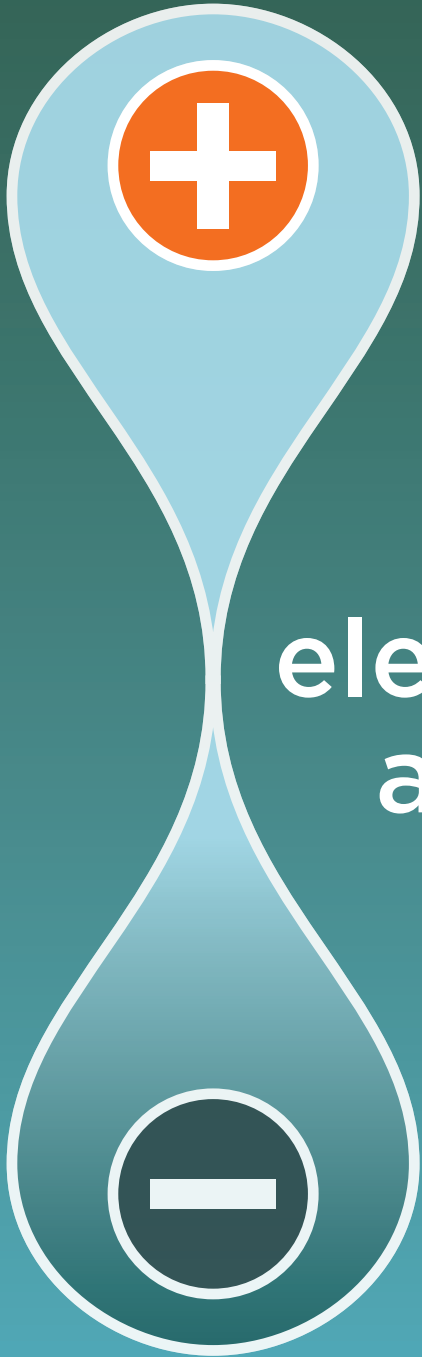


Texto avalado por la
Sociedad Mexicana de
Electroquímica



Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales

Carlos Eduardo Barrera Díaz
COORDINADOR

EDITORIAL REVERTÉ
UAEM

Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales

Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales

Carlos Eduardo Barrera Díaz

Coordinador



Universidad Autónoma
del Estado de México



EDITORIAL
REVERTÉ

Barcelona · Bogotá · Buenos Aires · Caracas · México

Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de agua residuales

Texto avalado por la Sociedad Mexicana de Electroquímica

© Carlos Eduardo Barrera Díaz

Esta edición:

© Reverté Ediciones, México D. F., 2014

ISBN: 978-607-7815-13-6

© Editorial Reverté, Barcelona, 2014

ISBN: 978-84-291-7918-7

CORRECCIÓN DE TEXTOS: Mariló Caballer Gil

DISEÑO Y FORMACIÓN DE INTERIORES: Reverte-Aguilar, S. L.

DISEÑO DE LA CUBIERTA: David Kimura + Gabriela Varela

Propiedad de:

REVERTÉ EDICIONES, S. A. DE C. V.

Río Pánuco, número 141. Col. Cuauhtémoc
Delegación Cuauhtémoc
C. P. 06500 México, D.F.
T: +(52) 55 5533-5658
F: +(52) 55 5514-6799
reverte@reverte.com.mx
www.reverte.com

EDITORIAL REVERTÉ, S. A.

Loreto 13-15, Local B
08029 Barcelona
España (*Spain*)
T: +(34) 93 419 33 36
F: +(34) 93 419 51 89
reverte@reverte.com
www.reverte.com

Reservados todos los derechos. La reproducción total o parcial de esta obra, por cualquier medio o procedimiento, comprendidos la reprografía y el tratamiento informático, y la distribución de ejemplares de ella mediante alquiler o préstamo públicos, queda rigurosamente prohibida sin la autorización escrita de los titulares del copyright, bajo las sanciones establecidas por las leyes.

Impreso en España. *Printed in Spain*

Depósito Legal: B. 5861-2014

Impresión de 1000 ejemplares

Impreso por Liberdúplex, S.L.U.
Barcelona – España

1408

Índice

Presentación	VII
Capítulo 1 Fundamentos de electroquímica ambiental	1
Capítulo 2 Parámetros fisicoquímicos y biológicos de la calidad del agua.....	45
Capítulo 3 Coagulación y floculación.....	65
Capítulo 4 Celdas de laboratorio y reactores industriales electroquímicos	81
Capítulo 5 Elementos de análisis de reactores sólo electroquímicos para su diseño y caracterización	119
Capítulo 6 Electrocoagulación.....	165
Capítulo 7 Principios básicos de electroflotación	181
Capítulo 8 Proceso de electrofenton y tecnologías electroquímicas basadas en la reacción química de Fenton	195
Capítulo 9 Electrooxidación	211
Capítulo 10 Producción electroquímica de peróxido de hidrógeno y su aplicación en el tratamiento de agua	229
Capítulo 11 Reducción electroquímica de Cr(VI)	251
Capítulo 12 Métodos electroquímicos combinados	279
Capítulo 13 Uso y aplicaciones de sensores químicos y electroquímicos para la detección de contaminantes en agua y agua residual	297
Índice alfabético	317

Presentación

El presente libro tiene como finalidad compilar numerosas investigaciones en el campo de la tecnología electroquímica y sus aplicaciones ambientales, contando con la colaboración de un gran número de investigadores tanto nacionales como extranjeros, proponiendo con ello una visión amplia dentro de la aplicación de la electroquímica.

Los temas que integran esta obra se escogieron cuidadosamente considerando desde los principios básicos de la electroquímica aplicada al tratamiento de aguas residuales hasta los parámetros a considerar durante el diseño, operación y evaluación de dichos sistemas, sin dejar de lado las aplicaciones utilizadas en la actualidad en la industria, la docencia y la investigación.

Este libro reúne diversas temáticas por lo que puede considerarse como un compendio de aquellos elementos que el lector requiere para poder tener una visión amplia de las aplicaciones de la electroquímica en el campo del tratamiento de agua residual. En el Capítulo 1 se presenta una primera impresión de los Fundamentos de la Electroquímica Ambiental, en donde los autores explican cómo esta disciplina es una nueva área de la ciencia en donde se emplean conocimientos de Electroquímica, Ingeniería Química y Ciencia de Materiales, así como las aplicaciones específicas para la remediación ambiental.

