



CIENCIAS TÉCNICAS

Premio Anual de la Academia de Ciencias de Cuba, 2020

Purificación de gases combustibles

Elina Fernández Santana ^{1*} <https://orcid.org/0000-0001-5468-8419>

Susana Rodríguez Muñoz ¹ <https://orcid.org/0000-0001-9871-1254>

Lianys Ortega Viera ¹ <https://orcid.org/0000-0003-0386-4042>

Rafael Franco Rico ¹ <https://orcid.org/0000-0002-7249-4180>

Anayancy Crespo Artigas ¹ <https://orcid.org/0000-0001-7924-0952>

Liuver Bárcenas Pérez ¹ <https://orcid.org/0000-0001-9142-4287>

¹ Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría. La Habana, Cuba

*Autor para la correspondencia: elina@quimica.cujae.edu.cu

RESUMEN

Palabras clave

biogás; gas acompañante; residuales; membranas; purificación

Introducción. El uso indiscriminado de combustibles convencionales, favorece el empleo de gases combustibles que disminuyan el impacto negativo al medio ambiente. Este trabajo se realizó con el objetivo de exponer los métodos de purificación de gases combustibles desarrollados en Cuba en particular, biológicos y de filtración por membranas, basados en el empleo de materiales de desechos, ya sean residuales líquidos, residuos sólidos y productos naturales. **Métodos.** Para reducir los contaminantes se emplearon métodos biológicos, basados en el uso de 2 equipos de contacto gas líquidos (biorreactores: columna de lecho empacado y torre de bandeja a flujo laminar (TBFL)), empleando residuales líquidos y tecnología de membranas sintetizadas a partir de materiales naturales (zeolita) y de desechos (vidrio borosilicato) a diferentes escalas de la investigación desarrollada. **Resultados.** Los métodos desarrollados son físico-químicos y biológicos, se basan fundamentalmente en el empleo de materiales de desechos, ya sean residuales líquidos donde se aprovechan las bondades de los microorganismos presentes en ellos o residuos sólidos o productos naturales con los que se conforman membranas cerámicas, tienen menores costos de inversión y producción que los que tradicionalmente se emplean. Se han aplicado exitosamente al biogás y al gas acompañante del petróleo, logrando remociones de sulfuro de hidrógeno ($H_2S_{(g)}$) superiores al 98 %, cumpliendo con las normas vigentes al efecto (menores de 0,1 % en volumen), así como también se reduce la concentración de dióxido de carbono ($CO_{2(g)}$). Como conclusión, se dispone en Cuba de métodos de purificación de gases combustibles con residuos y productos naturales, que están al alcance de países en vías de desarrollo.

Fuel gas purification

ABSTRACT

Introduction. The indiscriminate use of conventional fuel favors the use of combustible gases that reduce the negative impact on the environment. Objective: To expound the fuel gas



Keywords

biogas; accompanying gas; residuals; membranes; purification

purification methods developed in Cuba, in particular, biological and membrane filtration methods, based on the use of waste materials, wastewater, solid waste and natural products. **Methods.** To reduce contaminants, biological methods were used, based on the use of two liquid gas contact pieces of equipment (bioreactors: packed bed column and laminar flow tray tower (TBFL)), using wastewater and membrane technology synthesized from natural materials (zeolite) and waste (borosilicate glass) at different scales of the research developed. **Results.** The methods developed are physical, chemical and biological. They are based primarily on the use of waste materials, either liquid waste where they take advantage of the benefits of the microorganisms present in them or solid waste or natural products that make up ceramic membranes. They have lower investment and production costs than those traditionally used. They have been successfully applied to biogas and gas accompanying oil, achieving removals of hydrogen sulfide ($H_2S_{(g)}$) over 98 %, complying with current standards for this purpose (less than 0,1 % by volume), as well as reducing the concentration of carbon dioxide ($CO_{2(g)}$). As a conclusion, Cuba has methods of purifying combustible gases with waste and natural products that are within the reach of developing countries.

