

GAS NATURAL Y METANO: UNA REVISIÓN

NATURAL GAS AND METHANE: A REVIEW

Olga P Márquez, Elkis Weinhold, Reynaldo Ortíz, J Márquez

Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias, Departamento de Química – Grupo Interdisciplinario Salud y Electroquímica. Mérida – 5101, Venezuela.
jokkmarquez82@gmail.com

Recibido: 19-10-2025

Aceptado: 25-11-2025

RESUMEN

Actualmente resulta imprescindible, la inmediata atención a problemas de contaminación ambiental en nuestro planeta. Una fuente importante de contaminación la constituye, el uso indiscriminado de combustibles fósiles, la tala, los incendios forestales y contaminación industrial. Una ruta actual importante, descontaminante, la constituye, la utilización de fuentes renovables de energía, la utilización de agua ultra purificada y la incorporación del sistema electroquímico para la obtención del hidrógeno verde, oxígeno medicinal, almacenamiento de energía y montaje de plantas industriales variadas e importantes, en un complejo industrial. El gas metano, considerado actualmente, poco contaminante, es ahora purificado, utilizado como generador eléctrico, y su producto, el dióxido de carbono es capturado, almacenado, reciclado a metano o convertido en vector energético, producto alimenticio, o en otro compuesto útil a la comunidad. En síntesis, el metano (poco contaminante) puede ser convertido en fuente energética no contaminante y vía para la obtención de productos de gran interés social.

Palabras clave: Gas Natural, Metano, Gas de Síntesis, Contaminación ambiental.

ABSTRACT

Nowadays. pollution includes the indiscriminate use of fossil fuels, deforestation, forest fires, and industrial emissions. An important current route to decontamination is the use of renewable energy sources, the use of ultra pure water, and the use of electrochemical systems to obtain green hydrogen, medical oxygen, energy storage, and the assembly of several important industrial plants in an industrial complex. Methane gas, currently considered to be low-polluting, is now purified, used as an electricity generator, and its product, carbon dioxide, is captured, stored, recycled into methane, or converted into an energy vector, food product, or other compound useful to the community. In short, methane (a low-polluting gas) can be converted into a non-polluting energy source and a means of obtaining products of important social concern.

Keywords: Natural Gas, Methane, Synthesis gas, Environmental pollution.

Olga P. Márquez: Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciada en Química (UCV-ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. e-mail: olgamq@ula.ve/

Elkis Weinhold: Doctora. en Química Aplicada, opción Electroquímica ULA. Licenciatura en Química ULA, miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. email: elkisweinhold@gmail.com.

Reynaldo Ortiz: Dr en Química Aplicada, opción Electroquímica (ULA), Lcdo. en Química (ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA Mérida-Venezuela. Email:reynaldoluis@gmail.com.

Jairo Márquez P: Ph.D. en Electroquímica (Univ. de Southampton, U.K.), licenciado en Química (UCV-ULA), miembro del personal docente y de investigación de la Facultad de Ciencias-ULA. e-mail: jamar@ula.ve/

Introducción

El gas natural es el combustible fósil que genera menos gases de efecto invernadero. Compuesto principalmente por metano ($\text{CH}_4 > 90\%$), emite menos dióxido de carbono (CO_2) y contaminantes que los combustibles que ha reemplazado, especialmente el carbón. Tendrá una actuación importante en la transición energética en marcha. Se usa en necesidades térmicas, para generar electricidad, y en la producción de hidrógeno. La generación de electricidad con gas natural es fundamental y complementa al sistema eléctrico durante su transición; además, el hidrógeno verde es utilizable como materia prima o como vector energético cuando sea requerido. En la electrólisis del agua pura, tendremos además oxígeno medicinal para el sector salud y las comunidades.

El gas natural, energía primaria no renovable, se origina de la materia orgánica (plantas y animales) que, durante millones de años, se descompuso sin oxígeno bajo capas de sedimentos, formando una mezcla de hidrocarburos compuesta principalmente por metano (CH_4). Este combustible fósil se extrae mediante perforaciones en yacimientos subterráneos.¹

El gas natural es un recurso de energía no renovable. Es un combustible fósil incoloro, inodoro y no tóxico. Es un recurso energético con beneficios frente a otros porque es más limpio en cuanto a emisión de residuos y es también más eficiente. El gas natural, además aporta fiabilidad a las fuentes de energía renovables.²

Hoy el gas natural se encuentra a menudo en estado gaseoso en fosas que se encuentran bajo tierra cerca de fosas de petróleo, que queda en estado líquido. Ambos combustibles se encuentran en rocas de origen sedimentario, donde fenómenos geológicos los encarcelan, uno, otro o ambos, dando lugar a grandes fosas subterráneas.