En el Capítulo 2 los autores ofrecen una descripción de los principales parámetros fisicoquímicos y biológicos que se emplean para definir a la calidad del agua. Este capítulo describe en función de qué características físicas, químicas y biológicas se puede evaluar a un agua residual así como también la aplicación de estas características como variables de control de un proceso de tratamiento y también como el empleo de ellas para limitar las concentraciones máximas permisibles de descarga de aguas residuales.

El Capítulo 3 se refiere a uno de los procesos más empleados en el tratamiento de agua: la coagulación-floculación. Se aborda desde una óptica teórica hasta la descripción de un ejemplo de aplicación en la industria. Resulta importante incluir este capítulo ya que uno de los métodos más prometedores en la electroquímica ambiental es la electrocoagulación, la cual se narra en el Capítulo 6.

Las bases de las celdas de laboratorio y reactores industriales electroquímicos se relatan en el Capítulo 4. En particular, se refieren las implicaciones que tienen las principales características físicas y de diseño de celdas de laboratorio y reactores electroquímicos industriales que permiten obtener transformaciones eficientes gracias a un correcto control del potencial de electrodo en estos sistemas.

La implementación de procesos electroquímicos para su aplicación a nivel industrial, requiere del diseño eficiente del dispositivo central: el reactor

electroquímico. Por lo que, en el Capítulo 5 se presentan los elementos de análisis de reactores electroquímicos para su diseño y caracterización.

El Capítulo 7 describe bajo qué circunstancias se puede llevar a cabo el proceso de electroflotación. Los autores muestran cómo este proceso está influenciado por el pH de la solución acuosa, la densidad de corriente y el tipo de electrodos que se emplean.

El lector encontrará en el Capítulo 8 las bases teóricas de uno de los procesos que involucra la química de la reacción de Fenton, así como las aplicaciones ambientales para el tratamiento de soluciones sintéticas y reales con diferentes contaminantes refractarios, tales como plaguicidas, colorantes, productos de cuidado personal, fármacos y residuos químicos industriales. En el Capítulo 9 se presentan algunos conceptos fundamentales sobre la Electrooxidación, también conocida como oxidación electroquímica, la cual está enfocada a realizar la oxidación de contaminantes presentes en aguas residuales sobre la superficie de electrodos. La tecnología para la electrogeneración de peróxido de hidrógeno y su empleo en el tratamiento de agua residual se describe en el Capítulo 10.

Uno de los metales pesados que tienen un alto grado de toxicidad en el ambiente es el Cr(VI), el cual no puede ser removido por métodos convencionales por lo que una tecnología que puede emplearse en este tratamiento se relata en el Capítulo 11.

En el Capítulo 12 se presentan los avances más recientes cuando se emplean los métodos electroquímicos con algún otro tipo de tratamiento, lo que ha resultado en la obtención de sinergias en los procesos, lo que implica una reducción en los costos de operación.

Finalmente, en el Capítulo 13, se presenta el tema de usos y aplicaciones de sensores químicos y electroquímicos para la detección de contaminantes en agua y agua residual.

Quienes colaboramos en la realización de esta obra esperamos que sea de utilidad a todos aquellos interesados en la electroquímica para el tratamiento de las aguas residuales.

Índice alfabético

A

- absorbedor integrado, 16
 - tratamiento de efluente gaseoso con sistema de celda y, 16
- agentes oxidantes, 282
 - potenciales redox de algunos, 282
- agua. *Véase también* calidad del agua
 - alcalinidad, 51
 - algas, 58
 - artrópodos, 58
 - bacterias, 58
 - bicarbonatos y carbonatos, 54
 - características
 - biológicas, 47
 - físicas, 47
 - químicas, 47
 - carbón orgánico total (COT), 57
 - cloruros, 53
 - coloides, 52
 - color, 49
 - componentes aniónicos, 54
 - comportamiento en la coagulación, 72
 - clasificación según su, 72
 - conductividad y resistividad, 49
 - demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅), 55, 56
 - detección de contaminantes, 297
 - sensores químicos y electroquímicos para la, 297
 - escala de clasificación de la calidad DBO₅, 56
 - fluoruros, 54
 - fosfatos, 54
 - gases disueltos, 55
 - helmintos, 59
 - hongos, mohos y levaduras, 58
 - metales tóxicos, 55
 - moluscos, 58
 - nitrógeno, 53
 - normas de calidad y límites permisibles, 59
 - oxígeno disuelto (OD), 57
 - parámetros
 - bacteriológicos, 59
 - biológicos, 55
 - fisicoquímicos y biológicos de la calidad, 45
 - físicos, 49
 - químicos, 50
 - pH, 51
 - platelmintos, 58
 - producción electroquímica de peróxido de hidrógeno 229
 - y su aplicación en el tratamiento de, 229
 - protozoarios, 58
 - sílice, 54
 - sólidos, 52
 - sólidos disueltos totales (SDT), 52
 - sólidos fijos totales (SFT), 52
 - sólidos suspendidos fijos (SSF), 52
 - sólidos suspendidos totales (SST), 52
 - sólidos suspendidos volátiles (SSV), 52
 - sólidos totales (ST), 52
 - sólidos volátiles totales (SVT), 52
 - sulfatos, 53
 - temperatura, 49
 - turbiedad, 49
 - agua depurada en un tratamiento
 - EDI, esquema de procesos de regeneración, 43
 - EDR, esquema de procesos de regeneración, 41
 - agua mineral comercial, determinación de [NO₃⁻] en, 311

