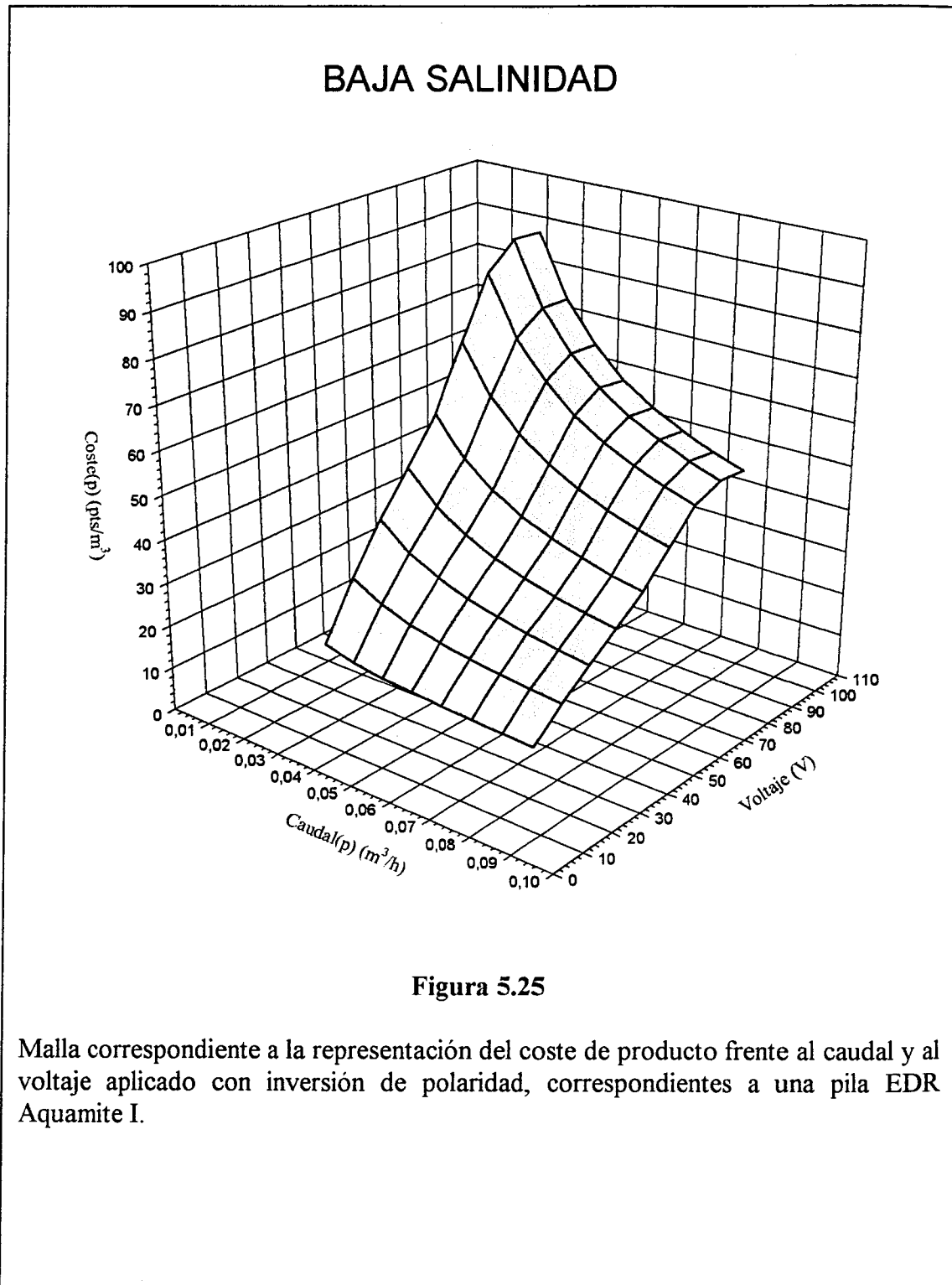
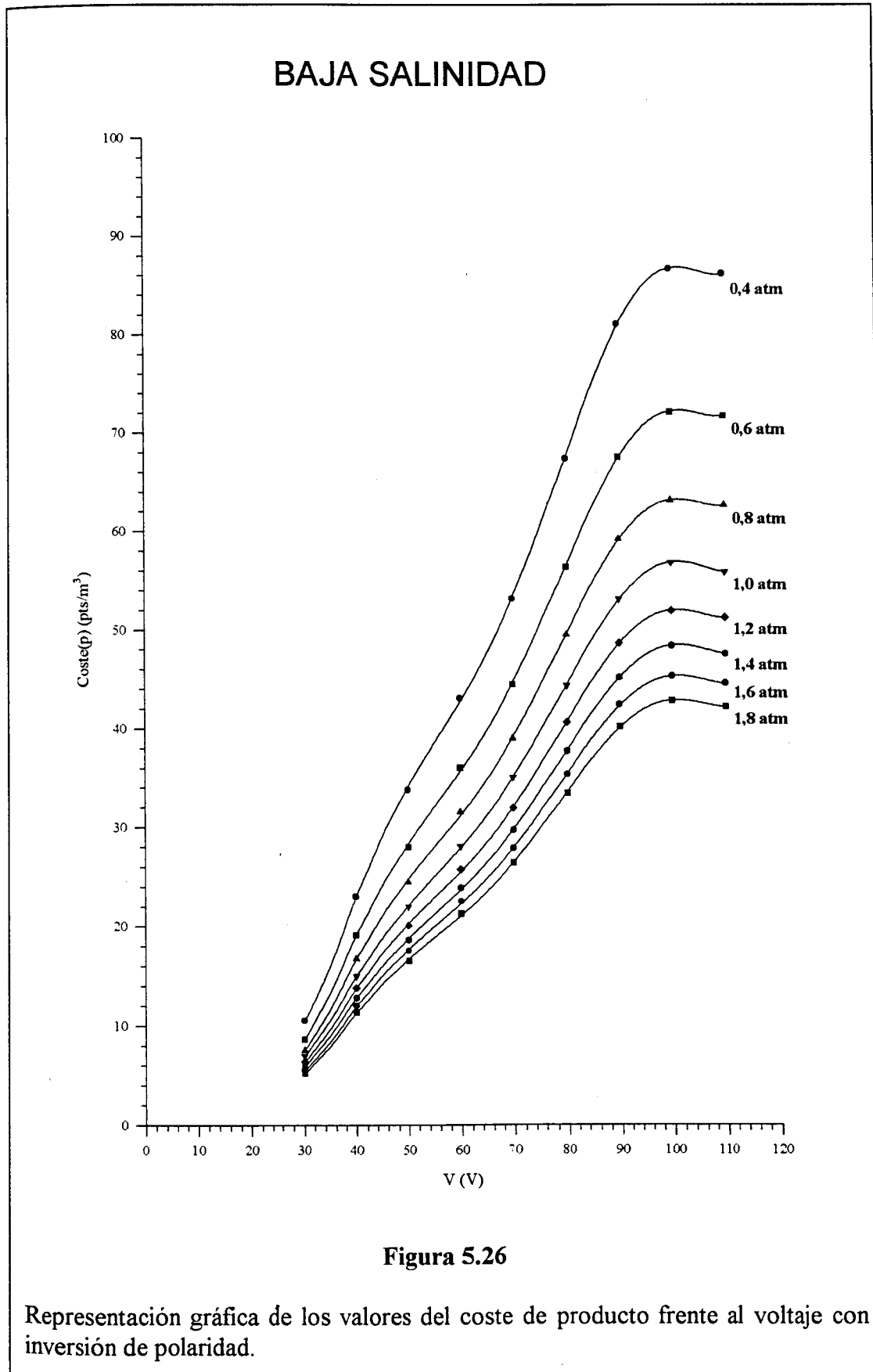


Figura 5.24

Representación gráfica de los valores de la potencia frente al caudal de producto con inversión de polaridad.





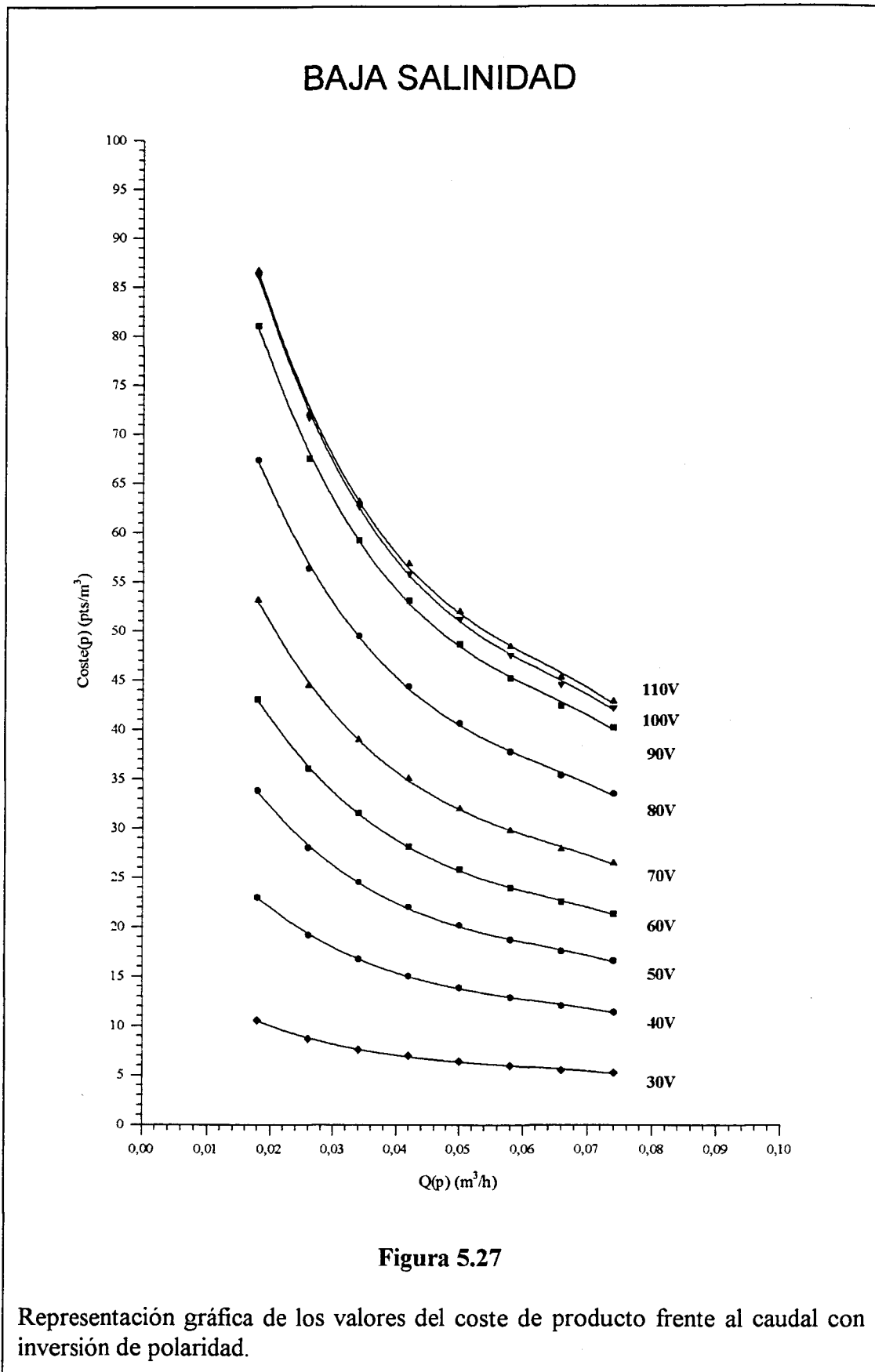


Figura 5.27

Representación gráfica de los valores del coste de producto frente al caudal con inversión de polaridad.

5.5. CARACTERIZACIÓN DE LA PLANTA PARA AGUA DE MEDIA SALINIDAD

En éste apartado, se procederá exactamente igual que en el anterior, pero caracterizando la planta a media salinidad, para lo cual se empleó una disolución acuosa patrón preparada mediante disolución de NaCl en agua de red, en una cantidad doble que la empleada en el caso de baja salinidad. Para el agua de media salinidad todos los valores obtenidos y calculados aparecen en las Tablas 5.45 a 5.51. En cada una de las tablas a la temperatura de trabajo (20°C) y para los diferentes valores de tensiones eléctricas aplicadas a las etapas de la pila, se dan los valores promedio de ambas etapas, para polaridad positiva y negativa, de la intensidad, de la potencia, de la conductividad de producto, de la conductividad de desecho, de la concentración de producto, de la concentración de desecho y del porcentaje de separación. También se dan los valores promedio para la pila de la intensidad, de la potencia, de la conductividad de producto, de la conductividad de desecho, de la concentración de producto, de la concentración de desecho y del porcentaje de separación, así como los valores de caudales de alimentación, producto y desecho, y el valor del coste de producto.

5.5.1 Optimo de funcionamiento en media salinidad. Porcentaje de separación

Con los datos de las tablas referidas en el párrafo anterior, se efectuó la representación tridimensional del porcentaje de separación hallado frente a la presión de alimentación y al voltaje aplicado a ambas etapas de la pila (Figura 5.28), obteniéndose un máximo relativo del porcentaje de separación del 98,2% a una presión de 1,2 atm y un voltaje de 60V.

Analizando las curvas bidimensionales de ésta representación correspondientes a cortes de la superficie citada mediante planos paralelos al plano coordenado porcentaje de separación-voltaje (Figura 5.29), se observa que, se produce un aumento del porcentaje de separación conforme aumenta el voltaje aplicado hasta un valor de 60V, para el rango de presiones de 0,4 a 1,4 atm, mientras que para el rango de 1,6 a 1,8 atm se produce hasta 70V, a partir de los cuales se produce una leve disminución, para cada presión de alimentación. Si se analizan los cortes mediante planos paralelos al plano coordenado porcentaje de separación-presión (Figura 5.30), se ve la existencia de un valor máximo para el porcentaje de separación a la presión de 1,2 atm al ir aumentando

el voltaje aplicado, excepto para el caso del voltaje de 30V que es a la presión de 1,0 atm. Estas circunstancias observadas se deben, por un lado, a la elevada concentración salina de las disoluciones tratadas dentro de los compartimentos de la pila, lo que posibilita que a voltajes hasta 60V se tengan concentraciones de producto muy altas por exceso de aporte iónico, sobre todo en el caso de 30V; por otro lado, como veremos posteriormente, a partir de 60V y 1,2 atm comienza el fenómeno de polarización, por lo que el transporte de corriente lo realizan mayoritariamente los iones del disolvente que han sufrido el proceso de disociación electrolítica y son los que atraviesan la membrana más rápidamente, siendo el paso de iones de la disolución salina menor, lo que eleva su concentración en el producto.

5.5.2 Estudio de la concentración del producto

Otra representación tridimensional estudiada corresponde a la concentración de producto calculada frente al caudal de producto obtenido y al voltaje aplicado a la pila (Figura 5.31), observándose un valor mínimo de concentración (233,60 ppm). En la Figura 5.32, correspondiente a los cortes de la superficie citada, mediante planos paralelos al plano coordinado concentración de producto-caudal, se aprecia que para cada voltaje aplicado, se produce una disminución de la concentración de producto al aumentar el caudal, hasta alcanzar un valor mínimo en $5 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$, excepto para 30V, en cuyo caso se alcanza el mínimo en $4,2 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{h}$.

Tabla S.45
 Caracterización de una planta EDR Aquamite I para salinidad media.
 Valores correspondientes a 30 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 11400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (7296 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)									
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	
Intensidad: I(+) (A)	0,83	1,18	1,31	1,44	1,48	1,60	1,56	1,66	1,61	
Intensidad: I(-) (A)	0,81	0,80	0,97	1,10	1,30	1,40	1,64	1,72	1,95	
Intensidad promedio pila: I (A)	0,82	0,99	1,14	1,27	1,39	1,50	1,60	1,69	1,78	
Potencia: Pot(+) (w)	24,90	35,25	39,23	43,13	44,48	48,00	46,73	49,88	48,23	
Potencia: Pot(-) (w)	24,30	24,15	29,18	33,07	38,92	42,00	49,28	51,52	58,57	
Potencia promedio pila: Pot (w)	24,60	29,70	34,20	38,10	41,70	45,00	48,00	50,70	53,40	
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1290,83	1571,45	1533,05	1592,12	1983,93	2706,71	3712,98	4575,51	4868,75	
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2072,17	1506,55	1088,95	915,88	1855,13	4107,29	5387,02	5913,49	6134,25	
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1681,50	1539,00	1311,00	1254,00	1919,53	3407,00	4550,00	5244,50	5501,50	
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	22103,83	23015,56	23381,30	23882,75	23170,09	22604,69	21546,86	20928,54	20326,04	
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	21276,53	23092,25	23920,56	24743,43	23331,09	20799,49	19337,14	19060,41	18596,52	
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	21690,18	23053,91	23650,93	24313,09	23250,59	21702,09	20442,00	19994,47	19461,28	
Concentración: Cc(p+) (ppm)	826,13	1005,73	981,15	1018,96	1269,72	1732,29	2376,31	2928,32	3116,00	
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1326,19	964,19	696,93	586,16	1187,28	2628,67	3447,69	3784,64	3925,92	
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	1076,16	984,96	839,04	802,56	1228,50	2180,48	2912,00	3356,48	3520,96	
Concentración: Cc(d+) (ppm)	14146,45	14729,96	14964,03	15284,96	14828,86	14467,00	13789,99	13394,26	13008,67	
Concentración: Cc(d-) (ppm)	13616,98	14779,04	15309,16	15835,79	14931,89	13311,67	12375,77	12198,66	11901,77	
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	13881,71	14754,50	15136,59	15560,38	14880,38	13889,34	13082,88	12796,46	12455,22	
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00	
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00	
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00	
Porcentaje de separación: %S(+)	94,18	92,53	92,63	92,18	90,33	86,63	81,47	76,61	75,34	
Porcentaje de separación: %S(-)	90,65	92,84	94,76	95,50	90,96	79,71	73,11	69,77	68,93	
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	92,41	92,69	93,69	93,84	90,65	83,17	77,29	73,19	72,13	
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	20,50	17,13	15,09	13,61	12,51	11,64	10,91	10,28	9,77	

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.46
Caracterización de una planta EDR Aquamite I para salinidad media.