El gas natural puede estar en forma llamada seca, es decir, totalmente gaseoso, o bien en forma húmeda, es decir, mezclado con hidrocarburos más largos, que se separan

fácilmente como líquidos por compresión, refrigeración o absorción.³

El gas natural seco es predominantemente metano (79%-97%), pero puede contener cantidades de etano (C_2H_6) (0,1% - 11,4%) según la región donde se encuentre.⁴

Composición: El gas natural es principalmente una mezcla de hidrocarburos, siendo el metano (CH_4) el componente principal, generalmente con porcentajes superiores al 90%. También incluye otros hidrocarburos como etano- C_2H_6 (0,1 - 11,4 %), propano- C_3H_8 (0,1 - 3,7 %), butano- C_4H_{10} (menos del 0,7 %), pentanos- C_5H_{12} en cantidades menores y vapor de agua. Además, puede contener gases no hidrocarburos como nitrógeno- N_2 (0,5 - 6,5 %), dióxido de carbono- CO_2 (menos del 1,5 %), y a veces, pequeñas cantidades de sulfuro de hidrógeno- H_2S y helio- He .⁵⁻⁸

La energía que inicialmente obtienen las plantas del sol se almacena en forma de enlaces químicos en el gas. Constituye una importante fuente de energía fósil liberada por su combustión. Se extrae de yacimientos independientes (gas no asociado) o junto a yacimientos petrolíferos o de carbón (gas asociado a otros hidrocarburos y gases).⁹

Durante la extracción, algunos gases que forman parte de su composición natural se separan por diferentes motivos: por su bajo poder calorífico (p. ej. nitrógeno y dióxido de carbono), porque pueden condensarse en los gasoductos (al tener una baja temperatura de saturación) o porque dificultan el proceso de licuefacción de gases (como el dióxido de carbono, que se solidifica al producir gas natural licuado (GNL)). El CO_2 se determina habitualmente con el método ASTM D1945 y azufre con ASTM1137.¹⁰

El propano, el butano y otros hidrocarburos más pesados también se separan porque dificultan que la combustión del gas natural sea eficiente y segura. El agua (vapor) se elimina por estos motivos y porque a presiones altas forma hidratos de metano, que obstruyen los gasoductos. Los derivados del azufre se depuran hasta concentraciones muy bajas para evitar

la corrosión, la formación de olores y las emisiones de dióxido de azufre (causante de la lluvia ácida) tras su combustión.¹¹

La detección y la medición de sulfuro de hidrógeno (H_2S) en gas natural se efectúa siguiendo el método ASTM D2385 y el método ASTM D2725 para identificar gases de combustión y combustibles. Por último, para su uso doméstico se le añaden trazas de mercaptanos (entre ellos el metil-mercaptano CH_4S), que permiten su detección olfativa en caso de fuga.

Impacto Ambiental: El CO_2 emitido a la atmósfera tras la combustión del gas natural es un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global de la Tierra.¹²

Esto se debe a que es transparente a la luz visible y ultravioleta, pero absorbe la radiación infrarroja que emite la superficie de la Tierra al espacio exterior, ralentizando el enfriamiento nocturno de esta.

La combustión del gas natural produce menos gases de efecto invernadero que otros combustibles fósiles como los derivados petrolíferos (fuelóleo, gasóleo y gasolina) y especialmente que el carbón. Además, es un combustible que se quema de forma más limpia, eficiente y segura y no produce dióxido de azufre (causante de la lluvia ácida) ni partículas sólidas.

El procesamiento del gas natural es una serie de procesos industriales diseñados para purificar el gas natural bruto mediante la eliminación de impurezas, contaminantes e hidrocarburos de mayor masa molecular para producir lo que se conoce como gas natural seco de calidad para gasoductos.¹³

El gas natural debe procesarse para prepararlo para su uso final y garantizar la eliminación de contaminantes. Las plantas de procesamiento de gas natural,¹⁴ purifican el gas natural crudo eliminando contaminantes como sólidos, agua, dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), mercurio e hidrocarburos de mayor masa molecular. Una planta de gas natural operativa suministra gas

natural seco con calidad de gasoducto que puede ser utilizado como combustible por consumidores residenciales, comerciales e industriales, o como materia prima para síntesis químicas.¹⁵

Procesamiento del gas natural

El gas natural presenta una composición que puede variar en función del tipo de yacimiento, profundidad y condiciones geológicas del lugar, por lo tanto, debe ser sometido a un tratamiento previo de acondicionamiento y remoción de sustancias contaminantes. El gas residual de la sección de recuperación de LGN es el gas de venta final, purificado, que se envía por gasoducto a los mercados de usuarios finales.¹⁶

El comprador y el vendedor establecen normas y acuerdos sobre la calidad del gas. En ellos se suele especificar la concentración máxima permitida de CO_2 , H_2S y H_2O , además de exigir que el gas esté comercialmente libre de olores y materiales objetables, así como de polvo u otras materias sólidas o líquidas, ceras, gomas y componentes gomosos que puedan dañar o afectar negativamente al funcionamiento de los equipos del comprador.

Procesamiento

1) Eliminación de gases ácidos (sulfuro de hidrógeno y dióxido de carbono) con el uso de membranas poliméricas o tratamiento con aminas. Se puede utilizar el proceso Claus para recuperar azufre elemental.

2) Eliminar vapor de agua utilizando absorción regenerable en trietilenglicol líquido (o un proceso de membranas).

3) El mercurio se elimina mediante un proceso de adsorción (carbono activado o tamices moleculares regenerables).

