

ARTÍCULOS

La transformación tecnológica como motor del futuro en la industria química

Technological transformation as a driver of the future in the chemical industry

Gabriel Alonso Gallardo

CORREO: ag223470618@alm.buap.mx

Maestría en Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química (FIQ),
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

Jesús Andrés Arzola Flores

ORCID: [0009-0008-7356-8592](https://orcid.org/0009-0008-7356-8592), jesus.arzolaflores@correo.buap.mx

Facultad de Ingeniería Química (FIQ),
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

María Fernanda Saviñón Flores

ORCID: [0009-0005-9242-0655](https://orcid.org/0009-0005-9242-0655), maria.savinson@alumno.buap.mx

Doctorado en Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería Química (FIQ),
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

Miguel Ángel García-Castro

ORCID: [0000-0003-4459-873X](https://orcid.org/0000-0003-4459-873X), miguel.garciacastro@correo.buap.mx

Facultad de Ingeniería Química (FIQ),
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

Juana Deisy Santamaría Juárez

ORCID: [0000-0003-0935-5468](https://orcid.org/0000-0003-0935-5468), deisy.santamaria@correo.buap.mx

Facultad de Ingeniería Química (FIQ),
Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP)

Recepción: 14/01/25. Aceptación: 25/06/25. Publicación: 18/05/26

RESUMEN

En la industria química, sector encargado de convertir materias primas en productos mediante procesos químicos y físicos, la innovación está presente a través de la síntesis de sustancias naturales, el reemplazo de procesos ineficientes y la producción de nuevas sustancias. Las industrias químicas han buscado alternativas que permitan tomar decisiones más rápidas, como la identificación de rutas de procesos y el diseño de plantas, que garanticen un funcionamiento óptimo y ciclos de desarrollo cortos para los nuevos procesos. El uso de nuevas herramientas de inteligencia artificial puede ayudar a resolver diversas problemáticas y a generar nuevas ideas y predicciones significativas en los procesos.

PALABRAS CLAVE

inteligencia artificial, industria química, innovación,
industria 4.0, procesos químicos y físicos

ABSTRACT

Within the chemical industry, a sector in charge of converting raw materials into chemical products through chemical and physical processes, innovation is present through the synthesis of natural chemical substances, the replacement of inefficient processes and the production of new substances. Chemical industries have sought alternatives that allow for faster decision making, such as the identification process routes and plant design, guarantee optimal performance and short development cycles for new processes. The use of new artificial intelligence tools can help solve various problems, generate new ideas insights and make meaningful predictions in processes.

KEYWORDS

artificial intelligence, chemical industry, innovation,
industry 4.0, chemical and physical processes

Evolución-revolución en la industria química

Antes del gran salto digital, la industria química estaba regida por el desarrollo de la tecnología de la época que gobernaba las áreas de primera necesidad social y política. La introducción de máquinas mecánicas impulsadas por vapor entre los siglos XVIII y XIX marcó la etapa conocida como primera revolución industrial o industria 1.0. La industria química tuvo sus inicios en la producción inicial del ácido sulfúrico con procesos como la cámara de plomo y el desarrollo de materiales esenciales para la industria textil y de construcción (Smil, 2004).

A finales del siglo XIX y principios del XX, con avances en la electrificación, los motores de combustión interna y las líneas de ensamblaje, se abrió paso la llamada segunda revolución industrial o industria 2.0. Aquí los avances en la industria química tuvieron cabida con el proceso de Haber-Bosch para la síntesis del amoníaco, que revolucionó la elaboración de fertilizantes y productos petroquímicos, plásticos, colorantes sintéticos, así como con la introducción de la electroquímica en la producción de aluminio y cloro (Smil, 2004).

No obstante, la llegada de la computación, la electrónica y la automatización de procesos a mitad del siglo XX dio paso a la tercera revolución industrial o industria 3.0. En este periodo ocurre la integración de simulaciones digitales y el desarrollo de modelos computacionales para optimizar la operación de reactores químicos. La implementación de sistemas para la automatización y el control de procesos, así como el desarrollo de nuevos polímeros y nanomateriales, tuvieron un gran auge a esta etapa.

Tan sólo una década atrás, con la adición de la inteligencia artificial (IA), el internet de las cosas (IIOT) y la manufactura aditiva (impresión 3D), surgió la cuarta revolución industrial o industria 4.0. Con el objetivo de aplicar mejor las bases de la ingeniería química, se implementó el monitoreo en tiempo real y la predicción de fallos en reactores mediante el IIOT y el aprendizaje automático (*machine learning*), el diseño de procesos químicos avanzados con ayuda de gemelos digitales buscando la máxima eficiencia con un enfoque sostenible, y la aplicación de la tecnología de impresión 3D para el diseño de dispositivos químicos específicos (Schwab, 2016).