	ΔP (atm)									
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	
Intensidad: I(+) (A)	1,17	1,52	1,69	1,71	1,75	1,72	1,62	1,77	1,82	
Intensidad: I(-) (A)	0,85	0,92	1,12	1,41	1,65	1,94	2,28	2,35	2,52	
Intensidad promedio pila: I (A)	1,01	1,22	1,40	1,56	1,70	1,83	1,95	2,06	2,17	
Potencia: Pot(+) (w)	46,80	60,70	67,40	68,50	70,00	68,70	64,62	70,70	72,90	
Potencia: Pot(-) (w)	34,00	36,90	44,60	56,30	66,00	77,70	91,38	94,10	100,70	
Potencia promedio pila: Pot (w)	40,40	48,80	56,00	62,40	68,00	73,20	78,00	82,40	86,80	
Conductividad: Cd(p+) ($\mu S/cm$)	1017,41	1313,14	1319,20	1252,69	1077,49	1141,50	1450,01	1582,07	1779,11	
Conductividad: Cd(p-) ($\mu S/cm$)	1804,58	1131,43	851,14	750,33	886,47	1176,36	1757,96	2830,18	3359,34	
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu S/cm$)	1411,00	1222,28	1085,17	1001,51	981,98	1158,93	1603,99	2206,12	2569,22	
Conductividad: Cd(d+) ($\mu S/cm$)	22166,86	23080,84	23397,40	24064,76	24055,64	24370,30	24278,78	24844,47	24288,22	
Conductividad: Cd(d-) ($\mu S/cm$)	21333,38	23295,59	23965,76	24704,13	24294,41	24325,36	23872,29	23101,82	22128,57	
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu S/cm$)	21750,12	23188,21	23681,58	24384,44	24175,02	24347,83	24075,54	23973,15	23208,40	
Concentración: Cc(p+) (ppm)	651,14	840,41	844,29	801,72	689,59	730,56	928,01	1012,52	1138,63	
Concentración: Cc(p-) (ppm)	1154,93	724,11	544,73	480,21	567,34	752,87	1125,09	1811,31	2149,98	
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	903,04	782,26	694,51	640,97	628,47	741,71	1026,55	1411,92	1644,30	
Concentración: Cc(d+) (ppm)	14186,79	14771,73	14974,34	15401,45	15395,61	15596,99	15538,42	15900,46	15544,46	
Concentración: Cc(d-) (ppm)	13653,36	14909,17	15338,09	15810,64	15548,42	15568,23	15278,27	14785,17	14162,29	
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	13920,08	14840,45	15156,21	15606,04	15472,01	15582,61	15408,35	15342,81	14853,37	
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00	
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00	
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00	
Porcentaje de separación: %S(+)	95,37	93,70	93,59	93,79	94,70	94,31	92,69	91,83	90,90	
Porcentaje de separación: %S(-)	91,78	94,57	95,87	96,28	95,64	94,13	91,14	85,39	82,82	
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	93,57	94,14	94,73	95,03	95,17	94,22	91,92	88,61	86,86	
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	33,67	28,15	24,71	22,29	20,40	18,93	17,73	16,70	15,88	

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.47
 Caracterización de una planta EDR Aquamite I para salinidad media.
 Valores correspondientes a 50 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 11300 $\mu\text{S/cm}$ (7232 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)									
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	
Intensidad: I(+) (A)	1,33	1,50	1,75	1,86	1,97	2,12	2,37	2,49	2,62	
Intensidad: I(-) (A)	0,99	1,30	1,47	1,70	1,91	2,06	2,10	2,24	2,34	
Intensidad promedio pila: I (A)	1,16	1,40	1,61	1,78	1,94	2,09	2,23	2,36	2,48	
Potencia: Pot(+) (w)	66,50	75,00	87,50	92,75	98,50	106,00	118,25	124,25	131,00	
Potencia: Pot(-) (w)	49,50	65,00	73,50	85,25	95,50	103,00	104,75	111,75	117,00	
Potencia promedio pila: Pot (w)	58,00	70,00	80,50	89,00	97,00	104,50	111,50	118,00	124,00	
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	890,09	1167,75	1101,78	1000,47	704,70	528,08	894,52	1649,94	1999,45	
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	1538,91	890,25	763,22	691,01	959,38	1355,57	1558,12	2022,34	2282,41	
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	1214,50	1029,00	932,50	845,74	832,04	941,83	1226,32	1836,14	2140,93	
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	22322,26	23274,47	23683,55	24408,49	24544,12	25183,81	25035,23	24773,67	24010,75	
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	21635,27	23602,44	24094,67	24802,35	24225,78	24117,26	24159,28	24253,72	23624,04	
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	21978,76	23438,45	23889,11	24605,42	24384,95	24650,53	24597,25	24513,69	23817,39	
Concentración: Cc(p+) (ppm)	569,66	747,36	705,14	640,30	451,01	337,97	572,49	1055,96	1279,65	
Concentración: Cc(p-) (ppm)	984,90	569,76	488,46	442,24	614,00	867,57	997,20	1294,30	1460,74	
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	777,28	658,56	596,80	541,27	532,51	602,77	784,85	1175,13	1370,20	
Concentración: Cc(d+) (ppm)	14286,24	14895,66	15157,47	15621,44	15708,24	16117,64	16022,55	15855,15	15366,88	
Concentración: Cc(d-) (ppm)	13846,58	15105,56	15420,59	15873,51	15504,50	15435,05	15461,94	15522,38	15119,38	
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	14066,41	15000,61	15289,03	15747,47	15606,37	15776,34	15742,24	15688,76	15243,13	
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00	
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00	
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00	
Porcentaje de separación: %S(+)	95,95	94,40	94,65	95,04	96,54	97,37	95,50	91,49	89,78	
Porcentaje de separación: %S(-)	93,00	95,73	96,30	96,58	95,28	93,24	92,15	89,57	88,34	
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	94,47	95,07	95,47	95,81	95,91	95,31	93,83	90,53	89,06	
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	48,33	40,38	35,51	31,79	29,10	27,03	25,34	23,92	22,68	

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.48

Caracterización de una planta EDR Aquamite I para salinidad media.

Valores correspondientes a 60 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 11230 $\mu\text{S/cm}$ (7187,20 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)									
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	
Intensidad: I(+) (A)	1,33	1,55	1,80	2,03	2,08	2,11	2,28	2,40	2,59	
Intensidad: I(-) (A)	1,08	1,33	1,50	1,64	1,92	2,19	2,30	2,46	2,53	
Intensidad promedio pila: I (A)	1,20	1,44	1,65	1,83	2,00	2,15	2,29	2,43	2,56	
Potencia: Pot(+) (w)	79,50	93,15	108,00	121,50	124,80	126,60	136,65	144,15	155,40	
Potencia: Pot(-) (w)	64,50	79,65	90,00	98,10	115,20	131,40	138,15	147,45	151,80	
Potencia promedio pila: Pot (w)	72,00	86,40	99,00	109,80	120,00	129,00	137,40	145,80	153,60	
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	459,71	852,68	662,65	573,05	508,06	518,89	691,20	977,72	1042,17	
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	1000,29	382,32	404,35	230,95	221,94	492,11	1329,80	1942,28	2411,83	
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	730,00	617,50	533,50	402,00	365,00	505,50	1010,50	1460,00	1727,00	
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	22777,95	23494,11	24061,79	24793,40	24632,42	25035,43	25141,22	25544,50	25153,37	
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	22205,57	24049,98	24375,43	25228,79	24990,08	25069,95	24298,26	24197,76	23281,50	
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	22491,76	23772,05	24218,61	25011,09	24811,25	25052,69	24719,74	24871,13	24217,43	
Concentración: Cc(p+) (ppm)	294,21	545,71	424,09	366,75	325,16	332,09	442,37	625,74	666,99	
Concentración: Cc(p-) (ppm)	640,19	244,69	258,79	147,81	142,04	314,95	851,07	1243,06	1543,57	
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	467,20	395,20	341,44	257,28	233,60	323,52	646,72	934,40	1105,28	
Concentración: Cc(d+) (ppm)	14577,89	15036,23	15399,54	15867,77	15764,75	16022,67	16090,38	16348,48	16098,16	
Concentración: Cc(d-) (ppm)	14211,57	15391,99	15600,27	16146,42	15993,65	16044,77	15550,89	15486,57	14900,16	
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	14394,73	15214,11	15499,91	16007,10	15879,20	16033,72	15820,63	15917,52	15499,16	
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00	
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00	
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00	
Porcentaje de separación: %S(+)	97,91	95,89	96,76	97,14	97,49	97,40	96,50	94,93	94,64	
Porcentaje de separación: %S(-)	95,45	98,16	98,03	98,85	98,90	97,53	93,26	89,92	87,60	
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	96,68	97,02	97,39	98,00	98,19	97,47	94,88	92,42	91,12	
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	60,00	49,85	43,68	39,21	36,00	33,36	31,23	29,55	28,10	

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.49
 Caracterización de una planta EDR Aquamite I para salinidad media.
 Valores correspondientes a 70 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 11270 µS/cm (7212,80 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)									
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	
Intensidad: I(+) (A)	1,28	1,61	1,81	1,93	2,06	2,06	2,19	2,37	2,48	
Intensidad: I(-) (A)	1,20	1,37	1,59	1,85	2,06	2,38	2,55	2,66	2,80	
Intensidad promedio pila: I (A)	1,24	1,49	1,70	1,89	2,06	2,22	2,37	2,51	2,64	
Potencia: Pot(+) (w)	89,60	112,70	126,88	134,93	144,38	144,38	152,95	165,55	173,43	
Potencia: Pot(-) (w)	84,00	95,90	111,13	129,68	144,03	166,43	178,85	185,85	196,18	
Potencia promedio pila: Pot (w)	86,80	104,30	119,00	132,30	144,20	155,40	165,90	175,70	184,80	
Conductividad: Cd(p+) (µS/cm)	526,73	887,73	766,76	638,17	554,35	610,55	942,97	1303,97	1481,09	
Conductividad: Cd(p-) (µS/cm)	1104,27	585,27	449,24	393,83	377,65	496,45	746,03	869,03	1023,91	
Cond. promedio pila: Cd(p) (µS/cm)	815,50	736,50	608,00	516,00	466,00	553,50	844,50	1086,50	1252,50	
Conductividad: Cd(d+) (µS/cm)	22645,22	23539,96	24023,93	24801,41	24664,56	25008,84	24901,67	25184,83	24648,18	
Conductividad: Cd(d-) (µS/cm)	22033,72	23897,41	24409,50	25112,40	24885,44	25155,91	25161,65	25792,11	25272,99	
Cond. promedio pila: Cd(d) (µS/cm)	22339,47	23718,68	24216,71	24956,91	24775,00	25082,38	25031,66	25488,47	24960,58	
Concentración: Cc(p+) (ppm)	337,11	568,15	490,73	408,43	354,79	390,75	603,50	834,54	947,90	
Concentración: Cc(p-) (ppm)	706,73	374,57	287,51	252,05	241,69	317,73	477,46	556,18	655,30	
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	521,92	471,36	389,12	330,24	298,24	354,24	540,48	695,36	801,60	
Concentración: Cc(d+) (ppm)	14492,94	15065,57	15375,32	15872,91	15785,32	16005,66	15937,07	16118,29	15774,83	
Concentración: Cc(d-) (ppm)	14101,58	15294,34	15622,08	16071,94	15926,68	16099,78	16103,45	16506,95	16174,71	
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	14297,26	15179,96	15498,70	15972,42	15856,00	16052,72	16020,26	16312,62	15974,77	
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00	
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00	
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00	
Porcentaje de separación: %S(+)	97,60	95,73	96,27	96,83	97,27	96,95	95,24	93,26	92,41	
Porcentaje de separación: %S(-)	94,96	97,19	97,81	98,04	98,14	97,52	96,23	95,51	94,75	
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	96,28	96,46	97,04	97,44	97,70	97,23	95,74	94,38	93,58	
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	72,33	60,17	52,50	47,25	43,26	40,19	37,70	35,61	33,80	

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.50

Caracterización de una planta EDR Aquamite I para salinidad media.

Valores correspondientes a 80 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 11300 $\mu\text{S/cm}$ (7232 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)									
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	
Intensidad: I(+) (A)	1,42	1,71	2,04	2,23	2,38	2,62	2,63	2,72	2,86	
Intensidad: I(-) (A)	1,22	1,51	1,66	1,89	2,12	2,22	2,53	2,74	2,88	
Intensidad promedio pila: I (A)	1,32	1,61	1,85	2,06	2,25	2,42	2,58	2,73	2,87	
Potencia: Pot(+) (w)	113,40	137,00	163,00	178,20	190,60	209,60	210,40	217,34	228,44	
Potencia: Pot(-) (w)	97,80	120,60	133,00	151,40	169,40	177,60	202,40	219,46	230,76	
Potencia promedio pila: Pot (w)	105,60	128,80	148,00	164,80	180,00	193,60	206,40	218,40	229,60	
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S/cm}$)	584,44	910,23	834,21	683,17	629,86	684,15	996,12	1334,74	1541,07	
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S/cm}$)	1106,56	579,77	461,79	402,83	374,14	512,85	705,88	919,26	1050,93	
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S/cm}$)	845,50	745,00	648,00	543,00	502,00	598,50	851,00	1127,00	1296,00	
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S/cm}$)	22645,88	23578,82	24008,45	24812,33	24637,68	24982,64	24901,12	25213,75	24637,21	
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S/cm}$)	22093,06	23969,37	24460,69	25169,12	24957,32	25203,44	25284,24	25793,87	25307,06	
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S/cm}$)	22369,47	23774,09	24234,57	24990,73	24797,50	25093,04	25092,68	25503,81	24972,13	
Concentración: Cc(p+) (ppm)	374,04	582,55	533,90	437,23	403,11	437,86	637,52	854,24	986,28	
Concentración: Cc(p-) (ppm)	708,20	371,05	295,54	257,81	239,45	328,22	451,76	588,32	672,60	
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	541,12	476,80	414,72	347,52	321,28	383,04	544,64	721,28	829,44	
Concentración: Cc(d+) (ppm)	14493,37	15090,44	15365,41	15879,89	15768,11	15988,89	15936,72	16136,80	15767,81	
Concentración: Cc(d-) (ppm)	14139,56	15340,39	15654,84	16108,24	15972,69	16130,20	16181,91	16508,08	16196,52	
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	14316,46	15215,42	15510,13	15994,07	15870,40	16059,55	16059,32	16322,44	15982,17	
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00	
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00	
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00	
Porcentaje de separación: %S(+)	97,34	95,64	95,95	96,61	96,90	96,59	94,98	93,12	92,12	
Porcentaje de separación: %S(-)	94,96	97,22	97,76	98,00	98,16	97,44	96,45	95,26	94,63	
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	96,15	96,43	96,86	97,31	97,53	97,02	95,72	94,19	93,38	
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	88,00	74,31	65,29	58,86	54,00	50,07	46,91	44,27	42,00	

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.51
Caracterización de una planta EDR Aquamite I para salinidad media.

Valores correspondientes a 90 V en cada etapa eléctrica. Conductividad de alimentación 11350 µS/cm (7264 ppm). Temperatura 20°C

	ΔP (atm)									
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	
Intensidad: I(+) (A)	1,61	2,00	2,31	2,58	2,74	2,67	2,99	3,18	3,25	
Intensidad: I(-) (A)	1,55	1,81	2,05	2,28	2,57	3,03	3,09	3,26	3,53	
Intensidad promedio pila: I (A)	1,58	1,90	2,18	2,43	2,65	2,85	3,04	3,22	3,39	
Potencia: Pot(+) (w)	145,13	179,55	207,90	232,43	246,15	240,30	269,10	286,36	292,50	
Potencia: Pot(-) (w)	139,28	162,45	184,50	204,98	230,85	272,70	278,10	293,24	317,70	
Potencia promedio pila: Pot (w)	142,20	171,00	196,20	218,70	238,50	256,50	273,60	289,80	305,10	
Conductividad: Cd(p+) (µS/cm)	670,52	1046,25	913,30	772,64	745,67	766,86	1095,38	1469,18	1660,06	
Conductividad: Cd(p-) (µS/cm)	1159,48	677,75	536,70	445,36	414,33	625,14	876,62	1046,82	1181,94	
Cond. promedio pila: Cd(p) (µS/cm)	915,00	862,00	725,00	609,00	580,00	696,00	986,00	1258,00	1421,00	
Conductividad: Cd(d+) (µS/cm)	22657,68	23527,16	24023,14	24812,09	24605,42	24990,49	24886,10	25145,87	24592,92	
Conductividad: Cd(d-) (µS/cm)	22139,97	23962,66	24480,43	25228,64	25019,58	25173,16	25174,86	25735,57	25246,35	
Cond. promedio pila: Cd(d) (µS/cm)	22398,82	23744,91	24251,79	25020,36	24812,50	25081,82	25030,48	25440,72	24919,63	
Concentración: Cc(p+) (ppm)	429,13	669,60	584,51	494,49	477,23	490,79	701,04	940,27	1062,44	
Concentración: Cc(p-) (ppm)	742,07	433,76	343,49	285,03	265,17	400,09	561,04	669,97	756,44	
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	585,60	551,68	464,00	389,76	371,20	445,44	631,04	805,12	909,44	
Concentración: Cc(d+) (ppm)	14500,92	15057,38	15374,81	15879,74	15747,47	15993,91	15927,10	16093,35	15739,47	
Concentración: Cc(d-) (ppm)	14169,58	15336,10	15667,48	16146,33	16012,53	16110,82	16111,91	16470,76	16157,66	
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	14335,25	15196,74	15521,14	16013,03	15880,00	16052,37	16019,51	16282,06	15948,57	
Caudal alimentación: Qa (l/h)	35,00	48,00	62,00	75,00	90,00	103,00	116,00	127,00	142,00	
Caudal producto: Qp (l/h)	18,00	26,00	34,00	42,00	50,00	58,00	66,00	74,00	82,00	
Caudal desecho: Qd (l/h)	17,00	22,00	28,00	33,00	40,00	45,00	50,00	53,00	60,00	
Porcentaje de separación: %S(+)	96,96	95,01	95,59	96,19	96,35	96,20	94,51	92,46	91,55	
Porcentaje de separación: %S(-)	94,75	96,77	97,41	97,80	97,97	96,90	95,61	94,63	93,99	
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	95,85	95,89	96,50	97,00	97,16	96,55	95,06	93,54	92,77	
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	118,50	98,65	86,56	78,11	71,55	66,34	62,18	58,74	55,81	

