

UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA

LA MOLINA

FACULTAD DE CIENCIAS



**“ESTUDIO DE PARÁMETROS CINÉTICOS RELACIONADOS
A LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS CON HIDRÓXIDO DE SODIO”**

Presentada por:

SILVIA DORALID ROJAS ARQUÍÑIGO

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Lima – Perú

2022

**La UNALM es la titular de los derechos patrimoniales de la presente investigación
(Art. 24. Reglamento de Propiedad Intelectual)**

**UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA
LA MOLINA**

FACULTAD DE CIENCIAS

**“ESTUDIO DE PARÁMETROS CINÉTICOS RELACIONADOS
A LA PURIFICACIÓN DEL BIOGÁS CON HIDRÓXIDO DE SODIO”**

Presentada por:

SILVIA DORALID ROJAS ARQUIÑIGO

Tesis para Optar el Título Profesional de:

INGENIERA AMBIENTAL

Sustentada y aprobada por el siguiente jurado:

Ph.D. Lizardo Visitación Figueroa
PRESIDENTE

Ing. Lawrence Quipuzco Ushñahua
MIEMBRO

Blgo. Juan Juscamaita Morales
MIEMBRO

Mg. Fermin Arévalo Ortiz
ASESOR

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos por el
apoyo incondicional para
alcanzar mis metas.

AGRADECIMIENTO

Quiero agradecer a mi asesor, el Magister Fermín Arévalo Ortiz por brindarme apoyo para realizar el trabajo de investigación y por compartir su tiempo y conocimientos para la ejecución de la tesis.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	vi
ABSTRACT	vii
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 Reacción química entre fase gaseosa y fase líquida	3
2.2 Calentamiento Global y Efecto Invernadero	4
2.3 Biogás.....	4
2.4 Aplicaciones del Biogás:	4
2.5 Métodos de Purificación del biogás según tecnologías	5
2.5.1 Métodos de absorción	6
2.5.2 Métodos de separación por membrana.....	6
2.5.3 Métodos biológicos.....	7
2.6 El biometano.....	7
2.7 Producción de biometano a partir de Biogás de vertedero.....	8
2.7.1 Antecedentes.....	8
2.7.2 Estándares de biogás	9
2.7.3 Valorización del Biogás	14
2.8 Contaminación por Uso de Combustibles Fósiles Comparados con el Uso de Combustibles no Fósiles.	21
III. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
3.1 Materiales	24
3.2 Biogás para el estudio	24
3.3 Reactivos	24
3.4 Equipos.....	24
3.5 Delimitación Espacial.	24
3.6 Métodos.....	25