La composición del gas natural afecta directamente sus propiedades, como su poder calorífico, su densidad y su comportamiento en diferentes condiciones.¹⁷

Por ejemplo, la presencia de dióxido de carbono y nitrógeno puede reducir el poder

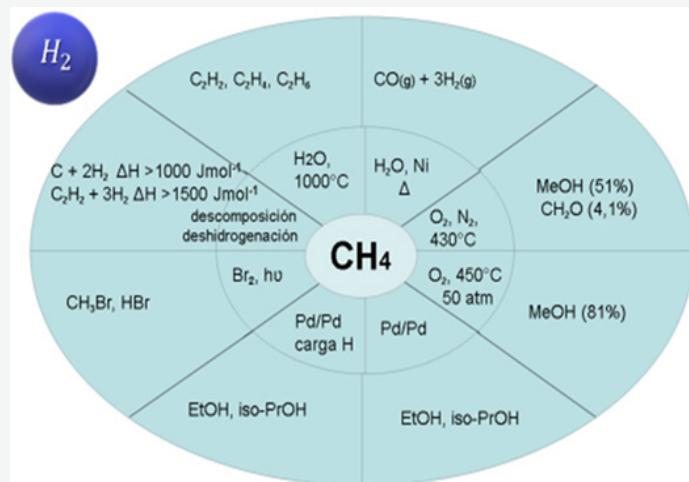


Figura 1. Esquema ilustrativo de transformación del Metano a productos de interés petroquímico

calorífico del gas, mientras que el sulfuro de hidrógeno requiere procesos de purificación para garantizar la seguridad y eficiencia en su uso.

Purificación

La separación permite obtener metano de alta pureza, que es esencial para diversas aplicaciones, como la producción de energía y la industria química. Se emplean membranas permeables para separar el metano de otros gases en función de sus diferentes propiedades físicas y químicas. Las membranas retienen ciertos gases mientras que otros los atraviesan, permitiendo la separación. La membrana separa el metano reteniéndolo. Moléculas no deseadas como el dióxido de carbono (CO_2), el agua (H_2O), los sulfuros (H_2S) y el amoníaco (NH_3) pasan a través de la membrana, permean. Se obtiene gas natural renovable.

El gas natural es un componente crucial del proceso de transición energética, ya que ayuda a satisfacer la creciente demanda al mismo tiempo que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero y mejora la calidad del aire. Es una de las pocas fuentes de energía que puede utilizarse en todos los sectores de la economía mundial. Se utiliza para generar electricidad, proporcionar calor para procesos industriales esenciales, calentar hogares y transportar personas y mercancías. Es adecuado para la fabricación de amoníaco, producto base industrial

de abonos nitrogenados, y de metanol, producto que se utiliza para fabricar plásticos y proteínas sintéticas. En comparación con las centrales eléctricas de carbón, las centrales modernas eléctricas de gas natural emiten menos de una décima parte de los contaminantes.

Otros procesos de purificación utilizados son la separación criogénica y la separación por absorción y por adsorción.

Usos del Metano

El gas natural es una fuente de energía primaria abundante en Venezuela, considerada alternativa por ser menos contaminante que las convencionales y generar menos huella ambiental. Por medio de las tecnologías y proyectos más adecuados a la concepción del desarrollo sostenible podría incorporarse en la matriz energética siendo Venezuela un país con grandes reservas.

Algunas reacciones del Metano

La figura 1 muestra un esquema de las reacciones más importantes del metano, para obtener productos de interés petroquímico

Obtención de Múltiples, variados y valiosos productos de interés social en la comunidad mundial. Vía la obtención previa del gas de síntesis, por oxidación parcial o por reformado autotérmico del metano.

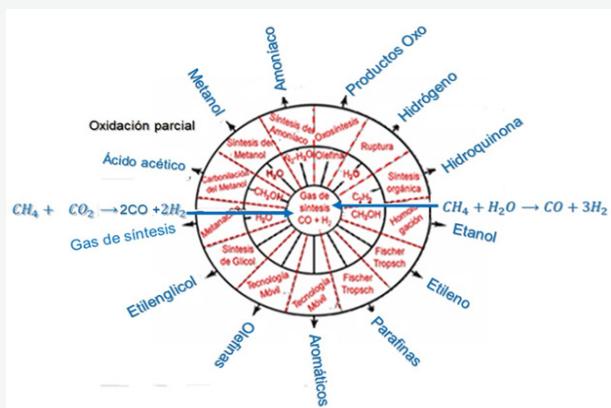
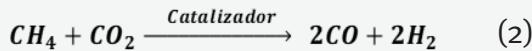


Figura 2. Ilustración de la importancia del gas de síntesis para la industria petroquímica

(a) Reformado de metano con vapor de agua. Este es el método más utilizado para generar gas de síntesis, ya que el metano es un compuesto fácilmente disponible que se encuentra como componente principal del gas natural. El esquema de reacción es:



(b) Reformado de metano con CO₂. Es un método que utiliza distintos metales de transición soportados (Ni, Ru, Rh, Pd) como catalizador, y con el que se obtiene gas de síntesis con alto contenido en CO, lo que es adecuado para los procesos de hidroformilación (figuras 2 y 3)



Obtención de Metano y Energía por reciclaje del CH₄ y CO₂

La figura 4 muestra sistemas de conversión del metano y el dióxido de carbono.

