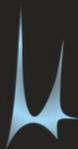


SOCIEDAD MEXICANA DE ELECTROQUÍMICA

30 años  
impulsando  
la **ELECTROQUÍMICA**  
en México



ISBN 000328

EDITOR  
FACUNDO ALMERAYA CALDERÓN

# SOCIEDAD MEXICANA DE ELECTROQUÍMICA A.C.

30 años impulsando la Electroquímica en México

Editor

Facundo Almeraya Calderón



Monterrey, Nuevo León. 2015

Responsable de la Edición: Facundo Almeraya Calderón  
Revisión de Estilo: Citlalli Gaona Tiburcio  
Diseño de Portada: Adonái Zapata Gordon  
Primera Edición: Junio del 2015  
ISBN 000328

Co-Editores: Mesa Directiva 2013 – 2015

Presidente: Dr. Facundo Almeraya Calderón  
Vicepresidente: Dr. Francisco J. Rodríguez Gómez  
Secretario: Dr. Ricardo Orozco Cruz  
Tesorero: Dr. José Ángel Cabral Miramontes  
Vocales:

Dra. Citlalli Gaona Tiburcio  
Dr. Alberto Martínez Villafañe  
Dr. Homero Castañeda López  
Dr. Joan Genesca Llongeras  
Lic. Jair M. Lugo Cuevas

Web-Master



D.R. ©Publicaciones SMEQ  
La purisima s/n, la Purisima. Iztapalapa.  
México D.F. C.P. 09340  
[www.SMEQ.org.mx](http://www.SMEQ.org.mx)  
Impreso en México

# PREFACIO

Es para nosotros una profunda satisfacción el poder editar este libro de memorias sobre electroquímica, celebrando el 30 aniversario de la Sociedad Mexicana de Electroquímica.

Este libro se ha estructurado en dos grandes secciones, en una se hace una reseña de la Sociedad, donde se menciona el origen, la formalización y misión de la misma; indicando quienes han sido sus presidentes, quienes conforman el consejo consultivo, lugares donde se han llevado los 30 Congresos de la SMEQ. Y la segunda sección se ha dividido en 8 capítulos, donde se cubren las temáticas de cada una de las divisiones. Todos estos capítulos constituyen los tópicos de interés sobre los que se han centrado los diversos trabajos de los miembros de la Sociedad. Los capítulos son expuestos por un coordinador, que de acuerdo a su trayectoria y liderazgo en el área ha recopilado las actividades y logros relevantes del área de interés.

Por ultimo queremos agradecer el entusiasmo y esfuerzo de todos los investigadores que han contribuido con sus artículos para hacer realidad el presente libro de memorias, así como el apoyo de los miembros de la mesa directiva 2013-2015.

El Editor  
Dr. Facundo Almeraya Calderón  
Presidente de la Sociedad Mexicana de Electroquímica  
2013-2015

# CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>Sociedad Mexicana de Electroquímica</b>	6
Origen	6
Formalización de la SMEQ	8
Objetivo General	11
Presidentes	11
Consejo Consultivo	14
Congresos	16
Logotipos de la SMEQ	30
Divisiones	32
Divisiones de la SMEQ	35
<b>Electroquímica Analítica (EA)</b>	36
<b>Ingeniería Electroquímica y Aplicaciones Tecnológicas (IEAT)</b>	46
<b>Nanoelectroquímica y Nanotecnología (NEN)</b>	75
<b>Electroquímica Ambiental (EA)</b>	90
<b>Electrodepósitos y Modificación de Superficies (EMS)</b>	127
<b>Corrosión y Tratamientos de Superficies (CTS)</b>	144
<b>Conversión y Almacenamiento de Energía (CAE)</b>	180
<b>Educación en Electroquímica (EE)</b>	200

## Sociedad Mexicana de Electroquímica

### Origen

Para finales de los años setenta, los académicos que realizaban investigación sobre temas relacionados con la electroquímica en México eran realmente pocos. Sólo algunos laboratorios dispersos en el país conformaban la masa crítica de esta rama de la química y trabajaban de manera aislada, prácticamente sin conocerse ni interactuar [1]. Uno de los laboratorios que en estas fechas comenzó a generar investigación en electroquímica fue el de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), con el Dr. Miguel Saloma Terrazas, quien recientemente había obtenido su doctorado en la Universidad de Trondheim, Noruega. Una de las principales metas del doctor Saloma fue difundir y promover su especialidad, por lo que se avocó a buscar financiamiento para invitar a reconocidas personalidades científicas que pudieran incrementar el interés y el desarrollo de la electroquímica en México. Sus esfuerzos se vieron coronados en 1979 con un apoyo por parte de la DGAPA-UNAM que le permitió organizar el primer evento científico en el área de electroquímica en la UNAM, el “Simposio de Electroquímica Moderna y sus Aplicaciones” [1].

Los ponentes del simposio se pudieron contactar con ayuda del profesor Arthur Díaz [1], investigador en electroquímica de la compañía IBM en California. Personalidades internacionales de la talla de Albert Fry, Dennis Evans, Marcel Pourbaix, Alejandro Arvía, Theodore Kuwana, y el mismo Arthur Díaz, quienes representaban académicamente lo mejor de aquellos años, participaron activamente en las actividades de ese evento. El simposio abarcó temas de punta en la investigación científica electroquímica como: uso de semiconductores, bioelectroquímica, electrosíntesis de compuestos orgánicos, métodos electroanalíticos, cinética y mecanismos en electroquímica, electroquímica de la corrosión y fuentes electroquímicas de corriente [1]. En este simposio participaron no sólo personal de la UNAM e invitados, sino también investigadores de los diversos grupos de investigación del país (ESIQUE e IIE), quienes presentaron ponencias y asistieron a las pláticas y talleres que se ofrecieron. Ésta fue la primera vez que la comunidad electroquímica del país se reunía con un objetivo científico, lo que permitió que los participantes se conocieran, intercambiaran experiencias e identificaran las posibles áreas de trabajo conjunto.

Con esta primera experiencia académica, la comunidad electroquímica comenzó a reunirse anualmente en lo que se denominó "Reuniones Académicas de Electroquímica", teniendo lugar la primera en el año de 1979 en el CINVESTAV.

A finales de los años setenta en este centro de investigaciones del IPN, habían comenzado las investigaciones de electroquímica con la llegada de los cooperantes científicos franceses [1] Roger Conan, Gerard Poillerat y Yunny Meas [1]. Estas reuniones eran informales con un carácter de minisimposio y se llevaban a cabo en salones de la institución, con la asistencia de una veintena de personas de diversas

instituciones que hacían trabajos en electroquímica, incluyendo los alumnos de los académicos participantes.

Mucho de los miembros de la SMEQ pertenecen a grupos consolidados en la electroquímica, de quién se destaca su dedicada labor por el desarrollo, impulso y creación de nuevos grupos distribuidos en diferentes estados de la República Mexicana, como son Aguascalientes, Campeche, Chihuahua, Estado de México, México D.F., Guadalajara, Guanajuato, Morelos, Nuevo León, San Luis Potosí, Querétaro, Puebla, Sinaloa, Tijuana, Yucatán y Zacatecas; por mencionar algunos.

### **Formalización de la SMEQ.**

Gracias al interés que despertaron las reuniones de la comunidad electroquímica, se propuso en 1980 la creación de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, con el fin de agrupar a los participantes de las reuniones y cursos. La Sociedad no fue registrada legalmente y operó dos años de manera informal [1].

Los organizadores de las reuniones de la comunidad electroquímica, se encontraron con la necesidad de emitir recibos oficiales o facturas a nombre de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, ya que ninguna institución o entidad gubernamental iba a darle dinero directamente a un organizador sin tener un comprobante fiscal. Fue en gran parte esta necesidad administrativa la que orilla a los organizadores de los congresos, fuertemente apoyados por los grupos del Dr. Yunny Meas y el Dr. Miguel Saloma, a constituir legalmente la Sociedad.

Con fecha del 12 de abril de 1983, ante el Lic. Antonio Velarde Violante, titular de la notaria No. 164, del Distrito Federal, y con número de

registro público de la propiedad 6001, se constituye la Sociedad Mexicana de Electroquímica A.C., con domicilio en México, Distrito Federal, con duración de 99 años, según el acta notarial No. 40,668 (cuarenta mil seiscientos sesenta y ocho). Los miembros fundadores fueron Yunny Meas Vong (Presidente), Miguel Saloma Terrazas (Vicepresidente), Omar Solorza Feria (Secretario) y Guadalupe Alonso Viveros (Tesorero) (Figura 1).

Los estatutos de esta nueva sociedad fueron basados en gran parte en los de asociaciones profesionales sin fines de lucro que ya en aquellos tiempos se encontraban sólidamente consolidadas, como la Sociedad Química de México (SQM) y la Sociedad Mexicana de Física, entre otras. Y en la escritura 218,014; libro 5,702 con fecha del 22 de Noviembre del 2004, ante el Lic. Fausto Rico Álvarez, titular de la notaria No. 6 del Distrito Federal, cuyo testimonio quedo inscrito en el registro público de la propiedad folio 6001, se hizo constar la reforma total de los estatutos sociales de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, Asociación Civil. Para quedar con domicilio en México Distrito Federal [3].

En el artículo 1º, dice: el nombre de la Asociación es: SOCIEDAD MEXICANA DE ELECTROQUIMICA A.C., el cual puede abreviarse con las siglas S.M.E.Q.[3].

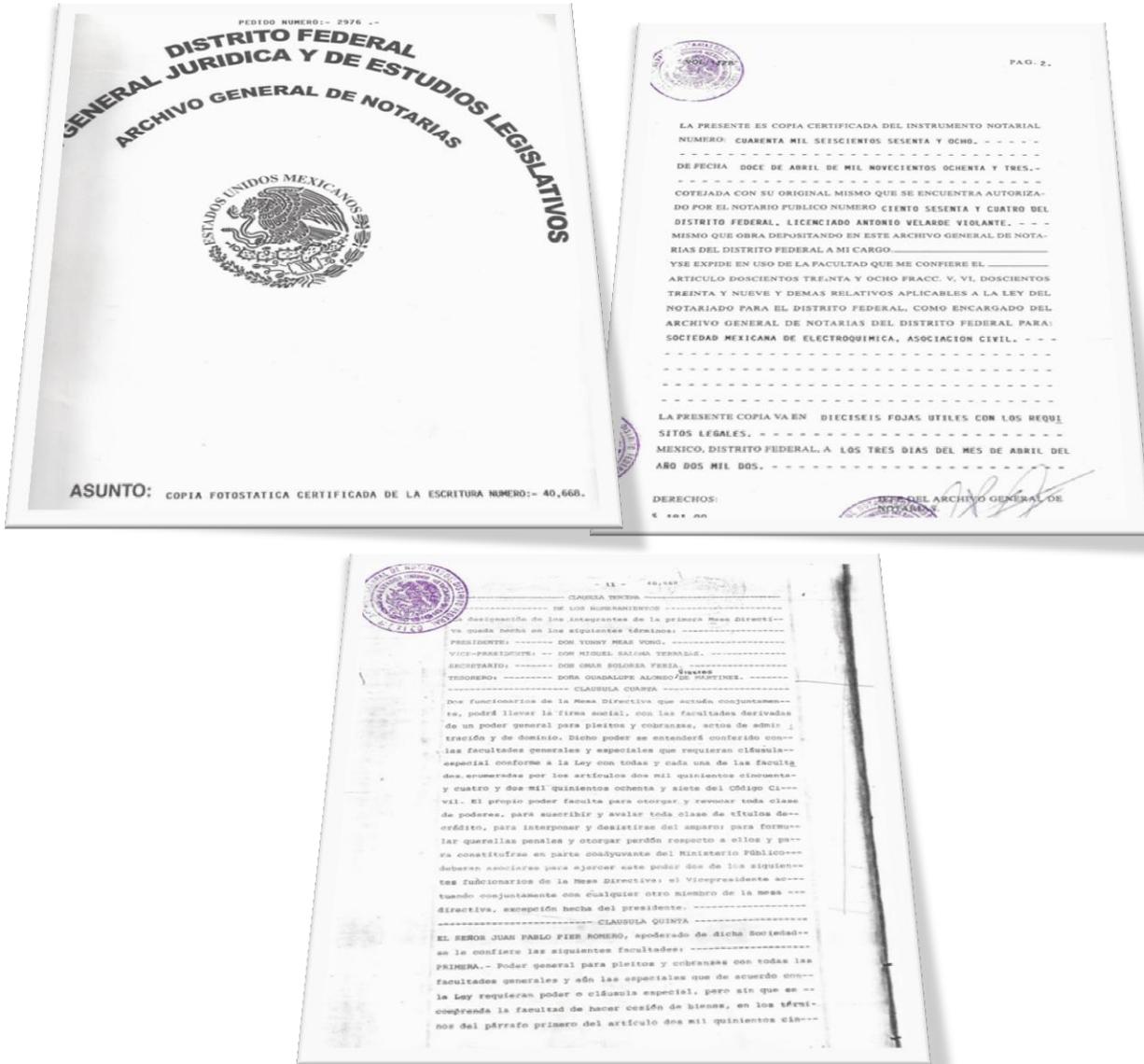


Figura 1. Primer Acta Constitutiva de la SMEQ, 12 de Abril de 1983.

## **Objetivo General**

La Sociedad Mexicana de Electroquímica (SMEQ) tiene como Objeto general procurar, estimular el desarrollo, aprovechamiento y trascendencia positiva de la Ciencia Electroquímica en el País y sus aplicaciones en todas las ramas de la Ciencia – Capitulo 2do- [3].

Para lograr sus fines, agrupará a todas aquellas personas, empresas, grupos e instituciones dedicadas a las tareas de investigación, docencia, desarrollo y aplicación de la Electroquímica, intercambiando experiencias que permitan la actualización y desarrollo planificado de esta ciencia.

## **Presidentes**

La primera mesa directiva de la sociedad Mexicana de Electroquímica A.C. tuvo como presidente al Dr. Miguel Saloma (1980-1982), y la segunda al Dr. Gerard Poillerat (1982-1983), quien se caracterizaba por su gran capacidad como organizador e impulsó los trabajos académicos de la naciente sociedad. A pesar de que para esas fechas la Sociedad no estaba constituida legalmente, ambas mesas directivas continuaron con las reuniones académicas que se celebraban en el CINVESTAV y que se denominaron “Congresos de la Sociedad Mexicana de Electroquímica”. En estos años se organizaron diversos cursos con reconocidos científicos en áreas como: electrocatálisis (1981), electroquímica orgánica (1982), cinética electródica (1982) y un taller de técnicas electroquímicas en la UAM-Iztapalapa (1983) [1].

Después del primer congreso de la SMEQ, se comenzó a buscar tener una organización interna y con ello se propuso tener una mesa directiva compuesta por diversas instituciones, pero esto no fue lo ideal, por carecer de un medio dinámico de ideas y discusión de resultados entre los integrantes de la mesa directiva. Para evitar este tipo de conflictos

se decidió que las mesas directivas estuvieran conformadas por académicos de la misma institución; este modelo se mantuvo durante al menos 15 años [1].

Hoy en día en el artículo 1º. Del Acta Constitutiva de la SMEQ, se define el comité ejecutivo (mesa directiva) el cual estará formado por: Presidente, Vicepresidente, Secretario, Tesorero y de uno a cinco vocales [3]. Este comité será electo cada dos años en la asamblea ordinaria.

El presidente de la SMEQ, es quien forma parte del Comité Ejecutivo de esta Asociación y quien representara oficial, extraoficial y judicialmente a la SMEQ, además de ser el responsable de la buena marcha de la sociedad. De igual forma hará cumplir los estatutos y acuerdos emanados de la misma [3].

En las Tablas 1-3 se enlistan los presidentes y mesas directivas de la Sociedad Mexicana de Electroquímica de 1983 a la fecha.

**Tabla 1.** Presidentes de la SMEQ del 1980-1990.

<b>Periodo</b>	<b>Presidente y Mesa Directiva</b>	
1988 - 1990	<b>Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín</b> Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE	
	José María Malo Tamayo - Secretario Ulises Cano - Vocal	Esteban García Ochoa - Tesorero Libería Mariaca (gepd) - Vocal
1986 - 1988	<b>Dr. Javier Ávila Mendoza</b> Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM) Facultad de Química	
	Ignacio González Martínez - Secretario	Walter López González - Tesorero
1983 - 1986	<b>Dr. Yunny Meas Vong</b> Universidad Autónoma Metropolitana, (UAM-I) Unidad Iztapalapa	
	Omar Solorza Feria - Secretario Guadalupe Alonso Viveros - Tesorero	Miguel Saloma Terrazas - Vicepresidente
1982-1983 No Constituida	<b>Dr. Gerard Poillerat</b> Cinvestav - Instituto Politecnico Nacional	
1980-1982 No Constituida	<b>Dr. Miguel Saloma Terrazas</b> Universidad Nacional Autónoma de México	

**Tabla 2.** Presidentes de la SMEQ del 1990 -2001.

<b>Periodo</b>	<b>Presidente y Mesa Directiva</b>	
1998 -2001	<b>Dr. Yunny Meas Vong</b> Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica - CIDETEQ	
	Raúl Ortega Borges – Secretario Elsa M. Arce Estrada – Tesorera Omar Solorza Feria - Vocal	Ignacio González Martínez – Vicepresidente Silvia Gutiérrez Granados - Vocal
1996 - 1998	<b>Dr. Jorge G. Ibáñez Cornejo</b> Universidad Iberoamericana, UI	
	Rubén Vázquez – Secretario Mercedes Teresita Oropeza – Vocal George Viater - Vocal	Omar Solorza Feria –Tesorero Tomas Hernández – Vocal Silvia Tejeda - Vocal
1994 - 1996	<b>Dr. Ignacio González Martínez</b> Universidad Autónoma Metropolitana, (UAM-I) Unidad Iztapalapa	
	Laura Galicia Luis - Secretaria	María Teresa Ramírez Silva - Tesorera
1992 - 1994	<b>Dra. Elsa M. Arce Estrada</b> Instituto Politécnico Nacional - ESIQIE	
1990 - 1992	<b>Dr. Omar Solorza Feria</b> Instituto Politécnico Nacional - CINVESTAV	

**Tabla 3.** Presidentes de la SMEQ del 2001 -2015.

<b>Periodo</b>	<b>Presidente y Mesa Directiva</b>	
2013 - 2015	<b>Dr. Facundo Almeraya Calderón</b> Universidad Autónoma de Nuevo León, UANL Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, CIIIA	
	Ricardo Orozco Cruz - Secretario José Ángel Cabral Miramontes – Tesorero Citlalli Gaona Tiburcio – Vocal Homero Castañeda López - Vocal	Francisco Javier Rodríguez Gómez – vicepresidente Alberto Martínez Villafañe - vocal Juan Genescá Llongueras - Vocal
2011 - 2013	<b>Dr. Norberto Casillas Santana</b> Universidad de Guadalajara U de G	
	Juan Manríquez – Secretario Juan Manuel Peralta – Tesorero Marina E. Rincón González - Vocal	Facundo Almeraya Calderón – Vicepresidente Bernardo A. Frontana Uribe – Vocal Mario A. Alpuche - Vocal
2009 - 2011	<b>Dr. Manuel E. Palomar Pardavé</b> Universidad Autónoma Metropolitana, (UAM-A) Unidad Azcapotzalco	
	Roel Cruz Gaona – Secretario Leonardo Bernal Haro - Tesorero	Norberto Casillas Santana - Vicepresidente
2007 - 2009	<b>Dra. Margarita Miranda Hernández</b> Universidad Nacional Autónoma de México - Centro de Investigación en Energía	
	Roel Cruz Gaona – Secretario Leonardo Bernal Haro - Tesorero	Manuel E. Palomar - Vicepresidente
2005 - 2007	<b>Dr. Luis A. Godínez Mora Tovar</b> Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, CIDETEQ	
	Francisco J. Rodríguez Gómez – Secretario Leonardo Bernal Haro - Tesorero	Margarita Miranda Hernández - Vicepresidente
2003 - 2005	<b>Dra. Mercedes Teresita Oropeza Guzmán</b> Universidad Autónoma Metropolitana, (UAM-I) Unidad Iztapalapa	
	German Orozco – Secretario Bernardo A. Frontana Uribe – Tesorero Silvia Gutiérrez Granados - Eventos	Luis A. Godínez Mora-Tovar – Vicepresidente Israel Rodríguez – Vocal Norberto Casillas Santana - Vocal
2001 -2003	<b>Dra. Silvia Gutiérrez Granados</b> Universidad Autónoma de Guanajuato, UAGto	
	Adrián Gil - Secretario Bernardo A. Frontana Uribe – Tesorero Norberto Casillas Santana – Vocal	M. Teresita Oropeza Guzmán – Vicepresidente Israel Rodríguez – Vocal Alejandro Alatorre - Vocal



**Figura 2.** Presidentes de la Sociedad Mexicana de Electroquímica 2001-2015.

## Consejo Consultivo

El consejo consultivo se forma en Mayo del 2013, en la reunión de líderes de grupo de la SMEQ, en la Ciudad de Queretaro Qro., donde este consejo se integra por todos los expresidentes de la SEMQ; la función del consejo es:

1. Ser un órgano de consulta y asesoramiento a la mesa directiva en curso.
2. El consejo Consultivo tiene voz, pero no tiene voto en las decisiones que tome la mesa directiva en curso.

3. Participar en diferentes comisiones como: Hacienda y Finanzas, Responsabilidades y Sanciones; y Premios y Reconocimientos.
4. Se nombra un Coordinador del consejo consultivo y tendrá un periodo de dos años, con posibilidad de reelección una vez transcurrido el periodo.
5. Los expresidentes que dejen de asistir dos años seguidos al congreso anual de la SMEQ no podrán ser participes del consejo.

El consejo consultivo está integrado por (tabla 4):

**Tabla 4.** Miembros del Consejo Consultivo de la SMEQ.

<b>Miembros del Consejo Consultivo</b>
Dr. Norberto Casillas Santana
Dr. Manuel E. Palomar Pardavé
Dra. Margarita Miranda Hernández
Dr. Luis A. Godínez Mora-Tovar
Dra. Mercedes Teresita Oropeza Guzmán
Dra. Silvia Gutiérrez Granados
Dr. Yunny Meas Wong
Dr. Jorge G. Ibáñez Cornejo
Dr. Ignacio González Martínez
Dra. Elsa M. Arce Estrada
Dr. Omar Solorza Feria
Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín

El Coordinador y las comisiones del Consejo consultivo están integrados de la siguiente manera (tabla 5).

**Tabla 5.** Coordinador y comisiones del Consejo Consultivo de la SMEQ.

<b>Coordinador</b>
Dr. Luis Godínez Mora Tovar
<b>Comisiones</b>
<b>Hacienda y Finanzas</b>
Dra. Margarita Miranda Hernández
<b>Responsabilidades y Sanciones</b>
Dra. Mercedes Teresita Oropeza Guzmán Dr. Ignacio González Martínez
<b>Premios y Reconocimientos</b>
Dr. Manuel E. Palomar Pardavé Dra. Elsa M. Arce Estrada Dr. Norberto Casillas Santana

## Congresos

Desde años antes, en Sudamérica, se comenzaron a realizar reuniones Latinoamericanas de Electroquímica y Corrosión (RELEC), cuyos principales países participantes eran Argentina, Chile, Venezuela y Brasil. En la V RELEC el Dr. Alejandro Arví, presidente de la entonces Sociedad Latinoamericana de Electroquímica, les propuso a los participantes de instituciones mexicanas que la VI RELEC tuviera como sede México. Los participantes, entre ellos el Dr. Poillerart y su grupo, aceptaron la invitación, regresando a México con la tarea de organizar este congreso internacional. Los asiduos participantes en aquellas Reuniones Académicas de Electroquímica de finales de los setentas y principios de los ochentas, entre los que se encontraban los ahora reconocidos académicos-investigadores Omar Solorza, Joan Genescá, Alvaro García, Yunny Meas, Guadalupe Alonso, Miguel Saloma, Mauricio Castro, Elsa Arce, Javier Ávila y Silvia Tejada, entre otros. [1]. Una vez

aceptado el reto, se organizaron para conseguir apoyos y financiamientos para organizar el congreso.

Una vez constituida la Sociedad, su primer reto a enfrentar fue realizar con éxito en mayo de 1983 la VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión; en Oaxtepec, Morelos (figura 3) [1]. Lo anterior exigió un nivel de comunicación dentro de la Sociedad que no se tenía hasta ese entonces, y que permitió que ésta continuara trabajando posteriormente en otros proyectos. Durante este congreso, además del gran número de participantes latinoamericanos, se logró reunir una gran cantidad de científicos del otro lado del Atlántico, en particular de Portugal, España y Francia, lo cual llamó la atención de los directivos de la Sociedad Latinoamericana de Electroquímica a tal grado, que años después esta sociedad se convirtió en la actual Sociedad Iberoamericana de Electroquímica (SIBAE) [1].

Después de haber tenido éxito en el VI RELEC realizado en México, los miembros de la Sociedad comenzaron a ver qué rumbo tendría esta nueva Organización, y empezaron por buscar una identidad que cumpliera los objetivos para los que fue creada. Dentro de la Sociedad Química de México (SQM) se propuso tener una sección de Electroquímica, y durante el congreso anual de la SQM, se realizaría el congreso de la SMEQ, pero eso no tuvo éxito, por lo que se decidió permanecer como una Sociedad independiente, cuyos intereses están marcados en el acta constitutiva [1].



**Figura 3.** VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión, 1983.

Durante los primeros años la SMEQ, tomando en cuenta los avances de las investigaciones se presentaban de manera indistinta, tanto en el congreso de la SMEQ como en la sección de electroquímica de la SQM (teniendo seis meses de diferencia), La mesa directiva del Dr. Javier Ávila decidió que en lugar de congresos se organizaran foros de discusión sobre temas selectos de electroquímica [1]. Así que en 1987 se realizó el III Foro Nacional de Electroquímica en La Trinidad, Tlaxcala, donde se abordó "la enseñanza de la electroquímica: estado actual y perspectivas". Este evento fue auspiciado por la Universidad Autónoma de Tlaxcala – Departamento de Ingeniería y Química (figura 4.).



**Figura 4.** III Foro Nacional de Electroquímica, 1987.

En 1988, en el Instituto de Investigaciones Científicas de La Universidad de Guanajuato, se llevó a cabo el IV Foro Nacional Experimental de la Electroquímica, donde se abordaron las técnicas electroanalíticas, y se denominó "La enseñanza Experimental de la Electroquímica". En este evento se planteó la necesidad de comunicar por escrito los resultados obtenidos de las investigaciones que todos realizaban. De esta manera se instauró la tradición de publicar como memorias en extenso los trabajos presentados en el congreso anual de la SMEQ [1].

A mediados de los Ochentas los grupos de electroquímica comenzaron a estar más consolidados y tener mayor madurez científica, caracterizada por sus publicaciones en revistas internacionales y la formación de recursos humanos. Unos de los primeros doctores egresados de instituciones mexicanas con especialidad en electroquímica, fueron

Omar Solorza, del Cinvestav-IPN en 1984, y Marco Antonio Quiroz de la Universidad Autónoma Metropolitana – Unidad Iztapalapa, en 1986.

A principio de los años noventa, se comenzó a tener una ruptura dentro de la SMEQ, esto debido a las visiones encontradas sobre la manera de abordar el estudio de dichos fenómenos. Esa situación se presentó entre los grupos de corrosión (quienes representaban una parte importante en los miembros activos de la Sociedad) y de electroquímica analítica. Bajo esta problemática los grupos de corrosión decidieron que un foro mejor para presentar sus trabajos fuera en el congreso de la AMIC (Asociación Mexicana de Ingenieros de Corrosión). Fue hasta el 2001, en el XVI Congreso de la Sociedad realizado en Santiago de Querétaro. Qro; cuando de nueva cuenta los grupos de corrosión tuvieron presencia importante en los eventos de la SMEQ [1].

Se considera que la consolidación de la SMEQ se dió en 1999, cuando el Dr. Yunny Meas, miembro fundador, vuelve a la presidencia de la Sociedad, teniendo la mesa directiva de 1998-2001. En abril de 1999 se organiza en Jurica, Querétaro, el evento denominado "Visión de la electroquímica para el siglo XXI"; ahí se hizo una planeación estratégica donde se analizaron las debilidades y fortalezas de la Sociedad.

A raíz de esta última reunión se cambió la manera de constituir la mesa directiva y se adoptó un modelo donde el presidente se elige y es él quien organiza y compone su propio grupo de trabajo; esto resulta bueno porque ya se tenía un medio de comunicación más eficaz como es el internet. Con estos avances la Sociedad comenzó a tener mayor impulso. En este mismo año, en el XIV Congreso de la SMEQ realizado en Mérida, por el Cinvestav-IPN, las memorias del congreso ya contaban

con registro ISBN, dándole así mayor impacto a los trabajos publicados, hecho que continua hasta el día de hoy [1].

La SMEQ y la Sociedad Iberoamericana de Electroquímica, en mayo del 2000, celebran en conjunto la organización del XIV Congreso Iberoamericano de Electroquímica y XV Congreso de la SMEQ (figura 5), en Oaxaca, Oax. Esta sería la segunda ocasión en donde la SMEQ participa como co-organizador de un evento internacional. Este evento representó un éxito por parte del comité organizador, y se tuvo la presencia de más de diez países entre ellos, España, Portugal y Francia.



**Figura 5.** XIV Congreso Iberoamericano de Electroquímica y XV Congreso de la SMEQ.

En el 2001 se celebra el XVI Congreso de la SMEQ en Santiago de Querétaro, Qro; donde se crea la primera base de datos electrónica de los miembros de la SMEQ, y además se da un seguimiento a las diferentes áreas de trabajo de la comunidad en electroquímica. También

se publicaron *las primeras Jornada de Técnicas Electroquímicas para el control de la Corrosión*, editadas por el Dr. Juan Genescá.

Durante la asamblea de este congreso se decide dar la sede a la UANL (Dra. Leonor Blanco), para que realice el XVII Congreso de la SMEQ (2002), y es por primera vez que el Congreso sale hasta la parte Norte del País. En este congreso se tiene una presencia de más de 113 trabajos y 120 conferencistas. En el 2002, se crea el comité editorial del boletín de la SMEQ "DIPOLLO", el cual buscaba rescatar la idea de los fundadores sobre tener un órgano de difusión y comunicación con los miembros de la Sociedad. Este boletín era electrónico y era enviado a los miembros cuatrimestralmente [4].

En el 2003, el grupo de Corrosión del CIMAV (Doctores; Martínez, Gaona y Almeraya), solicitan la sede del XVIII Congreso de la SMEQ, donde se marca otro nuevo reto, llevar el congreso todavía más hacia al Norte del País, a más de 1500 km de distancia del centro de México. En este Congreso se tuvo un éxito importante, porque se rompieron las distancias y la comunidad electroquímica respondió con su presencia, teniendo más de 137 trabajos orales. En esta ocasión se celebró el XX Aniversario de la SMEQ, donde se hizo una ceremonia conmemorativa y se le entregaron reconocimientos a dos fundadores, el Dr. Miguel Saloma y el Dr. Yunny Meas. Como complemento de las actividades también se publicaron las Segundas Jornadas de Técnicas Electroquímicas para el Control de la Corrosión [5].

En el 2004 el Congreso de la SMEQ, regresa a San Luis Potosí, donde el Instituto de Metalurgia de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, tuvo la sede. Y en el 2005 la SMEQ y la Sociedad Mexicana de Hidrogeno organizan el XX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica,

V Congreso Anual de la SMH, que tuvo lugar en Puente de Ixtla, Morelos [6].

En el ámbito internacional, la Sociedad ha buscado acercamiento con las sociedades internacionales para realizar intercambios y organización de eventos en conjunto. En este tenor, la Electrochemical Society (ECS-USA) y la SMEQ en el 2006 realizan en Cancun, Quintana Roo de manera conjunta el XXI Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 210th Meeting of The Electrochemical Society (figura 6).



**Figura 6.** XXI Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 210th Meeting of The Electrochemical Society.

La Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo en el 2007 organiza el XXII Congreso de la SMEQ, teniendo en conjunto la VII semana de Geología, Minería, Metalurgia y Materiales, de esta Universidad.

Y en el 2008 el XXIII Congreso de la SMEQ vuelve a salir hacia una de las fronteras más lejanas del país, Ensenada Baja California. La organización fue un esfuerzo conjunto entre el Tecnológico de Tijuana y

la Universidad Autónoma de Baja California. En este congreso por primera vez se abordan las temáticas de Nanotecnología, y además se lleva a cabo la primer reunión de la “Mexican Section of the Electrochemical Society”, donde la mesa directiva está conformada por los Doctores: Ignacio González, Manuel Palomar y Bernardo Frontana. Con este congreso se demostró que la comunidad de electroquímica ya no tiene fronteras y su presencia es cada día mayor [7].

En 2009 el XXIV Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, se lleva a cabo en una de las zonas más turísticas del país, Puerto Vallarta, Jalisco. Este evento tuvo como sede la Universidad de Guadalajara (CUCEI), y fue coordinado por el Grupo de Electroquímica y Corrosión del Dr. Norberto Casillas. A partir de este congreso se hacen en conjunto con la Sociedad Mexicana de Electroquímica las reuniones de la sección México de la Electrochemical Society (2nd Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society).

El XXV Congreso de la SMEQ (2010) tiene como sede uno de los Estados con menor participación en la Sociedad, y a través de la Universidad Autónoma de Zacatecas se lleva a cabo la organización del evento. Es importante mencionar que desde este congreso ya se venía analizando y elaborando la solicitud de la sede del congreso de la International Society of Electrochemical (ISE).

Y después de más de 20 años, el Congreso de la SMEQ regresa a la Ciudad de México, teniendo como sede a la Facultad de Química de la UNAM, donde el Dr. Francisco Javier Rodríguez, presidente del comité organizador lleva a cabo en 2011 el XXVI Congreso de la SMEQ y 4th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society. En esta ocasión se tuvieron distinguidos invitados como Bernard Tribollet,

Vincent Vivier, Mark Orazem, quienes además de dictar conferencias magistrales, impartieron un curso de Impedancia Electroquímica de primer nivel [8].

El Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (UAEM-UNAM) y Facultad de Química de la UNAM en el 2012, bajo la presidencia de los Doctores Carlos E. Barrera Díaz y Bernardo A Frontana Uribe, realizan el XXVII Congreso de la SMEQ y la 5th Meeting of the Mexican Section the Electrochemical Society. La Sociedad en este congreso ya encaraba dos grandes desafíos más, la organización conjunta con la ISE del 63th Meeting of the International Electrochemistry Society ISE 2013, a celebrarse en la ciudad de Querétaro en el mes de septiembre de 2013; y preparar con la ECS una edición más del Joint Meeting of the Electrochemical Society y la SMEQ "ECS-SMEQ 2014", a celebrarse en la ciudad de Cancún, México.; al cual asistió el Dr. Paul A. Kohl, vicepresidente de la ECS. En ambos eventos, sería puesta a prueba una vez más la capacidad de organización, compromiso y trabajo de todos los miembros de la SMEQ [9].

En la asamblea del congreso pasado (2012) y en el 2013, se tomó la decisión de no llevar a cabo el Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, en el formato acostumbrado, pero si llevar a cabo una reunión de líderes de grupo, previo al congreso del ISE, esto con la finalidad de no perder identidad y continuar teniendo presencia nacional.

En mayo del 2013 se realiza entonces el XXVIII Congreso de la SMEQ, denominándolo "Reunión de Líderes de Grupo a Nivel Nacional" [10], y la 6th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society. En este evento por primera vez se realizó la votación electrónica en la

página web de la Sociedad, para elegir al nuevo vicepresidente de la SMEQ. Y en el mes de septiembre se llevó a cabo en la Ciudad de Santiago de Querétaro el 63th Meeting of the International Electrochemistry Society ISE 2013 (figura 7). Los chaiman principales fueron los Doctores Yunny Meas e Ignacio González, desde luego respaldados por un comité local, miembros de la SMEQ. Y como complemento al evento del ISE, se realiza el Symposium MicroEchem 2013 "New process and materials based on electrochemical concepts at the microscopic level" en Amealco de Bonfil, Querétaro.



**Figura 7.** 63th Meeting of the International Electrochemistry Society ISE 2013.

En Octubre del 2014 la SMEQ en coordinación con la ECS, vuelven a organizar otro evento conjunto; el 226th Meeting of the Electrochemical Society, XXIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y 7th Meeting of the Mexico Section of the Electrochemical Society. Este se llevo a cabo en Cancún, Quintana Roo, México; teniendo como comité

organizador a la mesa directiva 2013-2015, y como Chairmen a los doctores Facundo Almeraya y Norberto Casillas (figura 8) [11].



**Figura 8.** 226th Meeting of the Electrochemical Society, XXIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y 7th Meeting of the Mexico Section of the Electrochemical Society.

Y ahora, en Boca del Río Veracruz, en mayo del 2015, se realizan el XXX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y 8th Meeting of the Mexico Section of the Electrochemical Society.

Después de más de 30 años impulsados la Electroquímica en México, la Sociedad Mexicana de Electroquímica lleva ya un largo camino recorrido, y hoy en día es una Sociedad consolidada que trabaja para alcanzar sus objetivos. Esto se ha logrado gracias a la participación, entusiasmo, e interés de todos los miembros activos, de las mesas directivas, de los presidentes de la SMEQ, y desde luego de los estudiantes de esta Sociedad que son el brillo y entusiasmo de la comunidad.

En las siguientes tablas 6-8, se enlistan todos los congresos de la SMEQ con sus respectivas ciudades sede, instituciones participantes y organizadores.

**Tabla 6.** Congresos de la SMEQ de 1983 – 1989.

<b>Año</b>	<b>Lugar/institución</b>	<b>Nombre del Congreso</b>
1983	Oaxtepec, Mor.	VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión
1984	Guanajuato, Gto. <b>UGto</b>	Primer Encuentro de Electroquímica
1985	Pachuca, Hgo. <b>UAEH</b>	Segundo Encuentro de electroquímica
1986	Puebla, Pue. <b>BUAP</b>	I congreso Nacional de Electroquímica
1987	La Trinidad, Tlax. <b>UAT</b>	III Foro Nacional de Electroquímica
1988	Guanajuato, Gto. <b>UGto -UNAM</b>	IV Foro Nacional Experimental de Electroquímica
1989	Cd. de México <b>(ESIQIE-IPN)</b>	IV Congreso Nacional de Electroquímica y Corrosión

**Tabla 7.** Congresos de la SMEQ de 1990 -1999.

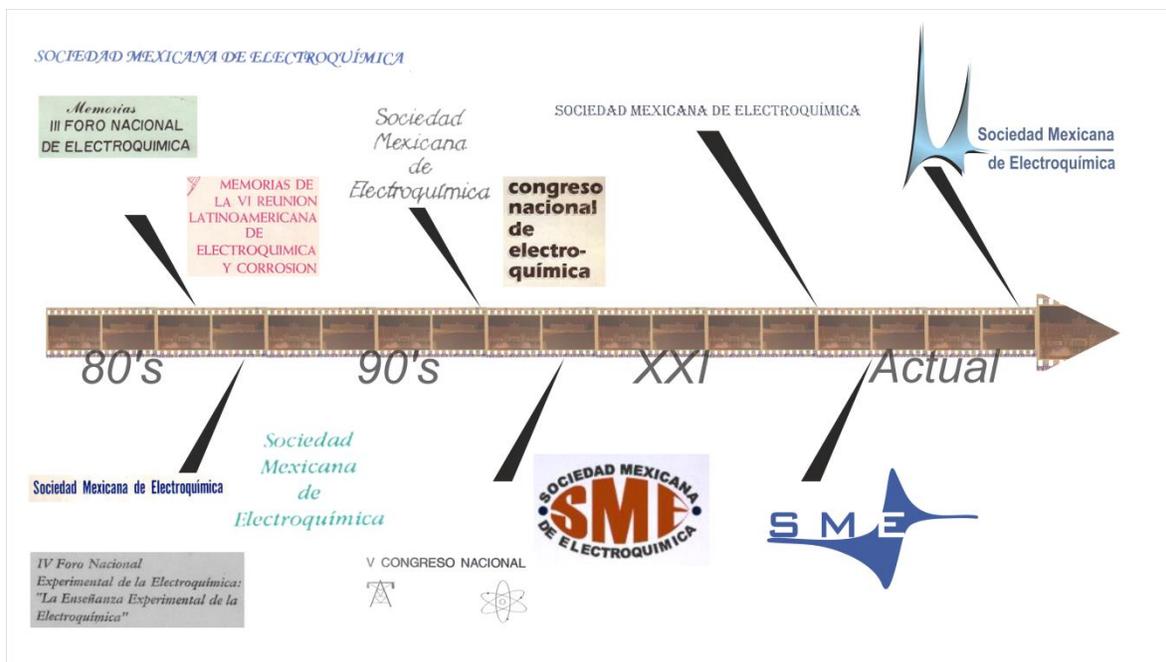
<b>Año</b>	<b>Lugar/Institución</b>	<b>Nombre del Congreso</b>
1990	Cuernavaca, Mor. <b>IIE</b>	V Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica
1991	Guadalajara, Jal. <b>UA de G</b>	VI Congreso Nacional de Electroquímica
1992	Tequesquitengo, Mor. <b>IIE</b>	VII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica
1993	Querétaro, Qro. <b>UNAM-FQ</b>	VIII Congreso Nacional de Electroquímica, II Simposio Internacional de Electroquímica Aplicada,
1994	Cuatla, Mor. <b>UAM-I</b>	IX Congreso Nacional de Electroquímica
1995	San Luis Potosí, SLP <b>UASLP</b>	X Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica
1996	Jalapa, Ver. <b>UAM-I</b>	XI Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica
1997	Guanajuato, Gto. <b>UGto</b>	XII Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica
1998	Torreón, Coah. <b>Met-Mex Peñoles S.A. de C.V.</b>	XIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica
1999	Mérida, Yucatán <b>Cinvestav-IPN, Unidad Merida</b>	XIV Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica. ISBN 970-92358-0-X

**Tabla 8.** Congresos de la SMEQ del 2000 – 2015.

<b>Año</b>	<b>Lugar/institución</b>	<b>Nombre del Congreso</b>
2000	Oaxaca, Oax. <b>SMEQ-SIBAE</b>	XV Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, XIV Congreso de la SIBAE . ISBN 970-18-4435-1
2001	Querétaro, Qro. <b>CIDETEQ</b>	XVI Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, I Jornada de Técnicas Electroquímicas para el Control y Estudio de la Corrosión. ISBN 970-18-6479-4
2002	Monterrey, N.L. <b>UANL - FCQ</b>	XVII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, ISBN 970-18-8034-X
2003	Chihuahua, Chih. <b>CIMAV</b>	XVIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, II Jornadas de Técnicas Electroquímicas para el Control de la Corrosión. ISBN 968-5742-01-4
2004	San Luis Potosí, SLP. <b>UASLP</b>	XVIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica
2005	Puente de Ixtla, Mor. <b>SMEQ-SMH</b>	XX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, V Congreso Anual de la SMH
2006	Cancún, Qro. <b>ECS-SMEQ</b>	XXI Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 210th Meeting of The Electrochemical Society.
2007	Pachuca, Hgo. <b>UAEH</b>	XXII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, VII Semana de Geología, Minería, Metalurgia y Materiales
2008	Ensenada, B.C. <b>UABC-ITT</b>	XXIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 1st Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society
2009	Puerto Vallarta, Jal. <b>U de G</b>	XXIV Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 2nd Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society. ISBN 978-970-764-739-8
2010	Zacatecas, Zac. <b>UAZ</b>	XXV Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 3 th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society.
2011	México, D.F. <b>UNAM-FQ</b>	XXVI Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica 4th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society. ISBN 978-607-02-2336-5
2012	Toluca, Edo de Méx. <b>UAEM-UNAM</b>	XXVII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 5 th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society. ISBN 978-607-95871-0-9
2013	Queretaro, Qro. <b>SMEQ</b>	XXVIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 6th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society. "Reunión de Líderes de Grupo a Nivel Nacional".
2014	Cancun, Quintana Roo <b>ECS-SMEQ</b>	226th Meeting of the Electrochemical Society, XXIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y 7th Meeting of the Mexico Section of the Electrochemical Society
2015	Boca del Río, Ver. <b>UV</b>	XXX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y 8th Meeting of the Mexico Section of the Electrochemical Society

## Logotipo de la SMEQ

Con el paso de los años, la Sociedad Mexicana de Electroquímica, pudo establecer un logotipo que la permitiera identificar y le diera personalidad (figura 9). Durante los primeros congresos de la Sociedad solamente se empleaba el nombre de la Asociación, pero a finales de los 90's, en el congreso organizado en Mérida, Yucatán, por el Cinvestav, se intentó tener un logotipo con la abreviatura o las siglas de la Sociedad. Ya para el congreso del 2002, organizado por la UANL-Facultad de Ciencias Químicas, en Monterrey, se presentó un logotipo a través de un "Voltagrama (gráfico que permite medir la intensidad de la corriente que atraviesa un electrodo por la aplicación de una diferencia de potencial)", en conjunto con las iniciales de la Sociedad. Este gráfico permitiría darle personalidad e identidad a la Sociedad. Posteriormente en el congreso del 2003 en el CIMAV en Chihuahua, Chih, el logo fue cambiado nuevamente, tratando de evitar confusiones con otros organismos. Se eliminaron las iniciales de la Sociedad (SME), dejando su nombre completo "Sociedad Mexicana de Electroquímica", y manteniendo el voltagrama. Hoy en día ese es el logotipo que se utiliza de manera oficial en la Sociedad (Figura 10). Este logo fue diseñado por Josefina González de la Vara, diseñadora que trabajó con la mesa directiva 2001-2003 bajo la presidencia de la Dra. Silvia Gutiérrez Granados.



**Figura 9.** Logotipos de la Sociedad Mexicana de Electroquímica 1983-2015.



**Figura 10.** Logotipo actual de la Sociedad Mexicana de Electroquímica.

## Divisiones

La Sociedad Mexicana de Electroquímica, con el paso de los años fue buscando cubrir las diferentes temáticas de los miembros participantes, y no fue hasta el congreso de 2001 donde se definió establecer 10 Divisiones en las diferentes áreas de la Electroquímica y Corrosión. Hoy en día se está trabajando, en que cada división cuente con un Coordinador y un Secretario de División.