INTRODUCCIÓN

Las fuentes de energía más utilizadas actualmente son petróleo, carbón y gases combustibles, dentro de esta última se encuentran el gas acompañante de petróleo (GAP) y el biogás, los mismos están compuestos fundamentalmente por hidrocarburos entre los que se encuentra el $CH_{4(g)}$, que le aporta valor calórico como combustible y otros gases inorgánicos como el $CO_{2(g)}$ y el $H_2S_{(g)}$, que no tienen valor calórico, provocan daños al medioambiente y ocupan un volumen que no es útil al comprimirlos, precisamente el $H_2S_{(g)}$ es el más tóxico y corrosivo, de ahí que resulte necesaria su eliminación. Los métodos de desulfuración que existen a nivel mundial son: adsorción por métodos físicos, absorción por métodos químicos, filtración por membranas y biológicos.

Unos requieren del empleo de reactivos químicos o de materiales absorbentes o adsorbentes, antiespumantes, lo cual implica elevados costes de operación y limitada eficiencia, o de membranas poliméricas muy costosas desde el punto de vista de su adquisición o para el caso de los biológicos, se necesita disponer de determinado microorganismo o familia de ellos en condiciones específicas para su empleo, ⁽¹⁾ todo lo que resulta caro y prácticamente son prohibitivos para ser aplicados en países en vías de desarrollo como Cuba, de ahí que, el objetivo general de este trabajo es exponer los métodos de purificación de gases combustibles desarrollados en Cuba en particular, biológicos y de filtración por membranas, basados en el empleo de materiales de desechos, ya sean residuales líquidos, residuos sólidos y productos naturales.

MÉTODOS

Para reducir los contaminantes se emplearon métodos biológicos, basados en el uso de 2 equipos de contacto gas

líquidos [biorreactores: columna de lecho empacado y torre de bandeja a flujo laminar (TBFL)], empleando residuales líquidos y tecnología de membranas sintetizadas a partir de materiales naturales (zeolita) y de desechos (vidrio borosilicato) a diferentes escalas de la investigación desarrollada.

Métodos biológicos

En los 2 biorreactores empleados, la purificación de los gases combustibles (biogás o el GAP) ocurre a partir del empleo de bacterias sufoxidantes presentes en los residuales líquidos. El procedimiento desarrollado consiste en poner en contacto el gas combustible con una pequeña cantidad de oxígeno del aire, entre un 1,5 % y un 6 % del gas combustible a tratar y pasar ambos fluidos (combustible y aire) por el interior de los equipos purificadores que contiene líquido residual durante un período de tiempo, donde los microorganismos que se encuentran en el líquido, consumen el $H_2S_{(g)}$ en altas proporciones, posibilitando obtener a la salida de los equipos, biogás o GAP, que contiene concentraciones volumétricas de $H_2S_{(g)}$ menores de 0,1 %, cantidades no dañinas para el hombre, el medio ambiente y los materiales de construcción. ⁽²⁾ El principal atractivo de este procedimiento es el uso de residuales líquidos como promotor de la purificación, requiriéndose solo de la superficie de la fracción líquida del medio residual y de la presencia de una pequeña cantidad de oxígeno, para lograr su efectividad, cuestión que fue probada a diferentes escalas, laboratorio, banco y piloto, tanto para el biogás como para el GAP, las 2 fuentes de energía que contienen metano, el que constituye el combustible de las mismas. ⁽³⁾

Tecnología de membranas

Para la obtención y desarrollo de las membranas, se emplean materiales vítreos de desechos (de producciones de

cristalería para laboratorios que constituyen residuos pasivos sin tener utilidad) en particular, vidrio borosilicato o de zeolita natural, del yacimiento de tasajeras, carbón vegetal, etilenglicol y óxido de zinc. En el caso del etilenglicol y el óxido de zinc son materiales de laboratorio con calidades analíticas. El procedimiento empleado para la síntesis de las membranas tiene los siguientes pasos: Proceso de molienda de las diferentes materias primas, hasta obtener la granulometría deseada en cada caso. Tamizado de las mismas, hasta alcanzar el tamaño de partículas necesario y deseado. Pesado y mezclado de la materia prima y el óxido de zinc. Prensado de las diferentes mezclas de vidrio borosilicato o zeolita natural, con el carbón vegetal, el etilenglicol y el óxido de zinc. Tratamiento térmico para la combustión del carbón y la formación de los poros en la estructura de las placas, quedando establecidos los parámetros para la síntesis de las membranas cerámicas planas, en las condiciones de trabajo. ^(4,5)

Posteriormente se realiza el proceso de purificación del biogás, utilizando las membranas obtenidas a diferentes proporciones de sus componentes, se caracteriza el biogás, antes y después de ser tratado, determinando la composición de $\text{CH}_{4(g)}$, $\text{CO}_{2(g)}$, monóxido de carbono ($\text{CO}_{(g)}$), dióxígeno ($\text{O}_{2(g)}$) y $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$, calculando entonces la eficiencia de remoción de $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$

para el biogás. ^(5,6) Las membranas sintetizadas para la purificación de gases se muestran en las figuras 1A y 1B.