Actualmente, la colaboración entre humanos y máquinas buscando la sostenibilidad en la industria química persigue lo que está dando lugar a la quinta revolución industrial o industria 5.0, con el desarrollo de la industria química basada en la economía circular —reciclaje avanzado—, procesos de materiales biodegradables, carbono neutral, uso de robótica colaborativa, entre otros.

Primeros pasos de la industria química

A lo largo de la historia, la industria química ha pasado por tres tipos de innovaciones (Murmann, 2002). El primer tipo fue la creación de procesos para la fabricación de sustancias químicas que también se encuentran en la naturaleza pero en cantidades limitadas o que es más

barato producirlas en una planta industrial. El proceso Haber-Bosch de fijación del nitrógeno (Ramos Robles, 2015) y el proceso sintético del índigo (Kumar, 2007) son ejemplos del primer tipo de innovación.

El segundo tipo abarca la sustitución de procesos industriales existentes por otros más eficientes mediante el uso de materias primas más baratas o la obtención de productos secundarios más valiosos en el mercado. El proceso de sosa amoniacal Solvay para la obtención de carbonato de sodio para la sustitución del proceso de sosa Leblanc (Rodríguez Guarnizo y Rodríguez Barrantes, 1999) es un ejemplo que se ubica en este tipo de innovación.

Finalmente, el tercer tipo consiste en la creación de sustancias químicas que no existen en la naturaleza. La mayoría de los tintes sintéticos (Al-Sheikh et al., 2014), así como de los productos farmacéuticos modernos (Majee et al., 2023), entran en esta categoría.

La innovación y su importancia en la industria química

Los 118 elementos químicos encontrados en la Tierra hasta la fecha pueden formar muchas más combinaciones estables, comúnmente llamadas moléculas, que las que existían antes de que el ser humano adquiriera conocimientos químicos suficientes para crear compuestos sintéticos de forma deliberada. Este número ilimitado de moléculas posibles es lo que ha dado lugar a continuas innovaciones en la industria química (Murmman, 2002).

En los últimos años, la incorporación de tecnologías digitales, como la IA y el *big data*, ha revolucionado la forma en que se diseñan y optimizan los procesos químicos. Estas tecnologías no sólo han mejorado la eficiencia operativa, sino que también han permitido una mayor precisión en la predicción y el control del comportamiento de las reacciones químicas, lo que ha llevado a una producción más segura y con menos residuos.

La evolución de la industria química también ha estado marcada por un enfoque creciente en la sostenibilidad. El desarrollo de procesos químicos más limpios y la adopción de prácticas de economía circular son ejemplos de cómo los avances en tecnología están ayudando a la industria a reducir su impacto ambiental negativo.

A medida que la industria química continúa integrando tecnologías avanzadas, como la manufactura aditiva y la biotecnología, se espera que éstas sigan impulsando el desarrollo de nuevos materiales y procesos, posicionando así a la industria en la vanguardia de la innovación tecnológica en el siglo XXI.

Desafíos actuales de la industria química

La tendencia actual en la industria química se dirige hacia el uso de energías renovables, la disminución en el uso de materias primas y la reutilización de desechos reciclados o de reuso en las cadenas de suministro de materias primas, ya que, de lo contrario, sucederá lo inevitable: la industria química podría convertirse en el mayor promotor en la emisión

de gases de efecto invernadero para el 2030 (Artz et al., 2017; Kätelhön et al., 2019; Lapkin, 2018; Sass et al., 2018). Sin embargo, los recursos renovables varían con respecto al tiempo y el espacio, lo que exige un funcionamiento flexible y nuevos paradigmas para identificar nuevas rutas de procesos y diseño de plantas híbridas (Sass et al., 2018).

Al mismo tiempo, las empresas químicas se enfrentan a una competencia cada vez mayor y deben garantizar su funcionamiento óptimo y ciclos de desarrollo cortos para los nuevos procesos (Schweidtmann et al., 2021). Facilitar este cambio implica diversas dificultades, ya que los métodos convencionales de síntesis y operación de procesos pueden no ser suficientes. Para tomar mejores decisiones en entornos complejos se desarrollan y optimizan modelos basados en la comprensión de mecanismos (Schweidtmann et al., 2021). Sin embargo, el desarrollo de modelos físicos y químicos es costoso y muchos fenómenos no pueden describirse en su totalidad a través de modelos computacionalmente manejables (Schweidtmann et al., 2021).

