

TRANSICIÓN ENERGÉTICA EN LA INDUSTRIA QUÍMICA DE LA PRODUCCIÓN DE AMONIACO.

ENERGY TRANSITION IN THE CHEMICAL INDUSTRY OF AMMONIA PRODUCTION.

Lorena Elizabeth Ruiz-Marin*, Ángel Castro-Agüero, Enedina Flores Tililayatzí, Jhonatan Mendez Valencia.

Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología, Universidad Autónoma de Tlaxcala, Calzada Apizaquito S/N, Apizaco, Tlaxcala, 90300, México.

*Email: 20254099@uatx.mx.com

Recibido: 18-Junio-2025

Aceptado: 07-Agosto-2025

RESUMEN

El presente trabajo revisa el estado del arte de tecnologías sostenibles para la producción de amoníaco, con énfasis en procesos que integran hidrógeno verde generado por energías renovables con el esquema tradicional Haber-Bosch.

La síntesis de amoníaco es responsable de un considerable porcentaje de las emisiones globales de CO₂ y del consumo energético de la industria química, lo que hace urgente la transición hacia alternativas más limpias. Se discuten avances recientes en electrólisis, tecnologías de control predictivo, y esquemas de integración energética, lo que permite dar la pauta a estudiar propuestas de simulación y control de plantas híbridas con el objetivo de reducir significativamente la huella de carbono del proceso de síntesis de amoníaco, fortaleciendo su rol en la seguridad alimentaria global y su potencial como vector energético.

Palabras Clave: amoníaco, amoníaco verde, Haber-Bosch, hidrógeno verde, sistema híbrido.

This paper reviews the state of the art of sustainable technologies for ammonia production, with emphasis on processes that integrate green hydrogen generated by renewable energies with the traditional Haber-Bosch scheme. Ammonia synthesis is responsible for a considerable percentage of the chemical industry's global CO₂ emissions and energy consumption, making the transition to cleaner alternatives urgent. Recent advances in electrolysis, predictive control technologies, and energy integration schemes are discussed, which allows to give the guideline to study proposals for simulation and control of hybrid plants with the aim of significantly reducing the carbon footprint of the ammonia synthesis process, strengthening its role in global food security and its potential as an energy vector.

Keywords: ammonia, green ammonia, green hydrogen, Haber-Bosch, hybrid system

1. INTRODUCCIÓN

El amoníaco ha tenido un profundo impacto global desde el descubrimiento de su síntesis a partir de hidrógeno y nitrógeno por Haber y Bosch en Alemania a principios del siglo XX (Appl., 1997; Modak., 2011). El papel clave del amoníaco hoy en día, es servir de materia prima básica para los fertilizantes inorgánicos (Rouwenhorst y col., 2021) que actualmente sustentan la producción de alimentos para aproximadamente la mitad de la población mundial (The Royal Society., 2020). Un uso emergente, pero no menos importante es como una buena fuente de almacenaje y transporte de energía o hidrógeno (Al-Zareer y col., 2019; Ghavam y col., 2021) por lo que procesos de reformación y crackeo de NH_3 a altas presiones han sido de temas de interés en desarrollo (Sayas y col., 2020; Trangwachiracha y col., 2024).

La producción mundial actual de amoníaco es de unos 176 millones de toneladas al año y se logra predominantemente mediante el reformado de metano con vapor de agua para producir el hidrógeno necesario para la síntesis de amoníaco a través del proceso Haber-Bosch. Este proceso consume una gran cantidad de energía, alrededor del 1.8% de la producción energética mundial cada año y produce como resultado unos 500 millones de toneladas de dióxido de carbono (Ruddock y Brudenell., 2003). La síntesis de amoníaco es, junto con la producción de cemento, acero y etileno, uno de los "cuatro grandes" procesos industriales que emiten más dióxido de carbono a la atmósfera. En estos procesos, en consecuencia, se debe desarrollar e implementar un plan de descarbonización para cumplir el objetivo de emisiones netas de carbono cero para 2050 (National Academy of Science., 2022) y al mismo tiempo contribuir con objetivos de desarrollo sostenible propuestos por las Naciones Unidas (NU) en su Agenda 2030 (Naciones Unidas y United Nations Climate Change).

