

Manufactura aditiva, nanopartículas y catálisis, el impacto de estos procesos en el desarrollo sostenible de la industria

Lucy-Catherine Daza-Gómez¹, Rocío Redón²

¹ División de Ingeniería Mecánica e Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México

² Laboratorio de materiales bio y catalíticos nanoestructurados. Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México
cgomez.nanoscience@gmail.com

Resumen

La manufactura aditiva y la catálisis están estrechamente relacionadas en la actualidad, ya que a través de la técnica de impresión 3D se pueden potencializar desde varios puntos de vista el campo de la catálisis, por ejemplo: en el diseño y fabricación de catalizadores personalizados, optimización de la estructura catalítica, fabricación de microreactores y reparación de catalizadores desgastados. Estos procesos pueden mejorar la eficiencia y selectividad de las reacciones catalizadas en áreas como la síntesis química, la industria de la energía y la producción farmacéutica. La integración de la manufactura aditiva en la catálisis tiene un gran potencial para mejorar la eficiencia, sostenibilidad y adaptabilidad en la producción química.

Palabras clave

Catálisis, manufactura aditiva, industria.

La catálisis

La catálisis ha sido clave en el desarrollo y avance de la industria moderna. Si bien se

dice que Berzelius, en 1835, fue la primera persona en utilizar el término para describir una "fuerza misteriosa", el término real "catálisis" se deriva de la fermentación del vino que se remonta aproximadamente al 5000 a.C. La catálisis enzimática ocurre cuando enzimas catalizan la reacción que convierte selectivamente la glucosa en etanol. Aunque la primera influencia importante de la catálisis en la industria comenzó alrededor de 1915, con la aparición a escala industrial del método Haber-Bosch, proceso usado para la síntesis de amoníaco ($N_{2(g)} + 3H_{2(g)} \xrightarrow{Fe^{3+}} 2NH_{3(g)}$). Esta reacción (crítica en esa época y útil en la actualidad) puede realizarse más rápidamente con hierro como aditivo en condiciones estándar. A partir de entonces, el avance de la catálisis ha estado estrechamente ligada con su aplicación al mundo industrial, como por ejemplo a la síntesis de ácido nítrico (sustancia vital en procesos industriales) y la producción de combustibles sintéticos, entre otras aplicaciones.

En términos químicos, la catálisis se refiere a la modificación de la velocidad de una reacción al reducir la temperatura o la presión requeridas para iniciarla mediante el uso de una sustancia que no se consume en la reacción, es decir, un catalizador. Según la definición actual de la American Chemical Society (ACS), el catalizador disminuye la energía de activación de la reacción, lo que resulta en un aumento de la velocidad de la reacción¹ (Figura 1).

A la catálisis la podemos entender con un sencillo ejemplo (Figura 1). Si pensamos que vamos en nuestro coche de un punto A a un punto B puede haber dos posibles caminos. Uno, el más largo, implica subir y bajar una montaña (camino azul), mientras que en el otro camino (camino rojo) hay que atravesar un túnel, lo cual hace que el camino sea más corto. Si tomamos el camino azul, en términos de la cantidad de gasolina (energía), gastaremos más gasolina, en comparación con el camino rojo, más corto. Es decir, si tomamos el camino rojo, no solamente ahorraremos energía (gasolina), sino que, en términos de tiempo, también llegaremos más rápido. Lo mismo ocurre en las reacciones químicas, el punto A son los reactivos y el punto B los productos. Si queremos llegar de los reactivos a los productos también existen dos rutas, una corta, rápida y de menor consumo energético, y la otra todo lo contrario. ¿Cómo se consigue en química, que los reactivos se vayan por la ruta más favorable? Pues al igual que en la imagen, a través de un túnel. En química “ese túnel” es llamado un **catalizador**, el cual reduce la energía de activación y acelera la velocidad de la reacción. Otra ventaja de “ese túnel” es que pueden pasar muchos coches a través de él, cumpliendo el mismo objetivo que ya mencionamos anteriormente. De manera

análoga, en las reacciones químicas donde se usa un catalizador (nuestro túnel), este puede reusarse muchas veces, acelerando numerosas reacciones químicas. En el ejemplo los autos son moléculas, las cuales pueden pasar una y otra vez por ese túnel sin alterarlo. El catalizador, entonces, nos proporciona una ruta alternativa para la reacción química.

Lo anterior es descrito de forma ideal, sin embargo, en la realidad, los catalizadores generalmente pierden su actividad a medida que pasan a través de ellos muchas moléculas. Es decir que a medida que los reusamos, ese túnel comienza a colapsarse, impidiendo que más moléculas puedan pasar fácilmente. Este es uno de los principales desafíos en el campo de la catálisis, desarrollar catalizadores estables a lo largo del tiempo, es decir, catalizadores cuya actividad no disminuya en ciclos consecutivos de reacción, como se discutirá más adelante.

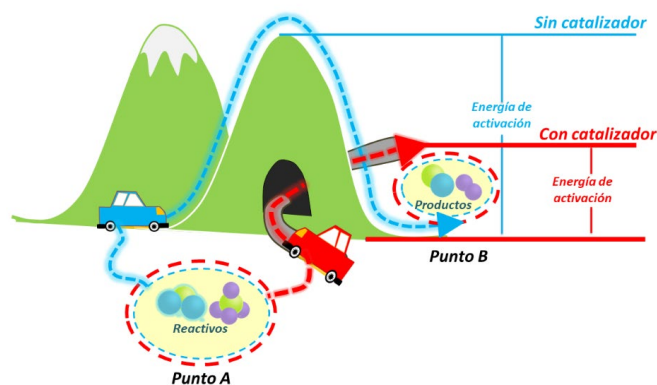


Figura 1. Representación esquemática de la definición de catálisis

El campo de la catálisis se puede clasificar de forma general en: **la catálisis homogénea** y **la catálisis heterogénea**. En la catálisis homogénea el catalizador se encuentra en la misma fase que los reactivos. En general, todos los componentes están presentes en forma de gas o están contenidos en una sola fase líquida (Figura 2). Por otro lado,