En la actualidad muchas empresas de la industria química están conscientes del impacto de estos retos de diferentes maneras, pero comparten la preocupación por eliminar los cuellos de botella en la producción, con el fin de reducir el tiempo de inactividad en una planta química, la incidencia de fallos en los equipos y los costos de mantenimiento, así como ampliar la disponibilidad de la planta y, en general, mejorar la eficiencia y visibilidad (Linchevski, 2021).

Es aquí donde las nuevas herramientas de IA, aún en desarrollo, pueden ayudar a resolver estos problemas. Las plantas químicas ya disponen de una gran cantidad de datos gracias a sensores, dispositivos inteligentes e informes periódicos de toda la planta. Ahora están adquiriendo herramientas basadas en IA que les ayuden a saber cómo usar de mejor manera los datos para poder generar nuevas ideas y predicciones significativas en los procesos (Linchevski, 2021).

Las soluciones de aprendizaje automático (ML) y aprendizaje profundo pueden hacer uso de conjuntos de datos masivos, que son demasiado grandes para las capacidades humanas. Éstos permiten detectar patrones antes de que una persona sea capaz de identificarlos, los cuales pueden ser utilizados para tomar decisiones o hacer predicciones precisas sobre tendencias futuras, posibles incidentes en las plantas, así como riesgos y oportunidades emergentes dentro del mercado o del proceso con el que se esté trabajando (Linchevski, 2021).

Industria 4.0: metamorfosis entre industria química e IA

La cuarta revolución industrial, que actualmente la industria química está adoptando, se suele denominar *industria 4.0* o la *era de internet*, la cual se define como una combinación de tecnología electrónica, información, comunicación y lo digital que impulsa la intensidad de la producción industrial (Dadhaneeya et al., 2023). La robótica, la IA, el IoT, la realidad aumentada, el

big data, el cómputo en la nube, la ciberseguridad y el GPS (*global positioning system*) son algunas de las tecnologías que figuran en la industria 4.0 (Bai et al., 2020).

Hoy en día, la adopción de diversas tecnologías avanzadas, como la IA, el IoT, el *big data* y la robótica, se ha utilizado en diferentes sectores de la industria química con el objetivo de automatizar procesos. Las máquinas inteligentes con capacidades de IA y ML ejecutan muchas tareas, incluidas la clasificación, el envasado y el control de calidad (Dadhaneeya et al., 2023). Esto garantiza una producción uniforme y segura al aumentar la productividad, reducir los costos laborales e incrementar la precisión. El avance en la industria 4.0 ofrece grandes oportunidades para establecer una producción sostenible (Manavalan y Jayakrishna, 2019).

Tradicionalmente, la IA ha significado la imitación de la inteligencia humana mediante ordenadores; sin embargo, el término ha empezado a abarcar el *big data*, el cual consiste en una gran cantidad de datos con una alta variedad y complejidad que se recopilan y analizan de forma masiva (Olsen y Tomlin, 2019). Las aplicaciones de la IA en la industria química pueden clasificarse en tres categorías:

El primer tipo es la *IA descriptiva*, la cual consiste en el reconocimiento de imágenes u objetos. Permite aumentar las habilidades de categorización de los trabajadores o, alternativamente, que los robots automaticen este tipo de tareas de reconocimiento de patrones (Olsen y Tomlin, 2019). Las operaciones con sensores que generan grandes cantidades de datos son utilizadas con técnicas de IA para descubrir relaciones desconocidas hasta ahora entre las condiciones de procesamiento y los resultados, y esta información es utilizada para mejorar el diseño y el control de los procesos. Algunos casos similares entran en esta categoría en la descripción de algún estado existente.

El segundo tipo es la *IA predictiva*. Cuando se comprenden las relaciones causa-efecto se obtienen beneficios al predecir resultados futuros y prescribir acciones actuales basadas en esas predicciones (Olsen y Tomlin, 2019). Las operaciones con sensores que envían datos continuamente a un ordenador, pero también algoritmos avanzados que predicen la vida útil restante basándose en las lecturas actuales y pasadas de los sensores, entran en esta segunda categoría.

Finalmente, el tercer tipo es la *IA prescriptiva*. Las acciones operativas son generadas por un *software* capaz de recomendar acciones específicas para alcanzar un objetivo determinado (Olsen y Tomlin, 2019). Las operaciones donde el ordenador utiliza datos de entrenamiento y técnicas estadísticas para aprender a tomar buenas decisiones sin depender de un modelo específico se ubican en esta última categoría.