**Tabla 9.** Divisiones de la SMEQ.

Divisiones	Abreviación
Electroquímica analítica	EA
Ingeniería electroquímica y aplicaciones tecnológicas	IEAT
Electroquímica molecular y bioelectroquímica	EMB
Electroquímica orgánica y de productos naturales	EO
Nanoelectroquímica y nanotecnología	NEN
Electroquímica ambiental	EA
Electrodepósitos y modificación de superficies	EMS
Corrosión y tratamientos de superficies	CTS
Conversión y almacenamiento de energía	CAE
Educación en electroquímica	EE

## Referencias

- [1]. Frontana-Uribe B.A. "Reseña "Vigésimo aniversario de la fundación de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (SMEQ)" Bol. Soc. Quím. Méx. 2007, 1(1), 54-58.  
Nota: El editor en Jefe del JMCS y la SQM, han permitido utilizar material de este artículo.
- [2]. Acta Constitutiva de la SMEQ No. 40,668. 12 de abril de 1983, ante el Lic. Antonio Velarde Violante, titular de la notaria No. 164, del Distrito Federal. Y con número de registro público de la propiedad 6001.
- [3]. Acta Constitutiva de la SMEQ No. 218,014; libro 5,702 con fecha del 22 de Noviembre del 2004, ante el Lic. Fausto Rico Álvarez, titular de la notaria No. 6 del Distrito Federal
- [4]. Memorias del XVII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, ISBN 970-18-8034-X.
- [5]. Memorias del XVIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, II Jornadas de Técnicas Electroquímicas para el Control de la Corrosión. ISBN 968-5742-01-4.
- [6]. Memorias del XX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, V Congreso Anual de la SMH
- [7]. Memorias del XXIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica,  
1st Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society.
- [8]. Memorias del XXVI Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica  
4th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society. ISBN 978-607-02-2336-5.
- [9]. Memorias del XXVII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica,  
5 th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society. ISBN 978-607-95871-0-9.

- [10]. "Reunión de Líderes de Grupo a Nivel Nacional". XXVIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 6th Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society.
- [11]. Libro de resúmenes 226th Meeting of the Electrochemical Society, XXIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y 7th Meeting of the Mexico Section of the Electrochemical Society.

# DIVISIONES DE LA SMIEQ

## ***Electroquímica Analítica (EA)***

---

Coordinadora: ***Dra. Ma. Teresa Ramírez Silva***<sup>1</sup>

### Colaboradores

Silvia Corona Avendaño<sup>2</sup>  
Mario Alberto Romero Romo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa  
Departamento de Química  
Av. San Rafael Atlixco #186,  
Col. Vicentina, C.P. 09340, México, D.F.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Metropolitana - Azcapotzalco  
Departamento de Materiales  
Av. San Pablo #180, Col. Reynosa-Tamaulipas  
C.P. 02200, México, D.F.

## Resumen

En 1983 se llevó a cabo la VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión en México, y dentro de este foro se presentaron trabajos de todos los campos de la electroquímica, de varios países; a partir de esta reunión se iniciaron los trabajos en diferentes foros de electroquímica, llegando al XXX Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de Electroquímica y con ello el desarrollo de la Electroquímica Analítica. En este capítulo se presenta el avance en investigaciones de estos temas por investigadores mexicanos.

## Introducción

En 1983 se llevó a cabo la VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión en México, se presentaron trabajos en el simposio de Electroquímica Orgánica y Electroanalítica, concernientes a: estudio electroquímico de complejos de cobalto, mecanismo de reducción de compuestos organomercuriales, determinación de Cadmio en ácido fosfórico, pKa del ionóforo nigericina y su mecanismo de transporte. Estudios Electroquímicos de complejos homo y heterobinucleares de Cu, Ni y Fe, conteniendo ligantes dialquilditiocarmabato, Construcción de un instrumento para voltamperometría cíclica, Determinación de plomo en gasolina por polarografía de desplazamiento (1-7). La Electroquímica Analítica siguió desarrollándose y en la actualidad existen varios grupos en la República Mexicana.

Entre los temas de investigación que se han desarrollado en México se presentan las siguientes investigaciones que han sido publicadas en revistas indizadas y muestran la calidad del trabajo que se ha presentado en los congresos de la Sociedad Mexicana de Electroquímica.

## Investigaciones

**Neurotransmisores e interferentes.** Se aportó al conocimiento básico de la electroquímica de la dopamina en disolución acuosa y por primera vez se determinó el efecto que tiene el dodecilsulfato de sodio sobre su proceso de oxidación y la interacción como complejo supramolecular con especies químicas como la ciclodextrina [8-10]. Con base en los estudios anteriores se han desarrollado sensores electroquímicos para la cuantificación selectiva de dopamina en disolución acuosa, y aún en presencia de dos de sus mayores interferentes: ácido ascórbico y ácido úrico, utilizando modificaciones de los electrodos que facilitaron la cuantificación [11-16]. Se han desarrollado además sensores electroquímicos para la detección de dopamina con base a diferentes estrategias de modificación de electrodos como, nanotubos de carbono de multipared, utilizando un composite de carbón con PVC, Poli-amidoamina (PAMAM), electrodos modificados con grafeno, [17-21]. Hay otros trabajos para la determinación de ácido úrico utilizando diferentes materiales como ciclodextrinas, nanotubos de carbono dispersos en polilisisina y nanotubos de carbono multipares [22-24].

**Desarrollo de Sensores y Biosensores.** Se desarrollaron biosensores electroquímicos para la determinación de glucosa utilizando configuraciones del tipo película gruesa (thick film por su designación en inglés y screen-printed), con materiales composite y biocomposite y resina epóxica y en flujo continuo y polímeros conductores [25-28], también se desarrollaron biosensores para determinación de colesterol, pesticidas utilizando acetilcolinesterasa modificada genéticamente, y tirosinasa y lacasa para determinar capacidad antioxidante [29-32]. Se desarrollaron sensores para la determinación de diferentes iones entre los que se encuentran nitratos, SDS entre otros [33, 34].

### **Síntesis y caracterización de nuevos polímeros conductores**

Se demostró por primera vez que la ciclodextrina puede formar un polímero conductor mediante su oxidación electroquímica en disolución acuosa y la determinación de metales con este polímero. [35-37].

**Otras contribuciones.** Se sintetizó, caracterizó (mediante estudios teóricos y experimentales) y demostró por primera vez, que la molécula 5-amino-1,10 fenantrolina puede formar un polímero conductor. Se obtuvo la caracterización teórica y experimental de la oxidación de fármacos, en medio acuoso y la determinación de sus constantes fisicoquímicas [38, 39], entre otros estudios más que se han desarrollado por diferentes investigadores mexicanos.

### **Conclusión**

Se ha desarrollado Electroquímica Analítica y se ha dado a conocer con muchas publicaciones en revistas indizadas.

### **Agradecimientos**

A todos aquellos que han dedicado su tiempo a la investigación en Electroquímica Analítica y a todos los que no se incluyeron pero han tenido una importante participación en este desarrollo.

## Referencias

- [1]. O Reyes Salas, J. Devynck, Y. Robin, Estudio electroquímico de complejos de cobalto. Memorias de la VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión. Oaxtepec Morelos 15-20 de Mayo 1983. Trabajo D-14 páginas 575-576.
- [2]. M.T. Ramírez-Silva, A. Diaz. Mecanismos de reducción de un compuesto organomercurial disustituido. Memorias de la VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión. Oaxtepec Morelos 15-20 de Mayo 1983. Trabajo D-13 páginas 568-574.
- [3]. J.L. González y J. de Gyves, Determinación de Cadmio en ácido fosfórico. Memorias de la VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión. Oaxtepec Morelos 15-20 de Mayo 1983. Trabajo D-24 páginas 642-649.
- [4]. R. Alva, G. Allende, E. Arzt, M. Toro-C, S. Estrada-O. pKa del ionóforo nigericina y su mecanismo de transporte. Memorias de la VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión. Oaxtepec Morelos 15-20 de Mayo 1983. Trabajo D-25 páginas 650-657.
- [5]. R.A. Contreras, R. I. Urbina, Estudios Electroquímicos de complejos homo y heterobinucleares de Cu, Ni y Fe, conteniendo ligantes dialquilditiocarmabato. Memorias de la VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión. Oaxtepec Morelos 15-20 de Mayo 1983. Trabajo D-15 páginas 577-579.
- [6]. A. García Torres, Construcción de un instrumento para voltamperometría cíclica. Memorias de la VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión. Oaxtepec Morelos 15-20 de Mayo 1983. Trabajo D-27 páginas 671-685.
- [7]. Ma. T. Torres de Luna y A. García Torres, Determinación de plomo en gasolina por polarografía de desplazamiento. Memorias de la VI Reunión Latinoamericana de Electroquímica y Corrosión. Oaxtepec Morelos 15-20 de Mayo 1983. Trabajo D-26 páginas 658-670.

- [8]. S. Corona-Avenidaño, G. Alarcón-Angeles, M.T. Ramírez-Silva, G. Rosquete-Pina, M. Romero-Romo and M. Palomar-Pardavé. On the electrochemistry of dopamine in aqueous solution. Part I: The role of [SDS] on the voltammetric behavior of dopamine on a carbon paste electrode. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2007, 609, 17-26
- [9]. S. Corona-Avenidaño, M.T. Ramírez-Silva, M. Romero-Romo, A. Rojas-Hernández, M. Palomar-Pardavé, Influence of the HClO<sub>4</sub> concentration on the  $\beta$ -CD electropolymerization over a carbon paste electrode and on dopamine's electrochemical response, *Electrochimica Acta* 2013, 89, 854–860.
- [10]. M. Palomar-Pardavé, S. Corona-Avenidaño, M. Romero-Romo, G. Alarcón-Angeles, A. Merkoçi, M. T. Ramírez-Silva, Supramolecular interaction of dopamine with  $\beta$ -cyclodextrin: An experimental and theoretical electrochemical study, *Journal of Electroanalytical Chemistry* 2014, 717-718, 103–109.
- [11]. G. Alarcón-Angeles, Silvia Corona-Avenidaño, Manuel Palomar-Pardavé, Alberto Rojas-Hernández, M. Romero-Romo and M. T. Ramírez-Silva. Selective electrochemical determination of dopamine in the presence of ascorbic acid using sodium dodecyl sulfate micelles as masking agent *Electrochimica Acta*, 2008, 53, 3013-3020.
- [12]. G. Alarcón-Angeles, B. Pérez-López, M. Palomar-Pardave, M.T. Ramírez-Silva, S. Alegret, A. Merkoçi, Enhanced host-guest electrochemical recognition of dopamine using cyclodextrin in the presence of carbon nanotubes, *Carbon* 2008, 46, 898-906.
- [13]. S. Corona-Avenidaño, M. T. Ramírez Silva, M. Palomar-Pardavé, Leonardo Hernández Martínez, M. Romero Romo, G. Alarcón Ángeles. Influence of CTAB on the electrochemical behavior of dopamine and on its analytic determination in the presence of ascorbic acid. *J Appl Electrochem* 2010, 40, 463–474,

- [14].E. Colín-Orozco, S. Corona-Avendaño, M. T. Ramírez-Silva, M. Romero-Romo, M. Palomar-Pardavé. On the Electrochemical Oxidation of Dopamine, Ascorbic Acid and Uric Acid onto a Bare Carbon Paste Electrode from a 0.1 M NaCl Aqueous Solution at pH 7, *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2012, 7, 6097–6105
- [15].E. Colín-Orozco, M.T. Ramírez-Silva, S. Corona-Avendaño, M. Romero-Romo, M. Palomar-Pardavé, Electrochemical quantification of dopamine in the presence of ascorbic acid and uric acid using a simple carbon paste electrode modified with SDS micelles at pH 7, *Electrochimica Acta* 2012, 85, 307-313.
- [16].J. Aldana González, M. Palomar Pardavé, S. Corona Avendaño, M.G. Montes de Oca, M.T. Ramírez-Silva, M. Romero-Romo. Gold nanoparticles modified-ITO electrode for the selective electrochemical quantification of dopamine in the presence of uric and ascorbic acids. *Journal of Electroanalytical Chemistry* 2013, 706, 69–75
- [17].C .Guzmán, G. Orozco, Y. Verde, S. Jimenez, L.A Godinez., E. Juaristi, E. Bustos Hydrogen peroxide sensor based on modified vitreous carbon with multiwall carbon nanotubes and composites of Pt nanoparticles-dopamine. *Electrochimica Acta*, 2009, 54, 1728-1732.
- [18].R. Aguilar, M.M. Davila, M.P. Elizalde, J. Mattusch, R.Wennrich, Capability of a carbon-polyvinylchloride composite electrode for the detection of dopamine, ascorbic acid and uric acid. *Electrochimica Acta* 2004, 49, 851-859.
- [19].M.G. Garcia, G.M.E. Armendariz, L.A. Godinez, J. Torres, S. Sepulveda-Guzman, E. Bustos. Detection of dopamine in non-treated urine samples using glassy carbon electrodes modified with PAMAM dendrimer-Pt composites. *Electrochimica Acta*, 2011, 56, 7712-7717.
- [20].E.B. Bustos, Ma.G.G. Jimenez, B.R. Diaz-Sanchez, E. Juaristi, T.W. Chapman, L.A. Godinez. Glassy carbon electrodes modified with composites of starburst-PAMAM dendrimers containing metal

nanoparticles for amperometric detection of dopamine in urine, *Talanta* 2007, 4, 1586-1592.

- [21].F. Gutierrez, F.N. Comba, A. Gasnier, A Gutierrez , L. Galicia, C. Parrado, M.D.Rubianes, G.A. Rivas. Graphene paste electrode: Analytical applications for the quantification of dopamine, phenolic compounds and ethanol. *Electroanalysis*, 2014, 26, 1694-1701.
- [22].M. Ramirez-Berriozabal, L. Galicia, S. Gutierrez-Granados, J.S. Cortes, P. Herrasti. Selective electrochemical determination of uric acid in the presence of ascorbic acid using a carbon paste electrode modified with  $\beta$ -cyclodextrin. *Electroanalysis*, 2008, 20, 1678-1683
- [23].M.C. Rodriguez , J. Sandoval, L. Galicia, S.Gutierrez, G.A. Rivas. Highly selective determination of uric acid in the presence of ascorbic acid at glassy carbon electrodes modified with carbon nanotubes dispersed in polylysine, *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 2008, 134, 559-565
- [24].A. Gutierrez, M.L. Lozano , L. Galicia, N.F. Ferreyra, G.A. Rivas Electrochemical sensing of uric acid using glassy carbon modified with multiwall carbon nanotubes dispersed in polyethylenimine, *Electroanalysis*, 2014, 26, 2191-2196.
- [25].C.A. Galan-Vidal, J. Munoz, C. Dominguez, S. Alegret. Glucose biosensor strip in a three electrode configuration based on composite and biocomposite materials applied by planar thick film technology *Sensors and Actuators, B: Chemical Sensors*, 1998, B52, 257 263.
- [26].C.A. Galan-Vidal, J. Munoz, C. Dominguez, S. Alegret. Glucose biosensor based on a reagentless graphite-epoxy screen-printable biocomposite, *Sensors and Actuators, B: Chemical* 1997, 45, 55-62.
- [27].G.A. Alvarez-Romero, A. Rojas-Hernandez, A. Morales-Perez, M.T. Ramirez-Silva. Determination of  $\beta$ -D-glucose using flow injection analysis and composite-type amperometric tubular biosensors, *Biosensors and Bioelectronics*, 2004, 19, 1057-1065.

- [28].M.L. Lozano, M.C. Rodriguez, P. Herrasti, L. Galicia, G.A. Rivas  
Amperometric response of hydrogen peroxide at carbon nanotubes  
paste electrodes modified with an electrogenerated poly(Fe(III)-5-  
amino-phenantroline. Analytical application, for glucose biosensing.  
Electroanalysis, 2010, 22, 128-134
- [29].M. Hernández Cruz, C. A. Galán Vidal, G. A. Álvarez Romero, M. T.  
Ramírez Silva, M. E. Paez Hernández, J. L. González Vidal. Behavior of  
two and three electrode configuration and different mediator in working  
electrode on development of disposable screen printing biosensors for  
determination of free cholesterol. J.Mex. Chem. Soc. 2013, 57, 47-53.
- [30].G. Valdés-Ramírez, M. Cortina, M. T. Ramírez-Silva and J. L. Marty,  
Acetylcholinesterase-based biosensors for quantification of carbofuran,  
carbaryl, methylparaoxon, and dichlorvos in 5% acetonitrile, Analytical  
and Bioanalytical Chemistry, 2008, 392, 699-707.
- [31].G. Valdés-Ramírez, D. Fournier, M. T. Ramírez-Silva and J.-L. Marty  
Sensitive amperometric biosensor for dichlorvos quantification:  
Application to detection of residues on apple skin Talanta, 2008, 74,  
741-746.
- [32].P. Ibarra-Escutia, J. Juarez Gómez, C. Calas-Blanchard, J.-L. Marty, M.  
T. Ramírez-Silva, Amperometric biosensor based on a high resolution  
photopolymer deposited onto a screen-printed electrode for phenolic  
compounds monitoring in tea infusions Talanta 2010, 81 1636–1642.
- [33].G.A. Alvarez-Romero, M.E. Palomar-Pardave, M.T. Ramirez-Silva.  
Development of a novel nitrate-selective composite sensor based on  
doped polypyrrole. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2007, 387,  
1533-1541.
- [34].G.A. Alvarez-Romero, A. Morales-Perez, A. Rojas-Hernandez, M.  
Palomar-Pardave, M. T. Ramirez-Silva. Development of a tubular sensor  
based on a polypyrrole-doped membrane for the potentiometric

- determination of the dodecylsulfate anion in a FIA system. *Electroanalysis*, 2004, 16, 1236-1243.
- [35].G. Roa-Morales, M. T. Ramírez-Silva, L. Galicia, Carbon paste electrodes electrochemically modified with cyclodextrins, *Journal of Solid State Electrochemistry* 2003, 7, 355-360.
- [36].G. Roa, M.T. Ramírez-Silva, M.A. Romero-Romo, L. Galicia. Determination of lead and cadmium using a polycyclodextrin-modified carbon paste electrode with anodic stripping voltammetry, *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 2003, 377, 763-769.
- [37].G. Roa-Morales, M. T. Ramírez-Silva, R. López González, L. Galicia and M. Romero-Romo. Electrochemical characterisation and determination of mercury using carbon paste electrodes modified with cyclodextrins. *Electroanalysis*, 2005, 17, 694-700.
- [38].J.A. Cobos-Murcia, L. Galicia, A. Rojas-Hernández, M.T. Ramirez-Silva, R. Álvarez-Bustamante, M. Romero-Romo, G. Rosquete-Pina., M. Palomar-Pardave. Electrochemical polymerisation of 5-amino-1,10-phenanthroline onto different substrates. Experimental and theoretical study *Polymer*, 2005, 46, 9053-9063.
- [39].M.T. Ramirez-Silva, D.S. Guzmán-Hernández, A. Rojas Hernández, A. Galano, S. Corona-Avenidaño, M. Romero-Romo, M. Palomar Pardave. Spectro-electrochemical and DFT study of tenoxicam metabolites formed by electrochemical oxidation. *Electrochimica Acta* 2013,111 314-323

# ***Ingeniería Electroquímica Y Aplicaciones Tecnológicas (IEAT)***

---

Coordinador: ***Dr. Norberto Casillas Santana***<sup>3</sup>

## Colaboradores

Alejandra Carreón Álvarez<sup>1</sup>

Alicia Rodríguez Arreola<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Guadalajara.  
Departamento de Ciencias Exactas y Naturales.  
Centro Universitario de los Valles (CUVALLES).  
Carretera Guadalajara-Ameca Km. 45.5, C.P. 46600, Ameca, Jalisco, México.

<sup>2</sup>Universidad de Guadalajara  
Departamento de Ingeniería Química. Departamento de Química.  
Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías..  
Blvd. Marcelino García Barragán #1451, CP 44430. Guadalajara, Jal., México.

## **“Aplicaciones de la Electroquímica al Tequila”**

## Resumen

La División de Ingeniería Electroquímica y Aplicaciones Tecnológicas de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (SMEQ) celebra con beneplácito la iniciativa de integrar un volumen conmemorativo alusivo al XXX Aniversario de la SMEQ. Uno de los intereses de nuestra división es contribuir al desarrollo de proyectos tecnológicos que incidan en el sector industrial en todos los ámbitos en donde la electroquímica tiene injerencia. En esta ocasión, el trabajo presentado se refiere a las aplicaciones de la electroquímica al estudio de algunas de las rutas de incorporación que siguen los metales en las bebidas espirituosas, en particular, la medición de la velocidad de incorporación de metales en contacto con el tequila y el uso de reactores electroquímicos para remover cobre del tequila, sin afectar el perfil sensorial de la bebida.

## Introducción

El tequila es una bebida espirituosa distintiva de nuestro país que cuenta con la denominación de origen. Lo que significa un reconocimiento de parte de la comunidad internacional al carácter regional, autóctono y propietario de la bebida, por lo que solo ciertas regiones de México tienen la autorización para cultivar la materia prima y elaborar el tequila en el mundo [1]. El tequila se produce principalmente en el estado de Jalisco, en el municipio de Tequila, Jalisco, de donde la bebida adquiere su nombre y algunos municipios más de los estados de Guanajuato, Michoacán, Nayarit y Tamaulipas [2]. Sin lugar a dudas, lo anterior es un privilegio, que también conlleva una responsabilidad ante la comunidad internacional de profundizar en el conocimiento y propiedades del tequila en todas sus facetas. En este sentido, podemos señalar que el tequila ha sido un campo de investigación fértil, que ha sido abordado con vigor por investigadores de diferentes disciplinas. Por ejemplo, se ha estudiado la materia prima para la elaboración del

tequila que es el *Agave Azul Tequila Weber*, en sus aspectos botánicos y las prácticas agroindustriales, sin dejar a un lado las operaciones unitarias involucradas en la fabricación del tequila, el añejamiento y el envasado [4-6]. Sin embargo, no se habían explorado las rutas de incorporación y los efectos que tienen los metales en la bebida, así como las estrategias para removerlos sin afectar sus propiedades sensoriales.

### **Incorporación de metales en bebidas espirituosas**

Las rutas de incorporación de los metales en las bebidas espirituosas, pueden ser variadas, e incluyen desde los campos de cultivo de la materia prima, las aguas de proceso, los aditivos añadidos, el contacto directo de la bebida con los equipos de proceso, los procesos de fermentación, el añejamiento, el envasado y la adulteración [5]. En este contexto es de gran interés, desde el punto de vista del consumidor, conocer los efectos benéficos o adversos que pueden tener los metales en la salud. Una vez identificadas las rutas de incorporación y acumulación de los metales en las bebidas espirituosas, es menester identificar las estrategias de control y eliminación, pero sin afectar las propiedades químicas, físicas y sensoriales de la bebida. En esta dirección existen trabajos previos publicados en la literatura que se han orientado a identificar las fuentes y las rutas de incorporación de metales en bebidas espirituosas y el papel que juegan los campos de cultivo, los métodos de manejo y procesamiento de la materia prima y producto final para diferentes bebidas espirituosas alrededor del mundo, por ejemplo, para los vinos de diferente color [11-13], cerveza [14, 15], whiskey [16], grapa, ron [17], cipryot [18] y mouro [19].

Una ruta natural de incorporación del metal puede ser el contacto directo con la materia prima o el producto terminado [5]. Lo que constituye un tema de estudio de la electroquímica que tiene que ver,

en algunos casos, con la oxidación del metal (corrosión) y su incorporación en forma libre o complejada a la bebida [6]. En el caso particular de la incorporación del cobre en el tequila, éste se presenta en los campos de cultivo de la materia prima por el uso de fungicidas a base de cobre y en los alambiques de cobre empleados en la destilación. En este último caso, la velocidad de incorporación del cobre en el tequila, se ve incrementada por la temperatura del alambique, el medio ácido y una concentración elevada de oxígeno que actúa como agente oxidante, sin dejar de mencionar la posible reducción directa de otros compuestos que conforman la matriz orgánica compleja del tequila [20].

### **Metales utilizados en los equipos de proceso de la industria tequilera**

Por un margen amplio el acero inoxidable es el metal más utilizado en la construcción de equipos de proceso en el sector tequilero, y en menor cantidad, el cobre y el aluminio, este último, empleado en la fabricación de algunos envases para cócteles enlatados con concentraciones variables de tequila [21]. El acero inoxidable 304 (18-8) es usado en la construcción de casi todos los equipos de proceso en la elaboración del tequila, por ejemplo, en los autoclaves empleados para el cocimiento del agave, difusores, en los tanques de almacenamiento de los jugos extraídos del agave cocido después de la molienda, en los tanques de fermentación con la levadura, y cada vez más frecuentemente, en los alambiques de destilación. El acero al carbón, por su parte, aparece en algunas herramientas de corte como son las "coas" de jimado, operación que consiste en remover las pencas del agave para obtener la piña, o en otras ocasiones, en los equipos de molienda de agave cocido o las puertas de los hornos de mampostería para la cocción de la piña del agave. El cobre por su parte, se utiliza en las tuberías y en la construcción de los alambiques de destilación de forma completa, o en

algunos casos, en la construcción de algunas de sus partes, tales como el serpentín, o el cuello de ganso del destilador, dependiendo de la industria tequilera de que se trate [4].

Dentro de los parámetros que afectan la velocidad de corrosión de los metales en contacto con el tequila podemos mencionar: el pH, la concentración de  $O_2$  y cloruros, la conductividad del medio, la temperatura y la presencia de algunos compuestos orgánicos, tales como el ácido acético, metanol y alcoholes superiores [6]. El pH bajo de algunas bebidas, por ejemplo, el tequila, que es de 3.6 a 4.9, contribuye decisivamente a la corrosión de los metales en las bebidas espirituosas. Otro ejemplo se presenta en la elaboración de una bebida espirituosa a base de esencia de anís, los compuestos orgánicos, especialmente, ácidos extraídos de las hierbas aromáticas, incrementan la velocidad de corrosión de los metales durante su destilación [22]. Otro factor relevante en la velocidad de incorporación del metal en la bebida es la temperatura, por ejemplo, Carreón y colaboradores [6], encontraron que la corrosión del cobre en el tequila se incrementaba con la temperatura y alcanzaba un máximo a una temperatura de  $65^\circ C$ , y descendía después de este máximo a temperaturas más elevadas. Este comportamiento fue explicado en términos de la concentración del oxígeno presente en el medio y la cinética de corrosión a diferentes temperaturas. Es de esperarse que a temperatura ambiente, la concentración del oxígeno en el medio sea mayor, pero la cinética de corrosión sea más lenta. En contraste, a temperaturas elevadas; la concentración del oxígeno es menor, pero la cinética de corrosión es más elevada, estos efectos opuestos provocan la aparición de un máximo en la velocidad de corrosión a una temperatura determinada (i.e.,  $65^\circ C$ ) [6].

En el contexto global, incluyendo otras bebidas espirituosas, además del tequila, no se tienen reportes de mediciones de la velocidad de corrosión exhaustivos de metales en bebidas espirituosas. Por lo común, los estudios se orientan más a investigar otros aspectos, por ejemplo, el efecto que tiene el etanol en contacto con el acero templado como en el trabajo de Souza y colaboradores [23]. No obstante, estos estudios han permitido identificar algunas dificultades para hacer mediciones de la velocidad de corrosión del metal en etanol, un componente esencial en la bebida espirituosa, en parte, por tratarse de un medio resistivo, lo que a su vez dificultaba la realización de mediciones de impedancia. Para los lectores que no están adentrados en el tema, la técnica de espectroscopia de impedancia electroquímica (EIS), se emplea para estudiar la corrosión y está basada en el empleo de una perturbación sinusoidal del potencial de un electrodo de trabajo, empleando una celda electroquímica convencional de tres electrodos [24,25]. Para superar estas dificultades, en términos de la baja conductividad del medio, otros grupos de investigación han optado por el uso de la llamada estrategia de dos electrodos [23]. Por otra parte, otros investigadores como Moutsatsou y colaboradores han investigado el comportamiento de metales que son lixiviados directamente del bronce de los alambiques empleados en la destilación de bebidas autóctonas, locales y típicas a base de esencias de anís, detectándose la presencia de Fe, Cu, Zn y Ni en concentraciones de 157.5, 82.5, 31 y 8.5 ppm respectivamente, estos metales aparecían complejados en la solución [22]. De manera similar otros estudios se han orientado al caso del aluminio empleando la técnica de EIS, sin embargo, se carece de reportes en donde el aluminio haya estado en contacto directo con bebidas espirituosas. Valcarce y colaboradores han orientado sus esfuerzos de investigación al estudio de la corrosión de cobre y latón en agua de la llave. Un estudio

que buscaba establecer la influencia que tiene la presencia del Zn en el latón en la velocidad de corrosión.

Uno de los primeros estudios de la velocidad de corrosión del cobre en tequila a diferentes temperaturas fue realizado en nuestro grupo de trabajo hace algunos años [6]. Como fue señalado previamente, es conveniente estimar la velocidad de corrosión de ciertos metales tales como el cobre, acero inoxidable, latón y aluminio porque de alguna manera están involucrados en los procesos de fabricación o en el envasado de bebidas derivadas del tequila. Es oportuno señalar que la concentración de los metales presentes en las bebidas espirituosas son constituyentes controlados por la normatividad vigente alrededor del mundo, para el caso particular del tequila en México, una referencia es la Norma 006 SCFI-2005.

### **Velocidad de corrosión de diferentes metales en tequila**

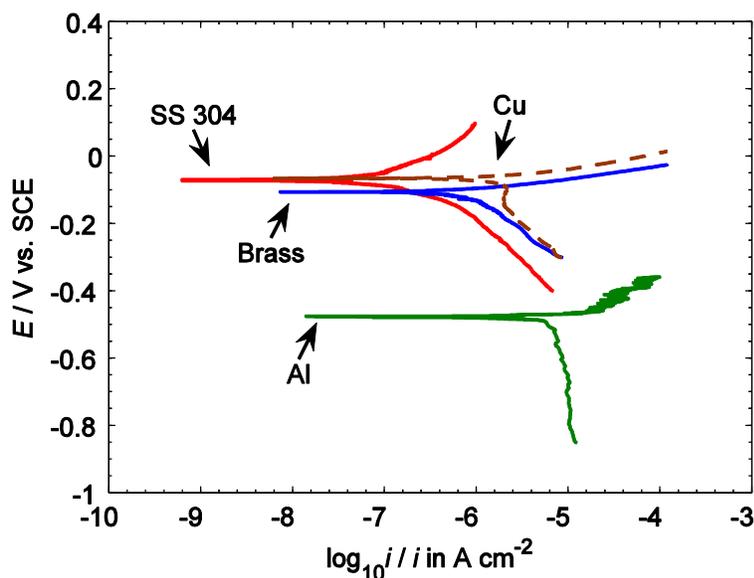
Con el objetivo de establecer la tendencia de los metales a incorporarse en el tequila se han realizado mediciones de la velocidad de corrosión de metales, tales como acero inoxidable (304), aluminio, latón y cobre en tequila de la primera destilación (ordinario) [9]. La fig. 1 muestra las gráficas de Tafel ( $E$  vs.  $\log i$ ) para acero inoxidable (304), aluminio, latón y cobre a una velocidad de barrido del potencial de 0.1 mV/s. Es posible observar los potenciales de corrosión para la serie de metales investigados en tequila,  $E_{corr}$ , que siguen el orden  $Cu > \text{latón} > \text{acero inoxidable (304)} > Al$ . El cobre inmerso en el tequila presenta el potencial más noble de todos los metales ensayados [26]. En el caso del Al se presenta un cambio abrupto en la corriente a un potencial de -0.72 V vs. SCE, debido al rompimiento de la película de óxido y la formación de picaduras [27]. En la tabla 1 se resumen los parámetros cinéticos obtenidos de las curvas de polarización que incluyen la pendiente

anódica ( $\beta_a$ ) y catódica ( $\beta_c$ ), la corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), el coeficiente de transferencia ( $\alpha$ ) y la resistencia a la transferencia de carga. En términos generales. Los resultados de la velocidad de corrosión reportados para los diferentes metales en el tequila siguen el orden Al > Cu > latón > acero inoxidable. Un resultado que concuerda también con la información puramente termodinámica dictada por la serie galvánica, excepto para la velocidad de corrosión del latón, que se esperaría fuera ligeramente mayor que la del cobre.

En la literatura hay reportes de las velocidades de corrosión del cobre y latón en el agua de la llave, encontrándose que el latón se corroe más lentamente que el cobre, lo que se atribuye a la presencia del Zn en el latón [28]. Los valores de la  $i_{corr}$  para el cobre y el latón obtenidos, son similares a los reportados en la literatura para sistemas con un pH de 7.8, por ejemplo, de  $3.5 \cdot 10^{-7}$  y  $5 \cdot 10^{-8}$  A/cm<sup>2</sup> respectivamente [28], estos valores difieren algunos órdenes de magnitud a los reportados en la tabla 1 debido a las diferencias de pH y resistencia de la solución (calculada con la ecn. 1) que para el tequila es de 3.6l y 52,110.5  $\Omega$  respectivamente.

$$R_s = \frac{l}{\kappa A} \quad (1)$$

En este caso la separación entre los electrodos,  $l$ , fue de 1 cm, la conductividad de la solución,  $\kappa$  (101  $\mu$ S/cm) y el área del electrodo de trabajo,  $A$  (0.19 cm<sup>2</sup>). Además, no debemos perder de vista que el tequila es una mezcla compleja que tiene más de 175 compuestos orgánicos y sales disueltas que también pueden afectar la velocidad de corrosión de estos metales [20]. Bajo estas condiciones, el material más aconsejable para el manejo del tequila resulta ser el acero inoxidable.



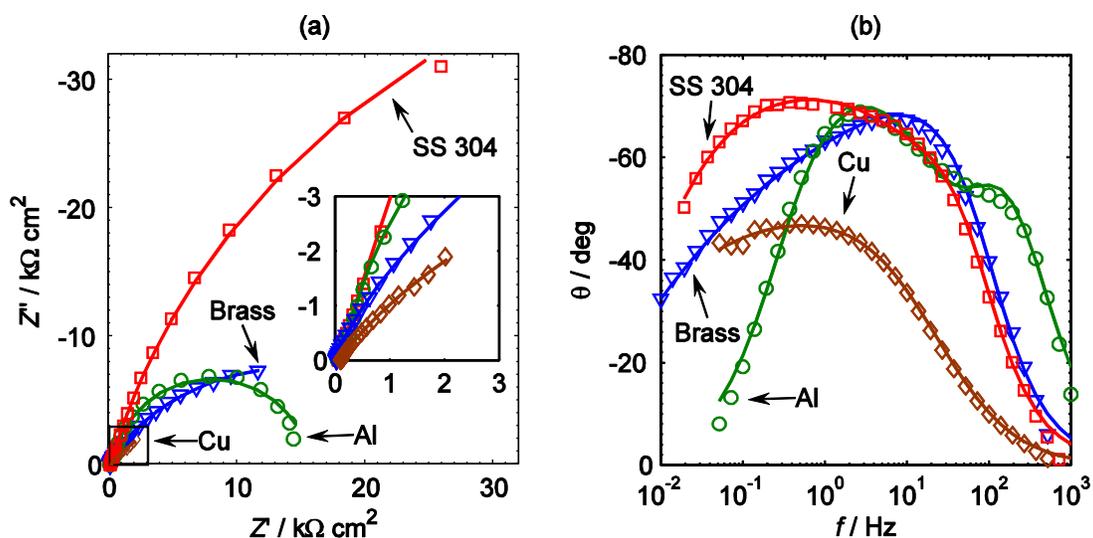
**Figura 1.** Gráficas de Tafel del aluminio, cobre, latón y acero inoxidable (304) inmersos en tequila de la primera destilación (ordinario) a una velocidad de 0.1 mV/s [9].

**Tabla 1.** Resultados de las mediciones de la densidad de corriente de corrosión ( $i_{corr}$ ), potencial de corrosión ( $E_{corr}$ ), coeficiente de transferencia ( $\alpha$ ), pendiente anódica ( $\beta_a$ ), pendiente catódica ( $\beta_c$ ) en estado estacionario [9].

Metal	$E_{corr}$ / V vs SSE	$\beta_a$ / V	$\beta_c$ / V	$R_p$ / $\Omega$ $cm^2$	$I_{corr}$ / mA $cm^{-2}$	$v$ / $\mu m$ $s^{-1}$
Acero inoxidable 304	-0.07	-	0.26	219 800	0.39	0.28
Aluminio	-0.47	-	0.83	1250	5.9	6.1
Latón	-0.10	0.04	0.19	14700	0.41	0.3
Cu	-0.06	0.04	-	5720	2.2	1.6

Los resultados de las mediciones de EIS del aluminio, cobre, latón y acero inoxidable 304 inmersos en tequila, sin agitación y empleando una

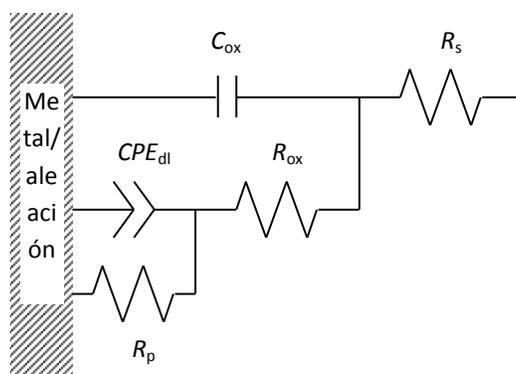
configuración de dos electrodos se muestran la fig. 2 (a) y (b).



**Figura 2.** a) Diagrama de Nyquist y b) Diagrama de Bode de aluminio, cobre, latón y acero inoxidable en tequila de la primera destilación (ordinario) sin agitación. Todas las mediciones se llevaron a cabo a potencial de circuito abierto, con una amplitud de 10 mV y 10 kHz – 0.01 Hz de frecuencia de barrido, empleando una configuración de dos electrodos [9].

Los símbolos en las figuras corresponden a los datos experimentales obtenidos y las líneas continuas las predicciones teóricas. Para el caso del aluminio, la presencia del semicírculo es atribuido a la formación de una capa de óxido interfacial, donde el Al es oxidado a  $\text{Al}^+$  que actúa como un intermediario y después la formación de  $\text{Al}^{3+}$  en la interfase óxido solución, donde puede generarse el  $\text{O}^{2-}$  o  $\text{OH}^-$  para producir una capa de óxido. Los datos para el latón y el cobre muestran semicírculos más deprimidos que son atribuidos a una distribución de corriente y la presencia de una película de óxido poco uniforme, la cual induce diferencias en la impedancia local y la distribución de las constantes de tiempo a lo largo de la superficie. Por otra parte, la fig. 2(b) ilustra el diagrama de Bode para los cuatro metales y aleaciones investigadas,

donde se hacen evidentes dos constantes de tiempo. La fig.3 presenta el circuito equivalente que fue propuesto para investigar las propiedades de la interfase metal/aleación-tequila, e incluye la resistencia de la solución  $R_s$ , la capacitancia de la capa de óxido,  $C_{ox}$ , y la resistencia,  $R_{ox}$ , un elemento de fase constante,  $CPE_{dl}$ , que toma en cuenta la capacitancia de la doble capa y la resistencia de polarización,  $R_p$ . Este modelo ha sido propuesto por Valcarce, et al., quienes consideraron electrodos corroyéndose que tienen diferentes tipos de heterogeneidades que son tomadas en cuenta en el elemento de fase constante en lugar de un capacitor simple.



**Figura 3.** Circuito equivalente usado para ajustar los datos de cobre, latón, aluminio y acero inoxidable en tequila de la primera destilación (ordinario).

La tabla 2 resume los parámetros del ajuste de los datos al circuito equivalente propuesto.

Los resultados con base a las mediciones de la resistencia de polarización obtenida, confirman que el material más apropiado para el procesamiento del tequila, es el acero inoxidable 304.

**Tabla 2.** Parámetros obtenidos del ajuste de los datos de EIS al circuito equivalente propuesto, usando el programa Boukamp para acero inoxidable 304, aluminio, cobre y latón [9].

<b>Metal</b>	<b>R<sub>s</sub></b> Ω cm <sup>2</sup>	<b>C<sub>ox</sub></b> F cm <sup>2</sup>	<b>R<sub>ox</sub></b> Ω cm <sup>2</sup>	<b>C<sub>dl</sub></b> F cm <sup>2</sup>	<b>n<sub>dl</sub></b>	<b>R<sub>p</sub></b> Ω cm <sup>2</sup>
Acero inoxidable 304	58	3.87x10 <sup>-5</sup>	440	2.79x10 <sup>-4</sup>	0.75	112 100
Aluminio	44	1.02x10 <sup>-5</sup>	350	2.57x10 <sup>-5</sup>	0.88	15 400
Latón	24	7.22x10 <sup>-5</sup>	178	1.01x10 <sup>-3</sup>	0.57	29 900
Cobre	102	6.62x10 <sup>-5</sup>	23	3.65x10 <sup>-3</sup>	0.55	15,000

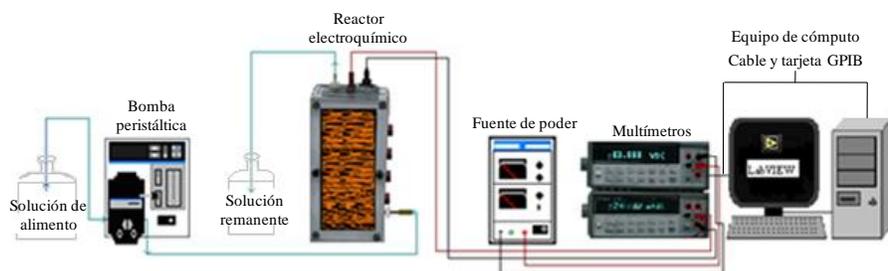
### **Reactor electroquímico de placas paralelas para remoción de cobre del tequila**

Ya han sido identificadas algunas rutas que siguen los metales para incorporarse a una bebida espirituosa. En el caso particular del cobre es oportuno señalar que su presencia, si bien controlada, tiene algunos aspectos benéficos a la bebida. Por ejemplo, se sabe que el cobre sirve para eliminar malos olores y sabores al transformar catalíticamente compuestos sulfurados del tequila, brindándole un sabor más agradable y placentero, acentuando sus propiedades sensoriales [3, 29]. Esta es también una de las razones por las cuales los productores de otras bebidas espirituosas tales como el cognac, grapa y armagnac, eligen el cobre de entre muchos metales para construir los alambiques y llevar a cabo su destilación. En contraste, el cobre puede tener algunos efectos negativos en la salud cuando su consumo es mayor de  $2 \frac{\text{mg}}{\text{día}}$ , por ejemplo, puede provocar náuseas, vómitos, dolor de cabeza, diarrea, taquicardia, hipertensión, anemia y puede llegar hasta la muerte. El

cobre ha sido asociado también a la enfermedad de Wilson que involucra la pérdida de memoria, dificultad de coordinación o temblores [30]. Por esta razón, en el sector tequilero existen normas que regulan el contenido de este metal y otros en el tequila y otras bebidas espirituosas que establecen que no se debe rebasar las 2 ppm de cobre en tequila envasado NOM-006-SCFI y NOM-142-SSA1-1995 establecida por el Consejo Regulador del Tequila [31, 32]. Aquí surge una necesidad por parte de los productores locales, de desarrollar estrategias para evitar la incorporación o remover el cobre del tequila sin afectar las propiedades organolépticas de la bebida.

Aunque existen numerosos reportes del uso de reactores electroquímicos para remover cobre de medios acuosos, en la literatura solo hay reportados dos trabajos de remoción de cobre en tequila mediante el uso de esta tecnología. Uno de ellos es el uso de un reactor cilíndrico empacado con una madeja de cobre enrollado [8] y otro de un reactor de placas paralelas empleando un cátodo de madejas de alambre de cobre [33]. Otras estrategias involucran el uso de resinas de intercambio [10] o el método de cementación [8].

En el método de remoción de cobre empleando un reactor electroquímico, el tequila, es alimentado a través del reactor, que está empacado con un cátodo formado por una madeja de alambre de cobre, un ánodo de carbón y un separador de Celgard® en tres etapas (ver Fig. 4). En cada etapa del reactor hay colocados puertos de muestreo que permiten monitorear la concentración de cobre a lo largo de cada etapa, habilitados con un septum de goma por donde se introduce una jeringa para la extracción de la muestra.



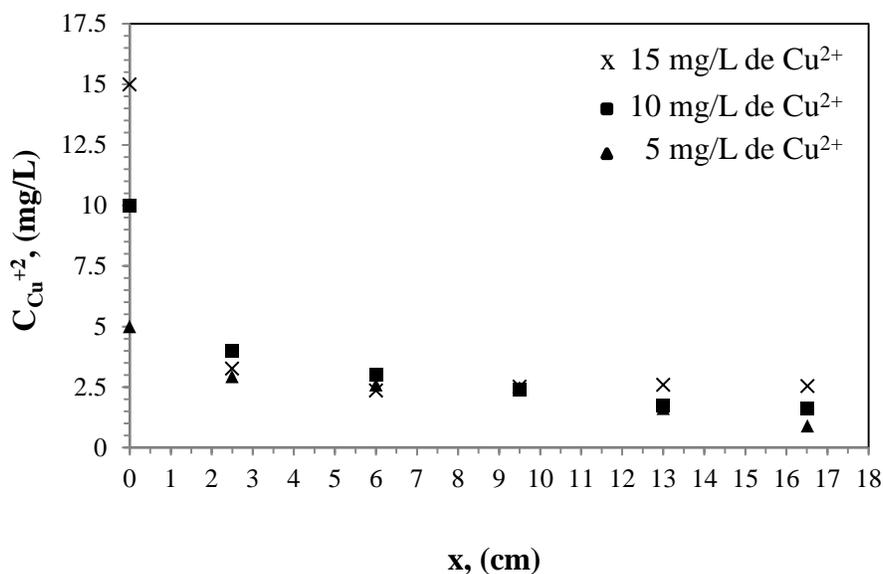
**Figura 4.** Reactor de placas paralelo empacado con un cátodo de malla de cobre y un ánodo de placa de carbón, separado por medio de un separador de Celgard®.

Los resultados de la variación de la concentración y los porcentajes de remoción de cobre de soluciones con concentraciones iniciales de 5, 10 y 15 mg/L de  $\text{Cu}^{2+}$  en el tequila alimentado al reactor aparecen en las figuras 5, 6 y 7. Las concentraciones después de la reducción del  $\text{Cu}^{2+}$  a la salida del reactor electroquímico son evaluadas por medio de la técnica de absorción atómica, obteniéndose valores de 0.9, 1.6 y 2.55 mg/L de  $\text{Cu}^{2+}$  para un caudal de 10 mL/min, 0.8, 1.5 y 2.19 mg/L de  $\text{Cu}^{2+}$  para un caudal de 20 mL/min y 1.98, 1.5 y 2.14 ppm de  $\text{Cu}^{2+}$  para un caudal de 30 mL/min. La mayor eficiencia de reducción,  $\bar{R}$ , con un porcentaje de 86% se presenta para una concentración inicial de 15 ppm de  $\text{Cu}^{+2}$  y un caudal de 30 mL/min.