Se realiza la caracterización estructural y funcional de las membranas encontrándose que son macroporosas, que pueden ser usadas en procesos de microfiltración. ^(5,7) Se obtiene un modelo fenomenológico que describe el proceso de purificación de biogás empleando membranas de zeolita natural. ^(5,8)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se comprobó que el procedimiento es efectivo para cualquier concentración de $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ (de 0,05 % a 8 %) en el combustible, que es el intervalo en que puede encontrarse dicha sustancia en estos combustibles en Cuba, en un tiempo de residencia en los equipos purificadores inferior a 4 minutos, siempre que exista un medio residual que contenga microorganismos sulfurosos capaces de consumir el $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ en altas proporciones, pues además de obtener un procedimiento, se comprobó su eficiencia en diferentes equipos purificadores: ⁽⁹⁾

- Biorreactor: columna de lecho empacado. ^(10,11) La columna de lecho empacado (figura 2) emplea como relleno anillos *raschig* de plástico. Se tratan: grandes cantida-



Fig. 1. Membranas cerámicas sintetizadas con materiales de desecho o producto natural. A) Membranas vítreas, B) Membranas de zeolita natural

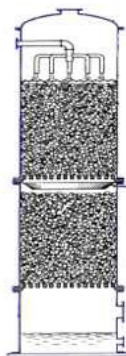


Fig. 2. Biorreactor: columna de lecho empacado.

des de gases combustibles con poco líquido: tiempo de residencia menor que equipos tradicionales; régimen turbulento; se obtienen porcentajes de remoción de $H_2S_{(g)}$, superiores al 98 %; se alcanzan remociones de $CO_{2(g)}$ hasta un 28 %; no existe variación de la concentración de $CH_{4(g)}$ al tratar el gas.

Novedad científica: La propuesta de una alternativa biotecnológica para desulfurar cantidades industriales de GAP, que se basa en el empleo de columnas de lecho empacado y residual albañal, la cual es favorable económica y ambientalmente, con respecto a los tratamientos físico-químicos, tradicionalmente empleados para el mismo fin.

Impacto económico: El coste de inversión de la propuesta tecnológica que emplea columnas de lecho empacado y albañal, es 32,5 % más bajo que el tratamiento que se emplea en la única planta de purificación de GAP existente en Cuba (endulzamiento por aminas) y sus costes de operación representan un 67,6 % de los reportados para la planta instalada en Boca de Jaruco, al este de La Habana para el tratamiento del mismo volumen de gas; resultando evidentemente más ventajoso la aplicación del método biológico en columnas de lecho empacado y albañal. Adicionalmente esta alternativa basada en el empleo de columnas de lecho empacado y residual albañal, puede ser aplicada para: Purificar pequeños y medianos volúmenes de gases como: biogás, efluentes de plantas de tratamiento de residuos y de pequeños centros colectores o pozos individuales de GAP y como tratamiento secundario, combinada con plantas de tratamiento físico-químico

- Biorreactor: torre de bandeja a flujo laminar (TBFL).^(12,13)

La TBFL (figura 3) consiste en 1 torre cilíndrica con tapas semielípticas soldadas en el tope y fondo. La misma cuenta con cuatro orificios (2 en el tope y 2 en el fondo) donde se conectan tubos para permitir la entrada y salida de los fluidos. La torre está formada por secciones embridadas dentro de las cuales se ubican bandejas apoyadas sobre vigas transversales que se disponen de forma tal que la zona activa de la bandeja tenga una inclinación de 1° - 5° respecto a la horizontal. Las bandejas tienen forma circular.^(14,15)

Se opera en régimen laminar y los fluidos circulan a contracorriente. En todos los casos se caracterizó el gas combustible y el residual líquido empleado antes y después de la purificación, obteniéndose durante 3 meses de trabajo, que el gas tratado cumple con las normas establecidas (concentraciones de $H_2S_{(g)}$ inferiores al 0,1 %) ⁽²⁾ y que, en el residual, se incrementa la formación de sólidos, que indica presencia de materia orgánica e inorgánica, dada por los sólidos volátiles y los fijos, incrementándose la biomasa, el azufre.

