



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE QUIMICA

**"ELECTRODIALISIS Y SU APLICACION EN LA
RECUPERACION DE METALES Y AGUAS DE
LAVADO DE ELECTRODEPOSICION"**

**TRABAJO ESCRITO VIA CURSOS DE EDUCACION CONTINUA
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO QUIMICO
PRESENTA:**

CARLOS ALBERTO ESPINOSA CUELLAR

ASESOR: DR. FRANCISCO JAVIER GARFIAS VAZQUEZ



**EXAMENES PROFESIONALES
FACULTAD DE QUIMICA**

MEXICO, D. F.

2001

292335.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

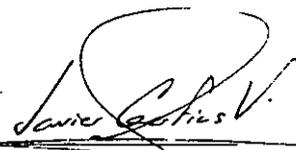
Jurado asignado:

Presidente: Dra. Elvira Santos Santos
Vocal Dr. Enrique Bravo Medina
Secretario Dr. Francisco Javier Garfias Vázquez
1er suplente M. Irma Cruz Gavilán García
2do suplente Dra. Sara Elvia Meza Galindo

Sitio donde se desarrolló el tema:

Edificio D, Facultad de Química, Ciudad Universitaria

Asesor: Dr. Francisco Javier Garfias Vázquez



Sustentante: Carlos Alberto Espinosa Cuellar



Dedicado a:

NAOMI PAULINA

Mi hija

Estás con Dios, pero vives en mí.

TE AMO

INDICE

I	Introducción	1
II	Objetivo	2
III	Desarrollo	2
	III.1 Electrodiálisis	2
	III.2 Electrodiálisis estándar	5
	III.3 Electrodiálisis inversa	6
	III.4 Electrodiálisis bipolar	7
	III.5 Componentes de un sistema de electrodiálisis	9
	III.6 Membranas de intercambio iónico	10
IV	Electrodeposición y contaminación del agua	13
	IV.1 Agua	16
	IV.2 Normatividad	18
	IV.3 Contaminación del agua en el proceso de electrodeposición	19
	IV.4 Aguas de lavado	20
	IV.5 Recuperación de metales en aguas de lavado	20
V	Conclusiones	23
	Bibliografía	25

I INTRODUCCION

En los últimos años, la sociedad ha decidido que el medio ambiente debe ser protegido. Así, ha incrementado las restricciones legales y presiones sociales para reducir las emisiones a la atmósfera, las descargas en sistemas de agua, así como también la disposición de sólidos en sitios de relleno. Por lo tanto, existe una gran necesidad de procesos químicos más limpios así como también tecnología que proteja el medio ambiente de descargas de contaminantes que pudieran ocurrir.

El proceso de recubrimiento de metales es uno de los que contribuyen de manera importante a la contaminación del agua. Este proceso exige de sistemas de lavado o enjuague para eliminar los residuos donde la mayor parte del agua empleada es consumida por los sistemas de enjuague. Por lo cual un sistema de tratamiento y reutilización del agua resulta ser una operación necesaria y benéfica tanto para el consumidor industrial como para el medio ambiente. La tecnología electroquímica contribuye de manera importante en la recuperación de los metales utilizados en electrodeposición así como de las aguas de lavado. Con el desarrollo de membranas de intercambio iónico, la electrodiálisis es una opción para ser aplicada en el proceso de electrodeposición. Con esto se puede llevar a cabo de manera exitosa la recuperación de metales y aguas de lavado de este proceso.

II OBJETIVO

Determinar la importancia del proceso de electrodiálisis y su aplicación en la recuperación de metales y aguas de lavado.

III DESARROLLO

III.1 Electrodiálisis

La electrodiálisis es un proceso de separación electroquímico en el que membranas cargadas y una diferencia de potencial eléctrico se usan para separar especies iónicas y otros componentes no cargados de una solución acuosa. En 1940, con la concepción de la electrodiálisis de múltiple compartimiento y el desarrollo de membranas de intercambio iónico a finales de los 40's, la electrodiálisis comienza a ser una importante técnica de separación.² En el proceso de electrodiálisis, los componentes iónicos de una solución son separados a través de una membrana. La aplicación de un potencial eléctrico entre dos electrodos genera una corriente eléctrica que pasa a través de la solución y que provoca una migración de los cationes hacia el electrodo negativo y una migración de los aniones hacia el electrodo positivo³. Este proceso funciona de acuerdo a la Ley de Faraday, (*la masa liberada por electrólisis es directamente proporcional a la carga que pasa por el electrolito y a la masa atómica e inversamente proporcional a su valencia*⁴), usando una membrana de intercambio iónico para permitir la migración del ión desde la zona diluida de la membrana, hasta la zona concentrada. Como la conductividad de la solución es directamente proporcional a la concentración, por lo tanto, la electrodiálisis es conveniente para aplicarse a soluciones concentradas.³

La electrodiálisis se utiliza para llevar a cabo diversos tipos de separación general; como:

- la separación y concentración de sales, ácidos y bases de soluciones acuosas.
- la separación de iones monovalentes de iones polivalentes y múltiples componentes cargados.
- la separación de componentes iónicos de moléculas no cargadas.

La electrodiálisis también permite producir ácidos y bases de las sales correspondientes, cuando se combina con la disociación de agua eléctricamente forzada en las membranas bipolares.¹

Principios

Los principios de operación de la electrodiálisis son los siguientes:

Los iones pueden ser removidos bajo la influencia de un campo electromagnético. Los iones cargados positiva y negativamente, son atraídos por cargas eléctricas opuestas, los iones positivos (cationes) son atraídos por el electrodo negativo (cátodo) y los iones negativos (aniones) son atraídos por el electrodo positivo (ánodo).⁵

La membrana de intercambio iónico tiene forma de hoja, donde el intercambio es un fenómeno de permeado iónico (fig. 1).¹

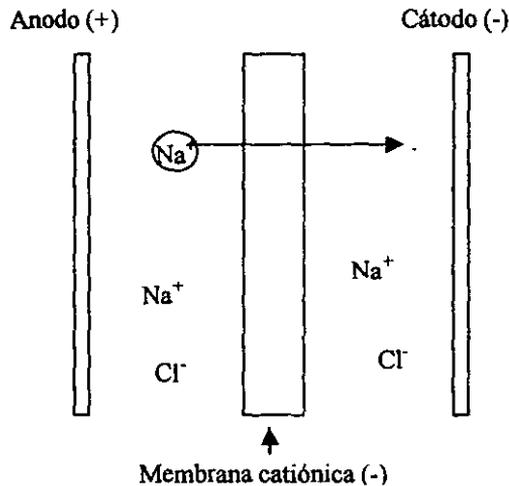


Figura 1. Intercambio iónico por permeación de membrana

En la figura anterior los iones sodio se movilizan al aplicarles una diferencia de potencial y pasan a través de una membrana catiónica dirigiéndose al cátodo. El mecanismo de operación de una membrana de intercambio iónico a la cual se le aplica un potencial eléctrico se muestra en la figura 2.