En la industria química el amoníaco representa el 38% de las emisiones de gases invernadero y el 17% del consumo energético del mismo sector. Por tal motivo, se han considerado alternativas y mejoras en el proceso Haber-Bosch como: las tecnologías de captura y almacenamiento de CO_2 (Asgharian y col., 2024; Mersch y col., 2024) así como generación de H_2 verde utilizando energías renovables (Tsoutsos, 2010; Rouwenhorst y col., 2021) para lograr que la producción de amoníaco reduzca la generación de CO_2 .

La transición energética global requiere tecnologías escalables para la conversión de energías renovables en formas almacenables y transportables. La NU estima que la producción de alimentos global debe aumentar un 70% para 2050 y además que entre el 40-60% de la producción de alimentos depende de fertilizantes comerciales (Meers, 2016).

2. OBTENCIÓN DE HIDRÓGENO VERDE PARA PRODUCCIÓN DE AMONIACO

2.1 Métodos electroquímicos y termoquímicos.

En varios estudios se ha modelado y analizado la obtención de hidrógeno verde por medio de electrólisis, gasificación de biomasa (Swami SM y Abraham MA., 2006) y reformado de biogás (Cortright y col., 2002) para determinar sus ventajas en la aplicación de la industria del amoníaco.

2.2 Electrólisis de agua.

En cuanto a la electrólisis para producción de hidrógeno, los electrolizadores que se han considerado son: electrolizadores alcalinos (AEC) (Nami y col., 2024), electrolizadores de óxido sólido (SOEC) (Bianchi y Bosio (2024) y electrolizador de membrana polimérica (PEMWE) (Mucci y col., 2023]; así como sistemas sostenibles mediante paneles fotovoltaicos flotantes (FPV) (Uygun y Dincer., 2024). Recientemente (Tang y col., 2024) han propuesto un nuevo sistema de electrólisis de semi vapor (SVE) para la generación rentable de hidrógeno, este sistema emplea la electrólisis de vapor a baja temperatura en el ánodo, manteniendo la circulación de agua líquida en el cátodo. El proceso SVE no requiere un aporte energético adicional en comparación con el proceso convencional de electrólisis de agua líquida, a la vez que permite el uso directo de una amplia gama de recursos hídricos sin pretratamiento. Y también se han planteado sistemas de optimización de energía solar para generar combustibles más eficientes (Kelly y col., 2010).

3. PRODUCCIÓN DE AMONIACO

Debido a la importancia de la producción de amoníaco se han investigado diversos métodos para su obtención con la finalidad de buscar alternativas al proceso convencional Haber-Bosch, Figura 1. En la síntesis electroquímica del amoníaco, (Cui y col., 2020) han analizado avances utilizando nitrógeno (N_2) y agua (H_2O) como materias primas con condiciones bajas de temperatura y presión.

La síntesis en sales fundidas, ciclos termoquímicos y rutas catalíticas los cuales operan a bajas presiones, aún se encuentran en desarrollo para aplicaciones a gran escala debido a que la obtención de amoníaco por estos métodos aún es reducida (Juangsa y col., 2021 y Klaas y col., 2021). Faria (2022) analiza brevemente los hallazgos científicos para la síntesis de amoníaco a baja temperatura y presión utilizando catalizadores homogéneos.