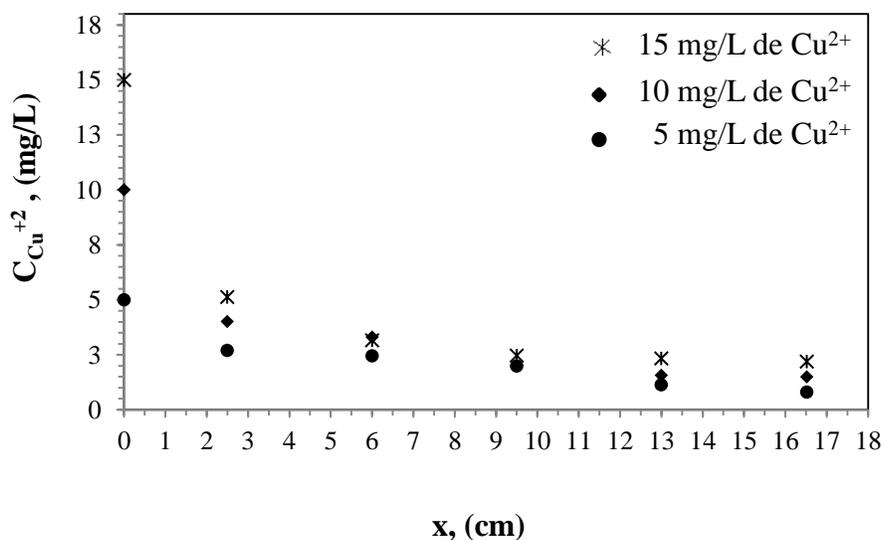
La concentración de  $\text{Cu}^{2+}$  dentro del reactor sigue un decaimiento de tipo exponencial para la reducción de cobre conforme avanza el frente de flujo. Este comportamiento es predecible para este tipo de reactores en flujo, en donde la composición del electrolito cambia con la distancia a través del reactor [25, 35]. A concentraciones más elevadas de  $\text{Cu}^{2+}$  al ingreso al reactor, se tiene un gradiente de concentración mayor y el cambio de la concentración es más rápido. Por otra parte, conforme avanza el fluido a través del reactor, el gradiente va disminuyendo y también la cantidad de  $\text{Cu}^{2+}$  que es reducido [25, 36]. Los tiempos de

residencia en el reactor,  $t$ , para cada uno de los caudales empleados de 10, 20 y 30 mL/min son de 81, 40.5 y 27 minutos respectivamente (evaluados con un trazador de KCl y mediciones de conductividad), para un volumen libre del reactor de 810 mL, los números de Reynolds,  $Re$ , son de 1.41, 2.72 y 4.16, los cuales implican un régimen de flujo completamente laminar. Los valores del número de Reynolds son relativamente bajos, en comparación a datos publicados en la literatura [37, 38, 39,], debido a que los caudales que se aplican en este trabajo, son más bajos que los que utilizan otros investigadores. El coeficiente de transferencia de masa,  $m_{Cu^{2+}}$ , obtenido para el cobre en este sistema es de 0.001 cm/s, determinado experimentalmente mediante el ajuste de datos experimentales a la ecuación del balance de masa correspondiente en el reactor electroquímico de placas paralelas. El número de Schmidt,  $Sc$ , que caracteriza las propiedades del fluido, alcanza un valor de 3625, empleando un coeficiente de difusión,  $D$ , para el  $Cu^{2+}$  de  $7.2 \times 10^{-6}$  cm<sup>2</sup>/s [40-43] y una viscosidad cinemática,  $\nu$ , de 0.0261 cm<sup>2</sup>/s que ha sido evaluada experimentalmente [36, 34, 8].

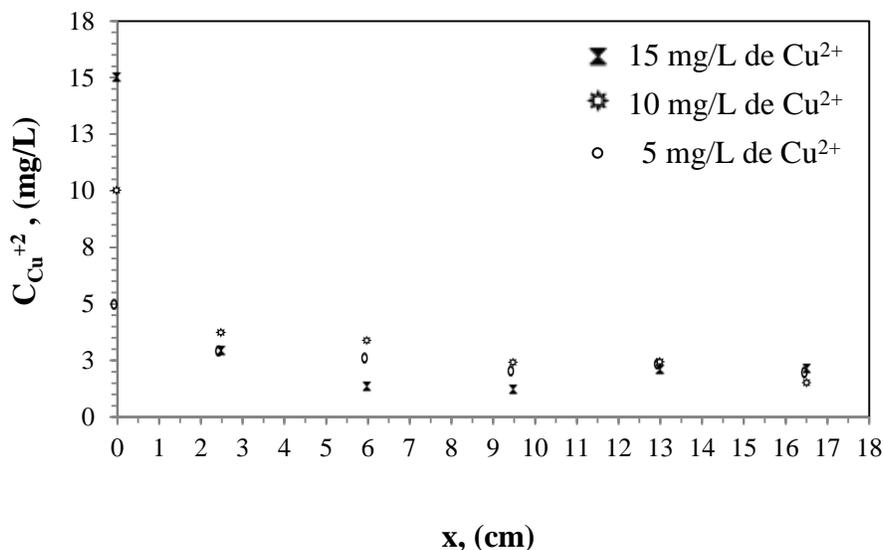
El proceso de eliminación del  $Cu^{2+}$  implica la reducción del  $Cu^{2+}$  disuelto en el electrolito (iónico), a cobre metálico depositado en el cátodo, mediante el uso de una corriente eléctrica proveniente de una fuente de poder externa, a la vez que el agua se descompone en oxígeno y protones en la superficie del ánodo. Varios autores han estudiado la distribución de corriente en reactores electroquímicos de placas paralelas, considerando el efecto de la evolución del hidrógeno en la resistencia óhmica y la distribución de corriente en electrolizadores [44, 45].



**Figura 5.** Comportamiento de la concentración de cobre de la electrólisis de soluciones de ordinario a lo largo del reactor con eficiencias de remoción de (x) 83%, ( ) 84% y ( ) 82%, aplicando un potencial de 3 V y un caudal de 10 mL/min.

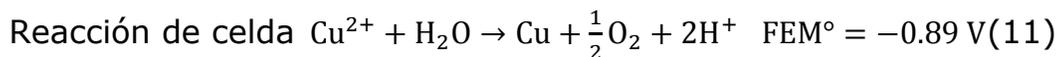
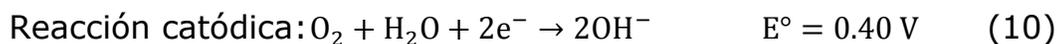
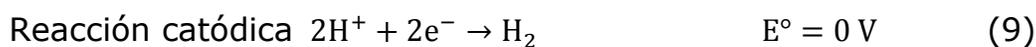
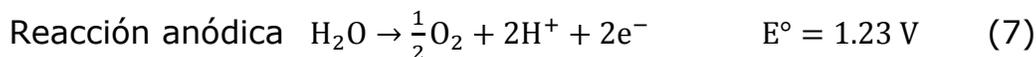


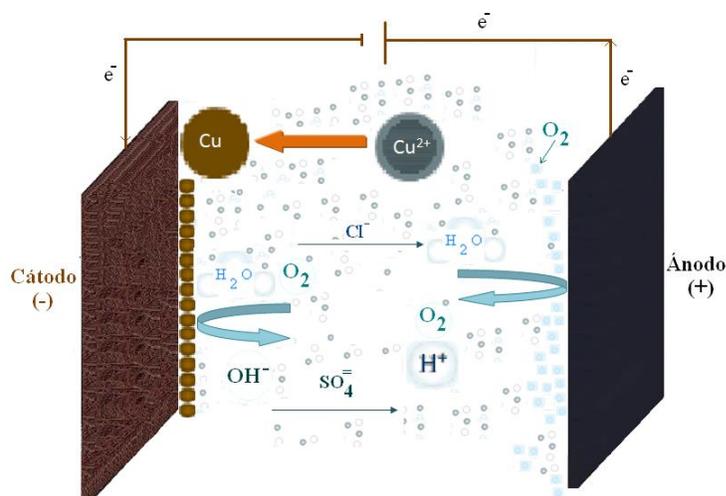
**Figura 6.** Comportamiento de la concentración de cobre de la electrólisis de soluciones de ordinario a lo largo del reactor con eficiencias de remoción de ( $\ast$ ) 85%, ( ) 85% y ( ) 84%, aplicando un potencial de 3 V y un caudal de 20 mL/min.



**Figura 7.** Comportamiento de la concentración de cobre de la electrólisis de soluciones de ordinario a lo largo del reactor con eficiencias de remoción de ( X ) 86%, ( \* ) 85% y ( o ) 60%, aplicando un potencial de 3 V y un caudal de 30 mL/min.

Las reacciones principales que se llevan a cabo en este reactor electroquímico de placas paralelas involucran la electrólisis del agua y la reducción del cobre iónico a cobre metálico [34, 46, 47], aunque no deben descartarse algunos componentes del tequila, no considerados en este trabajo (Fig. 8).





**Figura 8.** Representación esquemática de la reducción de  $\text{Cu}^{2+}$  en la superficie del electrodo y las reacciones de electrólisis del agua.

### Tratamiento matemático para la remoción de cobre en ánodos de madeja de cobre

Es factible deducir la ecuación de transporte de masa que rige el comportamiento del reactor electroquímico de placas paralelas con un cátodo de madeja de cobre a partir de una analogía con el tratamiento de reactores con electrodos porosos. La forma de obtener la ecuación que gobierna el comportamiento del reactor, se obtiene de un balance de masa del cobre en el tequila que circula a través de la malla de cobre, similar al descrito para electrodos porosos [25]. La longitud a lo largo del reactor es  $L$  (cm) y el área transversal  $A$  ( $\text{cm}^2$ ) con un caudal  $Q$  ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) (fig. 9). La velocidad de flujo lineal de la corriente,  $U$  (cm/s), se obtiene:

$$U = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

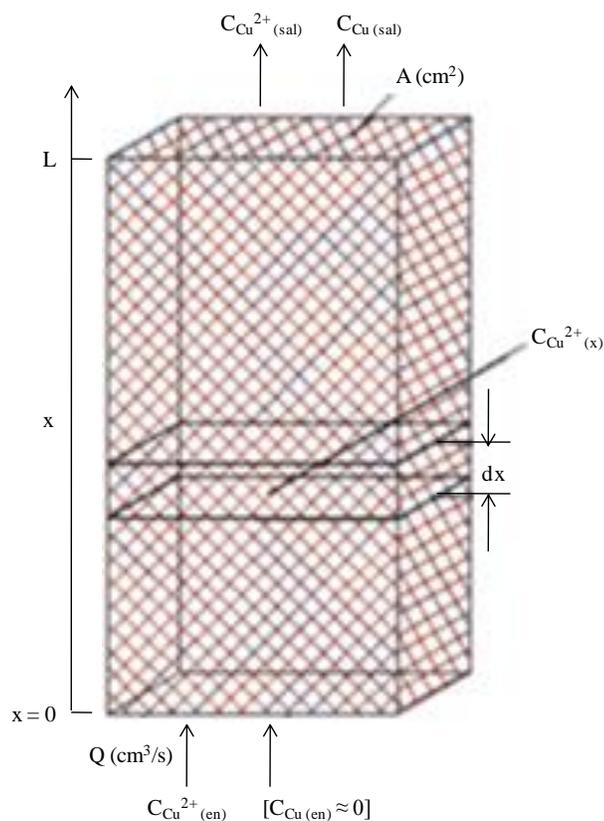
En este caso consideramos por simplicidad que la reacción que se lleva a cabo en la superficie del cátodo es la reacción de reducción del ion

cobre:  $\text{Cu}^{2+} + 2e^- \rightarrow \text{Cu}$ , con una corriente total,  $i$  (A). La concentración  $\text{Cu}^{2+}$  a la entrada es  $C_{\text{Cu}^{2+}(\text{en})}$  y a la salida  $C_{\text{Cu}^{2+}(\text{sal})}$ . La conversión global de O a su paso a través del electrodo es  $i/nF$  (mol/s) o  $i/nFQ$  (mol/cm<sup>3</sup>). Si  $\bar{R}$  es la fracción de O convertida ( $\bar{R} = 0$ , no hay conversión;  $\bar{R} = 1$ , 100% de conversión), así

$$C_{\text{Cu}^{2+}(\text{sal})} = C_{\text{Cu}^{2+}(\text{en})}(1 - \bar{R}) \quad (3)$$

$$C_{\text{Cu}^{2+}(\text{sal})} = C_{\text{Cu}^{2+}(\text{en})} - \frac{i}{nFQ} \quad (4)$$

$$\bar{R} = \frac{i}{nFQ} = 1 - \frac{C_{\text{Cu}^{2+}(\text{sal})}}{C_{\text{Cu}^{2+}(\text{en})}} \quad (5)$$



**Figura 9.** Diagrama esquemático del electrodo de trabajo de madeja de cobre con porosidad elevada en un reactor electroquímico en flujo.

El área total de reacción considerada es,  $a$ , ( $\text{cm}^2$ ) y el volumen del marco del electrodo,  $LA$ , ( $\text{cm}^3$ ). De tal forma que el área específica,  $s$ , se calcula como:

$$s \text{ (cm}^{-1}\text{)} = a \text{ (cm}^2\text{)}/LA \text{ (cm}^3\text{)} \quad (6)$$

La concentración de  $\text{O}$  decrece continuamente con la distancia de la cara frontal del electrodo ( $x = 0$ ) y la densidad de corriente en una posición dada,  $j_{(x)}$  ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ), varía con  $x$ .

$$j_{(x)} = nFm_{\text{Cu}^{2+}} [C_{\text{Cu}^{2+}(x)} - C_{\text{Cu}^{2+}(x=0)}] \quad (7)$$

La concentración en la superficie del electrodo es  $C_{\text{Cu}^{2+}(x=0)}$  está determinada por la constante de velocidad de reacción  $k_f$  [25].

$$C_{\text{Cu}^{2+}(x=0)} = \frac{i}{nFAk_f} \quad (8)$$

Sustituyendo la ecns. (8) en (7) obtenemos:

$$j_{(x)} = \frac{nFm_{\text{Cu}^{2+}} C_{\text{Cu}^{2+}(x)}}{1 + \frac{m_{\text{Cu}^{2+}}}{k_f}} \quad (9)$$

La variación diferencial de la concentración en  $x$  está dada por:

$$-dC_{\text{Cu}^{2+}(x)} \left( \frac{\text{mol}}{\text{cm}^3} \right) = \frac{j_{(x)} s A dx}{nFQ} \quad (10)$$

Combinando las ecns.(9) y (10) se obtiene:

$$\int_{C_{Cu^{2+}(en)}}^{C_{Cu^{2+}(x)}} \frac{dC_{Cu^{2+}(x)}}{C_{Cu^{2+}(x)}} = \frac{-m_{Cu^{2+}}sA}{Q \left[ 1 + \frac{m_{Cu^{2+}}}{k_f} \right]} \int_0^x dx \quad (11)$$

$$\ln \frac{C_{Cu^{2+}(x)}}{C_{Cu^{2+}(en)}} = \frac{-m_{Cu^{2+}}sAx}{Q \left[ 1 + \frac{m_{Cu^{2+}}}{k_f} \right]} \quad (12)$$

Resolviendo para  $C_{Cu^{2+}}(x)$  obtenemos:

$$C_{Cu^{2+}(x)} = C_{Cu^{2+}(en)} \exp \left[ \frac{-m_{Cu^{2+}}sAx}{Q \left[ 1 + \frac{m_{Cu^{2+}}}{k_f} \right]} \right] \quad (13)$$

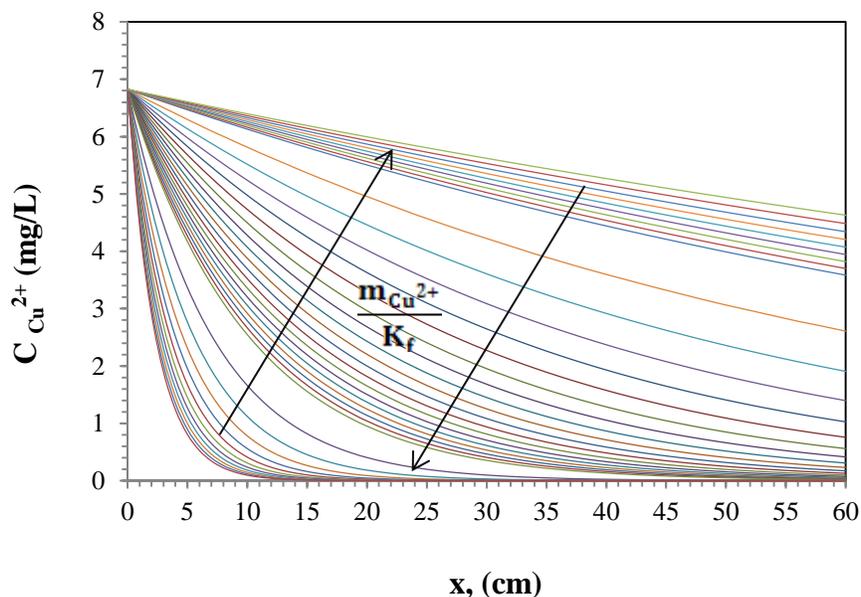
$$\text{Si } [k_f] \lll [m_{Cu^{2+}}] \quad (14)$$

Esta ecuación difiere de ecuaciones similares reportadas en la literatura para electrodos porosos, en que se incluye la relación entre el coeficiente de transferencia de masa y la constante de velocidad de reacción heterogénea  $\frac{m_{Cu^{2+}}}{k_f}$  [25].

La ecn. (13) describe el comportamiento de la concentración en función de la constante de velocidad de reacción heterogénea  $k_f$  y el coeficiente de transferencia de masa  $m_{Cu^{2+}}$ . Bajo condiciones particulares la ecuación se simplifica:

$$C_{Cu^{2+}(x)} = C_{Cu^{2+}(en)} \exp \left[ \frac{-m_{Cu^{2+}}sAx}{Q} \right] \quad (15)$$

$$\text{Si } [K_f] \ggg [m_{Cu^{2+}}] \quad (16)$$

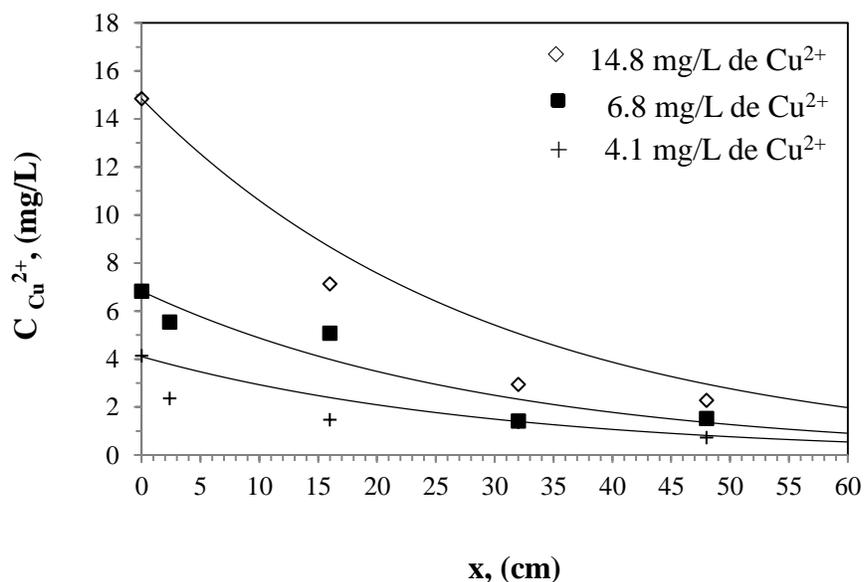


**Figura 10.** Gráfica de la concentración a lo largo del reactor aplicando la ecuación (13), utilizando como parámetro la relación  $\frac{m_{Cu^{2+}}}{K_f}$ .

En la fig. 10 se muestran una serie de gráficas de la ecn. (13) para diferentes valores de la relación  $\frac{m_{Cu^{2+}}}{K_f}$ . Las curvas se desplazan hacia arriba de la figura para valores de la relación  $\frac{m_{Cu^{2+}}}{K_f}$  elevados (i.e. control cinético,) y hacia abajo para valores de  $\frac{m_{Cu^{2+}}}{K_f}$  pequeños (i.e. control por transferencia de masa). Esta gráfica permite identificar el regimen imperante en el reactor después de hacer el ajuste de los datos experimentales como se muestra a continuación.

La fig. 11 presenta los resultados experimentales del comportamiento de la concentración de  $Cu^{2+}$  en función de la posición a lo largo del reactor. El ajuste de los datos experimentales se hace con base a la ecn. (13), como se muestra en la fig.11. En estudios previos realizados en nuestro grupo de investigación, se evaluaron los coeficientes de transferencia de masa con base al ajuste a la ecn. (13) obteniéndose

valores más pequeños para soluciones acuosas de  $\text{Cu}^{2+}$  en el orden  $1.5 \times 10^{-6}$  cm/s [Newman, 1973; Rodríguez, 2009], . En este caso, se evaluó la velocidad de reacción del cobre en el ordinario empleando un análisis de Tafel y se obtiene una constante de velocidad de reacción de  $3.95 \times 10^{-4}$  cm/s, característico de sistemas lentos [Bard et al, 2001]. Con base a este valor, se supusieron valores del coeficiente de transferencia de masa hasta lograr el mejor ajuste de los datos con la ecn. (12). El coeficiente de transferencia de masa que mejor ajusta los datos experimentales es de 0.001 cm/s, un valor que también es razonable para sistemas con una transferencia de masa pequeña [25, 47]. En la fig.11 se muestra el comportamiento de la concentración en función de la posición a lo largo del reactor para las diferentes concentraciones examinadas y las predicciones del modelo. Se obtienen los mejores resultados para una concentración intermedia de 6.8 mg/L de  $\text{Cu}^{2+}$ .



**Figura 11.** Comportamiento de la concentración de cobre a lo largo del reactor, con eficiencias de remoción de ( ◇ ) 85%, ( ■ ) 78% y (+) 83% para un caudal de 30 mL/min y un potencial de 3 V.

## **Conclusiones**

La presencia de metales en bebidas espirituosas puede tener efectos tanto positivos como adversos, pero además la presencia de metales en la bebida puede ser una alternativa de autenticación y control de la bebida. Por otra parte, existe un gran interés por conocer la inocuidad de los materiales de construcción de los equipos empleados en la elaboración de la bebida y en los envases de almacenamiento. Se ha visto que el metal más utilizado y conveniente para la industria tequilera es el acero inoxidable 304. En algunos casos la concentración de ciertos metales es regulada y es necesario contar con estrategias para removerlos, una alternativa es el uso de reactores electroquímicos. Los resultados muestran la factibilidad de su uso para mantener en norma la concentración del cobre en el tequila.

## **Agradecimientos**

Los autores de este capítulo desean agradecer al CONACyT por la beca de estudios de doctorado de MACA y de maestría de ARA, así como el apoyo al proyecto de investigación 62066.

## Referencias

- [1]. Tequila Regulatory Council. Agreement between the European Community and Mexico on the mutual recognition and protection of designations for spirit drinks. Official Journal L 152, 11/06/1997 p. 0016 – 0026. [www.crt.org.mx](http://www.crt.org.mx).
- [2]. Valenzuela-Zapata, A.; Nabhan, G. P. ¡Tequila!, First edition, 2003, Ed. The University of Arizona Press.
- [3]. Cedeño, M. Tequila production. *Critical Reviews in Biotechnology*. 1995, 15, 1-11
- [4]. Cedeño Cruz, M. Tequila production from agave: historical influences and contemporary process. En *The Alcohol textbook*. 4<sup>ta</sup> edition, 2003, Ed. By KA Jacques, 223-245.
- [5]. Ibanez, J., G., Carreon-Alvarez, A., Barcena-Soto, M., Casillas, N., Metals in alcoholic beverages: A review of sources, effects, concentrations, removal, speciation, and analysis, *Journal of Food Composition and Analysis*, 2008, 21, 672-683.
- [6]. Carreón, A.; Casillas, N.; González-Álvarez, V.; Prado-Ramírez, R. Corrosion of copper in tequila at different temperatures. *Materials Performance*. 2001, 40, 50-52.
- [7]. Carreón Alvarez M. A Estudio electroquímico de la remoción de cobre en tequila. *Tesis de Maestría en Cs. En Ing. Química* 2003, Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jal.
- [8]. Carreon-Alvarez, A. Análisis electroquímico y remoción de cobre en tequila por métodos fisicoquímicos, Tesis de Doctorado, Universidad de Guadalajara, 2008.
- [9]. Carreon-Alvarez, A., Casillas, N., Ibanez, J.G., Gomez-Salazar, S., Hernandez, F., Prado-Ramírez, R., Barcena-Soto, M. Corrosion of Aluminum, Copper, Brass and Stainless Steel 304 in Tequila. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2012, 7, 7877-7887.

- [10].Carreon-Alvarez, A., Herrera-Gonzalez A., Casillas, N, Rogelio Prado-Ramirez, R., Estarron-Espinosa, M, Soto, V., de la Cruz, W., Barcena-Soto, M., Gomez-Salazar, S., Cu (II) removal from tequila using an ion-exchange resin, *Food Chemistry*, 2011, 127, 1503–1509.
- [11].Ostapezuk, P.; Eschnauer, H. R.; Scollary, G. R. Determination of cadmium, lead, and copper in wine by potentiometric stripping analysis. *Fresenius J. Anal. Chem.* 1997, 358, 723-727.
- [12].Wiese, C.; Schwedt, G. Strategy for copper speciation in white wine by differential pulse anodic stripping voltammetry, potentiometry with an ion-selective electrode and kinetic photometric determination. *J. Anal. Chem.* 1997, 358: 718-22.
- [13].Arcos, M. T.; Ancín, M. C.; Echeverría J. C.; González, J.; Garrido, J. J. Study of lability of heavy metals in wines with different degrees of aging through differential pulse anodic stripping voltammetry. *J. Agric. Food Chem.* 1993, 41, 2333-39.
- [14].Agra-Gutiérrez, César; Hardcastle, J. L.; Ball, J. C. Compton Richard G. Anodic stripping voltammetry of copper at insonated glassy carbon-based electrodes: Application to the determination of copper in beer. *Analyst.* 1999, 124: 1053-57.
- [15].Mayer, H.; Marconi, O.; Floridi, S.; Montanari, L.; Fantozzi, P. Determination of Cu(II) in beer by derivative potentiometric stripping analysis. *J. Inst. Brew.* 2003, 109 (4) 332-36.
- [16].Barbeira, P. J. S.; Stradiotto, N. R. Anodic stripping voltammetric determination of Zn, Pb and Cu traces in whisky samples. *Fresenius J. Anal. Chem.* 1998, 361: 507-09.
- [17].Barbeira, P. J. S.; Stradiotto, N. R. Voltammetric stripping analysis of copper in distilled beverages using solid electrodes. *Anal. Lett.* 1999, 32 (10): 2071-80.
- [18].Kokkinofa, R.; Petrakis, P.V.; Mavromoustakos, T.; Theocharis, C.R. Authenticity of the traditional Cypriot spirit zivania on the basis of metal

content using a combination of coupled plasma spectroscopy and statistical analysis. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 2003, 51, 6233-6239.

- [19].Soufleros, E. H.; Ageliki, S. Mygdalia, P; Natskoulis, P. Characterization and safety evaluation of the traditional Greek fruit distillate "Mouro" by flavor compounds and mineral analysis. *Food Chemistry*. 2004, 86, 625-636.
- [20].Benn, S. M.; Peppard, T. L. Characterization of tequila flavor by instrumental and sensory analysis. *J. Agric. Food Chem.* 1996, 44 (2): 557-566.
- [21].Pohl, P. What do metals tell us about wine?. *Trends in Analytical chemistry*. 2007, 26(9), 941- 949.
- [22].Moutsatsou, A.; Chalarakis, E.; Zarangas, G. Influence of raw materials and distillation equipment on the heavy metal content of waste from an alcoholic anis-type beverage. *Journal of Hazardous Materials*. 2003, 96 (1), 53-64.
- [23].Souza, J. P.; Mattos, O. R.; Sathler, L.; Takenouti, H. Impedance measurements of corroding mild steel in an automotive fuel ethanol with and without inhibitor in a two and three electrode cell. *Corrosion Science*. 1987, 27 (21) 1351-1364.
- [24].Cottis, R.; Turgoose, S. Electrochemical impedance and noise, First edition, 1999, Ed. NACE International.
- [25].Bard A. J.; Larry R. F. Electrochemical methods fundamentals and applications, Second edition, 2001, Ed. John Wiley. 458-464.
- [26].Jones, D. A. Principles and Prevention of Corrosion. Second edition, 1996, Ed. Prentice-Hall, 31.
- [27].Caporali, S.; Fossati, A.; Lavacchi, A.; Perissi, I.; Tolstogouzov, A.; Bardi, U. Aluminium electroplated from ionic liquids as protective coating against steel corrosion. *Corrosion Science*. 2007.

- [28].Valcarce, M. B.; De Sánchez, S. R. Vázquez, M. A comparative analysis of copper and brass surface films in contact with tap water. *J. Mater Sci.* 2006, 41, 1999-2007.
- [29].de la Cuadra, ¿Gusta Ud. un tequila?, J., Investigación y desarrollo CONACyT, 1995, 1.
- [30].Córdoba, D., Toxicología. Ed. Manual Moderno, 2006, 5.
- [31].Norma Oficial Mexicana NOM-006-SCFI-2005. Diario Oficial de la federación, 2005, 9.
- [32].Norma Oficial Mexicana NOM-142-SSA1-1995. Bienes y servicios. Bebidas alcohólicas. Especificaciones sanitarias, 1995, 33.
- [33].Rodríguez A., A., Estudio de la remoción de cobre en tequila en un reactor electroquímico de placas paralelas, Tesis de maestría, Universidad de Guadalajara, 2012.
- [34].Rodríguez A., A., Remoción de cobre en medios acuosos por medio de un reactor electroquímico cilíndrico de flujo, Tesis de licenciatura, Universidad de Guadalajara, 2009.
- [35].Fogler, H. S., Elementos de ingeniería de las reacciones químicas, Cuarta edición, 2008, Ed. Pearson Prentice Hall. p. 869.
- [36].Tison, R. Copper recovery using a tumbled-bed electrochemical reactor. *J. Electrochem. Soc: Electrochemical science and technology.* 1981, 128, 2, 317-322.
- [37].Thomas, F. B., Ramachandran, P. A., Dudukovic, M. P., Jansson, R. E. W., Laminar radial flow electrochemical reactors. II. Convective diffusion of inert tracer, *Journal of Applied Electrochemistry*, 1989, 19, 845.
- [38].Coeuret, F. Introducción a la ingeniería electroquímica, Primera edición, 1992, Ed.Reverté.
- [39].Santos, J. L. C., Geraldés, V., Velizarov, S., Crespo, J. G., Characterization of fluid dynamics and mass-transfer in an

- electrochemical oxidation cell by experimental and CFD studies, *Chemical Engineering Journal*, 2010, 157, 379.
- [40]. Nelissen, G., Theemsche, A. V., Dan, C., Van den Bossche, B., Deconinck, J., Multi-ion transport and reaction simulations in turbulent parallel plate flow, *J. of Electroanalytical Chemistry*, 2004, 563, 213
- [41]. Nguyen, T. V., Walton, C. W., White, R. E., *J. of the Electrochemical Society*, 1986, 133, 1, 81.
- [42]. Petrova, T. P., Shapnik, M. S., *Proc. Kazan Institute of Chemistry and Technology*, 1975, 51, 116 (in Russian).
- [43]. Paidar, M., Bouzek, K., Laurich, M., Thonstad, J., Application of a three-dimensional electrode to the electrochemical removal of copper and zinc ions from diluted solutions. *Water environment research*, 2000, 72, 618.
- [44]. Tobias, C. W., *J. Electrochem. Soc.*, 1959, 106, 833.
- [45]. Bisang, J. M., Modelling the startup of a continuous parallel plate electrochemical reactor, *J. Appl. Electrochem*, 1997, 27, 4, 379.
- [46]. Mustoe, L. H., Wragg, A. A., Effect of flow rate and constant operating current on the behavior of a recirculating electrochemical reactor system, *Journal of Applied Electrochemistry*, 1983, 13, 507.
- [47]. Szpyrkowicz, L., Kelsall, G. H., Souto, R. M., Ricci, F., Kaul, S. N., *Chemical Engineering Science*, 2005, 60, 523.
- [48]. Newman J., *Electrochemical systems*, First edition, 1973, Ed. Prentice-Hall.
- [49]. Stern, M, Geary, A. L. *Electrochemical Polarization*, 1. A Theoretical Analysis of the Shape of Polarization Curves, *J. Electrochem. Soc.* 1957, 104, 56-63.

# ***Nanoelectroquímica y Nanotecnología (NEN)***

---

Coordinador: ***Dr. Luis A. Godínez Mora-Tovar***<sup>1</sup>

## Colaboradores

Juan Manríquez Rocha<sup>1</sup>  
Maximiliano Barcena Soto<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica,  
Parque Tecnológico Querétaro Sanfandila,  
76703, Querétaro, México

<sup>2</sup> Universidad de Guadalajara  
Departamento de Química  
CUCEI, Jalisco, México

## Resumen

En este capítulo se presenta la definición, campo de estudio y enfoque que caracteriza a la nano-electroquímica. En una segunda parte, se presenta un breve análisis de la evolución de la especialidad en México y finalmente se ponen a consideración del lector las perspectivas de la temática en el país.

## ¿Qué es la nano-electroquímica?

Como su nombre lo indica, la nano-electroquímica se refiere a la rama de la electroquímica en la que el enfoque de estudio o desarrollo de aplicación se centra en las propiedades de la materia y de la interfase electroquímica en la escala de los nanómetros. Como es bien sabido, un nanómetro corresponde a una milésima de la millonésima parte de un metro ( $10^{-9}$  m) y en esta escala, el enfoque de estudio es un tema ciertamente importante pues al describir la percepción de una pintura por ejemplo, no es lo mismo estudiar un punto de color y su interrelación con los puntos vecinos, que aproximar la observación desde el contexto global de la pintura. En este sentido, una aproximación holística e integral de las cosas es muy distinta a un enfoque puntual que se fundamenta desde la escala muy pequeña de las cosas y que a partir de ahí, proyecta la construcción de sistemas complejos.[1]

Desde la famosa ponencia a mediados del siglo pasado del Prof. Richard Feynman en Caltech, "There is plenty of room at the bottom", [2] la aproximación conceptual de hacer ciencia y tecnología con un enfoque de entender y utilizar lo muy pequeño para ir construyendo hacia "arriba" revolucionó la aproximación tradicional de estudiar los sistemas macroscópicos y a partir de su división, entender las propiedades de sus componentes. La propuesta disruptiva del Prof. Feynman se fundamenta

en la idea de que así como en escalas de dimensión macroscópicas se manifiestan ciertas propiedades que “promedian” y dan lugar a fenómenos integrales, en la escala nano, aparecen propiedades emergentes características de la escala molecular abriendo de este modo un campo de estudio y una gama de aplicaciones que han causado un interés muy particular en la comunidad científica.

En este contexto, y a mediados de los 70´s, el Prof. Norio Taniguchi en Tokio, Japón, acuñó el término de nanotecnología para describir el potencial del uso de los conceptos de la nano-ciencia para construir máquinas y dispositivos a imagen de muchas de las aplicaciones macroscópicas conocidas, utilizando componentes en escala nanométrica. [3] De este modo, fue posible comenzar a vislumbrar el uso de moléculas como componentes de máquinas en la escala de lo muy pequeño y con ellas, aplicaciones no sólo originales sino ampliamente prometedoras. [4] Así por ejemplo, se ha hablado de nano-robots que pudieran incorporarse en el flujo sanguíneo de personas para encontrar y administrar selectivamente medicamentos en células o tejidos afectados por alguna enfermedad, se ha pensado en dispositivos de almacenamiento de información a nivel molecular que permitirían densidades muy altas de almacenamiento e incluso se ha elaborado en máquinas que manipulen componentes en escala molecular y permitan construir nano-dispositivos vía instrucciones a las que se pueda acceder por internet; es decir adquirir hardware vía internet pues los componentes estarían incorporados en un sistema que tuviera almacenados los diferentes componentes en espacios muy pequeños dentro de un ordenador conectado a la red. [5]

En el marco de estas ideas sin embargo, es importante distinguir entonces si la nano-electroquímica es nano-ciencia o nano-tecnología.

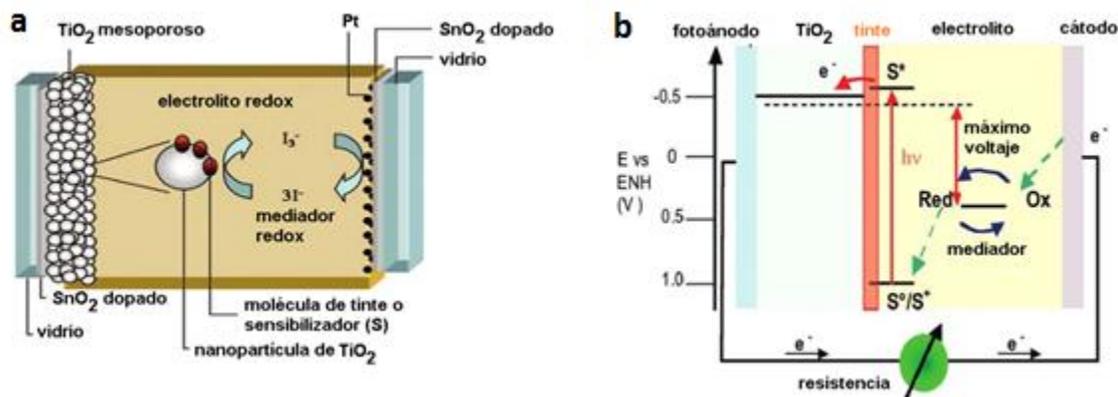
Como en el caso de la escala macroscópica tradicional, la diferencia consiste en el enfoque con el que se genera y utiliza el conocimiento. En términos no muy rigurosos, la ciencia consiste en un conjunto de conocimientos sistematizados, adquiridos mediante el método científico y con la característica de que pretende responder la pregunta: ¿cómo funciona el universo? (áreas del conocimiento como la filosofía o la religión contestan a la pregunta del porque funciona como lo hace el universo y emplean otros mecanismos distintos al método científico para generar las respuestas). La tecnología por otro lado utiliza el conocimiento científico y genera dinámicas y metodologías para construir dispositivos tangibles que permitan a los seres humanos realizar las actividades de su interés de una manera más eficiente. Así, mientras que la tecnología tiene un sentido estrictamente utilitario, la ciencia es un tema de responder a la curiosidad humana a través del método científico.

### **¿La nano-electroquímica es nano-ciencia o nano-tecnología?**

En este contexto, vale la pena preguntar si la nano-electroquímica es una ciencia o si forma parte de las distintas variantes de especialización de la nano-tecnología. Con base en estas ideas, es posible decir que se ha abordado el tema con los dos enfoques y que lejos de ser diferenciador, el tema es claramente complementario. A modo de ejemplo, dos trabajos representativos pueden ser citados.

En 1991, el grupo del Prof. Grätzel reportó la síntesis y caracterización de electrodos nano-cristalinos semiconductores de  $\text{TiO}_2$  sensibilizados para la construcción de una nueva clase de celdas solares con alto potencial tecnológico (ver Figura 1). [6] El conocimiento reportado en este trabajo ha derivado en varias patentes y en empresas de base tecnológica que en los últimos 25 años han ganado una posición

respetable en el mercado de los dispositivos de conversión de energía solar. Desde este punto de vista, la utilización de partículas en escala nanométrica para construir una nueva clase de celdas solares transparentes, baratas y amigables con el medio ambiente, ha sido un tema muy exitoso de nanotecnología electroquímica.



**Figura 1.** (a) Esquematación de una celda solar sensibilizada con tintes (o Celda Grätzel) y (b) Diagrama energético representativo de este dispositivo.

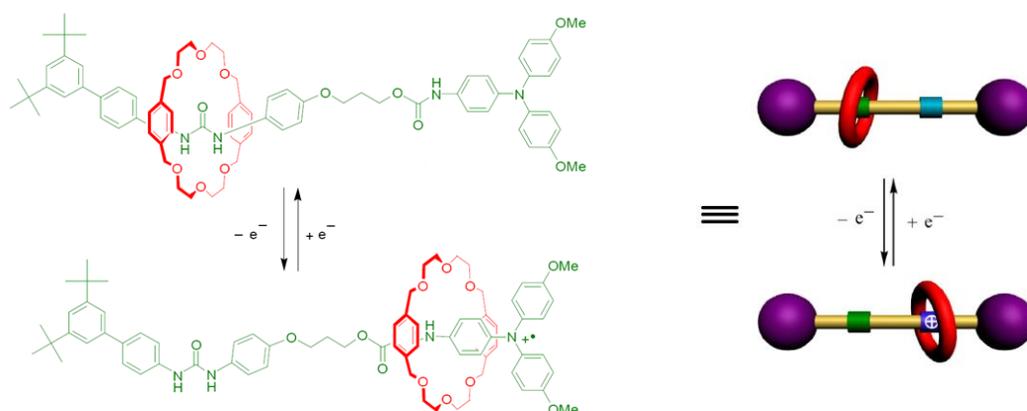
Además del impacto tecnológico que ha tenido la utilización de electrodos semiconductores con grandes áreas superficiales, el electrodo nano-estructurado reportado por Grätzel abrió también varias líneas de investigación científica tendientes a entender porque un electrodo construido con nano-partículas no presenta un doblamiento de bandas, o porque puede absorber fotones a longitudes de onda que dependen del tamaño de la partícula semiconductor; fenómenos que no eran reproducidos en los materiales semiconductores macro-métricos tradicionales. Desde este punto de vista, la investigación reportada por Grätzel es claramente una contribución importante de la nano-electroquímica a la ciencia; particularmente a la nano-ciencia.

Además de los materiales nano-estructurados, que como se ha visto presentan propiedades características, interesantes y potencialmente

muy importantes desde el punto de vista tecnológico, existen materiales que utilizando moléculas y sus interacciones dan lugar a dispositivos que pueden visualizarse como máquinas en escala molecular. Estas máquinas tienen componentes nano-métricos que explotan interacciones débiles, distintas a las del enlace covalente que define el campo de estudio principal de la química, para diseñar, y controlar el rol específico de cada componente en la máquina molecular. Desde el punto de vista científico, el estudio de las interacciones no covalentes de moléculas o agregados define el campo de estudio de la química supramolecular que, como definió el Prof. J. M. Lehn, constituye en analogía no el campo de estudio de las moléculas como entes individuales (sus reacciones, generación y desaparición vía reacciones químicas tradicionales) sino de las interacciones y dinámicas de su relación en sociedades de moléculas. Así, la química supramolecular es la química que estudiando las interacciones débiles estudia la química más allá del enlace covalente y es la ciencia sobre la que es posible desarrollar la nano-tecnología de las máquinas en escala molecular. [7]

En el campo de la nano-electroquímica de máquinas moleculares, es importante citar el trabajo de Kaifer [8] y de Chiu [9] y colaboradores, quienes reportaron el uso de rotaxanos o trenes moleculares que, como muestra la Figura 2, tienen una cadena orgánica con dos estaciones moleculares y un anillo que puede migrar entre las estaciones pero que se encuentra confinado al tren molecular. [9] Controlando el potencial eléctrico, es posible confinar el anillo a cualquiera de las dos estaciones del rotaxano. La posición del anillo en cada estación puede visualizarse como una unidad de información (0 ó 1) y de este modo el compuesto puede conceptualizarse como una máquina simple de almacenamiento de información a escala nano-métrica. Mientras que las interacciones supramoleculares que permiten controlar la posición del anillo en

cualquiera de las dos estaciones disponibles en el tren constituye un tema claro de nano-ciencia, la ingeniería molecular para diseñar, construir y controlar el dispositivo de almacenamiento de información es evidentemente objeto del campo de la nano-tecnología.



**Figura 2.** Esquemización de la respuesta redox de un rotaxano.<sup>9</sup>

Entonces y a modo de conclusión de esta sección, es posible definir la nano-electroquímica como la rama de la electroquímica (que es la ciencia que estudia procesos y eventos en la que se verifican procesos de transferencia de carga en una o más interfaces) en la que el enfoque de estudio o de aplicación, se centra en propiedades características de materiales en los que por lo menos una dimensión debe ser nanométrica (menor a 100 nm). También es claro que aunque el enfoque dominante de alguna aproximación nano-electroquímica puede ser científico o tecnológico, con frecuencia es posible encontrar ambas visiones y que, lejos de ser excluyentes, son complementarias.

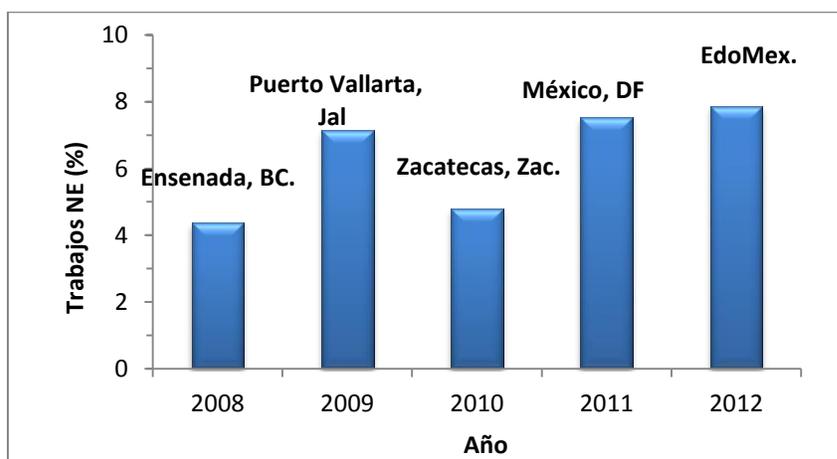
## **La nano-electroquímica en México**

A medida que la nano-ciencia y la nano-tecnología se han abierto camino con un fuerte impulso en las dos últimas décadas, se ha visto la necesidad de conformar la especialidad en la materia. Lo anterior se ha visto reflejado en el nacimiento de revistas internacionales científicas especializadas, así como en la creación de nuevas carreras. En México, el interés y desarrollo de estas disciplinas no ha sido la excepción y se ha extendido sobre todo, en la ciencia de los materiales y permeado a todas las áreas de investigación, resaltando en este contexto, el área de la Electroquímica.

En el Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (SMEQ) del 2008, realizado en Ensenada, [10] se dio el paso a incorporar esta área de manera más específica y a partir de ahí la nano-electroquímica se ha considerado como una sección más para la presentación de trabajos en el SMEQ. En este sentido, un buen referente de la investigación que se realiza en México en el área de la nano-electroquímica es el número de trabajos presentados en los congresos que la SMEQ ha organizado, así como en los congresos internacionales de la International Society of Electrochemistry (ISE) y de la Electrochemical Society (ECS).

La evolución de los trabajos presentados en la SEMQ en la sección de nano-electroquímica, en referencia al total de trabajos presentados, se puede observar en la Figura 3. En ella se puede notar que el porcentaje de participación inicial en el Congreso de Ensenada fue del 4.4% con respecto al número total de trabajos. Un año después, en el congreso de Puerto Vallarta, [11] se alcanzó un 7.1%, cuyo valor se ha vuelto casi una constante en los dos últimos congresos organizados exclusivamente por la SMEQ, mismos que tuvieron lugar en el 2011 en la Cd. de México[12] y en 2012 en Toluca de Lerdo; [13] en donde el porcentaje

de trabajos enfocados a la nano-electroquímica corresponden al 7.5% y al 7.9 %, respectivamente. A pesar del decremento en el número de trabajos presentados en el congreso celebrado en Zacatecas, [14] el porcentaje que dichos trabajos representan (4.8%), sigue siendo mayor al porcentaje alcanzado en Ensenada. Lo anterior, puede enfatizarse si se toma como referencia que el número de trabajos en la sección de nano-electroquímica fue de 8 en Ensenada, comparado con 12 en Zacatecas. Estos datos reflejan el crecimiento, el interés y el avance constante del desarrollo de la nano-electroquímica en México.