3.6.1 Llenado de Biogás en la fuente y su transporte al laboratorio de tesis de la UNALM:	25
3.6.2 Medición del volumen del biogás a purificar	25
3.6.3 Purificación del biogás con Hidróxido de Sodio	27
3.6.4 Determinación de parámetros cinéticos.	28
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	33
4.1 Procesamiento de datos	33
4.3 Parámetro cinético relacionado a la absorción de CO ₂ del biogás a purificar, respecto a la concentración de Hidróxido Sodio.....	38
4.4 Parámetro cinético relacionado a la absorción de CO ₂ del biogás a purificar respecto a la Velocidad de Flujo	40
4.5 Parámetro cinético relacionado a la absorción de CO ₂ del biogás a purificar respecto a la Presión Hidrostática	41
V. CONCLUSIONES	44
VI. RECOMENDACIONES	46
VII. BIBLIOGRAFÍA	47
VIII. ANEXOS.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Límites establecidos por el estándar SS 15 54 38 de Suecia para el uso de biometano como combustible para el transporte.	10
Tabla 2: Estándares para la inyección de gas en Suiza	11
Tabla 3: Estándares para la inyección de gas en Alemania.....	12
Tabla 4: Estándares para la inyección de gas en Francia	13
Tabla 5: Estándares para la inyección de gas en Southern California Gas (Estados Unidos).	14
Tabla 6: Ventajas e inconvenientes de las distintas técnicas para la valorización del biogás	17
Tabla 7: Características de las distintas técnicas de valorización del biogás.	19
Tabla 8: Capacidad de eliminación de contaminantes de cada técnica de valorización del biogás.....	20
Tabla 9: Tabla comparativa de datos económicos y consumos de las distintas técnicas.	21
Tabla 10: Resultados de la absorción de CO ₂ del biogás a purificar, respecto a la concentración de Hidróxido Sodio.....	38
Tabla 11: Resultados de la absorción de CO ₂ de biogás a purificar respecto a la Velocidad de Flujo del biogás	40
Tabla 12: Resultados de absorción de CO ₂ del biogás a purificar respecto a la Presión Hidrostática del sistema	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa del lugar de abastecimiento de biogás	25
Figura 2: Cámaras con biogás de la Finca “Bioagricultura Casa Blanca”.	26
Figura 3: Sistema del equipo de llenado del biogás. Diseño propio.....	26
Figura 4: Sistema del equipo purificador de biogás. Diseño propio.....	27
Figura 5: Biogás purificado	28
Figura 6: Medición de la Velocidad de Flujo	29
Figura 7: Probeta para cuantificar el volumen con respecto al tiempo.....	29
Figura 8: Medición de la Presión Hidrostática.	30
Figura 9: Cuantificación del Dióxido de Carbono.....	31
Figura 10: Titulación del NaOH mezclado con BaCl ₂	32
Figura 11: Comparación de Gráficos con Tendencia Lineal y Polinómica de la absorción de CO ₂ del biogás, respecto a la concentración del NaOH.	39
Figura 12: Comparación de Gráficos con Tendencia Lineal y Polinómica de la absorción de CO ₂ del biogás, respecto a la velocidad de flujo.....	40
Figura 13: Comparación de Gráficos con Tendencia Lineal y Polinómica de la absorción de CO ₂ del biogás, respecto a presión hidrostática.....	42

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Determinación del calor de respiración de frutas por el método de titulación.....	50
Anexo 2: Resultados de los parámetros cinéticos medidos en la purificación del biogás (molaridad, velocidad de flujo y presión hidrostática).....	61

RESUMEN

El uso de biogás purificado como fuente de energía puede contribuir en la mitigación del calentamiento global, producido por las emisiones de efecto invernadero, siendo el dióxido de carbono el gas de efecto invernadero antropógeno más importante. Asimismo, la purificación del biogás mejora su rendimiento calórico, siendo más eficiente como fuente de energía al utilizarlo.

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo estudiar los parámetros cinéticos (molaridad, velocidad de flujo y presión hidrostática) relacionados en la purificación del biogás con hidróxido de sodio.

Se diseñó y construyó un equipo purificador de biogás en el laboratorio de tesis del departamento de Química de la Facultad de Ciencias en la Universidad Nacional Agraria La Molina. Con el biogás a purificar (procedente de la Finca “Bioagricultura Casa Blanca”) se evaluaron los parámetros cinéticos y su comportamiento en diferentes condiciones.

Se encontró que, de los tres parámetros cinéticos evaluados, respecto a la concentración fue mejor el NaOH 2,0 M, en cuanto a la velocidad de flujo 50 ml/min y finalmente una presión hidrostática de 28 cm de agua.

Por último, se presentó un método alternativo por diferencia de volúmenes, para cuantificar el dióxido de carbono captado con el hidróxido de sodio, el cual es medido en el bidón 1 y bidón 2 del equipo purificador.

Palabras clave: Biogás purificado, parámetros cinéticos, equipo purificador, hidróxido de sodio, dióxido de carbono.