Resultando que, con la aplicación de los métodos, se logra desulfurar los gases combustibles,⁽¹⁶⁾ y además de la descontaminación del residual, pues este último, cumple entonces con las normas de vertimiento a cuerpos receptores marinos (clase E)⁽¹⁷⁾ y terrestres (excepto clase A)⁽¹⁸⁾ de referencia con impacto ambiental positivo.

Novedad científica: La propuesta de un equipo para la purificación de GAP, denominado torre de bandejas de flujo laminar (TBFL), consistente en una torre de bandejas atípicas,

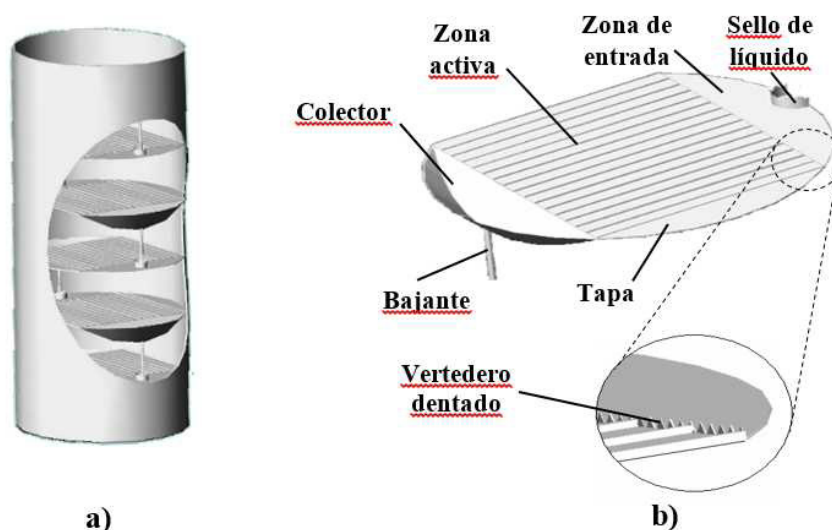


Fig. 3. Biorreactor: torre de bandejas de flujo laminar (TBFL). A) Vista isométrica del equipo mostrando la disposición de las bandejas. B) Bandeja y sus partes.

protegida bajo la patente No. 23369 del 2009,⁽¹³⁾ empleando el procedimiento establecido en la patente No. 23003 de 2004⁽³⁾ y se confecciona la metodología de diseño general de dicha TBFL.

Impacto económico: El método biológico⁽³⁾ desarrollado en la TBFL tiene un coste de equipamiento e instalación, 18 % más bajos que un proceso similar por el método tradicional (endulzamiento por aminas) que se emplea en Boca de Jaruco, al este de La Habana y sus costes operacionales sólo representan un 25,2 % de los reportados para esa planta, para el mismo volumen de GAP a tratar. Este análisis demuestra la superioridad económica del método biológico⁽³⁾ y lo hace una solución atractiva para países en vías de desarrollo como Cuba.

Adicionalmente, la aplicación de la TBFL para purificar GAP no se encuentra limitada al tratamiento en gran escala, pueden considerarse otras alternativas operacionales como: instalaciones para el tratamiento del gas a la salida de los pozos en pequeños centros colectores; unidades de postratamiento o pretratamiento anexas a plantas existentes de endulzamiento con aminas; tratamiento de los gases ácidos generados en las unidades de amina; pequeños sistemas de purificación para equipos que emplean GAP como combustible; tratamiento de gases combustibles que presenten similitud química con el GAP.

