



The renaissance of electrochemistry

EL RENACIMIENTO DE LA ELECTROQUÍMICA

*Walter Leidinger; Rainer Weber**

La transición energética, o Energiewende, que ha propuesto Alemania para su futuro abastecimiento energético con energías renovables conlleva un replanteamiento de la producción industrial, especialmente para su industria química.

La electroquímica orgánica celebra, por ello, un renacimiento dado que permite el acoplamiento entre una producción energética a partir de energías renovables y la producción química, y permite, de este modo, una "química verde" de alta eficiencia y sostenibilidad cuya materia prima futura sea CO₂.

Palabras claves: Energiewende, transición energética, energías renovables, electroquímica.

Germany has decided to switch its entire energy supply to renewables in a transition that they have termed as "Energiewende". A rethinking of industrial production, especially of the chemical production, is the consequence.

Organic electrochemistry is thus celebrating a renaissance, since it allows the coupling of renewable energies and chemical production. A highly efficient, sustainable "green chemistry" with CO₂ as the future raw material basis is possible.

Keywords: rethinking of chemical production, renewables, electrochemistry

** Walter Leidinger es Doctor en Química y profesor de la Sección Química de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Ha sido Director de Medio Ambiente de la empresa BAYER AG y experto consultor del parlamento del estado de Renania Norte y Westfalia (Alemania) en la comisión designada para discutir el futuro de la industria química. Rainer Weber es Doctor en Química y trabaja para la empresa COVESTRO Deutschland AG, en el CHEMPARK de Leverkusen, Alemania. Es director del departamento de Tecnología e Innovación y especialista en electroquímica. Dirección de contacto: wleidinger@pucp.pe*

La electroquímica es el estudio de la interrelación de las energías eléctrica y química. No sabemos exactamente cuándo ocurrió el nacimiento de esta ciencia, aunque algunos autores mencionan el uso de la electroquímica en el galvanizado de piezas metálicas en la antigüedad. Lo cierto es que en los siglos XVII y XVIII se descubre la electricidad y los científicos han tratado de utilizarla en la transformación de procesos químicos.

Humphry Davy y Michael Faraday son habitualmente considerados como los fundadores de la electroquímica. Davy fue el primero en relacionar la actividad química con los fenómenos eléctricos. Así pudo descubrir, entre 1800 y 1820, los elementos potasio, sodio, calcio, estroncio, litio y cloro utilizando la vía electrolítica. Su discípulo, Michael Faraday, continuó su labor en la primera mitad del siglo XIX. Faraday descubrió el diamagnetismo, la inducción electromagnética y la electrólisis.

La electroquímica se convierte, con los impulsos de estos científicos y los de muchos otros más como Daniell, Arrhenius, Brönstedt, Berzelius, Kolbe, Ostwald y Nernst por mencionar unos pocos, en uno de los pilares de la química. De hecho, hasta la mitad del siglo XX, la electroquímica juega un papel fundamental en el desarrollo de la química. Esta ciencia permitió el descubrimiento de la carga del electrón y el establecimiento de la moderna teoría de ácidos y bases, así como estudios importantes en las áreas médicas y biológicas. En el ámbito de la producción industrial química, muchos procesos inorgánicos se basan hoy en síntesis electroquímicas, como es el caso de la obtención de cloro y la soda cáustica y también es de gran importancia para la obtención de muchos metales como el cobre, el aluminio o el titanio, por mencionar solo los más importantes.

La síntesis de productos orgánicos por medio de métodos electroquímicos, por otro lado, no ha florecido a pesar de sus grandes ventajas ecológicas. El desarrollo masivo de la petroquímica a partir de los años 1950 y los altos costos de la electricidad hacen que los procesos electroquímicos

orgánicos no sean competitivos. Por otro lado, la electroquímica como ciencia requiere de muchos conocimientos interdisciplinarios y de los principios físico-químicos que no son siempre fáciles de aprender. Es por eso que, a pesar de las ricas potencialidades sintéticas de la electroquímica orgánica, existe poca aceptación en las síntesis orgánicas y su estudio prácticamente se menosprecia. Hoy existe muy poca información sobre técnicas electroquímicas en los libros de química orgánica sintética. Los estudiantes de química de las últimas décadas han estudiado la electroquímica como una ciencia del pasado. Los expertos en electroquímica son, por ende, muy pocos.