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

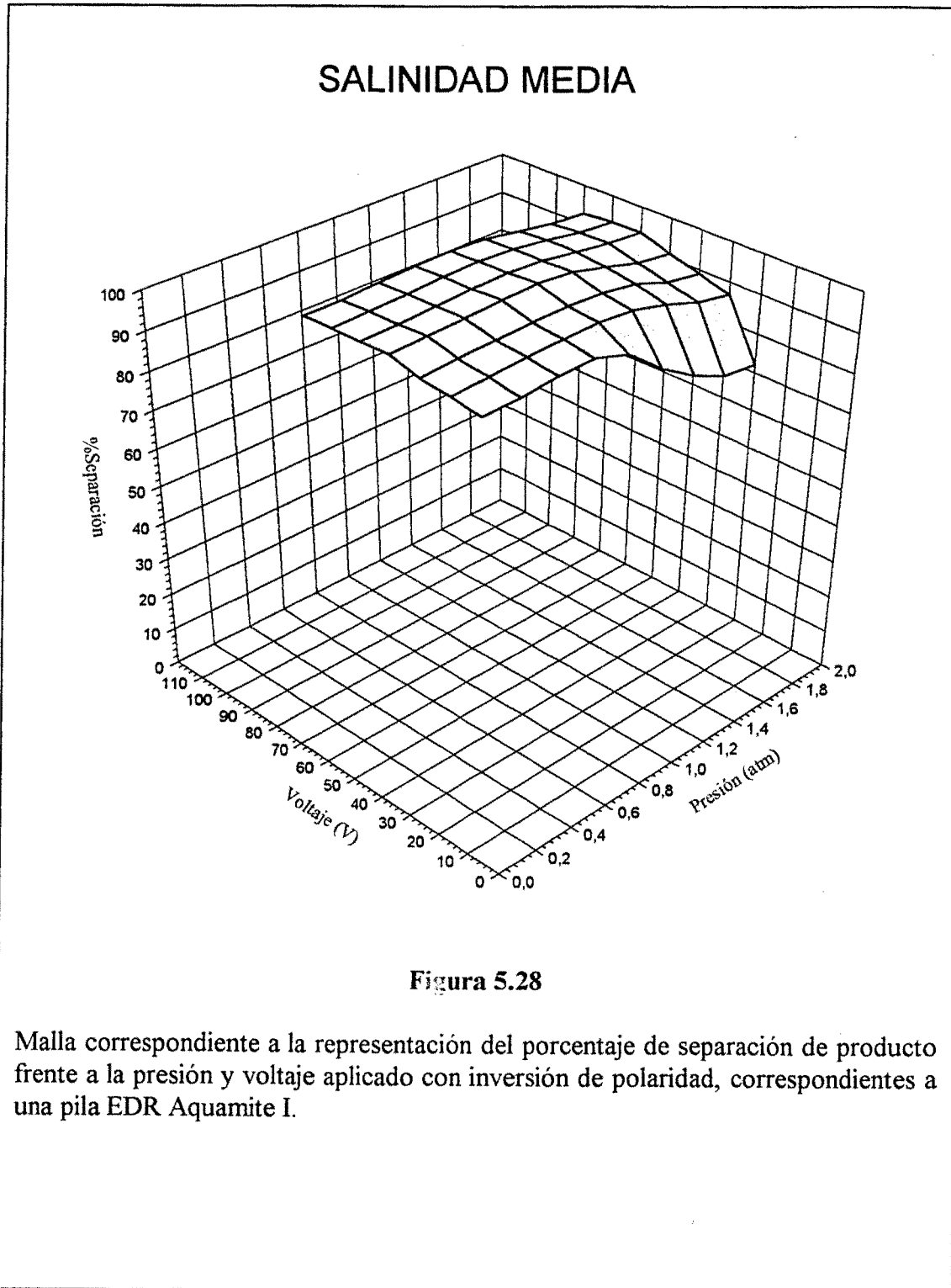


Figura 5.28

Malla correspondiente a la representación del porcentaje de separación de producto frente a la presión y voltaje aplicado con inversión de polaridad, correspondientes a una pila EDR Aquamite I.

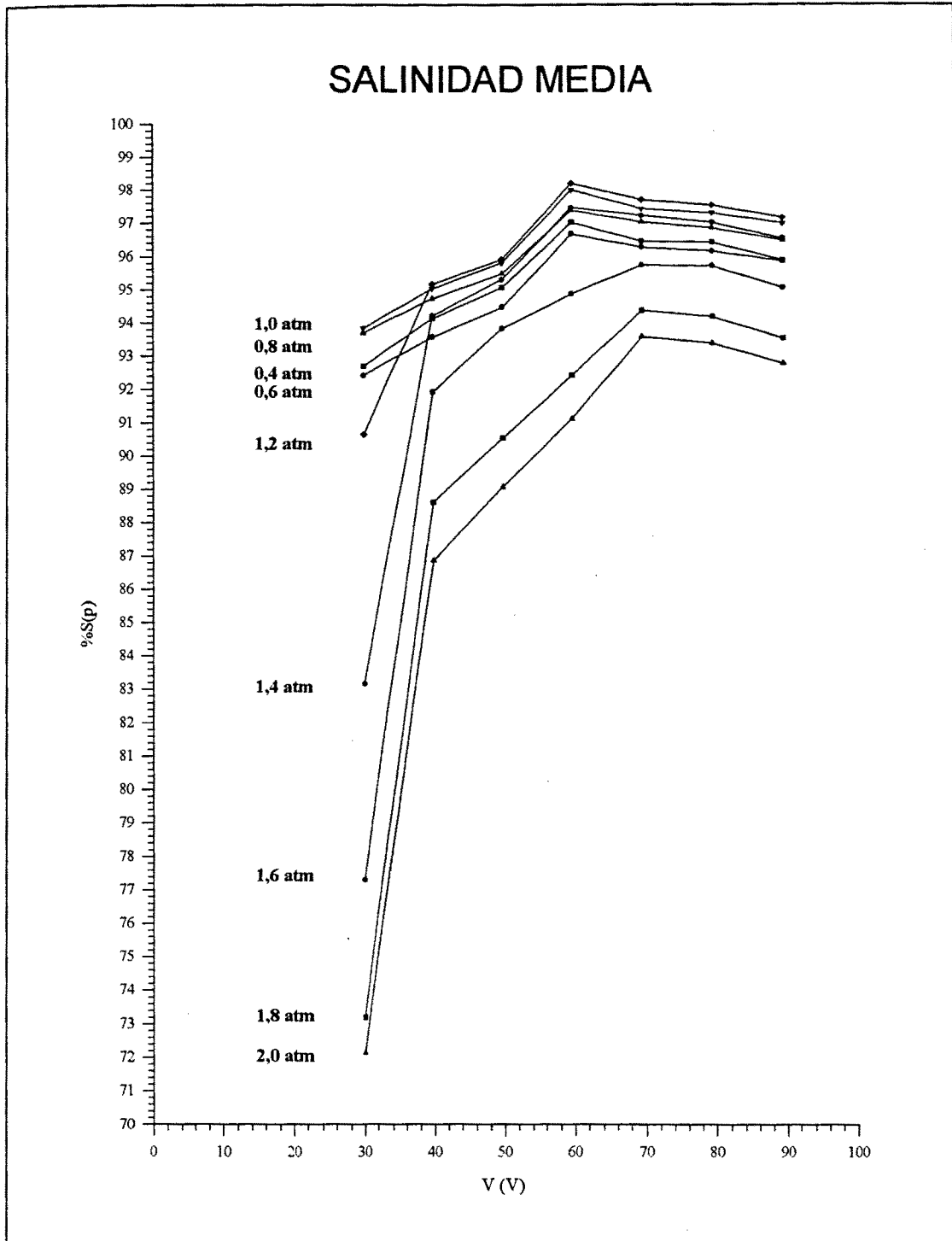


Figura 5.29

Representación gráfica de los valores de porcentaje de separación frente al voltaje con inversión de polaridad.

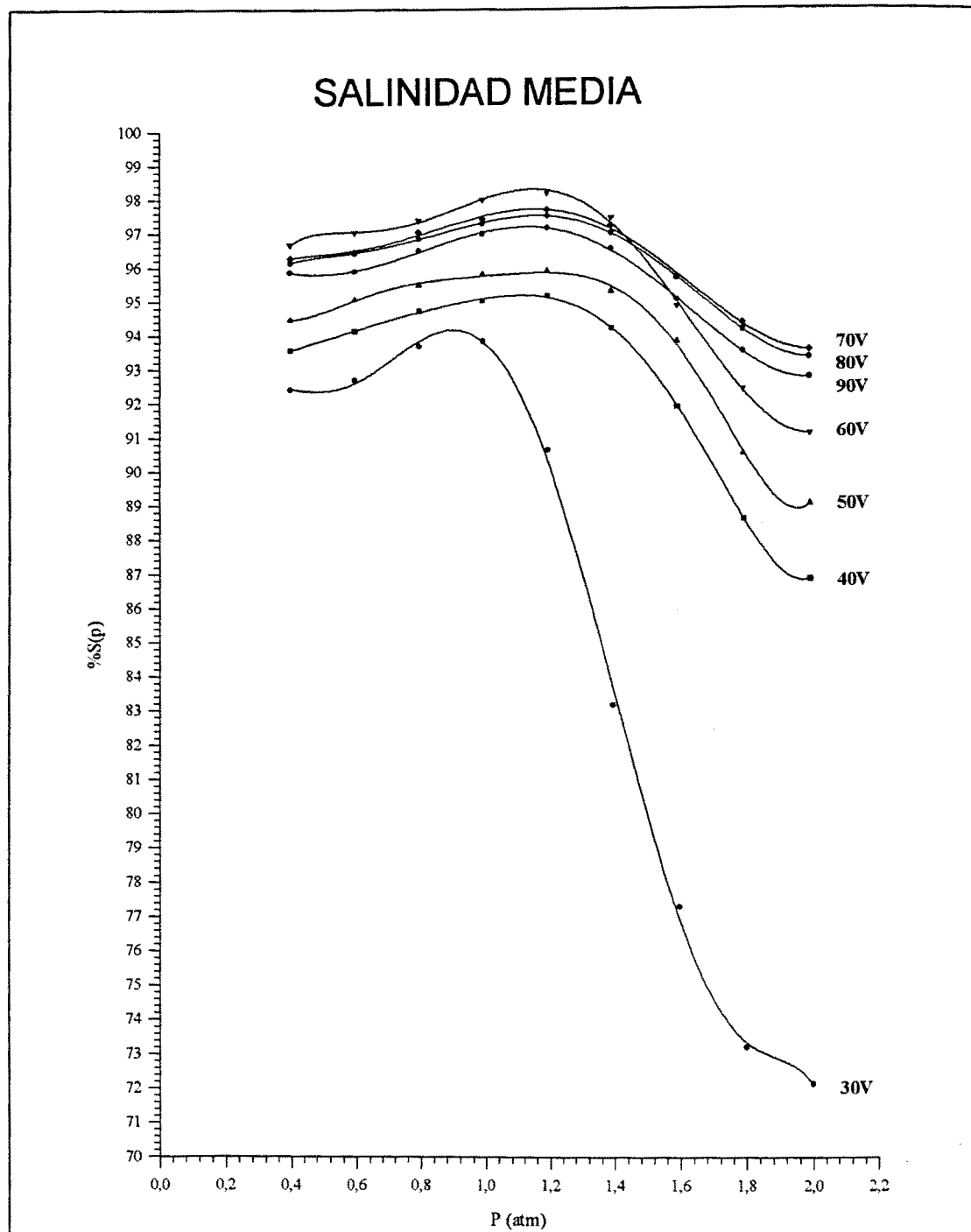
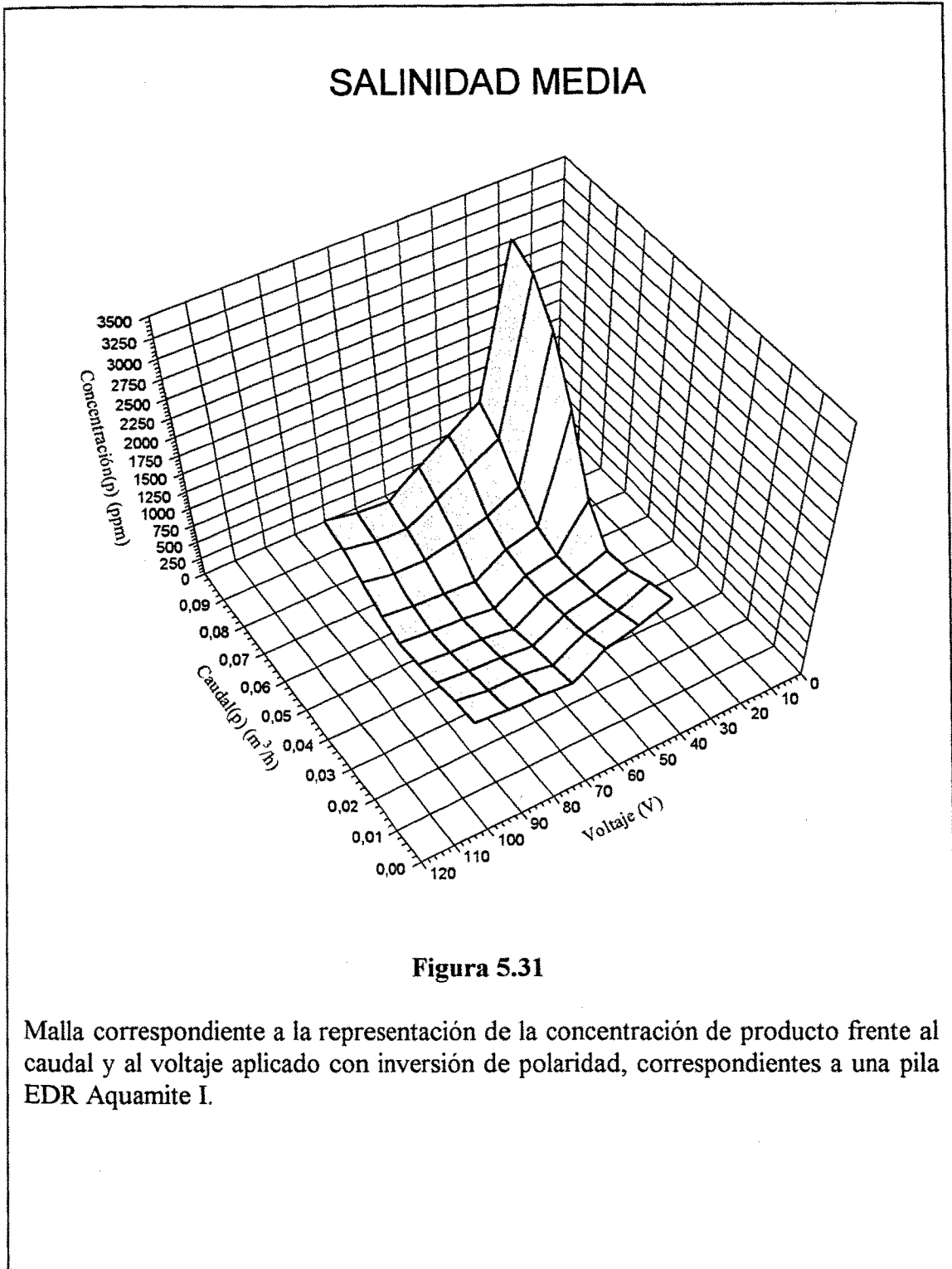


Figura 5.30

Representación gráfica de los valores de porcentaje de separación frente a la presión con inversión de polaridad.



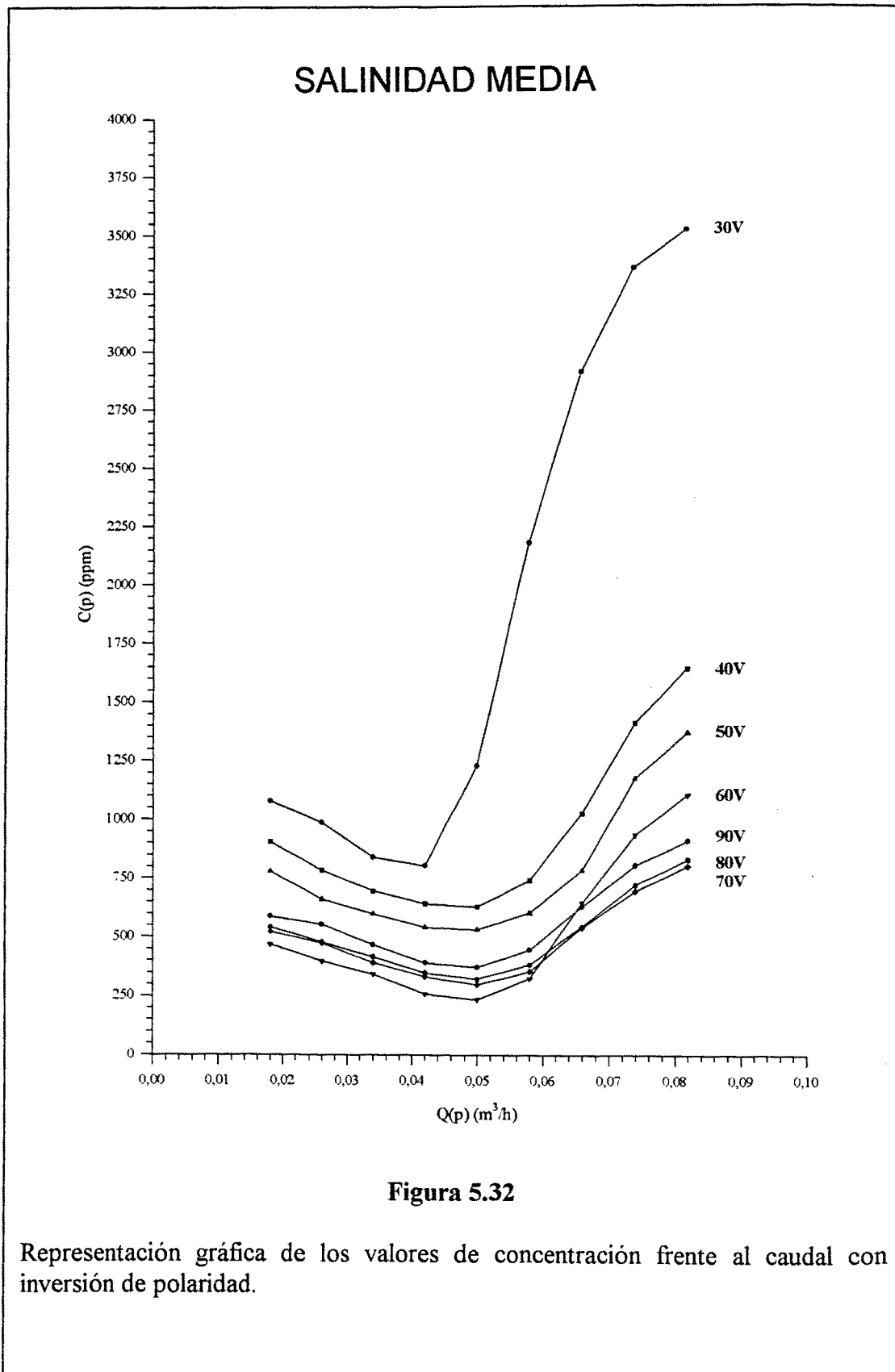


Figura 5.32

Representación gráfica de los valores de concentración frente al caudal con inversión de polaridad.

