

Aprovechamiento de la Química Click para soluciones energéticas sostenibles en la transición energética de México

Leveraging Click Chemistry for Sustainable Energy Solutions in Mexico's Energy Transition

Cinthy Figueroa Rodríguez^a, Magaly Netzaye Flores Fernández^b y Alvaro Rafael Pedroza Zapata^c

RESUMEN

La transición energética en México se puede beneficiar a través de la Química Click (QC) para volverla más sostenible. El objetivo de este ensayo explora el potencial de la QC para afrontar las barreras claves en la transición energética de México. La eficiencia y la modularidad de la QC es un procedimiento que se adapta, es rentable y sostenible. La QC aporta a la transición sostenible a través de: Diseño de materiales para el almacenamiento de energía, aplicaciones de energía solar, la producción de hidrógeno verde y favoreciendo aspectos sociales y económicos en el país, impactando las ODS 7 y 13.

Palabras clave: Química Click, Transición energética, ODS

^a Estudiante del Doctorado en Innovación y sustentabilidad en los negocios. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas, Periférico Norte N° 799, Núcleo Universitario Los Belenes, C.P. 45100, Zapopan, Jalisco, México. Correo: cinhya.figueroa7872@alumnos.udg.mx

^b Estudiante de la Maestría en Ciencia de Materiales. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas, Periférico Norte N° 799, Núcleo Universitario Los Belenes, C.P. 45100, Zapopan, Jalisco, México. Correo: magaly.flores5452@alumnos.udg.mx

^c Profesor de asignatura CUCEA. Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de Ciencias Económico Administrativas, Periférico Norte N° 799, Núcleo Universitario Los Belenes, C.P. 45100, Zapopan, Jalisco, México. Correo: alvaro.pedroza@ucea.udg.mx

ABSTRACT

Mexico's energy transition can benefit from Click Chemistry (QC) to make it more sustainable. The objective of this paper explores the potential of QC to address key barriers in Mexico's energy transition. The efficiency and modularity of QC is an adaptive, cost-effective and sustainable process. QC contributes to the sustainable transition through: Design of materials for energy storage, solar energy applications, green hydrogen production and favoring social and economic aspects in the country, impacting SDG 7 and 13.

Keywords: *Click Chemistry, Energy Transition, SDG*

INTRODUCCIÓN

La transición energética global es uno de los desafíos más urgentes de la actualidad, requiriendo esfuerzos colectivos de diversos sectores para alcanzar resultados sostenibles. Es esencial implementar estrategias que mejoren la eficiencia energética, impulsen políticas fiscales favorables a las energías renovables y promuevan la innovación industrial mediante prácticas de economía circular. Además, se deben desarrollar políticas internacionales y marcos de gobernanza multinivel para fomentar la colaboración y asegurar la aceptación social de las nuevas tecnologías energéticas (Hofbauer et al., 2022). Estas acciones son clave para alcanzar los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 7, sobre energía asequible y no contaminante, y 13, sobre acción por el clima.

En México, el compromiso con la energía sustentable se refleja en la meta de lograr un 35% de energías limpias en la matriz energética para 2024 (Secretaría de Energía [SENER], 2023). El país cuenta con ventajas geográficas, como su alto potencial de energía solar, estimado en 5 kWh/m² al día, lo que convierte a la energía solar en una solución viable para el consumo doméstico (Seefoó Luján, 2014). Sin embargo, el aumento de la demanda de electricidad, impulsada por el crecimiento poblacional y la expansión industrial, resalta la necesidad de enfoques innovadores en la generación, almacenamiento y distribución de

energía. Ávila (2018) advierte que los recursos naturales son limitados, mientras que las demandas energéticas de una población en constante crecimiento continúan aumentando, lo que contribuye a la contaminación y al agotamiento de recursos.

La pregunta clave es: ¿Cómo puede la química click (QC) contribuir a la transición energética solar en México?

DESARROLLO

La QC, iniciada por Barry Sharpless a principios de los 2000 (Kolb, Finn y Sharpless, 2001), es una herramienta altamente eficiente y selectiva en la síntesis química, ideal para desarrollar materiales funcionales en la transición energética. La QC permite diseñar materiales avanzados con propiedades específicas, mejorando el almacenamiento de energía, la recolección de energía solar y la catálisis para la producción de hidrógeno verde, contribuyendo significativamente a los objetivos de energía renovable de México.

