

SOLUCIONES ELECTROQUÍMICAS PARA LA MEJORA DEL MEDIO AMBIENTE

Antonio Aldaz Riera
Departamento de Química-Física
Universidad de Alicante



Introducción

En los últimos años la preocupación social sobre la protección del Medio Ambiente ha crecido de forma extraordinaria y, debido a esta presión social, la legislación está endureciendo cada día más las restricciones sobre vertidos sean estos sólidos, líquidos o gaseosos. Esta presión debe continuar, e incluso acentuarse aún más, en los próximos años por lo que la Industria debe intentar crear tecnologías y procesos capaces de trabajar en régimen de vertido nulo o no contaminante. Así, es necesario desarrollar nuevos procedimientos químicos más limpios que los actuales y nuevas tecnologías capaces de proteger el Medio Ambiente. Que duda cabe que la mejora o sustitución de los procesos actuales por otros con mayor selectividad, aprovechamiento energético y de materias primas, es también una forma, y no poco eficiente, de proteger nuestro entorno.

A este respecto, la Electroquímica, figura 1, ofrece la posibilidad de desarrollar tecnologías, procesos y sistemas capaces de contribuir de forma muy apreciable a la protección de nuestro Medio Ambiente. Sin intentar un tratamiento exhaustivo de estas posibilidades, parece conveniente señalar algunas de ellas:

Desarrollo de nuevos procesos de Síntesis Química

La electrolisis es aún muy poco usada industrialmente en la síntesis de compuestos orgánicos e inorgánicos a pesar de ser un método que permite trabajar con gran selectividad, ahorro energético y eliminación de reactivos tóxicos o peligrosos. Así, hoy en día la sustitución del polvo de zinc como reactivo para la ruptura del enlace S-S, ver por ejemplo la reducción de cistina a cisteína, es un proceso implantado industrialmente que ha eliminado el uso del zinc y que trabaja en condiciones mucho más suaves y menos peligrosas que el reductor químico.

Generación y Regeneración “in situ” de reactivos químicos

Reactivos peligrosos tales como cloro, hipoclorito, ozono, peróxido de hidrógeno etc., pueden ser obtenidos “in situ” en las cantidades necesarias evitando su almacenamiento y transporte, procesos potencialmente peligrosos. Además muchos de estos reactivos pueden ser regenerados de las aguas madres de los procesos químicos. Así por ejemplo, el empleo de hipoclorito como agente oxidante en gran cantidad puede producir una excesiva salinización de las

aguas residuales y hacerlas inadecuadas para su vertido. Es posible regenerar el hipoclorito por oxidación directa de estas aguas. El empleo de dicromato como agente oxidante produce efluentes con Cr(VI) y Cr(III) siendo el primero un conocido agente cancerígeno. Otra vez la Electroquímica proporciona soluciones industriales a este problema regenerando el Cr(VI) o eliminando ambos iones de los vertidos.

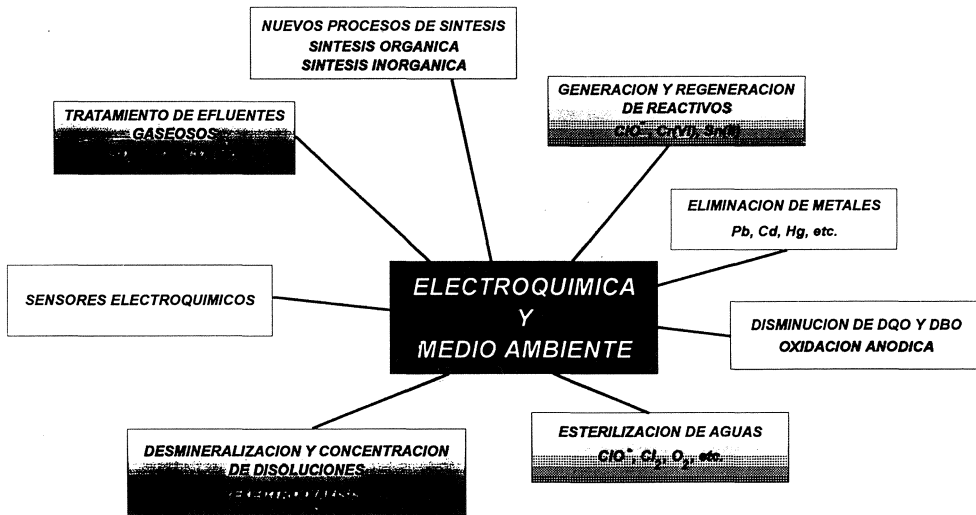


Figura 1

Tratamiento de efluentes gaseosos

Existen diversos procesos electroquímicos capaces de eliminar contaminantes tales como anhídrido sulfuroso, óxidos de nitrógeno de vertidos gaseosos, centrales térmicas, quema de piritas etc.