Un desarrollo muy inusual en esta área de la química está ocurriendo en Alemania, especialmente en la industria química alemana. La *Energiewende* o transición energética en Alemania le está dando un vuelco enorme a la química y la electroquímica juega en este proceso un papel fundamental. Veamos más detalles.

¿QUÉ ES LA TRANSICIÓN ENERGÉTICA?

El término *Energiewende* (que puede traducirse como *transición energética*) ha sido incorporado a muchos idiomas en todo el mundo y describe el proceso de cambio o transición energética que Alemania se ha propuesto para su abastecimiento energético, principalmente con energías renovables. Igualmente, el país apuesta por gestionar la energía de manera cada vez más eficiente realizando de este modo una contribución importante a la protección del clima.

La transición energética constituye una oportunidad única para Alemania para abrir nuevas áreas de nego-

cio, impulsar innovaciones y crear empleo y crecimiento. Al mismo tiempo espera ser menos dependiente del petróleo y del gas importados del extranjero. El presidente de Alemania, Frank-Walter Steinmeier, compara este proceso con procesos similares del pasado y lo describe como el “viaje a la luna” de Alemania¹.

Muchas personas piensan que se trata tan solo de un abandono de la energía nuclear hasta el año 2022 y se sorprenden de las dimensiones que integran este proyecto de transición energética y los múltiples aspectos que están interrelacionados. Las metas son, entre otras, aumentar la eficiencia eléctrica y apostar por la electromovilidad.² Esta última implica buscar nuevas estrategias de movilidad y de gestión de tráfico y considera la necesidad de implantar sistemas de movilidad urbana basados en vehículos eléctricos. Alemania busca soluciones transnacionales para reducir las emisiones globales de CO₂, cumplir las metas del plan climático y así contribuir a poner término al calentamiento global y alcanzar un abastecimiento energético seguro, sostenible y asequible.

La transición energética de Alemania no es algo que se pueda conseguir de la noche a la mañana, sino que es un proceso que está pensado para ser implantado progresivamente hasta su establecimiento final en el año 2050. Hay, y habrá, muchos problemas en el camino, pero este proceso es irreversible y hará que Alemania se abastezca en un 80% de energías renovables para ese año. Eso significa cerrar todas las centrales de generación eléctrica a partir de energía nuclear, de carbón bituminoso y de carbón de piedra para el año 2050. En la figura 1 se muestran las principales fuentes de emisión de gases de efecto invernadero en Alemania y el máximo esperado para 2030 de cumplirse con el plan gubernamental.³



Figura 1. Emisiones actuales de gases causantes del efecto invernadero por sectores en Alemania y la propuesta de reducción de las emisiones según el plan del Ministerio Federal de Medioambiente de Alemania. A la derecha, la portada del documento del plan, disponible en diversos idiomas.

1. Ministerio Federal de Relaciones exteriores de Alemania: “La *Energiewende* alemana” (consulta octubre de 2018). (📄)
2. Portal: Asi es Alemania de FAZIT Communication GmbH en cooperación con el ministerio alemán de relaciones exteriores: “Fomento de la electromovilidad – Alemania invierte 1.000 millones de

- Euros en producción de celdas para baterías” (📄)
3. The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) “Climate Action Plan 2050 – Germany’s long-term emission development strategy”. Berlin, 2016 (Consulta: octubre 2018) (📄)

