

## INDICE

|   |           |
|---|-----------|
| Prólogo   | XI        |
| <b>I. Nociones Básicas. Unidades Especificas Empleadas</b>              | <b>1</b>  |
| <b>1.1. Electrosíntesis</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1.2. Electrodiálisis</b>   | <b>3</b>  |
| <b>1.3. El reactor electroquímico. Componentes básicos</b>              | <b>4</b>  |
| 1.3.1. Electroodos  | 4         |
| 1.3.2. Diafragmas   | 5         |
| 1.3.3. Promotores de turbulencia  | 8         |
| 1.3.4. Cuerpo de la celda   | 8         |
| 1.3.5. Juntas   | 9         |
| 1.3.6. Distribuidores de flujo  | 10        |
| <b>1.4. Rectificadores</b>  | <b>11</b> |
| <b>1.5. Conceptos y Unidades Básicas</b>                                | <b>12</b> |
| 1.5.1. Potencial de electrodo   | 12        |
| 1.5.2. Voltaje  | 13        |
| 1.5.3. Intensidad   | 13        |
| 1.5.4. Densidad de corriente  | 14        |
| 1.5.5. Resistencia eléctrica  | 14        |
| 1.5.6. Resistividad   | 15        |
| 1.5.7. Conductividad  | 15        |
| <b>1.6. Ingeniería Electroquímica. Conceptos y Unidades</b>             | <b>16</b> |
| 1.6.1. Eficacia de la corriente   | 16        |
| 1.6.2. Rendimiento espacio tiempo                                       | 16        |
| 1.6.3. Área electroactiva por unidad de volumen                         | 17        |
| 1.6.4. Consumo específico de energía                                    | 17        |
| 1.6.5. Tiempo de resistencia  | 18        |
| <b>2. Fundamentos de las Reacciones Electrolicas</b>                    | <b>21</b> |
| <b>2.1. La doble capa</b>   | <b>21</b> |
| <b>2.2. La transferencia electrónica</b>                                | <b>23</b> |
| 2.2.1. Introducción   | 23        |
| 2.2.2. Termodinámica  | 23        |
| 2.2.3. Cinética   | 24        |
| 2.3. Transporte de materia  | 26        |
| <b>2.4. Transferencia electrónica y transporte de materia</b>           | <b>27</b> |
| <b>2.5. Adsorción y electrocatálisis</b>                                | <b>29</b> |
| <b>2.6. Reacciones químicas acopladas</b>                               | <b>31</b> |
| <b>2.7. Disoluciones de electrolitos. Características y propiedades</b> | <b>31</b> |
| <b>2.8. Componentes del voltaje de celda</b>                            | <b>33</b> |
| <b>3. Electroodos</b>   | <b>37</b> |
| <b>3.1. Introducción</b>  | <b>37</b> |
| <b>3.2. Tipos de electroodos</b>  | <b>38</b> |
| <b>3.3. Pasivación</b>  | <b>41</b> |
| <b>3.4. Criterios de selección. Propiedades</b>                         | <b>43</b> |
| <b>3.5. Anodos</b>  | <b>49</b> |
| <b>3.6. Cátodos</b>   | <b>51</b> |
| <b>3.7. Nuevos desarrollos</b>  | <b>52</b> |
| <b>4. Membranas de Intercambio Iónico</b>                               | <b>57</b> |