- agua potable (EPA-OMS), estándares para, 48
- agua residual, detección de contaminantes, 297
- — sensores químicos y electroquímicos, 297
- agua tratada mediante
- electrocoagulación, 34
 - — esquema de procesos de regeneración, 34
 - electrolisis, 25
 - — esquema de procesos de regeneración, 25
- aguas residuales
- tratamiento, 287
 - — electroquímico de, 198
 - — estudios con métodos combinados, 287
 - — tecnologías electroquímicas, 167
- Ancylostoma duodenale*, 59
- ánodo helicoidal, reactor tubular con, 269
- ánodo poroso, reactor de lecho fijo con, 111
- ánodos
- comparación del comportamiento, 218, 219
 - potencial de evolución de oxígeno de diferentes, 216
- antraquinona, producción del peróxido de hidrógeno, 231
- Ascaris lumbricoides*, 59
- ## B
- barreras contenedoras de la contaminación, 12
- barreras electroquímicas protectoras de la contaminación, 12
- barreras reactivas permeables, 10
- uso de, 11
- batch con recirculación, modo de operación en, 155
- Beggiatoa*, 58
- biosensores, 299
- burbuja(s)
- diámetro de desprendimiento, 188
 - tamaño y su efecto en electroflotación, 187
 - reacciones electródicas para la formación de, 185
- valoraciones en el electrodo de, 308
- catecolaminas, análisis con detector electroquímico en un equipo de HPLC, 96
- celda(s)
- para estudios voltamperométricos analíticos, 87
 - para macroelectrólisis a nivel laboratorio, 88
- celdas de electrodiálisis simple, 39
- celdas de electrolisis
- de placas planas, 136
 - — con flujo de fluido perpendicular al campo eléctrico, 136
 - directa y con catalizador redox *in-cell* y *ex-cell*, 101
- celdas de laboratorio, 81
- y reactores industriales electroquímicos, 81
- celdas de microflujo, 95
- celdas de tres electrodos, 86, 88
- esquema, 86
 - para estudios voltamperométricos, 88
 - voltamperograma típico, 88
- celdas electrolíticas
- burbujas en los electrodos, 184
 - — representación esquemática, 184
 - con un arreglo ideal, 90
 - — distribución de líneas de corriente y de potencial, 90
 - de laboratorio, 90
 - — características de construcción, 90
 - esquema, 85
 - generalidades, 85
 - procesos que pueden desarrollarse, 19
 - propiedades y posibilidades de elección, 89
 - tipo tanque rectangular, 109
- celdas electroquímicas
- de laboratorio, 85
 - descripción, 306
 - movimiento de cargas en, 38
 - para análisis en flujo, 94
 - y absorbedor, tratamiento de efluentes gaseosos con, 17
- celdas espectroelectroquímicas, 91
- para estudios de EPR acoplados con electroquímica, 92
 - para estudios de UV-Vis-NIR acoplados con electroquímica, 91
- celdas galvánicas
- esquema de, 85
 - y electrolíticas, 85
- ## C
- calentamiento eléctrico, 7
- calidad del agua
- escala de clasificación DBO₅, 56
 - parámetros fisicoquímicos y biológicos de la, 45
- calor en la biorremediación de suelos, aprovechamiento del, 13
- capa de diamante dopada con boro en sustrato de silicio, MEB de una, 223
- carbón vítreo
- linealidad de los sistemas cobre y, 310

- ciclo del nitrógeno, 53
- clasificación
 - de los coloides, 67
 - de métodos electroquímicos para la reducción de Cr(VI), 258
 - del agua según su comportamiento en la coagulación, 72
- coagulación, 68
 - adición de coagulante, 69
 - clasificación del agua según su comportamiento en la, 72
 - desestabilización de la partícula coloidal, 69
 - doble capa, 69
 - formación de flóculos, 69
 - modelo
 - de la formación de la doble capa, 70
 - físico, 69
 - químico, 70
 - puente químico, 70
 - sedimentación de flóculos, 69
 - tipos de flujo hidráulico en reactores de, 35
- coagulación y floculación, 65
 - características del agua cruda, 71
 - caso de estudio, 74
 - clorosulfato de polialumino, 76
 - cloruro férrico (FeCl_3), grado industrial, 75
 - concentración óptima, 72
 - dosis óptima, 72
 - esquema de las etapas de, 68
 - factores que influyen en el proceso de, 71
 - hidroxiclорuro de aluminio (PAC) Clarian®, 75
 - modelos teóricos de la, 69
 - pH óptimo, 72
 - poliacrilamida, 75
 - proceso de, 68
 - prueba de jarras (*jar test*), 74
 - sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$), grado industrial, 75
 - sulfato de polialuminio, 76
 - temperatura, 71
- coagulante y floculante, diferencias, 73
- coagulantes, 73
 - porcentajes de remoción respecto a la turbiedad según los diferentes, 77
- coágulo, 69
- cobre
 - valoraciones en el electrodo de, 307
 - y carbón vítreo, linealidad de los sistemas, 310
- coeficiente de transferencia de masa en función del número de Reynolds, 154
- coloides, 66
 - clasificación de los, 67
 - difusión, 68
 - movimiento browniano, 68
 - presión osmótica, 68
 - propiedades, 68
 - de superficie, 68
 - electrocinéticas, 68
 - ópticas, 68
- comparación del comportamiento de diferentes ánodos, 218, 219
- comportamiento de la oxidación anódica, 217
- compuestos orgánicos, degradación mediante $\text{H}_2\text{O}_2/\text{UV}$, 235, 236
- compuestos volátiles, sistema de electrotermorrecuperación de, 14
- concentración(es)
 - de nitratos, variación de la densidad de corriente del pico II (JII) en función de la, 309
 - en la interfase, en función del potencial bajo condiciones hidrodinámicas, 125
 - en un reactor de flujo continuo, perfil adimensional de, 108
 - interfacial de Cu^{2+} en el cátodo para un flujo laminar no desarrollado a diferentes potenciales, 141
 - en un reactor por lotes, perfil adimensional de, 104
- condiciones
 - a la frontera de un recipiente cerrado-cerrado, 145
 - en los modelos MDA y PDE, esquema de las, 145
 - de operación por el método de electrocoagulación, 169
- contaminación
 - barreras contenedoras de la, 12
 - del agua, 281
 - empleo de barreras electroquímicas protectoras de la, 12
- contaminantes
 - en agua y agua residual, 297
 - sensores químicos y electroquímicos para la detección de, 297
- correlaciones adimensionales en el transporte de masa, 149
- Cr(VI)
 - efecto de la velocidad de rotación del electrodo en la remoción de, 262
 - evaluación de reactores electroquímicos para la remoción de, 269