Nuevo paradigma de la industria química en el siglo XXI

Los expertos anticipan el inicio de la quinta revolución industrial, que integra diversas técnicas en una única infraestructura. Esta revolución es radicalmente diferente, ya que es más

que un mero cambio tecnológico. Devuelve al humano al centro de operaciones a través de un sistema humano-cibernético-físico para la creación de valor (Xu et al., 2019).

La aparición de la industria 5.0 surge de la observación o la creencia de que la industria 4.0, aunque se centra en gran medida en la digitalización y las tecnologías basadas en IA para impulsar la eficiencia y la adaptabilidad de la producción, descuida en cierta medida los principios fundamentales de la equidad social y la sostenibilidad (Attaran et al., 2024). En consecuencia, la noción de la industria 5.0 presenta una alternativa en enfoque y en perspectiva, subrayando la importancia de la investigación y la innovación para ayudar a la industria a servir a la humanidad de forma sostenible dentro de los límites del planeta (European Commission y Directorate-General for Research and Innovation, 2021).

Esta iniciativa aborda objetivos contemporáneos de la Unión Europea, como la mitigación de la crisis climática, la gestión de emergencias planetarias y la lucha contra las tensiones sociales. El principal objetivo de la industria 5.0 es que la industria pase de centrarse en el crecimiento impulsado por la tecnología a una economía sostenible cuyo núcleo sea el progreso y el bienestar humano (Panter et al., 2024). Este cambio pretende equilibrar el desarrollo económico y la responsabilidad social (European Commission y Directorate-General for Research and Innovation, 2022).

Mientras que la industria 4.0 se centra más en la computación de punta, la industria 5.0 hace hincapié en la colaboración entre humanos y robots para la eficiencia de la producción. La nueva tendencia ha evolucionado hacia un modo de trabajo más centrado en el ser humano y personalizado, en lugar de sustituirlo (European Commission y Directorate-General for Research and Innovation, 2021; Nahavandi, 2019).

Comprender los factores que incitan la transición de la industria 5.0 no sólo es revelador, sino una necesidad crucial para las empresas que buscan mantenerse competitivas y posicionadas de manera estratégica. Desafortunadamente, este conocimiento está muy poco desarrollado, lo que resulta en la pérdida de oportunidades de inversión informada, innovación estratégica y mitigación proactiva de riesgos durante la transformación digital industrial (Ghobakhloo et al., 2024). En otras palabras, la escasez de información en esta área representa un desafío significativo para las empresas que buscan el éxito sostenido en un panorama empresarial dinámico y en constante evolución. En consecuencia, este desafío pone en peligro la capacidad de las empresas para adaptar sus estrategias de digitalización a la industria futura prevista por la industria 5.0, lo que dificulta el progreso hacia un panorama transformador y armonizado.

Referencias

- Al-Sheikh, M., Medrasi, H. Y., Usef Sadek, K. y Mekheimer, R. A. (2014). Synthesis and spectroscopic properties of new azo dyes derived from 3-ethylthio-5-cyanomethyl-4-phenyl-1,2,4-triazole. *Molecules*, 19(3), 2993-3003. <https://doi.org/10.3390/molecules19032993>
- Artz, J., Müller, T. E., Thenert, K., Kleinekorte, J., Meys, R., Sternberg, A., Bardow, A. y Leitner, W. (2017). Sustainable conversion of carbon dioxide: an integrated review of catalysis and life cycle assessment. *Chemical Reviews*, 118(2), 434-504. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00435>
- Attaran, S., Attaran, M. y Celik, B. G. (2024). Digital twins and industrial Internet of Things: uncovering operational intelligence in industry 4.0. *Decision Analytics Journal*, 10, 100398. <https://doi.org/10.1016/j.dajour.2024.100398>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G. y Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: a sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229, 107776. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- Dadhaneeya, H., Nema, P. K. y Arora, V. K. (2023). Internet of things in food processing and its potential in industry 4.0 era: a review. *Trends in Food Science & Technology*, 139, 104109. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.07.006>
- European Commission y Directorate-General for Research and Innovation (2022). *Industry 5.0, a transformative vision for Europe. Governing systemic transformations towards a sustainable industry*. ESIR Policy Brief No. 3. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/web/eu-law-and-publications/publication-detail/-/publication/38a2fa08-728e-11ec-9136-01aa75ed71a1>
- European Commission y Directorate-General for Research and Innovation (2021). *Industry 5.0. Towards a sustainable, human-centric, and resilient European industry*. Publications Office of the European Union. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/468a892a-5097-11eb-b59f-01aa75ed71a1>
- Ghobakhloo, M., Mahdiraji, H. A., Iranmanesh, M. y Jafari-Sadeghi, V. (2024). From Industry 4.0 digital manufacturing to Industry 5.0 digital society: a roadmap toward human-centric, sustainable, and resilient production. *Information Systems Frontiers*, 1-33. <https://doi.org/10.1007/s10796-024-10476-z>
- Kätelhön, A., Meys, R., Deutz, S., Suh, S. y Bardow, A. (2019). Climate change mitigation potential of carbon capture and utilization in the chemical industry. *Proceedings of the National Academy Sciences*, 116(23), 11187-11194. <https://doi.org/10.1073/pnas.1821029116>
- Kumar, P. (2007). Plantation science: improving natural indigo in colonial India, 1860-1913. *The British Journal for the History of Science*, 40(4), 537-565. <https://doi.org/10.1017/S0007087407000027>