Eliminación de iones metálicos

Es posible eliminar los iones de metales pesados de los vertidos, especialmente de los provenientes de la industria de galvanotegia y galvanoplastia.

Disminución de la DQO y DBO de las aguas residuales

Puede disminuirse de forma apreciable la demanda química y biológica de oxígeno de los vertidos industriales eliminando la materia orgánica por oxidación anódica directa o indirecta por medio de la generación de reactivos de alto poder oxidante tales como hipoclorito y Ag(II) .

Esterilización de aguas residuales

La generación in situ de agentes bactericidas tales como hipoclorito y ozono es una realidad industrial empleada en , por ejemplo, el tratamiento de las aguas de los circuitos de refrigeración de las centrales térmicas.

Desalinización y concentración de disoluciones

La Electrodiálisis es capaz de extraer y separar sales de disoluciones proporcionando así, la posibilidad de generar disoluciones diluídas y concentradas que pueden ser reinyectadas al proceso o evacuadas como aguas residuales de baja salinidad. En contra de lo que normalmente se cree, la Electrodiálisis no solo es una técnica empleada para la obtención de agua dulce a partir de agua del mar o de aguas salobres, sino que es un posibilidad que permite todo tipo de eliminación de sales e incluso la regeneración de ácidos y bases a partir de sus sales y la neutralización, acidificación o basificación sin necesidad de adición de reactivos químicos.

Desarrollo de sensores electroquímicos

Los sensores electroquímicos están particularmente aconsejados para el control "on line" y análisis de los vertidos industriales y urbanos. Existen sensores para un amplio abanico de sustancias tales como oxígeno, monóxido y dióxido de carbono , amoníaco, dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, cationes, aniones y compuestos orgánicos.

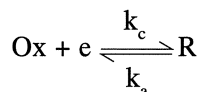
Toda esta tecnología esta basada sobre diferentes aspectos básicos y aplicados de la Electroquímica y su aplicación fructífera se basa en una adecuada combinación de:

- Conocimientos básicos sobre Electroquímica Electrónica e Ingeniería Electroquímica.

- Identificación de la oportunidad de empleo de la Tecnología Electroquímica.
- Selección de una solución electroquímica adecuada.
- Desarrollo de un proceso económicamente competitivo.

Nociones sobre Electrónica

La reacción central del proceso electródico es la transferencia electrónica desde el electrodo hacia la disolución (proceso catódico) o desde la disolución hacia el electrodo (proceso anódico) de acuerdo con el esquema:



Las concentraciones de las especies Ox y R que controlan la cinética del proceso de transferencia, son las existentes en la superficie del electrodo, entendiéndose por tal para un proceso homogéneo, la zona delimitada por el plano exterior de Helmholtz (plano que pasa por el centro de los iones colocados a la mínima distancia de la superficie electródica y que conservan intacta su esfera de coordinación).

La velocidad de reacción expresada como densidad de corriente, está dada por la expresión:

$$j_a = F \cdot k_a C_R^{\text{sup}} \cdot \exp(1-\beta)fE$$

para el proceso anódico y

$$j_c = -F \cdot k_c C_{\text{Ox}}^{\text{sup}} \cdot \exp(-\beta fE)$$

para el proceso catódico y siendo j = densidad de corriente (a anódica, c catódica), k_a y k_c ctes de velocidad, β coeficiente de transferencia, aproximadamente 0,5 para un gran número de reacciones y F cte de Faraday.

Las ctes k_a y k_c están relacionadas con la cte de velocidad tipo, k^0 , por las expresiones:

$$k_a = k^0 \exp(1-\beta) f (E-E^0) \quad \text{y} \quad k_c = k^0 \exp - \beta f (E-E^0)$$

siendo k^0 la cte. de velocidad en el potencial tipo y E^0 el potencial tipo.

