

El rutenio que mueve hidrógeno: catálisis homogénea en reacciones de transferencia de hidrógeno

Agustín Rodríguez Gutiérrez, Daniel Mora Carrero, Juan Manuel Cruz Casado, Arijon Ahmetaj

Resumen

La catálisis homogénea con complejos de rutenio desempeña un papel clave en las reacciones de transferencia de hidrógeno, un tipo de proceso químico que permite transformar compuestos orgánicos sin necesidad de utilizar hidrógeno gaseoso. Este artículo presenta una aproximación divulgativa a estas reacciones, explicando el papel del rutenio como catalizador y destacando aplicaciones reales en la industria farmacéutica, la química fina y la investigación energética. Además, se muestra cómo estas transformaciones contribuyen al desarrollo de procesos más sostenibles, reduciendo el consumo energético y la generación de residuos. A través de ejemplos concretos, se ilustra la relevancia de esta tecnología en el contexto actual de la química moderna.

Palabras Claves

Catálisis homogénea, Hidrógeno, Química sostenible, Rutenio, Transferencia

Juan Manuel Cruz Casado, Grado en Química, Universidad de Huelva, juanmanuel.casado@alu.uhu.es

Agustín Rodríguez Gutiérrez, Grado en Química, Universidad de Huelva, agustin.rodriguez@alu.uhu.es

Daniel Mora Carrero, Grado en Química, Universidad de Huelva, daniel.carrero@alu.uhu.es

Arijon Ahmetaj, Grado en Química, Universidad de Huelva, arijon.ahmetaj@alu.uhu.es



1. INTRODUCCIÓN

La catálisis es uno de los elementos fundamentales de la industria química moderna. Sin la ayuda de catalizadores, muchas reacciones serían demasiado lentas o requerirían condiciones extremas de presión y temperatura. En el caso de la catálisis homogénea, el catalizador se encuentra en la misma fase que los reactivos, normalmente disuelto en una disolución líquida, lo que permite una interacción más directa entre las especies químicas. Entre los distintos tipos de reacciones catalizadas, las reacciones de transferencia de hidrógeno permiten modificar la estructura de una molécula mediante la cesión o captura de átomos de hidrógeno. Estas transformaciones son muy utilizadas en la obtención de productos farmacéuticos, fragancias y compuestos industriales de alto valor. Los complejos de rutenio destacan como catalizadores especialmente eficaces en este tipo de procesos, debido a su elevada estabilidad, versatilidad química y capacidad para formar complejos activos altamente selectivos.

2. EL RUTENIO COMO CATALIZADOR

El rutenio es un metal de transición que pertenece al grupo 8 de la tabla periódica (metales de transición) y se caracteriza por su capacidad para adoptar diferentes estados de oxidación. Esta propiedad le permite alternar entre distintas formas químicas durante una reacción sin perder actividad catalítica. Una de las razones de su éxito como catalizador es su capacidad para formar complejos estables con moléculas orgánicas llamadas ligandos, que determinan la reactividad del metal. Modificando estos ligandos, se hace posible ajustar la eficiencia del catalizador, su selectividad y su compatibilidad con diferentes moléculas. Además, en comparación con otros metales nobles, el rutenio ofrece una combinación atractiva de coste relativamente bajo y alta eficiencia catalítica, lo que ha impulsado su aplicación a escala industrial.

3. TRASFERENCIA DE HIDRÓGENO: CONCEPTO GENERAL

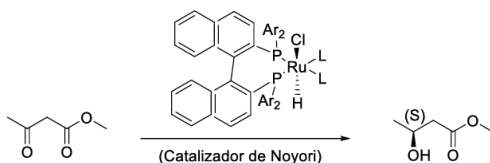
Las reacciones de transferencia de hidrógeno permiten llevar a cabo procesos de oxidación y reducción sin el empleo directo de hidrógeno molecular. En su lugar, se utilizan compuestos como alcoholes o aminas que actúan como donantes o aceptores de hidrógeno. Durante el proceso, el complejo de rutenio acepta átomos de hidrógeno de una molécula y posteriormente los transfiere a otra diferente. De esta forma, el catalizador actúa como un intermediario que transporta hidrógeno entre moléculas, evitando el uso de gases inflamables y haciendo el proceso más seguro. Estas reacciones suelen realizarse a presión atmosférica y temperaturas moderadas, lo cual supone una ventaja tanto a nivel económico como medioambiental.