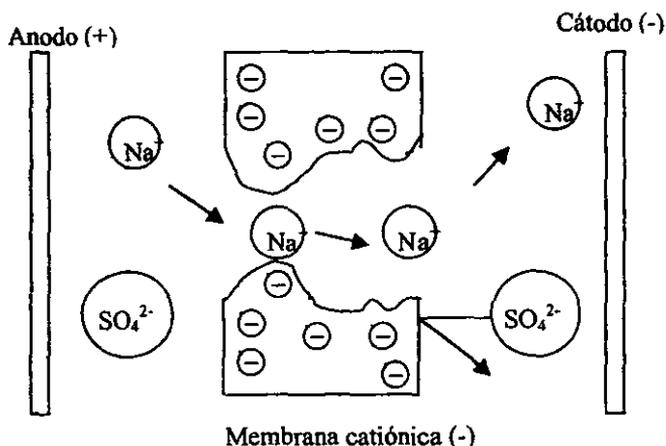


Figura 2. Permeabilidad iónicamente selectiva de las membranas de intercambio iónico.

La membrana de intercambio catiónico está cargada negativamente y es permeable para los cationes como el sodio (Na^+) y el calcio (Ca^{2+}), mientras que no es permeable para aniones tales como el cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), etc. Esta membrana por tener una carga negativa y por la aplicación del potencial eléctrico permite el paso de los iones sodio a través de ella y por tener esa carga negativa rechaza el paso de los iones sulfato.

La membrana también es selectiva en cuanto al tamaño del ión por lo que sólo permite el paso de los iones más pequeños a través de ella.

Esta permeabilidad selectiva que poseen las membranas de intercambio iónico es la base de los procesos de electrodiálisis. Las membranas de intercambio aniónico están cargadas positivamente y se comportan de modo opuesto.¹

La electrodiálisis estándar se desarrolló durante los años cincuenta. Sin embargo durante las dos décadas y media pasadas se ha desarrollado el proceso de polaridad inversa llamado *electrodiálisis inversa*. Además, lo último en el desarrollo de la electrodiálisis es la aplicación de *electrodiálisis bipolar* para recuperación de recursos y control de la contaminación.

A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los procesos mencionados anteriormente.

III.2 Electrodialisis estándar.

En este proceso el agua fluye entre membranas permeables catiónicas y aniónicas, colocadas alternativamente de tal forma que se construyen o disponen en un acumulador o batería. La corriente continua suministra la fuerza motriz para la migración iónica a través de las membranas y los iones son eliminados o concentrados en los pasos de agua alternativos por medio de las membranas selectivamente permeables (Figura 3).

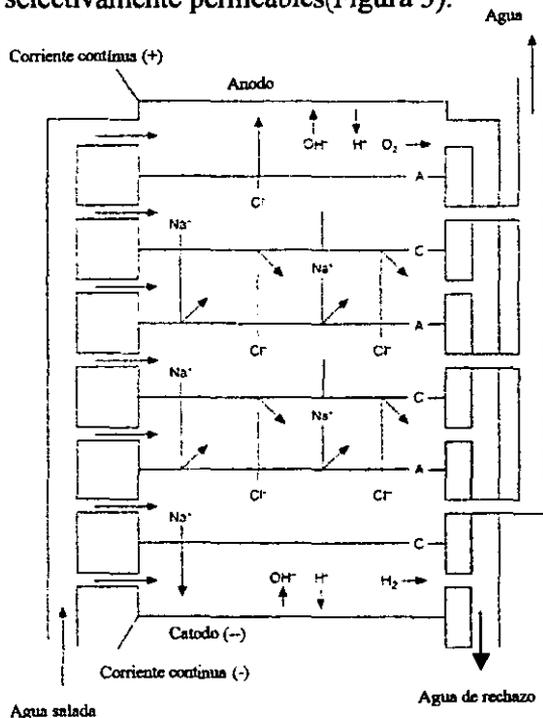


Figura 3. Proceso de electrodialisis . A= membrana aniónica permeable C= membrana catiónica permeable.

En la figura anterior se observa que la corriente de agua salada es distribuida en forma paralela a las cámaras separadas por membranas catiónicas y aniónicas. Al aplicar una diferencia de potencial, los iones Na^+ y Cl^- que se encuentran en solución migran a través de las membranas de intercambio iónico al ser atraídos por el cátodo y el ánodo respectivamente, con lo cual se obtienen corrientes de agua pura y de alta concentración de $NaCl$. Debido a que existe precipitación de sales solubles (como $CaCO_3$ y $CaSO_4$) en el acumulador, se necesita la adición de ácido o un secuestrante a la corriente de

concentrado para inhibirla. Todas las incrustaciones y materias que ensucian la superficie de las membranas disminuyen el rendimiento, por lo cual la batería de membranas se debe limpiar periódicamente.

III.3 Electrodialisis inversa

En este proceso la polaridad de los electrodos se invierte periódicamente (3 a 4 veces por hora) y, por medio de unas válvulas motorizadas, se intercambian las salidas del acumulador, del producto agua potable y del agua residual. Al ser transferidos los iones en direcciones opuestas a través de las membranas, ayuda a la rotura de las incrustaciones y al lavado y salida al exterior de lodos y otros depósitos de las celdas.

En la figura 4, se ilustra el cambio de polaridad de los electrodos con lo cual el sentido en el que migran los iones cambia y por lo tanto los compartimientos de solución concentrada y agua desmineralizada cambian de forma alterna de contenido (depósito A y depósito B).