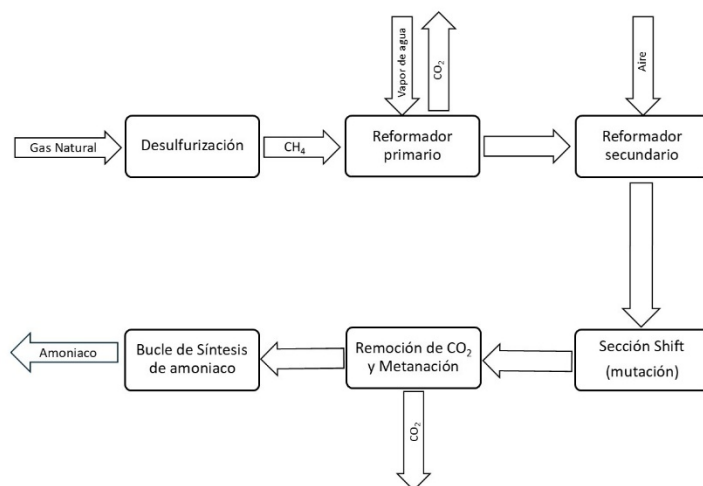


Figura 1. Diagrama de bloques del proceso convencional Haber-Bosch para la síntesis de amoníaco.

Kappagantula y col. (2024) también proponen y comparan diferentes arreglos de reactores como el: Bucle químico de tres reactores (TRCL) y Bucle químico del reformador (CLR) con la finalidad de

reducir el consumo energético. Spatolisan y Pellegrini (2023) analizan la intensificación del proceso introduciendo la etapa de eliminación del amoniaco mediante absorción con una solución de fosfato aguas abajo de la etapa de reacción con el fin de reducir las emisiones de CO_2 y Jonga y col. (2009) optimizan un reformador de metano con vapor de agua, encontrando que aumentando la fracción de aire en el quemador de combustible e incrementando el grosor del aislamiento se produce alrededor de 9.5% más de hidrogeno.

Hill y col. (2020) presentan un trabajo que se centra en los aspectos tecnológicos de un proceso Haber-Bosch electrificado como el que se muestra en la Figura 2. El H_2 , proveniente del metano, lo sustituyen por un sistema de electrolizadores; y también sustituyen el N_2 del aire, que se purifica en el metanador, por un sistema de Absorción por oscilación de presión (PSA). Ishaq y col. (2021) proponen un diseño donde se implementan e integran tres tipos diferentes de reformado de gas natural para la síntesis limpia de hidrógeno, metanol y amoniaco y donde una fuente de calor solar proporciona energía a la unidad de refrigeración por absorción y también vapor a los reformadores de gas natural.

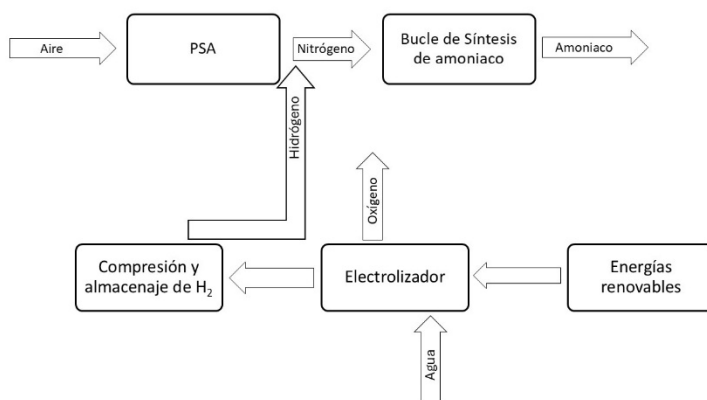


Figura 2. Diagrama de bloques del proceso electrificado Haber-Bosch para la síntesis de amoniaco.