La velocidad total del proceso será:

$$j = j_a - j_c = F(k_a C_R^{\text{sup}} \cdot \exp(1-\beta)fE - k_c C_{\text{Ox}}^{\text{sup}} \cdot \exp - \beta fE)$$

que puede expresarse también como:

$$j = Fk^o \left(\left(\frac{C_R^{sup}}{C_R^{seno}} \right) \exp(1-\beta)(E-E_o) - \left(\frac{C_{Ox}^{sup}}{C_{Ox}^{seno}} \right) \exp-\beta f(E-E_o) \right)$$

y que es conocida como ecuación de Butler-Volmer.

Si el transporte de materia hacia o desde el electrodo no es suficientemente rápido C será diferente de C y si este transporte está regido por las leyes de la difusión plana estacionaria, se cumplirá :

$$j = Fk^o \left(\left(1 - j/j_L^R \right) \exp(1-\beta)(E-E_o) - \left(1 - j/j_L^{Ox} \right) \exp - \beta f(E-E_o) \right)$$

siendo j_L la corriente límite del proceso de difusión que está proporcionada por la expresión:

$$j_L = Fk_{dif} C^{seno}$$

y en la que k_{dif} está dada por D/δ siendo D el coeficiente de difusión de la especie y δ el espesor de la zona de difusión que varía de acuerdo con el régimen hidrodinámico.

Otras formas de las ecuaciones anteriores son:

$$j = j_o \left(\exp(1-\beta)f\eta - \exp-\beta f\eta \right)$$

para el proceso regido por transferencia de carga con velocidad infinita del transporte de materia (η sobrevoltaje activación);

$$\eta_{dif} = RT/F \ln \left(\left(1 - j/j_L^{Ox} \right) \left(1 - j/j_L^R \right)^{-1} \right)$$

para el proceso regido por difusión (proceso reversible) y transferencia infinitamente rápida, y

$$j = j_o \left(\left(1 - j/j_L^R \right) \exp(1-\beta)f\eta - \left(1 - j/j_L^R \right) \exp-\beta f\eta \right)$$

para el proceso con control mixto difusión-activación.

La expresión anterior indica claramente que en un proceso a densidad de corriente constante, en el que la corriente aplicada corresponda al valor de la corriente límite de difusión, E debe alcanzar un valor ∞ (proceso anódico) o $-\infty$ (proceso catódico). De igual forma, la máxima densidad de corriente que un proceso puede alcanzar corresponde a su j_L y para ello es necesario un potencial infinito (proceso anódico) o -infinito (proceso catódico).

Diferencias de potencial en una célula electrolítica.

Durante una electrolisis el ánodo, electrodo en el que se realiza una reacción de oxidación, está conectado al polo positivo de la fuente de corriente o

potencial y el cátodo, electrodo en el que se realiza una reducción, está conectado al polo negativo de la fuente. De acuerdo con ello, el potencial necesario para realizar la electrolisis será:

$$V = E_a^i - E_c^i + I.R$$

en donde E^i es el valor del potencial de cada electrodo al paso de una corriente I y R es la resistencia de la célula que engloba a la resistencia de los electrodos, del electrolito y del posible separador. Introduciendo el concepto de sobrevoltaje ($\eta = E^i - E_{eq}$), la ecuación anterior queda como:

$$V = E_a^{eq} + \eta_a - (E_c^{eq} + \eta_c) + I.R$$

$$V = E_a^{eq} - E_c^{eq} + \eta_a - \eta_c + I.R$$

en donde E^{eq} simboliza el potencial de equilibrio de las reacciones anódica y catódica y η el sobrevoltaje global del proceso (que normalmente ser como mínimo la suma de los sobrepotenciales de activación y difusión).

Puesto que $\eta_a > 0$ y $\eta_c < 0$, V será siempre mayor que la diferencia entre los potenciales de equilibrio.