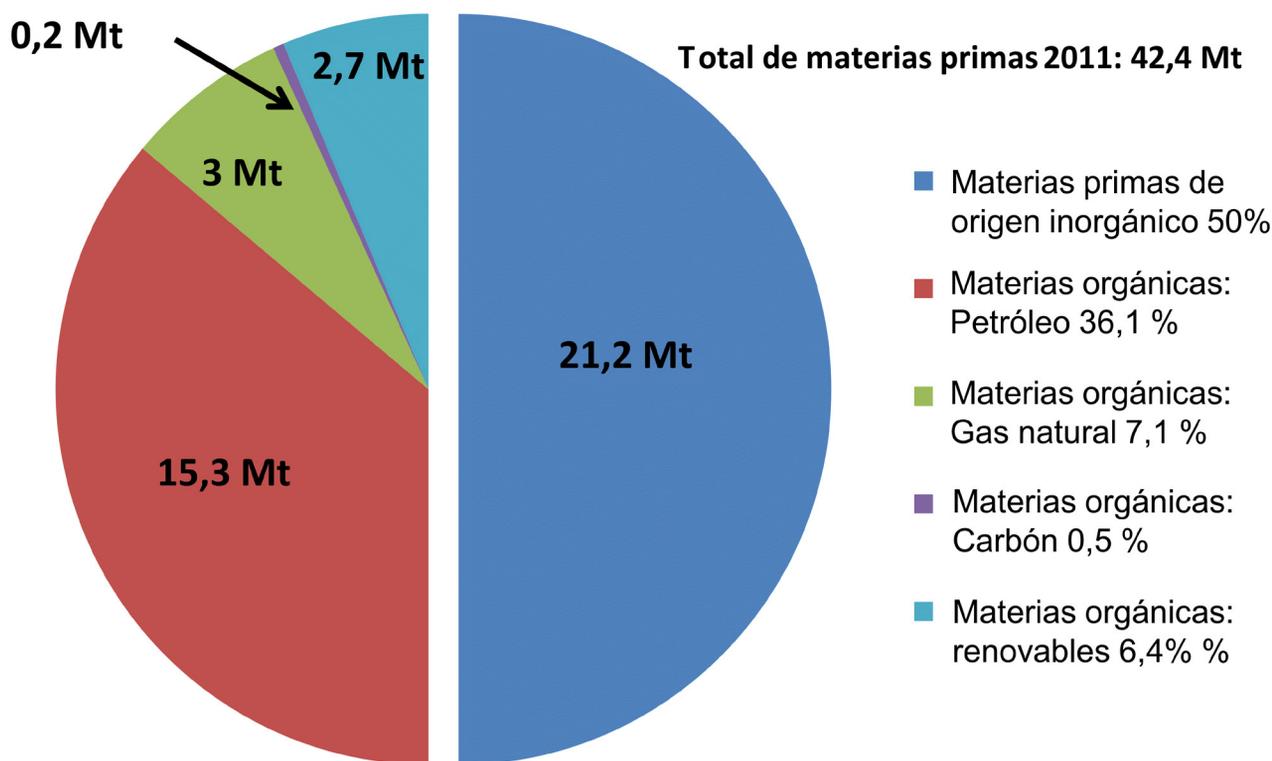


Figura 2. Materias primas en la industria de Alemania. Fuente: VCI - German Chemicals Industry Association

El sector energético es el más grande y deberá reducir hasta el año 2030 las emisiones de 358 millones de toneladas equivalentes de CO₂ a valores por debajo de 183 millones de toneladas equivalentes. Esto se conseguirá apostando por la energía eólica y la solar. El sector transporte podrá reducir sus emisiones en un 40% con el viraje a la electromovilidad. El sector vivienda podrá conseguir la reducción de sus emisiones mejorando el aislamiento de las casas e implantando energías renovables para su calentamiento.

Pero, ¿qué hará el sector industrial para lograr la transición energética y no perder su competitividad? Este sector, es el segundo sector más importante con emisiones de 181 millones de toneladas equivalentes de CO₂. De esta cantidad, aproximadamente un tercio proviene de la industria química.

La base de la industria química es el petróleo. Sin embargo, del consumo total de petróleo, ¡tan solo 10% se utiliza para la industria química! 47% del petróleo se usa para producir gasolina y 23% para producir diésel. Vale decir que el 70% del petróleo está directamente relacionado con el transporte⁴. La pregunta es: ¿qué pasará con las refinерías de petróleo si cambiamos todo el transporte a la electromovilidad? ¿A dónde ir con toda la gasolina que producen? Lo probable es que las refinерías ya no sean rentables y no sigan produ-

ciendo solo para la industria química. Por ende, ¡lo que se necesita en el futuro es una nueva base de carbono para la producción de químicos que no sea el petróleo!

Durante muchos años se ha discutido sobre el peak-oil, es decir, sobre el dilema que significa que el petróleo se esté acabando.⁵ La pregunta era: ¿qué pasará el día en el que ya no haya más petróleo y esta 'era del petróleo' acabe por haber consumido esta materia prima no renovable en algo más que cien años?

Vemos hoy que la 'era del petróleo' llegará a su fin no porque el petróleo se acabe sino por el efecto negativo que tiene su quema sobre el clima. Al igual que la "edad de piedra" no se acabó porque se acabaran las piedras, sino porque aparecieron nuevas técnicas mucho más eficientes, la 'era del petróleo' será superada por una tecnología muchísimo más eficiente que se base en otra materia prima que no sea el petróleo.