- Lapkin, A. A. (2018). Chemical engineering science and green chemistry – the Challenge of Sustainability. En A. Lapkin (ed.), *Handbook of Green Chemistry* (vol. 12: Green Chemical Engineering, pp. 1-16). Wiley-VCH. https://books.google.com.mx/books?id=7ExjDwAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=o#v=onepage&q&f=false
- Linchevski, C. (2021). How to leverage AI to benefit the chemical industry. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(12), 2040-2044. <https://doi.org/10.1002/cite.202100099>
- Majee, S., Shilpa, Sarav, M., Banik, B. K. y Ray, D. (2023). Recent advances in the green synthesis of active N-heterocycles and their biological activities. *Pharmaceuticals*, 16(6), 873. <https://doi.org/10.3390/ph16060873>
- Manavalan, E. y Jayakrishna, K. (2019). A review of Internet of Things (IoT) embedded sustainable supply chain for industry 4.0 requirements. *Computers & Industrial Engineering*, 127, 925-953. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.11.030>
- Sass, S., Faulwasser, T., Hollermann, D. E., Kappatou, C. D., Sauer, D., Schütz, T., Shu, D. Y., Bardow, A., Gröll, L., Hagenmeyer, V., Müller, D. y Mitsos, A. (2018). Model compendium, data, and optimization benchmarks for sector-coupled energy systems. *Computers & Chemical Engineering*, 113, 106760. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2020.106760>
- Murmann, J. P. (2002). Chemical industries after 1850. *Oxford Encyclopedia of Economic History*. Oxford University Press. <https://www.alexandria.unisg.ch/entities/publication/aabb2c3a-69e9-4afo-95a3-b64e112e0d9b>
- Nahavandi, S. (2019). Industry 5.0—A human-centric solution. *Sustainability*, 11(16), 4371. <https://doi.org/10.3390/su11164371>
- Olsen, T. L. y Tomlin, B. (2019). Industry 4.0: opportunities and challenges for operations management. *Manufacturing & Service Operations Management*, 22(1), 113-122. <https://doi.org/10.1287/msom.2019.0796>
- Panter, L., Leder, R., Keiser, D. y Freitag, M. (2024). Requirements for human-machine interaction applications in production and logistics within Industry 5.0 – a case study approach. *Procedia Computer Science*, 232, 1164-1171. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.114>
- Ramos Robles, M. D. (2015). Proceso de Haber-Bosch. Síntesis de amoníaco. *MoleQla: revista de Ciencias de la Universidad Pablo de Olavide*, (17), 7-3. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5015875>
- Rodríguez Guarnizo, J. y Rodríguez Barrantes, D. (1999). Los procedimientos clásicos de fabricación de la sosa. *Ensayos. Revista de la Facultad de Educación de Albacete*, (14), 293-310. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2292804>
- Schwab, K. (2016). The fourth industrial revolution. *World Economic Forum*, sp. <https://www.weforum.org>

- Schweidtmann, A. M., Esche, E., Fischer, A., Kloft, M., Repke, J.-U., Sager, S. y Mitsos, A. (2021). Machine learning in chemical engineering: a perspective. *Chemie Ingenieur Technik*, 93(12), 2029-2039. <https://doi.org/10.1002/cite.202100083>
- Smil, V. (2004). *Enriching the earth. Fritz Haber, Carl Bosch, and the Transformation of World Food Production*. MIT Press.
- Xu, Y., Sun, Y., Liu, X. y Zheng, Y. (2019). A digital-twin-assisted fault diagnosis using deep transfer learning. *IEEE Access*, 7, 19990-19999. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2890566>