- Cr(VI) (*continuación*)
- evolución de los métodos electroquímicos para la reducción de, 256
 - métodos electroquímicos de reducción de, 257
 - proceso sonoelectroquímico para la remoción de, 268
 - reducción electroquímica de, 251, 256
 - reducción en función del tiempo, 265
 - — y de la densidad de corriente, 263
 - reducción por electrocoagulación, 258
 - — electrodos de hierro, 259
- Crenothrix*, 58
- Cromo, 253
- en el medio ambiente, 253
 - toxicidad, 255
- Cu²⁺ en la interfase de los electrodos, perfil de concentración de iones en función de la distancia axial, 139
- Cu²⁺/Cu⁰, pruebas de microelectrólisis, obtención de la curva de polarización para el proceso, 152
- Curva(s)
- de corriente muestreada frente al potencial, 53
 - — para el depósito de iones Cu(II) en ácido sulfúrico, 153
 - de distribución de tiempos de residencia (DTR), 143
 - — obtención experimental, 143
 - de polarización para el proceso Cu²⁺/Cu⁰, 152
 - — pruebas de microelectrólisis, obtención de la, 152
 - experimentales de DTR 148
 - — del reactor FM01-LC empacado con mallas de acero inoxidable, 148
- D**
- Dax, modelo de dispersión axial para la determinación del, 145
- DBO₅, escala de clasificación de la calidad del agua, 56
- definición de oxidación electroquímica o electrooxidación, 213
- degradación de compuestos orgánicos
- mediante electrofenton, 240, 241
 - mediante H₂O₂/UV, 235, 236
- densidad de corriente
- calculada a lo largo de los electrodos, 140
 - del pico II (JII), 309
 - — variación en función de la concentración de nitratos, 309
 - en función del potencial bajo condiciones hidrodinámicas, 125
- depósito de iones Cu(II) en ácido sulfúrico, 153
- curvas de corriente muestreada frente al potencial para el, 153
- desarrollo de la ingeniería electroquímica, 121
- desinfección electroquímica, 24
- detector electroquímico
- de flujo, 94
 - — celda con dos detectores coulombimétricos, 94
 - de un equipo de HPLC, 95
 - — voltametría hidrodinámica típica, 95
- determinación de [NO₃⁻] en agua mineral comercial, 311
- diagrama
- de la electrogeneración del reactivo de Fenton, 199
 - — con ánodo de hierro y cátodo de grafito, 199
 - de las reacciones en el líquido y en los electrodos, 263
 - — en el proceso electroquímico para la reducción de Cr(VI), 263
 - de Pourbaix para el Cr, 254
 - del funcionamiento de un sensor químico, 300
 - del proceso de electrofenton, 202
 - — con generación de
 - H₂O₂ y regeneración de Fe²⁺, 202
 - Fe²⁺, 201
 - del proceso de Fenton clásico, 198
 - del proceso de fotofenton, 203
 - del reactor FM01-LC, 133
- diamante, estructura, 222
- diámetro de desprendimiento de la burbuja, 188
- diferencia entre floculante y coagulante, 73
- disciplinas de las que deriva la ingeniería electroquímica, 3
- diseño de un reactor electroquímico en forma de placas intercaladas, 168
- dispersión axial, modelo para la determinación del Dax, 145
- dispersión de flujo pistón con intercambio de materia (PDE), modelo de, 146
- dispersión-reacción acoplado con tanque de recirculación, modelo de, 156
- distribución
- de la velocidad axial, 270
 - — a lo largo del reactor electroquímico con diferentes posiciones de alimentación, 271

- de las líneas de corriente y de potencial en una celda electrolítica con un arreglo ideal, 90
 - de tiempos de residencia (DTR)
 - — con un solo punto de detección, esquema de la técnica, 144
 - — obtención experimental de la curva de, 143
 - disulfuro de formamidina (DSFA), 158
 - electrosíntesis de, 158
 - modelo dispersión-reacción CST, 158
 - reactor electroquímico FM01-LC, 158
 - Dracunculus medinensis*, 59
- E**
- ecuaciones
 - de diseño para reactores por lotes, 104
 - de Navier-Stokes, campo de velocidad obtenido de la solución de las, 128
 - RANS y transporte de masa con el modelo de turbulencia $k-\epsilon$, 134
 - efecto de Tyndall-Faraday, 68
 - efluentes gaseosos
 - tratamiento
 - — con celda electroquímica y absorbedor separados, 17
 - — con sistema de celda y absorbedor integrados, 16
 - — y combinación con procesos de absorción, 16
 - efluentes líquidos, tratamiento de, 18
 - Electro-Claus de eliminación de sulfuro de hidrógeno, proceso, 17
 - electrocoagulación, 165, 167
 - aplicaciones, 176
 - comparación entre sistemas en lote y en continuo, 176
 - consumo de energía del electrodo de aluminio para la remoción de contaminantes, 172
 - densidad de corriente o carga, 171
 - diseño de reactores y operación, 174
 - efecto de la temperatura, 174
 - efecto del pH, 173
 - esquema de un proceso de, 32
 - factores que afectan la, 171
 - interacciones ocurridas en un reactor de, 170
 - mecanismos de remoción de contaminantes, 168
 - presencia de cloruro de sodio, 172
 - reactores en lote y en continuo, 175
 - reducción de Cr(VI), 258
 - — electrodos de aluminio, 258
 - tipo de material de los electrodos, 174
 - electrodeposición, 28
 - con electrodo rotatorio, 29
 - — sistema experimental a escala de laboratorio de, 29
 - esquema de proceso de, 28
 - electrodiálisis, 38
 - electrodo(s)
 - densidad de corriente calculada a lo largo de, 140
 - efecto de la velocidad de rotación en la remoción de Cr(VI), 262
 - flux de masa calculado sobre cada uno de los, 140
 - perfil de concentración de iones Cu^{2+} en la interfase en función de la distancia axial, 139
 - electrodos al ión nitrito, selectividad, 310
 - electrodos de aluminio, 258
 - electrodos de carbón vítreo, valoraciones, 308
 - electrodos de carbono y grafito, electrorreducción de Cr(VI), 266
 - electrodos de cobre
 - valoraciones, 307
 - valores de
 - — sensibilidad, 310
 - — límite de detección, 310
 - — intervalo de linealidad, 310
 - — límite de cuantificación, 310
 - electrodos de hierro, 259
 - electrodos de polímeros conductores, 266
 - electrodos giratorios, reactores con, 112
 - electrodos rotatorios
 - mezcla completa, reactores de, 271
 - reactor electroquímico de, 272
 - sistema experimental a escala de laboratorio de electrodeposición con, 29
 - electrodos selectivos de iones, 305
 - clasificación IUPAC según tipo de membrana, 305
 - electrodos sensibles a nitratos, desarrollo, 304
 - electrofenton, 234
 - aguas residuales reales, 206
 - aplicaciones ambientales, 203
 - con generación de
 - — H_2O_2 y Fe^{2+} , 201, 202
 - diagrama esquemático del proceso de, 202
 - — Fe^{2+} , 200
 - degradación de
 - — colorantes, 204
 - — contaminantes industriales, 205
 - — plaguicidas, 203