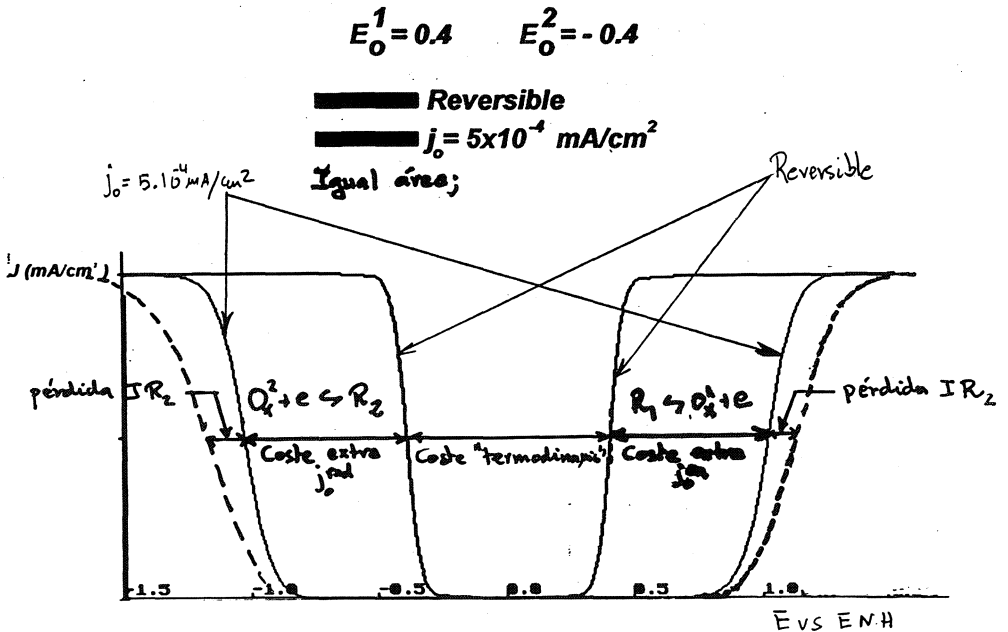


Figura 2. Curvas J-E y diferencias de potencial en electrolisis

$$A I = 0 \quad V_{r=0} = E_a^0 - E_c^0$$

A $I \neq 0$

$$V_{r=0} = E_a - E_c = (E_a^0 + \eta_a) - (E_c^0 + \eta_c) + I.R$$

PUESTO QUE $R > 0$, $\eta_a > 0$, $\eta_c < 0$.

$$V_{I \neq 0} > V_{I=0}$$

SI SOLO EXISTE η DE TRANSFERENCIA Y TAFEL ES APLICABLE:

* LOS VALORES DE η_a Y η_c SOLO DEPENDEN DE LOS VALORES DE j_0 Y α DE LOS PROCESOS ANODICO Y CATODICO.

$$V_{r=0} = E_a^0 + \frac{F}{\alpha_a RT} \ln \frac{j}{j_0} - E_c^0 + \frac{F}{\alpha_c RT} \ln \frac{j}{j_0} + I.R$$

* $V_{I \neq 0}$ DISMINUYE SI j_0 AUMENTA Y, POR TANTO, DISMINUYE EL COSTE ENERGETICO.

* $V_{I \neq 0}$ DEPENDE TAMBIEN DE LOS VALORES PARTICULARES DE LA PENDIENTE DE TAFEL DE LOS PROCESOS ANODICO Y CATODICO.

OTRAS VENTAJAS ENERGETICAS INDIRECTAS

EL CAMBIO DE UN ELECTRODO PUEDE HACER DISMINUIR R MODIFICANDO:

LA DISTANCIA INTERELECTRODICA
EL EFECTO BURBUJA

Figura 3. Electrocatálisis y voltaje de electrolisis

Consumo energético

El coste eléctrico del proceso de electrolisis es parte fundamental de los costes del proceso de descontaminación. El consumo energético expresado en kWh.kg⁻¹ del material recuperado o eliminado puede calcularse a partir de la expresión:

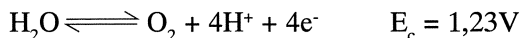
$$\text{Consumo energético (kWh/kg)} = n.F.V_{\text{cel}} / 36.\phi.M$$

en donde n es el número de electrones intercambiados en el proceso por mol de producto eliminado u obtenido, V_{cel} el voltaje de la célula (en V), ϕ el

rendimiento en corriente en % (porcentaje de la corriente total que se emplea en la recuperación o eliminación de una determinada sustancia) y M el peso molecular (en gramos) del compuesto eliminado u obtenido.