LAS MATERIAS PRIMAS DE LA INDUSTRIA QUÍMICA: QUÉ SE USA Y QUÉ SE PROYECTA USAR

La figura 2 muestra cuáles son las materias primas

4. Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI): [Factbook 05 - Die Formel Ressourceneffizienz](#). (2012). (📄)

5. David Blittersdorf, [The Peak Oil Dilemma](#). AllEarth Solar Power Blog. (consulta octubre de 2018) (📄)

de la industria química en Alemania. Como puede verse, el 50% de las materias primas son de origen inorgánico, 36,1% es petróleo, 7,1% es gas natural y hoy solo 6,4% son materias primas renovables.⁶ El verdadero desafío del futuro para la industria química está en la reducción de la dependencia del petróleo y del carbón y en la reducción de CO₂. La industria química presenta para ello igualmente soluciones gracias al aporte de sus productos y la alta eficiencia de los mismos.

Lo que se necesita es un cambio en los procesos químicos tal que permitan una reducción drástica de CO₂. La meta de la transición energética alemana traducida al idioma de la industria química es, por tanto, lograr una producción neutral en CO₂ para el año 2050. Para ello, se requiere no solo que los procesos químicos consuman menos energía y eviten la producción de CO₂, sino también que se potencie el uso de la producción de energía eléctrica renovable en los procesos químicos. Hoy le llamamos a este proceso *power to chem* que no es otra cosa que electroquímica.

El uso de CO₂ como base de carbono y materia prima es lo más inteligente que pueda realizar la industria química. Las tecnologías para lograr la conversión de CO₂ en productos químicos las encontraremos en la catálisis química, la fotocatálisis, en la biotecnología y en la electroquímica.

La electroquímica permite el uso de las energías renovables, tiene una alta selectividad, utiliza electrones como reactantes, y un exceso de reactantes no crea desechos que habría que eliminar. Otras ventajas son la construcción modular y una escala técnica simple, y el hecho de que permite una contribución a la estabilidad de la red eléctrica y el uso de CO₂ como materia prima. Las desventajas están en la alta inversión necesaria tanto en la construcción de las celdas como en la necesidad de una infraestructura para un suministro eléctrico de corriente continua.

Lo que se está viviendo en estos años es un renacimiento de la electroquímica para la producción de productos químicos básicos a partir del CO₂. Ese renacimiento podemos constatarlo viendo el gran número de trabajos científicos que se han potenciado en los últimos años⁷. Hasta el año 2011, el número de publicaciones sobre electroquímica a partir del CO₂ no pasaba de 100 al año. Este número se ha incrementado hasta por encima de 500 en los años 2016 y 2017.

La comunidad científica y la política muestran un enorme interés por el desarrollo de la electroquímica a partir del CO₂⁸. Hay nuevas síntesis que aún no han sido proba-

- Högner, J. y Hufschmidt, M. *Enquetekommission zur Zukunft der chemischen Industrie in Nordrhein-Westfalen im Hinblick auf nachhaltige Rohstoffbasen, Produkte und Produktionsverfahren*, Düsseldorf, 2015. (consulta octubre de 2018) (📄)
- Zhang, L.; Zhao, Z.-J., Gong, J.: "Nanoestructuradas Materiales para la reducción de CO₂ y sus mecanismos de reacción" *Angewandte Chemie*, 2017, 129(38) 11482 – 11511. (📄)
- Eichel, R.: "Deutschland ist das große Forschungslabor der Energiewende" (📄)