ABSTRACT

. The use of purified biogas as an energy source can contribute to the mitigation of global warming, produced by greenhouse gas emissions, carbon dioxide being the most important anthropogenic greenhouse gas. Likewise, the purification of biogas improves its caloric yield, being more efficient as an energy source when used.

The present research work aimed to study the kinetic parameters (molarity, flow rate and hydrostatic pressure) related to the purification of biogas with sodium hydroxide.

A biogas purification unit was designed and built in the thesis laboratory of the Chemistry Department of the Faculty of Sciences at the Universidad Nacional Agraria La Molina. With the biogas to be purified (from the "Bioagricultura Casa Blanca" farm), the kinetic parameters and its behavior under different conditions were evaluated.

It was found that, of the three kinetic parameters evaluated, 2.0 M NaOH was better in terms of concentration, 50 ml/min in terms of flow rate and finally a hydrostatic pressure of 28 cm of water.

Finally, an alternative method by volume difference was presented to quantify the carbon dioxide captured with sodium hydroxide, which is measured in canister 1 and canister 2 of the purifying equipment.

Keywords: Purified biogas, kinetic parameters, purifying equipment, sodium hydroxide, carbon dioxide.

I. INTRODUCCIÓN

En el Perú, el consumo de energía se sustenta fundamentalmente en el uso del petróleo con un 46 %, de gas natural 26 %, biomasa 12%, hidroenergía 11% y carbón 4% (MEM, 2014).

En los últimos años, las condiciones para el desarrollo de las energías renovables no convencionales (ERNC), tales como la eólica, geotérmica, solar o de biomasa, ha mejorado significativamente, siendo fundamental en este avance la promulgación de leyes como la Ley de Promoción y Utilización de Recursos Energéticos Renovables No Convencionales en zonas Rurales, Aisladas y de Frontera del País (Ley N° 28546).

El crecimiento poblacional nos obliga a buscar fuentes energéticas no convencionales y una posibilidad la encontramos en el biogás que se obtiene como producto de la digestión anaeróbica de la materia orgánica (residuos animales y vegetales) y que puede presentar diferentes usos energéticos.

La concentración de los distintos gases en el biogás dependerá de la composición de las materias primas, las condiciones de descomposición, tiempo de retención hidráulica en el biodigestor, entre otros.

Dado que en el Perú existen diferentes fuentes de biogás proveniente de rellenos sanitarios o de biodigestores anaeróbicos, entre otros, se hace indispensable promover el uso de esta energía y optimizar su eficiencia como combustible. Sin embargo, sabemos que el biogás puede contener algunas impurezas y elementos traza que deben ser removidos antes de su uso en la matriz energética.

Una baja concentración de gas metano en el biogás no permite aprovechar al máximo el rendimiento del gas para sus diversas aplicaciones, ya que a menor concentración de gas metano en el biogás, el rendimiento energético es menor y por otra parte la mayor concentración de dióxido de carbono (CO₂) en el biogás favorecen el efecto invernadero y el calentamiento global.

Las tecnologías para la purificación del biogás son muchas, por lo que en el presente proyecto se plantea estudiar los parámetros cinéticos relacionados a la purificación del

biogás con Hidróxido de Sodio (NaOH), a diferentes condiciones de concentración de hidróxido de sodio, velocidad de flujo y presión hidrostática; con la finalidad de obtener información del comportamiento de las variables relacionadas en la purificación del biogás con Hidróxido de Sodio.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Reacción química entre fase gaseosa y fase líquida

La reacción química es todo proceso termodinámico en el cual uno o más reactantes o sustancias, por efecto de un factor energético, se transforman, cambiando su estructura molecular y sus enlaces en productos o nuevas sustancias (Zumdahl y Decoste, 2012).

Las reacciones químicas transcurren con un amplio intervalo de velocidades. Algunas tienen lugar casi instantáneamente, mientras que otras ocurren con velocidades tan bajas que prácticamente es como si no ocurrieran. Una reacción química depende de su velocidad y ésta depende de factores como la temperatura y la concentración (King, 1969).