**Figura 3.** Porcentaje de trabajos presentados en la sección de nano-electroquímica (NE) en relación al número total de trabajos presentados en los congresos de la SMEQ.

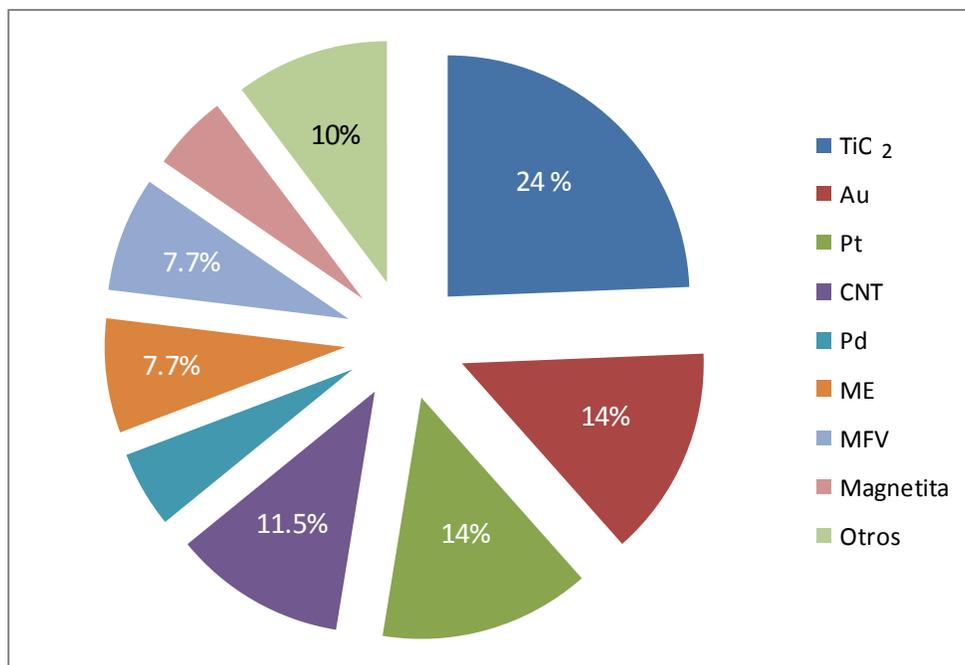
Por otro lado, en el congreso internacional realizado en Querétaro en 2013, (“64<sup>th</sup> Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry”), [15] hubo una participación relevante por parte de los integrantes de la SMEQ con 41 trabajos enfocados al área de la **nano-electroquímica**. Un año después se participó significativamente con 23 trabajos en el 226<sup>th</sup> Meeting of the Electrochemical Society realizado en Cancún. [16] Es importante resaltar, que, en ambos congresos internacionales, el prefijo nano fue utilizado de forma muy

enfática por la comunidad electroquímica internacional para describir trabajos realizados con nanoestructuras, nanotubos, nanopartículas, nanopelículas, nanodispositivos, entre otros; con lo que se alcanza a percibir el fuerte impacto de los nanomateriales en el área de la electroquímica a nivel internacional.

En los trabajos presentados en los congresos de 2008 al 2012 es posible observar una tendencia en cuanto a los materiales nanoestructurados reportados en los estudios (ver Figura 4). La mayor cantidad de trabajos presentados, mismos que representan el 24% del total, se refieren a estudios con nanotubos y nanoestructuras de  $\text{TiO}_2$ , ya que, es sabido que la anodización electroquímica es el método preferido para obtener dichas estructuras. Las aplicaciones tecnológicas del  $\text{TiO}_2$  son de gran interés porque este material puede ser usado en sensores de gas, conversión de energía solar y fotocátalisis. Después de los trabajos enfocados al uso de nanoestructuras a base de  $\text{TiO}_2$ , prosiguen las investigaciones enfocadas a nanopartículas de Au y de Pt con un porcentaje del 14%. Ambos materiales son extensivamente usados en electroquímica y resultan ampliamente atractivos por su versatilidad y la amplia ventana de potencial que presentan. El tener nanopartículas de estos metales resulta atractivo porque la cantidad de material se reduce notablemente, lo que representa una ventaja, ya que son materiales escasos y de alto costo.

Los trabajos reportados en el caso del Au son referidos a su uso en el área analítica para determinar Glucosa, Dopamina y otros analitos. Además de usarse como soporte para otros estudios electroquímicos. El Pt, por su parte, resulta muy atractivo por sus propiedades catalíticas y su aplicación en las celdas de combustible para la conversión de energía. En cuarto lugar, con 11.5%, aparecen los trabajos de

investigación enfocados al uso de nanotubos de carbono (CNT). Estos materiales se han utilizado como soporte de otros materiales y para la fabricación de composites con el fin de aumentar la conductividad eléctrica. Los CNT resultan atractivos porque se ven como sustitutos de los electrodos de carbono a escala nanométrica.



**Figura 4.** Distribución del número de trabajos presentados en los Congresos del SMEQ de 2008 a 2012 en relación al tipo de Material nano-estructurado usado en los estudios. ME refiere a otros metales y MFV a materiales en sistemas fotovoltaicos diferentes al TiO<sub>2</sub>.

Con el 6% de los trabajos, se reportan estudios electroquímicos de nanoestructuras con materiales fotovoltaicos como CdS, CuInSe<sub>2</sub>, ZnO, Cu<sub>2</sub>O, entre otros. También con un 6% de los trabajos se reporta el estudio de nanopartículas de diferentes metales como Ag, Ni, Cu y Ru; cuyo interés se centra principalmente en el desarrollo de electrodeposiciones.

Posteriormente, con porcentaje del 5%, se encuentran los trabajos con Paladio, éste fue usado como un electrocatalizador para la reacción de reducción de Oxígeno (RRO). También, con 5% de trabajos, se reportan los estudios de la electrosíntesis y caracterización de nanopartículas de magnetita, cuya aplicación se enfoca en el medio médico. Finalmente, debemos mencionar el estudio electroquímico de otras nanoestructuras de materiales como son polímeros conductores, composites y sistemas micelares.

A partir de lo antes expuesto, se puede observar, que los temas presentados en el marco de los congresos de la SMEQ muestran el enfoque multidisciplinario de los diferentes grupos de investigación que trabajan en México.

### **Perspectivas**

Establecer una predicción respecto al rumbo que tomará la investigación en el área de la nano-electroquímica en México resulta incierto, ya que las perspectivas hacia al futuro se consideran un planteamiento multifactorial. Sin embargo, si partimos de las tendencias mundiales y de las necesidades más primordiales de nuestra sociedad, se puede hacer un estimado muy burdo. Se sabe que las áreas prioritarias de cualquier país, en términos generales, son en primer lugar la producción de energía, seguida muy de cerca del tratamiento y suministro de agua y en tercer lugar al área de la salud. En efecto, se puede observar que de los trabajos reportados del 2008 al 2012 en la sección de nano-electroquímica casi un 50% están relacionados con la producción de energía, ya sea con celdas fotovoltaicas o con las celdas electroquímicas de combustible. Por lo que es de esperarse, que las investigaciones continúen con la tendencia de implementar dispositivos de conversión de energía que a su vez que sean amigables con el medio ambiente.

Con respecto al agua, tal vez han estado usando otros métodos alternativos a la electroquímica, ya que no se ve reflejado su uso en el número de trabajos. Sin embargo, la necesidad está patente, pues el cambio climático es una situación real que amerita atención, por lo que tecnologías para el aprovechamiento, uso racional y reúso del agua, serán tema de investigación por las siguientes décadas.

El en el área de la salud se desarrollarán sensores basados en la nano-electroquímica que ayudarán en un diagnóstico más rápido y menos invasivo. Al mismo tiempo, se empezarán a desarrollar tratamientos localizados y menos drásticos, es decir, más amigables con el cuerpo humano. Un indicio de esta tendencia es la electrosíntesis de nanopartículas de magnetita para provocar hipertermia localizada para el tratamiento contra el cáncer, entre otras aplicaciones. A la vez, existe la tendencia a asociar la calidad del medio ambiente con la salud del humano, este hecho inducirá a realizar investigaciones para el uso de la nanotecnología en aras de conservar el equilibrio en nuestro medio.

## Referencias

- [1]. Paul Davies, "God and the New Physics", Simon and Schuster Inc. 1983. Engineering & Science, Volume 23, No. 5, 1960, [http://en.wikipedia.org/wiki/There%27s\\_Plenty\\_of\\_Room\\_at\\_the\\_Bottom](http://en.wikipedia.org/wiki/There%27s_Plenty_of_Room_at_the_Bottom)
- [2]. N. Taniguchi, "On the Basic Concept of 'Nano-Technology'," Proc. Intl. Conf. Prod. Eng. Tokyo, Part II, Japan Society of Precision Engineering, 1974.
- [3]. K. E. Drexler, "Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology", Doubleday, 1986.L. A.
- [4]. Godínez, *Ciencia*, 51, 2, 23-31, 2000.B. O´Reagan, M. Gratzel, *Nature*, 353, 737-740, 1991.
- [5]. J. M. Lehn, "Supramolecular Chemistry; Concepts and Perspectives", Wiley-VCH, Weinheim, 1995.
- [6]. R. A. Bissell, E. Cordova, A. E. Kaifer, J. F. Stoddart, *Nature*, 369, 133-137, 1994.
- [7]. J. Chang, C. Lai, S. Chiu, *Molecules*, 20, 1775-1787, 2015.
- [8]. Memorias del XXIII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 1<sup>st</sup> Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, Ensenada, B. C.,2008.
- [9]. Memorias del XXIV Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 2<sup>nd</sup> Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, Puerto Vallarta, Jal., 2009.
- [10]. Memorias del XXVI Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 4<sup>th</sup> Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, México, D.F., 2011.
- [11]. Memorias del XXVII Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 5<sup>th</sup> Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, Toluca, Edo. de México, 2012.

- [12].Memorias del XXV Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 3<sup>th</sup> Meeting of the Mexican Section of the Electrochemical Society, Zacatecas, Zac. 2010.
- [13].64<sup>TH</sup> Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Querétaro, México, 2013.
- [14].226<sup>th</sup> Meeting of the Electrochemical Society, XXIX Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica, 7th Meeting of the Mexico Section of the Electrochemical Society. Cancún, Quintana Roo, 2014.

## ***Electroquímica Ambiental (EA)***

---

Coordinadora: ***Dra. Silvia Gutiérrez Granados***<sup>3</sup>

### Colaboradores

Carlos Ponce De León A.<sup>1</sup>, Carlos Barrera D.<sup>2</sup>, Gabriela Roa M.<sup>2</sup>, Patricia Balderas H.<sup>2</sup>,  
R. Galindo<sup>3</sup>, José Luis Nava<sup>4</sup>, Rubén Ornelas<sup>4</sup>, Israel Rodríguez Torres<sup>5</sup>,  
Juan Manuel Peralta-Hernández<sup>4</sup>, Erika Bustos B.<sup>6</sup>

<sup>1</sup>University of Southampton  
Electrochemical Engineering Laboratory, Energy Technology Research Group,  
Engineering Sciences, Highfield, Southampton SO17 1BJ, United Kingdom

<sup>2</sup>UAEM-UNAM.  
Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable (CCIQS) Carretera Toluca-  
Atlacomulco, Km 14.5. C.P. 50200, Toluca, Estado de México, México.

<sup>3</sup>Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología,  
Av. Insurgentes Sur 1582, Benito Juárez, Crédito Constructor,  
C.P 03940 Ciudad de México, D.F.

<sup>3</sup>Universidad de Guanajuato  
Departamento de Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus  
Guanajuato, Cerro de la Venada s/n, Pueblito de Rocha, C.P. 36040  
Guanajuato, Gto, México.

<sup>4</sup> Universidad de Guanajuato  
Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica,  
Av. Juárez 77, Zona Centro, Guanajuato, Guanajuato, C.P. 36000, México.

<sup>5</sup>Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Instituto de Metalurgia – Facultad de Ingeniería,  
Av. Sierra Leona 550, Lomas 2ª sección,  
C.P. 78210 San Luis Potosí, SLP, México.

<sup>6</sup>Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica, S. C.  
Parque Tecnológico Querétaro s/n, Sanfandila, Pedro Escobedo,  
76703, Querétaro, Querétaro, México.

## Introducción

Durante las últimas décadas la descarga de contaminantes en suelos, medios acuosos y atmosféricos se ha incrementado dramáticamente con el continuo desarrollo industrial en todo el mundo. Se ha llegado al punto en que el medio ambiente ya no puede absorber las cantidades de contaminantes que se han venido vertiendo en suelos, ríos, aire y mares a través de los años. Los métodos actuales de producción se están desarrollando para minimizar, eliminar o recircular los desechos que generan y cumplir con los cada vez más estrictos niveles permitidos de contaminación que los organismos regulatorios han impuesto y para evitar el impacto ambiental que generan. Sin embargo, muchos de los métodos tradicionales de tratamiento de desechos que se han venido usando no son adecuados en muchos casos y es necesario desarrollar nuevas tecnologías como los procesos electroquímicos que son capaces de extraer metales y eliminar compuestos orgánicos de aguas naturales y de desecho, así como tratar suelos contaminados con una mínima interferencia y a bajo costo energético.

Existen muchos ejemplos en los que la contaminación generada en procesos industriales ha sido disminuida o eliminada a través de estos métodos integrados en los procesos industriales [1-3]. En México, la disposición de desechos es un problema grave y muchos de los problemas ambientales que se presentan suelen ocurrir debido a la falta de comunicación entre las empresas y las instituciones de investigación que podrían proponer propuestas viables. En efecto, varios grupos de investigación de diversas universidades e institutos en México se han dado a la tarea de desarrollar procesos electroquímicos novedosos para la remoción de contaminantes orgánicos como colorantes sintéticos, pesticidas y fármacos usando métodos electroquímicos de oxidación

avanzada [4, 5], remoción de metales pesados [6-7] y en el tratamiento de suelos [8-9].

En este capítulo se presenta un resumen de las más importantes aplicaciones en los que la electroquímica se ha usado para proponer metodologías a la industria en el tratamiento de varios efluentes. Por ejemplo, la sección 2 aborda la eliminación de cromo hexavalente y la sección 3 presenta métodos de remoción de As y F. La sección 4 trata sobre la extracción de metales de aguas residuales usando electrocoagulación y a través del depósito metálico, respectivamente en celdas electroquímicas, tales como las de placas paralelas y cilindro rotatorio. La sección 5 aborda el tratamiento de aguas conteniendo compuestos orgánicos usando electro-oxidación, electro-Fenton y foto-electro-Fenton y muestra la versatilidad de estos procedimientos que actualmente se usan en algunas industrias para tratar agua contaminada. Asimismo, la sección 6 considera el método electrocinético para el tratamiento de suelos y los más importantes avances en este campo que se han llevado a cabo en México. Estas tecnologías tienen la capacidad de disminuir la cantidad de materia orgánica y de iones metálicos en el agua, a niveles que son aceptables para ser descargados en el medio ambiente o reutilizadas en algún proceso industrial.

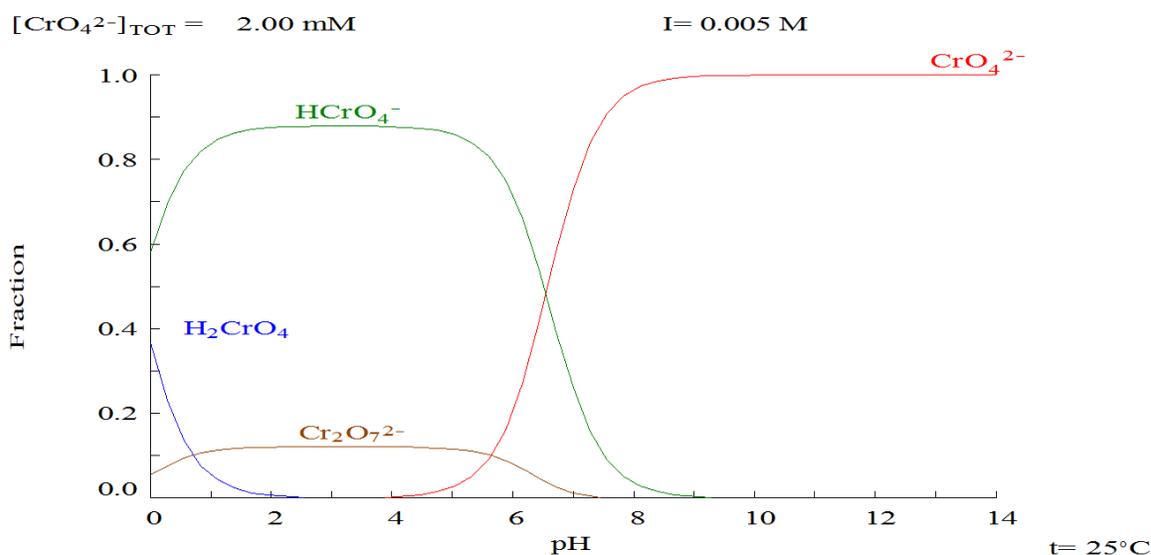
### **Eliminación de Cr(VI)**

En México, se han encontrado casos graves de contaminación por Cr(VI), tal es el caso de la empresa Cromatos de México ubicada en Lechería, Tultitlán, Estado de México que generó gran cantidad de residuos sólidos (cerca de 100 mil toneladas), que se convirtieron en relleno [11], provocando la muerte de muchas personas en dicha zona.

Otros sitios en donde se han registrado elevadas concentraciones de Cr(VI) es en Lago de Chapala y en la Ciudad de León, Guanajuato [12].

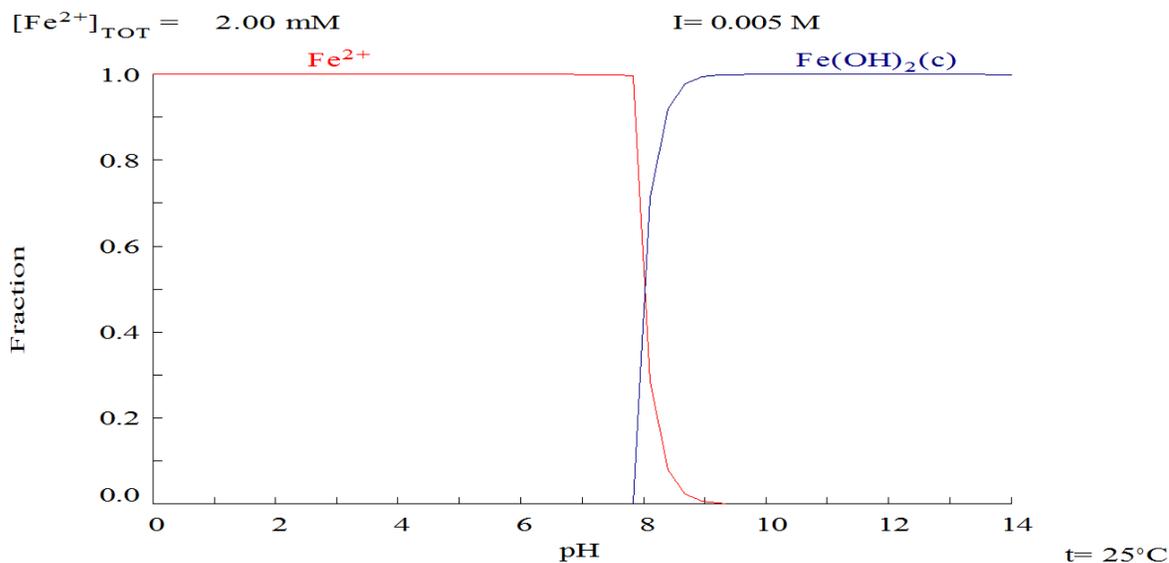
El Cr(VI) se encuentra regularmente como anión ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ,  $\text{CrO}_4^{2-}$ ) y es altamente soluble, como lo muestra la figura 1, y debido a su alto poder oxidante se convierte en un agente tóxico en potencia.

La Figura 2 muestra un diagrama de especies del Fe(II), el cual se emplea comúnmente para realizar la reacción de reducción de Cr(VI) a Cr(III).



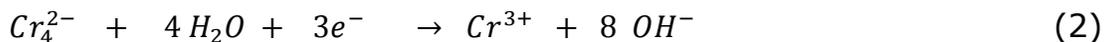
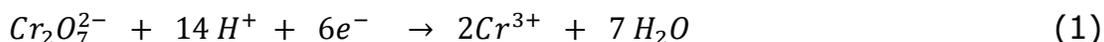
**Figura 1.** Diagrama de distribución de especies de Cromo hexavalente [13]

La reducción de Cr(VI) a Cr(III) por métodos electroquímicos puede llevarse a cabo empleando solamente reacciones electródicas o una combinación de reacciones electródicas y reacciones en solución acuosa.



**Figura 2.** Diagrama de distribución de especies de Hierro (II) [13]

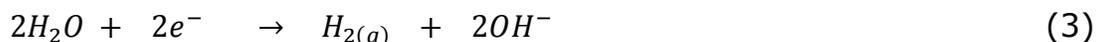
En el caso de reacciones electródicas, éstas se basan en las reacciones (1) y (2), dependiendo de la especie química predominante en solución acuosa



A partir de la reacción (1) se observa que el valor del pH de la solución acuosa afecta directamente el desplazamiento hacia los productos de la reacción. Por lo que en la literatura se reporta que para que el proceso se lleve a cabo de una manera adecuada es necesario trabajar a valores de pH entre 1.5 a 3 [14].

Además es necesario tomar en cuenta que en el cátodo también se lleva a cabo la reacción (3), en donde el agua se reduce para formar gas

hidrógeno e iones hidroxilo. Por lo que se llevan a cabo reacciones simultáneas y dado que hay una producción de iones hidroxilo el pH de la solución acuosa tiende a incrementarse, lo cual hace que la reacción de reducción de Cr(VI) disminuya su eficiencia, dado que necesita de una gran cantidad de protones.



Los materiales electródicos que se han empleado para llevar a cabo este tipo de proceso son: carbón vítreo reticulado, fibra de carbono y grafito. Recientemente se han utilizado electrodos de diamante dopado con boro (DDB) en una configuración DDB-DDB, con la cual se ha logrado obtener una eficiencia de reducción del 40 % a un pH de 2 [15].

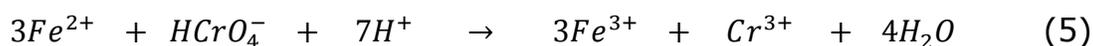
Para llevar a cabo este proceso, se han empleado ánodos de sacrificio, los cuales han sido de cobre y hierro [16-17] .

En el caso de la reacción anódica



En el cátodo se llevan a cabo las reacciones (1) a (3)

En solución acuosa



De acuerdo a las reacciones (1) y (5) es importante resaltar que ambas necesitan protones, por lo que a valores de pH bajos aumentará la eficiencia de reducción de Cr(VI), por lo que es importante mantener el valor de pH a valores debajo de 3.0.

Se puede observar en los diagramas de distribución de especies (figura 1 y 2) pH a valores ácidos, se tiene los iones  $\text{HCrO}_4^-$  y  $\text{Fe}^{2+}$  libres, lo que favorece la reacción, poniendo en evidencia nuevamente la necesidad de mantener el valor de pH ácidos.

### **Remoción de Arsénico**

La contaminación por metales pesados como resultado de la industria metalúrgica, es un problema histórico, que enfrentan todas las zonas con actividad minera en el mundo [18, 19]. La infiltración de metales como el arsénico (As), en los cuerpos de agua para el consumo humano, es un serio problema por su alta toxicidad, causando la afectación de 150 millones de personas alrededor del mundo [20, 21]. La exposición prolongada a este metal es una de las principales causas de afectaciones crónicas en la piel, e incrementa los riesgos de sufrir cáncer en otros órganos como: vaso, hígado, vejiga, pulmones, riñones y próstata [22]. La Organización Mundial de la Salud (OMS) en coordinación con la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA), establecieron  $10 \mu\text{gL}^{-1}$  como límite máximo de concentración de arsénico permisible en agua para el consumo humano [23 - 25]. En el caso particular de México, las autoridades sanitarias y de protección al ambiente, establecen una concentración de  $25 \mu\text{gL}^{-1}$  de As en agua, como máxima permisible.

Los métodos convencionales para la remoción de As, incluyen la adición de grandes cantidades de coagulantes químicos como sulfatos de hierro o aluminio, que generan grandes cantidades de lodo residual, el cual debe ser tratado posteriormente, para su adecuado confinamiento, lo que incrementa los costos de remediación [26, 27]. Como solución a esta problemática ambiental y de salud, la comunidad científica ha puesto su atención en métodos electroquímicos como la

electrocoagulación (EC), que además de las bondades de la coagulación química convencional, conjunta la capacidad de disolver electroquímicamente los metales usados como coagulantes, que suelen ser hierro y aluminio, disminuyendo así, la cantidad de contraiones [28]. La EC es un proceso de tratamiento de agua fiable, que no requiere de equipo costoso o muy complejo, capaz de transformar el agua tratada en un líquido inodoro e incoloro y con muy poca cantidad de lodo residual [18, 28].

En 2001 Balasubramanian y col. [29] reportaron el uso de un reactor batch para la remoción de As, de efluentes industriales. Los autores mencionan que es posible controlar la generación de iones de Fe (III) ajustando los parámetros de operación del proceso, y que la EC, es un método efectivo para la remover As, sin embargo no establecen ningún mecanismo de reacción. Trabajos posteriores [27, 28] muestran que el As se encuentra presente en diferentes estados de oxidación (+3 o +5), en compuestos como  $\text{HAsO}_2$ ,  $\text{H}_3\text{AsO}_3$  y  $\text{HAsO}_4^{2-}$ . Los compuestos con estado de oxidación de +5 resultan más susceptibles al ataque por EC, en medio neutro, empleando Al o Fe como electrodos. Es por ello que se trata de favorecer las condiciones óptimas de operación para oxidar los compuestos de As (III) a As (V). Kobya y col. [28] establecen en 2011 el mecanismo de interacción del As, con electrodos de Fe y Al.

Entre los electrodos típicamente empleados en la remoción de As mediante EC, se encuentran los de Fe, Al y Ti [30]. Los electrodos de Fe, presentan la más alta capacidad de remoción hasta ahora reportada (99%) a valores de pH de entre 6 y 8 [31]. El proceso de EC, empleando electrodos de Fe, está completamente estudiado y la literatura reporta que son los hidróxidos de hierro los encargados de la

remoción de arseniatos por el intercambio de ligandos y los procesos de adsorción [28,31].

Sin embargo, recientemente, diversos grupos de investigación [28,31 - 33] reportan que los electrodos de Al, muestran una mayor eficiencia en la remoción de As, por electrocoagulación, que los electrodos de Fe. Las reacciones que se originan entre el Al de los electrodos y el As disuelto en el agua, no están totalmente establecidas. Sin embargo, la ruta hasta ahora más aceptada es mediante la interacción entre los óxidos e hidróxidos de Al, con el As +3. Uno de los principales problemas al emplear los ánodos de Al, se debe a la formación de una capa de  $Al_2O_3$ , que origina la pasivación del área electro activa. Sin embargo, al ser la EC un proceso reversible, este problema puede solucionarse al invertir la corriente, para re-disolver el óxido formado. Finalmente, la velocidad y eficiencia de remoción de un sistema depende del control de diversos parámetros de operación como la concentración inicial de As, la densidad de corriente aplicada a los electrodos, las condiciones de flujo turbulento, el pH y el tiempo de electrólisis [28, 30, 31] .

Otro de los retos que enfrenta la investigación en esta área, es el escalamiento de procesos que resultan efectivos a nivel laboratorio y con muestras sintéticas a pruebas en planta piloto y con efluentes reales. Nava y col. [33, 34] reportan el uso de un reactor a escala pre-piloto con un volumen de reactor de  $88\text{ cm}^3$ , operando con un efluente residual de la industria metalúrgica del centro de México, que tienen una concentración inicial de As de  $50\text{ }\mu\text{gL}^{-1}$ . Los autores indican una etapa de pretratamiento a las muestras, que consiste en una desinfección simple, que se realiza por la adición de Hipoclorito, con lo cual se logra la oxidación de arsenitos a iones arsenatos, que son más susceptibles a la EC. El proceso de EC, se realiza en dos etapas, la primera, la

coagulación química convencional con agentes químicos que permiten la precipitación del As. Posteriormente, se trabaja con un arreglo de 3 electrodos de Al, dentro de un reactor con flujo turbulento. Los coagulantes se generan *in situ* por electrodisolución de los electrodos de Al en el medio. En el ánodo se generan los cationes de Al y en el cátodo se favorece la generación de H<sub>2</sub> gas, que da origen a la generación de hidróxidos de aluminio, que serán los responsables de la adsorción del As, todo este proceso se realiza en pH neutro, logrando disminuir la concentración de As de 50 µgL<sup>-1</sup> a 17 µgL<sup>-1</sup>.

### **Remoción de flúor**

El uso irracional del agua es un factor importante que conlleva la sobre explotación de los mantos freáticos y la búsqueda de este recurso a profundidades mayores. El agua almacenada en este tipo de yacimientos geológicos presenta un alto contenido en flúor [35]. En concentraciones por debajo de 1 mgL<sup>-1</sup>, el flúor resulta benéfico para prevenir problemas dentales, sin embargo, por arriba de esta concentración, causa diversas afectaciones en el organismo como: osteoporosis, artritis y otras afectaciones en los huesos, infertilidad en las mujeres, desórdenes de la tiroides y daño cerebral [36]. La Organización Mundial de la Salud, establece que la concentración de flúor en agua de consumo humano no debe exceder 1.5 mgL<sup>-1</sup> [37]. En México, recientes estudios revelan, que en algunos estados como San Luis Potosí, Chihuahua, Durango, Zacatecas, Aguascalientes y Guanajuato, las concentraciones de flúor en los cuerpos de agua va desde 1 hasta 9.5 mgL<sup>-1</sup> [38 - 41].

La remoción de flúor se realiza convencionalmente por precipitación – floculación con sales de calcio y aluminio, que a gran escala además de que se requiere una gran cantidad de dichas sales, se generan residuos de cloruros y sulfatos dependiendo de las sales que se empleen [42].

Otro método se basa en los procesos de adsorción con membranas [43] y la electrocoagulación (EC) [44 - 47].

En el proceso de EC, ocurre la electrodisolución del ánodo de sacrificio en el medio, lo que conduce a la formación de productos de hidrólisis (hidróxidos del metal) que son eficaces en la desestabilización de los contaminantes y / o en la formación de partículas de baja solubilidad que atrapan a los contaminantes. Asimismo, ocurre la reducción electroquímica de agua en el cátodo produciendo la formación de moléculas de hidrógeno gas que promueven una turbulencia suave en el sistema, con lo cual se mejora la floculación [44, 46].

Al igual que en la EC del As, que se menciona en la sección anterior, la selección adecuada de los electrodos es un parámetro crucial para la remoción del flúor. Los electrodos más comúnmente utilizados son los de Fe, Al y las combinaciones entre ambos, que han resultado tener una mayor eficiencia de remoción [45, 47]. Otros factores que están estrechamente ligados a la eficiencia de remoción del flúor son: la geometría del reactor y las condiciones de operación como la densidad de corriente y la velocidad de flujo [46].

M. Behbahan y col.[43] reportan en 2011, el uso de la EC, para la remoción de una muestra sintética de flúor de  $25 \text{ mgL}^{-1}$ , a pH neutro y con 4 electrodos de aluminio en forma de disco con un área total de  $240 \text{ cm}^{-2}$ , después de 25 minutos de tratamiento se reporta una eficiencia de remoción del 94.5 %. Uno de los principales problemas que los autores describen en este proceso, es la corrosión debida a la gran reactividad del flúor. Aoudj y col. [44] reportan el uso de una combinación de electrodos de Fe-Al, para la remoción simultanea de Cr y flúor en muestras sintéticas. Esto aborda una de las problemáticas de la

remoción de metales de efluentes, la presencia de dos o más metales en la solución, con el sistema que ellos proponen se alcanzan eficiencias de remoción de hasta el 95 % de ambos metales, siendo el Cr, mayormente atraído por los iones de Fe y el flúor removido por la interacción con los electrodos de Al. En 2007, Ching-Yao y col. [45] realizaron una simulación de la cinética de remoción del flúor de muestras sintéticas con diferentes concentraciones, para establecer el mecanismo de reacción que ocurre entre los ánodos y la solución concentrada de flúor, así como la influencia de varias de las variables de operación en el proceso.

En el trabajo de Sandoval y col. [46] publicado en 2014, se realiza el primer acercamiento a la solución real de la problemática del flúor, ya que se trabaja en un reactor filtro prensa de flujo continuo, acoplado a un floculador y clarificador, lo que se considera un sistema acoplado para la obtención de agua potable. Mediante este proceso se logra disminuir de 10 a 1 mg de flúor por L, lo que se traduce en eficiencias de remoción de hasta 96.2 %.

Palahouane y col. [47] proponen la posibilidad de hacer el proceso de EC aún más favorable con el ambiente, al sustituir la fuente de energía eléctrica, por dispositivos fotovoltaicos, con lo que se logra una alta eficiencia de remoción de flúor y una disminución del costo de energía eléctrica.

### **Remoción de otros metales (Ag, Pd, Ni, Zn, Cu y Cd)**

La industria de la galvanoplastia y acabado de metales genera grandes cantidades de efluentes acuosos, que contienen metales pesados en solución, los cuales se provienen de los procesos de enjuague de los artículos de metal recubierto [48], o de la industria minero-metalúrgica.

En México, la eliminación de estos metales se lleva a cabo tradicionalmente por métodos fisicoquímicos, donde se precipitan diferentes metales en forma de hidróxidos, con la generación de lodos que deben ser posteriormente confinados [49]. No obstante, del tratamiento que se les da a estos efluentes, en algunos casos no cumplen la norma ambiental vigente (NOM-002-SEMARNAT-1996), incluso aquellos que cumplen con las normas para la descarga, no son suficientes para restaurar las características iniciales del agua utilizada en el proceso y facilitar, por lo tanto, su reutilización en la propia industria. Es importante señalar que en un futuro no muy lejano, la posibilidad de reutilizar el agua en un proceso puede convertirse en un factor importante en la viabilidad y la competitividad de las industrias. Por lo que, los esfuerzos realizados desde la academia están orientados a estudiar en industrias, que consumen grandes cantidades de agua en la producción de metales, la sustitución o uso de agua tratada en la extracción y producción de metales [50]. En vista de esto, se hace necesaria y urgente la búsqueda de nuevas alternativas o la optimización de las actuales, para el tratamiento de las aguas residuales industriales con bajo impacto ambiental [51-52].

Entre los métodos electroquímicos usados para la remoción de metales está el uso de la reducción electroquímica directa, donde se usan reactores electroquímicos con electrodos bidimensionales y tridimensionales de placas planas o de cilindro rotatorio (ECR) [53]. Si bien existen otras configuraciones, son el reactor FM01-LC y el ECR los más estudiados en México para la eliminación o recuperación de metales preciosos.

El electrodo de cilindro rotatorio (RCE) es una de las tecnologías más empleadas para la eliminación de iones metálicos porque esta técnica

permite la eliminación de metales de 10,000 a 10 ppm [54-55]. Por ejemplo, Nava y col. [49, 56-58], lo han utilizado para la recuperación de zinc y cobre de las aguas residuales; pero también ha sido empleado por Gutiérrez y col. [59], para recuperar metales preciosos, tales como el Pd o por otros grupos de investigación para la obtención de plata [60-61] y níquel [62].

El RCE es muy adecuado para este propósito porque se logra un mayor transporte de masa en régimen de flujo turbulento [63-64], el cual se consigue variando las velocidades angulares, además del diseño de la celda evita los efectos de frontera, que promueve depósitos uniformes debido a su homogeneidad de distribución de la corriente secundaria y terciaria [65].

El FM01-LC es un reactor versátil que ha sido considerado en numerosos estudios ambientales [66], el cual presenta características similares al cilindro rotatorio, en cuanto a distribución uniforme de corriente y potencial, no obstante esta ventaja, la hidrodinámica ha sido un reto que ha sido estudiado por diferentes grupos en México [67-68].

El empleo de este reactor en México ha sido para recuperar metales de soluciones reales de la industria minero-metalúrgica [69], recuperación de paladio [59] a partir de soluciones de lixivitaciones de catalizadores, de oro y plata de soluciones de la lixiviación de minerales [70].

### **Electro-oxidación de Compuestos Orgánicos (EOx)**

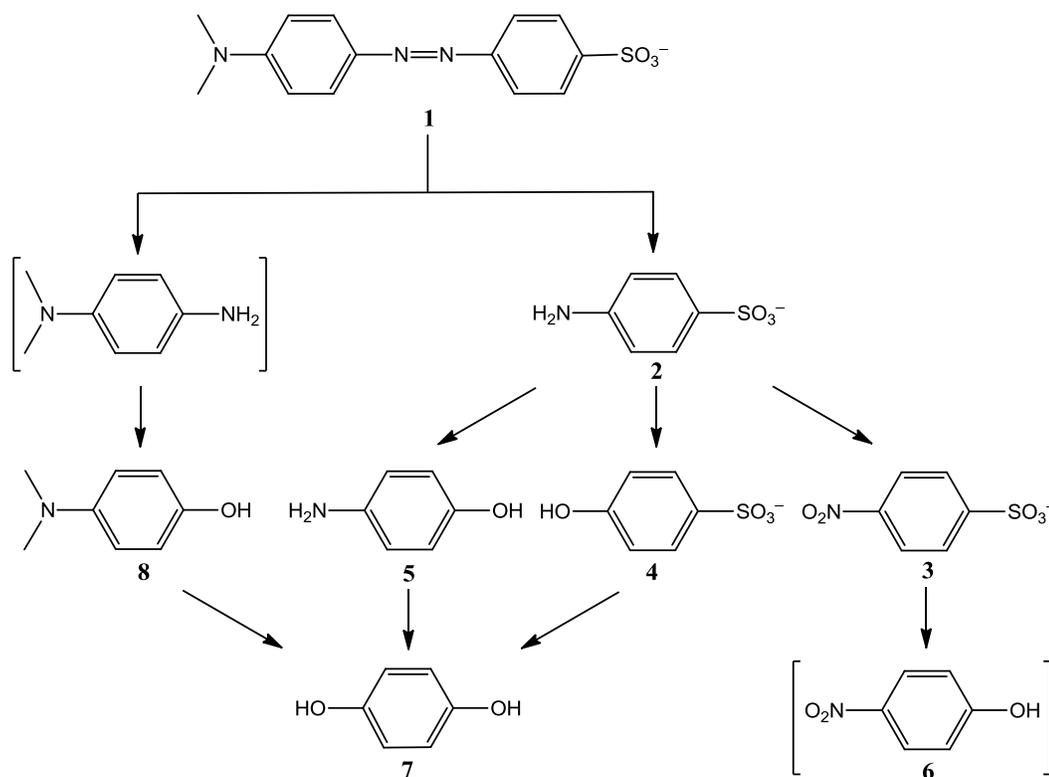
Los avances tecnológicos en varios campos productivos están en constante crecimiento, lo que a su vez ocasiona que se generen grandes cantidades de nuevos residuos que tienen como destino final los cuerpos de agua. En la mayoría de los casos, estos residuos son difíciles de

degradar por métodos de tratamiento convencionales [71]. En este sentido, los procesos electroquímicos se han posicionado como tecnologías innovadoras y eficientes para llevar a cabo el tratamiento de una amplia variedad de contaminantes orgánicos presentes en el agua [72].

La EOx es el procedimiento electroquímico más popular para la eliminación de contaminantes orgánicos de las aguas residuales. En México, en el año 2007 el grupo de I. González y col. [73], estudiaron la electro-oxidación de 1 mM del colorante textil índigo, usando como electrolito soporte 0.05 M NaCl. Mediante ensayos de micro electrólisis y de electrólisis macro encontraron que la oxidación del colorante índigo se llevó a cabo a través de los radicales hidroxilo ( $\cdot\text{OH}$ ) formados por la oxidación del agua en la superficie de un electrodo de BDD.

En el 2013, Peralta-Hernández y col. [74] llevaron a cabo un estudio para evaluar la degradación del colorante naranja de metilo, para ello utilizaron un reactor tipo filtro prensa con electrodo de BDD, el sistema se operó en recirculación a un flujo de 12 L/min. Mediante análisis de LC-MS encontraron la formación de siete productos de oxidación que provienen del rompimiento de la estructura  $-\text{N}=\text{N}-$  del colorante, seguida de la desaminación, además de la formación de grupos nitro y/o sulfonación de los compuestos aromáticos resultantes.

En la Figura 3 se presenta el mecanismo de degradación que los autores proponen.



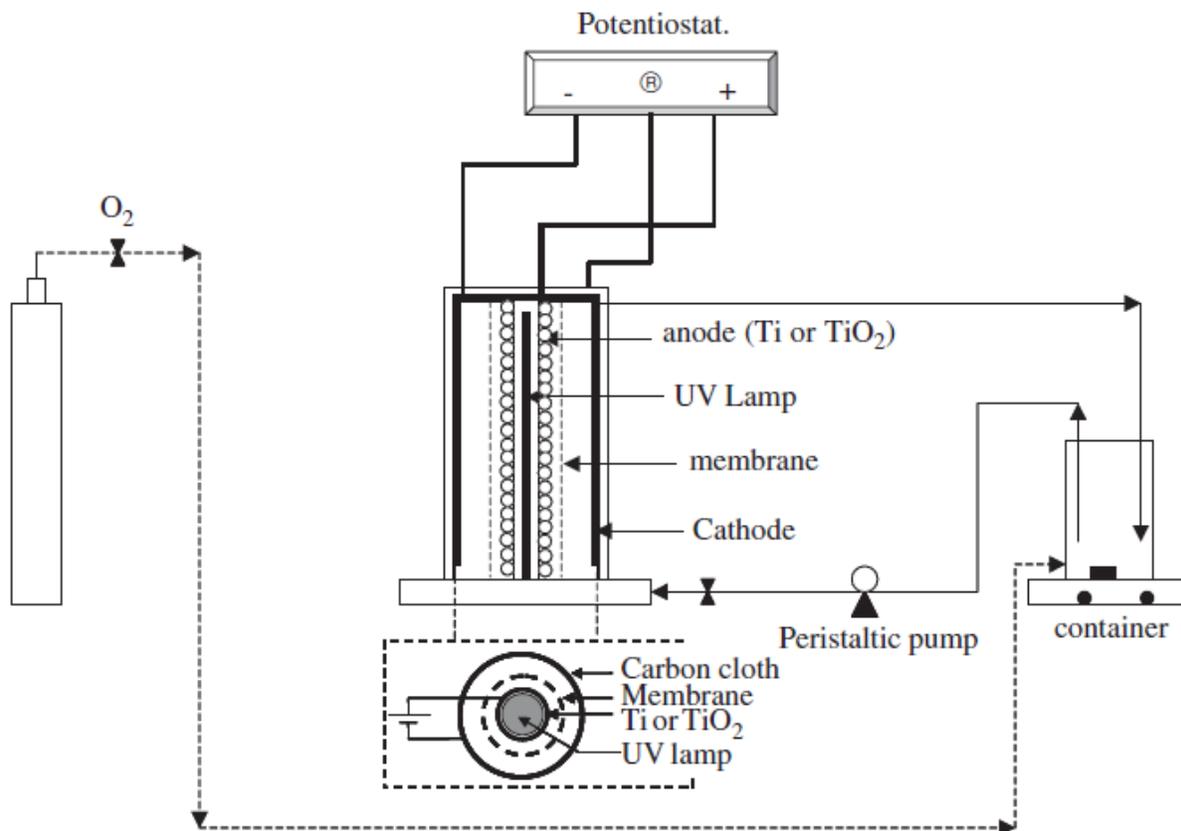
**Figura 3.** Secuencia del mecanismo de reacción propuesto por Peralta-Hernández y col.[74] para la EOX del naranja de metilo sobre BDD.

### Electro-Fenton (EF) y fotoelectro-Fenton (FEF)

El EF es un proceso indirecto de oxidación basado en la producción homogénea de radicales libres  $\cdot\text{OH}$  vía la reacción de Fenton que se produce entre el  $\text{Fe}^{2+}$  adicionado al medio y el  $\text{H}_2\text{O}_2$  electroquímicamente generado vía la reducción de  $\text{O}_2$  sobre un cátodo adecuado. En el FEF la solución contaminada que se degrada bajo condiciones de EF se somete simultáneamente a la iluminación de luz UV, para acelerar la tasa de mineralización del contaminante.

En el 2006, el grupo del L. Godínez [75], diseñaron y construyeron un reactor tubular para llevar a cabo los procesos de EF y FEF vía la producción electroquímica de  $\text{H}_2\text{O}_2$ . Con este sistema ellos encontraron que se puede oxidar fácilmente el colorante modelo amarillo ácido-52 en la presencia de pequeñas cantidades de  $\text{Fe}^{2+}$  e iluminando el sistema

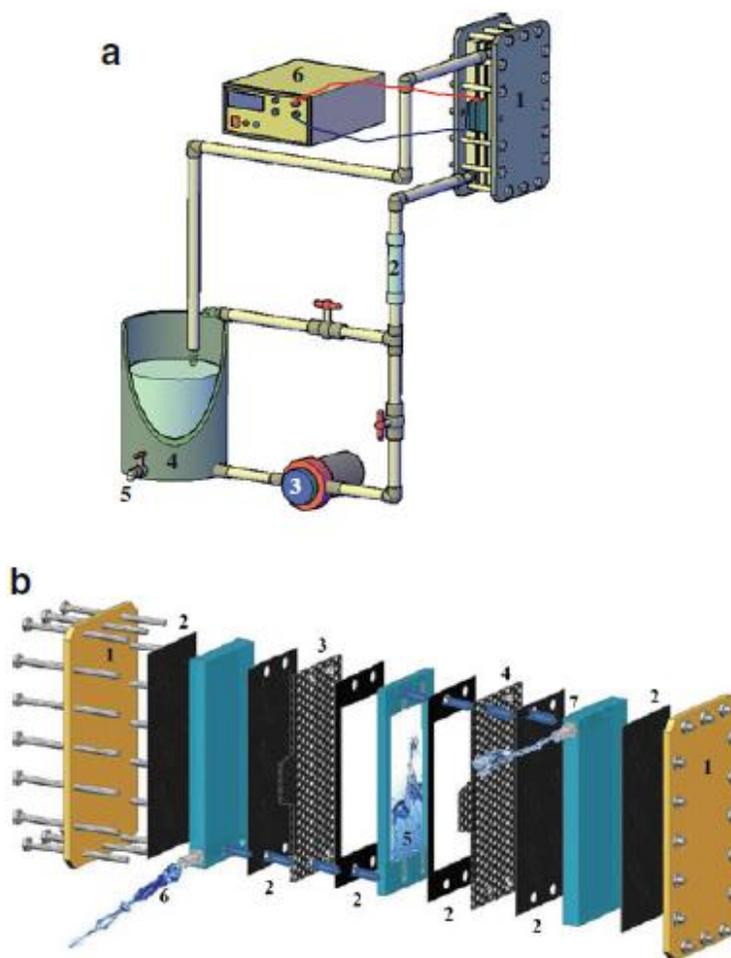
con una lámpara de luz UV a 365 nm. En la Figura 4 se presenta el sistema utilizado.