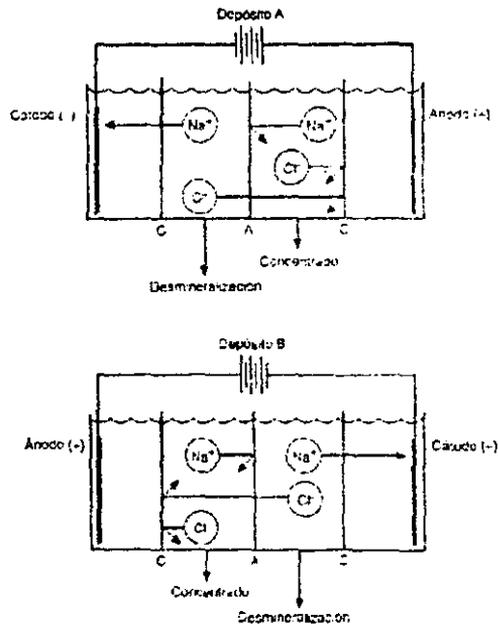


Figura 4. Control de formación de película e incrustación en una batería EDI

En la figura 5 se ejemplifica el vaciado de los depósitos A y B de la figura anterior al cambiar de polaridad de forma alterna.

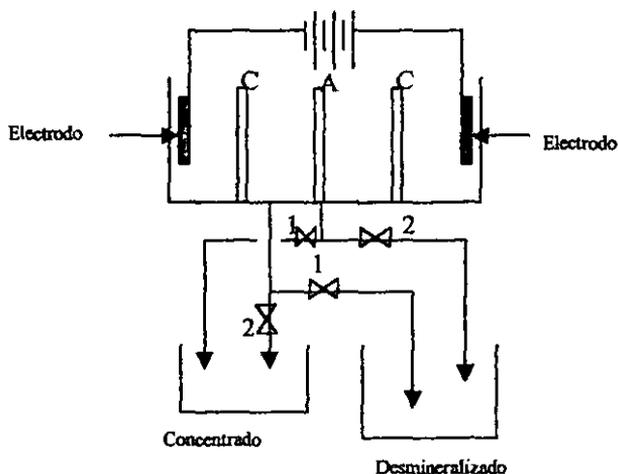


Figura 5. Vaciado de las cámaras en la electrodiálisis inversa.

Las válvulas marcadas con el número 1 se abren después de llevarse a cabo la separación, según lo muestra el depósito A (de la figura 4), para vaciar el contenido de las cámaras. Al cambiar la polaridad, como lo muestra el depósito B (de la figura 4), el contenido de las cámaras cambia por lo que para ser vaciadas se abren las válvulas marcadas con el número 2 y se cierran las válvulas 1.

Esta operación elimina la necesidad de dosificar ácido y/o secuestrantes y la formación de incrustación en los compartimentos de los electrodos se minimiza debido al cambio continuo de condiciones ácidas a básicas. Por lo anterior también se reduce el tiempo de mantenimiento.

3.4 Electrodiálisis bipolar.

Este proceso utiliza membranas de intercambio iónico para separar y concentrar los constituyentes ácido y base de una corriente de sal. En este proceso se utiliza una membrana bipolar que está compuesta de dos capas diferentes que son selectivas a los iones de cargas opuestas.

En la figura 6 se muestra la operación de esta membrana. Al aplicarle corriente eléctrica, el agua se difunde en la interfase de la membrana donde se

divide en iones H^+ y OH^- que después son transportados a través de las capas selectivas aniónicas y catiónicas, respectivamente, a cámaras que se encuentran al otro lado de la membrana bipolar con lo cual se acidifican o basifican estas cámaras.

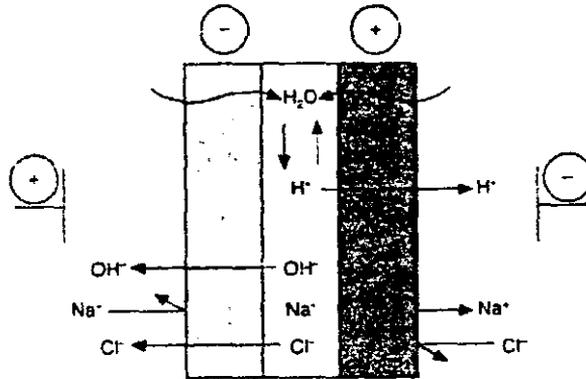


Figura 6. Vista aumentada de la operación de una membrana bipolar.

Para conseguir la producción neta de ácido y base, las membranas catiónicas y aniónicas se usan junto con las membranas bipolares.

En la figura 7 se alimenta una solución de sulfato de sodio a la cámara que está entre las membranas aniónica y catiónica, los iones sodio y sulfato se mueven sobre la membrana monopolar, al mismo tiempo se alimenta agua en las otras dos cámaras donde se separan los iones hidrógeno e hidróxido consiguiendo así acidificar y basificar estas cámaras.

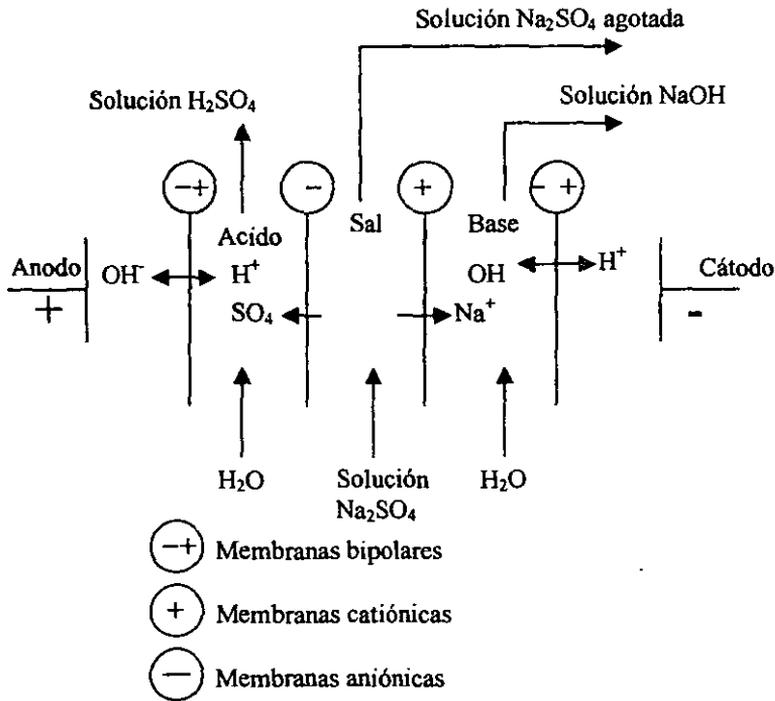


Figura 7. Celda bipolar de triple compartimento de electrodiálisis para conversión de sal en ácido y base.