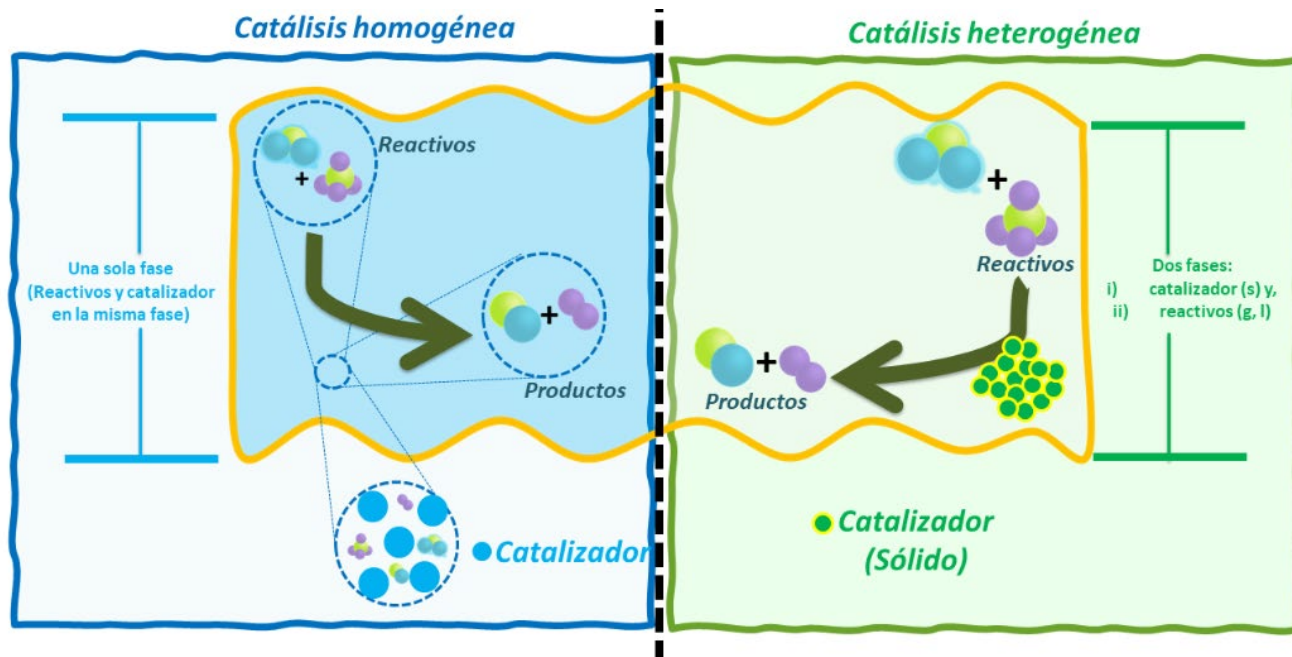


Figura 2. Catálisis homogénea vs. catálisis heterogénea

en la **catálisis heterogénea** el catalizador se encuentra en una fase diferente de los reactivos, lo cual implica la presencia de dos fases. Los ejemplos típicos involucran un catalizador sólido en presencia de reactivos líquidos o gaseosos².

En la industria se utilizan ambos tipos de catálisis, sin embargo, la catálisis heterogénea es la principal fuerza impulsora en muchos procesos industriales críticos. Esto se debe a que, además de proporcionar las características exclusivas de un catalizador (aceleración de la velocidad de reacción), también ofrece otras ventajas en comparación con la catálisis homogénea, por ejemplo:

1. **Reutilización del catalizador:** El catalizador sólido puede ser recuperado y reutilizado en múltiples ciclos de reacción, lo que resulta en una mayor eficiencia y rentabilidad en los procesos a nivel industrial. Además, esto contribuye a una minimización en la producción de residuos³.
2. **Pérdida de la fase activa:** La fase activa es la parte del catalizador que acelera

la reacción, en el caso de un catalizador sólido, al estar separado de la fase donde se encuentran los reactivos y productos, se evita la migración de la fase activa a la disolución o el medio de reacción. Esto es importante para mantener la estabilidad y la eficacia del catalizador a lo largo del tiempo^{3,4}.

3. **Recuperación del catalizador sólido:** En los procesos de catálisis heterogénea el catalizador sólido puede ser fácilmente separado de la mezcla final de reacción, lo que facilita su recuperación y permite su reutilización o tratamiento adecuado. Esto simplifica los procesos industriales y contribuye a la sostenibilidad. Como resultado de estas ventajas, la catálisis heterogénea está involucrada en la producción del 80 % de todos los productos químicos en el mundo actualmente. Su aplicación extensiva en la industria demuestra su importancia para el desarrollo de procesos eficientes, económicos y respetuosos con el medio ambiente².

Las nanopartículas y la catálisis

En la catálisis heterogénea, un factor crucial es el área superficial de los catalizadores sólidos. Esto se debe a la interacción entre el catalizador y los reactivos que ocurre en la superficie del sólido; entre más área superficial del catalizador, se esperará una mayor interacción con los reactivos, y por ende mayor actividad hacia la conversión de los productos. Entonces, ¿cómo lograr que los catalizadores tengan una gran área superficial? Esto se logra reduciendo el tamaño de las partículas que conforman el sólido. Esto puede sonar contradictorio, ¿verdad? Entonces, ¿cómo es posible que al disminuir el tamaño de las partículas se aumente el área superficial? La Figura 3 nos ilustra mejor esta aparente contradicción:

Consideremos un cubo cuyos lados miden 4 cm. Si calculamos su superficie ($S = A \cdot 6$, donde A es el área, recordando que el área de un cubo es $L \cdot L$, donde L es la longitud de un lado), obtenemos un valor de 96 cm^2 . Ahora, si dividimos este cubo en ocho cubos de 2 cm de cada lado, cada uno de estos nuevos ocho cubos tendrá una superficie de 24 cm^2 ($S = 4 \cdot 6$). Al sumar las superficies de los ocho cubos obtendremos un total de 192 cm^2 ($24 \text{ cm}^2 \cdot 8 = 192 \text{ cm}^2$). Si continuamos dividiendo uno de los cubos anteriores nuevamente en ocho partes más pequeñas, tendremos un total de 64 cubos con una longitud de lado de 1 cm. La superficie total de todos estos cubos suma 384 cm^2 . Si notamos en la imagen, el volumen no cambia, sigue siendo 64 cm^3 , pero la