Por tanto, se pone a disposición de la industria cubana una metodología de bajo costo, factible de aplicar, con accesibilidad y elementos de sustentabilidad con la que es posible alcanzar resultados indiscutiblemente superiores a los obtenidos hasta ahora en el país, que es efectiva en equipos tradicionales de contacto gas-líquido o en el equipo diseñado, torre de bandeja de flujo laminar, para la purificación de gases combustibles; lo que permite proponer tecnologías basadas en la misma.^(3,11,12,19)

Impacto ambiental positivo de las alternativas de tratamiento de gas acompañante de petróleo por los métodos biológicos desarrollados en equipos de contacto gas-líquido

Se logra la remoción de los contaminantes $\text{CO}_{2(g)}$ y $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ en el GAP, por el empleo y tratamiento de un material de desecho que puede ser dispuesto al medio, al cumplir con las normas correspondientes vigentes en Cuba,^(17,18) pudiendo ser esta una solución para el tratamiento de residuales líquidos de comunidades cercanas a los pozos.

Son menos agresivas al medio ambiente que las tecnologías tradicionales, ya que estas últimas emplean reactivos, generalmente nocivos, contaminantes y tóxicos, y emanan gases ácidos que deben ser tratados o quemados a la atmos-

fera, lo que implica un coste adicional y el aumento de la contaminación atmosférica.

Las concentraciones de dióxígeno ($\text{O}_{2(g)}$) y $\text{CO}_{2(g)}$ en el GAP, disminuyen, por el consumo de dichos gases por los microorganismos que así lo requieran y que están presentes en el residual líquido empleado. Cobra especial importancia la reducción del $\text{CO}_{2(g)}$ entre 47 % y 49 % pues, aunque esta no es una sustancia tóxica, se considera contaminante por ser un gas que produce efecto invernadero.

La disminución de la concentración del $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$, minimiza los efectos dañinos al hombre, así como también al medioambiente al evitar las lluvias ácidas y los efectos corrosivos sobre los materiales de construcción.

Impacto social positivo de las alternativas de tratamiento de gas acompañante de petróleo por los métodos biológicos desarrollados en equipos de contacto gas-líquido

El tratamiento de GAP en Cuba cumple un fin social, abastecer a la población de este portador energético, tanto para su consumo directo fundamentalmente para la cocción de alimentos, como indirecto en la generación de energía eléctrica y para que esto ocurra, el $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ debe encontrarse en el GAP en concentraciones inocuas para el hombre.

Impacto económico de las alternativas de tratamiento de gas acompañante de petróleo por los métodos biológicos desarrollados en los equipos de contacto gas-líquido

Además de lo ya expuesto, es preciso señalar que la utilización de residual albañal o industrial como portador de microorganismos, garantiza la efectividad del procedimiento empleado, sin requerir de inoculación de los mismos, lo que constituye una ventaja frente al resto de los métodos biológicos reportados a nivel internacional, pues estos últimos requieren del mantenimiento de un cultivo puro o mixto, aspecto que lo hace más atractivo económicamente.

Luego del tratamiento del gas combustible con las membranas, se obtiene que: Tienen una eficiencia de remoción de $\text{H}_2\text{S}_{(g)}$ hasta el 98 % y sus concentraciones inferiores al 0,1 %, cumpliendo la norma de referencia al efecto; se alcanzan remociones de $\text{CO}_{2(g)}$ hasta un 30 %; no hay variación de la concentración de $\text{CH}_{4(g)}$.

Todo lo anterior, demuestra que es posible utilizar materiales de desechos o un producto natural para dar solución a un problema de contaminación ambiental, no solo por el empleo de dichos materiales, sino también porque transformándolos adecuadamente mediante el conocimiento científico, se logra la reducción de sustancias tóxicas y dañinas que componen estas fuentes de energía, quedando las mismas en condiciones de ser utilizadas, en diferentes procesos industriales y por la propia sociedad.^(4,8,20)

Novedad científica: Nuevas membranas empleadas en la purificación de biogás, obtenidas a partir de materiales vítreos de desechos y zeolita natural cubana.

Impacto económico y ambiental: Las membranas vítreas y de zeolita natural cubana obtenidas tienen un costo 8 y 10 veces inferior, respectivamente, comparadas con el de las membranas macroporosas existentes en el mercado internacional. ⁽⁵⁾

Al disponer de un digestor que genere 1,4 m³ de biogás por día purificado, o sea, en condiciones de ser utilizado, se pueden ahorrar otras fuentes de energía tales como, 2,54 kW/h de electricidad; 0,84 L de gasolina; 0,65 kg de diésel; 1,86 kg de madera; 0,1 kg de carbón o 0,46 m³ de gas licuado por cada uno. ⁽²¹⁾