III.5 Componentes de un sistema de electrodiálisis.

El corazón de un sistema de electrodiálisis es la batería de membranas. Esta batería consiste en una serie alternante de membranas permeables a los cationes y aniones. Los electrodos están localizados a cada lado de la batería. Cuando la corriente es aplicada, los electrolitos migran al electrodo de carga opuesta. Debido al uso de membranas de polaridad selectiva, se forman dos corrientes, una diluida y otra concentrada. En la práctica se colocan espaciadores entre las membranas para formar canales de flujo. Los electrodos usados en electrodiálisis generalmente están contruidos de Titanio con una recubierta de platino.

Otro equipo esencial incluye una fuente de poder de corriente directa y un sistema de bombeo. La corriente directa suministrada la provee un transformador que convierte la corriente alterna en directa. El sistema de bombeo sirve al proceso para alimentar el agua a través de la unidad.^{1,2,6}

intercambio iónico comercialmente disponibles tiene un rango de 2 a 20 $\text{ohm}\cdot\text{cm}^2$, dependiendo del tipo de membrana y la solución que va a ser tratada.⁶ Las membranas comunes tienen una adecuada resistencia a los ácidos y a las bases. La resistencia a la oxidación es importante en algunas aplicaciones, por ejemplo, para la membrana siguiente al ánodo en la pila, y por esta razón algunos fabricantes ofrecen productos que tienen una buena resistencia a la oxidación. Algunas membranas resistentes a la oxidación tienen una baja resistencia a los álcalis. Algunas, pero no todas, son dañadas por soluciones alcalinas fuertes, especialmente a altas temperaturas.⁸

Las membranas de electrodiálisis son hojas planas normalmente hechas de película plástica formada sobre un tejido reforzado de dynel, vidrio u otro material resistente. Las membranas se presentan normalmente como una hoja no cortada, excepto por los cortes de los orificios para formar los canales de flujo y los agujeros de las guías para formar el conjunto de una batería. El espesor de la membrana depende de la aplicación. Normalmente las membranas tienen un espesor de 0.15 a 0.56 mm.

Los separadores o espaciadores separan las membranas y proporcionan un camino en la celda para el flujo del agua. En la figura 9 se observan tres tipos de separadores en los cuales el flujo entra en los canales de alimentación ubicados en el punto A y sigue el camino indicado por las flechas hasta que sale de la celda por el canal de descarga ubicado en el punto B. Los separadores de camino tortuoso dirigen el flujo con cambios repentinos de dirección, los de flujo paralelo distribuyen el flujo en canales adyacentes en forma paralela y el de camino sesgado es una modificación de los de camino tortuoso.

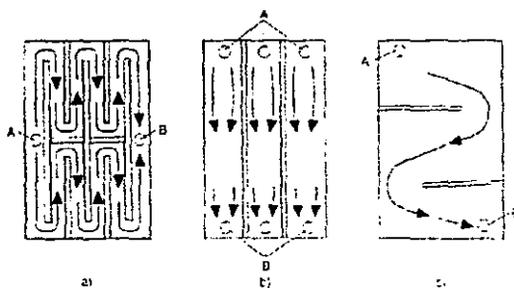


Figura 9. Tres tipos de separadores: a) camino tortuoso; b) flujo paralelo ramificado; c) camino sesgado.

En la tabla 1 se mencionan las propiedades de algunas membranas comercialmente disponibles, así como sus fabricantes.

Tabla 1. Propiedades de algunas membranas comerciales de intercambio iónico

Membrana	Tipo	Propiedades de estructura	IEC, meq/g	Refuerzo	Espesor, mm	Gel agua, %	Resistencia superficial 0,5 N NaCl, 25° C, $\Omega \cdot \text{cm}^2$	Permeabilidad 1,0/0,5 N KCl, %
Asahi Chemical Industry Company Ltd., Chiyoda-ku, Tokio, Japón								
K 101	Catiónica	Estireno/DVB	1,4	Sí	0,24	24	2,1	91
A 111	Aniónica	Estireno/DVB	1,2	Sí	0,24	31	2-3	45
Asahi Glass Company Ltd., Chiyoda-ku, Tokio, Japón								
CMV	Catiónica	Estireno	2,4	PVC	0,15	25	2,9	95
AMV	Aniónica	Butadieno	1,9	PVC	0,14	19	2-4,5	92
ASV	Aniónica	Univalente	2,1		0,15	24	2,1	91
DMV	Catiónica	Diálisis			0,15		—	—
Flemion*	Catiónica	Perfluorada					—	—
Ionac Chemical Company, Sybron Corporation, Birmingham, NJ 08011, EE. UU.								
MC 3470	Catiónica		1,5	Tergal	0,6	35	6-10	68
MA 3475	Aniónica		1,4	Tergal	0,6	31	5-13	70
MC 3142	Catiónica		1,3		0,8		5-10	—
MA 3148	Aniónica		0,8	Tergal	0,8	18	12-70	85
Iones Inc., Watertown, MA 02172, EE. UU.								
61AZL386	Catiónica		2,3	Modacrílico	0,5	46	~6	—
61AZL389	Catiónica		2,6	Modacrílico	1,2	48	—	—
61CZL386	Catiónica		2,7	Modacrílico	0,6	40	~9	—
103QZL386	Aniónica		2,1	Modacrílico	0,63	36	~6	—
103PZL386	Aniónica		1,6	Modacrílico	1,4	43	~21	—
204PZL386	Aniónica		1,9	Modacrílico	0,57	46	~8	—
204SXZL386	Aniónica		2,2	Modacrílico	0,5	46	~7	—
204UZ386	Aniónica		2,8	Modacrílico	0,57	36	~4	—

IV ELECTRODEPOSICION Y CONTAMINACIÓN DEL AGUA

A través de la historia el ser humano se ha empeñado en cambiar la apariencia de los metales aplicando recubrimientos metálicos de varios tipos, en algunas ocasiones por decoración y en otras para aumentar su valor comercial. También se han aplicado los recubrimientos metálicos a lo largo de la historia para prevenir el proceso destructivo de la corrosión.