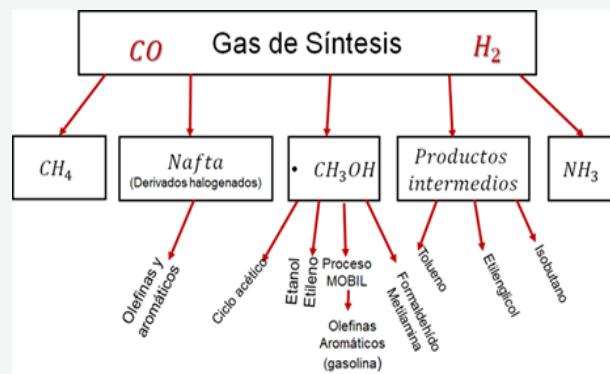


Figura 3. Síntesis adicionales con Metano (gas de síntesis)

Es oportuno mencionar, que la comercialización de celdas de combustible, estacionarias, descentralizadas, en el intervalo 10-250 kWh está ocurriendo. Estas celdas de combustible podrán ser utilizadas con gas natural y, en consecuencia, pequeños reformadores de gas natural serán desarrollados (ONSI, KTI, Haldor s0)

$CO_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow CO(g) + H_2O(l)$	$E^\circ = 0,250$
$CO_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow HCOOH(l)$	$E^\circ = -0,173$
$CO_2 + 8H^+ + 8e^- \rightarrow CH_4 + 2H_2O(l)$	$E^\circ = 0,173$
$2CO_2 + 12H^+ + 12e^- \rightarrow C_2H_4 + 4H_2O(l)$	$E^\circ = 0,054$
$CO_2 + 6H^+ + 6e^- \rightarrow CH_3OH(l) + H_2O(l)$	$E^\circ = 0,033$
$2CO_2 + 12H^+ + 12e^- \rightarrow C_2H_5OH + 3H_2O(l)$	$E^\circ = 0,084$
$CO_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow HCHO(l) + H_2O(l)$	$E^\circ = -0,067$
$2CO_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2C_2O_4(l)$	$E^\circ = -0,500$
$2CO_2 + 14H^+ + 14e^- \rightarrow C_2H_6(g) + 4H_2O$	$E^\circ = 0,143$
$CO_2 + e^- \rightarrow CO_2^-$	$E^\circ = -1,900$

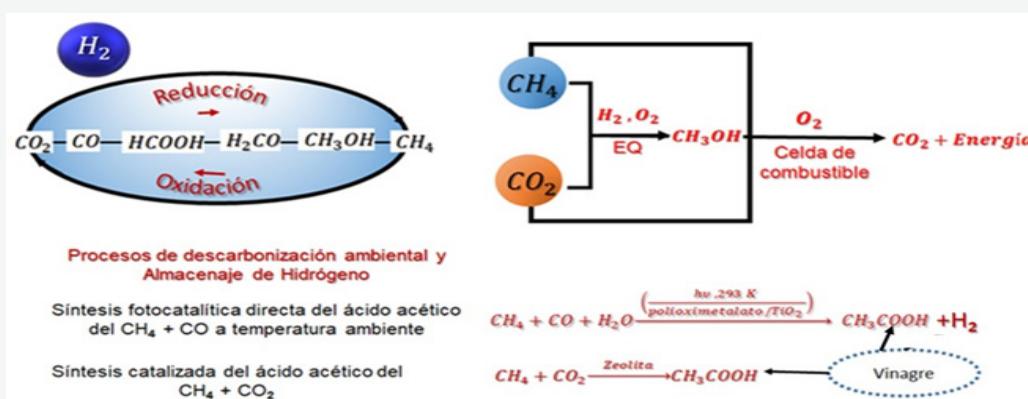


Figura 4. Cuadro ilustrativo de conversión del Metano, vía electroquímica

Existe una amplia gama de procedimientos electroquímicos para la comprensión del estudio del comportamiento del dióxido de carbono, en particular, su reducción a productos de interés petroquímico.¹⁸⁻²⁶

Producción de Energía Eléctrica:

El gas natural es un combustible importante para la obtención de electricidad, tiene un mejor rendimiento energético y un menor impacto ambiental que otros combustibles fósiles. El desarrollo y mejora de las turbinas de gas permite conseguir ahorros de hasta un 40%.²⁷⁻²⁹

Hay tres sistemas de producción de energía eléctrica que tienen el gas natural como combustible:

⦿ Las centrales térmicas convencionales, que generan electricidad mediante un sistema caldera-turbina de vapor con un rendimiento global de un 33%.³⁰

⦿ Las centrales de cogeneración termoeléctrica,³¹ en las que se obtiene calor y electricidad aprovechando el calor residual de los motores y las turbinas. El calor producido sirve para generar calefacción y aire acondicionado o para calentar agua sanitaria, y la electricidad se utiliza o se envía a la red eléctrica general. Su rendimiento eléctrico depende de la tecnología utilizada, pero puede oscilar entre el 30 y el 40%, mientras que el rendimiento térmico está alrededor del 55%.³²