Así mismo, con la purificación del biogás, se disminuiría la carga contaminante que se emitiría al medio ambiente pues, según datos del Grupo nacional de biogás, ⁽²¹⁾ se conoce que al purificar de 511 m³ de biogás en un año, se dejarían de emitir 3,83 toneladas de CO₂(g), se ahorrarían 0,24 toneladas de petróleo y se obtendrían 2,56 toneladas de abono orgánico. Razones que demuestran la importancia que tiene la purificación del biogás más aun, lográndose esta por un procedimiento de factura nacional que se basa en el empleo de desechos vítreos que se generan en la Unidad empresarial de base Vidrios Lisa, de La Habana, disminuyendo el impacto ambiental negativo sobre el medio ambiente que provoca la actividad del hombre. Así como también, el empleo de un producto natural para la síntesis de las membranas, contribuye a que países en vías de desarrollo como Cuba, dispongan de un método con ventajas económicas para la purificación de biogás.

Además, una vez empleadas las membranas en la purificación del biogás y efectuado el tratamiento de limpieza a las mismas, las membranas vítreas y de zeolita natural cubana pudieran ser utilizadas como abono en la agricultura, en la industria cerámica y de pinturas, lo que constituye un valor agregado de esta propuesta.

Impacto social: La propuesta, podría ser utilizada por pequeños agricultores para la purificación del biogás que se genera en digestores existentes en su propio terreno, que generan 1,4 m³ de biogás por día, cantidad necesaria para la cocción de 3 comidas de una familia de 5 personas con una fuente de energía limpia requiriendo solo de las membranas y el soporte para las mismas.

Impacto ambiental general: El tema propuesto está encaminado a la posibilidad de emplear diferentes fuentes de energía con la necesaria reducción de los impactos negativos que provoca la presencia del H₂S(g) que ellas contienen, en el medioambiente, debido a que es conocido que cuando el

H₂S(g) llega a la atmósfera, puede transformarse con cierta facilidad en dióxido de azufre (SO₂(g)) mediante una reacción de oxidación, aumentando la concentración de este gas en la atmósfera. Una vez disperso en el medio ambiente, el SO₂(g) puede causar diversos efectos negativos. Mezclado con la lluvia, se llega a transformar en ácido sulfúrico [H₂SO₄(ac)] y provoca la denominada lluvia ácida. Además, el viento puede facilitar que esta sustancia corrosiva recorra miles de kilómetros antes de precipitarse en bosques, lagos, canales y ríos y cuando la lluvia ácida cae, se acumula ocasionando la muerte de los animales acuáticos, afectando el crecimiento de las plantas y originando la muerte de numerosas especies vegetales en los bosques y praderas. Esta pérdida, a su vez, promueve la erosión de los suelos y el aumento de las tierras infértiles. Además, se considera que el H₂S(g) constituye 1 de los gases que provoca el efecto invernadero contribuyendo por tanto al calentamiento global. ^(22,23)

Todo lo anterior permite afirmar que la reducción del H₂S(g) se realiza con objetivos muy específicos que pueden resumirse en:

- Medioambiental: por el alto poder contaminante de los gases al ser quemados para utilizarlos como fuente de energía.
- Económico: porque es posible utilizar el gas ya sea el biogás o el GAP como combustible y al existir menor grado de corrosión, el costo de los materiales de construcción disminuye.
- Social: es posible emplear estas fuentes de energía para la cocción de alimentos, o en la generación de energía eléctrica

Conclusiones

Se dispone en Cuba de métodos de purificación de gases combustibles que están al alcance de países en vías de desarrollo, que: ⁽²⁴⁾ Emplean materiales de desechos (residuales líquidos, residuos sólidos) y productos naturales; permiten purificar el combustible hasta niveles compatibles con el uso humano; no provocan, ni contribuyen a la contaminación ambiental

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a todos los colaboradores de esta investigación, ya sean personas o instituciones, que contribuyeron desinteresadamente con sus ideas, conocimientos y recursos a la obtención de los resultados que aquí se presentan:

Los autores de esta investigación agradecen a: Jesús Marrero González, Yordanis Martínez Ramírez, Yulieth Viera Ga-

llardo, Kizzy Diarelis Ponce Abreu, José Gandón Hernández, José María Ameneiros Martínez, Félix Enrique Alfonso Martínez, Yudialis Pérez Fundora, Mercedes Gzegozewski González, Stella Osorio Ríos, Heidy Carpio Morales, Ángel Hernández Betancourt, Adrián Betancourt Bordama, Víctor Iriarte Docampo, Yania Aguiar Roque, Adriana Alonso Rodríguez, Iris Rúa Rodríguez, Eysel González Leyva, Lisbet Valdés Velázquez, Yunaisy Pando Ortiz, Yosleidy Rodríguez Cazañas, Jorge Luis Fonseca Lette, Jorge Antonio Díaz Lozada, Elena Alfonso Hernández, Marco Antonio Guzmán González, Iván Alfredo García González, Rosely Hernández Becerra, Suanet Morales Martínez, Luis Cepero Cáceres, Yuletsis Díaz Rodríguez, Ridel Casellas Ortega y Sergio Pascual Mustelier Pérez por su contribución en la realización de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ortega L, Rodríguez S, Fernández E, Bárcenas L. Principales métodos para la desulfuración del biogás. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. SciELO, ISSN 1815-591X. 2015;XXXVI(1):45-56.
2. NOM-137-SEMARNAT-2003. Contaminación atmosférica. -Plantas desulfuradoras de gas y condensados amargos-. Control de emisiones de compuestos de azufre, Norma Oficial Mexicana, México, 2003.
3. Fernández E, Procedimiento para la purificación de Biogás. Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI); Patente con Certificado No. 23003; Resolución 2582/2004, 2004.
4. Rodríguez S, Fernández E, Ortega L, Bárcenas L. Membrana filtrante de zeolita natural para la purificación de biogás. Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI). Patente con Certificado No. 24313. Resolución No. 2164/2017, 2018.
5. Ortega L. Purificación de biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural cubana. Tesis presentada en opción al grado científico de doctor en ciencias técnicas, 2017.
6. Ortega L, Rodríguez S, Fernández E, Martínez Y, Crespo A, Viera Y. Membranas vítreas empleadas en la purificación de biogás. *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. Web of Science (Thomson-Reuters), ISSN 0366-3175. 2016;55(1):24-28.
7. Ortega L, Ponce K, Rodríguez S, Fernández E, Bárcenas L. Características funcionales de membranas vítreas empleadas en la purificación de biogás. *Revista Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. SciELO, ISSN 1815-591X. 2016;XXXVII(2) May-Ago:57-67.
8. Ortega L, Crespo A, Gandón J, Rodríguez S, Fernández E, Ameneiros JM. Modelo fenomenológico que describe el proceso de purificación de biogás empleando membranas de zeolita natural. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. Web of Science (Thomson-Reuters), ISSN 2395-8472. 2017;16(2):531-9.
9. Fernández E, Rodríguez S, Franco R, Marrero J, Ortega L, Bárcenas L. Monografía Proceso de purificación de gas natural. Estudio de un caso. ISBN: 978-959-261-446-8 Facultad de Ingeniería Química, Cujae, Cuba, 2013.
10. Rodríguez S. Alternativa de desulfuración de gas acompañante del petróleo empleando un residual líquido. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, 2009.
11. Rodríguez S, Fernández E. Columnas de lecho empacado: una alternativa biotecnológica para la desulfuración de efluentes gaseosos. Depósito Legal para Obras Protegidas, Registro CENDA, Número: 911-2009, 2009.
12. Franco R. Torre de bandejas de flujo laminar, una alternativa para el tratamiento de gas acompañante del petróleo. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, 2009.
13. Franco R, Fernández E. Equipo para la purificación de gas acompañante de petróleo; Oficina Cubana de la Propiedad Industrial (OCPI); Patente con Certificado No. 23369; Resolución No. 0374/2009, 2009.
14. Franco R, Fernández E. Modelos matemáticos para la descripción hidráulica de un equipo purificador de gas acompañante del petróleo por método biológico.; *Revista Ingeniería hidráulica y medio ambiente*. SciELO. ISSN: 1815-595X. 2008;29(1).
15. Franco R, Fernández E. Modelos matemáticos para la descripción hidráulica de los platos de un equipo purificador de gas acompañante del petróleo por método biológico. *Revista: Tecnología y Ciencias del Agua* Base de datos: Web of Science (Thomson-Reuters), ISSN: 2007-2422, 2013;IV(4):141-9.
16. Franco R, Fernández E. Torre de bandejas de flujo laminar. Una alternativa para la purificación de gas acompañante del petróleo empleando residuales. Depósito Legal para Obras Protegidas, Registro CENDA, Número: 912-2009, 2009.
17. Norma Cubana 521:2007; Norma cubana para el vertimiento de residuales líquidos a las zonas costeras y aguas marinas; Oficina nacional de normalización; Cuba; 2007.
18. Norma Cubana 27. 2012. Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado. Especificaciones Vigentes desde 1999: 11 p.
19. Franco, R.; Propuesta de tecnología para purificación de gas acompañante de petróleo empleando un método biológico. Tesis en opción al grado de Master en análisis y control de procesos. Facultad de Ingeniería Química, CUJAE, La Habana, Cuba, 2005.
20. Ortega L, Rodríguez S, Fernández E. Purificación de biogás empleando membranas vítreas y de zeolita natural cubana. Premio de Estudios Iberoamericanos Grupo La Rábida como mejor tesis doctoral en el área científico técnica. Universidad Internacional de Andalucía, España, octubre 2018. ISBN: 978-84-7993-339-5.
21. Díaz, L. Biogás: Potencialmente Cuba supera los cuatrocientos millones de metros cúbicos anuales. OnCuba, [internet] 2013 [Consultado 18 enero 2016] Disponible en: <http://www.oncubamagazine.com/economia-negocios/biogas-potencialmente-cuba-supera-los-cuatrocientos-millones-de-metros-cubicos-anuales/>
22. Ficha Internacional de Seguridad Química. Sulfuro de hidrógeno, ICSC 0165. [internet] 2012 [Consultado 26 feb 2013]. Disponible en: <http://www.insht.es/InshtWeb/contenidos/nps0165.pdf/>
23. Guerrero L. Energías renovables, [internet] 2012 [Consultado 10 mar 2013] Disponible en: <http://vidaverde.about.com/Energias-renovables/Guia-de-about.com/>.
24. Ortega L, Fernández E, Morales S, Cepero L. Monografía Biogás: potencialidades para su empleo en Cuba. ISBN 978-959-261-601-1. Facultad de Ingeniería Química, Cujae, Cuba, noviembre 2019.