La electrodeposición es un proceso electrolítico en el cual se pasa una corriente eléctrica a través de una solución conteniendo iones metálicos. Esos iones son reducidos y depositados en el cátodo como un recubrimiento metálico. Si el ánodo está hecho del metal que va a ser depositado, se disuelve para proveer los iones metálicos en solución. Si es un ánodo insoluble se deben hacer periódicas adiciones de sales metálicas a la solución para mantener el contenido de metal. La cantidad de metal depositado sigue el principio de la ley de Faraday.

Los procesos industriales de depósito electrolítico de metales se clasifican en tres grupos principales:

- en galvanostegia,
- refinado y obtención electrolítica y
- en la producción de polvos metálicos en pilas electrolíticas,

cada uno de los cuales exige requisitos diferentes según sean las condiciones físicas del producto catódico.

En galvanostegia (procedimiento para recubrir un metal con una capa de otro de mejor calidad y aspecto) se necesita un depósito de cristales finos de gran tenacidad y adherencia, brillantes o de fácil pulimento.

En el refinado y obtención electrolítica bastan depósitos de grano relativamente gruesos ásperos pero adherentes. Estos depósitos han de ser de gran pureza y resistencia suficiente a fin de poder sufrir la manipulación habitual antes de ser fundidos o moldeados para su elaboración subsecuente.

En la producción de polvo metálico en pilas electrolíticas se debe asegurar el tamaño deseado de los granos, aunque se exige, también, nula o escasa adherencia al cátodo.

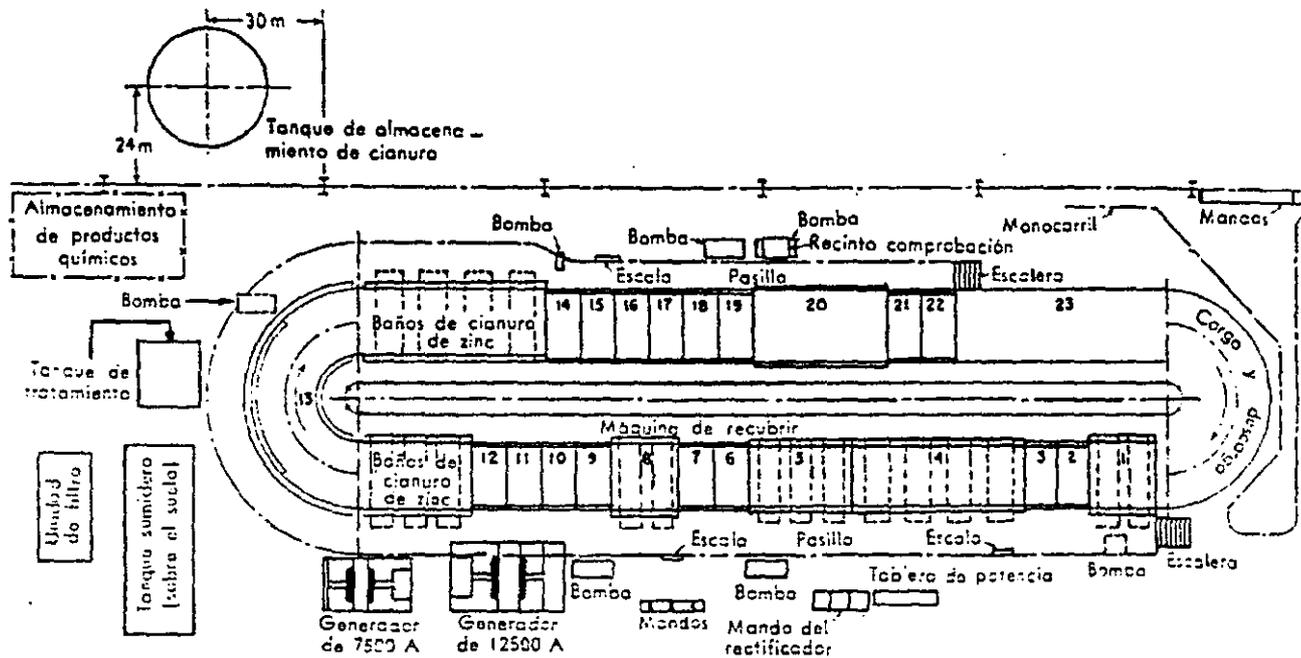
Las características del metal depositado en el cátodo pueden diferir mucho según sean las condiciones del electrolito, sobre todo en lo que atañe a los

iones existentes. Cuando se deposita plata de una solución de AgNO_3 , forma cristales grandes, fácilmente perceptibles. El estaño precipitado electrolíticamente de una solución de SnCl_2 formará agujas largas que crearán rápidamente un puente del ánodo al cátodo. Los depósitos de plomo de una solución de cloruro o de acetato, son muy diferentes de los producidos por un clorato o un perclorato. El níquel obtenido de un baño de sulfato puede dar depósitos duros que pueden pulirse aunque no fácilmente en tanto que de un naftalen sulfonato se obtienen depósitos brillantes que necesitan escaso o nulo pulido.¹⁰

En la figura 10 se muestra, como ejemplo, un equipo automático para recubrimiento electrolítico cuyas partes son:

1 y 8	desengrasador anódico
2, 6, 11, 16 y 19	lavado frío
3, 7, 9, 12, 17 y 21	lavado y rociado
4 y 5	ácido sulfúrico
10	ácido sulfúrico frío
14 y 15	recuperador
18	corona
20	anozinc
22	lavado caliente
23	secador de aire caliente (inyectado)

Figura 10. Equipo de máquina automática para recubrimiento electrolítico



Un recubrimiento metálico de alta calidad solo es posible cuando se trabaja con piezas o cátodos limpios, con soluciones de pureza controlada y se cuenta con sistemas de enjuague eficientes.^{3,5}

La industria de acabados metálicos es una industria de gran importancia ya que forma parte de otras grandes industrias (automovilística, electrónica, de herramientas, instrumentos, utensilios, etc.) así como de otras ramas industriales como la fotografía, offset, joyería, etc.