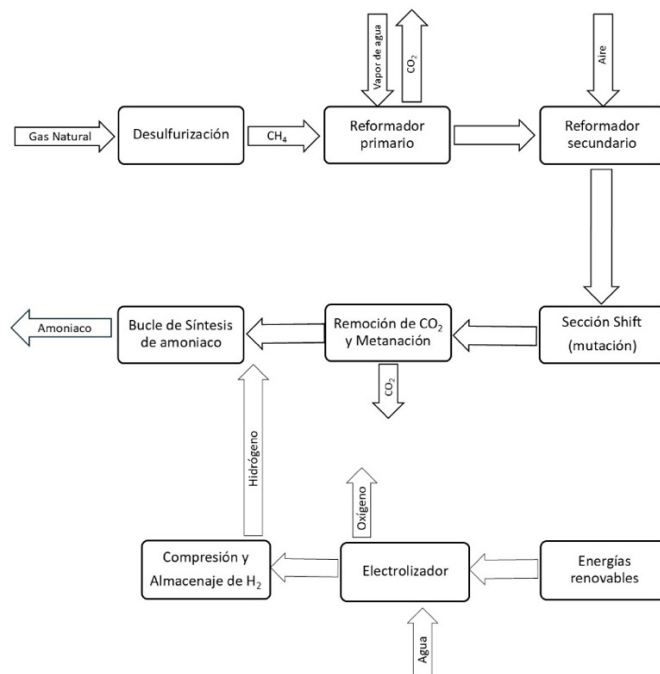


Figura 3. Diagrama de bloques del proceso híbrido Haber Bosch para la síntesis de amoníaco.

Isella y col. (2024) proponen un sistema de producción de amoníaco híbrido en el cual una corriente de hidrógeno verde se alimenta al circuito Haber-Bosh para reducir las emisiones de CO₂ utilizando la infraestructura ya existente del proceso convencional, ver Figura 3, y del cual, hasta el momento no se tiene referencia bibliográfica de algún otro trabajo al respecto.

4. CONTROL Y SIMULACIÓN DE PROCESOS DE AMONIACO.

En la transición de electrificar el proceso Haber-Bosch, algunos de los retos más grandes son el incrementar la eficiencia de la separación del agua, mejorar la eficiencia en la separación del amoníaco y el desarrollo de catalizadores; pero la factibilidad de éxito del proceso Haber-Bosch depende de acoplarlo con la energía renovable de naturaleza intermitente y aislarlo de las perturbaciones climáticas, así como tener un sistema de control ágil y que ajuste la operación a los cambios externos.

Paralelamente, Salmon y Bañares-Alcántara (2023) han utilizado modelos basados en Programación Lineal (LP); y modelos de control predictivo (MPC) en estudios de casos en diferentes entornos para acoplarse con entradas de energía oscilantes. Poe (2021) considera que el control predictivo de modelos multivariantes ofrece beneficios al reducir la variabilidad en los resultados de una operación, como la calidad, los volúmenes de producción y los costos operativos, al identificar las fuentes de variabilidad y responder a estas perturbaciones. Sin embargo, la flexibilidad de los procesos de síntesis con caudales de hidrógeno variables en el tiempo aún no está clara y podría ser necesario un costoso almacenamiento de hidrógeno como reserva.

En el ámbito de la simulación y el control de sistemas de producción de amoníaco Shah (1967) y Skogestad (2004), establecieron estructuras para el diseño de control de plantas químicas. Dichos

enfoques fueron posteriormente aplicados a plantas de amoníaco (Araujo y Skogestad, 20024). Asimismo Zhang y col. (2010) propusieron una estructura de control total de planta (PWC) para el proceso de síntesis de amoníaco basada en el marco integrado de simulación y heurística (IFSH) y es comparado con el procedimiento de control auto optimizado (SOC) propuesto por Araujo y Skogestad.

También se han realizado estudios aplicando distintos tipos de controladores para un mejor funcionamiento, optimización y seguridad del sistema. Zhang y col. (2019) presentan una aplicación práctica que simula controladores predictivos multimodal en un proceso de amoníaco multi unidad integrando todas las restricciones de seguridad del proceso en su diseño.

Albalawi y col. (2018) desarrollaron y aplicaron a un proceso químico dos nuevos esquemas de control predictivo basado en modelos con enfoque de Lyapunov (LMPC). Estos esquemas permiten alcanzar regiones de operación segura asociadas a la estabilidad del sistema en tiempos aproximadamente dos veces menores que los obtenidos con el LMPC convencional. Por su parte, Fahr y col. (2025) demostraron la viabilidad de cambios rápidos de carga en una planta Haber-Bosch altamente flexible mediante el uso de controladores proporcional-integral (PI) implementando distintas estrategias de control para la regulación del proceso.