5.5.3 Intensidad de corriente en la pila. Curvas corriente-voltaje.

Densidad de corriente límite y polarización

La representación tridimensional de la intensidad de corriente promedio obtenida para la pila frente a la presión de alimentación y al voltaje aplicado (Figura 5.33), permite el estudio de las curvas de la intensidad promedio frente al voltaje aplicado para cada presión de alimentación, obtenidas mediante cortes de la superficie citada por planos paralelos al plano coordinado intensidad-voltaje (Figura 5.34). En ellas se representan los puntos experimentales para los distintos voltajes de trabajo a los que se ajustan curvas polinómicas de orden 6 y coeficiente de correlación $r^2 = 0,999$ para todas. La obtención de la intensidad de corriente límite para cada presión aplicada (I_{lim}), hallada como el valor por extrapolación de la intersección de los dos tramos rectilíneos obtenidos en el rango de voltaje entre 50 y 90V, se corresponde con el valor de la intensidad para el voltaje ^{máximo 70V} de 60V en cada caso (Figura.5.35), recogiéndose sus valores en la Tabla 5.52. Al igual que en el caso de salinidad baja, comienza la polarización del proceso, a partir del voltaje del óptimo, que en éste caso es de 60V.

Tabla 5.52

Valores correspondientes a la intensidad de corriente límite I_{lim} para media salinidad a 60 V. Temperatura 20°C

	ΔP (atm)								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
I_{lim} (A)	1,26	1,49	1,70	1,90	2,08	2,22	2,36	2,51	2,66

Mediante cortes de la superficie considerada, con planos paralelos al plano coordinado intensidad-presión, se obtiene la representación de la intensidad de corriente promedio obtenida frente a la presión aplicada, para cada voltaje (Figura 5.36). En ellas se representan los puntos experimentales para las distintas presiones de trabajo a los que se ajustan curvas polinómicas de segundo grado y coeficiente de correlación $r^2 = 0,999$ para todas las curvas, cuyos coeficientes aparecen recogidos en la Tabla 5.53.

Tabla 5.53

Coefficientes correspondientes al ajuste polinómico de intensidad frente a presión aplicada para salinidad media ($I = b_0 + b_1(\Delta P) + b_2(\Delta P)^2$)

	ΔV (voltios)						
	30	40	50	60	70	80	90
b_2 (A/atm ²)	-0,142	-0,174	-0,191	-0,184	-0,189	-0,241	-0,257
b_1 (A/atm)	0,932	1,128	1,268	1,276	1,315	1,526	1,730
b_0 (A)	0,478	0,598	0,699	0,733	0,758	0,767	0,946

Obsérvese que conforme aumenta la presión aplicada a cada voltaje, aumenta la intensidad promedio de corriente, mientras que al aumentar el voltaje aplicado, a una presión dada, la intensidad promedio aumenta.

Se comprueba que las densidades de corriente, obtenidas como el cociente entre las intensidades promedio de corriente, expresadas en amperios, y el área de membrana de la pila expresada en m², calculada como el producto del área efectiva de una membrana (220 cm²), por el número de celdas electrodiálíticas, que es de 2,2 m², siguen, al igual que en el caso de baja salinidad, la ecuación general (5.2-2). Los valores para todos los voltajes empleados en el experimento se recogen en la Tabla 5.54. También en éste caso, las densidades de corriente límite cumplen la ecuación (5.2-1) y los valores de α aparecen recogidos en la Tabla 5.55.

Por otra parte se observa que para un voltaje dado, la relación entre el caudal de alimentación de la pila, Q_a (m³/h), y el cociente entre la densidad de corriente promedio, i (A/m²) y la conductividad de la corriente de desecho, $Cond(d)$ ($\mu S/cm$), es lineal como se aprecia en la Figura 5.37, expresándose en la Tabla 5.56 los parámetros de ajuste de cada recta y su coeficiente de correlación.

Tabla 5.54

Valores correspondientes al cociente (i_p/i_p^*) de la ecuación (5.2-2) para media salinidad.
Temperatura 20 °C

ΔV (voltios)	$\left(\frac{Q_{0,4}}{Q_{0,6}}\right)^{0,5}$ = 0,83	$\left(\frac{Q_{0,6}}{Q_{0,8}}\right)^{0,5}$ = 0,87	$\left(\frac{Q_{0,8}}{Q_{1,0}}\right)^{0,5}$ = 0,90	$\left(\frac{Q_{1,0}}{Q_{1,2}}\right)^{0,5}$ = 0,92	$\left(\frac{Q_{1,2}}{Q_{1,4}}\right)^{0,5}$ = 0,93	$\left(\frac{Q_{1,4}}{Q_{1,6}}\right)^{0,5}$ = 0,94	$\left(\frac{Q_{1,6}}{Q_{1,8}}\right)^{0,5}$ = 0,94	$\left(\frac{Q_{1,8}}{Q_{2,0}}\right)^{0,5}$ = 0,95
30	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,91	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,95	$(i_{1,8}/i_{2,0})$ = 0,95
40	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,95	$(i_{1,8}/i_{2,0})$ = 0,95
50	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94	$(i_{1,8}/i_{2,0})$ = 0,95
60	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,91	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94	$(i_{1,8}/i_{2,0})$ = 0,95
70	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94	$(i_{1,8}/i_{2,0})$ = 0,95
80	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,82	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94	$(i_{1,8}/i_{2,0})$ = 0,95
90	$(i_{0,4}/i_{0,6})$ = 0,83	$(i_{0,6}/i_{0,8})$ = 0,87	$(i_{0,8}/i_{1,0})$ = 0,90	$(i_{1,0}/i_{1,2})$ = 0,92	$(i_{1,2}/i_{1,4})$ = 0,93	$(i_{1,4}/i_{1,6})$ = 0,94	$(i_{1,6}/i_{1,8})$ = 0,94	$(i_{1,8}/i_{2,0})$ = 0,95

Tabla 5.55

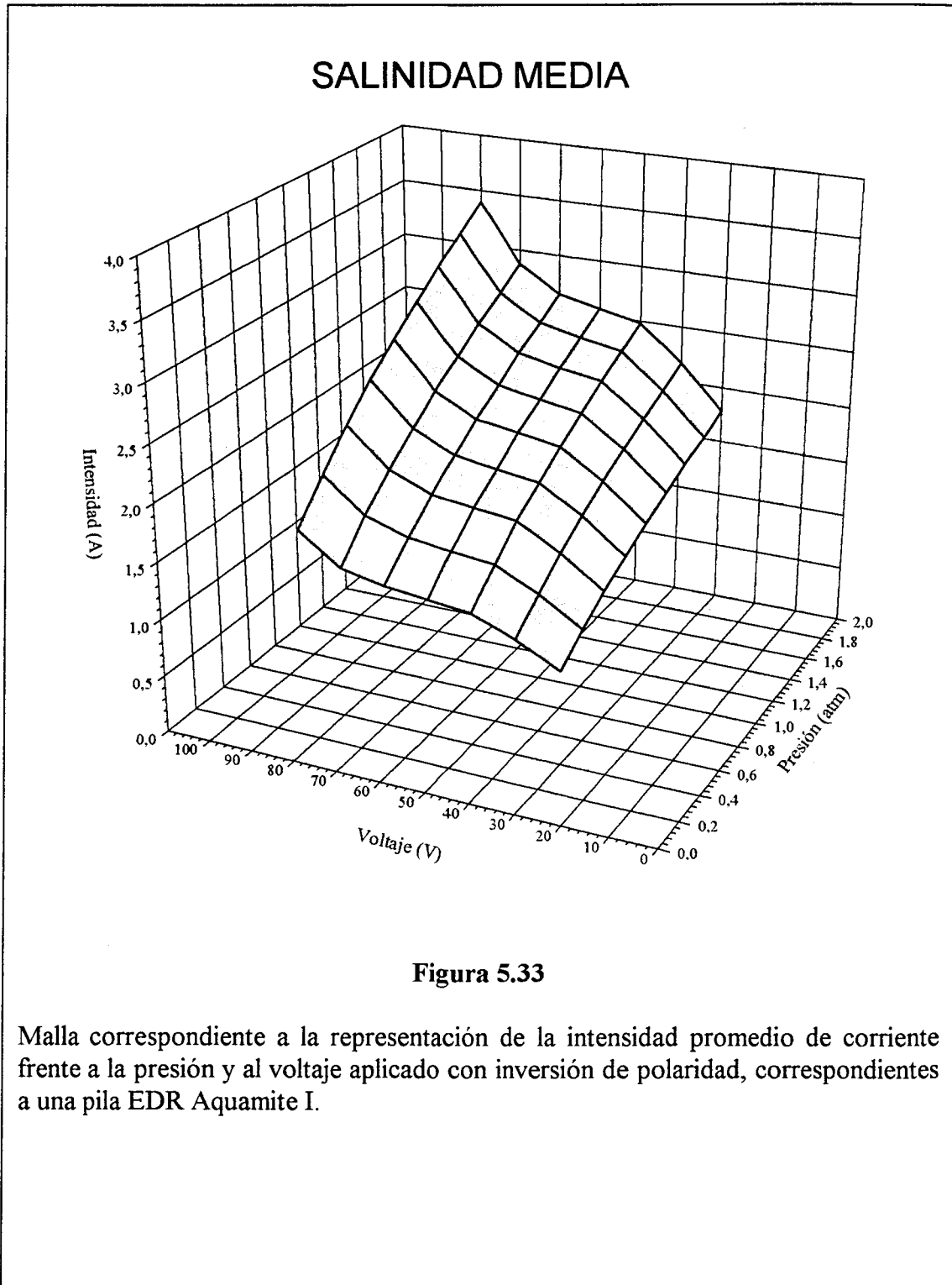
Valores correspondientes a la constante α de la ecuación (5.2-1). Voltaje 60 V.
Temperatura 20°C

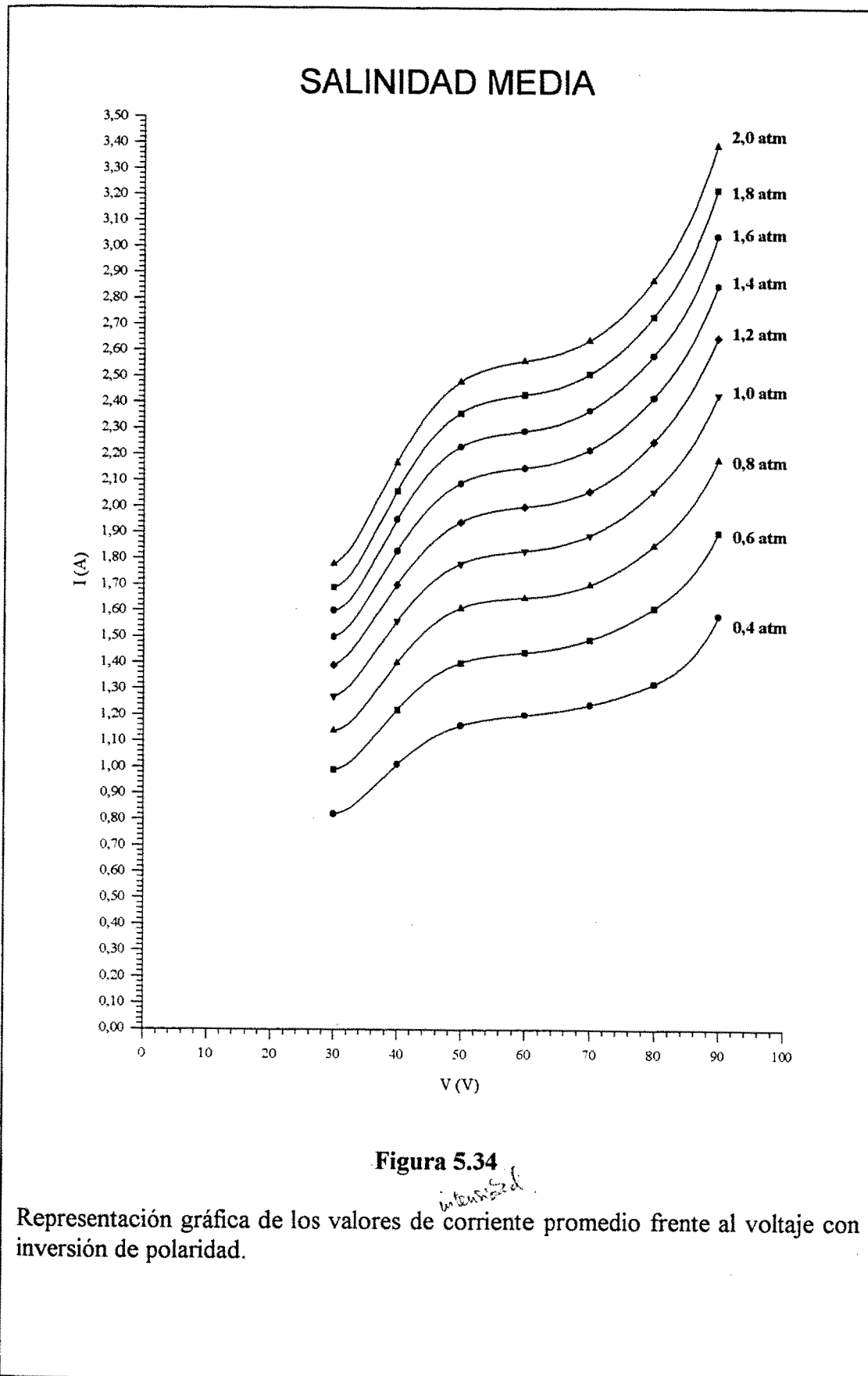
<i>para dividir por = 2,12 A/m²</i> α ($A \times h^{0,5} / m^{2,5}$)	ΔP (atm)								
	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00
	8,94	8,93	8,95	8,93	8,94	8,93	8,91	8,93	8,94
	4,06	4,06	4,07	4,06	4,06	4,06	4,05	4,06	4,06

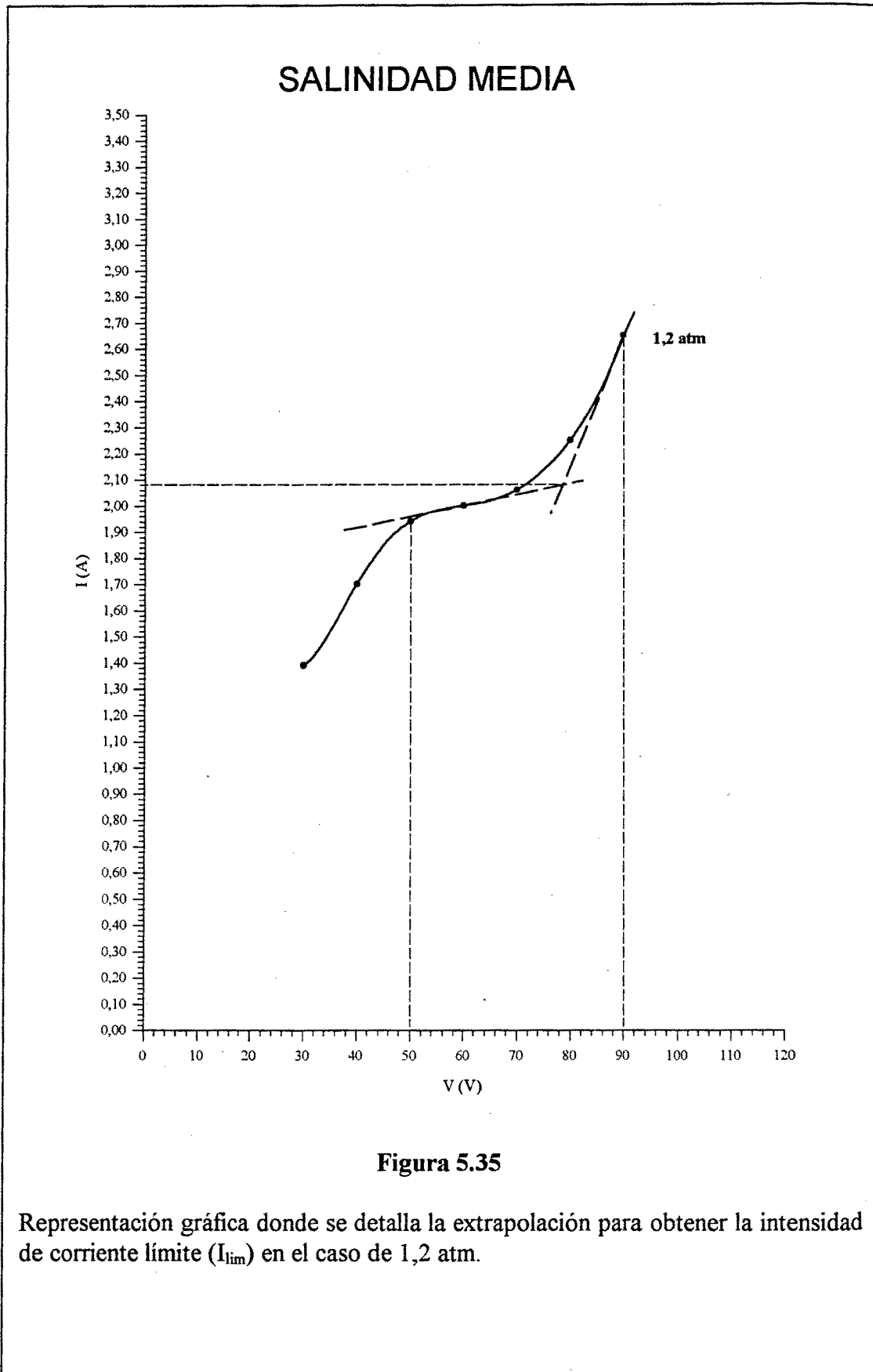
Tabla 5.56

Dependencia lineal entre $i/Cond(d)$ y el caudal de alimentación Q_a : $i/Cond(d) = b_0 + b_1 Q_a$