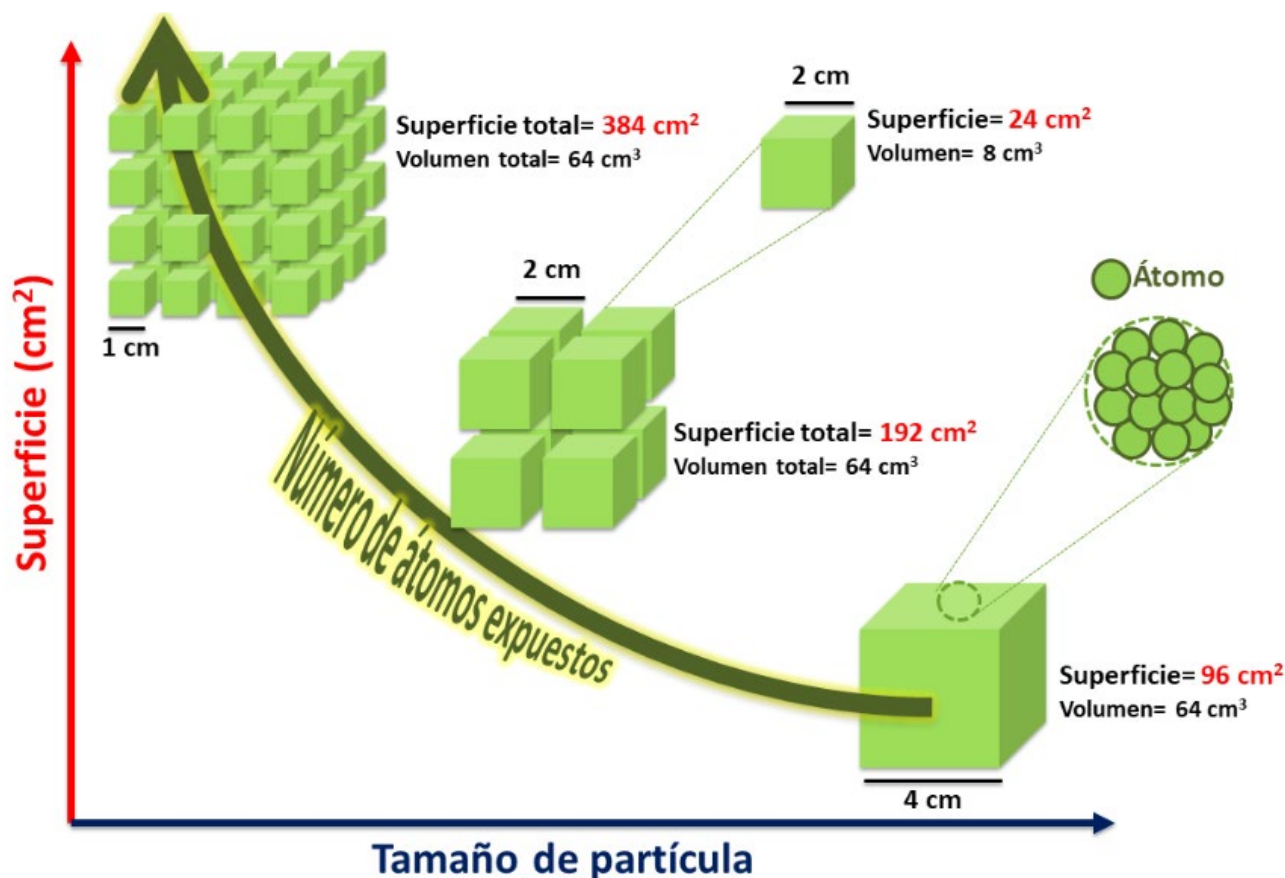


Figura 3. Efecto de la disminución del tamaño de partícula en el área superficial

superficie total sí cambió, aumentando a medida que el cubo inicial se iba partiendo en cubos cada vez más pequeños. Es decir, al disminuir el tamaño de los cubos, el área superficial aumentó. Esto mismo ocurre con una partícula de un sólido catalizador: a medida que hacemos más pequeña esa partícula, mayor será el área superficial, y por ende habrá más interacción con los reactivos. Lo anterior ocurre debido a que se reduce el tamaño de los cubos y se generan más caras adicionales, que antes estaban escondidas. Esta relación demuestra que a medida que disminuimos el tamaño de los cubos, la superficie disponible aumenta.

En el caso de los catalizadores sólidos hablamos de partículas. En estos casos, en la superficie de las partículas están presentes átomos. Si asumimos que un cubo es una partícula de un sólido catalizador, cada cara del cubo contiene átomos y que cada átomo tiene un tamaño de 1 cm (aunque en realidad los átomos son mucho más pequeños), entonces en cada cara habría 16 átomos, y si son 6 caras en el cubo, tendrías 96 átomos en la superficie. Y seguimos con el ejercicio de seguir dividiendo el primer cubo en cubos más pequeños, iremos exponiendo más átomos en la superficie. Este ejemplo nos ilustra cómo la superficie está directamente relacionada con la cantidad de átomos expuestos en ella. Aplicando este ejemplo de los cubos a partículas compuestas por millones de átomos, a medida que se reduce el tamaño de las partículas, específicamente en el intervalo de los nanómetros, aumenta el número de átomos que se encuentran en la superficie. Esto es especialmente relevante en el campo de la catálisis, ya que implica una mayor área para que los catalizadores reaccionen con los compuestos y aceleren las reacciones químicas. Por lo tanto, uno de

los enfoques de la catálisis heterogénea es obtener catalizadores con tamaño de partícula nanométrico (con dimensiones entre 1 y 100 nm), este tipo de partículas son conocidas como *nanoestructuras*, por ejemplo, las *nanopartículas esféricas*. Cuando se reduce el tamaño de las partículas a la escala nanométrica no solo se incrementa el área superficial, sino que también se pueden manifestar otras propiedades que no se observan en partículas a gran escala (*bulk*).