La simulación dinámica puede utilizarse para predecir los cambios dinámicos en variables críticas; Luyben (2012) presenta simulaciones dinámicas de seguridad de emergencia para dos principales fallos: pérdida de refrigerante en el reactor y pérdida de agua en el condensador del producto para un circuito de proceso de síntesis de amoníaco con reactor refrigerado y posteriormente evalúa simulaciones y control para perturbaciones en el rendimiento y la composición de la alimentación de una planta de síntesis de amoníaco (Luyben, 2018).

Deng y col. (2022) llevaron a cabo un análisis, simulación dinámica y optimización de un proceso de producción de amoníaco verde, adoptando el método catalítico térmico para transformar el proceso tradicional de Haber-Bosch utilizando hidrógeno verde como materia prima para reducir el consumo energético y las emisiones de carbono. La optimización del proceso de amoníaco verde se centró en el intercambiador de calor de salida del reactor y el intercambiador de calor de la torre de separación de amoníaco.

Fratini y col. (2016) simulan la integración de diferentes fuentes de energía renovables para la obtención de hidrógeno por medio de gasificación de biomasa, reformado de biogás y la electrólisis del agua en plantas de producción de amoníaco. Ostuni y col. (2016) patentaron un método para la regulación de una planta de amoníaco similar al proceso electrificado donde la planta de amoníaco opera a carga parcial, manteniendo el circuito de síntesis de amoníaco a una presión nominal alta y reduciendo la tasa de purga para aumentar la concentración de inertes en el circuito de síntesis de amoníaco y evitar el sobrecalentamiento del reactor.

Shaker y col. (2024) enfocan su trabajo principalmente en el uso de amoníaco verde como vehículo eficiente para el hidrógeno verde, junto con un meticuloso modelado y simulación de procesos y utilizan el Analizador de Energía Aspen para sugerir la posible integración térmica entre los intercambiadores de calor a fin de reducir la cantidad de suministro de calor y aprovechar la energía térmica interna de las corrientes. Patel y col. (2025) investigaron el comportamiento transitorio bajo un flujo de alimentación variado de la producción de amoníaco verde demostrando que, mediante

la implementación de estrategias de control eficaces, la unidad podía alcanzar un factor de carga mínimo del 10% o inferior, manteniendo la estabilidad y la eficiencia.

5. DISCUSIÓN

El análisis del estado del arte evidencia que la transición hacia esquemas de producción de amoníaco con menor huella de carbono requiere no solo innovaciones tecnológicas en la obtención de hidrógeno verde, sino también herramientas robustas de simulación y control que permitan evaluar su viabilidad operativa bajo condiciones industriales realistas. En particular, los sistemas híbridos que integran hidrógeno verde al proceso convencional Haber–Bosch emergen como una solución intermedia estratégica; sin embargo, su desempeño dinámico y su estabilidad operativa aún no han sido estudiados de manera sistemática.

La implementación de modelos dinámicos permite identificar variables críticas del proceso como presión, temperatura y relación H_2/N_2 y evaluar su sensibilidad frente a cambios transitorios en la alimentación. Esta información resulta esencial para el diseño de estrategias de control avanzadas, particularmente de control predictivo basado en modelos (MPC), el cual ha demostrado ser eficaz para manejar sistemas multivariables con restricciones operativas estrictas, como es el caso de la síntesis de amoníaco.

Desde esta perspectiva, un objetivo futuro relevante consiste en desarrollar un modelo dinámico integrado de una planta híbrida Haber–Bosch en UniSim Design, que incorpore una corriente variable de hidrógeno verde y permita evaluar diferentes escenarios de operación flexible. Sobre este modelo, la aplicación de estrategias de MPC facilitaría la anticipación de perturbaciones asociadas a la variabilidad de la energía renovable, optimizando la operación del proceso y minimizando desviaciones en variables críticas, sin comprometer la seguridad ni la eficiencia energética del sistema.