El país enfrenta el desafío de desarrollar tecnologías de almacenamiento eficientes y sostenibles, ya que la energía solar y eólica, aunque abundantes, son intermitentes y requieren soluciones de almacenamiento avanzadas. Además, la producción de hidrógeno verde, clave en la estrategia de descarbonización, necesita nuevos sistemas catalíticos eficientes y sostenibles. Las comunidades rurales y marginadas, que carecen de acceso a energía asequible, también podrían beneficiarse de estas tecnologías renovables, aunque los altos costos y la limitada escalabilidad de las tecnologías actuales dificultan su adopción generalizada.

La QC, en especial la reacción de ciclo adición azida-alquino catalizada por cobre (I) (CuAAC), ofrece una plataforma versátil para diseñar materiales que aborden estos retos. La reacción CuAAC, pilar de la química click, tiene aplicaciones clave en el ámbito energético:

1. Diseño de materiales para almacenamiento de energía:
 - Facilita la síntesis de polímeros orgánicos porosos (POPs) con alta área superficial y propiedades electroquímicas avanzadas, esenciales para supercondensadores y baterías de iones de litio o sodio.

- Permite la modificación post-sintética de MOFs, incorporando grupos funcionales que incrementan la capacidad de almacenamiento energético y mejoran la estabilidad térmica.

2. Producción de hidrógeno verde:

- Se emplea para desarrollar catalizadores híbridos con centros metálicos activos y fracciones REDOX (componentes de un sistema químico o material que participan en reacciones de óxido-reducción), incrementando la eficiencia en las reacciones de electrólisis del agua, particularmente en la evolución de hidrógeno (HER) y oxígeno (OER).

3. Aplicaciones en energía solar:

- Contribuye al diseño de tintes orgánicos estables para celdas solares sensibilizadas con colorantes (DSSCs), optimizando la absorción de luz solar y la conversión energética.

Su capacidad para crear materiales estables y funcionales, adecuados para el almacenamiento de energía, las células solares y la catálisis, permite optimizar el rendimiento y reducir los costos. Este ensayo analiza cómo la QC puede superar las barreras de la transición energética en México, promoviendo la sostenibilidad ambiental y la resiliencia económica hacia un futuro energético limpio.

PROPUESTA:

1. Diseño de materiales basados en QC para el almacenamiento de energía

La química click (QC) permite la creación de polímeros orgánicos porosos (POPs) y estructuras metal-orgánicas (MOFs) con gran área superficial y tamaños de poro ajustables, ideales para aplicaciones de almacenamiento de energía, como supercondensadores y baterías. Estos materiales permiten almacenar y liberar energía de manera eficiente, abordando la intermitencia inherente a la energía solar y eólica (Liu, Liu y Yang, 2019).

1.1 Polímeros porosos:

La QC puede producir polímeros hiperreticulados con alta conductividad iónica y estabilidad, lo que los hace apropiados para baterías de iones de litio o sodio (Tan y Tan, 2017). La adición de grupos funcionales, como azidas y alquinos, durante la síntesis permite ajustar las propiedades electroquímicas del polímero, mejorando su capacidad y ciclo de vida.

1.2 Estructuras metal-orgánicas (MOFs):

Los MOFs pueden diseñarse para el almacenamiento de energía gracias a su gran superficie interna y su capacidad de incorporar enlazadores conductores (Furukawa et al., 2013). La QC permite la modificación post-sintética de los MOFs, introduciendo grupos REDOX-activos (grupos funcionales o componentes moleculares discretos capaces de participar en reacciones de óxido-reducción) que mejoran sus capacidades de almacenamiento energético (Li, Wang y Zhao, 2019).(ver Figura 1).