Sin embargo, trabajar con nanopartículas también conlleva desafíos, uno de ellos es que las nanopartículas tienden a aglomerarse. Este fenómeno ocurre debido al tamaño de las partículas, que al ser tan pequeñas, poseen gran energía superficial, y para disminuirla (todo tiende a la mínima energía) las nanopartículas tienden a unirse entre sí (aglomerarse) y alcanzar una mayor estabilidad. Por lo cual, se esconden átomos (dejando menos átomos expuestos en la superficie) y, por ende, disminuyen la interacción con los reactivos. Otro problema asociado con las nanopartículas es la dificultad de separarlas del medio de reacción. Debido a su tamaño diminuto se requieren técnicas de ultrafiltración o ultracentrifugación, lo cual puede aumentar los costos y el tiempo de los procesos.

Una forma de solucionar estas desventajas es anclar las nanopartículas en un soporte, como cuando colgamos un cuadro a la pared y lo fijamos en una superficie (Figura 4). De esta manera, se siguen manteniendo las propiedades innatas de las nanopartículas y, al mismo tiempo, evitamos que se junte (aglomeren); además permite que se pueda recuperar más fácilmente el catalizador del medio de reacción. De esta manera no se necesitarían técnicas

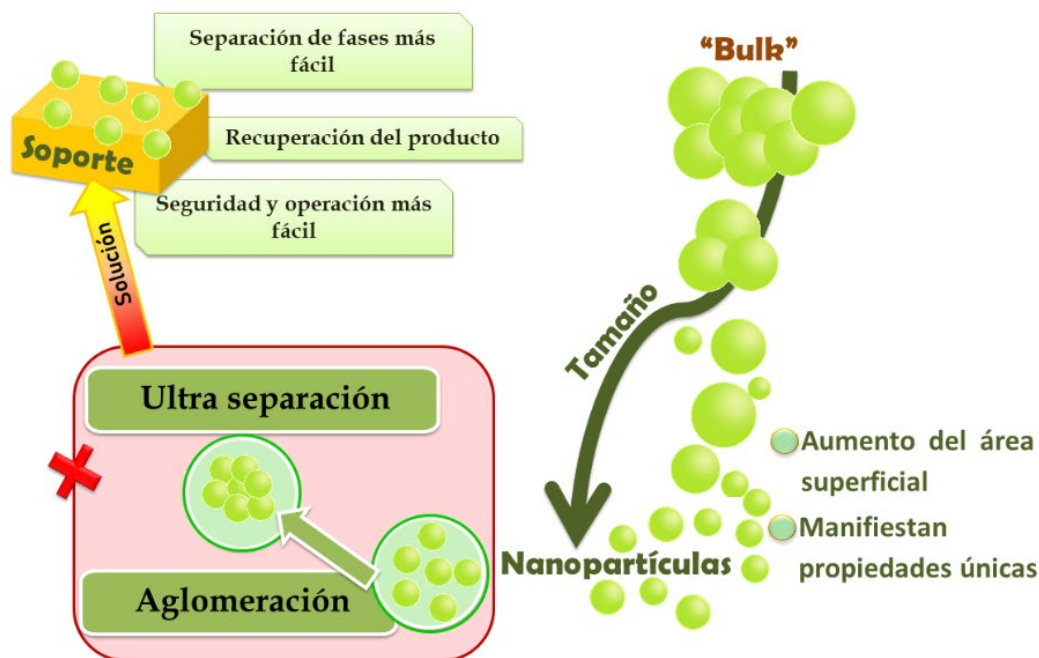


Figura 4. Efecto de la disminución del tamaño de partícula en las propiedades físicas y químicas, los problemas asociados a este proceso y la solución a estos

de ultra separación para recuperar el catalizador, lo que puede reducir costos y tiempo en los procesos catalíticos.

A este tipo de materiales, en el cual se anclan nanopartículas a un soporte, se les conoce como *catalizadores soportados*. El soporte puede ser inerte o tener una participación cooperativa en la reacción catalítica. Su participación o no en la reacción química dependerá de la aplicación en específico, como el tipo, medio y condiciones de reacción. En la literatura podemos encontrar muchos tipos de soporte, como los óxidos metálicos mesoporosos, la sílice mesoporosa, las estructuras metal-orgánicas (MOFs), el carbón activado, los polímeros, las arcillas y las zeolitas, entre otros⁵ (Figura 5). Entre los soportes más comunes se encuentran los óxidos metálicos y no metálicos, como el dióxido de silicio (SiO_2), el trióxido de aluminio (Al_2O_3) y el dióxido de titanio (TiO_2). Algunos de estos soportes tienen como

característica su gran área superficial, estabilidad térmica y mecánica y, en muchos casos, inercia química. Es importante que el soporte utilizado presente una buena resistencia mecánica, para mantener la actividad de los catalizadores y garantizar su funcionamiento óptimo durante las condiciones de reacción. Esto es especialmente importante en situaciones en las que los catalizadores soportados se someten a agitación vigorosa u otros factores que podrían causar desgaste, como presiones y temperaturas elevadas.