	ΔV (voltios)						
	30	40	50	60	70	80	90
$b_1 \times 10^{-4}$ ($A \times cm \times h / \mu S \times m^5$)	2,661	2,309	2,450	2,574	2,529	2,831	3,463
$b_0 \times 10^{-5}$ ($A \times cm / \mu S \times m^2$)	0,572	1,229	1,485	1,454	1,588	1,662	1,900
r^2	0,971	0,987	0,985	0,986	0,991	0,994	0,991







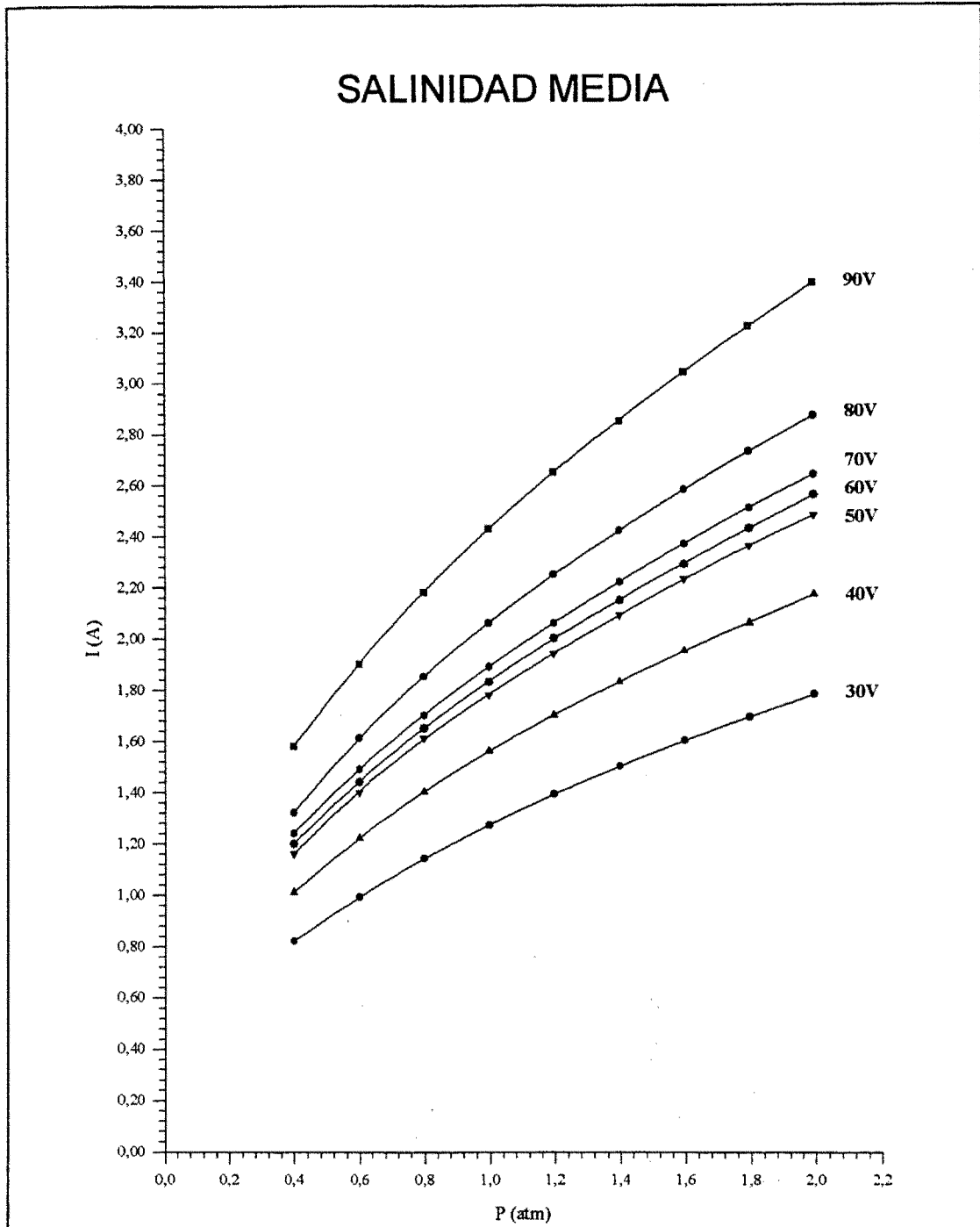


Figura 5.36

Representación gráfica de los valores de la intensidad de corriente promedio frente a la presión con inversión de polaridad.

5.5.4 Eficiencia de la corriente

La representación tridimensional de la eficiencia de la corriente promedio frente a la presión de alimentación y al voltaje de la pila, calculada mediante la ecuación (2.7-1) (Figura 5.38). Las curvas obtenidas mediante cortes de la superficie citada por planos paralelos al plano coordenado eficiencia-voltaje dan curvas que muestran una disminución de la eficiencia con el voltaje aplicado, salvo entre 30V y 40V para las curvas correspondientes a las presiones de alimentación entre 1,4 y 2,0 atm, donde aumenta (Figura 5.39). En las curvas que se obtienen mediante cortes de la superficie anterior por planos paralelos al plano coordenado eficiencia-presión (Figura 5.40), se observa que, para todos los voltajes de trabajo la eficiencia de la corriente aumenta al aumentar la presión, excepto para 30V, que exhibe un máximo en torno a 1,2 atm. El valor de la eficiencia de la corriente en el óptimo de funcionamiento (el máximo porcentaje de separación) resulta ser del 79,6%.

5.5.5 Potencia consumida

Otra de las representaciones tridimensionales obtenidas, es la correspondiente a la potencia promedio calculada frente al caudal de producto y al voltaje aplicado a la pila (Figura 5.41). Esta superficie permite el estudio de las curvas de potencia consumida frente al voltaje aplicado, a cada caudal de producto obtenido, halladas mediante cortes de la superficie citada anteriormente por planos paralelos al plano coordenado potencia-voltaje (Figura 5.42). En ellas se representan los puntos experimentales para los distintos voltajes de trabajo, a los que se ajustan curvas polinómicas de orden 6 y coeficiente de correlación $r^2 = 0,999$, observándose que al aumentar el voltaje aplicado, aumenta la potencia consumida para un caudal de producto determinado (presión de trabajo constante) y que conforme aumenta la presión de la corriente de alimentación, aumenta la potencia consumida para un valor de voltaje determinado. Las otras curvas estudiadas, obtenidas mediante cortes de la superficie anterior por planos paralelos al plano coordenado potencia-caudal, son las correspondientes a la potencia frente al caudal, para cada voltaje aplicado (Figura 5.43). En ellas se representan los puntos experimentales para los distintos caudales de trabajo, a los que se han ajustado curvas polinómicas de segundo grado y coeficiente de correlación $r^2 = 0,999$, cuyos coeficientes se dan en la Tabla 5.57; como puede apreciarse, para un voltaje dado el aumento del caudal del

producto va acompañado de un aumento de la potencia consumida, la cual a su vez crece conforme aumenta el voltaje aplicado.

5.5.6 Costes de producción

La representación tridimensional correspondiente al coste calculado por m³ de producto frente al caudal del mismo y al voltaje aplicado da una superficie representada en la Figura 5.44. El estudio de las curvas obtenidas mediante cortes de la superficie anterior con planos paralelos al plano coordenado coste-voltaje, da el voltaje aplicado frente al coste para cada caudal de producto obtenido (Figura 5.45); los puntos experimentales se ajustan a polinomios de orden 6, con coeficientes de correlación superiores a 0,999. Puede observarse que para un caudal de producto determinado, al aumentar el voltaje aplicado, aumenta el coste de operación de la pila y que para un voltaje determinado, conforme aumenta el caudal, disminuye el coste, siendo el coste correspondiente al mínimo relativo de concentración de producto (óptimo de funcionamiento: 60V y 1,2 atm; 5×10⁻² m³/h) de 36,00 pts/m³. Mediante cortes de la superficie en consideración anteriormente, con planos paralelos al plano coordenado corriente-voltaje, se obtiene la variación del caudal de producto obtenido frente al coste para cada voltaje aplicado (Figura 5.46), con ajustes polinómicos de orden 3 y r² = 0,999, cuyos coeficientes aparecen recogidas en la Tabla 5.58; de éstas gráficas, podemos concluir, que conforme aumenta el caudal de producto obtenido, disminuye el coste para un voltaje determinado y que a un caudal de producto dado, aumenta el coste de operación de la pila, a medida que aumenta el voltaje aplicado.

Tabla 5.57

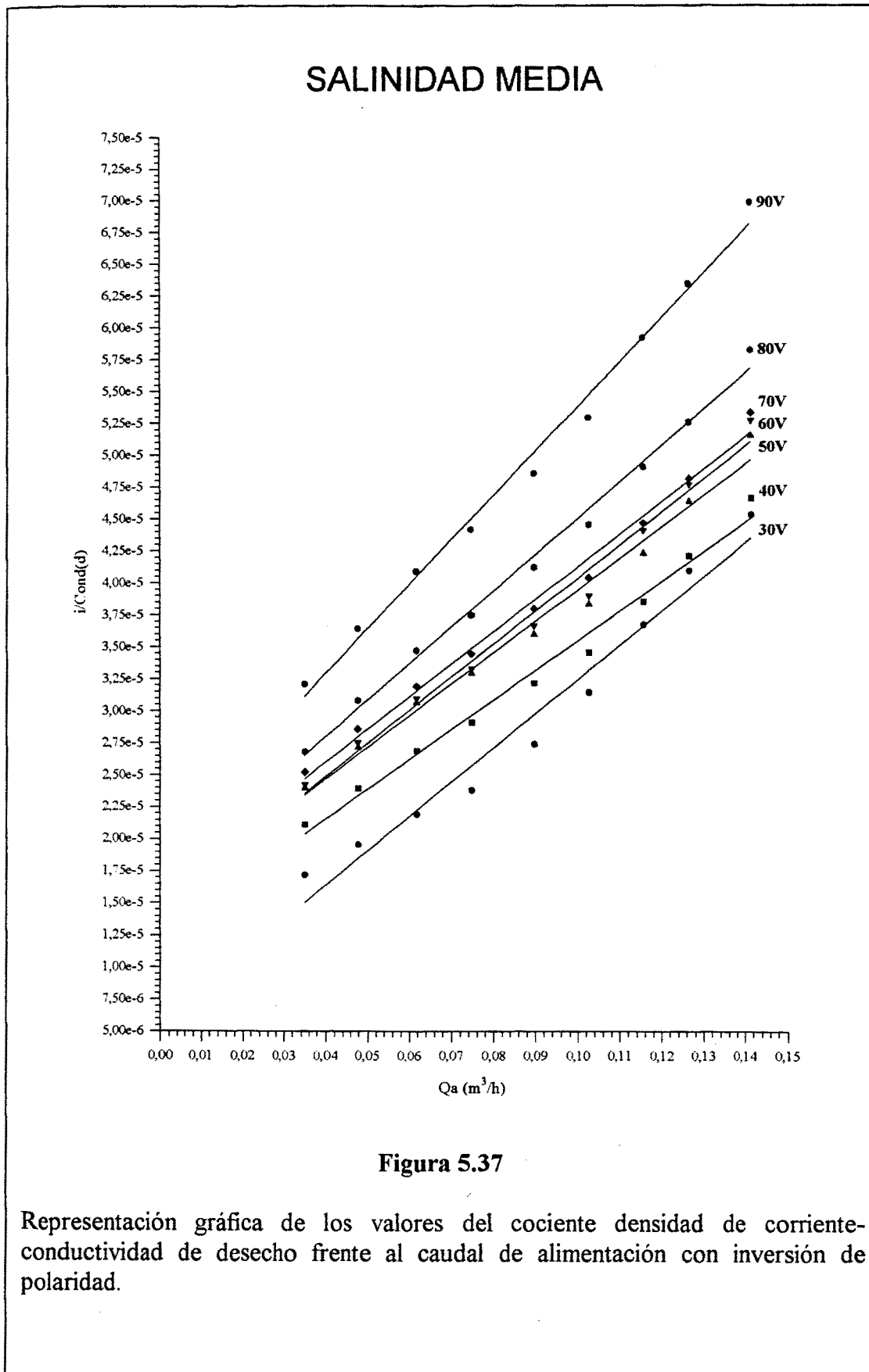
Coeficientes correspondientes al ajuste polinómico de potencia frente al caudal de trabajo para salinidad media (Pot = b₀ + b₁(Qp) + b₂(Qp)²)

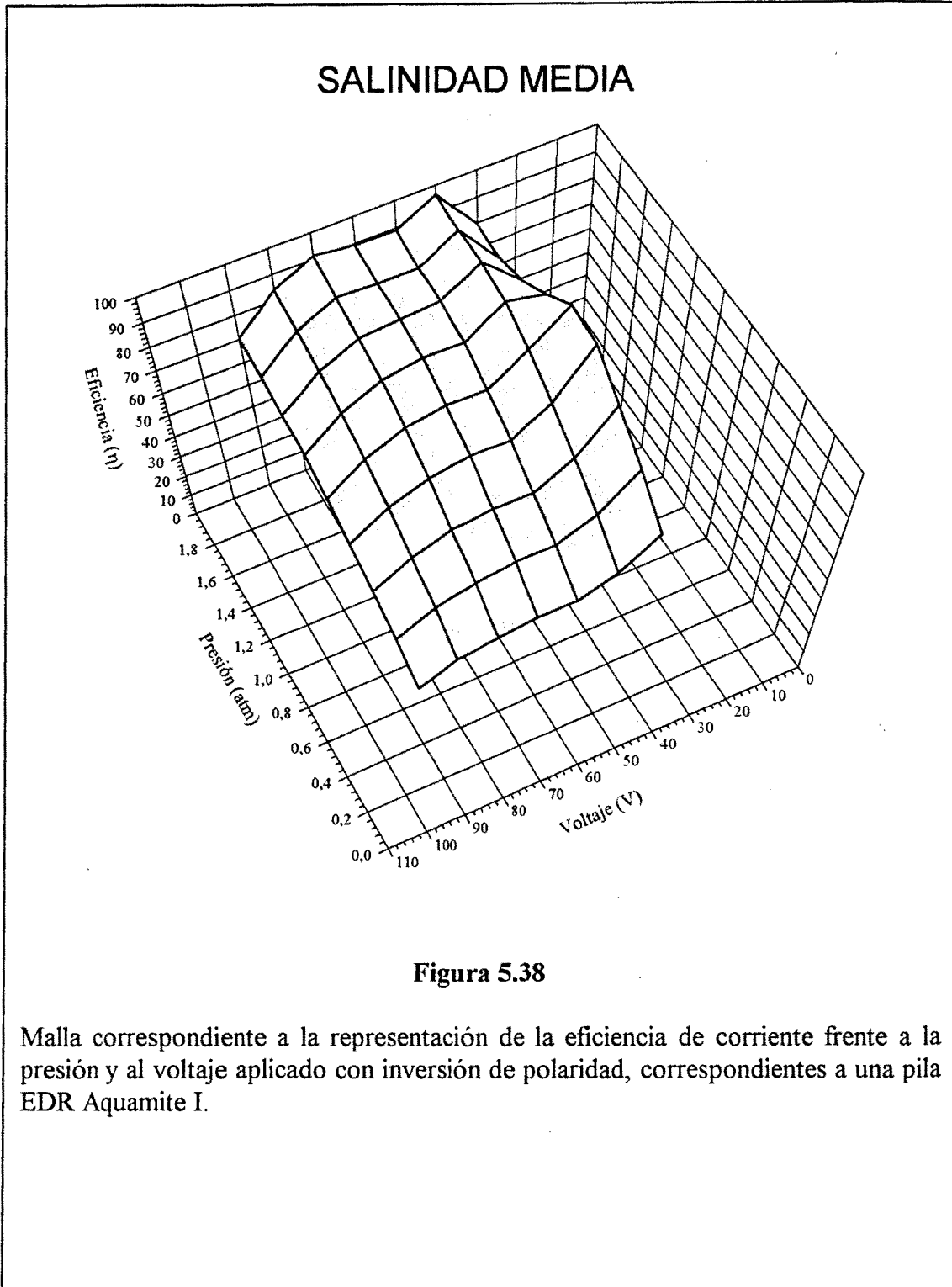
	ΔV (voltios)						
	30	40	50	60	70	80	90
b ₂ x 10 ⁴ (w×h ² /m ⁶)	-0,266	-0,435	-0,598	-0,691	-0,827	-1,204	-1,449
b ₁ x 10 ³ (w×h/m ³)	0,709	1,146	1,609	1,942	2,334	3,100	3,950
b ₀ (w)	12,923	21,663	31,755	40,112	48,455	55,226	77,298

Tabla 5.58

Coefficientes correspondientes al ajuste polinómico del coste frente al caudal de producto obtenido para salinidad media ($\text{Coste}(p) = b_0 + b_1(Qp) + b_2(Qp)^2 + b_3(Qp)^3$)

	ΔV (voltios)						
	30	40	50	60	70	80	90
$b_3 \times 10^5$ (pts \times h ³ /m ¹²)	-0,496	-0,789	-1,130	-1,481	-1,835	-1,901	-2,884
$b_2 \times 10^4$ (pts \times h ² /m ⁹)	1,001	1,611	2,321	3,015	3,715	3,935	5,858
$b_1 \times 10^3$ (pts \times h/m ⁶)	-0,746	-1,216	-1,757	-2,249	-2,751	-3,032	-4,375
$b_0 \times 10^2$ (pts/m ³)	0,308	0,506	0,728	0,912	1,105	1,305	1,792