Las reacciones químicas entre una fase gaseosa y una fase líquida son llamadas reacciones heterogéneas.

Al momento de diseñar reactores multifásicos se debe tener en cuenta la velocidad de reacción, la velocidad de transporte de materia entre fases, así como el modelo de flujo y de contacto de cada fase y entre fases (Izquierdo, 2004).

La solubilidad de una solución en otra se determina con la máxima cantidad de soluto que se disolverá en una cantidad dada de disolvente a una temperatura específica, mientras se disuelva visiblemente una solución en otra se determina muy soluble de lo contrario se dice que es poco soluble o insoluble (Chang, 2007).

La naturaleza del soluto y del solvente son determinantes en la solubilidad, además factores como la temperatura y la presión también influyen en la solubilidad de una sustancia debido a que cuando el soluto es un gas, al aumentar la temperatura la solubilidad disminuye, ya que las moléculas del gas se escapan de la solución y en el caso de la presión el efecto es grande ya que, a mayor presión, mayor es la solubilidad de un gas (Cárdenas y Gélvez, 2004).

La Ley de Equilibrio de Henry establece que a temperatura constante la solubilidad de un gas en un líquido es directamente proporcional a la presión del gas sobre el líquido; además

se debe tener en cuenta que la estricta aplicación de la Ley de Henry se limita a presiones bajas, a presiones elevadas la ley es menos exacta y las constantes de proporcionalidad presentan una variación considerable (Maron y Prutton, 2010).

2.2 Calentamiento Global y Efecto Invernadero

El calentamiento global es el incremento en el valor promedio de la temperatura de la superficie del planeta que se ha venido presentando aproximadamente desde la mitad del siglo pasado. Y según especialistas en el tema consideran que este fenómeno se debe al incremento acelerado en los niveles de dióxido de carbono (CO_2) y otros gases que provocan el efecto invernadero en la atmósfera terrestre.

El efecto invernadero es el mecanismo por el cual la atmósfera de la Tierra se comporta como una gran bola de vidrio que permite a los rayos solares pasar a través de ella, evitando al mismo tiempo que el calor generado por éstos escape al espacio; de esta manera la temperatura del planeta se incrementa.

Es importante mencionar que el efecto invernadero es un fenómeno natural que regula la temperatura del planeta, y que sin éste la Tierra sería un planeta muy frío que difícilmente albergaría la variedad y cantidad de vida que hoy conocemos. Sin embargo, como resultado de la mayoría de las actividades productivas del hombre, se han ocasionado alteraciones en los niveles promedios del dióxido de carbono principalmente, lo que está generando un incremento en los valores promedio de la temperatura superficial del planeta (Adame, 2010).

2.3 Biogás

El biogás es el producto gaseoso de la digestión anaeróbica de compuestos orgánicos. Su composición depende del sustrato digerido y del tipo de tecnología utilizada, puede ser la siguiente: del 50 al 70 por ciento de metano (CH_4), del 30 al 40 por ciento de dióxido de carbono (CO_2), menos de un 5 por ciento de hidrógeno (H_2), ácido sulfhídrico (H_2S), y otros gases (Fernández, 2010).

2.4 Aplicaciones del Biogás:

El biogás con un setenta por ciento de metano tiene un poder calorífico de 6000 Kcal/m^3 (el metano puro tiene un poder calorífico de 8600 Kcal/m^3 y el gas natural de 6000 a 8000 Kcal/m^3).

Además, una vez purificado el biogás, eliminando el ácido sulfhídrico (H₂S), es inodoro. El rango explosivo que tiene una mezcla con aire es de 1:5 a 1:15. La propiedad antidetonante en motores de explosión interna es superior a la gasolina de alto octanaje (Dreifuss, 1983).