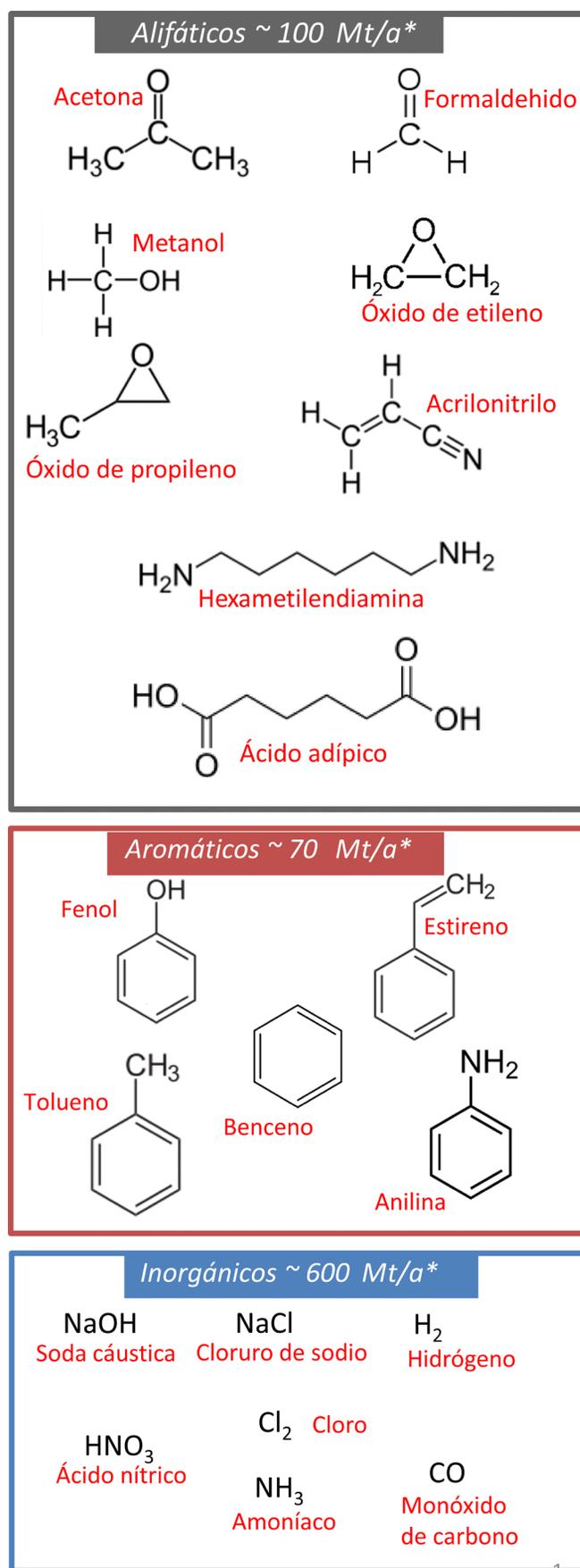


Figura 3. Los tres grupos de productos químicos básicos de la industria química en general. * Mt/a significa millones de toneladas al año.