Como habíamos visto, el voltaje de la célula depende de la diferencia entre los potenciales de equilibrio de los procesos anódico y catódico, del valor de los sobrevoltajes y de la caída IR de la célula.

La diferencia entre los potenciales de equilibrio es característica de las reacciones que ocurren en los electrodos por lo que deberán ser elegidas adecuadamente. Así por ejemplo, para la eliminación de un ión metálico por reducción sería aconsejable emplear un ánodo de difusión para la oxidación del ión hidrógeno ($E = 0 \text{ V}$) ya que este proporcionaría un potencial inferior al de la descomposición del agua que sería la reacción anódica más común:



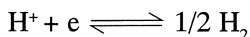
Dado que el voltaje de la célula también depende de los sobrevoltajes y de la caída óhmica I.R, será conveniente buscar condiciones para las que los valores de k° y j_L sean elevados posible y el valor de R el menor posible. Los valores de k° dependerán de la electrocatálisis de la reacción electródica, los de j_L del régimen de transporte de materia (agitación, presencia de promotores de turbulencia etc.) y de la concentración de especie electroactiva y los de R de la conductividad del electrolito y del diseño de la célula, preferentemente de la distancia electrodo-electrodo.

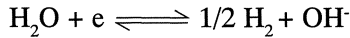
Tipos de electrodos

Las propiedades que normalmente debieran reunir los materiales electródicos son:

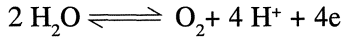
- Estabilidad química y mecánica.
- Propiedades electrocatalíticas y conductividad adecuadas.
- Bajo coste y/o larga vida.

Puesto que el empleo de la Electrolisis para el tratamiento de vertidos puede hacer uso de un proceso de reducción o de oxidación y el disolvente normalmente empleado es el agua, es necesario emplear como c todos y ánodos materiales con alto sobrevoltaje de hidrógeno y de oxígeno, respectivamente, para evitar las reacciones competitivas:





para el proceso de reducción, por ejemplo recuperación de un ión metálico bajo la forma del metal base, y



para el proceso de oxidación, por ejemplo eliminación de fenol y derivados fenólicos por oxidación anódica.

Para algunas reacciones de eliminación de materia orgánica que se llevan a cabo por la acción de oxidantes indirectos, tales como Cl_2 , hipoclorito, etc., es conveniente el empleo de ánodos DSA (Dimensionally Stable Anodes) del tipo Ti-RuO_2 que favorecen la formación de cloro en disoluciones de cloruros en lugar de formar oxígeno.

Estos condicionamientos hacen que los materiales catódicos para la eliminación de metales electronegativos, se restrinjan a carbón o grafito, plomo, zinc, aluminio y algún otro material con j_0 de hidrógeno muy baja. Como materiales anódicos para la eliminación de materia orgánica por oxidación directa se puede emplear Ti-PbO_2 , electrodo con un elevado sobrevoltaje de oxígeno. Últimamente se están desarrollando electrodos de Ti-SnO_2 , dopados con diferentes metales, que poseen un sobrevoltaje de oxígeno aún más elevado que el del PbO_2 .

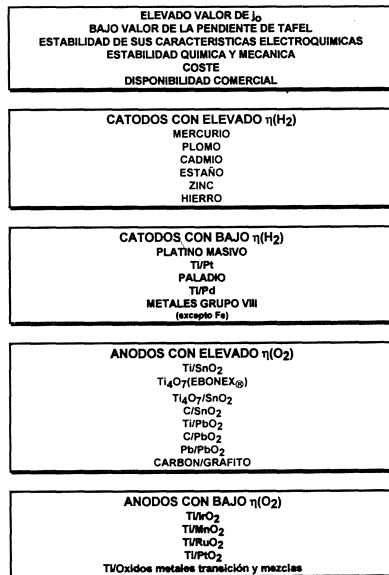


Figura 4. Condiciones industriales de un buen electrocatalizador

Diferentes estructuras físicas de electrodos

Dado que la concentración del agente contaminante puede variar en un rango muy amplio, la forma física de los electrodos varía según la concentración de las disoluciones. Así, para disoluciones diluídas se emplean electrodos de tres dimensiones, fieltros, esponjas etc., que poseen una gran área real en relación con su área geométrica, lo que hace que la densidad de corriente a la que trabaja el proceso de oxidación o reducción sea muy pequeña. Se consigue así una gran eficiencia en, por ejemplo, el tratamiento de disoluciones metálicas del orden de 100 ppm o menores. Cuando las concentraciones a tratar son mayores, se suelen emplear electrodos de dos dimensiones, más cómodos de manejar, (no presentan problemas de colmatación, por ejemplo) y con una mejor distribución de potencial.