**Figura 4.** Esquema del reactor fotoelectroquímico utilizado por L. Godínez y col. [75].

Con un sistema similar en 2008, Godínez y col. [76], evaluaron la degradación del colorante naranja de metilo, aplicando procesos electroquímicos basados en la producción de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, a saber fotólisis directa, electro-Fenton y fotoelectro-Fenton, encontrando que las eficiencias de degradación fueron del 31%, 60% y 80% respectivamente. Dichos resultados demuestran el poder oxidante del proceso fotoelectro-Fenton.

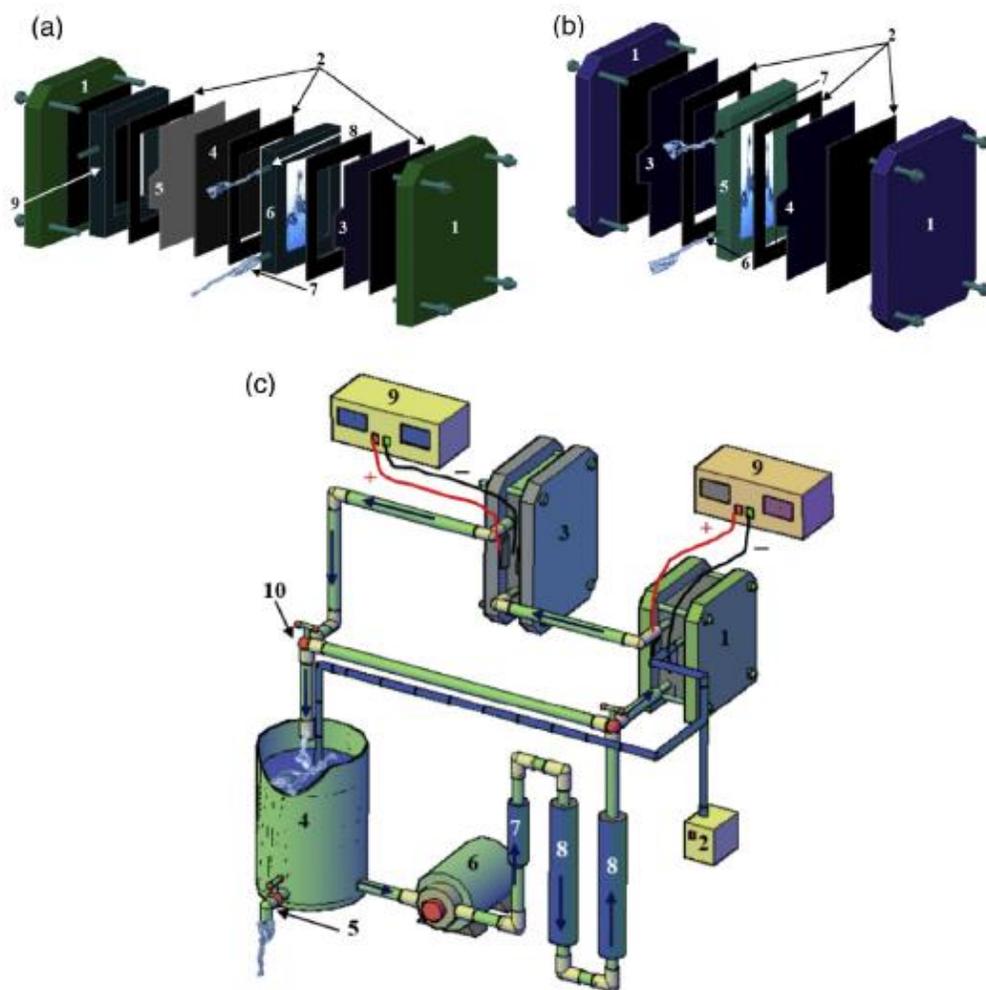
Peralta-Hernández y col. [77] en el 2010 propusieron una alternativa del proceso electro-Fenton utilizando un cátodo de BDD para llevar a cabo la producción del  $\text{H}_2\text{O}_2$ , con el objetivo de optimizar el proceso de degradación de amarillo ácido 36, realizaron estudios aplicando la metodología de superficie de respuesta (MSR). La variable del diseño experimental fue el porcentaje de decoloración. De acuerdo con el análisis de MSR las condiciones óptimas fueron  $\text{Fe}^{2+} = 0.24 \text{ mmol/L}$ ,  $j = 23 \text{ mA/cm}^2$ , and  $t = 48 \text{ min}$ , logrando una eficiencia máxima de decoloración del 98%, medida a través de determinaciones de HPLC.



**Figura 5.** Esquema de la planta prepiloto utilizada por Peralta-Hernández y col. [78].

La degradación del herbicida 2,4-D fue estudiada por Peralta-Hernández y col. [78], en donde ellos realizaron tratamientos de electro-oxidación y electro-Fenton/BDD (EF/BDD) usando una planta prepiloto de 3 L ( Fig. 5). Las electrólisis se realizaron con 60 mg/L de 2,4-D y a tres diferentes densidades de corriente. El proceso más rápido fue el EF/BDD con la adición de una concentración de 0.7 mM  $\text{Fe}^{2+}$ , logrando una remoción del 83 %. El consumo energético estimado para este proceso fue de 2.0  $\text{KWhm}^{-3}$ . Como subproductos de la reacción de degradación detectaron cuatro compuestos cloro aromáticos, el 2,4 dicloro fenol, 4,6 dicloro, resorcinol, cloro hidroquinonona y cloro *p*-benzoquinona, así como tres derivados hidroxilados.

Recientemente, en 2014, Peralta-Hernández y col. [79] realizaron un trabajo, en donde acoplaron una celda de Pt/cátodo de difusión de aire y una de BDD/BDD (Figura 6), para llevar a cabo la degradación del 2,4-D. Encontraron que este sistema acoplado bajo la misma corriente aplicada en condiciones de proceso EF, se obtiene la misma eficiencia de degradación, sin embargo, en mucho menor tiempo que para las celdas por separado. La disminución de la concentración del herbicida observó una reacción de pseudo-primer orden. Además, detectaron una serie de ácidos carboxílicos en todas las soluciones electrolizadas. Con la celda de BDD/BDD se observó una mayor producción de subproductos que con la de Pt/ cátodo de difusión de aire.



**Figura 6.** Sistema de celdas acopladas utilizado por Peralta-Hernández y col. [79].

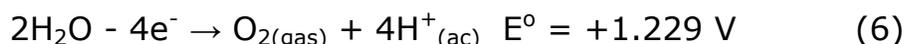
## **Tecnologías de remediación de suelos**

Diversas tecnologías han sido desarrolladas para remediar suelos, sedimentos, y las aguas subterráneas sobre la base de los principios físico-químicos, térmicos y biológicos en el lugar en que se realiza el proceso de remediación (*in situ*), al lado (*on site*) y fuera del sitio (*ex situ*). Sin embargo, estos tratamientos a menudo son costosos, consumen demasiada energía, son ineficaces, y podrían crear otras condiciones adversas en el medio ambiente. La remediación inadecuada se ha demostrado en numerosos sitios contaminados, debido a la baja permeabilidad y la heterogeneidad y/o mezcla de contaminantes (tal como la coexistencia de metales pesados y contaminantes orgánicos) [80]. Por tal motivo, se ha desarrollado la electro-remediación (ER), también llamada remediación o tratamiento electroquímico, tratamiento electro-cinético, electro-reclamación, entre otros [80], la cual es una técnica que se encuentra dentro de los tratamientos fisicoquímicos. La ER ha sido reconocida como un proceso prometedor para hacer frente a dificultades tales como suelos heterogéneos y de baja permeabilidad, asimismo puede ser aplicada *in situ* o *ex situ*, siendo especialmente útil para la remediación de sitios inaccesibles con mínima desorganización en la superficie, donde otras tecnologías fracasan. Igualmente, es sensible a una amplia variedad de contaminantes, es relativamente segura, efectiva, de fácil implementación, económica y flexible. Además, la mayoría de los métodos convencionales *in situ*, presentan dificultades en el tiempo de tratamiento para suelos de grano fino, con alto contenido de agua y suelos altamente orgánicos o arcillosos, pero la electro-remediación es adecuada para este tipo de suelos [81].

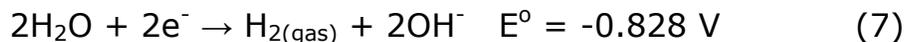
La ER es una tecnología para restaurar suelos contaminados que se basa en la generación de un campo eléctrico por la aplicación de corriente directa. Los electrodos son colocados en pozos previamente

excavados en el suelo y usualmente el suelo se humecta con un electrolito para mejorar las condiciones de conducción del campo eléctrico. La acción del electrolito permite transportar el contaminante hacia los pozos en donde será extraído. Al contrario del arrastre de fluidos, esta técnica permite establecer una migración dirigida, la cual evita la dispersión del contaminante fuera de la zona de tratamiento [82]. Los mecanismos principales por los cuales el campo eléctrico conduce los contaminantes hacia los electrodos son: electro-migración (movimiento de iones), electro-ósmosis (movimiento de compuestos orgánicos y electro-foresis (movimiento de coloides) [82, 83]. Siendo los dos primeros los que ejercen la mayor influencia en el transporte del contaminante [80].

En cuanto a la electrólisis de agua, esta ocurre sobre la superficie de los electrodos al aplicar una corriente eléctrica, lo que origina una frontera ácida (con un pH cercano a 2) en el ánodo y una frontera básica (pH con valor cerca de 12) en el cátodo, debido a la generación de  $H^+$  e  $OH^-$  respectivamente. Las reacciones de la electrólisis del agua son las siguientes: en el ánodo

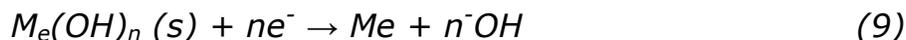


y en el cátodo:



Cuando la concentración de iones de los electrolitos es alta, se puedan llevar a cabo otros procesos en la superficie de los electrodos como es el depósito de metales en el cátodo y la precipitación de los metales como

hidróxidos, óxidos, sulfatos o fosfatos, dependiendo del pH de la solución:



Cabe mencionar que las reacciones de electrólisis dependen del tipo y disposición de los electrodos [84], así como las especies químicas y potencial eléctrico que se use durante la electro-remediación. De esta manera, los protones ( $H^+$ ) que se generan en el ánodo avanzan a través del suelo hacia el cátodo por: (a) migración de los iones debido al gradiente eléctrico, (b) advección del fluido a través de los poros debido al flujo electro-osmótico, (c) por un movimiento del fluido a través de los poros del suelo debido a una diferencia de potencial hidráulico generado internamente o aplicado externamente, y (d) a la difusión por la existencia de gradientes químicos. Sin embargo, el medio alcalino desarrollado en el cátodo avanza hacia el ánodo por migración iónica y difusión, por lo que el transporte de  $^-OH$  es opacado por el flujo electro-osmótico y la neutralización por los iones  $H^+$ , que van hacia el cátodo, donde los iones pueden recombinarse para formar agua [85].

Es así, como en las últimas tres décadas se han realizado diversas investigaciones a nivel laboratorio e incluso piloto aplicando el fundamento electro-cinético para remover una amplia variedad de contaminantes. La ER ha demostrado su capacidad de remover algunos contaminantes orgánicos como tricloroetileno e hidrocarburos en estudios a nivel laboratorio, piloto o campo [86]. Sin embargo, su principal aplicación ha sido en suelos contaminados con metales, para remover elementos como cromo, cadmio, mercurio, plomo, zinc, entre

otros [87]. En las aplicaciones en campo, los resultados han sido variables dependiendo del tipo y volumen del suelo, así como el tipo y concentración de contaminante, además del material, configuración y espacio entre los electrodos, consumo de energía eléctrica [82, 88 - 101]. Por lo tanto, se propone que la ER *in situ* resulta una muy buena opción frente a métodos tales como la vitrificación e incineración, en donde el mayor costo de los materiales electródicos puede disminuir al ser re-emplazados por otros materiales que existen en el mercado con menor costo e igual de eficientes.

### **Conclusiones**

Como se puede constatar, en México existe un creciente número de grupos que estudian y desarrollan procesos electroquímicos para recuperar, degradar o eliminar diferentes tipos de contaminantes.

## Referencias

- [1]. J. D. Genders, D. Pletcher (Editors). *Electrosynthesis from Laboratory, to Pilot, to Production*. The Electrosynthesis Company In. New York, 1990.
- [2]. C.A.C. Sequeira (Editor). *Studies in environmental Sciences 59; Environmental Oriented Electrochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 1994.
- [3]. C. Comninellis, G. Chen (Editors). *Electrochemistry for the Environment*, Springer, London, 2010.
- [4]. T. Zheng, J. Wang, Q. Wang, H. Meng, L. Wang. Research trends in electrochemical technology for water and wastewater treatment. *Applied Water Science* (2015), in print.
- [5]. C.A. Martinez-Huitle, S. Ferro. Electrochemical oxidation of organic pollutants for the wastewater treatment: direct and indirect processes. *Chemical Society Reviews* (2006), 35(12), 1324-1340.
- [6]. F. Fu, Q. Wang. Removal of heavy metal ions from wastewaters: a review, *Journal of Environmental Management* (2011), 92(3), 407-418.
- [7]. F.F. Rivera, C. Ponce de Leon, F.C. Walsh. J.L. Nava. The reaction environment in a filter-press laboratory reactor: the FM01-LC flow cell. *Electrochimica Acta* (2015), 161, 436-452.
- [8]. Fernandes, M.J. Pacheco, L. Ciriaco, A. López. Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates: Present and future. *Applied Catalysis, B: Environmental* (2015), 176-177, 183-200.
- [9]. J. Trujillo-Reyes, J.R. Peralta-Videa, J.L. Gardea-Torresdey. Supported and unsupported nanomaterials for water and soil remediation: Are they a useful solution for worldwide pollution, *Journal of Hazardous Materials* (2014), 280, 487-503.

- [10].A.N. Alshawabkeh. Electrokinetic soil remediation: challenges and opportunities. *Separation Science and Technology* (2009), 44(10), 2171-2187.
- [11].Méndez E. Monstruo tóxico en Tutitlán, México: Excelsior; 2012 <http://www.excelsior.com.mx/2012/07/09/nacional/846535>, [consultado 24/04/2015].
- [12].Redman A. Contaminación de cromo hexavalente en León, Gto., México: UNAM; 2011, [http://enes.unam.mx/?lang=es\\_MX&cat=sostenibilidad&pl=contaminacion-de-cromo-hexavalente-en-leon](http://enes.unam.mx/?lang=es_MX&cat=sostenibilidad&pl=contaminacion-de-cromo-hexavalente-en-leon) [consultado 24/04/2015].
- [13].Puigdomenech, Hydrochemical Equilibrium Constants Database(MEDUSA), Royal Institute of Technology, Stockolm, 1997.
- [14].Barrera Díaz C E, editor. Aplicaciones electroquímicas al tratamiento de aguas residuales. Barcelona, España Edit. Reverté; 2013.
- [15].Vázquez Peña Sarai. Reducción electroquímica en solución acuosa por métodos electroquímicas empleando electrodos de DDB. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. *Universidad Autónoma del Estado de México*. Toluca, México. 2012.
- [16].Barrera-Díaz C, Lugo-Lugo V, Roa-Morales G, Natividad R, Martínez-Delgadillo SA. Enhancing the electrochemical Cr(VI) reduction in aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials* (2011), 185 (2-3), 1362-8.
- [17].17. Lugo-Lugo V, Barrera-Díaz, C. E., Roa-Morales, G., Ureña-Núñez, F., Linares-Hernández, I. Hexavalent Chromium Reduction by Iron: Electro-Generated and Galvanic Production (2010), 29(1), 283-93.
- [18].C. Sullivan, M. Tyrer, C.R. Cheeseman, N.J.D. Graham, Disposal of water treatment wastes containing arsenic—a review, *Sci. Total Environ.* (2010), 408, 1770-1778.

- [19].P. Ravenscroft, H. Brammer, K. Richards, *Arsenic Pollution: A Global Synthesis*, RGS-IBG Book Series, A John Wiley & Sons Ltd. Publication, United Kingdom, 2009.
- [20].P.L. Smedley, D.G. Kinniburgh, A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters, *Appl. Geochem.* (2002), 17, 517–568.
- [21].J. Matschullat, Arsenic in the geosphere—a review, *Sci. Total Environ.* (2000), 249, 297–312.
- [22].Smith, A.H., Marshall, G., Yuan, Y., Ferreccio, C., Liaw, J., von Ehrenstein, O., Steinmaus, C., Bates, M.N., Selvin, S., Increased mortality from lung cancer and bronchiectasis in young adults after exposure to arsenic in utero and in early childhood. *Environ. Health Perspect.* (2006), 114, 1293–1296.
- [23].B.K. Mandal, K.T. Suzuki, Arsenic around the world: a review, *Talanta* (2002), 58, 201–235.
- [24].USEPA (U.S. Environmental Protection Agency), *Technologies and Costs for Removal of Arsenic from Drinking Water*, 2000, Washington.
- [25].WHO (World Health Organization), *Arsenic in Drinking Water*, WHO Fact Sheet, 2001.
- [26].Amirtharajah, A., Clark, M.M, Trussell, R.R., *Mixing in Coagulation and Flocculation*, American Water Works Association Research Foundation Denver, 1991.
- [27].P. Bhattacharya, A.H. Welch, K.G. Stollenwerk, M.J. McLaughlin, J. Bundschuh, G. Panaullah, *Arsenic in the environment: biology and chemistry*, *Sci. Total Environ.* (2007), 379, 109–120.
- [28].M. Kobya, F. Ulu, U. Gebologlu, E. Demirbas, M. S. Oncel, Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: Different connection modes and Fe–Al electrodes, *Separation and Purification Technology* (2011), 77, 283–293.

- [29].Balasubramanian, N., Madhavan, K., Arsenic removal from industrial effluent through electrocoagulation. *Chem. Eng. Technol.* (2001), 24 (5), 519–521.
- [30].Kumar, P.R., Chaudhari, S., Khilar, K.C., Mahajan, S.P., Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere* (2004), 55 (9), 1245–1252.
- [31].M. M. Emamjomeha, M. Sivakumar, Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes, *J. Environmental Management* (2009), 90, 1663–1679.
- [32].Mohora, E., Roncevic, S., Dalmacija, B., Agbaba, J., Watson, M., Karlovic, E., Dalmacija, M., Removal of natural organic matter and arsenic from underwater electrocoagulation/flotation continuousflow reactor. *J. Hazard. Mater.* (2012), 235–236, 257–264.
- [33].O. J. Flores, J. L. Nava, G. Carreño, E. Elorza, F. Martínez, Arsenic removal from groundwater by electrocoagulation in a pre-pilot-scale continuous filter press reactor. *Chemical Engineering Science* (2013), 97 1–6.
- [34].R. Alcacio, J. L. Nava, G. Carreño, E. Elorza, F. Martínez. Removal of arsenic from a deep well by electrocoagulation in a continuous filter press reactor. *Water Science & Technology: Water Supply*.14.2 (2014), 189 – 195.
- [35].M. Mohammad, S. Muttucumar, An empirical model for defluoridation by batch monopolar electrocoagulation/flotation (ECF) process, *J. Hazard. Mater.* (2006), 131, 118–125.
- [36].S. Vasudevan, J. Lakshmi, G. Sozhan, Studies on a Mg–Al–Zn alloy as an anode for the removal of fluoride from drinking water in an electrocoagulation process, *clean-soil, air, Water* (2009), 37, 372–378.
- [37].World Health Organization, Fluoride in drinking water, <http://www.who.int/water-sanitation-health/publications/fluoride-drinking-water-ful.pdf>, 2006.

- [38].F. Díaz-Barriga, A. Navarro-Quezada, M. Grijalva, M. Grimaldo, J.P. Loyola Rodríguez, M. Deogracias, Endemic fluorosis in Mexico, *Fluoride* (1997), 30, 223–239.
- [39].V. Hernández-Montoya, J.I. Bueno-López, A.M. Sánchez-Ruelas, J. García-Servín, R. Trejo-Vázquez, A. Bonilla-Petriciolet, C. Márquez-Algara, Fluorosis and dental caries in children of 9 and 11 years of the state of Aguascalientes, Mexico, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental* (2003), 19, 197– 204.
- [40].M.A. Armienta, N. Segovia, Arsenic and Fluoride in the groundwater of Mexico, *Environ. Geochem. Health* (2008), 30, 345–353.
- [41].K. Singh, D.H. Lataye, K.L. Wasewar, Ch. Kyoo Yoo, Removal of fluoride from aqueous solution: status and techniques, *Desalination Water Treat.* (2013), 51, 3233–3247.
- [42].M. Mohapatra, S. Anand, B.K. Mishra, D.E. Giles, P. Singh, Review of fluoride removal from drinking water, *J. Environ. Manage.* (2009), 91, 67–77.
- [43].M. Behbahani, M.R. Alavi Moghaddam, M. Arami, Techno-economical evaluation of fluoride removal by electrocoagulation process: Optimization through response surface methodology, *Desalination* (2011), 271, 209–218.
- [44].S. Aoudj, A. Khelifa, N. Drouiche, R. Belkada, D. Miroud. Simultaneous removal of chromium(VI) and fluoride by electrocoagulation–electroflotation: Application of a hybrid Fe-Al anode. *Chemical Engineering Journal* (2015), 267, 153–162.
- [45].H. Ching-Yao, L. Shang-Lien, K. Wen-Hui, Simulation the kinetics of fluoride removal by electrocoagulation (EC) process using aluminum electrodes. *J. Hazardous Materials* (2007), 145, 180–185.
- [46].M. A. Sandoval, R. Fuentes, J. L. Nava, I. Rodríguez. Fluoride removal from drinking water by electrocoagulation in a continuous filter press

reactor coupled to a flocculator and clarifier, *Separation and Purification Technology* (2014), 134, 163–170.

- [47].B. Palahouane, N. Drouiche, S. Aoudj, K. Bensadok, Cost-effective electrocoagulation process for the remediation of fluoride from pretreated photovoltaic wastewater. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (2015), 22, 127–131.
- [48].Walsh, F. C. Electrochemical technology for environmental treatment and clean energy conversion. *Pure Applied Chemistry* (2001), 73-12, 1819–1837.
- [49].Rivera, F. F., González, I. & Nava, J. L. Copper removal from an effluent generated by a chromium-plating industry using a rotating cylinder electrode reactor (RCE). *Environmental Technology* (2008), 29, 817–825.
- [50].Análisis, diagnóstico y estrategias para el aprovechamiento sostenible de agua y energía en la industria minera, con un enfoque multidisciplinario, y formación de recursos humanos en ciencias de la tierra. Avances de la 2ª etapa del Proyecto FORDECYT, 23 - 25 de febrero de 2015; UASLP, San Luis Potosí, SLP.
- [51].K. Rajeshwar, J. G. Ibañez, *Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement*, Academic Express, (1997).
- [52].G. Chen, Electrochemical technologies in wastewater treatment, *Sep. Purif. Technol.* (2004), 38, 11.
- [53].F.C. Walsh, G.W. Reade, *Electrochemical Techniques for the Treatment of Dilute Metal-Ion Solutions*, in: C.A.C. Sequeira (Ed.), *Environmental Oriented Electrochemistry, Studies in Environmental Science*, Vol. 59, Elsevier, Amsterdam, 1994.
- [54].F.C. Walsh, The role of the rotating cylinder electrode reactor in metal ion removal, in: J.D. Genders, N.L. Weinberg (Eds.), *Electrochemical*

Technology for a Cleaner Environment, The Electrosynthesis Company Inc., New York, 1992.

- [55].D.R. Gabe, F.C. Walsh, Recovery of metal from industrial process liquors using a rotating cylinder electrode reactor, I. Chem. E. Symp. Ser. (1990), 116, 219.
- [56].A. Recéndiz, S. Matlalcuatzi, J.L. Nava, F.F. Rivera, Mass transport studies at rotating cylinder electrode during zinc removal from dilute solutions, *Electrochim. Acta* (2011), 56, 1455.
- [57].S. Matlalcuatzi, J.L. Nava, The use of a rotating cylinder electrode to recover zinc from rinse water generated by the electroplating industry, *Water. Sci. Tech.* (2012), 65 (8), 1406.
- [58].F.F. Rivera, I. González, J.L. Nava, Copper removal from an effluent generated by a plastics chromium-plating industry using a rotating cylinder electrode (RCE) reactor, *Environ. Technol.* (2008) 29 (8), 817.
- [59].J. Terrazas-Rodriguez, S. Gutierrez-Granados, M.A. Alatorre-Ordaz, C. Ponce de Leon, F.C. Walsh, A comparison of the electrochemical recovery of palladium using a parallel flat plate flow-by reactor and a rotating cylinder electrode reactor, *Electrochim. Acta* (2011), 56, 9357.
- [60].A. Alonso, G. Lapidus, I. González. Selective silver electroseparation from ammoniacal thiosulfate leaching solutions using a rotating cylinder electrode reactor (RCE). *Hydrometallurgy* (2008), 92, 115–123.
- [61].J.L. Arredondo, F. Rivera, J.L. Nava. Silver recovery from an effluent generated by plating industry using a rotating cylinder electrode (RCE). *Electrochimica Acta* (2014), 147, 337–342.
- [62].M. Tesillo, S. Bravo, F.F. Rivera, E.P. Rivero, I. González, Nickel removal from rinse waters generated by electroplating industry using a rotating cylinder electrode (RCE) reactor, *ECS Trans.* (2009), 20 (1), 313.
- [63].J. Low, C. Ponce de León, F.C. Walsh, The rotating cylinder electrode (RCE) and its application to electrodeposition of metals, *Aust. J. Chem.* (2005), 58, 246.

- [64].E.P. Rivero, P. Granados, F.F. Rivera, M. Cruz, I. González, Mass transfer modeling and simulation at a rotating cylinder electrode (RCE) reactor under turbulent flow for copper recovery, *Chem. Eng. Sci.* (2010), 65, 3042.
- [65].T. Pérez, J.L. Nava, Numerical simulation of the primary, secondary and tertiary current distributions on the cathode of a rotating cylinder electrode cell. Influence of using plates and a concentric cylinder as counter electrodes, *J. Electro, Analytical Chemistry* (2014), 719, 106.
- [66].F.F. Rivera, C. Ponce de León, J. L. Nava, F. C. Walsh. The filter-press FM01-LC laboratory flow reactor and its applications. *Electrochimica Acta*, (2015), 163, 338-354.
- [67].J.A Delgadillo, R. Enciso, C. Ojeda, I. Rodríguez. A Comparative Study of the Turbulence-Closure Model for a FM01-LC Electrochemical Reactor. *Int. J. Electrochem. Sci.*, (2012), 7, 2065-2076.
- [68].E.P. Rivero, F.F. Rivera, M.R. Cruz-Díaz, E. Mayen, I. González. Numerical Simulation of mass transport in a filter press type electrochemical reactor FM01-LC: Comparison of predicted and experimental mass transfer coefficient. *Chemical Engineering Research and Design*, (2012), 90(11), 1969-1978.
- [69].O. González Pérez, S. Castro Larragoitia, I. Rodríguez-Torres. Preliminary studies on the electrochemical recovery of Zn and Cd from an effluent produced by a zinc refinery plant using a filter press reactor. *J. Chem. Technol. Biot.*, (2013), 88, 1371 – 1379.
- [70].V. Reyes-Cruz, I. González, M.T. Oropeza, Electro-recovery of gold and silver from a cyanide leaching solution using a three-dimensional reactor, *Electrochim. Acta* (2004), 49, 4417.
- [71].The World Meteorological Organization (WMO) and the United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO), *The World's Water: Is There Enough?* WMO Pub. No. 857, Geneva, Switzerland (1997).

- [72]. Baiocchi, C., M.C. Brussino, E. Pramauro, A. Bianco Prevot, L. Palmisano and G. Marci, Characterization of Methyl Orange and its photocatalytic degradation products by HPLC/UV-VIS diode array and atmospheric pressure ionization quadruple ion trap mass spectrometry. *Int. J. Mass Spectrom.*, (2002), 214(2), 247- 256
- [73]. José L. Nava, Francisco Núñez, Ignacio González, Electrochemical incineration of p-cresol and o-cresol in the filter-press-type FM01-LC electrochemical cell using BDD electrodes in sulfate media at pH 0. *Electrochimica Acta* (2007), 52, 3229–3235.
- [74]. Ramírez, Adriana Saldaña, Berenice Hernández, Roberto Acero, Ricardo Guerra, Sergi Garcia-Segura, Enric Brillas, Juan M. Peralta-Hernández. Electrochemical oxidation of methyl orange azo dye at pilot flow plant using BDD technology. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* (2013), 19, 571–579.
- [75]. J.M. Peralta-Hernández, Yunny Meas-Vong, Francisco J. Rodríguez, Thomas W. Chapman, Manuel I. Maldonado, Luis A. Godínez. In situ electrochemical and photo-electrochemical generation of the Fenton reagent: A potentially important new water treatment technology. *Water Research* (2006), 40, 1754 – 1762.
- [76]. J.M. Peralta-Hernández, Yunny Meas-Vong, Francisco J. Rodríguez, Thomas W. Chapman, Manuel I. Maldonado, Luis A. Godínez. Comparison of hydrogen peroxide-based processes for treating dye-containing wastewater: Decolorization and destruction of Orange II azo dye in dilute solution. *Dyes and Pigments* (2008) 76, 656-662.
- [77]. K. Cruz-González, O. Torres-López, A. García-León, J.L. Guzmán-Mar, L.H. Reyes, A. Hernández-Ramírez, J.M. Peralta-Hernández. Determination of optimum operating parameters for Acid Yellow 36 decolorization by electro-Fenton process using BDD cathode. *Chemical Engineering Journal* (2010), 160, 199–206.

- [78].Orlando García & Eloy Isarain-Chávez & Sergi Garcia-Segura, Enric Brillas & Juan M. Peralta-Hernández. Degradation of 2,4-Dichlorophenoxyacetic Acid by Electro-oxidation and Electro-Fenton/BDD Processes Using a Pre-pilot Plant. *Electrocatalysis* (2013), 4, 224–234.
- [79].Orlando García a, Eloy Isarain-Chávez a, Abdellatif El-Ghenymy b, Enric Brillas b, Juan M. Peralta-Hernández. Degradation of 2,4-D herbicide in a recirculation flow plant with a Pt/air-diffusion and a BDD/BDD cell by electrochemical oxidation and electro-Fenton process. *Journal of Electroanalytical Chemistry* (2014), 728, 1–9.
- [80].Krishna R. Reddy and Claudio Cameselle, *Electrochemical Remediation Technologies for Polluted Soils, Sediments and Groundwater*. USA, John Wiley & Sons, Inc., 2009.
- [81].Krishna R. Reddy, *Electrokinetically Enhanced Remediation of Hydrophobic Organic Compounds in Soils: A review*, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. USA, Taylor & Francis, 2005, 115-192.
- [82].David A. De la Rosa – Pérez, Ma. Maura Margarita Teutli – León and Marta E. Ramírez - Islas. *Electro-remediación de Suelos Contaminados, una Revisión Técnica para su Aplicación en Campo*. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 2007, 23.
- [83].Ronald E. Ney, *Fate and Transport of Organic Chemicals in the Environment: A Practical Guide*. Govern Editor. Maryland, 1990.
- [84].D. Turer and A. Genc, *Assessing Effect of Electrode Configuration on the Efficiency of Electrokinetic Remediation by Sequential Extraction Analysis*. USA, Elsevier, 2004, 167-174.
- [85].M. N. V. Prasad, Kenneth S. Sajwan and, Rvi Naidu, *Trace Elements in the Environment: Biogeochemistry, Biotechnology and Bioremediation*, USA, Taylor & Francis, 2006.

- [86].A. J. M. Gilbón, *Electroremediación de Suelos Contaminados con Hidrocarburos*. Universidad Autónoma Metropolitana, México, D.F. 2001, 47.
- [87].J. Hamed, Y. Acar and R. Gale, Pb(II) Removal from Kaolinite by Electrokinetics, *J. Geotech. Eng.*, (1991), 117, 2, 241-271.
- [88].D. Turer and A. Genc, Assessing Effect of Electrode Configuration on the Efficiency of Electrokinetic Remediation by Sequential Extraction Analysis. *J. Hazard. Mater.*, (2005), 119 (1-3), 167-174.
- [89].Akram N. Alshawabkeh, Albert T. Yeung and Mark R. Bricka, Practical Aspects of In-Situ Electrokinetic Extraction. *Environmental Engineering, J. Environ. Eng – ASCE*, 1999, 125, 1, 27-35.
- [90].Environmental Protection Agency, U.S., *Resource Guide for Electrokinetics Laboratory and Field Processes Applicable to Radioactive and Hazardous Mixed Wastes in Soil and Groundwater from 1992 to 1997*, 1997.
- [91].C. D. Fernández, *Descontaminación de Suelos*, [www.edafologia.ugr.es](http://www.edafologia.ugr.es).
- [92].Ma. Maura Margarita Teutli León, *Modelación matemática de la remediación electroquímica de suelos*. Universidad Metropolitana Unidad Iztapalapa, México, 2003.
- [93].Ivonne Duarte Medina, Erika Bustos Bustos and Margarita Teutli León. Compost Aided Electrokinetic Remediation of an Hydrocarbon Polluted Soil. *J. Mexican Chem. Soc.*, (2014), 58 (3), 343 – 347.
- [94].I. Robles, T. Serrano, J. J. Pérez, G. Hernández, S. Solís, R. García, T. Pi and E. Bustos. Influence of EDTA on the Electrochemical Removal of Mercury (II) in Soil from San Joaquín, Querétaro, México. *J. Mexican Chem. Soc.*, 2014, 58(3), 332 – 338.
- [95].Maribel Pérez-Corona, Elías Daniel Beltrán, Santiago Castro, Jorge Luis Corona, Jesús Cárdenas and Erika Bustos. Electroremediation of Hydrocarbons - Contaminated Vertisol Type Soil Employing Different Electrode Configurations. *Sustain. Environ. Res.*, (2013), 285 – 288.

- [96].G. I. Alba, M. C. Cuevas and E. Bustos. Comparing the Electroremediation of Gleysol soil Contaminated with Hydrocarbon with Triton X-114, Washing and Bioremediation with Solid Cultures Employing Agroindustrial Residues. *Intern. J. Electrochem. Sci.*, (2013), 8, 4735 - 4746.
- [97].E. Méndez, M. Pérez, O. Romero, E. D. Beltrán, S. Castro, J. L. Corona, A. Corona, M. C. Cuevas and E. Bustos. Effects of Electrode Material on the Efficiency of Hydrocarbon Removal by an Electrokinetic Remediation Process. *Electrochim. Acta*, (2012), 86, 148 – 156.
- [98].I. Robles, M. G. García, S. Solís, G. Hernández, Y. Bandala, E. Juaristi and E. Bustos. Electroremediation of Mercury Polluted Soil Facilitated by Complexing Agents. *Intern. J. Electrochem. Sci.*, (2012), 7, 2276 – 2287.
- [99].R. Flores, M. G. García, J. M. Peralta – Hernández, A. Hernández – Ramírez, E. Méndez and E. Bustos. Electro-Remediation in the Presence of Ferrous Sulfate as an Ex-Situ Alternative Treatment for Hydrocarbon Polluted Soil. *Intern. J. Electrochem. Sci.*, (2012), 7, 2230 – 2239.
- [100].E. Méndez, D. Castellanos, G. I. Alba, G. Hernández, S. Solís, G. Levresse, M. Vega, F. Rodríguez, E. Urbina, M. C. Cuevas, M. G. García and E. Bustos. Effect in the Physical and Chemical Properties of Gleysol Soil after an Electro-kinetic Treatment in Presence of Surfactant Triton X-114 to Remove Hydrocarbon. *Intern. J. Electrochem. Sci.*, (2011), 6, 1250 – 1268.
- [101].C. Ruíz, J. M. Anaya, V. Ramírez, G. I. Alba, M. G. García, A. Carrillo-Chávez, M. M. Teutli and E. Bustos. Soil Arsenic Removal by a Permeable Reactive Barrier of Iron Coupled to an Electrochemical Process. *Intern. J. Electrochem. Sci.*, (2011), 6, 548 – 560.

# ***Electrodepósitos y Modificación de Superficies (EMS)***

---

Coordinador: ***Dr. Yunny Meas Vong***

## Colaboradores

Gabriel Trejo Córdoba, José de Jesús Pérez Bueno,  
José Mojica Gómez, Raúl Ortega Borges

Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ),  
Parque Tecnológico Querétaro Sanfandila,  
76703, Querétaro Qro., México

## **Resumen**

Se presenta el desarrollo, evolución y tendencias de los trabajos de investigación y desarrollo tecnológico sobre electrodepósitos y modificación de superficies en México, desde los temas de inicio en esta disciplina hasta los temas actuales, así como su posicionamiento a nivel internacional.

## **Introducción:**

Debido a la importancia y la amplitud de los temas tratados en las líneas de investigación sobre "electrodepósitos y modificaciones de superficie", así como su importancia en el desarrollo industrial y tecnológico, se presenta este capítulo en 3 secciones. Uno correspondiente al desarrollo de las líneas de investigación sobre electrodepósito, un segundo mas general sobre modificaciones superficiales relacionadas con la electroquímica y un tercero sobre el desarrollo industrial e innovación tecnológica relacionada con la investigación en estos líneas.

## **Desarrollo de las líneas de investigación sobre electrodepósito en México.**

El diseño de nuevos materiales y el desarrollo de nuevos procesos para la fabricación de recubrimientos metálicos aplicados para diferente uso, ya sea decorativo, funcional, protector o en herramientas de uso industrial, es una línea de investigación en constante evolución y de bastante interés para la ciencia e ingeniería de materiales. Esto es motivado por los requerimientos de las mismas industrias que precisan de materiales novedosos con características adicionales a las que ya tienen. La electrodeposición es el proceso electroquímico de tratamiento de superficies más ampliamente utilizado. La electrodeposición sirve principalmente para la fabricación de recubrimientos funcionales, decorativos o protectores, cuyo espesor puede variar entre fracciones y

unidades de micrómetro. Metales, óxidos metálicos, aleaciones y composites de matriz metálica son electrodepositados para la fabricación de recubrimientos en multicapas o de capa simple. Comparada con otras tecnologías, especialmente con PVD (physical vapor deposition), la electrodeposición requiere equipamiento relativamente simple y de mucho menor costo. La electrodeposición es ideal para la producción en masa de recubrimientos, ya sea sobre piezas grandes o pequeñas, asimismo piezas de diferente geometría pueden ser recubiertas por electrodeposición utilizando baños electrolíticos de composición adecuada. Hoy en día, la electrodeposición todavía depende mucho del empirismo, y sigue habiendo una brecha entre la investigación sobre los principios fundamentales (termodinámicos y cinéticos) de deposición de metal y la práctica de electrodeposición industrial.

En años recientes, se ha logrado un progreso considerable en la comprensión teórica de una serie de aspectos relevantes concernientes al efecto de las variables de operación sobre la composición, microestructura, propiedades físicas y tribológicas de los electrodepósitos. En los últimos 25 años, en México diversos grupos de investigación han logrado avances considerables en el entendimiento de los fenómenos que ocurren durante el proceso de electrodeposición, ya sea desde un punto de vista teórico, de investigación o bien de desarrollo tecnológico. De una búsqueda bibliográfica realizada sobre los últimos 25 años en Scopus con la palabra clave "Electrodeposition", se encontró que las 12 instituciones mexicanas (nota: cabe mencionar que esta lista no es exhaustiva, debida a que se hizo la búsqueda solamente con esta palabra clave) que han publicado en este tema son, por orden alfabética:

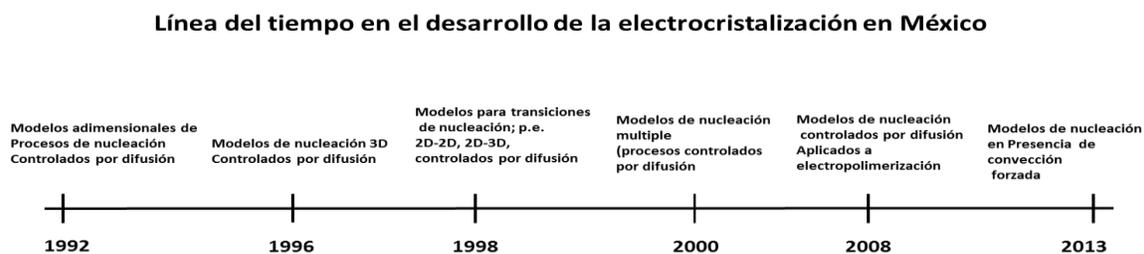
- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)
- Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ)
- Centro de Investigación y de Estudios Avanzados (CINVESTAV)
- Centro de Investigación y de Estudios Avanzados- Mérida. (CINVESTAV – Mérida)
- Centro Nacional de Metrología (CENAM)
- Instituto Mexicano del Petróleo (IMP)
- Instituto Politécnico Nacional (IPN)
- Instituto Superior de Tecnología de Monterrey (ITESM)
- Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo (UAEH)
- Universidad Autónoma Metropolitana – Iztapalapa (UAM-I)
- Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco (UAM-A)
- Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ)
- Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP)
- Universidad de Guanajuato (UG)
- Universidad Nacional Autónoma de México, (UNAM)

Los países con los cuales los investigadores mexicanos han colaborado son: Bélgica, Gran Bretaña, Ecuador, Egipto, España, Estados Unidos, Francia, India, Lituania, Venezuela, Canadá, Alemania, India, entre otros.

El tema de electrodepositos ha sido abordado básicamente bajo dos enfoques: un enfoque de investigación fundamental y un enfoque de investigación aplicada y tecnológica. Desde el punto de vista fundamental, los primeros trabajos se enfocaron al estudio de la **Electrocristalización** y fueron realizados a principios de los 90s. Estos trabajos estaban principalmente dirigidos a los estudios de la electrocristalización de sistemas relativamente simples, utilizando los

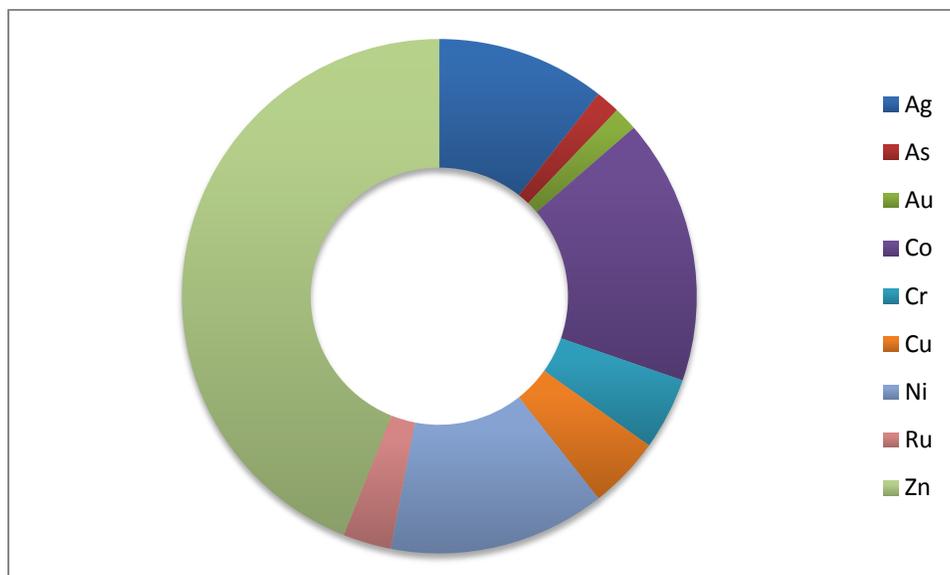
modelos tradicionales de nucleación instantánea y progresiva, ampliamente utilizados en esa época. Posteriormente y gracias al apoyo de reconocidos investigadores internacionales como el Prof. Benjamín Sharifker, esta línea de investigación ha tenido un muy importante desarrollo en México, logrando importantes aportaciones al entendimiento de los mecanismos de nucleación, principalmente a través del concepto de nucleación múltiple, lo que ha permitido el reconocimiento internacional a México en esta temática.

La siguiente figura (Fig.1) representa la evolución en función del tiempo de la electrocristalización en México.



**Figura 1.** Evolución de las investigaciones sobre la electrocristalización en México.

Una de las líneas de investigación más consolidada en México, es la de formación de recubrimientos metálicos. Desde el punto de vista de investigación diversos trabajos han sido reportados por diferentes grupos, principalmente enfocados al estudio de parámetros de electrodeposición ( $T$ ,  $i$ ,  $E$ , concentración) de metales como Fe, Co, Ni, Zn, Cu, Au, Ag, etc. (Fig. 2). Se observa que los metales y sus aleaciones más estudiados son: Zn, Ag, Co y Ni.



**Figura 2.** Repartición de las publicaciones en función de los metales y aleaciones de estos metálicos.

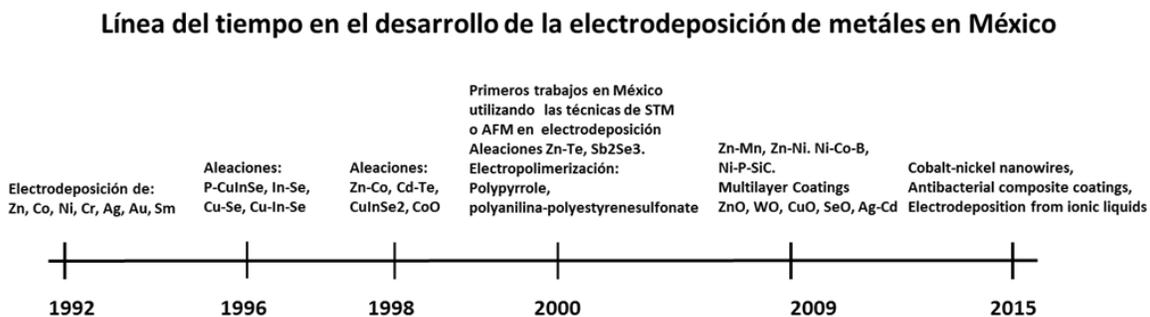
Asimismo, otros factores que influyen sobre la cinética y mecanismos de la electrodeposición, como p.e. características químicas de aditivos, también han sido estudiados ampliamente. Los conocimientos generados a partir de estas investigaciones han permitido el desarrollo de recubrimientos más complejos como aleaciones (p.e. Zn-Mn, Zn-Cu, Zn-Co, Zn-Ni, NiP, CoB) o composites con características especiales (NiP-SiC, NiP-PTFE, Zn-Ag), y que tienen aplicaciones especiales en diferentes sectores industriales (aeronáutico, automotriz, galvanoplastia).

Actualmente, un tema de creciente interés en diferentes grupos de investigación en México, es la **electrodeposición de óxidos semiconductores** (ZnO, WO, CuO, SeO, etc.) para aplicaciones en celdas solares, así como la formación de recubrimientos ternarios por ejemplo:  $\text{Cu}_2\text{SnS}_3$ , Cu-Ga-Se,  $\text{Cu}_{(1-x)\text{Ga}_x}\text{Se}_2$ .