Este enfoque permitiría avanzar hacia una producción de amoníaco más flexible, resiliente y sostenible, alineada con los objetivos globales de descarbonización y con el creciente interés en el amoníaco como vector energético en la transición energética.

6. CONCLUSIONES

A pesar de investigación, simulación y propuestas de control y optimización para el proceso de producción de amoníaco, no existe suficiente evidencia bibliográfica acerca de estos temas aplicados a plantas híbridas de fabricación de amoníaco, las cuales se perfilan como una alternativa innovadora dentro de los esfuerzos globales por descarbonizar esta industria. La propuesta de integrar al proceso convencional Haber-Bosch una corriente de alimentación de hidrógeno verde de manera controlada y transitoria a través de la generación in situ de energía renovable se plantea como una solución viable para reducir de forma significativa las emisiones de CO_2 asociadas a la producción tradicional de amoníaco, contribuyendo así a mitigar el impacto ambiental que esta industria tiene sobre la atmósfera.

Además de su contribución a la sostenibilidad ambiental, el desarrollo del amoníaco verde-híbrido representa un paso clave en la transición hacia una cadena de producción de fertilizantes más amigable con el medio ambiente. Esta transformación no solo fortalece la posición del amoníaco en

la agricultura, sino que también resalta su potencial como vector energético en un contexto de transición energética global.

AGRADECIMIENTOS

Lorena Elizabeth Ruiz Marin agradece la beca económica brindada por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación a través de la Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología de la Universidad Autónoma de Tlaxcala.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

REFERENCIAS

Albalawi, F., Durand, H., Alanqar, A., & Christofides, P. D. (2018). Achieving operational process safety via model predictive control. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 53, 74–88. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2016.11.021>

Al-Zareer, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2019). Transient thermodynamic analysis of a novel integrated ammonia production, storage and hydrogen production system. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44, 18214–18224. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.04.085>

Appl, M. (1997, septiembre 25–26). *The Haber–Bosch heritage: The ammonia production technology* [Conferencia técnica]. 50th Anniversary of the International Fertilizer Association (IFA), Sevilla, España.

Araújo, A., & Skogestad, S. (2008). Control structure design for the ammonia synthesis process. *Computers & Chemical Engineering*, 32, 2920–2932. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2008.03.001>

Asgharian, H., Baxter, L., Iov, F., Cui, X., Araya, S. S., Nielsen, M. P., & Liso, V. (2024). Techno-economic analysis of blue ammonia synthesis using cryogenic CO₂ capture process: A Danish case investigation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 69, 608–618. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.05.060>

Batgi, S. U., & Dincer, B. (2024). Design and analysis of a floating photovoltaic-based integrated energy system with ammonia production. *Applied Thermal Engineering*, 252, 123676. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123676>

Bianchi, F. R., & Bosio, B. (2024). Modelling of green ammonia production based on solid oxide cells as electrolyser and oxygen separator for Haber–Bosch loop decarbonization. *International Journal of Hydrogen Energy*, 95, 1183–1193. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.07.047>

Cortright, R. D., Davda, R. R., & Dumesic, J. A. (2002). Hydrogen from catalytic reforming of biomass-derived hydrocarbons in liquid water. *Nature*, 418, 964–967. <https://doi.org/10.1038/nature01009>

Cui, B., Yu, Z., Liu, S., Zhang, J., Liu, X., Liu, C., & Zhang, Z. (2020). Highly selective and efficient ammonia synthesis from N₂ and H₂O via an iron-based electrolytic-chemical cycle. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45, 94–102. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.144>

Deng, W., Huang, C., Li, X., Zhang, H., & Dai, Y. (2022). Dynamic simulation analysis and optimization of green ammonia production process under transition state. *Processes*, 10, 2143. <https://doi.org/10.3390/pr10102143>