Los catalizadores soportados siguen presentando algunos desafíos importantes, como una síntesis costosa, la difícil recuperación de los mismos y la lixiviación de la fase activa. En este sentido, una nueva generación de catalizadores soportados han surgido, a raíz del desarrollo y rápida evolución de la *manufactura aditiva* (mejor conocida como *impresión 3D*). Estos catalizadores soportados son conocidos como

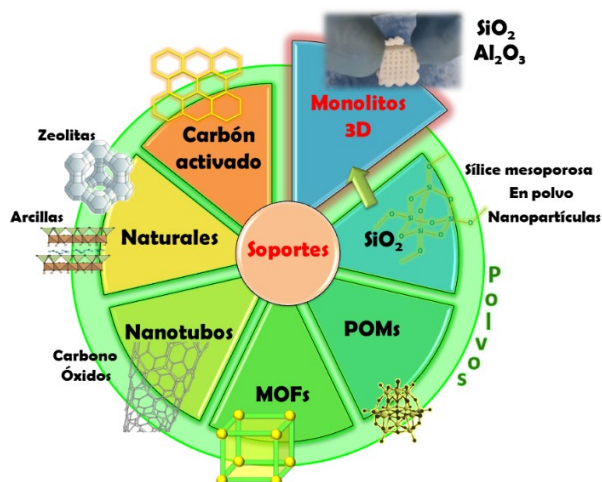


Figura 5. Tipos de soportes más utilizados en la catálisis heterogénea

catalizadores monolíticos y han despertado interés recientemente debido a sus ventajas en comparación con los soportes en polvo o granulados. Estos monolitos se caracterizan por su facilidad de extracción del medio de reacción (debido a su tamaño), como se muestra en la figura 6.

El fuerte vínculo entre la catálisis y la industria

Como ya se mencionó anteriormente, la catálisis ha evolucionado significativamente desde su primera definición, hace casi

200 años. Debido al impacto positivo que ha tenido este campo en cuanto a la reducción de la temperatura y la presión de una reacción se han llegado a reducir los costos de operación de los procesos industriales. La catálisis ha desempeñado un papel fundamental en la obtención de una gran mayoría de productos utilizados diariamente. Se estima que alrededor del 90 % de todos los productos químicos usados industrialmente se producen con la ayuda de catalizadores y se espera que esta cifra siga aumentando año tras año⁶. La evolución de la catálisis siempre ha estado estrechamente ligada al crecimiento y evolución de la industria a lo largo de las distintas revoluciones industriales (Figura 6), principalmente desde la Revolución 2.0 (en la cual aparece la catálisis).

Después de la Revolución Industrial 1.0, en el cual se introdujo la energía de vapor y la mecanización de la producción, apareció la Revolución Industrial 2.0 que estuvo marcada por el descubrimiento y desarrollo de la electricidad, el gas y el petróleo, junto con avances en la industria del acero, la

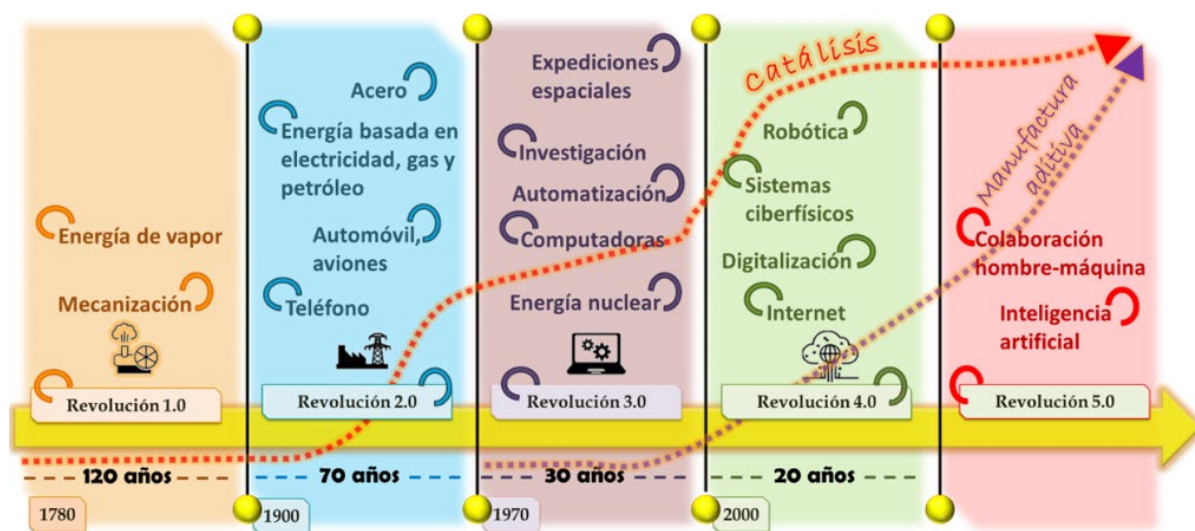


Figura 6. Crecimiento de la catálisis y aparición de la manufactura aditiva a lo largo de las revoluciones industriales

síntesis química y las comunicaciones a través del telégrafo y el teléfono. Posteriormente, la Revolución Industrial 3.0 trajo consigo la energía nuclear, la electrónica, las telecomunicaciones, las computadoras, la automatización y la exploración espacial, así como la biotecnología e investigación.

La Revolución Industrial 4.0 (I 4.0), también conocida como la era de la ciberindustria, se caracterizó por sistemas de digitalización, ciberfísicos y de robótica, cuyo enfoque estaba en las energías renovables y la interconexión inteligente de máquinas y procesos a través de Internet de las Cosas (IoT), Internet Industrial de las Cosas (IIoT), robótica colaborativa, big data, computación en la nube, fabricación virtual e *impresión 3D*. **La digitalización** de los procesos industriales ha sido uno de los enfoques principales de la I 4.0.

La catálisis, desde su aplicación industrial, ha ido transformándose para acoplarse a cada una de las revoluciones industriales, a sus desafíos y a innovación tecnológica. De ahí que en la actual transición entre la I 4.0 y la I 5.0, la catálisis haya buscado adaptarse al desarrollo de manufactura aditiva, incluyéndola en el campo de la catálisis, como una herramienta para la fabricación 3D de catalizadores. Por lo cual, los catalizadores soportados y los catalizadores monolíticos son ejemplos de enfoques utilizados en la catálisis heterogénea y la digitalización de los procesos industriales, como una tendencia clave en la actual I 5.0.