⦿ Las centrales de ciclo combinado (CCGT), que combinan una turbina de gas y 43 primaria.³³⁻³⁶

Las propiedades físico-químicas del metano hacen de este gas un excelente combustible, debido a su bajo índice de contaminación atmosférica, y al bajo impacto acústico de los motores. En forma de gas natural comprimido (GNC), el metano se ha utilizado en numerosas experiencias que han demostrado su viabilidad como alternativa a los combustibles fósiles tradicionales.³⁷

En todo el mundo, ya circulan más de un millón de vehículos impulsados con

GNC, que producen hasta un 50% menos de emisiones de CO₂ y un 80% menos de óxidos de nitrógeno (NO_x) que los vehículos accionados por gasolina o gasóleo, y no emiten plomo, azufre ni compuestos aromáticos.

Proceso paso a paso

En una planta de metano, la energía se produce principalmente a través de la cogeneración, que implica la quema controlada del metano para generar simultáneamente electricidad y calor útil.^{38,39} El metano utilizado puede ser gas natural o, más comúnmente en las plantas de biogás, un producto de la digestión anaeróbica de materia orgánica.

⦿ Combustión: El metano purificado o el biogás se quema en una cámara de combustión.

⦿ Generación de vapor: El calor producido por la combustión se utiliza para calentar agua y producir vapor.

⦿ Movimiento de la turbina: El vapor a alta presión impulsa las palas de una turbina.

⦿ Producción de electricidad: La turbina está conectada a un generador eléctrico, que convierte la energía mecánica del giro de la turbina en energía eléctrica.

Captura del CO₂:

La figura 5 muestra cómo es posible atrapar las emisiones de CO₂ de la atmósfera, para su posterior procesamiento.

La tecnología electroquímica de adsorción utiliza electrodos selectivos a al CO₂ del aire para convertirlo en combustibles (ej.: metanol y etanol). Estos dispositivos ofrecen una eficiencia en límites de detección del orden de concentraciones tan bajas como 0,1 % (1000 ppm) y una eficiencia faradaica superior al 90%.⁴⁰

Existen electrodos que pueden capturar CO₂ del aire. Estos electrodos suelen ser parte de dispositivos o sistemas que utilizan la captura directa de aire (DCA), una tecnología



Figura 5. Captura electroquímica del CO₂ atmosférico.

que extrae CO₂ directamente de la atmósfera. Los materiales y procesos utilizados varían, pero algunos ejemplos incluyen electrodos con materiales como poliantraquinona o carbón activado de alta superficie, así como tecnologías que emplean mediadores redox para facilitar la captura y liberación del CO₂.⁴¹

Los tamices moleculares (13 X, 4A), por ejemplo, pueden adsorber selectivamente CO₂ y H₂S en la medida en que el gas es de pureza ultra alta y pueden utilizarse en aplicaciones que requieren alta sensibilidad. los tamices moleculares pueden adsorber agua, CO₂ y H₂S al mismo tiempo con gran selectividad. Los tamices moleculares también tienen una vida útil más larga y un mayor índice de regeneración, lo que resulta más económico para aplicaciones a largo plazo.⁴² Estas ventajas hacen de los tamices moleculares la opción preferida para conseguir la pureza y fiabilidad necesarias para el transporte por tuberías, la seguridad y la eficiencia.

Los tamices moleculares (5A,13X), son los adsorbentes avanzados más utilizados para eliminar estas impurezas. Debido a su alta capacidad de adsorción y selectividad, pueden separar eficazmente hidrocarburos pesados y, al mismo tiempo, adsorber mercurio en un solo paso. Los tamices moleculares son especialmente útiles en sistemas criogénicos porque pueden funcionar a bajas temperaturas sin que se degrade su rendimiento. Además, son regenerables, lo que mejora su asequibilidad y funcionalidad a largo plazo.

El futuro de la purificación del gas natural⁴³

vendrá determinado por la medida en que satisfaga las necesidades energéticas en constante evolución, los retos de costes y las cuestiones medioambientales. Los nuevos avances garantizarán que el gas natural siga siendo una fuente de energía estable, eficiente y sostenible en la transición hacia una combinación energética más limpia.

Se prevé que los sistemas de eliminación de dióxido de carbono que pueden capturar y almacenar o reciclar CO₂ ganen más popularidad a medida que el mundo cambie hacia emisiones de carbono más bajas. También hay interés por los sistemas de depuración pequeños y portátiles, sobre todo para las aplicaciones extremas y a pequeña escala por su flexibilidad y logística.

¿Cómo funcionan?

1. Materiales absorbentes/adsorbentes: Se utilizan materiales con alta afinidad por el CO₂, como poliantraquinona, quinonas, fenazinas o carbón activado con alta área superficial.

2. Aplicación de electricidad: En algunos casos, se aplica una corriente eléctrica para inducir una reacción química que facilita la captura del CO₂. Por ejemplo, en el sistema del MIT, la poliantraquinona reacciona con el CO₂ al aplicar electricidad.