Con el avance de la tecnología se ha incrementado la demanda de maquinaria más grande y eficiente que, junto con la operación a mayores velocidades de producción y ambiente atmosférico corrosivo agravan los problemas de corrosión. Estos problemas de corrosión pueden reducirse o eliminarse por un tratamiento de recubrimiento superficial.^{3,5,11} Este recubrimiento superficial ofrece soluciones prácticas, con deposiciones de diversas características y propiedades para cada tipo de servicios.

El desarrollo de un proceso global de recubrimiento exige sistemas de lavado o enjuague para eliminar los residuos arrastrados en las piezas desde las soluciones previas a cada operación evitando la contaminación de éstas logrando así un trabajo de alta calidad y mayores rendimientos. La mayor parte del agua empleada es consumida por los sistemas de enjuague siendo una operación costosa y por lo que un sistema de tratamiento y reutilización del agua resulta ser una opción necesaria y benéfica tanto para el industrial como para el medio ambiente.^{3,5,10}

IV.1 Agua

El agua es uno de los recursos naturales más importantes. Estas aguas son soluciones diluidas que contienen muchos compuestos químicos, materia suspendida y partículas coloidales.

En la tabla 2 se presenta la composición del agua dulce común.

Fuente	En suspensión	Dispersión coloidal	Solución	
Litosfera	Arena	Arcilla	CO ₂ de carbonatos	
Minerales y Roca	Arcilla Suelos	Suelo	Na ⁺	Cl ⁻
			K ⁺	SO ₄ ²⁻
			Ca ²⁺	HCO ₃ ²⁻
			Mg ²⁺	NO ₃ ⁻
			Fe ²⁺	PO ₄ ³⁻
				F ⁻
Atmósfera	Polvos Macromoléculas	Polvos Macromoléculas	O ₂	H ₃ O ⁺
			N ₂	HCO ₃ ⁻
			CO ₂	
Biosfera	Algas, plantas Animales acuáticos y bacterias	Macropartículas orgánicas Virus	Moléculas orgánicas	
			CO ₂	O ₂ N ₂
			H ₂ S	CH ₄ NH ₄
			NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻

Tabla 2. Componentes de las aguas naturales

La presencia de estas impurezas se debe a procesos naturales debido al estrecho contacto del agua con los compuestos químicos de la litósfera, la atmósfera y la biosfera. Pero debido a la actividad humana la composición es modificada en forma negativa por la adición de otras impurezas.³

Se puede definir *contaminación* como la presencia de uno o más contaminantes o cualquier combinación de ellos que cause un desequilibrio ecológico. Un *contaminante* es toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas que al incorporarse a la atmósfera, al agua, al suelo, a la flora, a la fauna, etc., modifique su composición natural.

Los contaminantes químicos incluyen compuestos orgánicos e inorgánicos disueltos o dispersos. Los contaminantes inorgánicos provenientes del contacto con formaciones geológicas y de descargas industriales, contienen sustancias disueltas tales como sales metálicas solubles (cloruros, nitratos, sulfatos, fosfatos y carbonatos), gases tóxicos disueltos (dióxido de azufre, amoníaco, H₂S, cloro y desechos de ácidos y bases).

Los contaminantes orgánicos son compuestos que contienen carbono y provienen de desechos domésticos, agrícolas e industriales. Entre estos se encuentran, los desechos de seres humanos y animales, procesamiento de alimentos, compuestos químicos industriales y disolventes, aceites, breas, tinturas, etc.

La mayor parte del agua se emplea en riegos agrícolas, en procesos industriales y en abastecimientos públicos municipales de agua, por lo que el volumen vertido y el grado de contaminación de las mismas son factores que, unidos a las características del sistema de afluentes y ríos, determinan su calidad bioquímica y por lo tanto el uso al que pueden destinarse. Conforme aumentan las necesidades de agua, se reduce la calidad de ésta, es por eso que el sector industrial ha diseñado procesos mediante los cuales el agua puede reciclarse numerosas veces dentro de una misma planta antes de liberarla al medio ambiente.

Con frecuencia el sabor, el olor y el aspecto del agua indican la presencia de sustancias contaminantes. En otros casos la existencia de contaminantes peligrosos se revela sólo por medio de pruebas químicas precisas que requieren de los métodos cuantitativos de análisis gravimétrico, volumétrico o fisicoquímico. Es posible seleccionar adecuadamente un sistema de tratamiento de agua después de determinar el grado de pureza del agua residual, establecido los objetivos del proyecto específico, revisado las regulaciones estatales y federales y comparado las características del influente a tratar con las características del afluente requerido.^{3,10}

IV.2 Normatividad

Debido a que se conocen más a fondo las causas, problemas y efectos tóxicos y ambientales de la contaminación inorgánica en las aguas residuales se han modificado los límites de exposición permisibles de las descargas contaminantes.

En la tabla 3 se dan a conocer los límites máximos permisibles para contaminantes en las descargas de aguas residuales a los sistemas de alcantarillado urbano o municipal. La tabla es extraída de la Norma Oficial Mexicana **NOM-002-ECOL-1996**.

LÍMITES MÁXIMOS PERMISIBLES			
PARÁMETROS (mg/l, excepto cuando se especifique otra)	Promedio Mensual	Promedio Diario	Instantáneo
Grasas y Aceites	50	75	100
Sólidos Sedimentables (ml/l)	5	7.5	10
Arsénico total	0.5	0.75	1
Cadmio total	0.5	0.75	1
Cianuro total	1	1.5	2
Cobre total	10	15	20
Cromo hexavalente	0.5	0.75	1
Mercurio total	0.01	0.015	0.02
Níquel total	4	6	8
Plomo total	1	1.5	2
Zinc total	6	9	12

Tabla 3. Límites máximos permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales.

IV.3 Contaminación del agua en el proceso de electrodeposición.

En un proceso de electrodeposición, desde las operaciones preparatorias (limpieza y remoción de óxidos), hasta las actividades metálicas finales (pulido y raspadura o cepillado y pintura) utilizan agua, por lo que es evidente la magnitud de contaminantes, provenientes de esas descargas, es necesario entonces, contar con sistemas de tratamiento capaces de producir efluentes de menor impacto ambiental.³

La severidad del problema contaminante dependerá principalmente: de la fuente de desecho, del tipo de proceso empleado, del tamaño de la instalación y de la concentración relativa del afluente.

En términos generales, la contaminación del agua en procesos de electrodeposición proviene de¹⁰ :

- 1.- Limpieza, remoción de grasas, aceites, etc.
- 2.- Remoción de óxidos, costras, manchas, etc.
- 3.- Proceso electroquímico que establece el recubrimiento metálico.