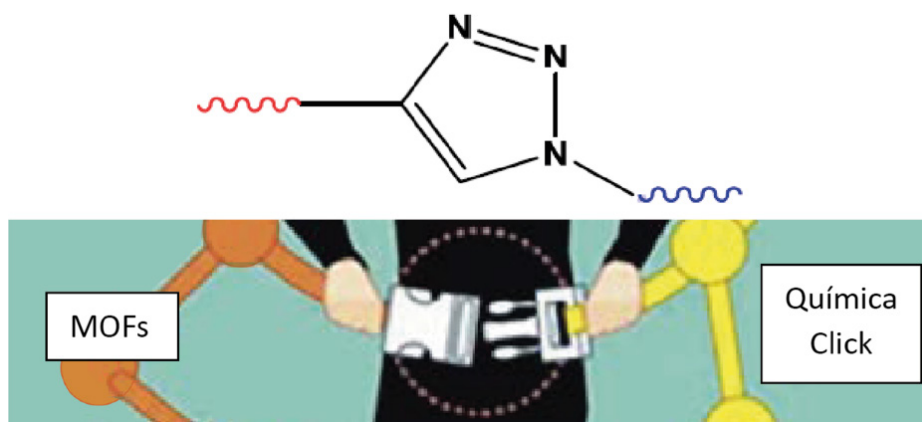


Figura 1. Una coalición de Química Click ↔ MOFs

2. La QC en aplicaciones de energía solar:

México, con sus abundantes recursos solares, tiene el potencial de convertirse en un líder global en energía solar. Sin embargo, la eficiencia de las células fotovoltaicas sigue siendo un factor limitante. La QC ofrece soluciones para desarrollar fotovoltaica orgánica (OPVs) y celdas solares sensibilizadas con colorantes (DSSCs), las cuales son más económicas y respetuosas con el medio ambiente que las células solares tradicionales basadas en silicio.

2.1 Células solares sensibilizadas con colorante (DSSCs):

En los DSSCs, la QC permite la síntesis de tintes orgánicos altamente estables que absorben un espectro más amplio de luz solar, lo que incrementa la eficiencia de conversión de energía solar. La modularidad de la QC facilita el diseño preciso de tintes ajustados a los niveles de energía necesarios para un rendimiento óptimo (Liu et al., 2019).

2.2 Células solares de perovskita:

Las células solares de perovskita son una tecnología prometedora debido a su alta eficiencia y bajo coste de producción. La QC puede modificar la estructura de la perovskita, mejorando su estabilidad y capacidad de absorción de luz, factores esenciales para garantizar la viabilidad a largo plazo en los diversos climas de México (Li et al., 2019).

3. Producción de hidrógeno verde a través de la QC:

Un elemento clave en la transición energética de México es la producción de hidrógeno verde, que puede utilizarse como combustible limpio para el transporte y la industria. Para lograrlo, se necesitan catalizadores eficientes para la electrólisis del agua, que genera hidrógeno y oxígeno. La QC se puede utilizar para diseñar nuevos materiales catalíticos que mejoren la eficiencia y la durabilidad de la producción de hidrógeno (Suh et al., 2011; Zhou, et al., 2013).

3.1 Desarrollo de catalizadores:

La QC permite la creación de marcos moleculares que pueden actuar como catalizadores altamente activos y selectivos para la reacción de evolución de hidrógeno (HER) y la reacción de evolución de oxígeno (OER) (Furukawa et al., 2013). Mediante la incorporación de fracciones REDOX-activas y centros metálicos a través de reacciones “click”, se pueden crear catalizadores eficientes y ambientalmente benignos.

4. Impactos sociales y económicos:

La QC puede acelerar la transición energética en comunidades rurales y desatendidas al desarrollar materiales rentables y escalables para almacenamiento de energía, energía solar y producción de hidrógeno, mejorando su calidad de vida y reduciendo los costos energéticos.

4.1 Creación de empleo:

Las tecnologías basadas en QC impulsarán la creación de empleos en investigación, desarrollo, fabricación e instalación en el sector de energías renovables en México.