- electrofenton (*continuación*)
- — productos de cuidado personal, 205
 - — productos farmacéuticos, 205
 - materiales anódicos y catódicos, 199
 - perspectivas, 207
 - variantes del proceso, 200
- electrofitorremediación, 14
- electroflotación, 182, 184
- aplicaciones al tratamiento de
 - — agua, 188
 - — agua residual, 189, 190
 - — principios básicos, 181
 - representación esquemática de una unidad de, 185
 - tamaño de la burbuja y su efecto en la, 187
- electroforesis, 6
- electrogeneración
- de hierro, 260
 - — sistemas electrolíticos, 260
 - — sistemas galvánicos, 264
 - del reactivo de Fenton, 199
 - — diagrama esquemático, 199
 - — empleando ánodo de hierro y cátodo de grafito, 199
- electrolisis, 7, 18
- de placas planas con flujo de fluido perpendicular al campo eléctrico, 136
 - reacciones directas, 20
 - reacciones indirectas, 21
- electromigración, 6
- eliminación de contaminantes iónicos, 8
 - esquema del proceso de, 9
- electroósmosis, 7
- electrooxidación, 211
- electrodos de diamante dopados con boro, 222
 - estado del arte de la, 220
 - anódica directa, 215
 - indirecta, 214
- electroquímica ambiental, 3
- electroquímica industrial, procesos, 120
- electrorreducción de Cr(VI)
- cobre, 267
 - electrodos de polímeros conductores, 266
 - por medio de otros electrodos, 266
- electrorremediación de suelos
- aprovechamiento del calor en la, 13
 - procesos de, 8
- electrosíntesis de disulfuro de formamida (DSFA), 158
- elementos de análisis de reactores sólo electroquímicos para su diseño y caracterización, 119
- eliminación de
- materia orgánica, 24
 - nitrógeno, 24
 - sulfuro de hidrógeno, 17
 - — proceso Electro-Claus de, 17
- Enterobius vermicularis*, 59
- equipo de HPLC, voltimetría hidrodinámica típica en un detector electroquímico de un, 95
- escala de clasificación de la calidad del agua: DBO₅, 56
- esquemas de
- celda electrolítica, 85
 - — de placas planas, 136
 - con flujo de fluido perpendicular al campo eléctrico, 136
 - — de tres electrodos, 86
 - celda galvánica, 85
 - condiciones a la frontera de un recipiente cerrado-cerrado, 145
 - — en los modelos MDA y PDE, 145
 - diseño de un proceso electroquímico, 122
 - etapas de coagulación y floculación, 68
 - proceso de electrocoagulación, 32
 - proceso de electrodeposición, 28
 - proceso de electrolisis, 25
 - — en un reactor electroquímico tipo filtro prensa, 25
 - proceso de electromigración, 9
 - proceso de fitoelectrorremediación, 15
 - procesos de regeneración de agua
 - — electrolítico, 25
 - — de electrocoagulación, 34
 - — EDR, 41
 - — EDI, 43
 - recirculación en un proceso electroquímico con filtrado, 102
 - repulsión coloidal, 67
 - técnica para la distribución de tiempos de residencia (DTR), 144
 - — con un solo punto de detección, 144
- estado del arte de la electrooxidación, 220
- estándares para agua potable (EPA-OMS), 48
- estructura del diamante, 222
- estudios
- con métodos combinados en el tratamiento de aguas residuales, 287
 - realizados con métodos electroquímicos combinados, 287, 289
- evaluación
- del desempeño de reactores electroquímicos, 269

- — para la remoción de Cr(VI), 269
- del patrón de fluido en un reactor con electrodo 3D, 143
- — a través de la distribución de tiempos de residencia (DTR), 143
- evolución
- de los métodos electroquímicos para la reducción de Cr(VI), 256
- de oxígeno, sobrepotencial de, 216

F

- factores que influyen en
 - el proceso de coagulación y floculación, 71
 - la electrocoagulación, 171
 - la floculación, 73
- fenómeno de flotación y sedimentación, 182
- fenómenos de transporte
 - análisis, 126
 - — aplicación a la descripción de reactores electroquímicos, 126
 - ecuaciones de movimiento, 126
 - en los procesos electroquímicos, 123
- Fenton. *Véase también* procesos Fenton; reactivo de Fenton
 - reacción química de, 195
 - — tecnologías electroquímicas basadas en la, 195
 - proceso de electrofenton, 195
 - proceso de oxidación, 237
- Fenton clásico, 197
- filtro prensa, reactor tipo, 111, 112
- fitelectrorremediación, esquema de un proceso de, 15
- floculación, 68, 72 *Véase también* coagulación y floculación
 - factores que influyen en la, 73
 - modelo
 - — ortocinético, 70
 - — pericínético, 70
- floculante y coagulante, diferencias, 73
- floculantes, 73
- flotación
 - de una partícula en el agua, 183
 - y sedimentación, fenómeno de, 182
- flujo hidráulico en reactores de coagulación, 35
- flujo pistón
 - con dispersión, reactores tubulares de, 269
 - con recirculación, reactor tubular de, 107
 - reactores tubulares de, 105
- flux de masa calculado sobre cada uno de los electrodos, 140