IV.4 Aguas de lavado

Las especies químicas transportadas de un proceso a otro se acumulan en las soluciones subsecuentes en forma de impurezas, ocasionando de esta manera su contaminación. Por tal motivo, un proceso de recubrimiento metálico en particular requiere de grandes cantidades de agua para lavar o enjuagar las sobras de películas químicas acarreadas de los procesos previos.

Una película química transportada desde un proceso y que permanece en la superficie de la pieza de trabajo, puede reaccionar con la siguiente solución y precipitar en la superficie del metal deteriorando la calidad del proceso de deposición metálica.

La contaminación del agua se debe principalmente a estas descargas, aún a pesar de que su capacidad contaminante sea menor que las descargas de las soluciones peculiares del proceso de deposición y la de pérdidas accidentales.

Los afluentes de las aguas de enjuague de estas industrias contienen varios sólidos disueltos. Esto representa un problema para su tratamiento y se tendría un problema mayor en aquellos lugares donde todas las aguas de enjuague son mezcladas. Entonces, para realizar un tratamiento apropiado, es necesario segregar las corrientes del proceso de la planta en varios grupos químicos.^{3,10}

IV.5 Recuperación de metales en aguas de lavado.

Ya que el mecanismo fundamental de la electrodiálisis es el transporte de electrólitos a través de las membranas, este proceso ofrece la posibilidad de separar los compuestos ionizados de los no ionizados o débilmente ionizados desde una solución.

El uso de la electrodiálisis, para la eliminación de contaminantes de agua y agua residual, está restringido a los iones pequeños como sodio, calcio, cloruro, sulfato, etc. Si existen iones orgánicos presentes en solución la conductividad eléctrica y la permeabilidad selectiva de la membrana disminuye.

Las sustancias que pueden ser eliminadas del agua por electrodiálisis tienen un tamaño de partícula en el intervalo de 0.0004 a 0.1 μm . En particular, para los metales en aguas de lavado, el posible rango se encuentra entre 0.0004 y

0.03 μm . A continuación se muestra una lista de los metales que pueden eliminarse por electrodiálisis¹.

Sodio	Níquel	Magnesio	Hierro
Potasio	Cromo	Zinc	Aluminio
Calcio	Cobre	Arsénico	Plata

La electrodiálisis tiene gran aplicación en el control de la contaminación y recuperación de material en la electrodeposición.

Las aguas de lavado de este proceso provocan algunos problemas de contaminación al contar con metales disueltos. Las corrientes de agua tratadas por electrodiálisis fluyen a través de los compartimentos de una batería de electrodiálisis donde los iones metálicos son transferidos a la corriente concentrada, la corriente de agua de lavado tratada es reutilizada en el proceso, usualmente en la corriente de donde fue obtenida.

La corriente concentrada de iones metálicos puede ser recirculada al baño electrolítico para ser nuevamente utilizada y aprovechada al máximo^{3,7}. En la figura 11, se muestra, como ejemplo, un proceso de electrodiálisis para un sistema de electrodeposición de níquel.⁷

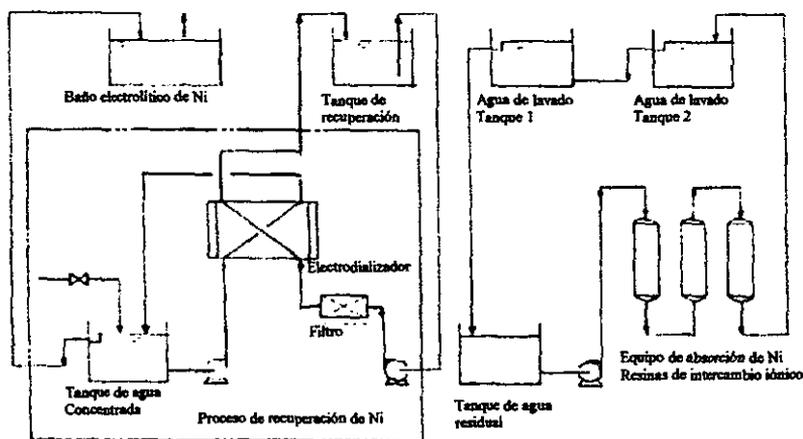


Figura 11. Diagrama de flujo de tratamiento de efluentes de electrodeposición de níquel.

La solución concentrada de níquel que se obtiene del electrodiálizador es llevada a un tanque donde se almacena esta solución para posteriormente ser reincorporada al baño electrolítico de níquel con lo cual el aprovechamiento del metal en la electrodeposición es mayor.

Como resultado de investigaciones y el desarrollo de trabajos llevados a cabo en el pasado medio siglo, la tecnología de electrodiálisis fue comercializada en el campo industrial y es utilizada todavía para concentrar agua marina en la fabricación de sal, en la desalinización de aguas salobres, recuperación y reuso de aguas residuales¹²(Itoi, Shigeru. 1979).

En 1971, Robert Lacey utilizó procesos de electromembrana para regenerar ácidos de una solución gastada de encurtido. Observó que los iones Fe de una solución gastada de encurtido pueden ser removidos y reemplazados por iones H^+ para regenerar H_2SO_4 , en celdas de electromembranas. Este método implica la formación de hidróxidos de hierro insolubles¹³ (Lacey, Robert. 1971).

En 1978 la electrodiálisis es usada para regenerar baños electrolíticos de cobre, reciclaje de aguas de lavado y recuperación de ácido sulfúrico de soluciones de encurtido¹⁴(Korngold, E. 1978).

En 1992 se presentó el resultado de la utilización de la electrodiálisis inversa en la estación Tutuka Power. Fueron evaluadas la experiencia en el diseño y operación ganadas en los últimos 7 años de la electrodiálisis inversa. Fueron investigados factores tales como el diseño de la planta, cantidad de agua recuperada, eficiencia actual y saturación de $CaSO_4$. Se probó que la vida de la membrana estaba garantizada en exceso¹⁵ (Raubenheimer, A.E. 1992).