La manufactura aditiva, industria y catálisis

La manufactura aditiva ha brindado nuevas oportunidades al campo de la catálisis en el contexto de la I 4.0. Una de las aplicacio-

nes más importantes de la manufactura aditiva en la catálisis es la fabricación de catalizadores soportados, especialmente en la obtención de soportes tridimensionales, para el posterior anclaje de nanopartículas catalíticamente activas. Entre los soportes tridimensionales más eficientes desarrollados hasta el momento tenemos los denominados monolitos, los cuales son estructuras unitarias con canales interconectados o separados que pueden tener diferentes geometrías. También son conocidos como soportes de panal y su característica principal es que son piezas con estructuras porosas, cuya porosidad y geometría son perceptibles al ojo humano.

Para la obtención de estos monolitos se usa la impresión 3D, el cual permite la fabricación precisa de estos y otros soportes tridimensionales, facilitando la personalización y optimización de la estructura para una aplicación catalítica específica. La mayor ventaja que da la impresión 3D es que ofrece flexibilidad en la geometría de los canales y la distribución de poros, de una forma sencilla y sin procesos complejos, como en la síntesis tradicional de estos soportes tridimensionales. La geometría y distribución de los poros puede influir en la transferencia de masa, la eficiencia de reacción y la selectividad del catalizador. Adicionalmente, la impresión 3D ofrece una mayor reproducibilidad y escalabilidad en la fabricación de catalizadores soportados, lo que puede tener un impacto significativo en la producción industrial, a diferencia de la síntesis química de estos catalizadores.

Hasta ahora se ha visto cómo empleando la impresión 3D es posible obtener catalizadores soportados, sin embargo, ¿qué es exactamente la manufactura aditiva?

Podemos decir que es un método de fabricación de abajo hacia arriba, que logra los requisitos de impresión mediante la acumulación de materiales, capa por capa, hasta obtener un objeto 3D. Existen varios tipos de manufactura aditiva y las siguientes son las más usadas en el campo de la catálisis:

- **Estereolitografía (SLA):** Esta técnica utiliza un láser ultravioleta para solidificar resinas líquidas fotosensibles, capa por capa. Se construye el soporte mediante la exposición selectiva a la luz, creando una estructura tridimensional ⁷.
- **Fusión por deposición de material (FDM):** En esta técnica, un material termoplástico se extruye a través de una boquilla que se desplaza en patrones definidos, capa por capa. A medida que el material se enfría, se solidifica y se forma el soporte ⁸.
- **Sinterización selectiva por láser (SLS):** Un láser de alta potencia fusiona y solidifica las partículas de un polvo en capas sucesivas. El láser se mueve según el patrón definido por el diseño, fabricando el soporte con una geometría determinada ⁹.
- **Deposición de material fundido:** Esta técnica es similar a la FDM, pero en lugar de utilizar termoplásticos se emplean metales o aleaciones fundidas. El material se deposita capa por capa y se solidifica para formar el soporte metálico ¹⁰.
- **Impresión 3D basada en gel (Gel-3D):** Esta técnica utiliza geles poliméricos (semisólidos) que se extruyen capa por capa y luego se solidifican mediante procesos de curado químico o fotopolimerización. Los geles pueden contener partículas de catalizador u otros componentes activos ¹¹.

Cada técnica de manufactura tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección de la técnica adecuada dependerá de los requisitos específicos del soporte y de la aplicación catalítica. **La extrusión de materiales** es una técnica ampliamente utilizada en la manufactura aditiva de catalizadores y catalizadores soportados tridimensionales (Figura 7). Con esta técnica se pueden obtener monolitos catalíticamente activos, combinarlos con un soporte adecuado durante el proceso de extrusión o anclar la fase activa (posterior a la obtención del soporte 3D). El material para extruir puede ser una pasta o una mezcla viscosa, la cual puede ser calentada o enfriada (dependiendo de sus propiedades reológicas) para facilitar su extrusión. A medida que se va depositando cada capa el material se enfría y solidifica, formando así la estructura tridimensional del catalizador o catalizador soportado. Esta técnica, al igual que todas las técnicas de manufactura aditiva, permite flexibilidad de diseño y personalización, ya que permite la fabricación de estructuras complejas y adaptadas a las necesidades específicas de la catálisis. Además, otra ventaja de esta técnica en especial es que es un proceso relativamente rápido y eficiente, lo que lo hace adecuado para la producción a escala industrial. Los aspectos más importantes a tener en cuenta al usar esta técnica son la elección del material y la optimización de los parámetros de extrusión, como la velocidad, presión y temperatura de extrusión, ya que son aspectos críticos para garantizar una buena funcionalidad y estabilidad del catalizador.

Impacto de la manufactura aditiva y la catálisis

La manufactura aditiva que se aplica en el campo de la catálisis también abarca otras ramas de la industria (Figura 8).

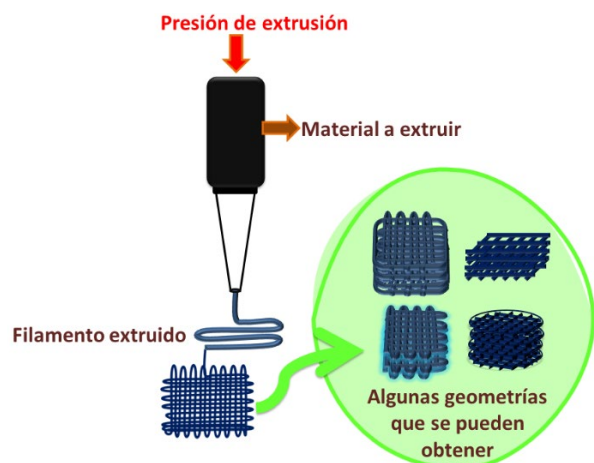


Figura 7. Técnica de extrusión de materiales

Aprovechando que la impresión 3D da la posibilidad de fabricar piezas a demanda (es decir, con estructuras y geometrías intrincadas) se puede utilizar para obtener reactores y materiales de laboratorio con una geometría característica y específica (y también a escalas muy pequeñas). Así como también, sistemas digitales que procuren optimizar los procesos catalíticos y mejorar la eficiencia en diferentes etapas de la producción industrial ¹²⁻¹⁴.