4. APLICACIONES REALES

4.1. Industria farmacéutica

Uno de los ejemplos más relevantes es el uso de catalizadores de rutenio en la síntesis de fármacos que contienen alcoholes quirales. En muchos medicamentos es esencial obtener un único isómero, ya que el otro puede ser inactivo o incluso tóxico. Un caso real es la fabricación de intermediarios farmacéuticos mediante transferencia de hidrógeno asimétrica, donde complejos quirales de rutenio permiten obtener moléculas con aproximadamente un 99 % de pureza enantiomérica. Esta tecnología se emplea en la síntesis de componentes de antivirales, antibióticos y antiinflamatorios, mejorando el rendimiento y reduciendo residuos. Un ejemplo de este tipo de catalizadores es el catalizador de Noyori (Imagen 1).

Imagen 1: Ejemplo de reducción de una cetona por hidrogenación de Noyori.



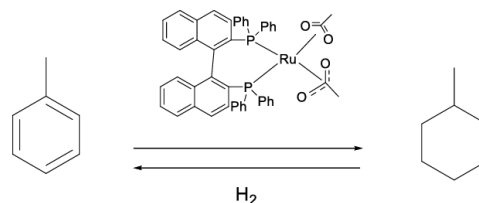
4.2. Producción de fragancias y aromas

En química fina, los complejos de rutenio se emplean para transformar cetonas en alcoholes que forman parte de perfumes y esencias naturales. Por ejemplo, algunos aromas florales derivados de alcoholes aromáticos, como el alcohol feniletílico (aroma a rosa) se obtienen por transferencia de hidrógeno, utilizando rutenio como catalizador para controlar la estructura final del producto. En el caso del alcohol feniletílico se obtiene a partir de la acetofenona (de forma parecida a la vista en la imagen 1). Gracias a este proceso se consigue una alta selectividad, lo que garantiza la calidad del aroma sin necesidad de etapas de purificación complejas.

4.2. Aplicaciones energéticas

En investigación energética, la transferencia de hidrógeno se estudia como una posible vía para el almacenamiento químico del hidrógeno. Algunas moléculas orgánicas pueden cargarse y descargarse de hidrógeno reversiblemente mediante catalizadores de rutenio, funcionando como "baterías químicas". Esto ocurre con los llamados LOHC, es decir, líquidos orgánicos portadores de hidrógeno. Un sistema muy estudiado sería la "batería química" entre las especies de tolueno y metilciclohexano. Esta transferencia de hidrógenos se hace a través de catalizadores de rutenio. (Imagen 2).

Imagen 2: Reacción de los LOHC, "baterías químicas".



Este sistema permite almacenar energía en forma de enlaces químicos, lo que podría facilitar el transporte seguro de hidrógeno en el futuro.

Este sistema permite almacenar energía en forma de enlaces químicos, lo que podría facilitar el transporte seguro de hidrógeno en el futuro.

5. IMPACTO EN LA QUÍMICA VERDE

La transferencia de hidrógeno catalizada por rutenio cumple varios principios de la química verde:

- Reduce el uso de hidrógeno presurizado.
- Disminuye la producción de subproductos.
- Aumenta la eficiencia de reacción.
- Reduce el consumo de energía.

Estos beneficios convierten esta tecnología en una alternativa más limpia frente a métodos tradicionales de hidrogenación.

6. CONCLUSIONES

La catálisis homogénea con complejos de rutenio representa una herramienta esencial en la química moderna. Su capacidad para facilitar reacciones de transferencia de hidrógeno de forma controlada, segura y eficiente la ha convertido en un método clave en la industria farmacéutica, la química fina y el desarrollo de tecnologías energéticas más limpias. El continuo desarrollo de nuevos catalizadores permitirá ampliar aún más sus aplicaciones en el futuro.

REFERENCIAS

- [1] R. Noyori, *Asymmetric Catalysis in Organic Synthesis*, Wiley, 1994.
- [2] J. G. de Vries, *Handbook of Homogeneous Hydrogenation*, Wiley-VCH, 2007.
- [3] A. J. Blacker et al., "Transfer Hydrogenation in the Pharmaceutical Industry", *Chemical Reviews*, vol. 109, pp. 130–174, 2009.
- [4] P. Jessop, "Hydrogen Storage by Transfer Hydrogenation Systems", *Coordination Chemistry Reviews*, vol. 248, pp. 2425–2442, 2004.

Juan Manuel Cruz Casado, Daniel Mora Carrero,
Arijon Ahmetaj y Agustín Rodríguez Gutiérrez,
Grado en Química, 4º curso.