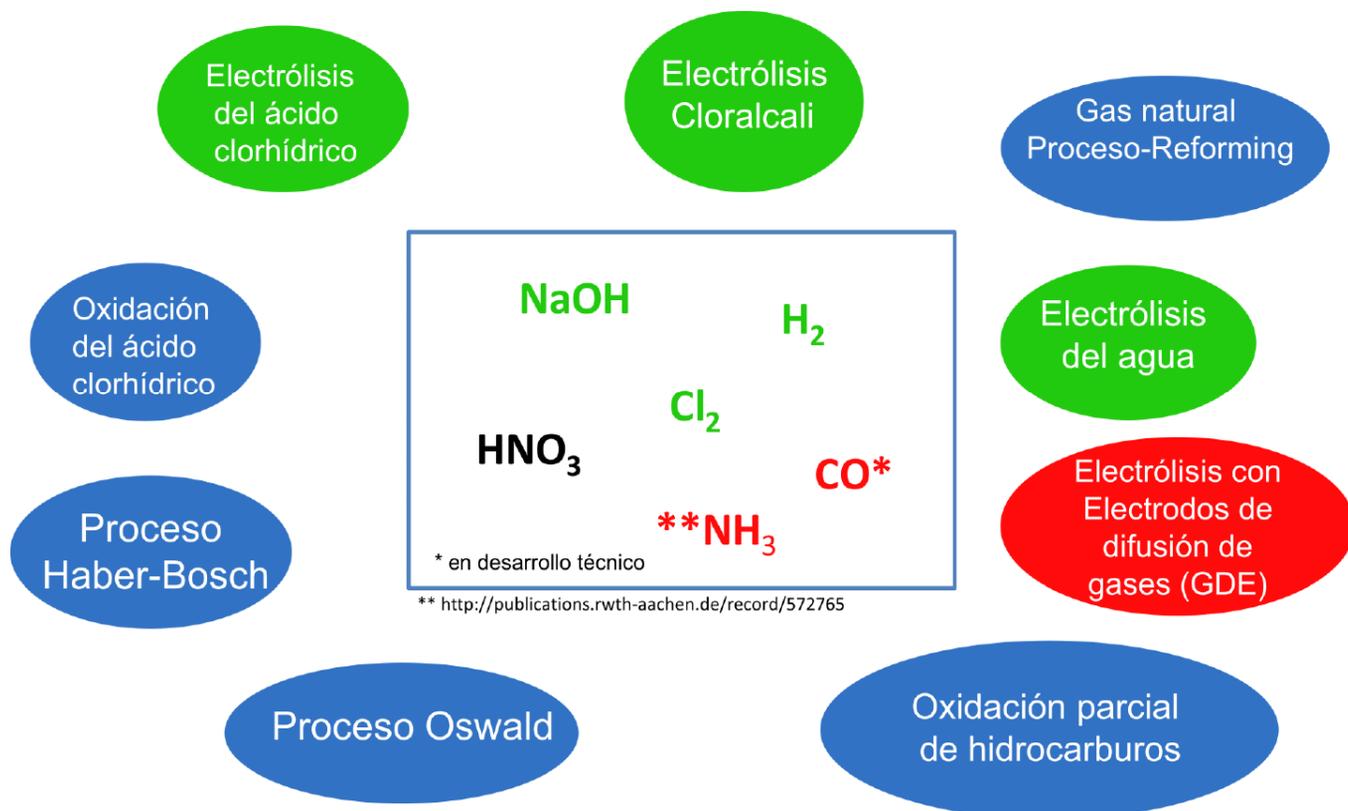


Figura 4. Productos químicos inorgánicos básicos. Estado actual y potencial para nuevos procesos Electroquímicos.

das a escala industrial. Se necesitarán unos diez a veinte años para desarrollar todas las técnicas necesarias.

¿Cómo se podrían producir los productos químicos básicos más importantes a partir de CO₂? En la figura 3 se muestran los productos químicos básicos de la industria química, en general, separados en tres grupos.

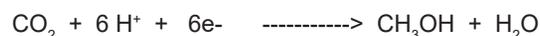
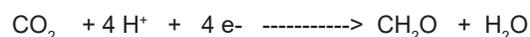
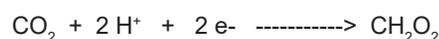
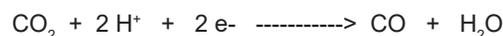
Los productos inorgánicos básicos para la industria son los más grandes en volumen y se producen en el mundo aproximadamente 600 millones de toneladas anuales. Estos productos son la soda cáustica, el hidrógeno, el cloro, el ácido nítrico, el amoníaco y el monóxido de carbono. Los procesos químicos para la producción de estos productos se muestran en la figura 4.

En verde podemos ver los productos resultantes y los procesos en los cuales actualmente se utiliza la electroquímica. En azul, los procesos que no hacen uso de la electroquímica. En rojo se muestran los productos y procesos en los cuales se viene experimentando con electroquímica con electrodo de difusión gaseosa^{9,10}. En este último caso el cátodo, que era normalmente de níquel, ha sido cambiado por un cátodo membrana en el cual se inyecta oxígeno, CO₂ u otros gases. La ventaja de esta tecnología está en la reducción drástica del voltaje de la celda de hasta 30% y, en consecuencia, en un consumo mucho menor de energía eléctrica. La

reacción química se produce en los poros de la membrana y es una reacción trifásica, es decir, de tres medios: uno líquido, uno gaseoso y una superficie electroquímica de contacto.

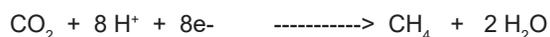
Los productos alifáticos básicos para la industria química se producen en el mundo en un volumen de aproximadamente 100 millones de toneladas anuales. Los productos más importantes son formaldehído, metanol, acetona, óxido de etileno, óxido de propileno, acrilonitrilo, hexametildiamina y ácido adípico. De estos, los candidatos potenciales para una síntesis electroquímica a partir del CO₂ con electrodos de difusión gaseosa son el metanol y el formaldehído. Los alifáticos básicos a base de CO₂ producidos en una combinación de procesos (p. ejemplo: electroquímica y catálisis) son todos los otros mencionados.