Tipos de células

El cuadro siguiente esquematiza los diferentes tipos de células.

En función de la existencia o no de separador:

dividida
no dividida

En virtud de su forma filtro-prensa:

paralepipédica- cuba
cilíndrica
geometría variable (ejemplo Swiss roll cell)

Según el tipo de electrodo:

ESTÁTICO:

- dos dimensiones:

Placas
Cilindros
Placa expandida

- tres dimensiones:

• Poroso:

Placas perforadas
Mallas
Tejidos
Fieltros
Espumas

• Lecho compacto:

Gránulos
Microesferas
Fibras
Barras cilíndricas
Anillos Raschig

MOVIL (normalmente 3D):

- Rotatorio (2D)
- Lecho fluidizado (3D):
 - Microesferas
 - Esferoides
- Lecho móvil (3D):
 - Lecho inclinado
 - Lecho vibrante
 - Lecho pulsante

Según el tipo de conexión eléctrica:

monopolar
bipolar

Algunos ejemplos de tratamientos de vertidos

Eliminación de materia orgánica

A diferencia de otros procesos como recuperación de metales, electrodiálisis etc., la destrucción de materia orgánica por métodos electroquímicos se encuentra aún en fase de laboratorio o de desarrollo en pequeñas plantas piloto. Estos métodos de tratamiento pueden ser medioambientalmente más aceptables que la incineración.

De forma general los métodos pueden ser:

- Oxidación directa
- Oxidación indirecta
- Reducción

siendo los parámetros empleados para medir la coontaminación orgánica:

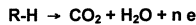
- COT (TOC).- Carbono orgánico Total, unidad mg C/l (ppm)
- DOQ (COD).- Demanda Química de Oxígeno, unidad mg O/l (ppm)
- DBO_x (BOD).- Demanda Biológica de Oxígeno en x días, unidad mg/l (ppm)

Los dos primeros parámetros determinan la cantidad total de compuesto orgánico. La relación $DBO_{x=5}/DQO$ indica la fracción de material orgánico biológicamente degradable y la diferencia $DQO-DBO$ la cantidad de materia orgánica no degradable biológicamente (compuesto refractario).

Oxidación directa

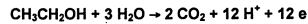
El proceso de eliminación se basa en la oxidación directa del compuesto orgánico en electrodos de alto sobrevoltaje de oxígeno para evitar la pérdida de eficiencia por la descomposición del agua, fig.5. La oxidación puede conducir a la mineralización total, $COT = 0$, del vertido con formación de CO_2 , N_2 , etc. o a una disminución de los índices de contaminación. Los ánodos empleados suelen ser $Ti-PbO_2$ (comercial) y $Ti-SnO_2$ (en período de comercialización). Este último ánodo posee un sobrevoltaje de oxígeno superior al primero y es capaz de eliminar ácidos alifáticos. Este método ha sido aplicado al tratamiento de aguas residuales de destilerías, de aguas procedentes de la industria del tinte y de aguas residuales de industrias de Química Fina.

OXIDACION DIRECTA

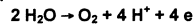


Ejemplo: *destrucción de etanol*

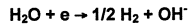
Anodo:



Competitiva:



Cátodo:



ANODOS DE ELEVADO $\eta(O_2)$:

- * Ti/PbO_2
- * Ti/SnO_2 (dopado)
- * Ebonex®/ PbO_2
- * Ebonex®/ SnO_2 (dopado)

CATODOS:

- * ACERO INOX.

Figura 5. Tratamiento de aguas residuales. Destrucción de materia orgánica

Oxidación indirecta

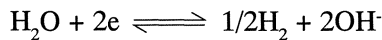
La oxidación indirecta se basa en la generación de un compuesto con alto poder de oxidación, Fe^{3+} , Ag^{2+} , Cl_2 , ClO^- , O_3 y H_2O_2 , de los que la generación

de ozono e hipoclorito son los más empleados. Existen procesos electroquímicos industriales para la generación de ozono tales como el empleo de células SPE (solid polymer electrode) . El ozono es obtenido, mezclado con oxígeno partir de la electrolisis del agua, en concentración del 20%(en peso), a una densidad de corriente de 2A/cm² y a un coste de 60kWh/kg.