Ejemplos concretos de tecnologías que involucran QC y MOFs, así como su relevancia en la transición energética son:

- **Fabricación:**
 - Producción de materiales avanzados basados en QC, como electrodos para baterías de flujo REDOX y catalizadores para celdas de combustible.
 - Síntesis de estructuras metal-orgánicas diseñadas para captura y almacenamiento de CO₂, una tecnología crucial para mitigar emisiones en procesos industriales.
- **Instalación:**
 - Integración de sistemas basados en QC, como supercondensadores y baterías en redes de energía renovable.
 - Uso de módulos de celdas solares DSSCs en techos residenciales y comerciales, particularmente en comunidades rurales donde la red eléctrica es limitada.

4.2 Impactos ambientales y económicos:

Impacto ambiental: La QC contribuye a reducir las emisiones de carbono, combatiendo el cambio climático (Liu et al., 2019).

Impacto económico: La integración de QC reduce los costos de generación y almacenamiento de energía, haciendo las energías limpias más accesibles y competitivas globalmente (Li et al., 2019).

Desafíos: Los costos de producción y la durabilidad de los materiales, junto con la necesidad de una producción sostenible, son obstáculos para su escalabilidad.

CONCLUSIÓN

La química click (QC) es clave para apoyar la transición energética de México mediante el desarrollo de materiales innovadores para almacenamiento de energía, conversión de energía solar y producción de hidrógeno. Su eficiencia y modularidad permiten crear soluciones escalables, rentables y sostenibles, contribuyendo al ODS 7 (energía asequible) y ODS 13 (acción por el clima). La integración de estas tecnologías en la infraestructura energética impulsará el crecimiento económico y mejorará la calidad de vida en México.

BIBLIOGRAFÍA

- Ávila, P. Z. (2018). Sustainability: a strong concept for humanity. *Tabula Rasa*, (28), 409-423.
- Furukawa, H., Cordova, K. E., O’Keeffe, M., & Yaghi, O. M. (2013). The chemistry and applications of metal-organic frameworks. *Science*, 341(6149), 1230444. <https://doi.org/10.1126/science.1230444>
- Hofbauer, L., W. McDowall y S. Pye (2022). Challenges and opportunities for energy system modelling to foster multilevel governance of energy transitions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 161. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112330>
- Kolb, H.C., Finn, M.G. and Sharpless, K.B. (2001), Click Chemistry: Diverse Chemical Function from a Few Good Reactions. *Angew. Chem. Int. Ed.*, 40: 2004-2021.
- Li, P. Z., Wang, X. J., & Zhao, Y. (2019). Click chemistry as a versatile reaction for construction and modification of metal-organic frameworks. *Coordination Chemistry Reviews*, 380, 484-518. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2018.11.006>
- Liu, X., Liu, Y., & Yang, Y. (2019). Porous organic polymers: An emerging platform for advanced adsorption applications. *Journal of Materials Chemistry A*, 7(35), 20097-20102. <https://doi.org/10.3389/fchem.2018.00592>
- Seefóo Luján, J. Luis. (2014). Hacia la sustentabilidad ambiental de la producción de energía en México. *Relaciones. Estudios de historia y sociedad*, 35(139), 343-350. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0185-39292014000300015&lng=es&tlng=es.
- SENER. (2023, 20 de abril). [México cumplirá con su meta del 35% de generación eléctrica con energías limpias en 2024: Consejo Consultivo para la Transición Energética | Secretaría de Energía | Gobierno | gob.mx \(www.gob.mx\)](https://www.gob.mx/energia/documentos/mexico-cumplira-con-su-meta-del-35-de-generacion-electrica-con-energias-limpias-en-2024)
- Suh, M. P., Park, H. J., Prasad, T. K., & Lim, D.-W. (2011). Hydrogen Storage in Metal–Organic Frameworks. *Chemical Reviews*, 112(2), 782–835. doi:10.1021/cr200274s
- Tan, L., & Tan, B. (2017). Hypercrosslinked porous polymer materials: Design, synthesis, and applications. *Chemical Society Reviews*, 46(11), 3322-3356. doi: 10.1039/c6cs00851h
- Zhou, T., Du, Y., Borgna, A., Hong, J., Wang, Y., Han, J., ... Xu, R. (2013). *Post-synthesis modification of a metal–organic framework to construct a bifunctional photocatalyst for hydrogen production. Energy & Environmental Science*, 6(11), 3229. doi:10.1039/c3ee41548a