- formación, potenciales de algunos reactantes químicos, 217
- formación de burbujas, reacciones electródicas para la, 185
- formamidina, disulfuro de (DSFA), 158
 - electrosíntesis de, 158
 - reactor electroquímico FM01-LC, 158
- fotofenton, 242
 - solar, 242
 - — representación de las reacciones involucradas, 243
- fotofenton, 202
- fotólisis del peróxido de hidrógeno, 234

G

- gas producido electroquímicamente, cantidad teórica de, 186
- generalidades de las celdas electrolíticas, 85
- geometría de los reactores electroquímicos, 108

H

- H₂O₂. *Véase* peróxido de hidrógeno, 233
- hidatidosis, 58
- HPLC, en un detector electroquímico, 95
 - voltimetría hidrodinámica, 95

I

- ingeniería electroquímica, 6, 97, 121
 - aplicaciones, 4
 - desarrollo, 121
 - disciplinas de las que deriva, 3
- intercambio de materia, mecanismo descrito por el modelo PDE, 146
- intercambio iónico, membranas de, 39
- ión ferricianuro, reducción del, 132
- ión nitrito, selectividad del electrodo al, 310

L

- lavado electroquímico de suelos, 9
 - proceso de, 10
- lecho fijo, reactores de, 110
- lecho fluidizado, reactores de, 110
- linealidad de los sistemas cobre y carbón vítreo, 310

M

- materia, mecanismo de intercambio, 146
 - descrito por el modelo PDE, 146
- materia orgánica, eliminación de, 24
- MEB de una capa de diamante dopada con boro en sustrato de silicio, 223

- mecanismos de
- funcionamiento de membranas aniónicas y catiónicas, 39
 - intercambio de materia por el modelo PDE, 146
- medio ambiente, cromo en el, 253
- membranas aniónicas y catiónicas, 39
- mecanismo de funcionamiento de, 39
- membranas bipolares, 40
- empleo de, 40
- membranas de intercambio iónico, 39
- métodos electroquímicos
- combinados, 279, 284
 - — estudios realizados con, 287, 289
 - — factores que se han de tener en cuenta, 286
 - para la reducción de Cr(VI), 257
 - — clasificación de, 258
 - — evolución de los, 256
- microelectrólisis, obtención de la curva de polarización, 152
- para el proceso $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^0$, 152
- microflujo
- celdas de, 95
 - reacción electroquímica en un sistema de, 97
- microorganismos biológicos, 58
- interacción con el oxígeno de un manantial orgánico, 58
- modelo(s)
- de dispersión
 - — axial para la determinación del Dax, 145
 - — de flujo pistón con intercambio de materia (PDE), 146
 - de dispersión-reacción acoplado con tanque de recirculación, 156
 - diferenciales, 144
 - dispersión-reacción CST
 - — descripción del reactor electroquímico FM01-LC, 158
 - MDA y PDE
 - — esquema de las condiciones a la frontera de un recipiente cerrado-cerrado utilizadas en los, 145
 - — parámetros utilizados por los, 148
 - paramétricos, utilización para la descripción de reactores electroquímicos, 141
 - PDE, mecanismo de intercambio de materia por el, 146
 - teóricos de la coagulación y la floculación, 69
- modo de operación en batch con recirculación, 155
- movimiento de cargas en celdas electroquímicas, 38
- ## N
- Navier-Stokes, ecuaciones de, campo de velocidad obtenido de la solución de las, 128
- Necator americanus*, 59
- Nematelmintos, 59
- nitratos, concentración de, 309
- variación de la densidad de corriente del pico II (JII) en función de, 309
- nitrógeno
- ciclo del, 53
 - eliminación de, 24
- NOM-127-SSA1-1994, parámetros de la, 60, 61
- número de Reynolds, coeficiente de transferencia de masa en función del, 154
- ## O
- operación en batch con recirculación, modo de, 155
- oxidación
- anódica, comportamiento de la, 217
 - aplicaciones industriales, 244
 - avanzada (POA), procesos de, 197, 282, 283
 - Fenton, proceso de, 237
- oxígeno
- de un manantial orgánico, 58
 - — interacción de microorganismos biológicos, 58
 - potencial de evolución de diferentes ánodos, 216
 - sobrepotencial de evolución de, 216
- ## P
- parámetros
- de la NOM-127-SSA1-1994, 60, 61
 - fisicoquímicos y biológicos de la calidad del agua, 45
 - utilizados por los modelos MDA y PDE, 148
- partícula(s)
- en agua, sedimentación o flotación, 183
 - en solución acuosa, 183
 - — representación esquemática de las fuerzas que actúan, 183
 - coloidales, 67
- patrón de fluido, evaluación en un reactor con electrodo 3D, 143
- mediante la distribución de tiempos de residencia (DTR), 143
- perfil(es)
- adimensional de concentraciones en un

- — reactor de flujo continuo, 108
- — reactor por lotes, 104
- de concentración
- — de iones Cu^{2+} en la interfase de los electrodos en función de la distancia axial, 139
- — en el tanque de modelos de dispersión-reacción y de flujo pistón, 160
- — en reactores tubulares con flujo pistón, 106
- peróxido de hidrógeno, 231
 - aplicaciones al tratamiento de agua, 233
 - fotólisis del, 234
 - producción electroquímica
 - — materiales de electrodo, 232
 - — y su aplicación en el tratamiento de agua, 229
 - producción mediante el proceso de la antraquinona, 231
- plancton, 59
- porcentajes de remoción respecto a la turbiedad, 77
 - según diferentes coagulantes aplicados, 77
- potencial de evolución de oxígeno de diferentes ánodos, 216
- potenciales de formación de algunos reactivos químicos, 217
- potenciales redox de algunos agentes oxidantes, 282
- principales componentes de los reactores electrolíticos, 19
- principios básicos de electroflotación, 181
 - proceso(s)
 - $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^0$, pruebas de microelectrólisis, 152
 - — obtención de la curva de polarización para el, 152
 - de absorción, tratamiento de efluentes gaseosos y la combinación con, 16
 - de coagulación y floculación, 68
 - — factores que influyen en el, 71
 - de electrocoagulación, esquema de un, 32
 - de electrodeposición, esquema de, 28
 - de electrofenton
 - — con generación de Fe^{2+} , 201
 - diagrama esquemático, 201
 - de electrolisis en un reactor electroquímico tipo filtro prensa, 25
 - de electromigración, esquema del, 9
 - de electrorremediación de suelos contaminados, 8
 - de Fenton clásico, diagrama esquemático del, 198
 - de fitoelectrorremediación, esquema de un, 15
 - de fotofenton, diagrama esquemático del, 203
 - de la antraquinona, 231
 - — producción de peróxido de hidrógeno, 231
 - de lavado electroquímico de suelos, 10
 - de oxidación avanzada (POA), 197, 282, 283
 - de oxidación Fenton, 237
 - electrocinéticos, 6
 - — tratamiento de suelos contaminados por, 6
 - Electro-Claus de eliminación de sulfuro de hidrógeno, 17
 - electrofenton, variantes del, 200
 - electrolíticos, tipos de, 21
 - electroquímico
 - — a nivel industrial, 120
 - — con filtrado, 102
 - — esquema de la recirculación, 102
 - — esquema de diseño de un, 122
 - — fenómenos de transporte en los, 123
 - Fenton
 - — corriente/voltaje, 239
 - — pH, 238
 - — relación $\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$, 239
 - — temperatura, 239
 - que pueden desarrollarse en una celda electrolítica, 19
 - Rayox[®], 244
 - sonoelectroquímico para la remoción de Cr(VI) , 268
 - WPO, 245
 - propiedades
 - de las celdas electrolíticas y posibilidades de elección, 89
 - de los coloides, 68
 - prototipos de reactores de electrocoagulación, 37
 - pruebas de microelectrólisis, curva de polarización, 152
 - para el proceso $\text{Cu}^{2+}/\text{Cu}^0$, 152