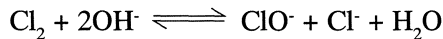
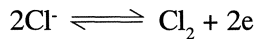
La generación de hipoclorito “in situ” en aguas residuales conteniendo elevadas concentraciones de cloruro es también un método empleado para la destrucción de material orgánico (la posible formación de derivados clorados debe ser tenida en cuenta), cianuros y esterilización de aguas residuales. La presencia de cianuros suele ser normal en los baños de galvanizado y su destrucción se puede llevar a cabo fácilmente por oxidación indirecta del cloruro existente o añadido.

Las reacciones son:

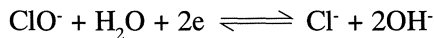
Catodo (-)



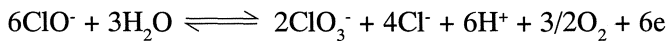
Anodo (+)



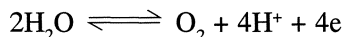
El rendimiento de esta reacción puede disminuir por varias razones lo que incrementa el coste energético. Así, puede existir reducción del hipoclorito en el c todo para regimenes turbulentos de flujo:



aumentando la importancia de esta reacción al aumentar la concentración de hipoclorito. Igualmente para elevadas concentraciones de hipoclorito puede suceder la reacción de oxidación:



Si el contenido de Cl⁻ es bajo, la velocidad de oxidación del ión cloruro es baja, lo que, para ciertos valores de densidad de corriente, puede provocar la descomposición del agua con desprendimiento de oxígeno:



Este tipo de tratamiento, generación “in situ” de bajas concentraciones de hipoclorito, se realiza normalmente con la aguas de refrigeración de centrales térmicas, especialmente si estas provienen del mar puesto que evita la colmata-

ción de las tuberías de refrigeración por crecimiento de organismos marinos (lamelibranquios, algas etc.). Los electrodos empleados suelen ser acero inoxidable como cátodo y DSA como ánodo. Si se emplea agua de mar, la velocidad de flujo del electrolito debe ser muy elevada para evitar la formación de carbonatos básicos de calcio y magnesio que originan una capa no conductora sobre el cátodo que hace aumentar el potencial de electrólisis.

El coste energético varía entre 3,5 a 7 Kwh/kg dependiendo de la concentración de hipoclorito.

Los reactores electroquímicos pueden ser de forma y rendimientos energéticos muy variables dependiendo del empleo que se le vaya a dar al hipoclorito y del origen de las aguas salinas (Fig. 6).

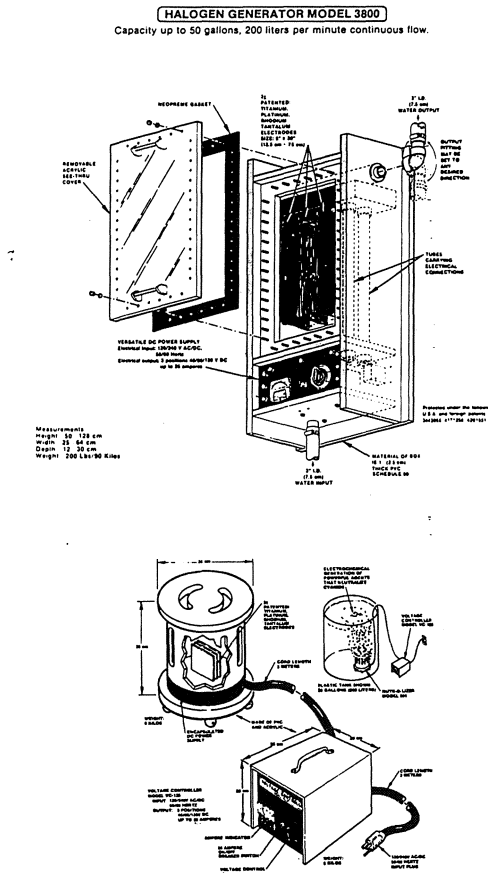
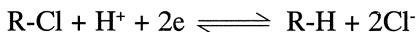