Fahr, S., Kender, R., Bohn, J.-P., Rehfeldt, S., Peschel, A., & Klein, H. (2025). Dynamic simulation of a highly load-flexible Haber–Bosch plant. *International Journal of Hydrogen Energy*, 102, 1231–1242. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.01.039>

Faria, J. A. (2022). Renaissance of ammonia synthesis for sustainable production of energy and fertilizers. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 29, 100466. <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2021.100466>

Frattini, D., Cinti, G., Bidini, G., Desideri, U., Cioffi, R., & Jannelli, E. (2016). A system approach in energy evaluation of different renewable energy sources integration in ammonia production plants. *Renewable Energy*, 99, 472–482. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.040>

Ghavam, S., Vahdati, M., Wilson, I. A. G., & Styring, P. (2021). Sustainable ammonia production processes. *Frontiers in Energy Research*, 9, 580808. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.580808>

Ishaq, H., & Dincer, I. (2021). Investigation and optimization of a new hybrid natural gas reforming system for cascaded hydrogen, ammonia and methanol synthesis. *Computers & Chemical Engineering*, 148, 107234. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2021.107234>

Isella, A., Ostuni, R., & Manca, D. (2024). Towards the decarbonization of ammonia synthesis: A techno-economic assessment of hybrid-green process alternatives. *Chemical Engineering Journal*, 486, 150132. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.150132>

Jong, M. de, Reinders, A. H. M. E., Kok, J. B. W., & Westendorp, G. (2009). Optimizing a steam-methane reformer for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, 34, 285–292. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.09.084>

Juangsa, F. B., Irhamna, A. R., & Aziz, M. (2021). Production of ammonia as potential hydrogen carrier: Review on thermochemical and electrochemical processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 14455–14477. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.01.214>

Kappagantula, R. V., Ingram, G. D., & Vuthaluru, H. B. (2024). Effectiveness of three-reactor chemical looping for ammonia production using Aspen Plus simulation. *International Journal of Hydrogen Energy*, 61, 1340–1355. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2024.02.238>

Kelly, N. A., Gibson, T. L., Cai, M., Spearot, J. A., & Ouwerkerk, D. B. (2010). Development of a renewable hydrogen economy: Optimization of existing technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35, 892–899. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.11.062>

Klaas, L., Guban, D., Roeb, M., & Sattler, C. (2021). Recent progress towards solar energy integration into low-pressure green ammonia production technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 25121–25136. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.05.063>

Luyben, W. L. (2012). Use of dynamic simulation for reactor safety analysis. *Computers & Chemical Engineering*, 40, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.02.013>

Luyben, W. L. (2018). Plantwide control of a coupled reformer/ammonia process. *Chemical Engineering Research and Design*, 134, 518–527. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.04.040>

Manca, D., Ostuni, R., & Zardi, F. (2016). *Method for load regulation of an ammonia plant*. United States Patent and Trademark Office.

Meers, E. (2016). *EIP-AGRI Focus Group on nutrient recycling: Starting paper on how to improve the agronomic use of recycled nutrients (N and P) from livestock manure and other organic sources*. European Commission.

Mersch, M., Sunny, N., Dejan, R., Ku, A. Y., Wilson, G., O'Reilly, S., Soloveichik, G., Wyatt, J., & Mac Dowell, N. (2024). A comparative techno-economic assessment of blue, green, and hybrid ammonia production in the United States. *Sustainable Energy & Fuels*, 8, 1495–1508. <https://doi.org/10.1039/d3se01421e>

Modak, J. M. (2011). Haber process for ammonia synthesis. *Resonance*, 16, 1159–1167. <https://doi.org/10.1007/s12045-011-0130-0>

Mucci, S., Mitsos, A., & Bongartz, D. (2023). Power-to-X processes based on PEM water electrolyzers: A review of process integration and flexible operation. *Computers & Chemical Engineering*, 175, 108260. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2023.108260>