R

 - RANS, ecuaciones, y transporte de masa con el modelo de turbulencia $k-\epsilon$, 134
 - Rayox[®], proceso, 244
 - reacción electroquímica
 - realizada en un sistema de microflujo, 97
 - y su naturaleza heterogénea, 83

- reacción química de Fenton
 - proceso de electrofenton, 195
 - tecnologías electroquímicas basadas en la, 195
- reacciones electródicas para la formación de burbujas, 185
- reactantes químicos, potenciales de formación de algunos, 217
- reactivo de Fenton
 - diagrama esquemático de la electrogeneración
 - — empleando ánodo de hierro y cátodo de grafito, 199
- reactor(es)
 - aplicaciones industriales de los, 112
 - con electrodo 3D, 143
 - — evaluación del patrón de fluido mediante la distribución de tiempos de residencia (DTR), 143
 - con electrodo giratorio, 112
 - continuos tipo tanque agitado, 107
 - de cilindros concéntricos de laboratorio, 128
 - — ecuaciones de Navier-Stokes, 128
 - de coagulación, tipos de flujo hidráulico en, 35
 - de electrocoagulación, interacciones ocurridas en un, 170
 - de electrodos rotatorios (mezcla completa), 271
 - de flujo continuo
 - — perfil adimensional de concentración en un, 108
 - — tipo tanque agitado, 107
 - de lecho fijo
 - — con ánodo poroso, 111
 - — y de lecho fluidizado, 110
 - electrolíticos, principales componentes de los, 19
 - electroquímicos
 - — análisis de los fenómenos de transporte y descripción de, 126
 - — arreglo con conexión
 - bipolar, 103
 - monopolar, 103
 - — características y modelos del patrón de flujo, 142
 - — consumo de energía, 100
 - — conversión, 98
 - — de electrodos rotatorios, 272
 - — diseño de en forma de placas intercaladas, 168
 - — distribución de flujo, 142
 - — ecuaciones de movimiento, 126
 - — eficiencia de corriente, 98
 - — elementos de distribución de corriente y potencial, 135
 - — FM01-LC
 - a escala de laboratorio, 155
 - aplicación del modelo dispersión-reacción CST a la descripción del, 158
 - curvas experimentales de DTR, 148
 - descripción utilizando electrodo tridimensional, 154
 - diagrama esquemático del, 133
 - electrosíntesis de disulfuro de formamida (DSFA), 158
 - empacado con siete mallas expandidas de acero inoxidable, 148
 - modelo dispersión-reacción CST, descripción del, 158
 - — geometría de los, 108
 - — modos de operación, 101
 - — monopolar tipo filtro prensa FM01-LC, 155
 - — para la industria, 97
 - — para la remoción de Cr(VI), evaluación del desempeño de, 269
 - — reactores por lotes (batch), 104
 - — rendimiento
 - de energía, 100
 - espacio-tiempo, 99
 - — tipo filtro prensa, esquema de un proceso de electrolisis en un, 25
 - — transporte de masa, 130
 - — utilización de modelos paramétricos para la descripción de, 141
 - — utilizados a nivel industrial, 113
 - industriales electroquímicos, celdas de laboratorio y, 81
 - por lotes, perfil adimensional de concentraciones en un, 104
 - tipo filtro prensa, 111, 112
 - tipo FM01-LC, distribución de concentración y potencial en un, 159
 - tubulares
 - — con ánodo helicoidal, 269
 - — de flujo pistón, 105
 - con dispersión, 269
 - con recirculación, 107
 - perfil de concentración en, 106
- recipiente cerrado-cerrado, esquema de las condiciones a la frontera utilizadas en los modelos MDA y PDE, 145
- reducción
 - de Cr(VI)
 - — en función del tiempo, 265

- y de densidad de corriente, 263
- — evolución de los métodos electroquímicos para la, 256
- — métodos electroquímicos de, 257
- — por electrocoagulación, 258
- electrodos de aluminio, 258
- electrodos de hierro, 259
- del ión ferricianuro, 132
- electroquímica de Cr(VI), 251, 256
- regeneración de agua depurada en un tratamiento
 - de electrocoagulación, esquema de procesos con interés, 34
 - EDI, esquema de los procesos con interés, 43
 - EDR, esquema de los procesos con interés, 41
 - electrolítico, esquema de los procesos, 25
- remoción
 - de Cr(VI)
 - efecto de la velocidad de rotación del electrodo, 262
 - evaluación del desempeño de reactores electroquímicos para la, 269
 - porcentajes respecto a la turbiedad 77
 - — según diferentes coagulantes aplicados, 77
 - proceso sonoelectroquímico para la, 268
- repulsión coloidal, esquema de, 67
- Reynolds, número de, coeficiente de transferencia de masa en función del, 154