3. Liberación del CO₂: Una vez que el electrodo está saturado con CO₂, se puede liberar el gas mediante cambios en las condiciones, como la variación de voltaje o temperatura, dependiendo del material y

proceso utilizado.

4. Uso o almacenamiento: El CO₂ capturado puede ser utilizado para diversos fines, como la producción de combustibles sintéticos o productos químicos, o puede ser almacenado permanentemente en formaciones geológicas.

Ventajas de los electrodos en la captura de CO₂

Se pueden destacar las siguientes ventajas:^{44,45}

Eficiencia energética: Algunos métodos, como el sistema del MIT, requieren menos energía que los métodos convencionales de captura de carbono.

Adaptabilidad: La tecnología puede adaptarse a dispositivos más pequeños y no requiere altas concentraciones de CO₂ para ser eficiente.

Escalabilidad: La capacidad de la tecnología para capturar CO₂ puede ser escalada fácilmente agregando más electrodos, según investigadores del National Geographic España.

Ejemplos de tecnologías:

Sistema del MIT: Utiliza electrodos con poliantraquinona para capturar CO₂ del aire y liberarlo para su almacenamiento o uso.

Electrodos de carbón activado: Se han investigado electrodos de carbón activado con alta superficie para la captura electroquímica de CO₂.

Tecnologías de electrodos con mediadores redox: Utilizan mediadores solubles para facilitar la captura y liberación de CO₂ mediante cambios en el pH.

Tecnología Orca: Aunque no utiliza electrodos, es un sistema que captura CO₂ de la atmósfera y lo transforma en roca, demostrando la viabilidad de la captura a gran escala.

ELECTROREDUCCIÓN DEL CO₂:

Empleando agua como solvente para la electro-reducción de CO₂, los distintos metales pueden ser agrupados en función del tipo de producto mayoritario al que dan lugar, del modo siguiente:

- Hidrocarburos y alcoholes (Cu).
- Monóxido de carbono (Au, Ag, Zn, Pd, Ga).
- Ácido fórmico (Pb, Hg, In, Sn, Bi, Cd, Tl).
- Algunos metales no muestran propiedades catalíticas específicas bajo las condiciones estándar de reacción tales como, presión parcial de CO₂ 1 atm y 25°C (Ni, Pt, Fe, Co, Rh, Ir, W). Sin embargo, presentan propiedades catalíticas si se modifican estas condiciones.
- Algunos metales claramente catalizan la formación de hidrógeno incluso si las condiciones de reacción estándar se modifican (Ti, Nb, Ta, Mo, Mn, Al).

Esquema industrial alimentado con planta eléctrica de metano natural

El metano natural purificado es fuente eléctrica para la obtención de H₂ verde, O₂ medicinal, H₂O ultrapura, H₂O potable, reconversión del CO₂ producido a metano, metanol, ácido acético y energía. El esquema inicial sugerido se presenta en la figura 6 y sería el origen de un complejo industrial que puede luego incorporar cloro soda, amoníaco, fertilizantes, etanol y otros productos.



Figura 6. Un ejemplo de cómo se puede utilizar una planta eléctrica alimentada de gas natural minimizando las emisiones de CO₂

Conclusiones

- ⦿ Es posible un sistema energético con utilización de gas metano, de bajas emisiones, con almacenaje, reciclado y sin contaminación.
- ⦿ El sistema puede incorporar una estación de celdas de combustible para generación adicional de energía y agua de alta pureza cuando sea requerida.
- ⦿ Para el sistema de salud y la comunidad, se abre un compás interesante de energía circular, con producción de oxígeno, hidrógeno, agua ultra pura, agua potable y posibilidad de plantas adicionales de gran importancia (amoníaco, urea, metanol, etanol, ácido acético, etc.).
- ⦿ Con el sistema electroquímico es posible la obtención de elementos y compuestos químicos de alta pureza, sin contaminación, para satisfacción del sistema de salud pública, privada y comunidad en general.

Referencias

- 1.- Ricci, E., Di Maio, E., Degli Esposti, M., Liu, L., Mensitieri, G., Fabbri, P., Kentish, S.E. y De Angelis, M.G. (2021). Towards a systematic determination of multicomponent gas separation with membranes: the case of CO₂/CH₄ in cellulose acetates, *J. Membr. Sci.* 628, 119226.
- 2.- Samei, M. y Raisi, A. (2021) Multi-stage gas separation process for separation of carbon dioxide from methane: Modeling, simulation, and economic analysis. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 170, 108676.
- 3.- Lele Yang, Xiaodong Chen, Chengyu Huang, Sen Liu, Bo Ning, Kai Wang (2024). Revisión de las tecnologías de separación gas-líquido: mecanismo de separación, ámbito de aplicación, estado de la investigación y perspectivas de desarrollo. *Investigación y diseño en ingeniería química*, 201, 257-274.
- 4.- Miogas (2024) Gas Natural: obtención, composición y creación <https://miogas.com/blog/gas-natural-obtencion-composicion-y-creacion/>
- 5.- Márquez, O. P., Salazar, E., Márquez, J., Martínez, Y., & Manfredy, L. (2016). Evaluación de Nanopartículas de Pt/Rh/Ru Depositadas Sobre Carbón Vítreo Como Catalizador para la Electrooxidación de Metanol. *Revista de Ciencias Naturales Journal of Natural Sciences*, 1, 39-63.
- 6.- Qi Lu and Feng Jiao (2016), Electrochemical CO₂ reduction: Electrocatalyst, reaction mechanism, and process engineering, *Nano Energy.*,<http://dx.doi.org/10.1016/j.nanoen.2016.04.0097>
- 7.- Hatemeh Haghigatjoo, Mohammad Reza Rahimpour (2024) Introducción a las impurezas no ácidas del gas natural: Partículas, condensados, mercurio, nitrógeno, helio. Avances en el gas natural: formación, procesamiento y aplicaciones. 5, 3-24. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-19223-4.00009-7>
- 8.- Jessica Gómez P. (2024). Osinergmin. Operación de plantas de procesamiento de gas natural.