El biogás producido a partir de procesos de digestión de residuos puede utilizarse:

- Para generación de calor o electricidad en una caldera.
- Para generar electricidad con el empleo de motores o turbinas.
- Para su uso en pilas de combustible, previa realización de una limpieza del ácido sulfhídrico (H₂S) y otros contaminantes de las membranas.
- Para introducirlo en una red de transporte de gas natural, para lo que es necesario antes realizar un proceso de purificación del biogás, así como añadir los aditivos necesarios.
- Para su uso como material base para la síntesis de productos de elevado valor añadido como el metanol o el gas natural licuado.
- Para su empleo como combustible de automoción. El biogás, además de metano tiene otra serie de compuestos que se comportan como impurezas: agua, sulfuro de hidrógeno, monóxido de carbono y compuestos orgánicos volátiles como hidrocarburos halogenados, siloxanos, etc. Por tanto, es necesaria la limpieza del combustible, dependiendo del uso final (Fernández, 2010).

2.5 Métodos de Purificación del biogás según tecnologías

Estos se basan en la captura selectiva de las impurezas del gas con ayuda de materiales sólidos granulados, los cuales contienen una gran superficie específica. La aplicación de elevadas presiones mejora sustancialmente el resultado final.

Estos sistemas se utilizan principalmente para eliminar el agua, el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno presentes como contaminantes en el biogás. El proceso más conocido utiliza un sistema PSA, donde el gas es comprimido a 60-100 psig, antes de ser introducido en el sistema de adsorción Guild. El sistema PSA de adsorción elimina el agua, el dióxido de carbono a valores entre el 1 y el 3 %, y H₂S a valores típicos entorno a 4 ppm, obteniéndose un gas de producto que se encuentra dentro de los límites normalmente exigidos para su distribución en tubería. (Llaneza, González, L. y González, E., 2010)

2.5.1 Métodos de absorción

Llaneza, González, L. y González, E., 2010, indican lo siguiente:

Fundamentalmente aplicables al caso del H_2S y el CO_2 . Se basan en la transferencia de masa entre la sustancia gaseosa a depurar y un líquido denominado absorbedor que posee propiedades selectivas de absorción. El solvente habitual es el agua y se utilizan diversos compuestos y sistemas para la depuración.

Uno de los procedimientos empleados para absorber el H_2S y el CO_2 , consiste en la utilización de soluciones de aminas, las cuales tienen el grupo amino (NH_2) que se combina con dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno para dar compuestos de hidrógeno carbonato, amoníaco (RNH_3) HCO_3 y azufre con amoníaco (RNH_3) S , pero tiene la dificultad de ser un método muy costoso.

En la columna tipo ducha (scrubber) se emplean soluciones de carbonato (carbonato de potasio o sodio), en ellas se logra reducir el sulfuro de hidrógeno. (Kirk y Othmer, 1962). Los sistemas tipo scrubbing utilizan adicionalmente el aumento de presión para mejorar la eficiencia del sistema.

También se han empleado las soluciones acuosas alcalinas. Su principal ventaja consiste en que los problemas de corrosión y formación de espuma lo hacen menos costoso. Sin embargo, el agente antiespumante hace que el equipamiento y la operación sean más complicados. Este método presenta un elevado consumo de energía para el bombeo de la solución y de los gases. (Kirk y Othmer, 1962).

2.5.2 Métodos de separación por membrana

Este proceso se basa en la difusión de algunos compuestos que pasan a través de una membrana selectiva. Con el objetivo de facilitar la difusión se emplea un portador. La permeabilidad del gas a través de la membrana es función de la solubilidad y difusividad del gas en el material de la misma. Permite separar diferentes gases en función de la membrana, tales como el CO_2 , H_2S , el H_2 y otros hidrocarburos y gases ligeros.