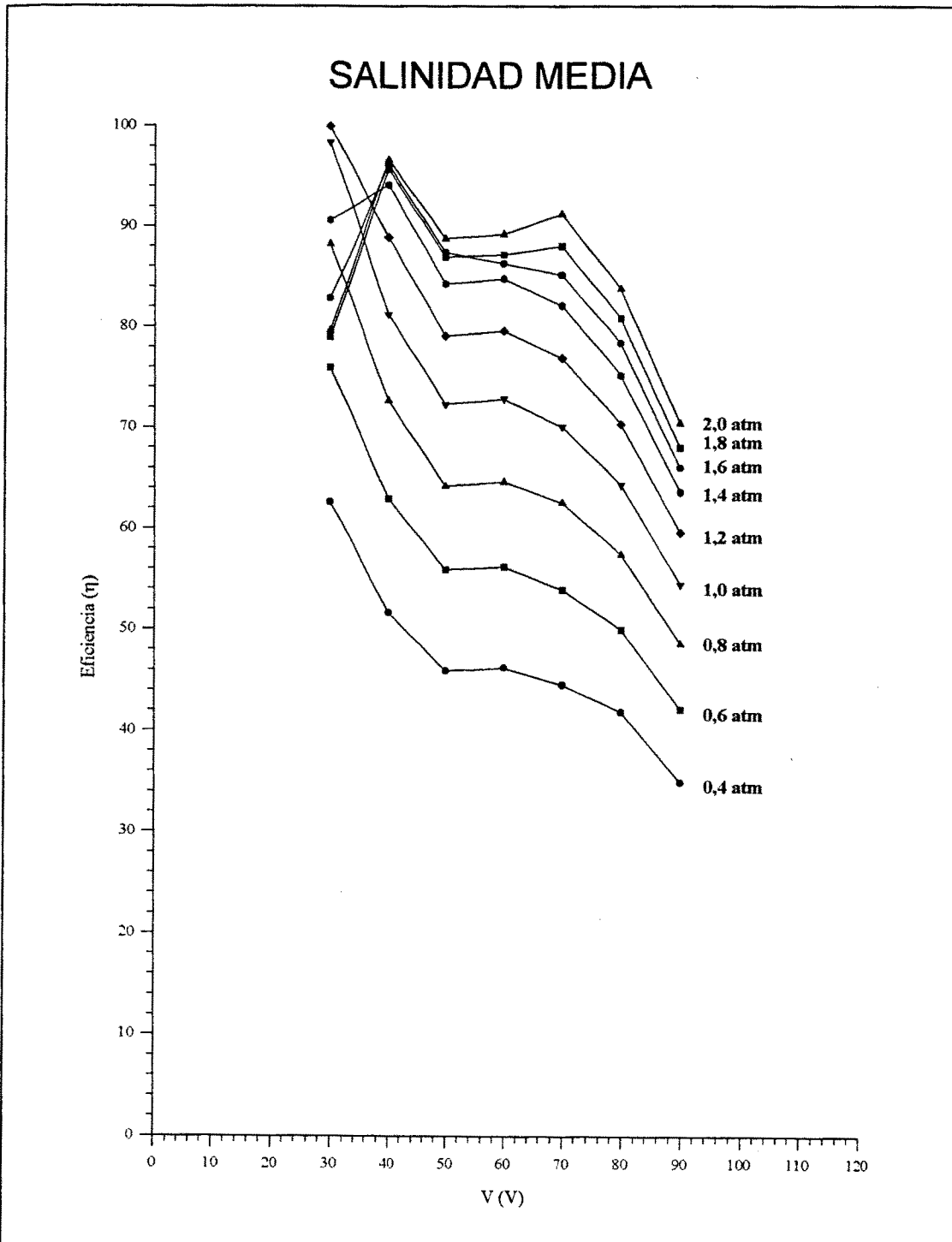


Figura 5.39

Representación gráfica de los valores de eficiencia de corriente frente al voltaje con inversión de polaridad.

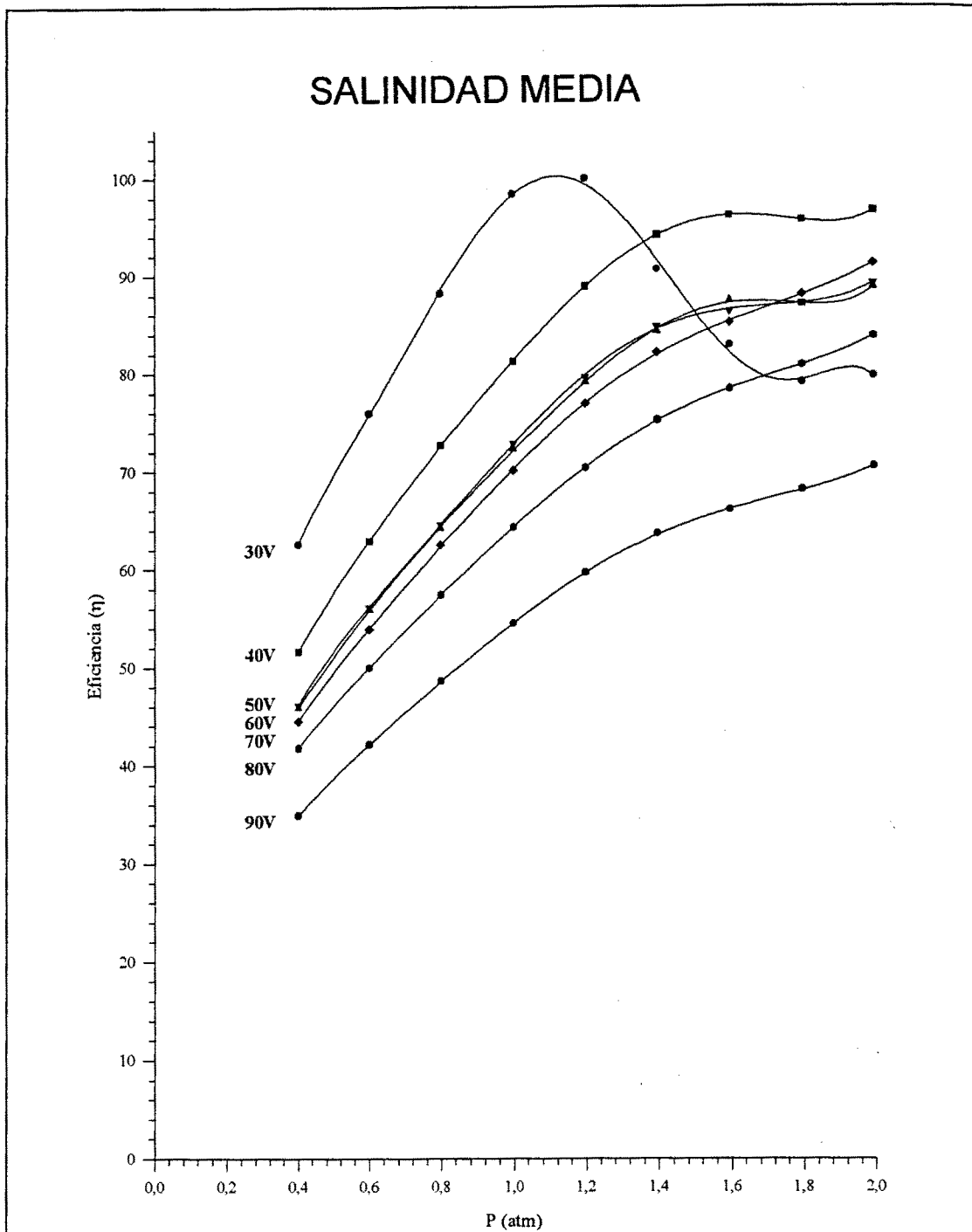
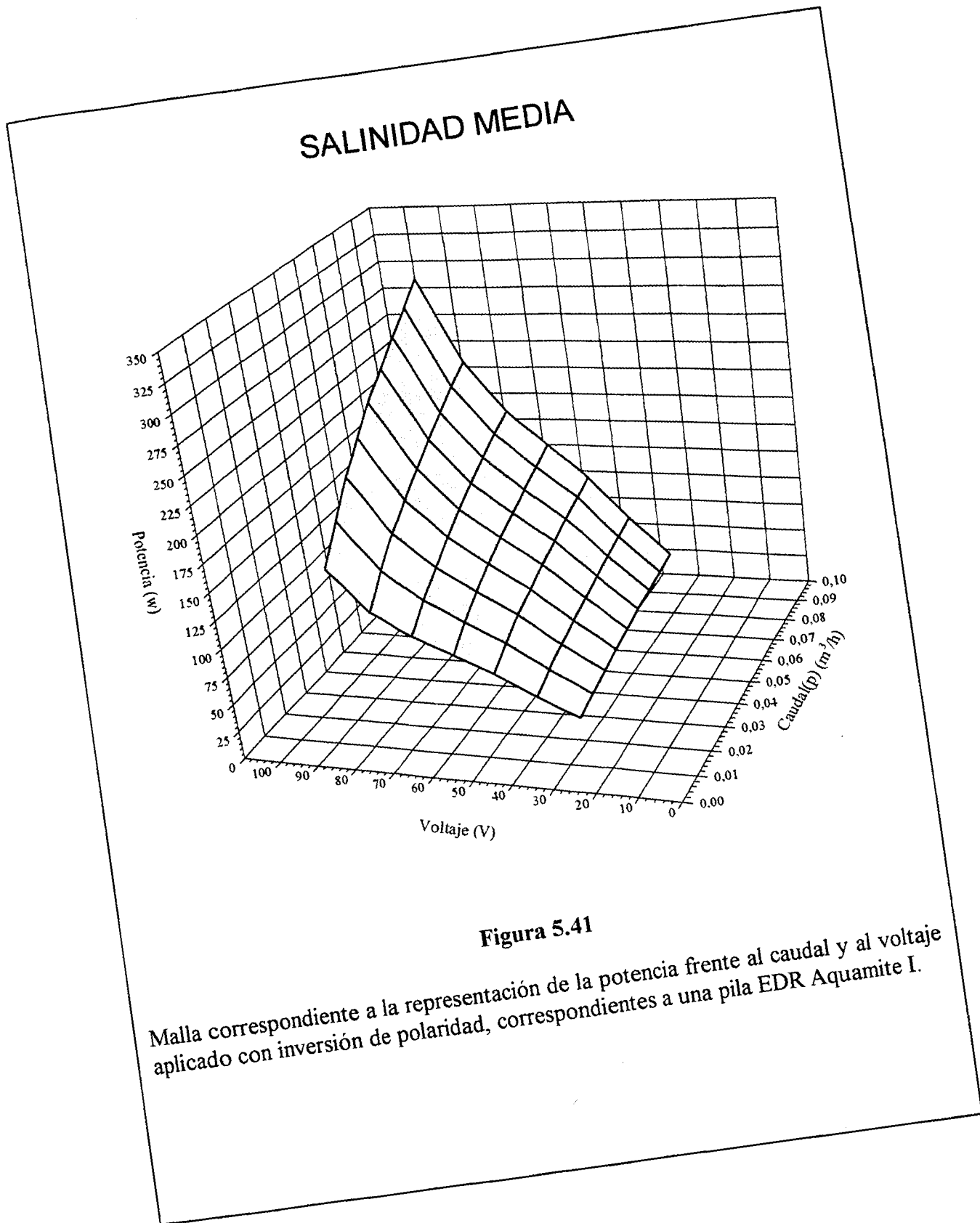


Figura 5.40

Representación gráfica de los valores de eficiencia de corriente frente a la presión con inversión de polaridad.