- 9.-http://gasnatural.osinerg.gob.pe/contenidos/uploads/GFGN/Operacion_Plantas_Procesamiento_de_Gas_Natural.pdf
- 10.- Balat, M. (2007). Status of Fossil Energy Resources: A Global Perspective. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 2(1), 31–47.
- 11.- Gad, M.S., Shoaib, A. M., Awad, M., Elmawgoud, H. A., Khalil, S. A., & Alsabagh, A. M. (2025). Innovative role of Benzalkonium chloride as a quaternary ammonium salt for natural gas hydrate formation and storage. *Scientific Reports*, 15(1), 16144.
- 12.- Wilk-Jakubowski, J. L., Pawlik, L., Frej, D., & Wilk-Jakubowski, G. (2025). Data-Driven Computational Methods in Fuel Combustion: A Review of Applications. *Applied Sciences*, 15(13), 7204.
- 13.- Ohte, N. (2025). Ecosystem responses and behaviors under changing pressure of air pollutants: Special article collection from the 10th International Conference on Acid Deposition “ACID RAIN 2020”. *Ecological Research*, 40(3), 245-248
- 14.- Wilson, E. F., Taiwo, A. J., Chineme, O. M., Temitope, A. Y., Chukwuka, E. F., Olufemi, A. M., ... & Adesanya, Z. (2022). A review on the use of natural gas purification processes to enhance natural gas utilization. *Int. J. Oil, Gas Coal Eng*, 11, 17-27.
- 15.- Mohd Pauzi, M. M. I., Azmi, N., & Lau, K. K. (2022). Emerging solvent regeneration technologies for CO₂ capture through offshore natural gas purification processes. *Sustainability*, 14(7), 4350.
- 16.- Olga P. Márquez, Yris Martínez, Keyla Márquez, Elkis Weinhold, Reynaldo Ortíz (2022) Electroquimienergía y cambio climático: Una revisión. *InfoANALÍTICA*, 10 (1) 43-82. DOI 10.26807/ia.
- 17.- Ghorbani, B., Hamedi, M. H., Amidpour, M., & Mehrpooya, M. (2016). Cascade refrigeration systems in integrated cryogenic natural gas process (natural gas liquids (NGL), liquefied natural gas (LNG) and nitrogen rejection unit (NRU)). *Energy*, 115, 88-106.
- 18.- Ghaib, K.; Nitz, K.; Ben-Fares, F.-Z. Chemical Methanation of CO₂: A Review. *ChemBioEng Rev*. 2016, 3, 266–275.
- 19.- SALDÍVAR-ESPARZA, Santiago, CABRERA-ROBLES, José Salvador, RETA-HERNÁNDEZ, Manuel. Tecnologías de captura y almacenamiento de dióxido de carbono. *Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias*. 2017, 4-12: 22-34.
- 20.- R. Ortiz, O. P. Márquez, J. Márquez, C. Gutiérrez (1995). FTIR spectroscopy study of the Electrochemical Reduction of CO₂ on Various metal Electrodes in methanol, , J. Electroanal. Chem, 390, 99/107,
- 21.- R. M. Hernández, J. Márquez, O. P. Márquez, M. Choy, C. Ovalles, J. J. García, B. Scharifker (1999). Reduction of Carbon dioxide on modified Glassy Carbon Electrodes, J. Electrochem. Soc., 146(11), 4131- 4136
- 22.- Belkys Pérez, Jairo Márquez, Marisela Choy, Olga P. Márquez, Reynaldo Ortíz (2000), Estudios de deposición de cobre sobre acero para la reducción electroquímica de CO₂, CIENCIA, 8 (2), 226-234.