Por último una línea incipiente es la electrodeposición de metales a partir de líquidos iónicos, hasta la fecha pocos trabajos han sido publicados por grupos de investigación en México y se limitan únicamente a la electrodeposición de Zn, Ni, Ag, Cu.

Cabe mencionar que además de los estudios relacionados con el electrodeposito de metales, algunos grupos se han enfocado al electrodeposito de polímeros y de recubrimientos de naturaleza orgánica y que generalmente se agrupan considerando las aplicaciones de los electrodepositos que obtienen, en las áreas de Electroquímica Analítica o Electroquímica Fundamental.

Algo similar ocurre para los grupos que estudian los procesos de electrodepositos para aplicaciones en refinación y tratamiento de minerales que, aun cuando estudian muchas veces el electrodeposito desde un punto de vista muy fundamental, sus resultados se agrupan bajo el rubro de Ingeniería Electroquímica. La siguiente figura (Fig.3) representa la evolución en función del tiempo de la electrodeposición en México.



**Figura 3:** Evolución de las investigaciones sobre electrodeposito en México.

El segundo enfoque con el que se ha abordado el tema de Electrodepósitos corresponde a un enfoque de investigación aplicada y desarrollo tecnológico.

Bajo este enfoque, desde mediados de los 80s están reportados artículos y tesis, principalmente sobre electrodeposición de metales a sub potenciales (Under Potential Deposition), y sobre potenciales (Over Potential Deposition), estos trabajos fueron enfocados principalmente al desarrollo de electrocatalizadores, utilizando metales como Ru, Te, Cd, Pd, Co, etc.

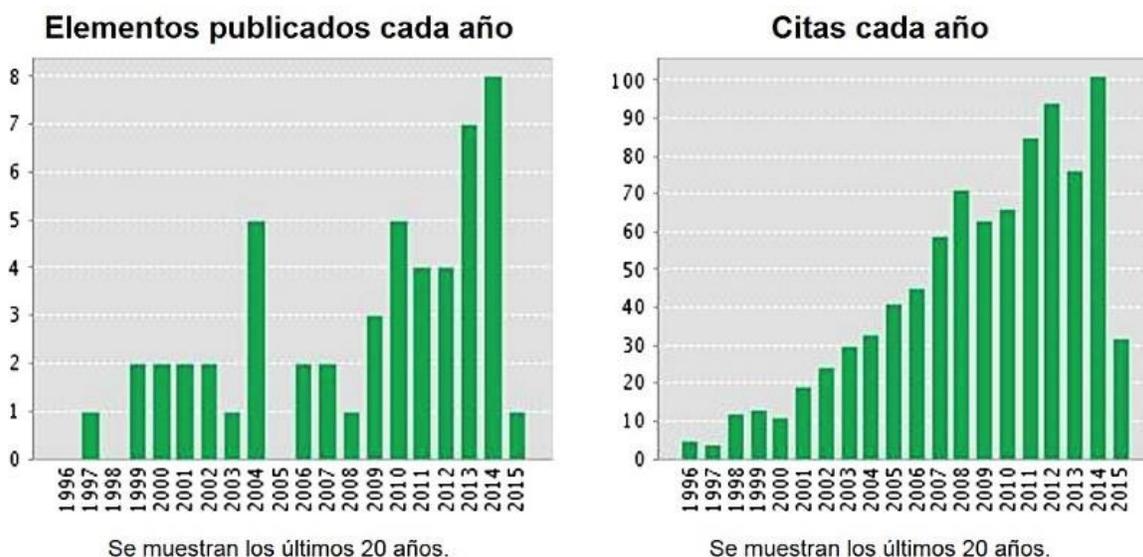
Desde el punto de vista industrial, el desarrollo de los electrodepósitos en México puede entenderse considerando los datos correspondientes a la participación en el mercado de las empresas dedicadas a esta actividad.

### **Desarrollo de las líneas de investigación sobre “Modificación de superficie” en México.**

La modificación de superficies dentro del área de Electroquímica en México, como en la mayoría de las otras disciplinas, ha tenido un crecimiento en los últimos años. La Figura 5 , a manera solo indicativa de la tendencia, presenta las publicaciones encontradas sobre modificación de superficies dentro del área de Electroquímica en México.

Comparando las publicaciones de la Figura 4 con las de toda el área de Electroquímica en México que se presentan en la Figura 5, se puede apreciar que la tendencia de crecimiento no está del todo reflejada para el tema de modificación de superficies dentro del área de Electroquímica. Aun cuando esto puede ser debido en parte a la búsqueda realiza, podemos al menos notar el cambio de tendencia a

partir del año 1996 y la tendencia en el crecimiento. Al menos en esta búsqueda, se ha encontrado que entre 1995 y 1996 se pasa de 6 a 30 publicaciones, entre 2002 y 2003 se pasa de 77 a 113 registros, así como entre 2007 y 2008 se salta de 178 a 249 reportes. Para esta gráfica, aparecen cuatro regiones para las cuales, un ajuste lineal tendría pendientes del orden de  $45^\circ$ : 1967-1995, 1996-2001, 2002-2006 y 2008-2015.



Resultados encontrados: 54

Total de veces citado [?]: 956

Total de veces citado sin citas propias [?]: 948

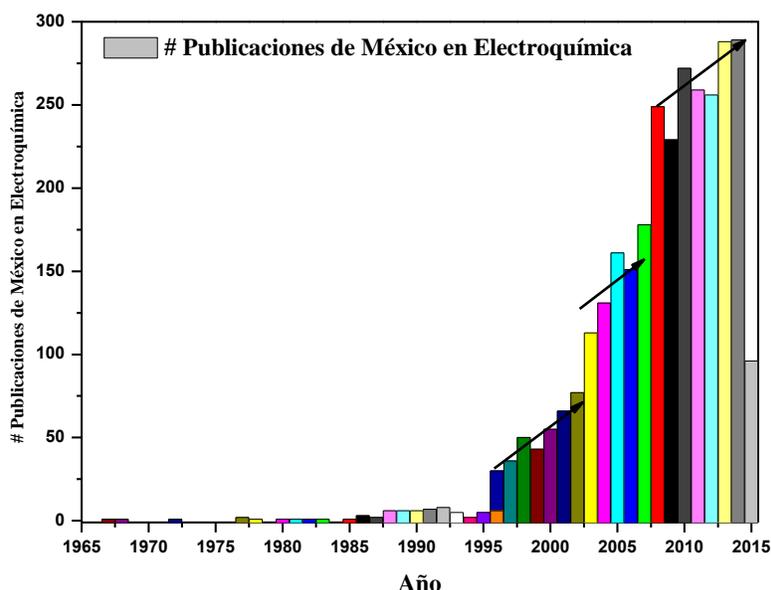
Artículos en que se cita [?]: 934

Artículos totales en que se cita sin citas propias [?]: 926

Promedio de citas por elemento [?]: 17.70

h-index [?]: 14

**Figura 4.** Grafica de publicaciones de investigadores mexicanos dentro del área de electroquímica que se asocian a modificación de superficies que ilustra la tendencia en los en los últimos veinte años, sin ser una búsqueda exhaustiva [Web of Science – 29/05/2015].



**Figura 5.** Grafica de publicaciones de investigadores mexicanos dentro del área de electroquímica, sin ser una búsqueda exhaustiva [Scopus – 29/05/2015].

La tendencia de crecimiento en el área también pudiese estar asociada a la tendencia internacional y a una mayor oferta de revistas especializadas en el área. Se presenta en la Tabla 1 un listado de las revistas internacionales indizadas con sus Factores de Impacto de 2010 a 2013. Aun cuando la tendencia general de las revistas de todos los campos del conocimiento presentan una tendencia a subir sus Factores de Impacto, las revistas en el área de Electroquímica han presentado tanto casos de subir, como bajar y de ziz-zag; mostrando un bajo rango de fluctuación de decimas de punto. Aquí la tendencia no es tan marcadamente creciente como en las publicaciones de mexicano en el área de electroquímica.

**Tabla 1.** Listado de revistas indizadas en el área de Electroquímica.

#	Revistas Indizadas en Electroquímica	IF (2013)	IF (2012)	IF (2011)	IF (2010)
1	Bioelectrochemistry	3.870	3.947	3.759	3.520
2	Biosensors & Bioelectronics	6.451	5.437	5.602	5.361
3	Chemical Vapor Deposition	1.371	1.316	1.796	1.804
4	Corrosion Reviews	1.714	0.500	0.692	0.529
5	ECS Electrochemistry Letters	1.540			
6	Electroanalysis	2.502	2.817	2.872	2.721
7	Electrochemical and Solid State Letters	2.149	2.010	1.995	1.981
8	Electrochemistry	0.975	0.934	0.954	0.771
9	Electrochemistry Communications	4.287	4.425	4.859	4.287
10	Electrochimical Acta	4.086	3.777	3.832	3.650
11	Electrocatalysis	2.089	1.455		
12	Fuel Cells	1.546	2.364	3.149	3.320
13	International Journal of Hydrogen Energy	2.930	3.548	4.054	4.057
14	Ionics	1.836	1.674	1.288	1.052
15	International Journal of Electrochemical Science	1.956		3.729	2.808
16	Journal of Applied Electrochemistry	2.147	1.836	1.745	1.496
17	Journal of Electroanalytical Chemistry	2.871	2.672	2.905	2.733
18	Journal of New Materilas for Electrochemical Systems	0.659	0.532	0.533	0.687
19	Journal of Power Sources	5.211	4.675	4.951	4.290
20	Journal of Solid State Electrochemistry	2.234	2.279	2.131	2.234
21	Journal of the Electrochemical Society	2.859	2.588	2.590	2.427
22	Journal of Fuel Science and Technology	0.785	0.988	1.136	0.884
23	Russian Journal of Electrochemistry	0.660	0.501	0.534	0.445
24	Sensors	2.048	1.953	1.739	1.774
25	Sensor and Actuators B-Chemical	3.840	3.535	3.898	3.370
26	Sensor Letters	0.558	0.517	0.819	0.602
27	Transactions of the Institute of Metal Finishing	0.747		1.234	1.620

**Tabla 2.** Listado de trabajos en el área de Electroquímica con asociación a la Modificación de Superficies.

	2011	2012	2013	2014	2015	Total	Promedio de citas por año
	85	94	76	101	32	956	27.31
<b>1. ELECTROCHEMISTRY AND THE ENVIRONMENT</b> Por: RAJESHWAR, K; IBANEZ, JG; SWAIN, GM JOURNAL OF APPLIED ELECTROCHEMISTRY Volumen: 24 Número: 11 Páginas: 1077-1091 Fecha de publicación: NOV 1994	30	24	20	14	5	336	15.27
<b>2. ELECTROCHEMISTRY OF SOME SUBSTITUTED PYRROLES</b> Por: DIAZ, AF; MARTINEZ, A; KANAZAWA, KK JOURNAL OF ELECTROANALYTICAL CHEMISTRY Volumen: 130 Número: 1-3 Páginas: 181-187 Fecha de publicación: 1981	2	2	1	2	0	105	3.00
<b>3. Synthesis and characterization of high tap-density layered Li[Ni(1/3)Co(1/3)Mn(1/3)]O(2) cathode material via hydroxide co-precipitation</b> Por: Luo, Xufang; Wang, Xianyou; Liao, Li; et ál. JOURNAL OF POWER SOURCES Volumen: 158 Número: 1 Páginas: 654-658 Fecha de publicación: JUL 14 2006	5	13	4	13	3	76	7.60
<b>4. Oxygen catalytic evolution reaction on nickel hydroxide electrode modified by electroless cobalt coating</b> Por: Wang, XY; Luo, H; Yang, HP; et ál. Conferencia: International Symposium on Solar-Hydrogen-Fuel Cells Ubicación: CANCUN, MEXICO Fecha: AUG 25-29, 2002 INTERNATIONAL JOURNAL OF HYDROGEN ENERGY Volumen: 29 Número: 9 Páginas: 967-972 Fecha de publicación: AUG 2004	6	10	8	11	5	59	4.92
<b>5. On the electrochemistry of dopamine in aqueous solution. Part I: The role of [SDS] on the voltammetric behavior of dopamine on a carbon paste electrode</b> Por: Corona-Avendano, Silvia; Alarcón-Angeles, Georgina; Ramírez-Silva, Maria Teresa; et ál. JOURNAL OF ELECTROANALYTICAL CHEMISTRY Volumen: 609 Número: 1 Páginas: 17-26 Fecha de publicación: OCT 15 2007	8	5	5	6	1	39	4.33
<b>6. Hydrogen bonding effects on the association processes between chloranil and a series of amides</b> Por: Gomez, M; Gomez-Castro, CZ; Padilla-Martinez, II; et ál. JOURNAL OF ELECTROANALYTICAL CHEMISTRY Volumen: 567 Número: 2 Páginas: 269-276 Fecha de publicación: JUN 15 2004	0	4	3	3	1	29	2.42
<b>7. Evolution from hydrogen bond to proton transfer pathways in the electroreduction of alpha-NH-quinones in acetonitrile</b> Por: Macias-Ruvalcaba, NA; Gonzalez, I; Aguilar-Martinez, M JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY Volumen: 151 Número: 3 Páginas: E110-E118 Fecha de publicación: MAR 2004	2	4	1	2	1	27	2.25
<b>8. Molecular design of laccase cathode for direct electron transfer in a biofuel cell</b> Por: Martinez-Ortiz, Javier; Flores, Roberto; Vazquez-Duhalt, Rafael BIOSENSORS & BIOELECTRONICS Volumen: 26 Número: 5 Páginas: 2626-2631 Fecha de publicación: JAN 15 2011	1	7	10	6	1	25	5.00
<b>9. Structure and Electrochemistry of Thin-Film Oxides Grown by Laser-Pulsed Deposition</b> Por: Julien, C.; Haro-Poniatowski, E.; Hussain, O. M.; et ál. IONICS Volumen: 7 Número: 3 Páginas: 165-171 Fecha de publicación: MAY 2001	5	1	0	0	0	24	1.60
<b>10. Hydrogen peroxide sensor based on modified vitreous carbon with multiwall carbon nanotubes and composites of Pt nanoparticles-dopamine</b> Por: Guzman, C.; Orozco, G.; Verde, Y.; et ál. ELECTROCHIMICA ACTA Volumen: 54 Número: 6 Páginas: 1728-1732 Fecha de publicación: FEB 15 2009	5	6	2	2	3	23	3.29

Asociada a la Figura 4, se presenta la Tabla 2, que presenta algunos de los trabajos en el área de Electroquímica con asociación a la Modificación de Superficies. Se puede encontrar en las investigaciones de mexicanos con labor en el área de Electroquímica con asociación a la Modificación de Superficies, temas tales como:

1. Sensores, para: Dopamina, peróxido de hidrogeno con electrodos modificados de nanotubos, etc.
2. Electrodoos modificados con recubrimientos metálicos u óxidos metálicos, tales como: Co, Li[Ni(1/3)Co(1/3)Mn(1/3)]O(2), Mo-Os-Se, etc.
3. Celdas biocombustibles con cátodo de lacasa, etc.
4. Superficies funcionalizadas, con: AEBA,
5. Materiales compuestos, como: nanopartículas de Pt – dopamina,
6. Técnicas de caracterización, empleadas como: AFM, SEM, TEM, GDOES, XPS, etc.
7. Otros.

### ***Tendencias: Electroquímica y la Modificación de superficies por Métodos Físicos***

El uso de métodos de depósitos físicos y químicos para la modificación de superficies que se utilizan y estudian en el campo de la Electroquímica se ha diversificado e incrementado en frecuencia, conforme aumenta la disponibilidad de técnicas de depósito, así como las exigencias de los problemas lo han requerido. Esto sobre todo fomentado por las especificaciones cada vez más complejas en la industria y en la investigación.

La investigación que se encuentra en grupos mexicanos incluye el estudio de superficies obtenidas por métodos físicos como: HVOF, depósitos pulsados-láser, evaporación, polimerización de plasma, etc.; tal y como otras técnicas químicas, como: CVD, Sol-gel, etc.

## **Desarrollo industrial, Innovación Tecnológica e Investigación en Electrodeposición y Modificación de Superficies:**

De acuerdo con el Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte de 2007 [1], la industria de los Electrodepositos y Modificación de Superficies (EMS) se clasifica como la rama industrial 3328: "Recubrimientos y terminados metálicos". Esta sección está formada por empresas dedicadas al recubrimiento de piezas metálicas por medio de procesos electrolíticos, aplicación de pinturas y otros tipos de recubrimientos, incluyendo el tratamiento de piezas no metálicas y procesos de preparación como son la limpieza, pulimento, y esmerilado, así como otros tratamientos especiales.

Para dar una idea del tamaño que tiene esta industria en América del Norte, en EE.UU había 6,178 empresas (unidades económicas) y la producción fue aproximadamente \$26.6 billones de dólares en 2007 [2]. En Canadá se contabilizaron poco más de 1,000 empresas y se lograron ingresos de \$2.5 billones de dólares en 2008 [3]. Mientras que en México, de acuerdo con datos del INEGI, existen aproximadamente 600 establecimientos con una producción de \$2.3 billones de dólares en 2008 [4].

Dada la diversidad tecnológica de la industria de los recubrimientos, y su amplia cobertura de aplicaciones, durante la formación de la Alianza Estratégica y Redes de Innovación (AERI) para el sector de los recubrimientos y terminados metálicos, de la cual el CIDETEQ ha sido el líder del proyecto, en colaboración con el CINVESTAV Unidad Querétaro, se planteó una división en cinco áreas tecnológicas, las cuales en conjunto abarcan la totalidad de las actividades de investigación y desarrollo tecnológico de esta industria. Estas áreas tecnológicas son: 1) Electrodeposición (electroplating), 2) Recubrimientos de Conversión

(conversion coatings), 3) Recubrimientos Orgánicos (organic coatings), 4) Recubrimientos Metal-Cerámicos (metal-ceramic coatings), y 5) Tratamiento de Superficies (surface treatment). Esta división y enfoque en cinco áreas tecnológicas, permitió no solamente tener mayor alcance, sino mayor nivel de detalle. Esto es, ofrecer un análisis diferenciado de las distintas contribuciones de la investigación científica y del desarrollo de cada área, y por tanto, de su participación en el futuro de largo plazo que tiene la tecnología en la industria de estudio.

El desarrollo tecnológico de la Industria del tratamiento y acabado de superficies interactúa y se alimenta de dos vertientes cruciales. Por un lado, de la investigación científica que llevan a cabo centenares de instituciones académicas y gubernamentales en el mundo y por el otro lado, de suma relevancia, la participación de diversas industrias “proveedoras” que llevan a cabo una gran proporción del desarrollo tecnológico y de la explotación comercial del mismo. Sólo por dar un dato: más del 80% de la propiedad industrial (patentes concedidas) a nivel mundial de las cinco áreas tecnológicas de estudio la detentan las industrias “proveedoras” y sólo aproximadamente el 16% la Industria del tratamiento y acabado de superficies, el resto la tienen Institutos y Universidades.

Enfocándose al área tecnológica de los electrodepositos, se ha observado que la producción científica a nivel mundial para el periodo de estudio (2006-2011) ha crecido a un promedio de 1.6% anual, lo que sugiere que va alcanzando una etapa de madurez. Los países que dominan la producción científica en esta área tecnológica son principalmente China, con poco más del 20% del total de artículos científicos publicados en el periodo de estudio, seguido de EE.UU. y Japón con el 9.1% y 7.8% de la producción respectivamente. La

producción científica sobre "Electrodepósito" en México representó el 0.8% del total a nivel mundial. Ésta, es comparable con la producción que tienen países como España (0.9%), Polonia (0.9%), Bulgaria (0.8%); y arriba de la que tienen países como Israel (0.5%) y Lituania (0.5%). Para que México entrará dentro de los primeros diez países de mayor producción en esta área, tendría que publicar poco más del doble de lo publica actualmente en este tema. Es decir, tendría que publicar algo similar a lo que actualmente hace Brasil (10° lugar a nivel mundial), quien alcanzó 120 artículos en este periodo de estudio. Como país México ocupa un bajo lugar a nivel mundial. Sin embargo, cualquiera de las cuatro instituciones líderes en este tema en México (CIDETEQ, UNAM, UAM O CINVESTAV), tiene una producción científica comparable con instituciones de prestigio internacional, como: la National Formosa University de Taiwán (4° lugar como país) o la Pohang University of Science and Technology de Corea del Sur (5° lugar como país).

Los sectores industriales con mayor nivel de patentamiento, pueden indicar sectores con mayor interés en la explotación comercial de los desarrollos tecnológicos. En Electrodeposición, un sector que destaca es el de electrónica, con aplicaciones para cobre electrolítico para las tarjetas de circuitos impresos (PCB's, de sus siglas en inglés). Otros procesos de Electrodeposición en la industria automotriz utilizan electrodeposición de oro, para los interruptores de las bolsas de aire de los autos, en las cuales deben mantenerse una muy alta confiabilidad de sus características conductoras aun en varios años de no usarse.

Las tres fuerzas de cambio más relevantes que mueven el desarrollo de tecnología en este sector, son: Las regulaciones ambientales y sanitarias; la reducción costos de operación; y el cumplimiento de especificaciones del cliente. Entre los cambios que producen las

regulaciones ambientales se observa a largo plazo la necesidad de reducir totalmente tanto las descargas de aguas residuales como el de los llamados lodos. En la reducción de los costos de operación, a largo plazo los expertos identifican una imposibilidad de seguir reduciéndolos. Esto podría implicar el agotamiento de las posibilidades de ciertas técnicas que podría estar dando lugar a las condiciones de ser sustituidas por unas nuevas. Estas nuevas técnicas podrían ofrecer un mejor desempeño o cumplimiento de otro factor adicional con el mismo costo. En el largo plazo los expertos observan un cambio hacia el uso de nuevos materiales con propiedades multifuncionales (aleaciones, compuestos).

### **Referencias**

- [1].INEGI, "Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte: SCIAN 2007," Instituto Nacional de Estadística y Geografía.2007.
- [2].U.S. Census Bureau, "2007 Economic Census Industry Series," U.S. Census Bureau 2011.
- [3].Canadian Industry Statistics, Manufacturing production of NAIC 3328, 2011
- [4].INEGI, "Censos Industriales 2009," Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010.

## ***Corrosión y Tratamientos de Superficies (CTS)***

---

Coordinador: ***Dr. Joan Genescá Llongueras***<sup>13</sup>

### Colaboradores

Alberto Martínez Villafañe<sup>1</sup>, Pedro Castro B<sup>2</sup>, Angélica del Valle<sup>3</sup>,  
José María Malo T<sup>4</sup>, Juan Mendoza<sup>5</sup>, Tezozomoc Pérez López<sup>6</sup>,  
Benjamín Valdez<sup>7</sup>, Jorge Uruchurtu Ch<sup>8</sup>, Ricardo Orozco C<sup>9</sup>,  
Citlalli Gaona T.<sup>10</sup>, Francisco J. Rodríguez G<sup>11</sup>, Rubén. Vázquez<sup>12</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigación en Materiales Avanzados, CIMAV  
Departamento de Metalurgia e Integridad Estructural  
Ave. Miguel de Cervantes 120 complejo Industrial Chihuahua  
C.P. 31109 Chihuahua, Chihuahua, México

<sup>2</sup>Centro de Investigación y Estudios Avanzados, CIEA, Unidad Mérida  
Unidad Mérida Km. 6 Antigua carretera a Progreso Apdo.  
Postal 73, Cordemex, 97310, Mérida, Yuc., Méx.

<sup>3</sup>Instituto Mexicano del Transporte, IMT  
Km 12+000, Carretera Estatal No. 431 "El Colorado Galindo"  
Parque Tecnológico San Fandila/ Mpio. Pedro Escobedo/ Edo. Querétaro/ C.P.76703

<sup>4</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, IIE  
Reforma 113, Col. Palmira, C.P. 62490 Cuernavaca, Morelos, México.

<sup>5</sup>Instituto Mexicano del Petróleo, IMP  
Dirección de Servicios de Ingeniería-Gerencia de Servicios Químicos  
Área de Corrosión  
Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152 Col.  
San Bartolo Atepehuacan,  
México D.F. C.P 07730

<sup>6</sup>Centro de Investigaciones den Corrosión, CICORR  
Universidad Autónoma Campeche  
Av. Agustín Melgar S/N entre Calle 20 y Juan de la Barrera. Col. Buenavista C.P.24039  
Campeche , Campeche. México

<sup>7</sup>Instituto Ingeniería  
Universidad Autónoma de Baja California  
Unidad Mexicali I. Ex Ejido Coahuila, Mexicali, B.C.

<sup>8</sup>Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Ciicap  
Universidad Autónoma Estado Morelos  
Av. Universidad No. 1001, Col Chamilpa,  
Cuernavaca, Morelos, México. C.P. 62209

<sup>9</sup>Instituto Ingeniería  
Universidad Veracruzana  
S. S. Juan Pablo II s/n. Zona Universitaria. C.P. 94297,  
Boca del Río, Veracruz.

<sup>10</sup>Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, CIIIA  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica-Universidad Autónoma de Nuevo León  
Aeropuerto Internacional del Norte, Km 2.3 Carretera a Salinas Victoria s/n.  
66600 Municipio de Apodaca, N.L

<sup>11</sup>Facultades de Ingeniería y Química  
Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM  
Av. Universidad N° 3000, Universidad Nacional Autónoma de México, C.U.,  
Distrito Federal, 04510

<sup>12</sup>Departamento de Ingeniería Química,  
Universidad Iberoamericana, UIA  
Prolongación Paseo de la Reforma 880, Lomas de Santa Fe,  
México, C.P. 01219, Distrito Federal

<sup>13</sup>Polo Universitario de Tecnología Avanzada  
Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM  
Vía de la innovación No.410., Parque de Investigación e Innovación Tecnológica, PIIT  
Autopista Monterrey-Aeropuerto Km.10  
Apodaca, Nuevo León. C.P. 66629

## **“Algunas Aportaciones a la Investigación Científico Tecnológica en Corrosión en México”**

## Introducción

### **Algunas reflexiones sobre la enseñanza de la corrosión.**

Empiezo parafraseando a Neruda: Confieso que he vivido. Cumplidos los 65 y cerca ya de los 66 años, escribiendo ya pues el diario de invierno (aquí copio a Paul Auster) es tiempo de mirar hacia atrás sin ira. Llevo ejerciendo la docencia en corrosión desde 1975, cuando inicié el doctorado. Son muchos años, un largo aprendizaje. ¿Estoy satisfecho? En absoluto. Más allá de los buenos alumnos, que son muchos y todos excelentes, que están en el camino, el desafío que nos propusimos Javier Ávila y un servidor, allá por 1982, en el aquel entonces recién estrenado Laboratorio de Corrosión en el edificio D de la Facultad de Química de la UNAM sigue vigente. Hemos avanzado y mucho en investigación y una buena muestra es el creciente número de artículos de autores mexicanos, como lo demuestra una búsqueda en Scopus, pero sigue pendiente el problema del conocimiento básico, el de los aspectos electroquímicos de la corrosión, el cual sigue sin formar parte de los currícula de las carreras de ingeniería. Recientes revisiones de varios proyectos tecnológicos, análisis de falla en ductos, etc., me han permitido comprobar que las carencias en cuanto, por ejemplo, a la correcta aplicación de la protección catódica siguen siendo un obstáculo, que la interpretación de un potencial de corrosión, no digamos el criterio de los  $-0.85 \text{ V vs Cu/CuSO}_4$ , y si este debe aplicarse con la corriente conectada o no, el efecto del apantallamiento catódico cuando se produce una delaminación, y un muy largo etc., siguen formando parte de los desafíos a los que se enfrentan en el día a día muchos de nuestros ingenieros. Ello explica porque los estudios sobre el costo de la corrosión siguen siendo muy elevados ([www.corrosioncost.com](http://www.corrosioncost.com)) y porque el Departamento de Defensa de los USA haya encargado a la Universidad de Akron una licenciatura en ingeniería de la corrosión, cuya primera generación se gradúa precisamente este año 2015. Muy atrás

queda el informe Hoar publicado en 1970 y sin embargo plenamente vigente, que señalaba como una de las causas principales del elevado costo de la corrosión en la Gran Bretaña, 3.5% del PIB, la siguiente:

- La necesidad de una mejor educación en corrosión y protección con la introducción en el curriculum de las carreras de ingeniería de una asignatura de corrosión, que entre otras acciones dió lugar a la publicación del libro "Introduction to corrosion prevention and control for engineers", del Prof. P.J. Gellings auspiciado por la Federación Europea de la Corrosión y cuya primera edición salió en 1976 y la última es de 2005.

Por referirme, solo, a alguna de las relacionadas directamente con la enseñanza de la corrosión.

El estudio más reciente realizado en los USA, **Cost of Corrosion and Preventive Strategies in the United States**, apunta a 276 billones de dólares y una de las causas principales, la referida a la enseñanza de la corrosión, sigue siendo válida. Apunto aquí, en su idioma original, las dos conclusiones referidas a la enseñanza e investigación en corrosión:

- **Improve education and training of staff**
- **Advance corrosion technology through research, development, and implementation**

De los estudios mas recientes disponibles me permito rescatar los **Proceedings of the Materials Forum 2007: Corrosion Education for the 21st Century**, Michael H. Moloney, Editor, Corrosion Education, Workshop Organizing Panel, National Research Council, Washington

(2007). Copia textual del segundo párrafo del Prefacio: Better education for the nation's engineers is essential to improving corrosion control and management practices throughout the national infrastructure. In this regard, an assessment of the corrosion curricula of undergraduate engineering schools is timely. Lo anterior y las ponencias presentadas indican que tienen detectado el mismo problema.

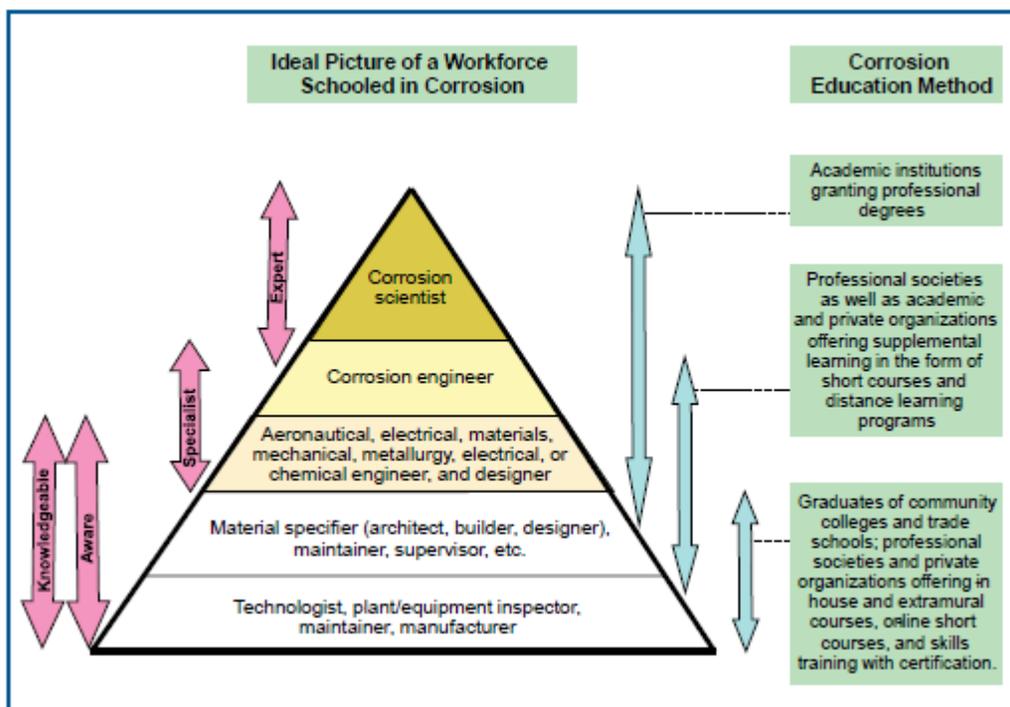
Otras dos referencias imprescindibles son:

1. J. R. Scully and R. G. Kelly, "Corrosion Education in the 21<sup>st</sup> Century," 16th International Corrosion Congress: Corrosion Tech. in the High Technology Era, Sept. 19-24, Beijing, China (2005).
2. Assessment of Corrosion Education, National Research Council of the National Academy, Washington DC, (2009).

El Prof. John Scully ha agrupado, en forma piramidal, a los diferentes actores, la fuerza de trabajo a fin de cuentas, que participan en las tareas de educación e investigación en corrosión. Una copia se presenta en la Figura 1. Está estructurada en función de la diversidad de los profesionales de la corrosión y del nivel educativo y de conocimiento que necesitan. Puede servir de punto de partida y a la vez de resumen, en cuanto a las recomendaciones tanto de tipo estratégico como táctico necesaria para mejorar la educación en corrosión a los diferentes niveles en que ésta debe darse.

El estudio realizado por el National Research Council citado anteriormente apunta a que una de las claves para todos los niveles involucrados, desde licenciatura a doctorado, estriba en adoptar el modelo de la enseñanza basada en el conocimiento. Dada la naturaleza

multidisciplinaria de los fenómenos de corrosión es necesario que un experto o especialista en corrosión posea una gran cantidad de conocimientos. Además de los básicos en una carrera de ingeniería, hay que añadir los necesarios en ciencia e ingeniería de materiales, química (orgánica e inorgánica) y electroquímica (con énfasis en electroquímica aplicada), además de mecánica de la fractura si va a tener que trabajar con formas de corrosión donde la presencia de esfuerzos mecánicos es importante, como corrosión bajo esfuerzo, corrosión-fatiga, etc. Otros tópicos, como química coloidal, mecánica de fluidos, fisicoquímica de superficies, polímeros e incluso ingeniería eléctrica le serían también de utilidad. A fin de cuentas el modelo propuesto es el de la educación basada en el conocimiento, Knowledge-based Education. Hay que tener en cuenta que los eventos y procesos en corrosión deben ser estudiados y entendidos en coordenadas espacio-temporales. Empezando por las escalas dimensionales, desde el nivel atómico (0.1 nm), pasando por el micrométrico (iniciación de una picadura, aprox. 1  $\mu\text{m}$ ), hasta el que se mide en cm (propagación de una picadura, 1mm), ya que estos procesos controlan muchas de las propiedades de los procesos de corrosión y su comportamiento a macroescala. Adicionalmente, hay que tomar en cuenta la escala temporal, ya que muchos de estos procesos de corrosión pueden suceder en tiempos tan cortos como los picosegundos y otros necesitar varios años (corrosión atmosférica, por ejemplo).



**Figura 1.** The corrosion workforce pyramid. The pyramid shows the various categories of corrosion professionals and the education they need. The green boxes on the right indicate the educational paths they follow. Adapted from J. R. Scully, presented at the 16th International Corrosion Conference, Beijing, China, September 2005.

A continuación se presenta una muestra, espero que representativa, de lo que se ha hecho y hace en México relacionado a corrosión y protección. Refleja los esfuerzos de lo realizado por algunos grupos en estos últimos años, muy vinculados especialmente a los aspectos electroquímicos de la corrosión. No cabe duda que el balance es positivo, en calidad y cantidad, pero hay que continuar trabajando, especialmente en los aspectos más ingenieriles de este campo del conocimiento que por su impacto, social y económico, es vital para el crecimiento de México y fundamental para la preservación de su infraestructura.

**Centro de Investigación en Materiales Avanzados, CIMAV**

**Integrantes del Grupo de Corrosión:** Alberto Martínez Villafañe, José Chacón Nava.

El primer grupo de corrosión establecido en nuestro país muy posiblemente nace en 1975 con la llegada del Dr. Alejandro Peraza García al IPN, siendo a esa fecha el Primer Doctor con la especialidad en Corrosión y que posteriormente pasaría al IIE al Departamento de Combustibles Fósiles, donde se forma un grupo multidisciplinario (1978-1998) relacionado con la corrosión (Alejandro Peraza García, Alberto Martínez Villafañe, Juan Paredón, Adriana Wong, David López, Abraham Velazco, Jorge Uruchurtu Chavarin, José María Malo Tamayo, José G. Chacón Nava, José G. González Rodríguez, Víctor M. Salinas Bravo, Esteban M. García Ochoa, José Luis Ramírez, Miguel Ángel González, Jesús Porcayo Calderón, F. Almeraya Calderón, Citlalli Gaona Tiburcio, entre otros). Parte del trabajo desarrollado por este grupo posteriormente sería la base de las metodologías relacionadas con la corrosión y métodos de protección utilizados en CIMAV. A la fecha, el grupo de corrosionistas mencionado ha formado más de 100 doctores con diferentes especialidades relacionadas con la corrosión y protección.

***Recientes Avances en la Corrosión por Sales Fundidas de Aleaciones Intermetálicas:*** La degradación de materiales por corrosión, es una de las principales causas que afectan la operación, eficiencia, disponibilidad y seguridad de muchos procesos industriales e infraestructura que involucran condiciones en baja y alta temperatura. En países industrializados, evaluaciones llevadas a cabo por comités de expertos en corrosión y protección fijan pérdidas anuales causadas por la corrosión en torno al 3.5 por ciento del producto interno bruto, mientras que en los países en vías de desarrollo llegan al 6 por ciento.

En particular, la industria de generación de energía eléctrica ya que se ha reportado que fenómenos de deterioro asociados con corrosión es la causa del 27% de las fallas de materiales que se presentan en las plantas generadoras de electricidad.

Los dispositivos de transferencia de calor, como los sobrecalentadores, recalentadores y precalentadores de aire regenerativo de calderas de plantas eléctricas son las más afectadas por la corrosión, ya que ésta causa la degradación severa de los intercambiadores de calor que forman estos equipos, los cuales operan en baja y alta temperatura en ambientes muy corrosivos que contienen ciertos contaminantes provenientes del combustible empleado comúnmente aceite residual o combustóleo. En México el 66.8% de la energía eléctrica generada, es mediante plantas termoeléctricas, las cuales en su mayoría usan combustóleo pesado derivado de los crudos nacionales. Específicamente el combustóleo posee grandes concentraciones de vanadio, azufre y sodio, elementos conocidos como los principales responsables de generar la corrosión por sales fundidas, en primer término, pero también oxidación y sulfidación. Debido a que no se contempla un cambio radical hacia a otro tipo de combustible, resulta necesario realizar investigación en el campo de la corrosión en los materiales usados en calderas de potencia. Otros ambientes en donde se presenta este tipo de daño es en celdas de carbonatos fundidos, que contienen  $(\text{Li},\text{K})\text{CO}_3$  a  $650^\circ\text{C}$ , en incineradores de desechos, que contienen sales de  $\text{NaCl}$  y  $\text{KCl}$  y operan a en un rango de temperaturas de  $350^\circ\text{C}$  a  $600^\circ\text{C}$ , etc.

En los últimos años, la investigación y el desarrollo de los materiales intermetálicos para aplicaciones estructurales a altas temperaturas, se ha visto favorecida por la demanda de materiales alternativos a las

superaleaciones en la industria aeroespacial, con el objetivo de desarrollar materiales más ligeros, más resistentes y que operen a temperaturas más altas de trabajo.

El arreglo atómico en los compuestos intermetálicos se denomina "estructura ordenada", lo que significa que cada elemento tiene una orientación preferente en la estructura cristalina. Los compuestos intermetálicos  $\text{Fe}_3\text{Al}$  y  $\text{FeAl}$  son de particular interés puesto que a diferencia de otros intermetálicos pueden existir en un amplio rango de composiciones. En equilibrio, entre 18.5 y 36.5 %Al (% at.) el  $\text{Fe}_3\text{Al}$  existe a temperatura ambiente con una estructura  $\text{DO}_3$ ; mientras que el  $\text{FeAl}$  con una estructura B2 existe entre 36.5 y 50 %Al. Aunque la ductilidad de la estructura  $\text{DO}_3$  es mayor que la de la estructura B2, es solamente estable hasta los 540 °C, arriba de esta temperatura, la estructura B2 es la estable. Y aunque ésta última es relativamente frágil en composiciones cercanas al 50% (at.) de Al, la ductilidad puede ser incrementada disminuyendo el contenido de Al. La adición de otros elementos tales como B,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Li, Ce, Nd, Pr, Ni, Zr, Cr, Ta, Ti aumentan la resistencia a la corrosión en alta temperatura.

### **Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN-Unidad Mérida**

**Integrantes del Grupo de Corrosión:** Castro Borges Pedro, Díaz Ballote Luis, Maldonado López Luis, Pech Canul Máximo, Petrova Veleva Lucien

El grupo de electroquímica y corrosión del CINVESTAV-Mérida inició actividades en 1987 bajo la iniciativa del Dr. Luis Maldonado López. Durante los primeros años estuvo un profesor visitante de Lituania (Dr. Rimantas Ramanauskas) y en 1994 ingresó a la planta de profesores la

Dra. Veleva (de Bulgaria). Desde su creación los 3 principales objetivos del grupo han sido: a) incidir en temas de investigación de frontera de la Ciencia e Ingeniería de la Corrosión, b) contribuir en la formación de recursos humanos de alto nivel y c) la gestión tecnológica y vinculación con la industria a través de proyectos, asesorías, contratos, servicios técnicos y cursos.

Ejemplos de los temas de investigación que han sido abordados por miembros de este grupo son: electroquímica de corrosión de metales en diferentes ambientes influenciada por las características del clima tropical húmedo (atmósfera, concreto, suelos, agua del mar), inhibidores de corrosión, mapas de agresividad del clima tropical marino de la Península de Yucatán (corrosión del acero al carbón, zinc, aluminio y cobre), corrosión de acero al carbón protegido con recubrimientos electrodepositados de zinc y aleaciones de zinc, ensayos acelerados en cámaras y modelos de simulación de corrosión, sensores de corrosión, degradación de calizas en monumentos históricos/sitios arqueológicos, corrosión localizada en aleaciones de aluminio y compósitos, degradación de polímeros y aplicación de la electroquímica en el área de biocombustibles. Como resultado de éstas investigaciones se han publicado en forma global 245 artículos en revistas indexadas y 450 trabajos en congresos nacionales e internacionales.

En cuanto a la formación de recursos humanos se han dirigido 96 tesis de licenciatura, 53 de maestría y 19 de doctorado. Parte de la labor académica de los miembros del grupo consiste en la impartición de diversos cursos en los programas de maestría y doctorado de Física Aplicada/Fisicoquímica del CINVESTAV-Mérida. Aunque la mayoría de las tesis de posgrado dirigidas son de egresados de dichos programas, también se han graduado estudiantes provenientes de otros programas

a través de la colaboración/convenios con otras instituciones educativas en México y el extranjero. Dos de los miembros del grupo han publicado libros a través de casas editoriales (“Corrosión de Metales y Degradación de Materiales” por L. Veleva y “Corrosión en Estructuras de Concreto Armado” por P. Castro), los que han tenido un impacto muy positivo en la formación de recursos humanos en el área de la corrosión.

El grupo de Electroquímica y Corrosión ha tenido una fuerte vinculación con la industria y como ejemplos de los proyectos más relevantes se pueden mencionar: el diagnóstico del estado de corrosión del muelle de carga de Peñoles en Tampico; la evaluación de la corrosividad atmosférica del muelle de carga en la sección de fluidos del Puerto de altura de la terminal remota en Progreso, Yucatán; evaluación del desempeño a la corrosión marina de distintos tipos de recubrimientos base zinc y aleaciones de zinc, pintados y sin pintar para la empresa Hilti, AG, de la Unión Europea; la asesoría a la empresas el Águila, S. A de CV y la Corporación Mexicana de Investigación en Materiales, S. A de C.V.; Elaboración del mapa de agresividad atmosférica para el corredor industrial Reynosa/Tampico/Altamira y el proyecto para determinar las velocidades de corrosión del refuerzo galvanizado del Common Fund for commodities de las Naciones Unidas.

Otro aspecto del impacto académico del grupo es la organización de congresos. En 1992 se organizó el 1er. Taller Internacional de Corrosión, en 1994 el 1st. Mexican Symposium on Metallic Corrosion y en 1999 el XIV Congreso de la Sociedad Mexicana de Electroquímica. Aparte de eso, algunos miembros del grupo han participado individualmente como coordinador general de diversos congresos, simposios y jornadas. Cabe mencionar que algunos miembros del grupo han obtenido notables reconocimientos internacionales.

## **Instituto Mexicano del Transporte**

**Integrantes del Grupo de Corrosión:** Del Valle Moreno Angélica, Martínez Madrid Miguel, Pérez Quiroz J. Trinidad, Rendón Belmonte Mariela, Terán Guillén Jorge, Torres Acosta Andrés.

El grupo de corrosión del IMT inició actividades en 1997 bajo la coordinación del Dr. Alejandro Lozano Guzmán, desde 1998 y hasta el presente, el Dr. Miguel Martínez Madrid dirigió y consolidó al grupo. Desde su creación los 3 principales objetivos del grupo han sido: a) Incidir en temas de investigación de la Ciencia e Ingeniería de la Corrosión aplicada al transporte, b) Contribuir a la formación de recursos humanos de alto nivel y c) Gestionar tecnología y vinculación con la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y la industria del transporte, a través de proyectos, asesorías, contratos, servicios técnicos y cursos.

Ejemplos de los temas de investigación que han sido abordados por miembros de este grupo son: Inhibidores de corrosión, sensores de corrosión, aplicación de la electroquímica en el área de biocombustibles, protección catódica en puentes y muelles, efecto del ambiente marino en durabilidad de estructuras de concreto reforzado, evaluación de eficiencia de ánodos galvánicos, capacidad residual en aceros corroídos, evaluación electroquímica de soldaduras. Como resultado de éstas investigaciones se han publicado en forma global 150 artículos en revistas indexadas, 433 trabajos en congresos nacionales e internacionales, 25 Publicaciones Técnicas del IMT, 9 capítulos en libros y 3 patentes, se encuentran en proceso de obtención de 14 patentes.

En cuanto a la formación de recursos humanos se han dirigido 72 tesis de licenciatura, 32 de maestría y 6 de doctorado.

El grupo de Corrosión ha tenido una fuerte vinculación con la SCT y la industria, como ejemplos de los proyectos más relevantes se pueden mencionar: Plan Nacional de evaluación de Puentes dañados por corrosión, que realizó la diagnóstico y el proyecto de reparación de los 6500 Puentes de la Red Federal y 2000 Puentes de la red CAPUFE; el Sistema de Gestión Marítima, que evaluó y emitió el Proyecto de Rehabilitación de los 17 Muelles Federales de México; Supervisión del Muelle Alterno de Puerto Progreso, en Progreso, Yuc.; Coordinación del Proyecto DURAR, que estudia la corrosividad atmosférica en 13 países Iberoamericanos y existen 15 estaciones distribuidas en el territorio nacional; Comportamiento electroquímico de acero al carbón soldado a acero inoxidable; Estudio del acero inoxidable como refuerzo estructural en concreto; Influencia del medio ambiente sobre ánodos discretos usados en concreto reforzado; Efectos geométricos del agrietamiento del concreto debido a corrosión localizada del acero de refuerzo; Caracterización de la superficie del acero bajo protección catódica en agua de mar; Efecto de la adición de un inhibidor base Amino Alcohol en refuerzo galvanizado en soluciones alcalinas.