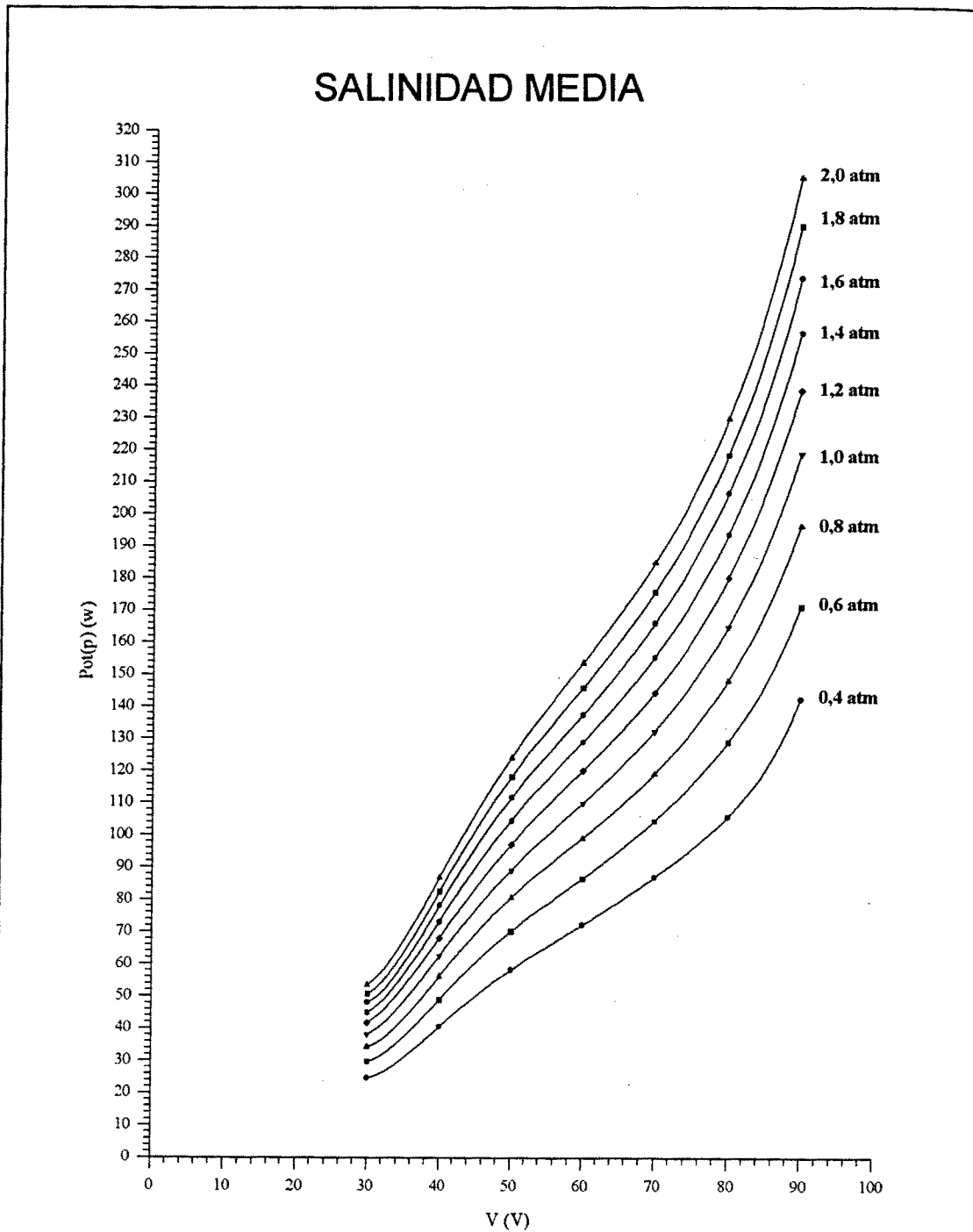
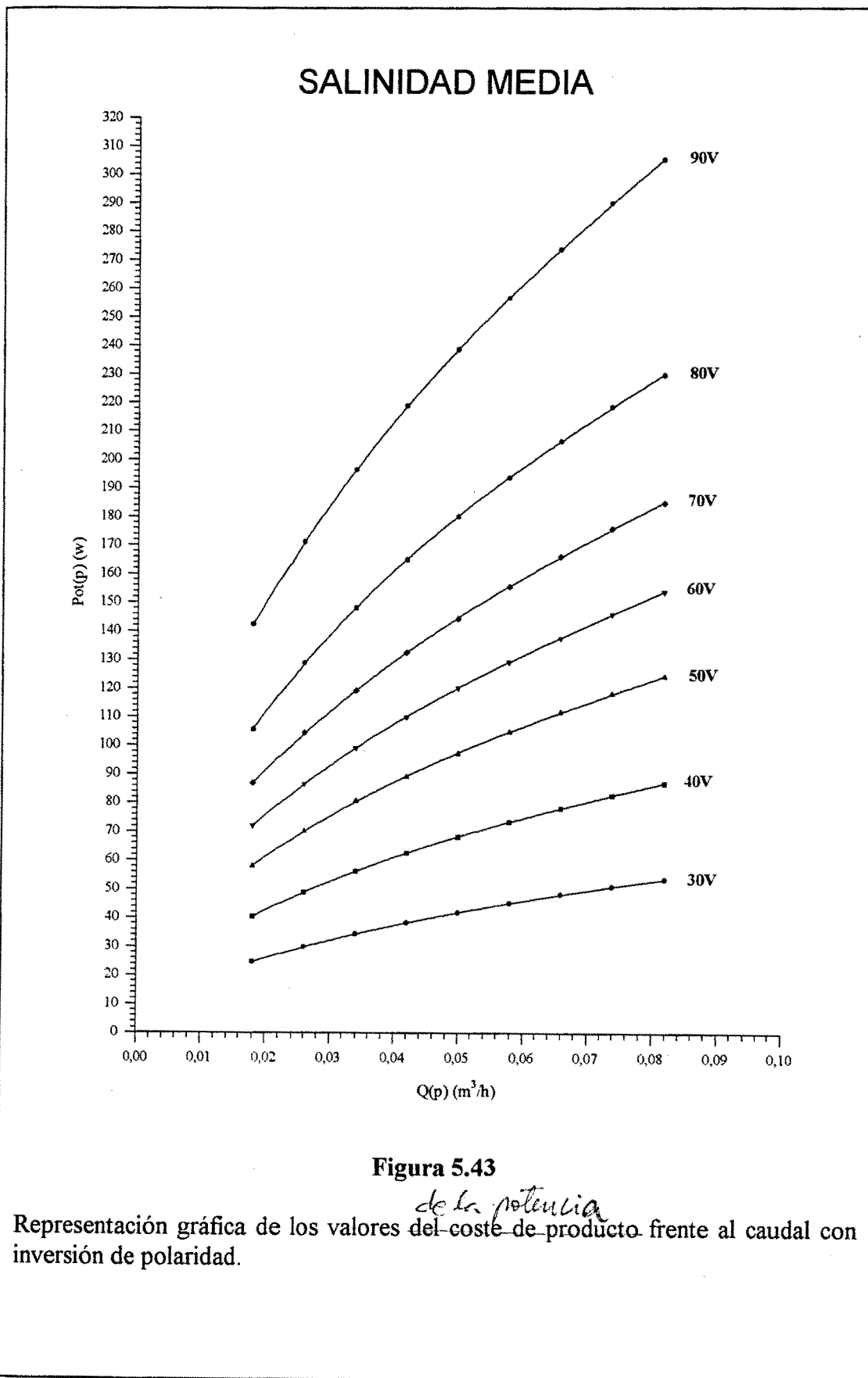
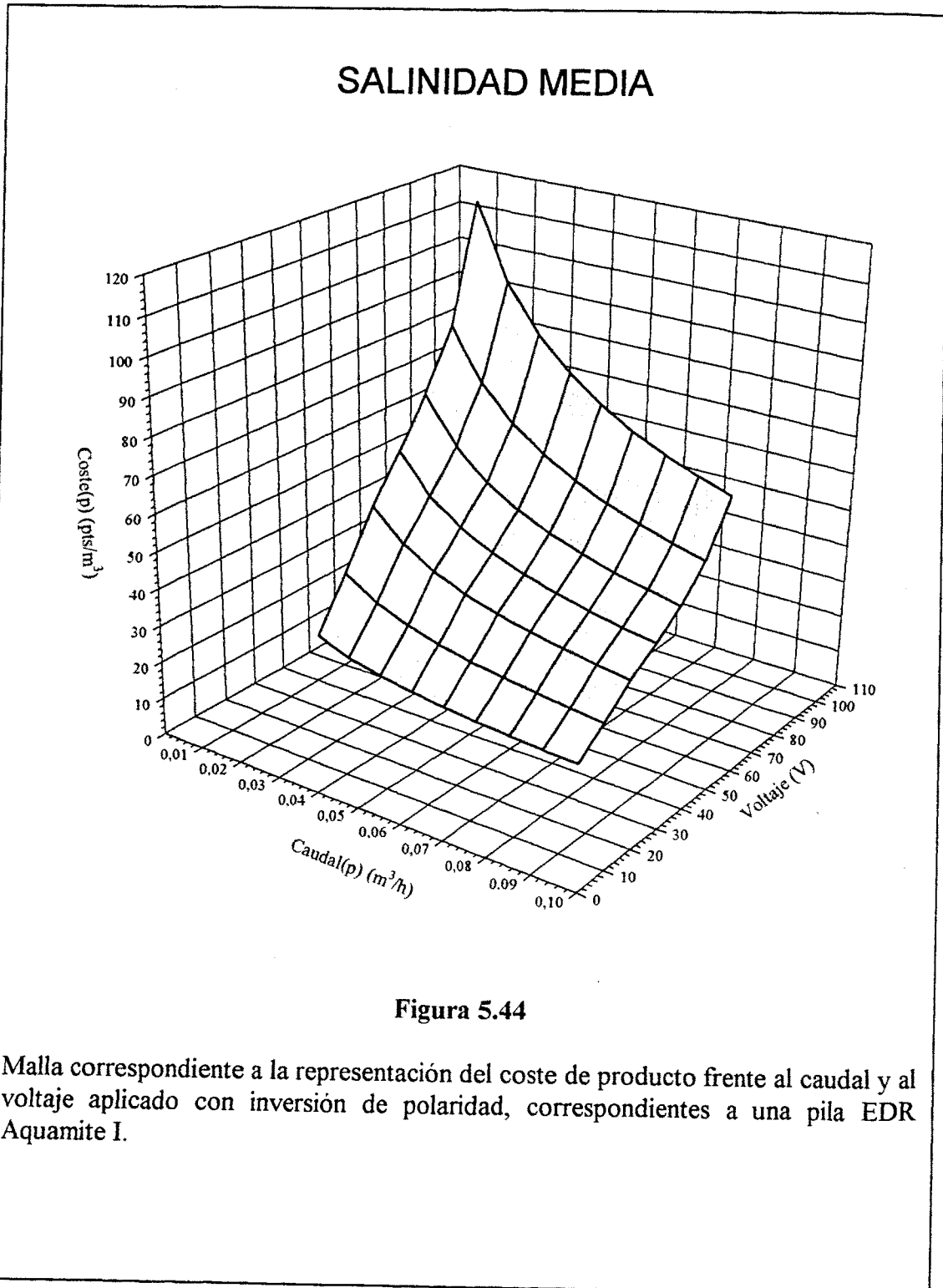
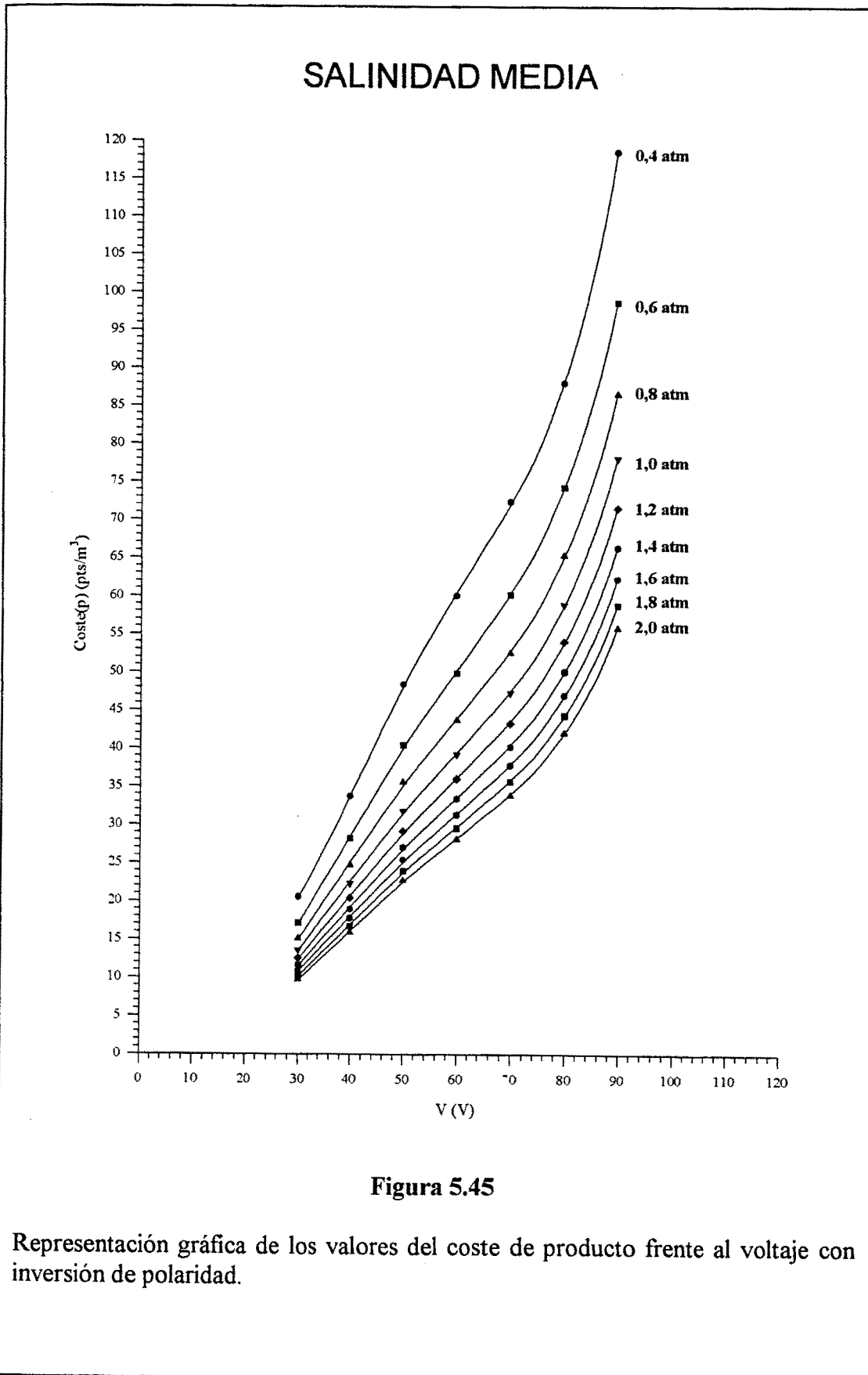


Figura 5.42

Representación gráfica de los valores de potencia frente al voltaje con inversión de polaridad.







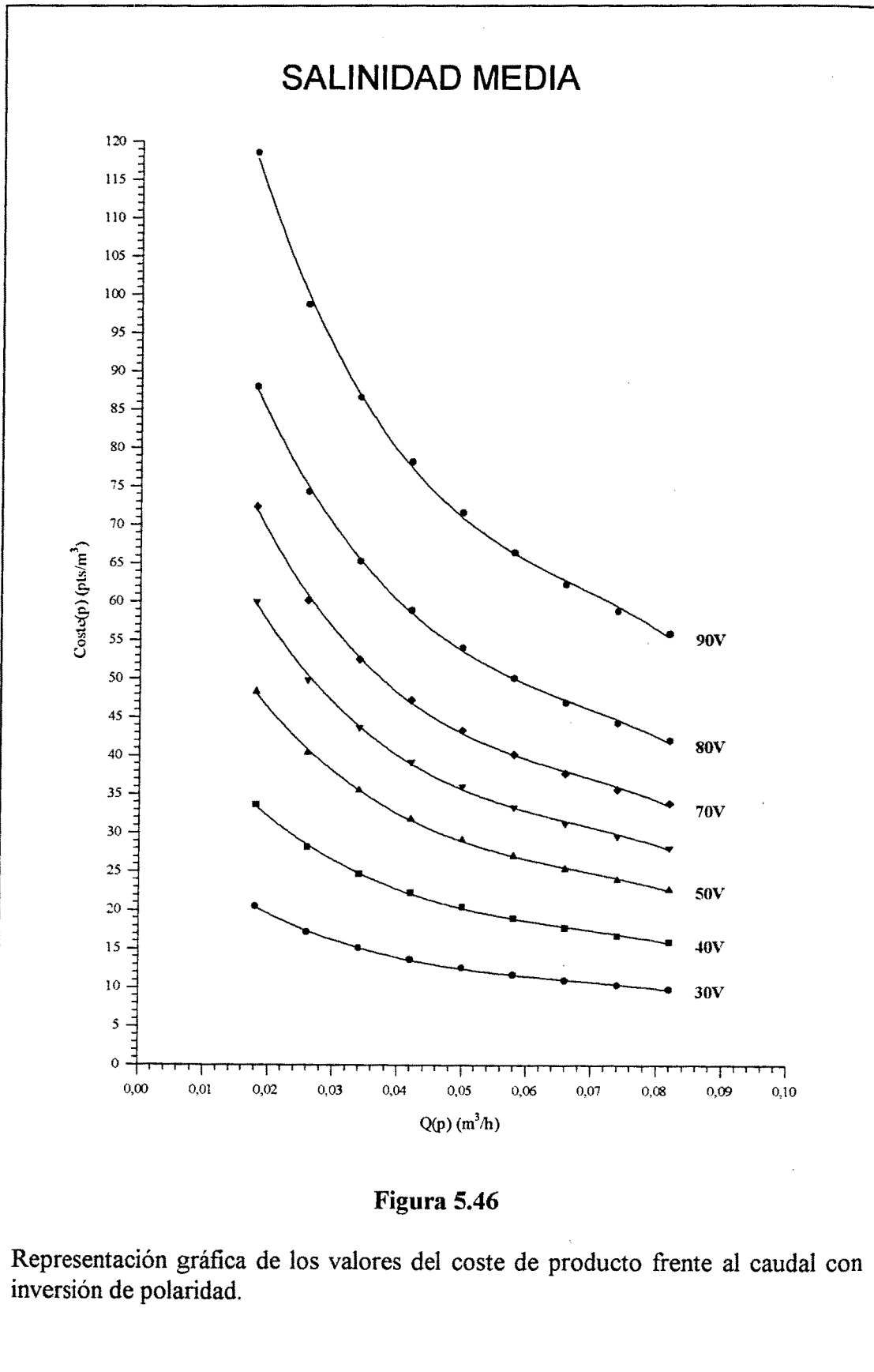


Figura 5.46

Representación gráfica de los valores del coste de producto frente al caudal con inversión de polaridad.

5.6. APLICACIONES PRACTICAS

Una vez evaluada y optimizada la planta para éstos dos tipos de aguas, se procedió al tratamiento en la situación de óptimo, con recirculación de desecho, de un agua patrón de media salinidad, con el fin de ver la viabilidad del proceso. También se trató, en las mismas condiciones, pero sin recirculación de desecho, un agua procedente de drenaje de terrenos agrícolas (Campo de Cartagena), un agua procedente de un afloramiento natural (Rambla del Arco) y un efluente industrial.

5.6.1 Tratamiento mediante recirculación de un agua patrón de media salinidad

La Tabla 5.59 muestra, a la temperatura de trabajo (20°C) y para el valor de tensión eléctrica aplicada a las etapas de la pila en el óptimo de funcionamiento, los valores promedio de ambas etapas, para polaridad positiva y negativa, de la intensidad, de la conductividad de producto, de la conductividad de desecho, de la concentración de producto, de la concentración de desecho y del porcentaje de separación. También se dan los valores promedio para la pila, de la conductividad de producto, de la conductividad de desecho, de la concentración de producto, de la concentración de desecho y del porcentaje de separación, así como los valores de caudales de alimentación, recirculado, producto y desecho.

Este tratamiento se inició, en principio, operando la pila sin recirculación, cubriéndose un periodo de inversión de polaridad (30 minutos) y posteriormente, durante el segundo periodo de inversión de polaridad, se inyectó un caudal de recirculado a razón de 15 l/h, proveniente del agua de desecho de la primera operación, por uno de los dos canales de entrada a la pila, a una presión 0,2 atm superior a la de entrada del otro canal, cuando la polaridad era positiva. La operación con éste caudal de recirculación, como máximo, obedece a que si dicho caudal se supera, los picos de intensidad de corriente observados están muy próximos a los valores límites de diseño de la pila, de ahí que no fuese conveniente superar éste valor. La corriente de lavado de electrodos provenía del agua de alimentación y se inyectaba a una presión 0,1 atm inferior a la de alimentación.

Tabla 5.59

Valores correspondientes a la experiencia con recirculación de desecho, a un voltaje de 60 V, una presión de alimentación 1,2 atm, conductividad de alimentación 10635 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (6806,40 ppm). Temperatura 20°C

	Sin Recirculación	Con Recirculación
Intensidad: I(+) (A)	2,00	2,15
Intensidad: I(-) (A)	1,90	2,04
Intensidad promedio pila: I (A)	1,95	2,10
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	754	4431
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	377	4093
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	566	4262
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	22986	26321
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	23457	12887
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	23222	19599
Concentración: Cc(p+) (ppm)	483	2836
Concentración: Cc(p-) (ppm)	241	2620
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	362	2728
Concentración: Cc(d+) (ppm)	14711	16845
Concentración: Cc(d-) (ppm)	15013	15562
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	14862	16203
Caudal alimentación: Qa (l/h)	90	75
Caudal recirculación: Qr (l/h)	0	15
Caudal producto: Qp (l/h)	50	48
Caudal desecho: Qd (l/h)	40	16
Porcentaje de separación: %S(+)	96,06	75,25
Porcentaje de separación: %S(-)	98,03	77,14
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	97,05	76,19
* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho		

De acuerdo con la Tabla 5.59, se aprecia que para nuestra pila, la recirculación máxima permisible, según sus parámetros de diseño, reporta un incremento muy bajo de salinidad del desecho y un aumento muy elevado de la concentración del producto, acercándolo a los valores de media salinidad, comparándolo con la operación sin recirculación, por lo que se puede concluir que no es recomendable dicho proceso. Como alternativa, se podría efectuar un nuevo tratamiento sin recirculación del agua producto obtenida.

5.6.2 Tratamiento de un agua de drenaje de terrenos agrícolas (Campo de Cartagena)

Al igual que en el caso anterior, se inició la operación de la pila sin recirculación, cubriéndose un periodo de dos inversiones de polaridad (60 minutos). La corriente de lavado de electrodos provenía del agua de alimentación y se inyectó a una presión 0,1 atm inferior a la de alimentación. El análisis del agua de alimentación se recoge en la Tabla 5.60

Tabla 5.60
Análisis del agua de alimentación proveniente de las aguas de drenaje de terrenos agrícolas. Temperatura 20°C

	mg/l (ppm)	meq/l	%meq/l
ANIONES			
Cloruros (Cl ⁻)	1231	34,7	50,0
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	1088	22,7	32,6
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	526	8,6	12,4
Nitratos (NO ₃ ⁻)	210	3,4	4,9
CATIONES			
Sodio (Na ⁺)	708	30,8	44,3
Calcio (Ca ⁺²)	229	11,4	16,5
Magnesio (Mg ⁺²)	280	23,0	33,2
Potasio (K ⁺)	164	4,2	6,0
Otros parámetros			
Conductividad eléctrica a 20°C	6931 μS/cm		
Sólidos Totales Disueltos (STD)	4436 mg/l		

Los valores promedio obtenidos aparecen en la Tabla 5.61. De acuerdo con ellos, se aprecia que para nuestra de pila, el porcentaje de eliminación de sales es del 94,15% y el coste de operación de la misma es de 33,00 pts/m³, registrándose buena concordancia, al comparar con la operación anteriormente vista, con el agua patrón de similar salinidad.