Recibido: 06/10/2021

Aprobado: 19/12/2021

Conflicto de intereses

Los autores no tienen conflictos de intereses en relación con la investigación presentada para optar por el premio Academia de Ciencias de Cuba.

Contribución de los autores

Conceptualización: Elina Fernández Santana, Susana Rodríguez Muñoz, Lianys Ortega Viera

Curación de datos: Elina Fernández Santana, Susana Rodríguez Muñoz, Lianys Ortega Viera, Rafael Franco Rico, Anayancy Crespo Artigas, Liuver Bárcenas Pérez

Análisis formal: Elina Fernández Santana

Adquisición de fondos: Elina Fernández Santana, Susana Rodríguez Muñoz, Lianys Ortega Viera

Investigación: Elina Fernández Santana, Susana Rodríguez Muñoz, Lianys Ortega Viera, Rafael Franco Rico, Anayancy Crespo Artigas, Liuver Bárcenas Pérez

Metodología: Elina Fernández Santana, Susana Rodríguez Muñoz, Lianys Ortega Viera

Administración del proyecto: Elina Fernández Santana

Recursos: Elina Fernández Santana, Susana Rodríguez Muñoz, Lianys Ortega Viera

Supervisión: Elina Fernández Santana, Susana Rodríguez Muñoz, Lianys Ortega Viera

Validación: Elina Fernández Santana

Visualización: Elina Fernández Santana, Susana Rodríguez Muñoz, Lianys Ortega Viera

Redacción-borrador original: Elina Fernández Santana

Redacción-revisión y edición: Elina Fernández Santana

Financiación

Toda la investigación fue realizada como parte de proyectos institucionales de la Universidad tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, por lo que su financiamiento correspondió a la misma.

Cómo citar este artículo

Fernández Santana E, Rodríguez Muñoz S, Ortega Viera L, Franco Rico R, *et al.* Purificación de gases combustibles. An Acad Cienc Cuba [internet] 2022 [citado en día, mes y año];12(2):e1153. Disponible en: <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/1153>