Figura 6

Reducción electroquímica

Numerosos compuestos orgánicos totalmente clorados son sustancias difícilmente oxidables o biodegradables. La reducción de, al menos, un enlace C-Cl puede facilitar el ataque biológico y/o la oxidación electroquímica posterior. El esquema del proceso es:



Los potenciales para la reducción de compuestos halogenados varían entre -1 y -3 V vs ECS por lo que es necesario el empleo de c todos de elevado sobrevoltaje tales como plomo, carbón o grafito. Puesto que estos compuestos suelen estar en bajas concentraciones, se suelen emplear cátodos 3D de elevado sobrevoltaje de hidrógeno (por ejemplo, fieltro de carbón dopado con plomo). Este proceso previo de reducción puede ser empleado en la destrucción por oxidación del Cl_4C . Así, este derivado tetraclorado es muy resistente a la oxidación, lo que no sucede con el triclorado. Una reducción previa del Cl_4C a Cl_3CH facilita el proceso de eliminación.

Recuperación de iones metálicos

La recuperación de iones metálicos es una tecnología ampliamente aplicada en el tratamiento de vertidos de la industria de galvanizado. Puesto que la concentración de ión metálico influye decisivamente en el tipo de célula y naturaleza de electrodos, dividiremos a los vertidos en dos grupos:

- a) Vertidos con concentraciones de ión metálico entre 1 y 3 g/l
- b) Vertidos con concentraciones inferiores a 100 ppm.

En el primer caso se emplean electrodos de dos dimensiones y con ellos se pueden alcanzar fácilmente concentraciones de vertido de 0,1 a 0,5 g/l. Para el segundo se utilizan electrodos 3D, especialmente si se desea obtener vertidos con concentraciones inferiores a 1 ppm. Obviamente es posible utilizar una adecuada combinación de electrodos.

La naturaleza del material catódico depende fundamentalmente del tipo de ión metálico. Los metales nobles son fácilmente depositados sobre sustratos con bajo sobrevoltaje de hidrógeno mientras que solo pueden depositarse metales muy electronegativos empleando cátodos de elevado sobrevoltaje de hidrógeno.

La fig.7 muestra la influencia de la mayor o menor nobleza del metal a depositar frente al proceso competitivo de formación de hidrógeno. Dado que en los casos expuestos en la figura se aplica una densidad de corriente superior

a la límite, se obtiene siempre un rendimiento en corriente inferior a la unidad aunque claramente se observa que el depósito del metal más noble transcurre con un rendimiento en corriente superior.

Los metales pueden ser obtenidos en diferente forma física y pueden, o no, ser disueltos anódicamente para regenerar las disoluciones iniciales de los baños de depósito.

Sin embargo existen diversas limitaciones a este proceso tan atractivo y que deben ser tenidas en cuenta:

- La eficiencia en corriente disminuye drásticamente al alcanzar los niveles de ppm.
- El depósito selectivo no suele ser posible industrialmente, para mezclas de iones de baja concentración.
- El rendimiento puede ser muy afectado por la presencia de compuestos orgánicos (generalmente aditivos de baños) en la disolución

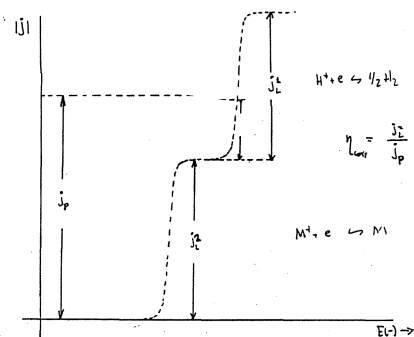
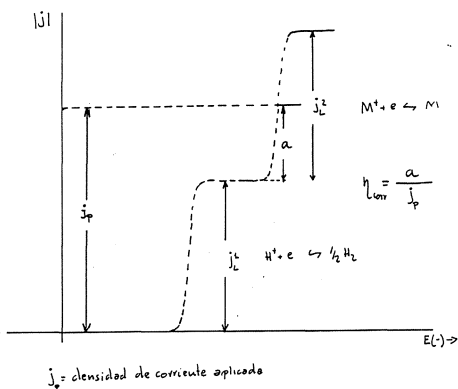


Figura 7