- 23.- Martínez Yris, Hernández Ricardo, Borrás Carlos, Márquez P. Olga, Ortíz Reynaldo, Choy Marisela, Márquez Jairo (2001) Reducción Electroquímica del dióxido de carbono sobre electrodos modificados con partículas metálicas, , Universidad, Ciencia y Tecnología, 5(18), 59-64, 2001
- 24.- R. Ortiz, O. P. Márquez, J. Márquez, C. Gutiérrez. (1995) FTIR spectroscopy study of the Electrochemical Reduction of CO₂ on Various metal Electrodes in methanol, J. Electroanal. Chem, 390, 99/107,
- 25.- Carbon dioxide Electrochemical Reduction on copper electrodes and several electrolytic media B. Pérez, Y. Martinez, J. Márquez, M. Choy, O. P. Márquez (1995) , Proceedings of the International Symposium on Electrochemical Science and Technology, ISEST, Hong Kong, 1, L59-1/ L59- 7, 1995
- 26.- Reduction of Carbon dioxide on modified Glassy Carbon Electrodes, R. M. Hernández, J. Márquez, O. P. Márquez, M. Choy, C. Ovalles, J. J. García, B. Scharifker, J. Electrochem. Soc., 146(11), 4131- 4136, 1999
- 27.- <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2021.119226>.Gabi, K.; Nitz, K.; Ben-Fares, F.-Z. Chemical Methanation of CO₂: A Review. ChemBioEng Rev. 2016, 3, 266–275.
- 28.- MevisseF., Krewinkel, R., & Wiedermann, A. (2025). The Future of Industrial Gas Turbines: Technological Advances and Market Trends. Journal of Thermal Science and Engineering Applications, 1-42
- 29.- National Academies of Sciences, Medicine, Division on Engineering, Physical Sciences, Aeronautics, Space Engineering Board, & Compite on Advanced Technologies for Gas Turbines. (2020). Advanced technologies for gas turbines. National Academies Press.
- 30.- Shu, G., Yu, C., Shen, G., He, A., Wang, Z., & Wang, X. (2023). Development of heavy-duty gas turbines in China in the new era. Strategic Study of Chinese Academy of Engineering, 24(6), 184-192.
- 31.- Jamel, M. S., Abd Rahman, A., & Shamsuddin, A. H. (2013). Advances in the integration of solar thermal energy with conventional and non-conventional power plants. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 20, 71-81.
- 32.- Yodovard, P., Quedará,J., & Hirunlabh,J. (2001). The potential of waste heat thermoelectric power generation from diesel cycle and gas turbine cogeneration plants. Energy sources, 23(3), 213-224
- 33.- Boretti, A. (2025). Combined cycle gas turbine (CCGT) plants utilizing methane-hydrogen blends represent a significant element in Australia's journey toward achieving net-zero emissions. Fuel, 381, 133339.
- 34.- Garcia, J., & Guédez, R. (2025). Techno-economic assessment of retrofitted combined-cycles for power-to-hydrogen-to-power systems in European electricity markets. International Journal of Hydrogen Energy, 190, 152177.
- 35.- in European electricity markets. International Journal of Hydrogen Energy, 190, 152177

- 36.- Mondol, J. D., & Carr, C. (2017). Techno-economic assessments of advanced Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) technology for the new electricity market in the United Arab Emirates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 19, 160-172.
- 37.- Mondol, J. D., & Carr, C. (2017). Techno-economic assessments of advanced Combined Cycle Gas Turbine (CCGT) technology for the new electricity market in the United Arab Emirates. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 19, 160-172.
- 38.- Stanojević, N., Vasić, M., & Popović, V. (2021). The contribution of cng powered vehicles in the transition to zero emission mobility example of the light commercial vehicles fleet. *Thermal Science*, 25(3), 1867-1878.
- 39.- Zardoya, A. R., Lucena, I. L., Bengoetxea, I. O., & Orosa, J. A. (2023). Research on the new combustion chamber design to operate with low methane number fuels in an internal combustion engine with pre-chamber. *Energy*, 275, 127458.
- 40.- Choi, C. H., Lee, J. Y., Kim, D. J., Woo, S. G., & Uhm, H. S. (2019). Methane Disintegration by Water Vapor in a Hot Chamber heated by Using a Microwave Steam Torch. *Journal of the Korean Physical Society*, 75(5), 367-372.
- 41.- Jiang, Y., Li, L., Zhang, J., Li, W., Zhao, X., Xie, Y., ... & Zhong, M. (2025). Electrochemical CO₂ reduction using membrane electrode assemblies: progress, challenges, and opportunities. *Chemistry—An Asian Journal*, 20(18), e00685.
- 42.- Kang, J. S., Kim, S., & Hatton, T. A. (2021). Redox-responsive sorbents and mediators for electrochemically based CO₂ capture. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 31, 100504.
- 43.- Hou, M., Li, L., Xu, R., Lu, Y., Song, J., Jiang, Z., ... & Jian, X. (2025). Precursor-chemistry engineering toward ultrapermeable carbon molecular sieve membrane for CO₂ capture. *Journal of energy chemistry*, 102, 421-430
- 44.- Hou, M., Li, L., Xu, R., Lu, Y., Song, J., Jiang, Z., ... & Jian, X. (2025). Precursor-chemistry engineering toward ultrapermeable carbon molecular sieve membrane for CO₂ capture. *Journal of energy chemistry*, 102, 421-430
- 45.- Xia, Q., Zhang, K., Zheng, T., An, L., Xia, C., & Zhang, X. (2023). Integration of CO₂ capture and electrochemical conversion: focus review. *ACS Energy Letters*, 8(6), 2840-2857.