Las reacciones electroquímicas fundamentales serían las siguientes:



9. Bulan, A.; Kintrup, J.; Weber R.: "Gas diffusion electrode and method for its production" Europäisches Patent EP 2 398 101 A1 (📄)

10. Kugler, K.: "Electrochemical nitrogen reduction for ammonia", Thesis Dissertation. Aachen University 2016. (📄)



La transferencia de 2,4,6,8 o doce electrones, según el caso, en una reacción electrocatalítica trifásica (gas y líquido sobre una superficie de contacto) depende en muchos casos del tipo y material de la superficie de contacto que transporta la carga eléctrica. El reto para la electroquímica con electrodos de difusión gaseosa está en la obtención y producción de superficies de contacto altamente activas, los así llamados electrocatalizadores, y de membranas estables de alta porosidad y buen sello gaseoso. Estas reacciones no son nada sencillas, pero factibles como lo muestran los primeros resultados ¹¹.

Finalmente, los productos aromáticos básicos de la industria química se producen en el mundo en una cantidad de aproximadamente 70 millones de toneladas anuales. Por la complejidad de estos productos, el camino electroquímico no es el más apropiado. La biotecnología nos ofrece, en cambio, alternativas viables para la obtención biológica de algunos de ellos.

Un ejemplo es la anilina biológica. Hoy se produce a partir del petróleo. Una síntesis que ha desarrollado COVESTRO, una spin-off de la multinacional Bayer, se basa en azúcar sin refinar con muy buenos resultados¹². Otro ejemplo es la síntesis biotecnológica del fenol¹³. En ambos casos, la biotecnología ofrece resultados muy satisfactorios y demuestra que, junto con la electroquímica, el camino de la química biomimética, vale decir, de una química inspirada en la naturaleza que entienda sus mecanismos y trate en lo posible de seguir sus pasos, nos lleva a mejores resultados.

RESUMEN Y PERSPECTIVAS

Con el valioso aporte de la electroquímica y en especial de la electroquímica con electrodos de difusión gaseosa, Alemania podrá alcanzar las metas ambientales trazadas y una producción química neutral en CO₂ para el año 2050. La transición energética hacia energías renovables como la energía eólica y la solar conlleva a grandes fluctuaciones en la red eléctrica dependiendo de si hay viento o brilla el sol. Con síntesis electroquímicas, la industria química podría facilitar una mejor regulación de la red eléctrica. Esto se conseguiría permitiendo que las síntesis electroquímicas funcionen cuando haya sobreproducción de energía eléctrica y dejen de funcionar cuando escasee, de tal modo que se compensaran las diferencias entre la generación y el consumo energético y así se mantendría la estabilidad de la red eléctrica.

Por otro lado, debe reconocerse que el uso de CO₂ como base de carbono para la producción de productos químicos básicos es factible y su desarrollo científico y técnico debe ser prioritario. Muchas soluciones futuras para el cambio de la base de carbono de la industria química lejos del petróleo se encontrarán en la combinación de procesos de síntesis químicas sostenibles, catálisis química, biotecnología y electroquímica.

La “Energiewende” o la transición energética de Alemania causará un cambio muy profundo en la industria química. La electroquímica a partir del CO₂ es una tecnología clave que permitirá alcanzar las metas trazadas. Su renacimiento y desarrollo están en marcha.

Recibido: 8 de octubre de 2018

Aceptado en su forma final: 22 de noviembre de 2018

BIBLIOGRAFÍA ESENCIAL

The Federal Ministry for the Environment, Nature Conservation and Nuclear Safety (BMU) “Climate Action Plan 2050 – Germany’s long-term emission development strategy”. Berlin, 2016 Disponible en línea ([📄](#))

11. Nakata, K.; Ozaki, T.; Terashima, C.; Fujishima, A.; Einaga Y.: “High yield electrochemical production of formaldehyde from CO₂ and seawater” *Angewandte Chemie Int. Ed.* **2014**, *53*, 871-874. ([📄](#))
12. Ernhofer, W.: “COVESTRO produziert erstmals Anilin aus Bio-

- masse” ([📄](#)) y “COVESTRO introduces method to produce plant-based aniline” November,21, 2018. ([📄](#))
13. Bayer Technology Services: “Phenol from the bioreactor”, *Technology Solutions*, 2013. 18-21. ([📄](#)) y ([📄](#))