Tabla 5.61

Valores correspondientes a la experiencia del tratamiento de un agua de drenaje de terrenos agrícolas, a un voltaje de 70 V, una presión de alimentación 1,2 atm, conductividad de alimentación 6931 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (4436 ppm). Temperatura 20°C

Intensidad: I(+) (A)	1,88
Intensidad: I(-) (A)	1,26
Intensidad promedio pila: I (A)	1,57
Potencia: Pot(+) (w)	131,60
Potencia: Pot(-) (w)	88,20
Potencia promedio pila: Pot (w)	110,00
Conductividad: Cd(p+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	1072
Conductividad: Cd(p-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	303
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	687
Conductividad: Cd(d+) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	13337
Conductividad: Cd(d-) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	14299
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	13818
Concentración: Cc(p+) (ppm)	686
Concentración: Cc(p-) (ppm)	194
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	440
Concentración: Cc(d+) (ppm)	8534
Concentración: Cc(d-) (ppm)	9151
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	8844
Caudal alimentación: Qa (l/h)	90
Caudal producto: Qp (l/h)	50
Caudal desecho: Qd (l/h)	40
Porcentaje de separación: %S(+)	90,87
Porcentaje de separación: %S(-)	97,43
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	94,15
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	33,00

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

5.6.3 Tratamiento de un afloramiento natural (Rambla del Arco)

Para éste tratamiento se inició, la operación de la pila sin recirculación, cubriéndose un periodo de dos inversiones de polaridad (60 minutos). La corriente de lavado de electrodos provino del agua de alimentación y se inyectó a una presión 0,1 atm inferior a la de alimentación. El análisis del agua de alimentación se muestra en la Tabla 5.62.

Tabla 5.62
Análisis del agua de alimentación proveniente del afloramiento natural.
Temperatura 20°C

	mg/l (ppm)	meq/l	%meq/l
ANIONES			
Cloruros (Cl ⁻)	1485	41,9	48,3
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	1814	37,8	43,5
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	394	6,5	7,4
Nitratos (NO ₃ ⁻)	39	0,6	0,7
CATIONES			
Sodio (Na ⁺)	635	27,6	30,2
Calcio (Ca ⁺²)	816	40,7	44,6
Magnesio (Mg ⁺²)	248	20,4	22,3
Potasio (K ⁺)	101	2,6	2,8
Otros parámetros			
Conductividad eléctrica a 20°C	8644 μS/cm		
Sólidos Totales Disueltos (STD)	5532 mg/l		

Todos los valores promedio obtenidos se dan en la Tabla 5.63. Se observa que para éste tipo de planta, el porcentaje de eliminación de sales es del 83,28% y el coste de operación de la misma es de 51,75 pts/m³, detectándose un aumento al comparar con la operación anteriormente vista con el agua patrón de similar salinidad, lo que se puede atribuir a la mayor concentración iónica de ésta con respecto a aquella, ya que éste agua posee cationes y aniones distintos del Cl⁻ y Na⁺, que contribuyen a un incremento de la intensidad de corriente y no son eliminados mayoritariamente de la corriente de producto; por ésta causa también se registra la reducción del porcentaje de separación.

Los análisis correspondientes al agua producto y al agua de desecho se dan en las Tablas 5.64 y 5.65, respectivamente. En la Tabla 5.66 aparecen reflejados los valores de la dilución de la corriente de alimentación por el intercambio iónico debido al proceso EDR y en la Tabla 5.67 se muestran los porcentajes de separación iónica.

Tabla 5.63

Valores correspondientes a la experiencia del tratamiento de un afloramiento natural, a un voltaje de 60 V, una presión de alimentación 1,2 atm, conductividad de alimentación 8644 $\mu\text{S/cm}$ (5532 ppm). Temperatura 20°C

Intensidad: I(+)(A)	3,31
Intensidad: I(-)(A)	2,44
Intensidad promedio pila: I (A)	2,88
Potencia: Pot(+)(w)	198,60
Potencia: Pot(-)(w)	146,40
Potencia promedio pila: Pot (w)	172,50
Conductividad: Cd(p+)($\mu\text{S/cm}$)	2172
Conductividad: Cd(p-)($\mu\text{S/cm}$)	2009
Cond. promedio pila: Cd(p)($\mu\text{S/cm}$)	2090
Conductividad: Cd(d+)($\mu\text{S/cm}$)	20170
Conductividad: Cd(d-)($\mu\text{S/cm}$)	20489
Cond. promedio pila: Cd(d)($\mu\text{S/cm}$)	20340
Concentración: Cc(p+)(ppm)	1390
Concentración: Cc(p-)(ppm)	1286
Conc. promedio pila: Cc(p)(ppm)	1338
Concentración: Cc(d+)(ppm)	12909
Concentración: Cc(d-)(ppm)	13113
Conc. promedio pila: Cc(d)(ppm)	13011
Caudal alimentación: Qa (l/h)	90
Caudal producto: Qp (l/h)	50
Caudal desecho: Qd (l/h)	40
Porcentaje de separación: %S(+)	82,62
Porcentaje de separación: %S(-)	83,93
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	83,28
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	51,75

* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho

Tabla 5.64

Análisis de la muestra de agua producto del afloramiento natural. Temperatura 20°C

	mg/l (ppm)	meq/l	%meq/l
ANIONES			
Cloruros (Cl ⁻)	288	8,1	54,5
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	168	3,5	23,5
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	189	3,1	20,8
Nitratos (NO ₃ ⁻)	11	0,2	1,2
CATIONES			
Sodio (Na ⁺)	149	6,5	41,4
Calcio (Ca ⁺²)	133	6,6	42,4
Magnesio (Mg ⁺²)	18	1,5	9,5
Potasio (K ⁺)	41	1,0	6,7
Otros parámetros			
Conductividad eléctrica a 20°C		2030 µS/cm	
Sólidos Totales Disueltos (STD)		997 mg/l	

Tabla 5.65

Análisis de la muestra de agua de desecho del afloramiento natural. Temperatura 20°C

	mg/l (ppm)	meq/l	%meq/l
ANIONES			
Cloruros (Cl ⁻)	3332	94,0	51,0
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	3911	81,4	44,2
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	392	6,4	3,5
Nitratos (NO ₃ ⁻)	152	2,5	1,3
CATIONES			
Sodio (Na ⁺)	1197	52,1	29,6
Calcio (Ca ⁺²)	1445	72,1	41,0
Magnesio (Mg ⁺²)	569	46,8	26,6
Potasio (K ⁺)	188	4,8	2,7
Otros parámetros			
Conductividad eléctrica a 20°C		18390 µS/cm	
Sólidos Totales Disueltos (STD)		11186 mg/l	

Tabla 5.66

Dilución del agua de alimentación por el intercambio iónico producido por EDR

Corriente	TDS (mg/l)	Flujo (l/h)	TDS×Flujo(mg/h)
Alimentación	5532	90	497880
Producto	997	50	49850
Desecho	11186	40	447440

Tabla 5.67
Porcentaje de separación de iones en el agua de alimentación

Aniones	%S	Cationes	%S
Cloruros (Cl ⁻)	80,6	Sodio (Na ⁺)	76,5
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	90,7	Calcio (Ca ⁺²)	83,7
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	52,0	Magnesio (Mg ⁺²)	92,7
Nitratos (NO ₃ ⁻)	71,8	Potasio (K ⁺)	59,4

5.6.4 Tratamiento de un efluente industrial

Se trata de un efluente acuoso de elevada conductividad: 31800 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (20850 ppm). El análisis del líquido se muestra en la Tabla 5.68. Debido a su elevado contenido salino, para su tratamiento mediante EDR, fue preciso efectuar una dilución en la proporción 1:4.

El tratamiento se llevó a cabo sin recirculación, con una presión en la entrada de 1,2 atm y un caudal de alimentación (Q_a) de 70 l/h, de modo que $Q_a \times C_a = 584,5 \text{ mS}/\text{cm} \times \text{h}$. Los caudales de producto y desecho fueron respectivamente de $Q_p = 36 \text{ l/h}$ y $Q_d = 34 \text{ l/h}$. La corriente de lavado de electrodos provino del agua de red urbana y se inyectó a una presión 0,1 atm inferior a la de alimentación a la pila.

La evolución de las conductividades del producto (C_p) y del desecho (C_d), así como del porcentaje de separación (%S) se recogen en las Tablas 5.69 y 5.70, y corresponden a las dos sesiones en las que tuvo lugar la experiencia.

Los valores promedio de la intensidad, potencia, conductividad del producto, conductividad del desecho, concentración del producto, concentración del desecho y porcentaje de separación, así como los valores de los caudales de alimentación, producto y desecho, y el valor del coste del producto, se muestran en la Tabla 5.71. Todos éstos valores corresponden a los promedios realizados para las dos sesiones de las que consta la experiencia.

En las Tablas 5.72 y 5.73 se recogen los análisis del producto y desecho, respectivamente, obtenidos después del tratamiento del efluente.

De éstos resultados se desprende que si bien la aplicación de la EDR se realiza bajo condiciones muy poco favorables, permite alcanzar un porcentaje promedio de eliminación de sales del 70,30%.

Tabla 5.68

Análisis de la muestra del efluente acuoso industrial. Temperatura 20 °C

	mg/l (ppm)	meq/l	%meq/l
ANIONES			
Cloruros (Cl ⁻)	607	17,1	7,6
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	9736	202,7	90,2
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	241	3,9	1,8
Nitratos (NO ₃ ⁻)	52	0,8	0,4
CATIONES			
Sodio (Na ⁺)	159	6,9	3,0
Calcio (Ca ⁺²)	661	33,0	14,3
Magnesio (Mg ⁺²)	59	3,3	2,1
Amonio (NH ₄ ⁺)	3359	186,6	80,7
Otros parámetros			
Conductividad eléctrica a 20°C	31800 μS/cm		
Sólidos Totales Disueltos (STD)	14874 mg/l		

Tabla 5.69

Primera sesión de tratamiento del efluente acuoso. Temperatura entre 17,6 y 18,3 °C

Δt(min)	C _p (mS/cm)	C _p Q _p	C _d (mS/cm)	C _d Q _d	C _p Q _p + C _d Q _d	%S
15	5,68	204,48	10,84	368,56	573,04	63,0
30	3,80	136,80	12,70	431,80	568,60	73,9
45	3,81	137,16	12,72	432,48	569,64	74,0
60	4,24	152,64	12,22	415,48	568,12	71,1
75	4,07	146,52	12,54	426,36	572,88	72,9
90	4,51	162,36	11,81	401,54	563,90	68,7

Tabla 5.70

Segunda sesión de tratamiento del efluente acuoso. Temperatura entre 17,6 y 18,3 °C

Δt(min)	C _p (mS/cm)	C _p Q _p	C _d (mS/cm)	C _d Q _d	C _p Q _p + C _d Q _d	%S
15	5,61	201,96	11,28	383,52	585,48	65,6
30	3,60	129,60	11,25	382,50	512,10	65,4
45	4,06	146,16	12,43	422,62	568,78	72,3
60	4,17	150,12	12,65	430,10	580,22	73,6
75	4,00	144,00	12,60	428,40	572,40	73,3
90	4,16	149,76	12,50	425,00	574,76	72,7

Tabla 5.71

Valores correspondientes a la experiencia del tratamiento de un desecho industrial, a un voltaje de 60 V, una presión de alimentación 1,2 atm, conductividad de alimentación 8350 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (5340 ppm). Temperatura 20°C

Intensidad promedio pila: I (A)	2,00
Potencia promedio pila: Pot (w)	120
Cond. promedio pila: Cd(p) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	4310
Cond. promedio pila: Cd(d) ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	12130
Conc. promedio pila: Cc(p) (ppm)	2758
Conc. promedio pila: Cc(d) (ppm)	7763
Caudal alimentación: Qa (l/h)	70
Caudal producto: Qp (l/h)	36
Caudal desecho: Qd (l/h)	34
Porcentaje de sep. promedio pila: %S	70,3
Coste de producto: Coste(p) (pts/m ³)	50
* (+) = valor con polaridad positiva para la pila; (-) = valor con polaridad negativa para la pila; (p) = producto; (d) = desecho	

Tabla 5.72

Análisis de la muestra de agua producto del efluente industrial

	mg/l (ppm)	meq/l	%meq/l
ANIONES			
Cloruros (Cl^-)	515	14,5	10,8
Sulfatos (SO_4^{-2})	5705	118,8	87,9
Bicarbonatos (HCO_3^-)	99	1,6	1,2
Nitratos (NO_3^-)	8	0,1	0,1
CATIONES			
Sodio (Na^+)	85	3,7	2,6
Calcio (Ca^{+2})	297	14,8	10,3
Magnesio (Mg^{-2})	20	1,6	1,1
Amonio (NH_4^+)	2238	124,3	86,7
Otros parámetros			
Conductividad eléctrica a 20°C	18560 $\mu\text{S}/\text{cm}$		
Sólidos Totales Disueltos (STD)	8967 mg/l		

Tabla 5.73
Análisis de la muestra de agua de desecho del efluente industrial

	mg/l (ppm)	meq/l	%meq/l
ANIONES			
Cloruros (Cl ⁻)	1503	42,4	12,3
Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	14087	293,3	85,0
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	419	6,9	2,0
Nitratos (NO ₃ ⁻)	143	2,3	0,7
CATIONES			
Sodio (Na ⁺)	220	9,6	2,7
Calcio (Ca ⁺²)	920	45,9	13,1
Magnesio (Mg ⁺²)	158	13,0	3,7
Amonio (NH ₄ ⁺)	5059	281,1	80,4
Otros parámetros			
Conductividad eléctrica a 20°C	37100 μS/cm		
Sólidos Totales Disueltos (STD)	22509 mg/l		

CONCLUSIONES

PUESTA EN MARCHA DE LA PLANTA

1º) Se ha llevado a cabo la puesta en marcha de una planta de Electrodialisis Reversible (EDR), marca Ionics®, tipo Aquamite I, con seis etapas hidráulicas y dos eléctricas, en su aspecto de diseño de la circulación de fluidos tanto de alimentación a la planta, como de recuperación de producto, recogida de salmuera y recirculación de la misma, y evacuación de la corriente de lavado de electrodos de la planta, y de diseño de la instalación eléctrica de la planta que permite controlar la tensión eléctrica aplicada a cada etapa eléctrica de la misma, así como, el accionamiento de bombas y electroválvulas, y la medida de los tiempos de inversión de polaridad. Además, el sistema incluye la medida y el control informatizado de voltajes e intensidades de cada etapa eléctrica, presión de alimentación y pH de salmuera.

ANÁLISIS DE AGUAS

2º) Se llevaron a cabo los análisis de las aguas de alimentación a planta por electroforesis capilar, revelándose como un método muy efectivo para el conocimiento de la concentración aniónica y catiónica de las mismas en tiempo real.

CARACTERIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA

3º) Se ha determinado el tiempo de inversión de polaridad de la planta piloto, para cada caso de tratamiento de aguas descrito, llegándose a un óptimo de 15 minutos.

4º) Se ha caracterizado y optimizado el proceso de la planta piloto, para el tratamiento de aguas de contenido salino bajo (< 6000 ppm) y medio (< 12000 ppm), en orden a la obtención de un mayor porcentaje de separación de sales, lo que implica una concentración de STD mínima en el agua producto. Se llegó a la conclusión, de que para las aguas de baja salinidad el óptimo de funcionamiento corresponde 1,2 atm de presión y 70 V de diferencia de potencial eléctrico para ambas etapas, dando un porcentaje de separación de 95,40% (275,52 ppm) y para las de media salinidad, el óptimo de funcionamiento corresponde a 1,2 atm de presión, 60V, siendo el porcentaje de separación de sales de 98,19% (233,60 ppm).

5º) Los costes de operación de planta, de acuerdo con los valores de caudal y potencia consumida para las disoluciones salinas empleadas como patrón, en el óptimo calculado, son de 31,92 pts/m³ para el agua de baja salinidad y de 36,00 pts/m³ para la de media salinidad.

6º) Para los tipos de aguas citados anteriormente se realizó la recirculación del desecho obtenido, llegándose a un máximo caudal de recirculación de 18 l/h, para ambos casos, debido a las limitaciones impuestas por el propio sistema.

7º) La caracterización mediante barridos voltaje-presión es recomendable para la caracterización y evaluación de una planta ED, en los siguientes supuestos:

- Cuando no se dispone de suficiente información sobre la misma.
- Si hay una variación de las condiciones de funcionamiento.
- Cuando cambia el tipo de efluente a tratar.
- Tras un periodo de operación muy prolongada que pueda suponer el envejecimiento de las membranas.
- Después de una operación de limpieza de membranas con desmontaje y montaje de la pila.

Por otra parte, la caracterización y evaluación de una planta ED, se realiza para fijar las condiciones operativas que garanticen el mínimo coste del producto.

8º) Se ha determinado, mediante el estudio de las curvas corriente-voltaje, la intensidad de corriente límite y su dependencia de la presión de alimentación. Los valores de la intensidad de corriente límite oscilan entre 0,91A y 1,86A para aguas de baja salinidad y entre 1,26A y 2,66A para aguas de media salinidad.

9º) Los voltajes óptimos exhiben valores próximos a los correspondientes al inicio del proceso de polarización, por ello no deben ser excedidos de forma importante.

10°) Se ha comprobado que, para ésta planta, la relación existente entre la densidad de corriente límite (i_{lim}) y el caudal de producto obtenido (Q_p), es

$$i_{lim} = \alpha \times Q_p^{0.5}$$

siendo α una constante cuyo valor es: $\alpha \cong 3,1 \text{ A}\times\text{h}^{0.5}/\text{m}^{2.5}$ para aguas de baja salinidad y $\alpha \cong 8,9 \text{ A}\times\text{h}^{0.5}/\text{m}^{2.5}$ para aguas de salinidad media.

De la ecuación anterior se sigue inmediatamente que

$$\frac{i_p}{i_{p^*}} = \left(\frac{Q_p}{Q_{p^*}} \right)^{0.5}$$

donde i_p e i_{p^*} son las densidades de corriente (A/m^2) correspondientes a los caudales de producto Q_p y Q_{p^*} (m^3/h) para presiones de trabajo ΔP y ΔP^* consecutivas, para todos los voltajes dados en el experimento.

APLICACIONES

11°) Como aplicación se efectuó el tratamiento, a los valores optimizados, de aguas de drenaje de terrenos agrícolas, enmarcadas dentro del tipo de baja salinidad, llegándose a un porcentaje de separación de sales del 94,15% (440 ppm) con un coste de operación de planta de 33,00 pts/ m^3 , y de aguas provenientes de un afloramiento natural, consideradas como del tipo de media salinidad, obteniéndose un porcentaje de separación de sales del 83,28% (1338 ppm) con un coste de operación de planta de 51,75 pts/ m^3 .