La separación por electrodiálisis de los cationes Ca^{2+} y Na^+ fue estudiada en una membrana de intercambio catiónico del tipo MK-40 y en una membrana de ósmosis inversa del tipo MGP. Se demostró que el uso de una corriente pulsada ofrece posibilidades para controlar la selectividad de transporte iónico¹⁶ (Kropotov, V.N. 1995)

En 1997 se discutió el efecto de la composición de la solución en los parámetros de diseño de la electrodiálisis, en la eficiencia y en la resistencia aparente de la pila para mezclas de ácidos, sales monovalentes y metales divalentes. La eficiencia observada depende de la valencia del ión y es independiente de la naturaleza de la especie iónica, para el sistema de

membranas investigado. Bajo muchas condiciones, una simple regla lineal falla para predecir esos parámetros de diseño, particularmente para sistemas a bajo pH¹⁷ (Rockstraw, David. 1997).

V CONCLUSIONES

Los procesos de recubrimiento metálico por electrodeposición utilizan sistemas de lavado y enjuague que producen efluentes con iones metálicos diluidos en concentraciones que sobrepasan los límites máximos permisibles.

Antes de ser descargados estos efluentes al medio ambiente se debe implantar un sistema de tratamiento de los mismos con el fin de disminuir la concentración de metales.

Las principales razones para implantar este sistema son económicas (por el valor del metal o de las soluciones metálicas) y legales (para lograr el cumplimiento de la legislación ambiental).

Para determinar el tipo de proceso de separación por medio de membranas de intercambio iónico, se debe tener en cuenta el tamaño del material que se va a eliminar. El tamaño del ión, tanto para aniones como para cationes, con el cual la electrodiálisis es eficiente debe encontrarse entre 0.0004 y 0.1 μm .

Los contaminantes típicos que pueden eliminarse por electrodiálisis son: sodio, potasio, calcio, magnesio, amonio, arsénico, níquel, cromo, cobre, zinc, estroncio, hierro, aluminio, plata, cloruro, sulfato, nitrato, fosfato, cianuro, fluoruro, cromato, acetato y oxhidrilo.

Las especies iónicas de gran tamaño reducen la eficiencia del proceso ya que disminuyen la conductividad eléctrica y permeabilidad selectiva de la membrana de intercambio iónico.

Desde el punto de vista ambiental, la electrodiálisis es muy importante ya que reduce la cantidad de contaminantes que se encuentran en las aguas de lavado del proceso de electrodeposición, antes de que éstas sean descargadas a la red urbana, cumpliendo así con los requerimientos legales en cuanto a concentraciones máximas permisibles.

Desde el punto de vista económico, la recuperación de los metales que se encuentran en las aguas de lavado provenientes del proceso de electrodeposición así como la recuperación de las mismas aguas permite que sean recirculados tanto al baño electrolítico como a las aguas de lavado originales con lo cual se utiliza menor cantidad de agua y menor cantidad de soluciones metálicas lo que repercute en un ahorro económico sustancial.

Para la recuperación de metales, la electrodiálisis está en competencia directa con la ósmosis inversa, pero la electrodiálisis debe ser considerada para la eliminación de los constituyentes iónicos cuando se requieren grandes niveles de concentración por encima de los que normalmente son prácticos con la ósmosis inversa.

De los tres tipos de electrodiálisis existentes (estándar, inversa y bipolar), la electrodiálisis inversa presenta aspectos que repercuten en la economía al disminuir los costos por mantenimiento. La limpieza automática de las incrustaciones evita la utilización de secuestrantes y/o ácidos y la reducción del tiempo de mantenimiento. Por lo tanto es una opción interesante para la recuperación de metales y aguas de lavado resultantes en el proceso de electrodeposición (sodio, potasio, calcio, níquel, cromo, cobre, magnesio, zinc, arsénico, aluminio, hierro, plata).

BIBLIOGRAFIA

- 1.- García, B.A. Editor. Tratamiento del agua por procesos de membrana. McGraw-Hill. España. 1998. ISBN 84-481-1206-7.
- 2.- Schweitzer, P.A. Handbook of separation. Techniques for Chemical Engineers. McGraw-Hill. USA. 1979. ISBN 0-07-055790-X.
- 3.- Astorga Grajeda, C.S. Propuesta del proceso de intercambio iónico como sistema de tratamiento de agua para la eliminación de níquel en desechos residuales de una industria de acabados metálicos. TESIS, Facultad de Química. UNAM. México. 1996.
- 4.- Oyarzabal, V.F. Lecciones de física. Ed. CECSA. México. 1972.
- 5.- Montgomery, J.M. Water Treatment. Principles and Design. Wiley Interscience. USA. 1985. ISBN 0-471-04384-2.
- 6.- Rousseau, R.W. Handbook of separation process technology. Wiley Interscience. USA. 1987. ISBN 0-471-89558-X.
- 7.- Genders, J.D. Electrochemistry for a cleaner environment. The electrosynthesis company. USA. 1992. ISBN 0-9629708-1-6.
- 8.- Perry, R.H., Green, D.W. Perry's Chemical Engineer's Handbook. McGraw-Hill. USA. 1984. 17-37. ISBN 0-07-049479-7.
- 9.- Gerhartz, W. Ullmanns' Encyclopedia of Industrial Chemistry. Ed. Advisory Board. USA. 1993. ISBN 0-89573-159-2. Vol. A9
- 10.- Mantell, C.L. Ingeniería Electroquímica. Versión española por Dr. Julián Fernández. Ed. Reverté. España. 1980. ISBN 84-291-7940-2.
- 11.- Hammer, P. Industrial Water Treatment Practice. Ed. Butterworths. Gran Bretaña. 1961.
- 12.- Itoi, S. Progress of electrodyalisis in the past half century. Chemical Abstracts. 127 (1997), 762.

13.- Lacey, R.E. Electromembrane process for regenerating acid from spent pickle liquor. Chemical Abstracts. **76** (1972), 167.

14.- Korngold, E. Strathmann, H. Electrolysis in advanced waste water treatment. Chemical Abstracts. **88** (1978), 308.

15.- Raubenheimer, A.E. Electrolysis reversal at Tutuka Power Station RSA- seven years' design and operating experience. Chemical Abstracts. **118** (1993), 429.

16.- Kropotov, V.N. Electrolysis separation of Na^+ and Ca^{2+} in a pulsed current mode. Chemical Abstracts. **123** (1995), 726.

17.- Rockstraw, D. Use of electrolysis to remove acid, salt and heavy metal mixtures from aqueous solutions. Chemical Abstracts. **127** (1997), 785.