Otro aspecto de la labor académica del grupo es la organización e impartición de cursos anuales especializados en corrosión al personal de las 32 Unidades de la SCT y universidades nacionales e internacionales invitadas, a lo largo de todo el país. Algunos miembros del grupo han participado individualmente como coordinadores generales de diversos congresos, simposios y jornadas. Cabe mencionar que algunos miembros del grupo han obtenido notables reconocimientos nacionales e internacionales.

Algunas aportaciones:

- Juárez-Arellano, E. A., Martínez-Madrid, Miguel, Pérez-Quiroz, José T., Rendón-Belmonte, Mariela, Schorr, Miguel & Valdez-Salas, Benjamín. (2015) "Surface modification of carbon steel reinforcement of concrete". *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 62(2), pp. 69-76.
- Alonso-Guzmán, Elia Mercedes, Chávez Garcia, Hugo L., Martínez-Madrid, Miguel, Martínez-Molina, Wilfrido, Pérez-Quiroz, José T., Rendón-Belmonte Mariela (2014). "Electrochemical Behavior of the Welded Joint Between Carbon Steel and Stainless Steel by Means of Electrochemical Noise". *Int. J. Electrochem. Sci*, 9, pp.6734-6750.
- Martínez-Madrid, Miguel, Pérez-Quiroz, José T., Porcayo-Calderón, Jesús, Rendón-Belmonte, Mariela, Torres-Acosta, Andrés, Valdéz-Salas, Benjamín, Wiener, Schorr. (2013) "Characterization of steel surface under cathodic protection in seawater," *Anti-Corrosion Methods and Materials*. 60(3), pp.160-167.
- Orozco-Gamboa, Gustavo, Pérez-Quiroz, José T., Porcayo-Calderón, Jesús, Rendón-Belmonte, Mariela, Terán-Guillén, Jorge., Torres-Acosta, Andrés. (2012) "Evaluation of a  $CR_3C_2$ (NICR) coating deposited on S4400 by means of an HVOF process and used for flow plates of Pem fuel," *International Journal of Electrochemical Science*. 7(2), pp.1079-1092.
- Del Valle-Moreno, Angélica, Martínez Madrid, Miguel, Terán Guillén, J Torres Acosta, Andrés. (2010) "Efficiency of an amine-ester based corrosion inhibitor for concrete" *Superficies y Vacío* 23(5), pp.188-192.
- Alonso, Maria C., Herrera-Núñez, Maria J., Martínez-Madrid, Miguel, Pérez-Quiroz José T., Torres-Acosta, Andrés. (2009) "Effect of Amino Alcohol-Based Corrosion Inhibitor Addition on Galvanized Reinforcements in Alkaline Solutions", *Corrosion* 65(9), pp.571-577.

- Del Valle-Moreno, Angélica, Genesca Llongueras, Juan, Martínez Madrid, Miguel, Torres Acosta, Andrés. (2009) "EIS Monitoring of Cathodic Protection of Steel Reinforced Concrete Enhanced by Humectants" ECS Transactions, 20(1). pp.489-498.
- Genesca Llongueras, Juan, Herrera Núñez, Maria J., Martínez Madrid Miguel, Pérez-Quiroz José T., Terán Guillén, Jorge. (2008) "Assessment of stainless steel reinforcement for concrete structures rehabilitation," Journal of Constructional Steel Research, 64(11), pp.1317-1324.
- Orozco-Gamboa, Gustavo, Pérez-Quiroz, José T., Porcayo-Calderón, Jesús, Rendón-Belmonte, Mariela. (2008) "Evaluation of coated stainless steels for bipolar plates in fuel cells type Pem," ECS Transactions, 15. pp.61-70.
- Del Valle-Moreno, Angélica, Hernández-López, Yolanda, Oidor- Salinas, Patricia, Torres Acosta, Andrés, T. de Rincón, Oladis, Rodríguez Montero, R. (2008) "Environmental influence on the behavior of discrete anodes in reinforced concrete" Construction & Building Materials 22 (4) pp.494-503.
- Navarro-Gutierrez, Sergio, Terán-Guillén, Jorge, Torres-Acosta, Andrés. (2007) "Residual flexure capacity of corroded reinforced concrete beams," Engineering Structures, 29 (6), pp.1145-1152.
- T. de Rincón, Oladis, Duracon Group. (2007) "Effect of the marine environment on reinforced concrete durability in Iberoamerican countries: DURACON project/CYTED, Corrosion Science, 49 (7), pp. 2832-2843.
- Del Valle Moreno, Angélica, Genesca Llongueras, Juan, Perez-Quiroz, Jose T., Porcayo Calderón, Jesús. (2005) "Improving Efficiency In The Galvanic Cathodic Protection Of Concrete Structures," Proceedings of the International Conference Held at the University of Dundee, Scotland, UK. p. 279. Thomas Telford.

- Torres-Acosta, Andrés & Sagues, Alberto. (2004) "Concrete cracking by localized steel corrosion-Geometric effects," ACI Materials Journal, 101 (6), pp. 501-507. Martínez-Madrid, Miguel & Torres-Acosta, Andrés. (2003) "Residual life of corroding reinforced concrete structures in marine environment," J. of Materials in Civil Engineering, 15 (4), pp. 344-353.

### **Instituto de Investigaciones Eléctricas**

**Integrantes del Grupo de Electroquímica y Corrosión:** Malo Tamayo José María, Salinas Bravo Víctor, Fernández Rodríguez Daniel, Muñoz Ledo José Ramón

El grupo de electroquímica y corrosión del IIE en su etapa inicial estuvo bajo la dirección del Dr. Alejandro Peraza García, madurando posteriormente bajo el liderazgo de los Drs. Alberto Martínez Villafañe y Jorge Uruchurtu Chavarín a mediados de los años 80's. El principal objetivo del grupo ha sido actuar como apoyo tecnológico al sector energía, particularmente a la Comisión Federal de Electricidad y Pemex. En una primera etapa se realizaron estudio para comprender la problemática de integridad y corrosión en alta temperatura de calderas de centrales termoeléctricas y la problemática de corrosión electroquímica de estructuras expuestas a la atmósfera. Esto dio lugar a proyectos vinculado a CFE que permitieron sentar las bases del entendimiento del fenómeno de la corrosión asociada a procesos de combustión en proyectos de alcance nacional que repercutieron en las prácticas de operación de CFE. Los aspectos electroquímicos de la corrosión por sales fundidas de los combustóleos nacionales formaron parte de este esfuerzo. En este periodo el Dr Jorge Uruchurtu encabezó el Proyecto del Mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica (Proyecto MICAT) de corrosión atmosférica (1995-1998). Esto permitió años más tarde dar sustento a estudios para Pemex Exploración y

Producción en el estado de Tabasco (1999) para establecer el impacto de la corrosión atmosférica por emisiones de instalaciones petrolera de la región. El mismo investigador fue responsable de encabezar los trabajos de monitoreo de corrosión en centrales termoeléctricas, particularmente en precalentadores de aire regenerativo, donde se tuvo éxito al relacionar la corrosión con los eventos de operación de centrales en el centro y norte del país, con la intervención de la Dra. Liboria Mariaca (qepd) y el Dr. Esteban García.

Hasta 1997 el IIE sirvió como un centro de formación investigadores donde tuvieron participación los hoy Drs. Facundo Almeraya, Ulises Cano, José Guadalupe Chacón Citlalli Gaona, Cecilio Mojica y José Luis Ramírez, por mencionar algunos, que en su mayoría han pasado a forma parte de otras instituciones. Tras este periodo fructífero la institución tuvo un cambio en sus políticas recibiendo énfasis los trabajos de desarrollo y servicios con atención en la autosuficiencia del Instituto. Esto tuvo como efecto la partida de varios de sus miembros y la reconstitución del grupo de electroquímica y corrosión en su forma actual.

A partir de 1998 se realizaron estudios relacionados con ductos de hidrocarburos, desarrollándose el software de administración del mantenimiento de corrosión del corredor de ductos Atasta-Cd. Pemex (100 km) para Pemex Exploración y Producción (PEP) cubriendo las formas de control: protección catódica, inhibidores y recubrimientos. El primer estudio de campo de ductos fue para PEP en el Activo Burgos (1999) seguido de la evaluación en campo (2000) del gasoducto Valtierra-Lázaro Cárdenas de 400 km de longitud para determinar la relación entre la protección catódica y los daños/fugas que presentaba el ducto de del Pemex Gas y Petroquímica Básica.

En la última década se han realizado diversos proyectos dirigidos a resolver problemas de protección catódica y corrosión interior de ductos de Pemex. Un ejemplo es la evaluación de la problemática de corrosión en tanques de almacenamiento de petróleo crudo en la Terminal Marítima Dos Bocas (TMDB) (2002-2004) ocasionada por el alto contenido de agua de los envejecidos yacimientos de la zona marina. Como resultado se demostró la viabilidad de utilizar protección catódica en el interior de los tanques, además se diseñó e integró un sistema de monitoreo de la protección catódica y del recubrimientos interior que fue entregado a Pemex. En dos años posteriores (2005-2007) se trabajó en el diagnóstico de la protección catódica de los principales ductos enterrados de la TMDB. En esta etapa se estableció la colaboración con el Dr. John Leeds, creador de la técnica DCVG, para la inspección de ductos enterrados divulgándose la técnica y capacitando al personal de Pemex.

A solicitud de la Región Marina Noreste de PEP, se diseñó, construyó, instaló y experimentó (2010) con un equipo que opera en línea en la plataforma Rebombéo para el registro de corrosión de dos de las principales líneas de crudo a tierra. Este estudio permitió mostrar la ventajas de monitoreo electroquímico en línea y tiempo real y el efecto del ensuciamiento en la corrosión interior de los ductos.

En años recientes (2012-2013) se ha colaborado con la Subdirección de Transmisión de CFE desarrollándose y aplicándose el método electroquímico *extendido* y el ultrasónico por impacto en la inspección de cimentaciones de torres de líneas de transmisión, realizándose trabajos de cobertura nacional con un alcance de cerca de 300 estructuras. El éxito en el diagnóstico ha llevado a capacitar al personal y adoptar las técnicas de inspección de CFE.

En 2013 se desarrolla la versión más avanzada del monitor de precalentadores de aire con control de temperatura y seguimiento vía web, probado en la central Mérida II de CFE.

Recientemente, se ha desarrollado en colaboración con el INEGI el Mapa Nacional de Corrosión de Suelos (2013-2015), un sistema de información geográfico para las 9 regiones de CFE, consultable vía web, de la corrosividad de los suelos, que permite estimar la vida de materiales (acero, aluminio, cinc, cobre y aluminio).

Junto a los proyectos mencionados, el grupo se aboca a diversos servicios que incluyen en el diagnóstico de la corrosión de acueductos de suministro de agua de las ciudades de Querétaro y San Luis Potosí (2013-15), construidos por ICA de 100 km de longitud, para analizar interferencias y justificar el uso/omisión de protección catódica en ductos de concreto y acero. Asimismo, participa (2014-15) a solicitud de PEP asesorando al consorcio de empresas Marinsa, Petroquimia del Golfo y SIC, quienes llevan el control interior de corrosión de los principales ductos de la zona marina, para la interpretación de 130 simulaciones de corrosión de los ductos citados.

Algunos trabajos y proyectos del Grupo (Reporte Técnicos de Proyectos)

- *"Mapa Nacional de Corrosión de Suelos que Afecta la Infraestructura del Sector Eléctrico"*. IIE/04/15/14556/I 001-5/P/DC, 2013-15, Fernández D., Mena U., Malo, J.M., Rodríguez R.M.
- Sistema de Información Geográfico para la predicción de vida de cimentaciones de torres de líneas de transmisión consultable vía web

por las 9 Regiones de Transmisión para la Unidad de Ing Civil y Desarrollo, Comisión Federal de Electricidad.

- *"Desarrollo y Prueba de Métodos Alternativos de Inspección de la Integridad de Cimentaciones de Líneas de Transmisión"*. IIE/04/15/14301-14478/I001-4/P/DC, 2012-13, Fernández D., Malo J.M., Muñoz Ledo J.R.
- Desarrollo de métodos de eco-impacto y electroquímico extendido para cimentaciones de torres de líneas de transmisión. Pruebas en cerca de 300 estructuras distribuidas en el país para la Gerencia de Líneas de Transmisión, Subdirección de Transmisión, Comisión Federal de Electricidad.
- *"Integración y Prueba de un Sistema de Monitoreo de Corrosión en Línea para Precalentadores de Aire Regenerativos de Centrales Termoeléctricas"*, IIE/04/15/14310/I001-2/P/DC, 2012-2013, Malo J.M., Salinas V.
- Sistema de monitoreo de corrosión con control de temperatura instalado en Central Mérida 2 que permite medir la corrosión de los componentes de los precalentadores de aire, consultable en línea y tiempo real vía web, para la Gerencia de Ingeniería y Desarrollo, Subdirección de Generación, CFE.
- *"Evaluación de la corrosión interior del oleoducto clave 001 de 36" diam Akal-C/Dos Bocas Tabasco"*., IIE/04/15/13471.2009, Herrera J.R., Aguilar A., J. M. Malo.
- Diseño, fabricación, instalación y prueba de equipo de monitoreo de corrosión del Complejo Operativo Rebombeo en la Zona Marina de Pemex. Aborda el problema de corrosión interior de ductos de la zona marina a tierra por el creciente contenido de agua en crudos para la CTDA, MNE, GTDH, Pemex Exploración y Producción.

## **Instituto Mexicano del Petróleo**

**Integrantes del Grupo de Corrosión:** Mendoza Flores Juan, Romero Domínguez Juan Manuel

El Área de Corrosión del Instituto Mexicano del Petróleo (IMP) fue creada en el año de 1965, como respuesta a una necesidad tecnológica de Petróleos Mexicanos (PEMEX).

Es la primera área técnico – científica que en México se dedicó al estudio y control del fenómeno de la corrosión metálica, en instalaciones y equipos de la Industria Petrolera Nacional.

Los especialistas e investigadores que han formado parte de esta área del IMP, han realizado diferentes proyectos de investigación y servicios tecnológicos que han generado diversas contribuciones científico – tecnológicas en el ámbito de la ciencia en ingeniería de la corrosión, entre otras:

- Diseño y desarrollo de los primeros estudios electroquímicos en México, orientados al entendimiento y determinación del efecto corrosivo de diversas cepas bacterianas que se desarrollan en ambientes típicos de la Industria Petrolera Nacional.
- Determinación del efecto de condiciones hidrodinámicas (flujos turbulento y laminar) sobre la cinética electroquímica de la corrosión que sufre el acero de construcción de ductos, en medios que contienen bióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) disueltos.
- Determinación del efecto que las condiciones de flujo turbulento tienen, sobre los procesos electroquímicos que controlan el desempeño de inhibidores de corrosión formadores de película, usados en sistemas de transporte de hidrocarburos.

- Estudios de las características de los procesos electroquímicos que sufren aleaciones de magnesio, usadas como ánodos galvánicos en sistemas de protección catódica.
- Determinación del efecto corrosivo de soluciones de dietanol amina utilizada en procesos de endulzamiento de gas de la industria del petróleo.

### **Centro de Investigación en Corrosión - Universidad Autónoma de Campeche**

El Programa Interinstitucional de Investigación y Desarrollo Tecnológico sobre Corrosión en el Golfo de México surgió como una iniciativa de un grupo de investigadores dedicados al estudio de corrosión en México y como respuesta a la problemática del deterioro de la infraestructura en esta importante zona geoeconómica del país. Inició con la proyección de una red de colaboradores a nivel nacional e internacional, tomando como nodo central a la sede en la Universidad Autónoma de Campeche. En este esquema de trabajo. Se tuvieron logros notables, con la participación de entusiastas investigadores, con lo que se alcanzó una producción científica importante, reflejada el desarrollo de proyectos de investigación con financiamiento externo y amplia vinculación, la publicación de artículos en revistas especializadas y presencia en los foros de reconocido prestigio. Si bien este crecimiento fue relevante, no se tenía una colaboración suficiente al interior de la Universidad, por lo que se modificó el modo operativo para arraigar el naciente programa en su institución sede.

En 1996, contaba con 4 investigadores titulares y esporádicamente se recibían investigadores invitados que desarrollaban proyectos con la inclusión de una cantidad considerable de estudiantes, con lo que se mantuvo una producción científica y presencia en diversos foros.

Fue en 2000 que se concibió un esquema de trabajo diferente, pensado en amplia colaboración con las facultades de la Universidad, así como la superación y crecimiento de su planta académica. Se proyectó la adquisición del grado de Doctor de los académicos que contaban con el grado de Maestro y la contratación de nuevos investigadores con mayor trayectoria, que impulsaran el avance y la consolidación de los pertenecientes al programa. En este lapso, en reconocimiento a la labor de investigación se obtuvo el cambio de categoría a Centro de Investigación en Corrosión (CICORR). A su vez, se obtuvieron plazas para 2 investigadores con amplia experiencia y reconocimiento en las áreas de corrosión atmosférica y técnicas electroquímicas avanzadas, lo que reforzó considerablemente la maduración de la planta académica.

En 2010, se obtuvo una de las metas de mayor relevancia para el CICORR, consistente en el reconocimiento de la Maestría en Ciencias de la Preservación de Materiales en el Padrón Nacional de Posgrados de Calidad que otorga el CONACYT a programas de posgrado que cumplen con los requisitos de calidad establecidos. Actualmente se han registrado 5 generaciones, de las cuales se ha obtenido una eficiencia terminal satisfactoria, con la formación orientada a investigación de sus egresados, quienes desarrollan temas de tesis afines a los proyectos asociados al CICORR.

La planta académica está sustentada en 10 investigadores, todos con grado de Doctor. De ellos, 5 están reconocidos por el Sistema Nacional de Investigadores con Nivel II, el mayor número para una dependencia de la Universidad Autónoma de Campeche y 2 en Nivel I. Se agrupan en los Cuerpos Académicos "Ciencia e ingeniería ambiental aplicada al estudio de materiales de interés histórico y artístico: degradación y

conservación” y “Ciencia e Ingeniería de Corrosión”. Ambos están reconocidos por el Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP) como cuerpos académicos Consolidados. De igual manera, 9 de los investigadores cuentan con el reconocimiento de Perfil deseable, una clasificación a la calidad del trabajo universitario.

El CICORR cuenta con varios proyectos vigentes con financiamiento externo en los que la participación de estudiantes es una constante, algunos proyectos son colaboración bilateral y multilateral entre nuestra Máxima Casa de Estudios y otras instituciones nacionales e internacionales como es la Universidad de Antioquía de Medellín, Colombia, la Universidad de Sevilla, el Instituto de Recursos Naturales y Agrobiología de Sevilla, la Universidad Autónoma de Barcelona, la Universidad del Papaloapan, la Universidad Veracruzana, la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, entre otras. La actividad de los investigadores del CICORR ha permitido la consolidación de vinculación internacional de grupos de investigación de trayectoria reconocida en líneas afines de investigación. Como consecuencia de la presencia activa del CICORR en actividades científicas en el ámbito nacional e internacional los investigadores son invitados a participar como conferencistas plenarios, Organizadores, chairmans y editores de memorias en extenso de congresos internacionales.

## **Instituto de Ingeniería - Universidad Autónoma de Baja California**

**Integrantes del Grupo de Corrosión:** Valdez Benjamín, Schorr Michael, Zlatev Roumen, Carrillo Mónica, Stoytcheva Margarita, Radnev Nicola Ramos Rogelio, Curiel Mario.

El Departamento de Corrosión y Materiales de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC), fue fundado en 1996 e inicio como Laboratorio de Corrosión creado para dar continuidad a proyectos de estudios de corrosión y protección de infraestructura instalada en ambientes geotérmicos y acueductos, que desde 1986 se realizaban a través de trabajo en red con la participación del Instituto de Investigaciones eléctricas, la UABC, la Universidad Autónoma de Campeche y la Universidad Autónoma de Guadalajara. Actualmente el Departamento de Corrosión y Materiales es un Cuerpo Académico consolidado conformado por nueve investigadores. Además del Laboratorio de Corrosión, cuenta con Laboratorios de Electroquímica Aplicada, Semiconductores y Nanomateriales, Biomateriales, Instrumentación Digital y Materiales Avanzados. Las principales contribuciones del grupo son las siguientes:

- Formación de recursos humanos especializados a nivel de licenciatura y posgrado en el diagnóstico, prevención y control de la corrosión en la infraestructura industrial.
- Estudio de fenómenos de corrosión, biocorrosión y degradación de materiales en ambientes geotérmicos.
- Desarrollo de sistemas de protección contra la corrosión en infraestructura de acueductos y presas para el transporte y distribución de agua en el estado de Baja California.

- Diseño, modificación de superficies nano-estructuradas y estudio del comportamiento de corrosión de biomateriales metálicos utilizados como implantes en el cuerpo humano.
- Diseño y construcción de sensores y biosensores electroquímicos modificados con nanopartículas para uso en estudios y análisis en campo.
- Diseño y fabricación de instrumentación para la medición electroquímica de corrosión, así como el desarrollo e implementación de software especializado para evaluar el comportamiento de corrosión, simulación de procesos y análisis de imágenes de superficies afectadas por corrosión.
- Estudio de procesos de corrosión y degradación de materiales en plantas de producción de gas natural y regasificación de gas natural licuado.
- Síntesis verde de inhibidores de corrosión para ambientes ácidos y sistemas de potabilización de agua.
- Síntesis, desarrollo y evaluación de inhibidores de corrosión en fase vapor para la protección de infraestructura de la industria microelectrónica, militar y ambientes marinos.
- Diseño y evaluación de recubrimientos por conversión química en base a fosfatos y elementos de tierras raras, para uso en la industria aeroespacial.
- Estudio y caracterización de fenómenos de corrosión y desgaste en máquinas rotativas, mezcladores y turbinas en plantas de producción química.
- Publicación de libros dedicados a materiales y corrosión.

Durante veinte años hemos contribuido al desarrollo de la investigación de los fenómenos de corrosión en la industria nacional, contribuyendo con ello al desarrollo del país a través de la preservación de la

infraestructura del sector productivo. Así mismo hemos impulsado el trabajo colaborativo a través de redes nacionales e internacionales.

### **Centro de Investigación en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Ciicap - Universidad Autónoma Estado Morelos**

**Integrantes del Grupo:** Gonzalo González, Jorge Uruchurtu Ch.

En el grupo de "Síntesis y desarrollo de materiales avanzados" encabezado por el Dr. José Gonzalo González, se desarrolla en la actualidad relacionado con electroquímica investigación en diversas áreas. En la síntesis y desarrollo de inhibidores obtenidos de productos naturales para la corrosión en medios ácidos; en la síntesis y desarrollo de recubrimientos híbridos y compositos para protección contra la corrosión e medios neutros con cloruros y para la utilización con substratos metálicos de electrodos para celdas de combustibles, paneles solares y protección del patrimonio cultural. También se hace investigación en el área de corrosión en altas temperaturas y efectos en la corrosión asistida por esfuerzos mecánicos. Finalmente, se llevan a cabo estudios sobre aditivos en el concreto para mejorar las propiedades mecánicas del mismo así como proteger las varillas de refuerzo del concreto reforzado.

### **Instituto Ingeniería - Universidad Veracruzana**

**Integrantes del Grupo de Corrosión:** Galicia Aguilar, Gonzalo, Galván-Martínez, Ricardo, Orozco-Cruz, Ricardo, Ramírez-Reyes, José L. El 16 de agosto de 2005, siendo una prioridad para la Universidad Veracruzana la formación de cuadros de profesionistas con conocimientos en el ámbito de la corrosión así como el ofrecimiento de servicios a los sectores industriales en la zona del Golfo de México, se creo la Unidad AntiCorrosión, que en el quehacer académico acuño el

nombre de C.A. Ingeniería de Corrosión y Protección y liderando este proyecto el Dr. Enrique A. Martínez Martínez<sup>‡</sup>.

A partir de ese año, los académicos de este grupo impactan académicamente impartiendo cátedra en el tronco terminal del Programa Educativo de Ingeniería Química así como algunas experiencias educativas en el Programa de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales de la Facultad de Ingeniería en la zona Veracruz-Boca del Río.

El grupo presenta una diversidad de especialistas quienes cultivan líneas de investigación y generación de conocimiento relacionadas al área de corrosión. Dentro de las líneas más importantes identificadas en el grupo se encuentra el estudio mediante técnicas electroquímicas de los procesos de corrosión en estructuras de concreto expuestos en medios salinos, identificando el efecto del ion cloruro así como la carbonatación sobre el material de refuerzo con diferente acabado superficial. De la misma manera es identificado el estudio electroquímico de materiales alternativos para su uso como biomateriales así como una la identificación de la mejor alternativa de electrodeposición a través de métodos tradicionales y también mediante la utilización de campo magnético. Existen líneas muy identificadas en el área de corrosión como lo es el estudio electroquímico de aceros bajo carbono utilizados en la industria petrolera y que analizadas en condiciones estáticas o con flujo, utilizando inhibidores o bajo protección catódica. De la misma manera se desarrollan alternativas para la mitigación del fenómeno de corrosión mediante la utilización de extractos de plantas utilizadas como posibles inhibidores, así también se desarrollan alternativas de conservación para el Patrimonio Histórico metálico, a través de sustancias verdes. Es importante mencionar que se viene desarrollando

una serie de proyectos financiados con el objetivo de estudiar el efecto del cambio climático, a través de la variabilidad estacional, en la modificación de los parámetros fisicoquímicos del agua de mar y su relación con los procesos de corrosión de materiales inmersos en ese medio.

A partir del año 2010, teniendo la fortaleza del C.A. Ingeniería de Corrosión ya consolidado, este grupo es la parte medular para sentar las bases y la creación de la Maestría en Ingeniería de Corrosión, única en el País y con reconocimiento dentro del Programa Nacional de Posgrados de Calidad del CONACyT.

**Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica, CIIIA; Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica - Universidad Autónoma de Nuevo**

**Integrantes del Grupo de Corrosión:** Citlalli Gaona Tiburcio, Facundo Almeraya Calderón, José Ángel Cabral Miramontes, Francisco H. Estupiñán López, Patricia Zambrano R.

El grupo de Corrosión y Protección del CIIIA se formó a finales del año 2011, por los doctores Citlalli Gaona y Facundo Almeraya, y a través de su experiencia adquirida en CIMAV por más de 17 años, le dan continuidad a diversas líneas de investigación, para así crear en el 2012 el Cuerpo Académico "Deterioro e Integridad de Materiales Compuestos", que ha permitido la interacción con otros grupos de investigación en corrosión y electroquímica.

Se atienden tres líneas de investigación: 1.) Corrosión y protección de materiales metálicos, abordando tópicos de corrosión electroquímica, donde se han desarrollado estudios enfocados a corrosión en estructuras de concreto reforzado, y que han permitido evaluar y monitorear

estructuras de concreto reforzado como puentes, chimeneas y muelles del API, entre otras; encontrando que los deterioros en el sistema acero concreto definen problemáticas como carbonatación, cloruros, sulfatos, etc. También se estudian los mecanismos de corrosión de materiales aeronáuticos empleando técnicas electroquímicas como ruido electroquímico, impedancia electroquímica y curvas de polarización cíclica, entre otras; y se estudian los diferentes sistemas de protección contra la corrosión, como protección catódica y recubrimientos en alta y baja temperatura. En la línea 2.) Diseño y selección de materiales compuestos; se han venido estudiando aceros inoxidable, aleaciones de Aluminio, Titanio y superaleaciones, las cuales son sometidas al mecanismo de agrietamiento por corrosión y esfuerzo, valorando su comportamiento en la maquina CERT (Constant Extension Rate Test), caracterizando por microscopia electrónica la morfología del daño, y a través de técnicas electroquímicas, su desempeño y resistencia a SCC (Stress Corrosion Cracking). Y en la línea de investigación 3.) Deterioro de materiales en alta temperatura, se está estudiando la cinética en oxidación y sulfidación de superaleaciones que son empleadas en turbinas de aviones y diferentes componentes aeronáuticos.

El grupo de corrosión ha hecho diversas aportaciones en la generación de conocimiento, realizando publicaciones en revistas indexadas, capítulos de libros, patentes, proyectos y servicios con la industria nacional (automotriz, mecánica, química, civil, aeronáutica, siderúrgica, etc). Y en el 2014 el grupo empezó a colaborar con la Red de Aeronáutica "GIRE", de Conacyt, dentro de la cual se han establecido convenios de colaboración con otras instituciones para el desarrollo de proyectos y la formación de recursos humanos.

El líder de este grupo es el Dr. Facundo Almeraya Calderón, quien es profesor – Investigador titular A y Exclusivo en el CIIIA (Centro de Inv. e Innov. en Ing. Aeronáutica) de la FIME en la UANL, y es nivel II del SNI. Actualmente funge como Presidente de la Sociedad Mexicana de Electroquímica (SMEQ) de 2013 a 2015, siendo su vicepresidente de 2011 a 2013; es Presidente Honorario de Alconpat México y de 2006 a 2008 fue su Presidente. En el CIIIA es el Responsable del Laboratorio de Corrosión y Protección, y líder del cuerpo académico UANL-CA-316 “Deterioro e Integridad de Materiales Compuestos”.

Este grupo está conformado por tres investigadores con doctorado en Ciencia de Materiales: Dra. Citlalli Gaona Tiburcio, Metalurgista, con 22 años de experiencia en docencia e investigación, y cuyas áreas de especialidad son técnicas electroquímicas, SCC y corrosión en estructuras de concreto reforzado; Dr. José A. Cabral Miramontes, Ing. en Ciencia de Materiales y actual tesorero de la SMEQ (2013-2015), cuyo trabajo se enfoca a recubrimientos en alta temperatura aplicados por plasma y HVOF; y el Dr. Francisco Estupiñan López, Ingeniero Industrial, quien se desempeña en el uso y aplicación de técnicas electroquímicas AC y DC, y cuenta con certificación nivel 1 en Recubrimientos por parte de la NACE.

**Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM y Universidad Iberoamericana, UIA.**

**Integrantes del Grupo de Corrosión:** J. Avila, A. Barba, A. Covelo, J. Genesca, M.A. Hernández, F.J. Rodríguez, C. Rodríguez, V. Torres, R.C. Vásquez

El Laboratorio de Corrosión, LabCorr, de la Facultad de Química, FQ, inicia labores con la construcción del nuevo edificio D de la FQ, 1980 – 1982 y la incorporación al mismo de Javier Avila y Juan Genescá. Sus

objetivos eran y siguen siendo muy claros, formación de recursos humanos al más alto nivel. En 30 años se han formado 50 maestros y 23 doctores en el mismo. Los inicios fueron en el área de corrosión atmosférica, gracias a la colaboración con Sebastián Feliu y Manuel Morcillo del CENIM-CSIC. Entre otros es destacable la participación en el proyecto mapa Iberoamericano de Corrosión Atmosférica, MICAT ("*Corrosividad atmosférica. (MICAT-México)*". Plaza y Valdés, México D.F. 1999). Simultáneamente LabCorr llevo a cabo una extensa labor de difusión de los problemas y causas de la corrosión que quedó plasmada en la serie de libros *Mas allá de la herrumbre*, editados por el Fondo de Cultura Económica.

Paralelamente se empezó a trabajar en el área de corrosión de armaduras metálicas en concreto (*Corrosion* 52 (8) 609 (1996), en colaboración con el CIEA-IPN, Unidad Mérida (*Cement and Concrete Research* 30 (10) 1565 (2000)) y el Instituto Mexicano del Transporte (*Journal of Constructional Steel Research* 64, 1317 (2008)), así como en la de protección catódica (*Journal of Materials Engineering and Performance* 6, 449 (1997), en colaboración con PEMEX-PEP (*Materials Performance* 50 (9) 34 (2011)) con especial énfasis en el desarrollo de nuevos ánodos galvánicos de aluminio (*Journal of Applied Electrochemistry* 32 (8) 897 (2002)), así como el modelado matemático de la misma (*Corrosion Science* 53 (5) 1806 - 1812 (2011)). Más recientemente y en colaboración con el IMP se ha desarrollado investigación en el estudio del efecto de las condiciones hidrodinámicas en la corrosión por CO<sub>2</sub> y/o H<sub>2</sub>S y la evaluación de inhibidores (*Journal of Electroanalytical Chemistry* 566, 111 (2004), *Materials and Corrosion* 58 (7) 514 (2007), *Journal of Applied Electrochemistry* 39 (10) 1809 - 1819 (2009).

Con la incorporación de Francisco J. Rodríguez en 1994 se inicia formalmente la investigación en el área de recubrimientos y tratamientos de superficies. En el área de recubrimientos anticorrosivos se aplicaron técnicas electroquímicas para obtener velocidades de corrosión de los sustratos (*Progress in Organic Coatings* 42 (3-4) 218 (2001)), se realizaron análisis de nuevos recubrimientos (*Journal of Solid State Electrochemistry* 13 (11) 1785 (2009)), pigmentos inhibidores de nueva generación, y sobre todo, tratamientos químicos de conversión libres de metales pesados (*Surface and Coatings Technology* 201 (8) 4666 (2007)).

De creación más reciente, el Centro de Ingeniería de Superficies y Acabados (CENISA) de la Facultad de Ingeniería ha logrado y consolidado en los últimos años el Laboratorio de Procesamiento de Recubrimientos Sol-Gel. Este tipo de desarrollo ha permitido generar recubrimientos de espesor micrométricos (1 – 3  $\mu\text{m}$ ) depositados tanto en aleaciones ferrosas como en no ferrosas. En esta segunda categoría, se ha logrado mejorar la resistencia a la corrosión de la aleación AA2024-T3 a largos tiempo de inmersión en medio salino cuando el recubrimiento sol-gel se dopa con inhibidores, grafeno en conjunto con arcillas naturales. Así mismo, este laboratorio de sol-gel está generando la incorporación de diversos entramados nanotecnológicos (nanofibras) mediante la técnica de electrohilado para construir redes tridimensionales con geometrías definidas y orientadas no sólo para el área de electroquímica – corrosión, sino también en el área químico-biológica. (*Corrosion* 70 (8) 828 – 841 (2014)).

La investigación en corrosión en la Universidad Iberoamericana, UIA, se incluye el trabajo desarrollado por el grupo dirigido por el Dr. Rubén C. Vásquez del Dpto. de Ingeniería Química, muy vinculado a LabCorr

donde desarrolló su formación docente e investigadora. Su trabajo ha abordado desde métodos de ensayo para determinar la eficiencia electroquímica de ánodos de sacrificio, el diseño y construcción de equipos de transferencia de calor de soluciones electrolíticas de la industria de producción de cátodos de cobre, estudios de corrosión en crudos de petróleo usando técnicas electroquímicas de corriente directa, alterna y ruido electroquímico (*Afinidad 60 (504) 136 - 143 (2003)*), hasta estudios electroquímicos (corriente directa, alterna y ruido) sobre la corrosión e ingeniería de protección contra la corrosión en equipos del proceso de endulzamiento de gas.

### **Agradecimiento.**

Un especial agradecimiento a los que han colaborado y hecho realidad este Capítulo y una cordial felicitación a todos los miembros de la SMEQ por este aniversario.

# ***Conversión y Almacenamiento de Energía (CAE)***

---

Coordinador: **Dr. Omar Solorza Feria<sup>1</sup>**

## Colaboradores

Luis G. Arriaga Hurtado<sup>2</sup>, Abraham Ulises Chávez Ramírez<sup>2</sup>,  
Janet Ledesma García<sup>3</sup>, Minerva Guerra Balcázar<sup>3</sup>, Ulises Cano<sup>4</sup>, Félix Loyola<sup>4</sup>,  
J.R.Flores<sup>4</sup>, I.L.Albarrán<sup>4</sup>, T.Romero<sup>4</sup>, M.López<sup>4</sup>, J.De La Cruz<sup>4</sup>, J.Avilés<sup>4</sup>.

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Nacional - IPN  
Depto. Química, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados  
Av. 2508, Zacatenco. 07360 DF.

<sup>2</sup>Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica  
Parque Tecnológico Querétaro Sanfandila, C.P. 76703, Querétaro, México.

<sup>3</sup> Universidad Autónoma de Querétaro  
División de investigación y Posgrado, Facultad de Ingeniería, Cerro de las Campanas  
S/N, C.P. 76010, Querétaro, México.

<sup>4</sup> Instituto de Investigaciones Eléctricas  
Grupo de Conversión de Energía vía Electroquímica.

## **Resumen**

En este capítulo se describe en forma resumida, las contribuciones recientes en torno a las propiedades de los materiales utilizados en la conversión y almacenamiento de energía. Se presentan aportaciones relevantes de las propiedades electrocatalíticas y sistemas electroquímicos de conversión y almacenamiento de energía de los grupos de investigación autores del capítulo.

## **Introducción.**

Uno de los retos más importantes en los que se enfrenta la humanidad en este siglo XXI, es el aprovechamiento de las energías renovables, su generación, almacenamiento y aplicaciones, con el fin de remplazar la dependencia en los combustibles fósiles y la economía que gira en torno a estos combustibles. Los resultados de las contribuciones teóricas y experimentales realizadas en investigación, así como del desarrollo e innovación de proyectos demostrativos electroquímicos, poseen a las baterías, celdas de combustible y a los capacitores electroquímicos o supercapacitores como sistemas prometedores para la conversión y almacenamiento de energía electroquímica [1-5]. En las baterías y celdas de combustible la energía eléctrica es generada por conversión de energía química a través de reacciones redox en el ánodo y cátodo. En los supercapacitores la energía eléctrica es liberada por la carga y descarga de la doble capa eléctrica, como ocurre con los materiales base grafeno [6] y por reacciones farádicas rápidas como en los pseudocapacitores [7]. Existen numerosos grupos de investigación que han desarrollado trabajos relevantes en torno a la tecnología del hidrógeno y celdas de combustible, por considerarlas como estrategias emergente y darlas a conocer como tecnologías prometedoras en la generación de energía limpia y sustentable, con alta densidad de

energía y alta eficiencia. Entre estas fuentes generadoras de energía se encuentran las celdas de combustible poliméricas a hidrógeno (PEMFC), las alimentadas con alcoholes y en medio alcalino (DAFC), las que generan energía al ser alimentadas con ácido fórmico (DFAFC), etc... todas manejadas como dispositivos electroquímicos que transforman la energía química de un combustible en energía eléctrica en la interfaz electrodo-electrolito [5,8]. Las reacciones principales que se llevan a cabo en una celda de combustible son la oxidación del combustible en el lado anódico y la reducción del oxígeno del aire en la parte catódica, siendo el Pt y sus aleaciones los materiales nanoestructurados las que presentan mayor actividad específica y másica. Sin embargo, debido al alto costo y escases del Pt, aunado al auto-envenenamiento de estos catalizadores por el CO de la oxidación de las moléculas orgánicas y el entrecruzamiento de estas especies a la parte catódica, con la correspondiente disminución del desempeño de la reacción de reducción de oxígeno, la aplicación del Pt ha sido restringida. Con el fin de disminuir los costos de los electrocatalizadores, aumentar el desempeño de estos y obtener estabilidad a largo plazo, se realizan esfuerzos para diseñar nuevas estructuras catalíticas con el menor contenido de Pt o sin este metal. Es en la superficie del material catalítico donde las reacciones electroquímicas se llevan a cabo y es sabido que el desempeño de un electrocatalizador depende de la forma y tamaño de las partículas, la estructura y composición de la superficie y los enlaces que forman, así como de las interacciones con el material soporte y la evolución de estos parámetros durante el funcionamiento de una celda de combustible, que representan la parte medular de los efectos electrónicos y geométricos, responsables del buen desempeño de un electrocatalizador, de su estabilidad y durabilidad. Se ha reportado que las aleaciones base-Pt han visto ampliamente mejorado su desempeño y tolerancia al CO debido al denominado mecanismo bifuncional y/o efecto

ligante. Cuando los materiales electrocatalíticos son utilizados en celdas generadoras de energía, estos son generalmente soportados o dispersos en un medio conductor. El material soporte debe cumplir con algunos requerimientos como son una gran área superficial para la dispersión del catalizador, una alta conductividad eléctrica y estabilidad electroquímica en el medio de reacción. Los materiales nanocatalizadores (2-5 nm) son actualmente soportados en diferentes tipos de carbones, óxidos metálicos y grafenos impurificados o funcionalizados [9]. Un electrocatalizador por definición debe ser un material química y estructuralmente no modificable, sin embargo los procesos catalíticos son dinámicos y modifican la estructura original y química del catalizador y esta por ligera que sea puede alterar su comportamiento variando su actividad y selectividad [10]. Las estructuras electrónicas, químicas y cristalográficas están relacionadas entre si con la actividad catalítica, la alta selectividad y estabilidad que son alcanzadas determinando en forma apropiada el tamaño crítico, la forma, la composición y el soporte o medio de dispersión del catalizador.

### **Nanocatalizadores para la reacción catódica en prototipos con celdas de combustible poliméricas**

Desde 1992, el grupo de energética electroquímica del CINVESTAV ha realizado trabajos de investigación en la síntesis y caracterización de materiales nano-catalizadores producidos por diferentes métodos y usados como electrodos en electrolizadores y celdas de combustible poliméricas, alimentadas con hidrógeno y oxígeno. Se han realizado contribuciones en la formación de recursos humanos en electrocatálisis y celdas de combustible, con trabajos de investigación que cubren desde la síntesis de los materiales catalíticos hasta el diseño y construcción de pequeños prototipos de celdas de combustible poliméricas [11-15]. En los últimos años también se han diseñado y construido prototipos de

baja potencia con celdas de combustible conteniendo catalizadores con Ru, Fe, Pd, Ag, Ni, y con bajo contenido de Pt. Además, se han construido prototipos demostrativos solar-hidrógeno integrando un panel solar a un electrolizador y éste a una celda de combustible polimérica, para hacer funcionar un motor eléctrico. La propuesta de investigación está encaminada a unir esfuerzos para producir una propia tecnología debido a que se adquieren del exterior partes y componentes para la construcción de los prototipos. Se cuenta con un diseño industrial (IMPI- folio 38278) y dos patentes otorgadas (IMPI- folio 19972 y folio 29940) que han sido la base para el diseño y construcción de un transporte monoplaza híbrido. El prototipo de transporte híbrido es la integración de diferentes componentes que incluyen un recipiente con hidrógeno, una celda de combustible, baterías recargables Pb/ácido y una electrónica de potencia que permite el control de equipos periféricos que alimentan  $H_2$  y  $O_2$  a las celdas de combustible, y que elevan y regulan el voltaje y corriente de salida de las celdas para ser suministradas a los motores eléctricos y para la recarga de las baterías. Las celdas de combustible están constituidas por platos colectores de corriente de carbón de alta densidad los cuales son maquinados con diferentes trayectorias para permitir el mayor tiempo de residencia del  $H_2$  que será oxidado y un flujo paralelo de  $O_2$ , que además de ser reducido para formar parte de la reacción global, permite el enfriamiento de la misma celda. Entre platos colectores de corriente existen los ensambles membrana-electrodo que son el corazón de las celdas y están constituidos por una membrana polimérica de conducción protónica y materiales nanocatalizadores en el lado anódico y catódico del ensamble. El material catalizador más utilizado en las celdas poliméricas es el Pt y sus aleaciones y la membrana es la comercial de Nafion. Los resultados cinéticos de actividad específica y en masa que se han obtenido en el grupo de investigación se encuentran ya reportados

en las referencias arriba mencionados y la investigación esta enfocado a sintetizar y caracterizar nanomateriales core-shell con bajo contenido de Pt, comparando los resultados cinéticos con lo reportado por el DOE como expectativa y que se presenta en la Tabla 1. Los resultados reportados en actividad específica y másica en Co@Pt y Ni@Pt se encuentran en concordancia con los objetivos establecido en la Tabla 1. El prototipo eléctrico híbrido diseñado y construido con celdas de celdas de combustible polimérica alimentados con hidrógeno y oxígeno se muestra en la figura 1.

**Tabla 1.** Objetivos esperados en celdas de combustible PEM según el DOE [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/fuel\\_cells.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/03/f12/fuel_cells.pdf)

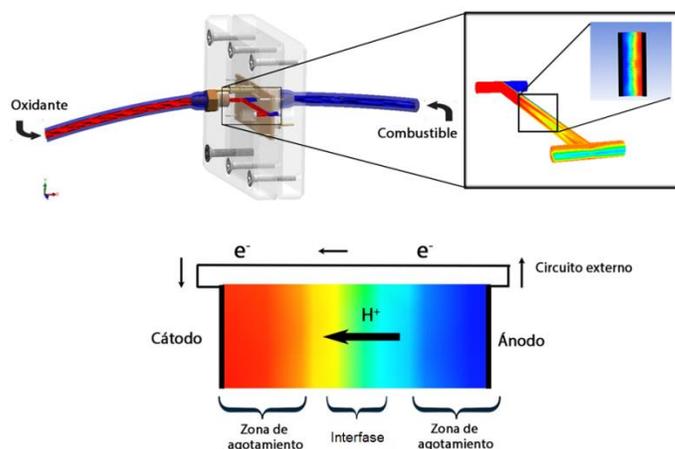
Característica	Unidades	2011	2013 - 2014 (Estado actual)	Expectativas DOE	
				2017	2020
<b>Carga Total PGM (Platinum Group Metal)</b>	$\text{mg}_{\text{PGM}}/\text{cm}^2$	0.15	0.15	0.125	0.125
<b>Actividad específica</b>	$\text{mA}/\text{cm}^2_{\text{PGM}} @ 0.9\text{V}$	0.72	1.0	>1.0	>1.0
<b>Actividad en masa</b>	$\text{A}/\text{mg}_{\text{PGM}} @ 0.9\text{V}$	0.24	0.47-0.67	0.44	0.44
<b>Pérdida de la actividad catalítica en masa</b>	%	<40	<40	<10	<10
<b>Durabilidad hasta pérdida en masa &gt;20%</b>	horas	5,000	10,000	15,000	20,000



**Figura 1.** Transporte eléctrico híbrido con tecnología de celdas de combustible.

## Microceldas de combustible microfluídicas como fuente alternativa de conversión de energía

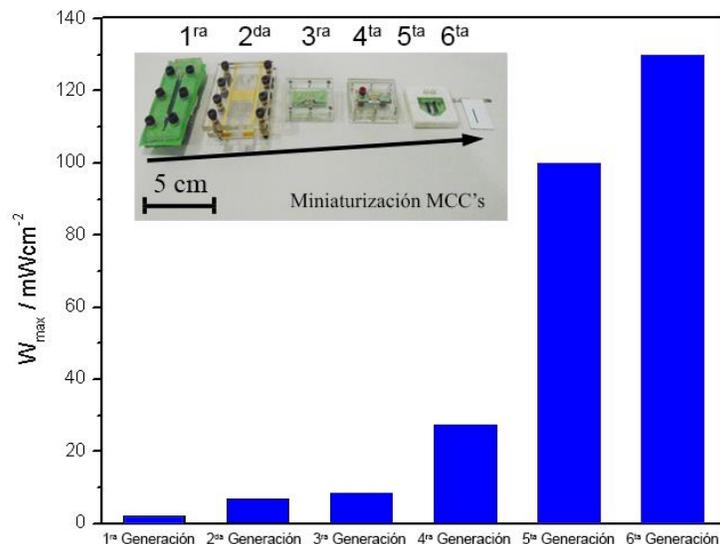
Una nueva generación de celdas de combustible están constituidas por las microceldas de combustible de flujo laminar (MCC) las cuales son alimentadas por combustibles y oxidantes líquidos bajo un régimen de flujo laminar que permite el funcionamiento sin la necesidad de una barrera física de separación entre electrodos, lo que implica el uso de menos componentes que las celdas de combustible convencionales, un modo de operación simple y una reducción significativa en los eventos de mantenimiento (Figura 2).