Diferentes filtros de membranas han sido probados para la separación de sulfuro de hidrógeno y CO_2 del gas. Los equipos y la operación de este método son simples, sin embargo, la eficiencia de la separación por membrana es baja y el costo de la misma elevado, además hay que aplicar elevadas presiones. Sin embargo, es una tecnología en constante

crecimiento e innovación por lo que no se puede descartar su uso a medio plazo. (Llaneza, González, L. y González, E., 2010)

2.5.3 Métodos biológicos

Se llevan a cabo mediante la acción de determinados microorganismos tales como bacterias sulfuroxidantes que llevan el sulfuro a azufre metálico (Fdez – Polanco y otros, 1996). Se conocen muchos microorganismos que habitan en lugares húmedos y que son consumidores de H₂S (g) como fuente nutricional, cubriendo sus alrededores con azufre elemental. Estos tienen preferencia por las aguas residuales y nunca dejan de crecer y multiplicarse mientras las condiciones ambientales lo permitan, pueden vivir tanto en presencia como en ausencia de oxígeno, aunque hay ciertos factores que favorecen su crecimiento y desarrollo como son: humedad, presencia de oxígeno, existencia de H₂S (g) y líquido residual como vector (transportador de bacterias).

Todos los estudios demuestran que el efecto biocatalítico en cuestión se debe al consumo de H₂S (g) por parte de dichos microorganismos disminuyendo así su concentración en el biogás.

Un ejemplo de este tipo de procesos es la Tecnología de Percolación (PROFACTOR) que utiliza filtros biotecnológicos que reducen considerablemente o eliminan casi completamente – dependiendo de la composición del biogás a tratar – el H₂S.

Con el biofiltro percolador se alcanza un alto grado de pureza del biogás –niveles de ácido sulfhídrico hasta aprox. 50 ppm. El biofiltro permite al usuario mayor flexibilidad para su utilización en nuevas tecnologías de conversión energética – pilas de combustible, biocombustible para vehículos, inserción de biogás en la red de gas natural, etc.-, además de las ya conocidas como motores de cogeneración y trigeneración.

Entre los productos que pueden emplearse como parte esencial del filtro biológico destaca la utilización de algas (micro o macro). (Llaneza, González, L. y González, E., 2010)

2.6 El biometano

Para obtener biometano, el biogás obtenido de los residuos orgánicos se somete a un proceso de limpieza denominado upgrading. Al hacerlo, se eliminan distintas impurezas como el CO₂.

El biometano es un gas con una composición similar a la del gas natural y, por tanto, se puede inyectar en la red de gasoductos. También se utiliza como combustible para vehículos sostenibles, que reducen la huella de carbono.

Además del upgrading, para obtener biometano existe la opción de capturar CO₂ de otras fuentes, como por ejemplo la industria o las plantas térmicas de generación, y combinarlo con hidrógeno verde para obtener metano sintético. A este proceso se le denomina Power to gas.

El biometano es una fuente de energía renovable con unas tasas de continuidad que no ofrecen, de momento, otras fuentes renovables.

Cabe destacar que la introducción del uso de biogás y el biometano contribuye de manera relevante al desarrollo de una verdadera economía circular, ya que son el resultado de una valorización adecuada de los residuos. (Good New Energy, 2019)

2.7 Producción de biometano a partir de Biogás de vertedero

Del trabajo de Sánchez, Barrero y Antolín (2016) titulado “Producción de biometano a partir de biogás de vertedero”, se tomó la información de los antecedentes, los estándares de biogás y la valorización del biogás lo cual se describe a continuación:

2.7.1 Antecedentes

El biometano no es más que el biogás, procedente de vertederos o de otras fuentes, sometido a un proceso llamado valorización, mediante el cual se separan los componentes no deseados y se adecúa su composición a los estándares marcados por la legislación correspondiente a la aplicación a la que se destine este gas.

Principalmente existen tres aplicaciones finales del biometano: pueden emplearse directamente para la generación energética, puede emplearse como combustible para vehículos, en forma de gas natural comprimido (GNC), o bien puede suministrarse a la red de gas como un sustituto del gas natural (SGN).