Naciones Unidas. (s. f.). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/>

National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2022). *New directions for chemical engineering*. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/26342>

Nami, H., Hendriksen, P. V., & Frandsen, H. L. (2024). Green ammonia production using current and emerging electrolysis technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 199, 114517. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2024.114517>

Poe, W. (2021, junio). *Improving process economics of ammonia plant operations with advanced process control*. AVEVA. <https://www.aveva.com>

Rouwenhorst, K. H. R., Krzywda, P. M., Benes, N. E., Mul, G., & Lefferts, L. (2021). Ammonia production technologies. En A. Valera-Medina & R. Bañares-Alcántara (Eds.), *Techno-economic challenges of green ammonia as an energy vector* (pp. 41–83). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-820560-0.00004-7>

Rouwenhorst, K. H. R., van der Ham, A. G. J., & Lefferts, L. (2021). Beyond Haber–Bosch: The renaissance of the Claude process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46, 21566–21579.

Salmon, N., & Bañares-Alcántara, R. (2023). Impact of process flexibility and imperfect forecasting on the operation and design of Haber–Bosch green ammonia. *RSC Sustainability*, 1, 923–937. <https://doi.org/10.1039/d3su00067b>

Sayas, S., Morlanés, N., Katikaneni, S. P., Harale, A., Solami, B., & Gascon, J. (2020). High-pressure ammonia decomposition on Ru–K/CaO catalysts. *Catalysis Science & Technology*, 10, 5027–5035. <https://doi.org/10.1039/d0cy00686f>

Shah, M. J. (1967). Control simulation in ammonia production. *Industrial & Engineering Chemistry*, 59, 72–83.

Skogestad, S. (2004). Control structure design for complete chemical plants. *Computers & Chemical Engineering*, 28, 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.08.002>

Smith, C., Hill, A. K., & Torrente-Murciano, L. (2020). Current and future role of Haber–Bosch ammonia in a carbon-free energy landscape. *Energy & Environmental Science*, 13, 331–344. <https://doi.org/10.1039/c9ee02873k>

Spatolisano, E., & Pellegrini, L. A. (2023). Haber–Bosch process intensification: A first step towards small-scale distributed ammonia production. *Chemical Engineering Research and Design*, 195, 651–661. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.06.031>

Swami, S. M., & Abraham, M. A. (2006). Integrated catalytic process for conversion of biomass to hydrogen. *Energy & Fuels*, 20, 2616–2622. <https://doi.org/10.1021/ef060054f>

Tang, J., Guo, K., Guan, D., Hao, Y., & Shao, Z. (2024). A semi-vapor electrolysis technology for hydrogen generation from wide water resources. *Energy & Environmental Science*, 17, 7394–7402. <https://doi.org/10.1039/D4EE02722A>

The Royal Society. (2020, febrero). *Ammonia: Zero-carbon fertiliser, fuel and energy store*. <https://royalsociety.org>

Tsoutsos, T. (2019). Hybrid wind–hydrogen energy systems. En J. K. Kaldellis (Ed.), *Stand-alone and hybrid wind energy systems* (pp. 254–281). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9781845699628.2.254>

United Nations Climate Change. (s. f.). *The Paris Agreement*. <https://unfccc.int>

Wu, T., Fan, W., Zhang, Y., & Zhang, F. (2021). Electrochemical synthesis of ammonia: Progress and challenges. *Materials Today Physics*, 16, 100310. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2020.100310>

Zhang, C., Vasudevan, S., & Rangaiah, G. P. (2010). Plantwide control system design and performance evaluation for ammonia synthesis process. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49, 12538–12547. <https://doi.org/10.1021/ie101135t>

Zhang, Z., Wu, Z., Rincon, D., & Christofides, P. D. (2019). Operational safety of an ammonia process network via model predictive control. *Chemical Engineering Research and Design*, 146, 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2019.04.004>