**Figura 2.** Esquema de funcionamiento de una MCC.

El grupo de Sistemas Electroquímicos de Energía (seqe.mx) del Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica S.C. (cideteq.mx) y la Universidad Autónoma de Querétaro (ingenieria.uaq.mx) han trabajado en el desarrollo de este tipo de dispositivos de conversión de energía que operan con diversos combustibles tales como el glicerol, etilenglicol, ácido fórmico, glucosa, etanol y metanol [16-18]. Más de seis generaciones de MCC se han

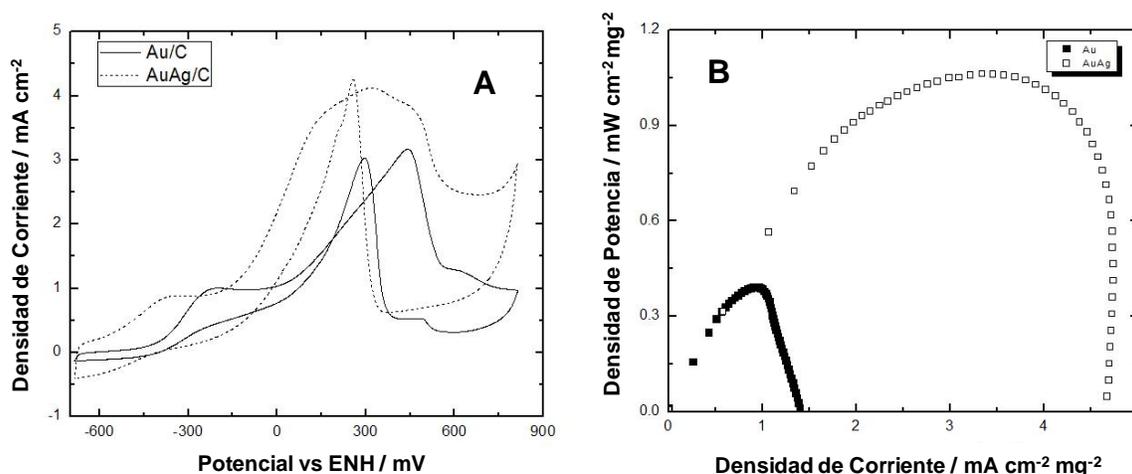
desarrollado en el grupo en los últimos años comenzando con dimensiones de canal de 1000  $\mu\text{m}$ , hasta las últimas generaciones donde el líquido fluye por cavidades en un intervalo de 70-90 nm [19] (Figura 3).



**Figura 3.** Relación de desempeño vs miniaturización de la MCC.

En cada generación se han optimizado los diseños, las técnicas de fabricación incorporando herramientas computacionales para el modelado y construcción con equipos fotolitografía y sistemas de control numérico de alta resolución, los componentes de ensamble e interconexión electrónica; así como el desarrollo de materiales electrocatalíticos anódicos y catódicos de naturaleza inorgánica y enzimática. En este contexto, destacan los materiales bimetálicos tipo core-shell (núcleo-coraza) usados como ánodos y cátodos para la oxidación de diversos combustibles y la reducción de oxígeno respectivamente. Por ejemplo el AuAg/C fue empleado en la reacción de oxidación de glucosa en medio básico [16], incrementando la actividad electrocatalítica en términos del potencial de oxidación de la glucosa que resultó en un desplazamiento de aproximadamente 150 mV (hacia

valores más negativos) comparado con el potencial de oxidación de glucosa sobre Au/C y la posibilidad de utilizar menos cantidad de metal noble, ya que al normalizar la potencia de la celda obtenida por la masa de oro usada en el catalizador se obtiene una densidad de potencia máxima aproximadamente del doble que aquella obtenida con un catalizador basado en Au/C (Figura 4).

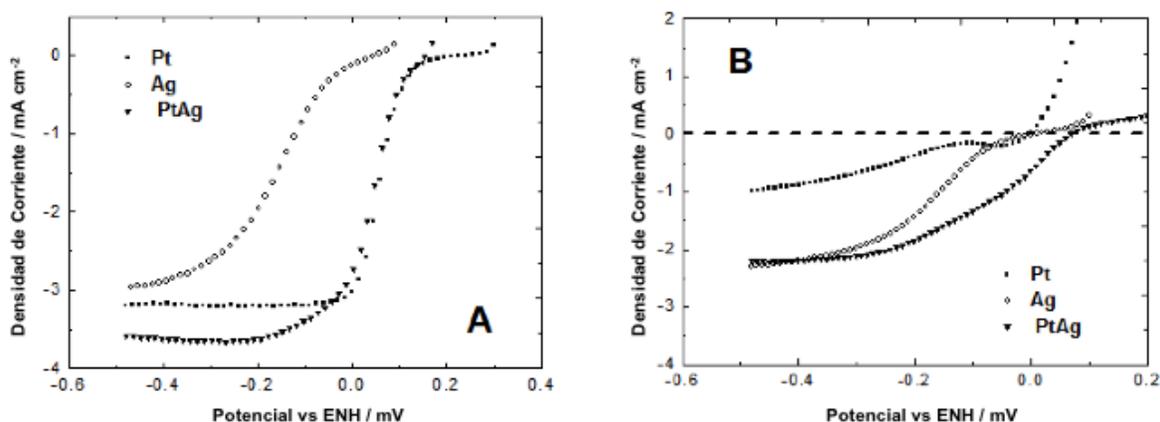


**Figura 4.** A) Voltamperogramas cíclicos de la reacción de oxidación de glucosa sobre Au/C y AuAg/C en 0.01 M de glucosa + KOH 0.3 M a 20 mV s<sup>-1</sup>. B) Comparación de las curvas de potencia normalizadas por la cantidad de oro en los ánodos Au/C y AuAg/C [17].

Materiales catódicos desarrollados en el grupo basados en PtAg/C empleados para la reacción de reducción de oxígeno (RRO) mostraron una alta tolerancia a la presencia de glucosa lo que permitió disminuir el efecto de crossover (flujo del combustible del compartimento anódico al catódico) en la MCC e incluso emplear un solo flujo para su funcionamiento. En la Figura 5 se muestran las curvas de polarización para la RRO sobre PtAg/C comparado con Pt/C comercial y Ag/C en ausencia y presencia de glucosa. Puede observarse que la densidad de

corriente asociada a la RRO sobre PtAg/C permanece constante en presencia de glucosa sin sufrir envenenamiento comparado con el Pt/C comercial [20].

Recientemente en el grupo se desarrolló una celda de combustible nanofluídica que emplea electrodos nanoporosos y que opera con varios combustibles individuales o mezclados (metanol, etanol, glicerol y etilenglicol) en medio alcalino. El éxito del dispositivo se debe al uso de un eficiente electrocatalizador basado Cu@Pd/C tipo núcleo-coraza que permitió obtener las mayores densidades de potencia reportadas, abriendo la posibilidad de desarrollar nano-dispositivos de potencia para múltiples aplicaciones y donde el combustible empleado no represente una limitante para su uso [16].



**Figura 5.** Curvas de polarización de la reacción de reducción de oxígeno obtenidas en A) KOH 0.3 M y B) glucosa 30 mM + KOH 0.3 M saturadas con oxígeno [20].

La actual tendencia es desarrollar dispositivos que cumplan con tres propiedades, la generación de energía, el medio de almacenamiento y la interfaz electrónica para aplicación específica. Estas tres funciones integradas en un solo dispositivo con dimensiones micro/nanométricas colocan la tecnología en la categoría de dispositivos Lab On Chip (LOC),

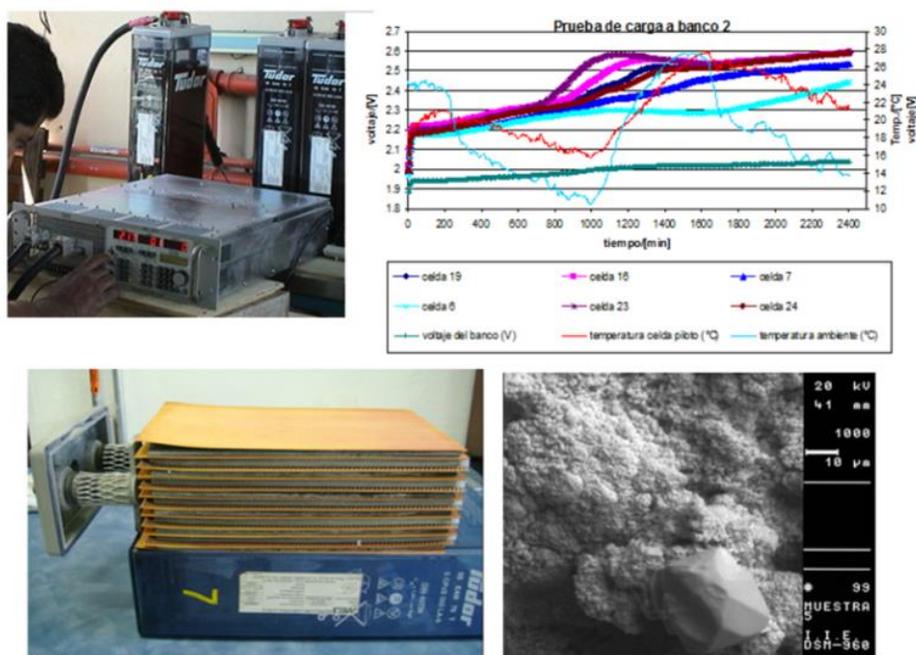
los cuales escalan funciones y procesos de sistemas a un microchip. El desarrollo de este tipo de dispositivos implica una tarea multidisciplinaria en electroquímica, nanotecnología, electrónica, físico-matemática, mecánica, informática, biotecnología, biomedicina e ingeniería ambiental.

### **Conversión de Energía vía Electroquímica en el IIE.**

El IIE tiene como actividad sustancial el impulsar tecnologías avanzadas, limpias y eficientes en el sector energético nacional. Al no ser una institución académica, su principal orientación es la investigación aplicada y por supuesto el desarrollo tecnológico. En ese sentido, en el IIE las actividades relacionadas con la Electroquímica son principalmente aquellas que están directamente asociadas a dispositivos de aplicación práctica, i.e. evaluación y desarrollo. Esto incluye baterías, electrolizadores y celdas de combustible poliméricas.

**Baterías.** La aplicación de la Electroquímica en el estudio de baterías ha incluido pruebas estándares para la determinación del estado operativo de sistemas NiHM. El interés surgió debido a que sistemas de esta tecnología fueron utilizados para transporte eléctrico llegando a una vida útil, cuyo estado final podría ser aún aprovechado en otras aplicaciones como el almacenamiento en sistemas fotovoltaicos. Las pruebas típicas consisten en ciclos de carga-descarga a tasas especificadas acorde con la tecnología. Al final de estas pruebas, los ciclos definen el estado operativo del sistema, particularmente estado de carga y con ello su reaprovechamiento. En el caso de sistemas Pb-ácido, técnicas electroquímicas empleadas por el IIE han incluido ruido electroquímico para el seguimiento de la formación de los electrodos, lo que permite dar un diagnóstico de la correcta formación estructural de la batería. Por otra parte, también se ha empleado la técnica de Espectroscopía de

Impedancia Electroquímica (EIS), para diferenciar baterías en mal estado de baterías correctamente manufacturadas su fabricación. Esta técnica fue desarrollada para una empresa mexicana fabricante de acumuladores automotrices, con el propósito de substituir las pruebas estándar de ciclos de carga-descarga, cuyas características las hacen costosas y tardadas, debido al espacio, tiempos e infraestructura para dichas pruebas.



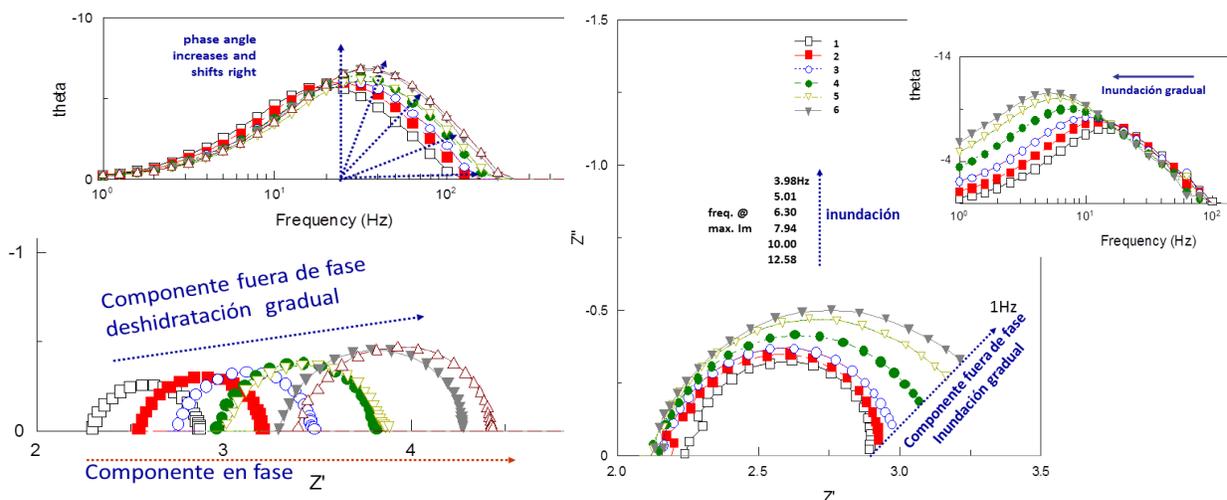
**Figura 6.** Pruebas de carga/descarga en baterías Pb-ácido y estudios postmortem (corrosión en placas, integridad de separadores y aparición de cristales de sulfato de plomo). Proyecto para estimar estado de salud de un banco de 110V c.d.

**Celdas De Combustible PEM.** El IIE ha aplicado diversas técnicas electroquímicas para el desarrollo de tecnología de Celdas de Combustible poliméricas. Dichas técnicas incluyen voltametrías cíclicas para determinar el área electroquímicamente activa en los electrodos

catódicos, responsables de la reacción de reducción de oxígeno, reacción limitante del dispositivo generador de electricidad. Curvas de polarización lineal son empleadas para determinar posibles cortos, pero sobre todo el comportamiento voltaje-corriente de celdas simples ó conjuntos de celdas de combustible cuando se les alimenta un combustible y un oxidante bajo condiciones específicas de operación. Aunque estas pruebas son de estado estacionario, son la base para determinar el desempeño de la tecnología desarrollada y retroalimentan el diseño posible de una planta de potencia. Adicionalmente se emplea la EIS durante los protocolos de prueba de las celdas desarrolladas en el IIE. Esta técnica permite tener un seguimiento del estado de hidratación al interior de la celda, debido a que el electrolito sólido debe estar hidratado para una conducción iónica máxima. No son sólo los componentes óhmicos los extraídos de esta medición, también son aprovechados los componentes fuera de fase ya que asisten en diagnosticar los procesos de inundación que limitan procesos de transporte de masa tanto de reactivos como de productos, lo cual disminuye el desempeño.

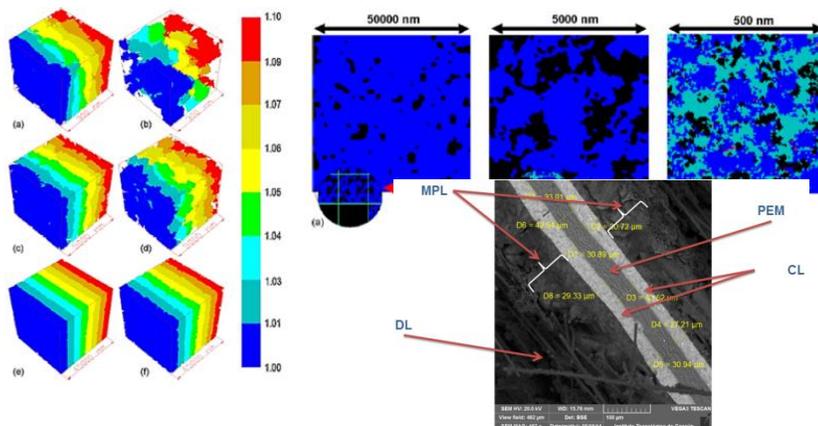
Durante el desarrollo de tecnología de celdas PEM el IIE realiza estudios paralelos para mejorar el entendimiento de aquellos procesos electroquímicos asociados a su diseño, a las características de componentes como conductores electrónicos y iónicos, así como a aquellos de carácter catalítico. Voltametrías lineales son empleadas para detectar el cruce de hidrógeno al lado catódico a través de la membrana, la cual además de su permeabilidad natural debido a su muy bajo espesor (25 a 50  $\mu\text{m}$ ), podría presentar daños a lo largo del proceso de preparación. La relevancia de la estructura a nivel capa catalítica determina el desempeño real de una celda de combustible. Es en esta capa donde ocurren procesos de transferencia de masa, carga,

calor, lugar de reacciones electroquímicas y por supuesto generación de electricidad.



**Figura 7.** Desarrollo de técnica de diagnóstico de inundación/deshidratación en celdas de combustible PEM mediante EIS. Elementos en fase se desplazan hacia mayores valores (izquierda) durante deshidratación (no se afectan en inundación). Elementos fuera de fase en bajas frecuencias se desplazan hacia mayores valores durante inundación (i.e. mayores ángulos de fase).

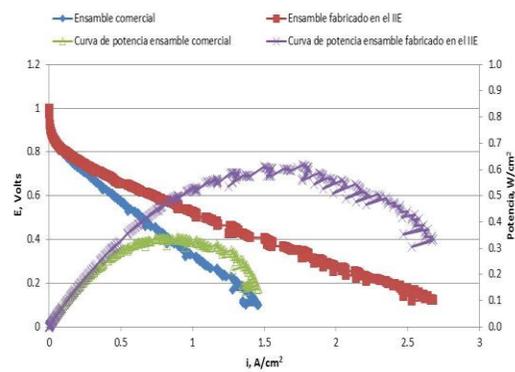
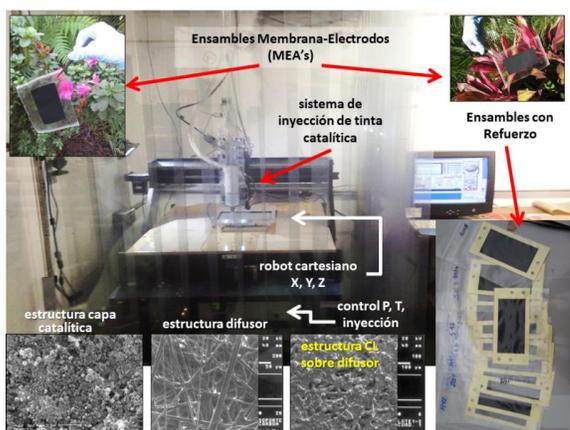
Técnicas electroquímicas e ingeniería y estudios teóricos (modelado y simulación), han sido también realizados para el estudio y desarrollo de estos dispositivos (ver Fig.8). Así, el conocimiento adquirido es vertido en los procesos de manufactura automatizada del IIE (Fig. 9) de ensambles membrana-electrodos (MEA's), i.e. el corazón de la tecnología de celdas de combustible PEM.



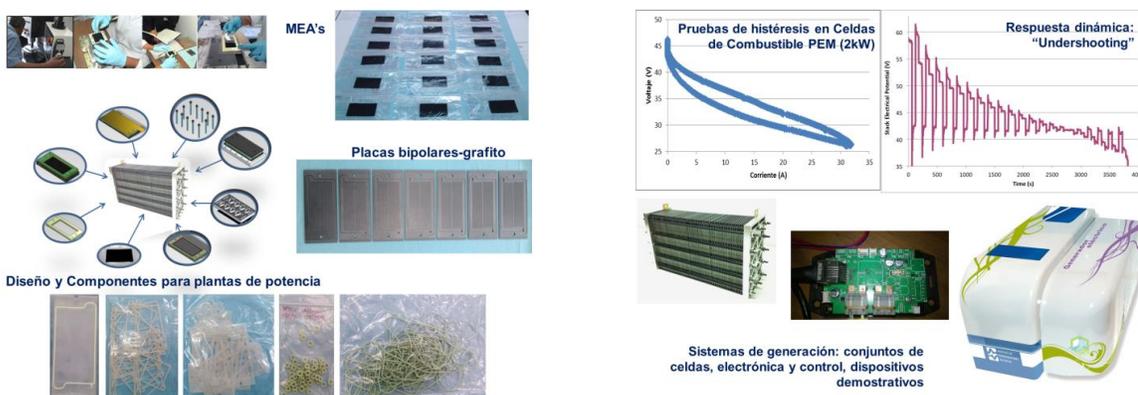
**Figura 8.** Reconstrucción de estructuras de CL's a distintas escalas (arriba en azul) y simulación de su efecto estructural y composicional en la distribución de potencial.

Aunque podrían considerarse como pruebas eléctricas, el uso de barridos de voltaje o corriente en demanda, así como demandas súbitas o transitorias a un generador como las celdas de combustible, son técnicas que ponen a prueba los procesos electroquímicos de la tecnología, bajo condiciones dinámicas. Estas pruebas incluyen la aplicación de escalones, barridos lineales y pulsos ya sea de voltaje o corriente, midiendo la respuesta de la celda de combustible. Dichas técnicas ponen a prueba todos los procesos al interior de la celda, así como a la ingeniería vertida en el diseño y en el control de la operación de la celda.

La electroquímica tiene como último fin, el impactar de manera práctica a nuestra sociedad y una forma de hacerlo es en el desarrollo de dispositivos o plantas de potencia, que puedan integrarse en aplicaciones prácticas.



**Figura 9.** Sistema automatizado de depósito de tintas catalíticas (hasta 400cm<sup>2</sup>), desempeño y comparación vs MEA comercial

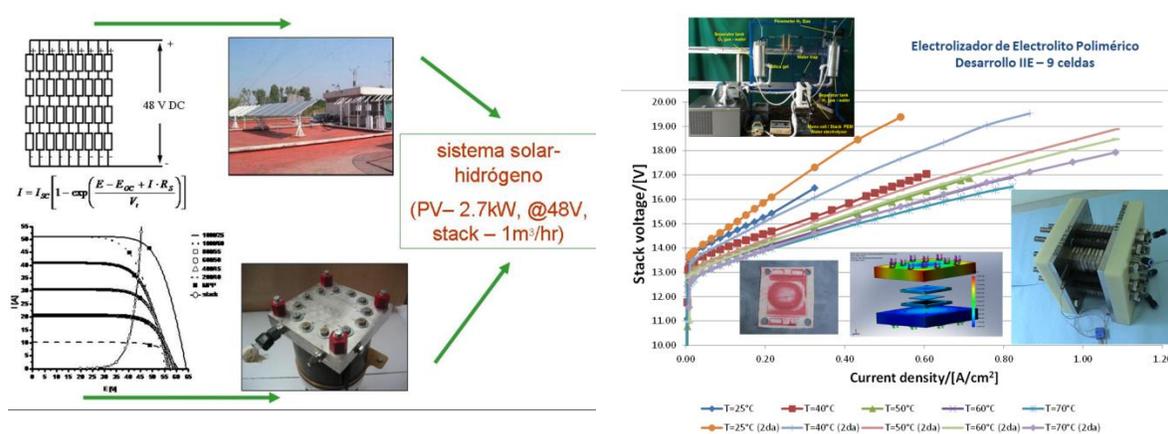


**Figura10.** Desarrollo del Core-Technology de Celdas de Combustible en el IIE – Ensamblados Membrana-Electrodos y de Sistemas reales de generación, incluyendo balance de planta (BOP) y respuesta dinámica (histéresis y “undershooting”).

Como cualquier reactor electroquímico, las celdas incluyen diseños que buscan facilitar los procesos de transporte de masa, así como la máxima conducción eléctrica y iónica, además de una propicia estructura tridimensionalmente porosa en 3 dimensiones de las capas catalíticas a fin de promover el máximo de corriente eléctrica a un determinado

voltaje. Las características de los sistemas electroquímicos y sus limitantes deben ser previstos durante el desarrollo de tecnologías como las celdas.

**Generación De Hidrógeno Renovable Vía Electroquímica.** La disponibilidad de un combustible sustentable y limpio para celdas de combustible es complementada en el IIE con los desarrollos y estudios para la obtención de hidrógeno sustentable a partir de excedentes de energía renovable (por ejemplo en sistemas fotovoltaicos), para el almacenamiento de dicha energía en forma de hidrógeno; una manera de almacenar energía intermitente de mayor vida útil en anaqueles (a diferencia de las baterías). Esto ha llevado al IIE a integrar el 1er sistema hidrógeno-solar y al desarrollo de su propia tecnología de electrólisis de membrana polimérica con muy buenos resultados (Fig. 11). Otros medios electrolíticos han sido explorados anteriormente.



**Figura 11.** 1er sistema hidrógeno-solar en América. Edificio 12 IIE (izquierda), tecnología IIE de electrólisis de membrana y curva de desempeño a diversas temperaturas (derecha)

## Agradecimientos

Los resultados presentados en este capítulo han sido en parte financiados por el CONACYT (FI/75/2012) e ICYTDF.

## Referencias

- [1]. Z. Yu, L. Tetard, L. Zhai, Jayan Thomas. Supercapacitor electrode materials: nanostructures from 0 to 3 dimensions. *Energy Environ. Sci.*, 2015, 8, 702–730.
- [2]. Y. Gong, M. Li, Y. Wang. Carbon Nitride in Energy Conversion and Storage: Recent Advances and Future Prospects. *ChemSusChem.*, 2015, 8, 931-946.
- [3]. Ch. Yuan, H.B. Wu, Y. Xie, X. W. Lou. Mixed Transition-Metal Oxides: Design, Synthesis, and Energy-Related Applications. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, 53, 1488 – 1504
- [4]. M.Liu, R. Zhang, W. Chen. Graphene-Supported Nanoelectrocatalysts for Fuel Cells: Synthesis, Properties, and Applications. *Chem. Rev.*, 2014, 114, 5117–5160
- [5]. M.K. Debe, Electrocatalyst approaches and challenges for automotive fuel cells. *Nature* 2012, 486, 43-51.
- [6]. M. Mao, J. Hu, H. Liu. Graphene-based materials for flexible electrochemical energy storage. *Int. J. Energy Research* 2015, 39, 727-740
- [7]. Akinwolemiwa, Ch. Peng, Z. George. Redox Electrolytes in Supercapacitors. *J. Electrochem. Soc.*, 2015, 162, A5054-A5059.
- [8]. S. Holdcroft. Fuel Cell Catalyst Layers: A Polymer Science Perspective. *Chem. Mater.* 2014, 26, 381–393.
- [9]. J.W. Desmond, M. Tang, Th. F. Jaramillo. A carbon-free, precious-metal-free, high-performance O<sub>2</sub> electrode for regenerative fuel cells and metal–air batteries. *Energy Environ. Sci.*, 2014, 7, 2017–2024
- [10]. S. Alayoglu, G. A. Somorjai. Nanocatalysis II: In Situ Surface Probes of Nano-Catalysts and Correlative Structure–Reactivity Studies. *Catal. Lett.*, 2015, 145, 249-271

- [11].K. Suárez-Alcántara, A. Rodríguez-Castellanos, R. Dante and O. Solorza-Feria,  $Ru_xCr_ySe_z$  Electrocatalyst for oxygen reduction in a polymer electrolyte membrane fuel cell. *J. Power Sources*, 2006, 157, 114-120.
- [12].R.G. González-Huerta, J.A. Chávez-Carvayar and O. Solorza-Feria, Electrocatalysis of oxygen reduction on carbon supported Ru-based catalyst in a polymer electrolyte fuel cell. *J. Power Sources*, 2006, 153, 11-17.
- [13].G. Ramos-Sánchez, H. Yee-Madeira and O. Solorza-Feria. PdNi Electrocatalyst for ORR in Acid Media. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2008, 33, 3596-3600.
- [14].D.C. Martínez-Casillas, H.A. Calderón, V. Collins-Martínez, O. Solorza-Feria. Pd<sub>5</sub>Cu<sub>4</sub>Pt OR Nanocatalyst for PEMFCs. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013, 38, 12674-12680.
- [15].J.L. Reyes-Rodríguez, F. Godinez-Salomón, M.A. Leyva, O. Solorza-Feria. RRDE study on Co@Pt Core-Shell Nanocatalysts for the Oxygen Reduction Reaction. *Int. J. Hydrogen Energy*, 2013, 38, 12634-12639.
- [16].J. Maya-Cornejo, E. Ortiz-Ortega, N. Arjona, M. Guerra-Balcázar, J. Ledesma-García, L.G. Arriaga. Copper-palladium core shell for multi-fuel membraneless nanofluidic fuel cell: toward a new era of small energy conversion devices, *Chem. Commun.* 2015, 51, 2536-2539.
- [17].F.M. Cuevas-Muñiz, M. Guerra-Balcázar, F. Castaneda, J. Ledesma-García, L.G. Arriaga, Performance of Au and AuAg Nanoparticles Supported on Vulcan In A Glucose Laminar Membraneless Micro-Fuel Cell, *J. Power Sources* 2011, 196, 5853-5857.
- [18].E. Ortiz-Ortega, Marc-Antoni Goulet, Jin Wook Lee, M. Guerra-Balcázar, N. Arjona, Erik Kjeang, J. Ledesma-García, L. G. Arriaga, Nanofluidic direct formic acid fuel cell with combined flow-through and air-breathing electrode for high performance, *Lab on Chip* 2014, 14, 4596-4598.
- [19].Moreno-Zuria, A. Dector, N. Arjona, F.M. Cuevas, J. P. Esquivel, N. Sabaté, A.U. Chávez-Ramírez, J. Ledesma-García, L. G. Arriaga, Direct

Formic Acid Microfluidic Fuel Cell design and performance evolution, *J. Power Sources*, 2014, 269, 783-788.

- [20].M. Guerra-Balcázar, F.M. Cuevas-Muñiz, L. Álvarez-Contreras, J. Ledesma-García, and L. G. Arriaga, Evaluation of bimetallic catalyst PtAg/C as a glucose-tolerant oxygen reduction cathode, *J. Power Sources* 2012, 197, 121-128.
- [21].U. Cano-Castillo, A. Ortiz, S. Cruz, L. G. Arriaga and G. Orozco, Parameter Changes During Gradual Flooding of a PEM Fuel Cell Through EIS Studies, *ECS Transactions Proton Exchange Membrane Fuel Cells* 6, Volume 3, Issue I, pp931-939, 2006, Editors: T. Fuller et al.
- [22].L.G. Arriaga, W. Martínez, U. Cano, H. Bludzuweit., Direct coupling of a solar-hydrogen system in Mexico, *Int. J. Hydrogen Energy* 2007,32 2247 – 2252
- [23].Félix Loyola Morales, Ulises Cano, Channel length and air flow rate effect on the PEM fuel cell overall performance, XI International Hydrogen Congress, Cuernavaca, Mexico, 20-23 Septiembre 2011, (ISBN: 978-607-8182-01-5)
- [24].R. Barbosa, J. Andaverde, B. Escobar, U. Cano, Stochastic reconstruction and a scaling method to determine effective transport coefficients of a proton exchange membrane fuel cell catalyst layer, *Journal of Power Sources*, 196, issue 3 (2011) 1248–1257, 1 February, 2011.
- [25].Ulises Cano, Tatiana Romero, Félix Loyola, Hydrogen-crossover evaluation of graphite bipolar plates and membrane-electrodes assemblies, used in PEMFC. Hardware development and methodology implementation, XI International Hydrogen Congress (ISBN: 978-607-8182-01-5), Cuernavaca, Mexico, 20-23 Septiembre 2011,

## ***Educación en Electroquímica (EE)***

---

Coordinador: ***Dr. Jorge Ibáñez Cornejo***<sup>1</sup>

Colaboradores

Patricia Balderas Hernández<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad Iberoamericana-UI  
Depto. de Ingeniería y Ciencias Químicas,  
Centro Mexicano de Química Verde y Microescala.  
Prol. Reforma 880, Del. Álvaro Obregón, 01219 México, D.F. México

<sup>2</sup> UAEMex-UNAM  
Centro Conjunto de Investigación en Química Sustentable  
Carretera Toluca-Atlacomulco Km 14.5, 50200 Toluca, México

**“Educación en Electroquímica:  
Algunas Tendencias Actuales”**

## Resumen

Se presenta una panorámica general de las tendencias actuales y recursos disponibles para la enseñanza de la electroquímica.

## Introducción

La importancia de la electroquímica es innegable — desde nuestro funcionamiento como sociedad moderna la cual requiere de sistemas de producción eficiente y limpia de energía, así como su conversión y almacenamiento; la extracción, purificación y uso de materiales; la prevención de la corrosión de los metales; la realización de síntesis orgánicas, bioquímicas e inorgánicas mejores y más limpias; la producción de nanomateriales; la prevención, monitoreo y control de la contaminación, etc. hasta nuestro propio funcionamiento como individuos biológicos. A pesar de su ubicuidad, hay pocos programas que tienen cursos formales en electroquímica por lo que se puede deber a lo anterior que sólo aproximadamente uno de cada dos miembros de la Electrochemical Society (ECS) ha tomado al menos un curso formal en electroquímica.[1]

## Tendencias

Se ha escrito sobre el liderazgo y educación en ingeniería electroquímica, [2, 3] y se hace notar que el rango de escalas en las aplicaciones puede ir desde electrónica hasta atómica a molecular, desde nanoescala a macroescala. Muchos métodos computacionales han sido desarrollados para calcular propiedades y modelar fenómenos. Es fundamental dotar a los estudiantes con la capacidad de hacer cualquier simplificación de un modelo con base en argumentos bien razonados y justificados. Uno de los desafíos que enfrentan los educadores y científicos en ingeniería electroquímica es atraer a la próxima generación de investigadores y educadores en el campo. [4] Por lo

tanto, se tienen que desarrollar nuevas estrategias pedagógicas para mantener la actualización e ilustrar los conceptos clave. Otro número especial sobre educación en electroquímica está en la revista Interface y trata sobre un amplia gama de actividades educativas de interés (ej. electroquímica y estado sólido, sistemas electroquímicos nanoestructurados, celdas de combustible, ingeniería electroquímica, electroquímica para K-12; coloreando joyas, etc.). [5]

Especialmente llamativo es el hecho de que las principales sociedades de electroquímica a nivel mundial (es decir, la International Society for Electrochemistry, ISE y la ECS) no contemplen un área de la educación entre sus divisiones técnicas. [6, 7]

### **Recursos disponibles**

Afortunadamente varias de las distintas sociedades de electroquímica en el mundo han desarrollado materiales. Por ejemplo, en uno de estos sitios[8] hay una biblioteca virtual que contiene una lista de las principales revistas y centros de electroquímica, así como un excelente panorama de páginas web dedicadas a difundir diversos temas sobre la enseñanza de la electroquímica. El Prof. Zoltan Nagy[9] ha dedicado una buena parte de su vida profesional a mantener y actualizar un repositorio enorme de información sobre electroquímica, que incluye una gran variedad de aspectos de educación (Electrochemical Science and Technology Information Resource, ESTIR albergado por el Ernest B. Yeager Center for Electrochemical Sciences, YCES y el Chemical Engineering Department, Case Western Reserve University, Cleveland, Ohio) donde incluye: Electroquímica y temas relacionados en Internet, noticias, bibliografías, datos fisicoquímicos, diccionario electroquímico, proveedores, consultores, equipos de laboratorio, instrumentación, hardware y software (solamente "freeware"), celdas a escala

laboratorio/piloto/producción, diseños, cursos cortos, información de divulgación científica, reuniones, escuelas de posgrado, capítulos e informes, volúmenes de proceedings, libros, sociedades, revistas, manuales, bibliografías, nomenclatura, normas, etc. Aquí se incluye una enciclopedia de electroquímica. [10] Springer también acaba de editar una enciclopedia de electroquímica. [11]

Por otra parte, la ISE publica regularmente una lista de libros de electroquímica recientes (últimos dos años), [12] mientras que Google hace también lo propio. [13] Las dos principales revistas de enseñanza de la química: Journal of Chemical Education[14] y The Chemical Educator[15] han publicado docenas artículos sobre el tema, muchos de los cuales están concentrados en un excelente (aunque incompleto) resumen que elaboró Coe College en donde además se da una serie de ejemplos de varias universidades que han desarrollado experimentos sobre diferentes áreas de la enseñanza electroquímica. [16]

Asimismo, hay compañías que fabrican y distribuyen equipos de electroquímica y que han elaborado varias series de experimentos didácticos en los últimos 20 años.[17-20] Aunque los instrumentos comerciales fabricados o distribuidos por estas compañías son bastante confiables, una parte importantísima para poder poner la electroquímica al alcance de todos implica la fabricación casera de algunos de ellos. [21-25] Otras varias revistas también han publicado artículos sobre la educación en electroquímica. [26-28] Existe un manual que sobresale por la amplitud de conceptos que cubre desde lo más básico hasta lo que hay de frontera. [29]

## Recomendaciones para currícula: El Eurocurrículum en Electroquímica

En cuanto a recomendaciones sobre contenidos específicos para un currículum en electroquímica, la más famosa ha sido la iniciativa de la Federation of European Chemical Societies Working Party on Electrochemistry. [30]

Allí se hace notar que este tema preocupa debido a que sólo una fracción de la currícula da la base de la cinética de los procesos en el electrodo y de la química en la superficie lo cual es necesario para un entendimiento real de cómo trabajan los sistemas electroquímicos. Por ello se recomienda que la currícula debe incluir termodinámica y cinética electroquímicas, la estructura del electrodo y las soluciones en la interfase. También deberá contener los principios del funcionamiento de sistemas prácticos importantes tales como baterías, celdas de combustible, la corrosión y la protección a la corrosión, sistemas de electrólisis, membranas y biomembranas, estructura interfacial, fenómenos de transporte. Se consideran dos niveles para la enseñanza de la electroquímica en la universidad: a) **Nivel básico**, para estudiantes que su área principal no es la química, donde los principios deberán estar en forma descriptiva más que cuantitativa; y b) **Nivel avanzado** para estudiantes especializados en las carreras de química.

*Algunas recomendaciones son:* a) **Nivel básico**: estructura iónica de los electrolitos, equilibrio ácido-base, pH, amortiguadores, leyes de Faraday, celdas galvánicas, potenciales de electrodo, escala SHE, ecuación de Nernst, determinación de constantes de equilibrio, tipos de electrodos reversibles, electrodos selectivos de iones, biosensores, conducción y conductividad de electrolitos, números de transporte y movilidades, polímeros y otros electrolitos sólidos, la doble capa

eléctrica, sobrepotenciales y curvas corriente-potencial, electroanálisis, bases de corrosión, la celda de combustible de hidrógeno/oxígeno, polímeros conductores, depósito de metales. **Las recomendaciones para el trabajo práctico de este nivel son:** medición del pH, mediciones potenciométricas con electrodos selectivos de iones, titulación potenciométrica, corrosión, conductividad, eficiencia de una batería secundaria (ej. plomo-ácido), preparación y estudio de un polímero conductor. **b) Nivel avanzado:** potenciales químicos y electroquímicos, actividades, modelo Debye-Hückel, modelo de energía de hidratación de Born, termodinámica de iones en solución, potenciales galvánicos y voltajes, potenciales de electrodos, escala SHE, potenciales de electrodos estándar, equilibrio termodinámico en una celda electroquímica, ecuación de Nernst, electrodos reversibles, relación entre potencial de equilibrio y otras cantidades termodinámicas, tipos de celdas electroquímicas, titulaciones potenciométricas, potencial de membrana, electrodos selectivos de iones, baterías de metal-aire y litio, sensores potenciométricos, propiedades de transporte, definición de flux, ecuación de transporte uni-dimensional en estado estable, ley de Ohm, 1ª ley de Fick, conducción en electrolitos, parámetros de transporte para iones en solución (movilidad, número de transporte, conductividad molar, coeficiente de difusión), relaciones Nernst-Einstein y Stokes-Einstein, difusión del estado inestable (2ª ley de Fick), medición de conductividades, números de transporte y coeficientes de difusión, conductividad de electrolitos fuertes y débiles, dependencia de la conductividad con la temperatura, campo eléctrico y frecuencia, conductividad en sales fundidas y electrolitos sólidos, interfases y cinética de reacciones en el electrodo, estructura de la interfase metal-líquido, la doble capa eléctrica, mecanismos de reacción y sobrepotenciales, cinética de transferencia de electrones y relaciones corriente-potencial (Butler-Volmer y Tafel), teoría de Marcus de la

transferencia de electrones homogénea y heterogénea, capa de difusión, corriente límite, electrodo de disco rotatorio, voltamperometría en estado estacionario, celdas electrolíticas y galvánicas, electrocatálisis, corrosión de metales y pasividad. **Algunos ejemplos prácticos incluyen:** sensores amperométricos, biosensores, polímeros conductores, baterías primarias y secundarias, celdas de combustible, supercapacitores, depositación galvánica y por electrólisis de metales, electrodeposición de óxidos y semiconductores, electroplateado y grabado, tratamiento electroquímico de efluentes, electrosíntesis de compuestos orgánicos e inorgánicos, y protección contra la corrosión.

### **Conclusión**

La enseñanza de la electroquímica es un área sumamente dinámica, y se requiere estar actualizando conocimientos y estrategias pedagógicas para enfrentar este gran reto.

## Referencias

- [1]. Fergus, Jeffrey W. How Do We Learn Electrochemistry? The Electrochemical Society Interface, Spring 2012, 21 (1), 55-56. [http://www.electrochem.org/dl/interface/spr/spr12/spr12\\_p055\\_056.pdf](http://www.electrochem.org/dl/interface/spr/spr12/spr12_p055_056.pdf) (visitada: Mayo 9, 2015).
- [2]. Weidner, John W. Leadership & Education in Electrochemical Engineering. The Electrochemical Society Interface, Summer 2010, 19 (2), 36. [http://www.Electrochem.org/DL/interface/sum/sum10/sum10\\_p036.pdf](http://www.Electrochem.org/DL/interface/sum/sum10/sum10_p036.pdf) (visitada: Mayo 9, 2015).
- [3]. Subramanian, Venkat R.; Braatz, Richard D. Current Needs in Electrochemical Engineering Education. The Electrochemical Society Interface, Summer 2010, 19 (2), 37-38. [http://www.electrochem.org/dl/interface/sum/sum10/sum10\\_p037-038.pdf](http://www.electrochem.org/dl/interface/sum/sum10/sum10_p037-038.pdf) (visitada: Mayo 9, 2015).
- [4]. Botte, Gerardine G. Introducing Electrochemical Engineering to Future Generations. The Electrochemical Society Interface, Summer 2010, 19 (2), 39-43. [http://www.electrochem.org/dl/interface/sum/sum10/sum10\\_p039-043.pdf](http://www.electrochem.org/dl/interface/sum/sum10/sum10_p039-043.pdf) (visitada: Mayo 9, 2015).
- [5]. The Electrochemical Society Interface, Fall 2006, 15 (3). [http://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal06/if\\_fal06.htm](http://www.electrochem.org/dl/interface/fal/fal06/if_fal06.htm) (visitada: Mayo 9, 2015).
- [6]. <http://www.ISE-online.org/divisions/index.php> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [7]. <http://www.electrochem.org/ecs/tia/div/> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [8]. <http://www.liv.ac.uk/chemistry/links/electrochem.html> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [9]. <http://apps.lib.whu.edu.cn/12/test/elec/info/dianhuaxue.htm> (visitada: Mayo 9, 2015).

- [10].<http://knowledge.electrochem.org/encycl/> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [11].Savinell, Robert F.; Ota, Ken-ichiro; Kreysa, Gerhard. Editors Encyclopedia of Applied Electrochemistry, edited by Springer, 2014, pp 1368-1371. DOI 10.1007/978-1-4419-6996-5\_125. Print ISBN 978-1-4419-6995-8, Online ISBN 978-1-4419-6996-5 (visitada: Mayo 9, 2015).
- [12].<http://www.ise-online.org/books/> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [13].[http://books.google.com.mx/books/about/Electrochemistry.html?id=SwPyzEhprj8C&redir\\_esc=y](http://books.google.com.mx/books/about/Electrochemistry.html?id=SwPyzEhprj8C&redir_esc=y) (visitada: Mayo 9, 2015).
- [14].<http://pubs.acs.org/journal/jceda8> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [15].<http://chemeducator.org/> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [16].<http://www.public.coe.edu/departments/ElectrochemEd/EchemEdLit.html> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [17].Metrohm UK. <http://www.laboratorytalk.com/laboratory-equipment-and-wares/liquid-handling/titration-equipment/practical-voltammetry-monograph/51163.article> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [18].EG&G PAR.  
<http://www.princetonappliedresearch.com/Literature/index.aspx>  
(visitada: Mayo 9, 2015).
- [19].Pine Instrument Company.  
<http://www.pineinst.com/echem/viewproduct.asp?ID=46265> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [20].Cypress Systems. <http://home.asdlib.org/> (visitada: Mayo 9, 2015).
- [21].Amend, John R.; Stewart, Greg; Kuntzleman, Thomas S.; Collins, Michael J. Affordable Cyclic Voltammetry, J. Chem. Educ. 2009, 86 (9), 1080-1081.
- [22].Polk, B. J.; Duvallet, F. Multidimensional Instrumentation Applied to Studies of Electrodeposition, The Chemical Educator 2007, 12 (1), 29.

- [23].Gopinath, A. V.; Russell, D. An Inexpensive Field-Portable programmable Potentiostat, *The Chemical Educator* 2006, 11 (1), 23-28.
- [24].Santos, Andre L.; Takeuchi, Regina M.; Oliveira, Herenilton P.; Rodríguez, Marcello G.; Zimmerman, Robert L. A Reliable Homemade Electrode Based on Glassy Polymeric Carbon, *J. Chem. Educ.* 2004, 81, 842.
- [25].Gostowski, R. Teaching Analytical Instrument Design with LabVIEW. *J. Chem. Educ.* 1996, 73, 1103.
- [26].Hazen, R.; Spaulding, R. M.; Kasem, K. K. Sigle, E. A. Electrochemistry in Thin Solid Films of Prussian Blue: A Model Demonstration of Reversible Behavior, *Am. J. of Undergrad. Res.* 2003, 2 (1), 27-36.
- [27].<http://www.educacionquimica.info/>
- [28].<http://pubs.rsc.org/en/journals/journalissues/rp#!recentarticles&ad>
- [29].Zoski, Cynthia G., Editor. *Handbook of Electrochemistry*. Elsevier, Amsterdam, 2007, ISBN: 978-0-444-51958-0.
- [30].Schultze, J. W.; Sundholm, G. *Eurocurriculum in Electrochemistry*. <http://www.ise-online.org/journals/eurocor.php> (visitada: Mayo 9, 2015).

*D.R. ©Publicaciones SMEQ  
La purisima s/n, la Purisima. Iztapalapa.  
México D.F. C.P. 09340  
Impreso en México*