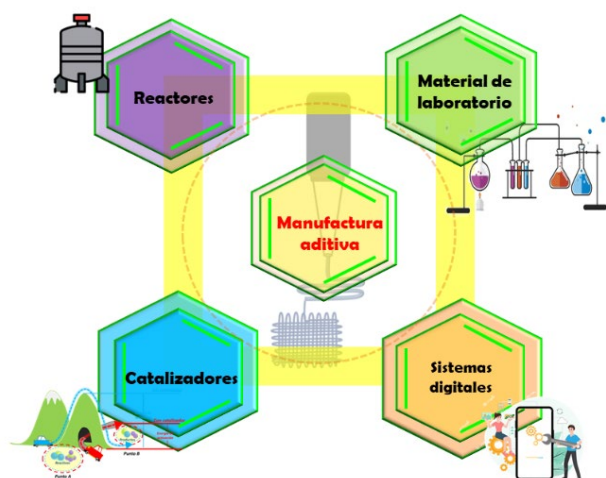


Figura 8. Aplicación de la manufactura aditiva en el campo de la catálisis

A continuación, se mencionan algunas formas en las que la manufactura aditiva y la catálisis están relacionadas:

- **Diseño y fabricación de catalizadores personalizados:** la fabricación de catalizadores con formas y geometrías específicas puede maximizar la eficiencia y selectividad de los catalizadores utilizados para reacciones químicas estratégicas en la industria. Estos catalizadores personalizados no son posibles con los métodos tradicionales de síntesis.
- **Optimización de las estructuras catalíticas:** la posibilidad de obtener estructuras catalíticas con geometrías específicas permite que exista un control de la porosidad y la distribución de poro. Estas características son fundamentales para maximizar la eficiencia y selectividad de los catalizadores. Además, usando manufactura aditiva es posible intercalar diferentes soportes entre capa y capa, pudiéndose de esta forma optimizar aún más la eficiencia catalítica.
- **Fabricación de microreactores:** usando manufactura aditiva es posible fabricar microreactores con canales y geometrías características. Esto permite que se mejore la transferencia de masa y calor, lo cual provoca reacciones más rápidas y controladas. Esto impacta (sobre todo) a la catálisis heterogénea, donde los catalizadores están en una fase separada a la de los reactivos.
- **Reparación y regeneración de catalizadores:** la manufactura aditiva puede utilizarse para reparar o regenerar los catalizadores que estén desgastados o dañados por el reuso consecutivo. En lugar de reemplazar completamente un catalizador se pueden utilizar técnicas de fabricación aditiva para agregar material en las áreas afectadas y restaurar su funcionalidad. De esta forma, se abaratan costos y tiempo en comparación con los métodos tradicionales de reemplazo.

Con los ejemplos anteriores puede verse cómo el campo de la catálisis puede beneficiarse de la manufactura aditiva a través de la fabricación de catalizadores y, desde otros enfoques, puede tener un efecto sinérgico en el proceso global de una reacción catalítica.

La industria de la manufactura aditiva en México

En México existen empresas dedicadas a la manufactura aditiva que ofrecen servicios de impresión 3D (para prototipado rápido), fabricación de piezas personalizadas y producción en pequeña escala. Estas compañías utilizan una amplia gama de materiales como plásticos, metales y resinas para fabricar objetos tridimensionales según las especificaciones de los clientes.

Además, se han venido estableciendo diversos centros de investigación enfocados (o relacionados) con la manufactura aditiva. Estas instituciones promueven la innovación y la colaboración entre la industria y el sector académico para impulsar el avance de la tecnología en el país. Dentro de los laboratorios más importantes está el Laboratorio Nacional de Manufactura Aditiva Digitalización 3D y Tomografía Computarizada (MADiT)-UNAM, el Laboratorio de Nano & Micro Manufactura Aditiva de Polímeros y Materiales Compuestos “3D Lab”-CIMAV y Laboratorio de Manufactura Aditiva-UPA.

Por otro lado, el gobierno mexicano también ha mostrado interés en fomentar el desarrollo de la manufactura aditiva. Por ejemplo, se han implementado programas y políticas para impulsar la adopción de esta tecnología en la industria, con el objetivo de aumentar la competitividad y promover la creación de empleos especia-

lizados en el campo de la impresión 3D¹⁵. Además, equipos de manufactura aditiva han sido comprados para instituciones públicas (como hospitales) para, de esta forma, mejorar la atención médica.

En el sector privado, la manufactura aditiva se utiliza en diversos sectores, como la industria automotriz, aeroespacial, médica, de diseño de productos y arquitectura, entre otros. Las empresas mexicanas han utilizado la impresión 3D principalmente para el prototipado de piezas, producción de componentes personalizados, fabricación de herramientas y dispositivos médicos y para la creación de modelos arquitectónicos, entre otros usos^{16,17}.

Finalmente, la manufactura aditiva ha venido ganando terreno en México y se ha convertido en una herramienta importante para la innovación y el desarrollo industrial en el país. Esta tecnología sigue evolucionando y se espera que siga expandiéndose a corto y largo plazo, y retribuya de forma positiva en la industria mexicana.

En resumen...

La manufactura aditiva y la catálisis están estrechamente relacionadas debido a que, a través de la fabricación aditiva, se pueden obtener catalizadores y microreactores personalizados, así como la optimización de los procesos catalíticos con la reparación de catalizadores desgastados. Estas aplicaciones tienen un impacto significativo en diversas áreas como la síntesis química, la industria de la energía y la producción farmacéutica, mejorando la eficiencia y selectividad de las reacciones catalíticas. La fabricación de microreactores puede generar un impacto positivo, no solo abaratando costos, sino también un enfoque

sostenible para producir productos químicos bajo demanda. Además, la flexibilidad que proporciona la manufactura aditiva facilita la adaptación de diseños de los reactores. De esta manera, la integración entre la manufactura aditiva y la catálisis tiene un gran potencial para mejorar la sostenibilidad, adaptabilidad y eficiencia de los procesos industriales.