|   |     |
|---|-----|
| <b>4.1. Introducción</b>                                | 57  |
| <b>4.2. Estructura y clasificación</b>                  | 59  |
| <b>4.3. Métodos de fabricación</b>                      | 63  |
| <b>4.4. Polarización</b>                                | 64  |
| <b>4.5. Criterios de selección. Propiedades</b>         | 69  |
| <b>4.6. Membranas especiales</b>                        | 75  |
| 4.6.1. Membranas bicapa                                 | 75  |
| 4.6.2. Membranas selectivas o iones monovalentes        | 76  |
| 4.6.3. Membrana aniónica para concentrar ácidos         | 78  |
| 4.6.4. Membrana bipolares                               | 79  |
| <b>5. Celdas.</b>                                       | 83  |
| <b>5.1. Generalidades y factores de diseño</b>          | 83  |
| 5.1.1. Transferencia de materia                         | 84  |
| 5.1.2. Distribuciones de corriente y potencial          | 86  |
| 5.1.3. Geometría de celda y electrodos                  | 88  |
| 5.1.4. Conexiones eléctricas                            | 89  |
| 5.1.5. Distribución hidráulica                          | 92  |
| 5.1.6. Eliminación de calor                             | 94  |
| <b>5.2. Tipos de Celda</b>                              | 97  |
| 5.2.1. Clasificación                                    | 99  |
| 5.2.2. Celdas tipo tanque                               | 99  |
| 5.2.3. Celdas tipo filtro inerte                        | 104 |
| 5.2.4. Celdas de lecho fluido inerte                    | 104 |
| 5.2.5. Celdas de electrodos apilados                    | 105 |
| 5.2.6. Celdas de electrodos porosos y lecho empaquetado | 107 |
| 5.3. Criterios de selección                             | 109 |
| <b>6. Electrosíntesis</b>                               | 113 |
| <b>6.1. Introducción</b>                                | 113 |
| <b>6.2. Clasificación</b>                               | 116 |
| <b>6.3. La reacción Electroquímica. Variables</b>       | 119 |
| 6.3.1. Introducción                                     | 119 |
| 6.3.2. Potencial de electrodo                           | 120 |
| 6.3.3. Material electródico                             | 120 |
| 6.3.4. Disolvente y electrólito soporte                 | 123 |
| 6.3.5. Tipo y geometría de celda                        | 125 |
| 6.3.6. Densidad de corriente                            | 125 |
| 6.3.7. Transporte de materia                            | 126 |
| 6.3.8. El contraelectrodo                               | 128 |
| <b>6.4. Electrodo</b>                                   | 129 |
| <b>6.5. Diafragmas</b>                                  | 129 |
| <b>6.6. Modos de operación</b>                          | 129 |
| <b>6.7. Aplicaciones tradicionales</b>                  | 136 |
| 6.7.1. Cloro – sosa                                     | 136 |
| 6.7.2. Desinfección. Hipoclorito sódico                 | 144 |
| 6.7.3. Flúor  | 146 |
| 6.7.4. Industria metalúrgica                            | 149 |
| 6.7.4. A. Electrowinning del cobre                      | 149 |
| 6.7.5. Industria papelera y textil                      | 152 |

|   |     |
|---|-----|
| 6.7.5. A. Clrato sodico                             | 152 |
| 6.7.6. Otras  | 155 |
| <b>6.8. Aplicaciones Avanzadas</b>                  | 157 |
| <b>6.8.1. Producción de compuestos orgánicos</b>    | 157 |
| 6.8.1. A. Introducción                              | 157 |
| 6.8.2. B. Fibras                                    | 157 |
| 6.8.3. C. Química fina                              | 162 |
| 6.8.4. D. Industria farmacéutica                    | 168 |
| 6.8.2. Producción de ozono                          | 175 |
| 6.8.3. Medio ambiente                               | 179 |
| 6.8.3. A. Introducción                              | 179 |
| 9.8.3. B. Tratamiento de efluentes líquidos         | 179 |
| 9.8.3. C. Tratamiento de efluentes gaseosos         | 187 |
| <b>6.9. Criterios de selección</b>                  | 191 |
| <b>6.10. Ventajas y limitaciones</b>                | 192 |
| <b>6.11. Análisis preliminar de viabilidad</b>      | 194 |
| <b>7. Electrodiálisis</b>                           | 199 |
| 7.1. Introducción                                   | 199 |
| 7.2. Electroodos                                    | 202 |
| 7.3. Membranas                                      | 203 |
| 7.4. Espaciadores                                   | 203 |
| 7.5. Conexiones a la red                            | 205 |
| 7.6. Configuraciones de celda                       | 205 |
| 7.6.1. Celdas de dos compartimentos                 | 206 |
| 7.6.2. Celdas de cuatro compartimentos              | 206 |
| 7.6.3. Celdas de tres compartimnetos                | 207 |
| 7.7. Modos de operación                             | 208 |
| 7.7.1. Continuo                                     | 209 |
| 7.7.2. Discontinuo                                  | 210 |
| 7.7.3. Semicontinuo                                 | 210 |
| 7.8. Variables de diseño                            | 211 |
| <b>7.9. Electrodiálisis reversibles</b>             | 218 |
| <b>7.10. Aplicaciones tradicionales</b>             | 221 |
| 7.10.1. Potabilización de aguas                     | 221 |
| 7.10.2. Fabricación de sal de mesa                  | 224 |
| 7.10.3. Sector lácteo                               | 226 |
| <b>7.11. Aplicaciones Avanzadas</b>                 | 228 |
| 7.11.1. Industria química                           | 228 |
| 7.11.2. Industria alimentaria                       | 230 |
| 7.11.3. Industria farmacéutica                      | 231 |
| 7.11.4. Industria metalúrgica                       | 233 |
| 7.11.5. Biotecnología                               | 234 |
| 7.11.6. Enfluentes industriales                     | 237 |
| <b>7.12. Electrohidrólisis. Membranas Bipolares</b> | 238 |
| 7.12.1. Principio de funcionamiento                 | 238 |
| 7.12.2. Aplicaciones                                | 243 |
| 7.12. 2. A. Industria metalúrgica                   | 243 |
| 7.12.2. B. Industria química y biotecnológica       | 245 |