S

- sedimentación
 - fenómeno de, 182
 - o flotación de una partícula en el agua, 183
- selectividad del electrodo al ión nitrito, 310
- sensores electroquímicos, 302
 - tipos de transducción que presenta un, 303
 - uso y aplicaciones 297
 - — para la detección de contaminantes en agua y agua residual, 297
- sensores potenciométricos, 304
 - clasificación IUPAC de electrodos selectivos de iones según tipo de membrana, 305
 - tipos de, 305
- sensores químicos, 299
 - características, 301
 - diagrama del funcionamiento de un, 300
 - electroquímicos, 300
 - másicos, 300
 - ópticos, 299

- receptores
 - — bioquímicos, 299
 - — físicos, 299
 - — químicos, 299
- reconocimiento químico, 301
- uso y aplicaciones, 297
 - — para la detección de contaminantes en agua y agua residual, 297
- sistema
 - Cu²⁺/Cu en una celda de placas planas, 138
 - — resultados del perfil de velocidades y distribución de potencial en el, 138
 - de celda y absorbedor integrado, tratamiento de efluente gaseoso con, 16
 - de electrodeposición con electrodo rotatorio, 29
 - — a escala de laboratorio
 - de electrotermorrecuperación de compuestos volátiles, 14
- sobrepotencial de evolución de oxígeno, 216
- sonoelectroquímica para la remoción de Cr(VI), proceso, 268
- Sphaerotilus*, 58
- suelos
 - aprovechamiento del calor en la electroremediación de, 13
 - lavado electroquímico de, 9
 - proceso de lavado electroquímico de, 10
- suelos contaminados
 - procesos de electrorremediación de, 8
 - tratamiento por procesos electrocinéticos, 6
- sulfuro de hidrógeno, proceso Electro-Claus de eliminación de, 17

T

- tamaño de la burbuja y su efecto en electroflotación, 187
- tanque agitado
 - reactor de flujo continuo tipo, 107
 - reactores continuos tipo, 107
- tanque de dispersión-reacción, perfiles de concentración en, 160
- tanque de flujo pistón, perfiles de concentración en, 160
- tecnologías electroquímicas
 - basadas en la reacción química de Fenton, 195
 - en el tratamiento de aguas residuales, 167
- tiempos de residencia (DTR)
 - evaluación del patrón de fluido en un reactor con electrodo 3D, 143
 - obtención experimental de la curva de distribución de, 143

- tipos de flujo hidráulico en reactores de coagulación, 35
- transducción de sensores electroquímicos, 303
- transporte. *Véase* fenómenos de transporte tratamiento
- de agua, 229
 - — producción electroquímica de peróxido de hidrógeno y su aplicación en el, 229
 - de aguas residuales
 - — estudios con métodos combinados en el, 287
 - — tecnologías electroquímicas en el, 167
 - de efluentes gaseosos
 - — con sistema de celda y absorbedor integrado, 16
 - — con celda electroquímica y absorbedor separados, 17
 - — y la combinación con procesos de absorción, 16
 - de efluentes líquidos, 18
 - de electrocoagulación, 34
 - — esquema de procesos de regeneración de agua tratada, 34
 - de suelos contaminados por procesos electrocinéticos, 6
 - EDI, esquema de procesos de regeneración de agua depurada, 43
 - EDR, esquema de procesos de regeneración de agua depurada, 41
 - electrolítico, esquema de procesos de regeneración de agua tratada, 25
 - electroquímico de aguas residuales, 198
- Trichuris trichiura*, 59
- turbiedad, porcentajes de remoción según diferentes coagulantes aplicados, 77
- Tyndall-Faraday, efecto de, 68
- ## V
- valoraciones
- en el electrodo de carbón vítreo, 308
 - en el electrodo de cobre, 307
- variación de la densidad de corriente del pico II (JII), 309
- en función de la concentración de nitratos, 309
- variantes del proceso electrofenton, 200
- velocidad axial
- distribución a lo largo del reactor electroquímico con diferentes posiciones de alimentación, 271
 - distribución de la, 270
- velocidad de rotación del electrodo, efecto en la remoción de Cr(VI), 262
- venturi, 36
- voltametría hidrodinámica típica en un detector electroquímico de un equipo de HPLC, 95
- voltamperograma(s)
- típico, celda de tres electrodos para estudios, 88
 - lineales experimentales, 307
- voltamperometría, 311
- celda de tres electrodos para estudios, 88
- ## W
- WPO, proceso, 245



Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales

El presente libro compila numerosas investigaciones en el campo de la tecnología electroquímica y sus aplicaciones ambientales. Propone una visión amplia de las aplicaciones electroquímicas, con la colaboración de numerosos investigadores.

Los temas tratados van desde los principios básicos de la electroquímica aplicada hasta el tratamiento de aguas residuales, incluidos los parámetros de diseño, operación y evaluación de dichos sistemas. Las diversas temáticas hacen de este texto un compendio de todos los aspectos que el lector necesita para tener una visión amplia de la electroquímica aplicada al tratamiento de aguas residuales.

Características clave

- Presenta los fundamentos de la electroquímica ambiental, una nueva área de la ciencia que incluye conocimientos de electroquímica, ingeniería química y ciencia de materiales, así como las aplicaciones específicas para remediar el ambiente.
- Describe los principales parámetros fisicoquímicos y biológicos que se emplean para definir la calidad del agua.
- Aborda los procesos como coagulación-floculación, electroflotación, reacción de electro-fenton, electrooxidación y electrogeneración de peróxido de hidrógeno.
- Analiza las celdas de laboratorio y los reactores industriales con la finalidad de obtener transformaciones eficientes, y se centra especialmente en el diseño y caracterización de los reactores electroquímicos.
- Trata de forma especial la remoción de Cr(VI), un metal pesado muy tóxico para el ambiente que no puede ser eliminado mediante procedimientos convencionales.
- Presenta los avances recientes en métodos electroquímicos, así como el uso de sensores electroquímicos para detectar contaminantes en el agua.



EDITORIAL
REVERTÉ

www.reverte.com



ESPAÑA

ISBN 978-84-291-7979-1



9 788429 179798

MÉXICO

ISBN 978-84-291-7979-1



9 788429 179798