Aunque se han realizado numerosos esfuerzos para utilizar la manufactura aditiva en la fabricación de catalizadores 3D, aún no se ha aprovechado todo el potencial de esta tecnología, debido a que la mayoría de los estudios se han centrado en la obtención de estructuras pequeñas (las cuales son similares a las producidas mediante métodos convencionales). Además, estos trabajos no superan la barrera de consideraciones químicas y materiales en el proceso de manufactura y no han saltado a la intensificación del proceso.

Agradecimientos

Lucy Caterine-Daza Gómez agradece a DGAPA-UNAM por la beca posdoctoral.

Referencias

- (1) American Chemical Society. Catalysis. <https://www.acs.org/greenchemistry/research-innovation/catalysis.html#:~:text=In%20chemistry%2C%20catalysis%20refers%20to,not%20consumed%20by%20the%20reaction.https://www.acs.org/greenchemistry/research-innovation/catalysis.html#:~:text=In%20chemistry%2C%20catalysis%20refers%20to,not%20consumed%20by%20the%20reaction.> (accessed 2023-05-11).
- (2) Hu, X.; Yip, A. C. K. Heterogeneous Catalysis: Enabling a Sustainable Future. *Frontiers in Catalysis* 2021, 1. <https://doi.org/10.3389/fctls.2021.667675>.
- (3) Schlögl, R. Heterogeneous Catalysis. *Angewandte Chemie International Edition* 2015, 54 (11), 3465–3520. <https://doi.org/10.1002/anie.201410738>.
- (4) Copéret, C.; Chabanas, M.; Petroff Saint-Arroman, R.; Basset, J. Homogeneous and Heterogeneous Catalysis: Bridging the Gap through Surface Organometallic Chemistry. *Angewandte Chemie International Edition* 2003, 42 (2), 156–181. <https://doi.org/10.1002/anie.200390072>.
- (5) *Advances in Carbon Capture*; Elsevier, 2020. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-05339-6>.
- (6) Armor, J. N. A History of Industrial Catalysis. *Catal Today* 2011, 163 (1), 3–9. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2009.11.019>.
- (7) Xiao, R.; Ding, M.; Wang, Y.; Gao, L.; Fan, R.; Lu, Y. Stereolithography (SLA) 3D Printing of Carbon Fiber-Graphene Oxide (CF-GO) Reinforced Polymer Lattices. *Nanotechnology* 2021, 32 (23), 235702. <https://doi.org/10.1088/1361-6528/abe825>.
- (8) Bhagia, S.; Bornani, K.; Agrawal, R.; Satlewal, A.; Đurković, J.; Lagaña, R.; Bhagia, M.; Yoo, C. G.; Zhao, X.; Kunc, V.; Pu, Y.; Ozcan, S.; Ragauskas, A. J. Critical Review of FDM 3D Printing of PLA Biocomposites Filled with Biomass Resources, Characterization, Biodegradability, Upcycling and Opportunities for Biorefineries. *Appl Mater Today* 2021, 24, 101078. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101078>.
- (9) Yang, C.; Zhang, C.; Chen, Z.-J.; Li, Y.; Yan, W.-Y.; Yu, H.-B.; Liu, L. Three-Dimensional Hierarchical Porous Structures of Metallic Glass/Copper Composite Catalysts by 3D Printing for Efficient Wastewater Treatments. *ACS Appl Mater Interfaces* 2021, 13 (6), 7227–7237. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c20832>.
- (10) Cannio, M.; Righi, S.; Santangelo, P. E.; Romagnoli, M.; Pedicini, R.; Carbone, A.; Gatto, I. Smart Catalyst Deposition by 3D Printing for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Manufacturing. *Renew Energy* 2021, 163, 414–422. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.064>.
- (11) Zhu, J.; Wu, P.; Chao, Y.; Yu, J.; Zhu, W.; Liu, Z.; Xu, C. Recent Advances in 3D Printing for Catalytic Applications. *Chemical Engineering Journal* 2022, 433, 134341. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134341>.
- (12) Laguna, O. H.; Lietor, P. F.; Godino, F. J. I.; Corpas-Iglesias, F. A. A Review on Additive Manufacturing and Materials for Catalytic Applications: Milestones, Key Concepts, Advances and Perspectives. *Mater Des* 2021, 208, 109927. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.109927>.
- (13) Zhu, J.; Wu, P.; Chao, Y.; Yu, J.; Zhu, W.; Liu, Z.; Xu, C. Recent Advances in 3D Printing for Catalytic Applications. *Chemical Engineering Journal* 2022, 433, 134341. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.134341>.
- (14) Hurt, C.; Brandt, M.; Priya, S. S.; Bhatelia, T.; Patel, J.; Selvakannan, P. R.; Bhargava, S. Combining Additive Manufacturing and Catalysis: A Review. *Catal Sci Technol* 2017, 7 (16), 3421–3439. <https://doi.org/10.1039/C7CY00615B>.
- (15) La Cámara Nacional de la Industria de Transformación (CANACINTRA). DIAGNÓSTICO PARA EL DESARROLLO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN DE MANUFACTURA ADITIVA. chrome-extension://efaidnbmninnibpcapjpcglclefindmkaj/https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/189123/0018-F-13032015_Diagn_stico_para_desarrollo_de_procesos_de_fabricaci_n_de_manufactura_aditiva_Parte_1.pdf (accessed 2023-05-22).
- (16) Verónica Alcántara. La Industria de La Manufactura Aditiva En México. *ManufacturaLATAM*. 2022.
- (17) Rodrigo Riquelme. Manufactura Aditiva En México Adolece de Acceso a Inversión Por Desconocimiento de La Tecnología. *El economista*. 2021. <https://www.eleconomista.com.mx/empresas/Manufactura-aditiva-en-Mexico-adolesce-de-acceso-a-inversion-por-desconocimiento-de-la-tecnologia-20210717-0003.html> (accessed 2023-05-22).