|   |     |
|---|-----|
| 7.12.2. C. Desulfuración de gases                               | 246 |
| 7.12.2. D. Otras  | 249 |
| 7.13. Criterios de selección                                    | 254 |
| 7.13.1. Electrodiálisis   | 256 |
| 7.13.2. Electrohidrólisis                                       | 256 |
| 7.14. Análisis preliminar de viabilidad                         | 257 |
| 7.14.1 Electrodiálisis  | 258 |
| 7.14.2. Electrohidrólisis                                       | 261 |
| <b>8. Situación Tecnológica. Evolución. Conclusiones</b>        | 267 |
| <b>8.1. Electrosíntesis</b>                                     | 267 |
| 8.1.1. Electroodos  | 270 |
| 8.1.2. Membranas  | 270 |
| 8.1.3. Celdas   | 271 |
| <b>8.2. Electrodiálisis</b>                                     | 271 |
| 8.2.1. Módulos de electrodiálisis                               | 272 |
| 8.2.2. Membranas  | 272 |
| <b>8.3. Conclusiones</b>  | 275 |
| Apéndice 1. Resistividad de los materiales electródicos         | 277 |
| Apéndice 2. Parámetros cinéticos de los materiales electródicos | 279 |
| Apéndice 3. Propiedades de las membranas comerciales            | 283 |
| Apéndice 4. Potenciales de pares redox de interés industrial    | 289 |
| Apéndice 5. Campo electroquímico de los disolventes orgánicos   | 291 |
| Apéndice 6. Celdas comerciales                                  | 293 |
| A.6.1. Descripción de Celdas Comerciales                        | 393 |
| A.6.1.1. Electrosíntesis  | 301 |
| A.6.1.2. Electrodiálisis  | 301 |
| Apéndice 7. Procesos orgánicos                                  | 311 |
| Apéndice 8. Relación de fabricantes y proveedores               | 313 |
| A.8.1. Celdas de electrosíntesis                                | 313 |
| A.8.2. Módulos de electrodiálisis                               | 314 |
| A.8.3. Membranas de intercambio iónico                          | 316 |
| Apéndice 9. Fichas de instalaciones                             | 319 |
| A.9.1. Electrosíntesis  | 319 |
| A.9.2. Electrodiálisis  | 319 |
| A.9.3. Electrohidrólisis  | 321 |
| A.9.3.1. Washington Steel Corp                                  | 321 |
| A.9.3.2. Allied Signal  | 321 |
| Apéndice 10. Vocabulario y acrónimos                            | 323 |
| Apéndice 11. Bibliografía                                       | 331 |
| Índice alfabético   | 337 |