Actualmente, en Europa, en torno al 65% de las plantas de valorización de biogás se dedican a producir gas para suministrarlo a la red de gas natural, mientras que un 35% produce biometano para producir GNC como combustible para vehículos (Niesner, Jecha, & Stehlík, 2013).

Para transformar el biogás en biometano, este gas debe pasar por dos etapas: una primera etapa de limpieza, donde se elimina el agua, H₂S y las partículas sólidas, y una segunda etapa llamada etapa de valorización, donde se elimina el CO₂ del biogás, con el fin de separarlo del metano.

2.7.2 Estándares de biogás

El biogás que se extrae de los vertederos, así como de las diversas fuentes, debe ser sometido a un tratamiento con el fin de obtener un producto de mayor valor añadido, en este caso, un biometano que pueda ser empleado como fuente de energía en forma de sustituto del gas natural o en forma de combustible para vehículos. Aquí entran en juego las diversas técnicas para la limpieza y la valorización del biogás, las cuales son necesarias para adaptar el biogás obtenido de la fuente de origen a las características demandadas por la aplicación final que vaya a tener el biometano producido.

Para establecer un punto común en cuando a las características que debe tener el biometano para su uso general, surgen los estándares para el biogás, unas normativas que determinan los requerimientos que debe tener un biogás procesado para que pueda ser considerado como biometano. Cada requerimiento del biometano se traduce en que una determinada propiedad de biogás debe estar comprendida entre unos determinados valores límites, y debe medirse de acuerdo a una normativa específica.

En la actualidad no existen estándares internacionales que regulen la utilización del biometano como combustible para vehículos, sin embargo, algunos países han desarrollado estándares nacionales. Suecia es uno de los pocos países que ha desarrollado un estándar nacional para el biogás que se emplea como combustible para vehículos. Este estándar se denomina SS 155438: "Motor fuels – Biogas as fuel for high-speed Otto engines" y es tomado como referencia por otros países. Este estándar se ocupa de establecer las características específicas relacionadas con el uso y el almacenamiento del biogás producido la digestión anaerobia para su uso como combustible para motores. No se aplica a los combustibles que se mezclen con otros compuestos, como propano o hidrógeno. Por consiguiente, este estándar refleja un combustible con un número de metano elevado. El número de metano es una propiedad de estos combustibles gaseosos análoga al número de octano para los motores de gasolina. Un número de metano bajo puede ser origen de la presencia de hidrocarburos de cadena larga en el combustible (Protection, 2006). Este

estándar también se aplica al biogás destinado a la inyección a la red de suministro de gas natural.

En el caso de Suecia, dado que la producción de combustibles está regida por regulaciones que deben ser cumplidas, el biogás producido por el estándar antes mencionado deberá cumplir ambas normativas reguladoras, para que este biogás pueda ser usado en los motores de gas natural sin que éstos precisen de modificación alguna. En la Tabla 1 se muestra las características que debe cumplir un biometano empleado como combustible para vehículos según el estándar SS 15 54 38 sueco. El índice Wobbe es un indicador del buen funcionamiento de un motor que quema gas natural. Este índice determina el comportamiento de la llama en el quemador al intercambiar dos gases combustibles. El índice Wobbe es un valor numérico y se calcula como el poder calorífico del gas dividido por la raíz cuadrada de la densidad relativa del gas (Persson, Jönsson, & Wellinger, 2006).

Tabla 1: Límites establecidos por el estándar SS 15 54 38 de Suecia para el uso de biometano como combustible para el transporte.

Propiedad	Unidades	Límites	Norma para medición
Índice Wobbe	MJ/m ³	43,9-47,3	SS-ISO 6976
Número de octano (MON)	-	130	
Contenido en metano	% vol.	97±2	ISO 6974
Contenido de CO ₂ + O ₂ + N ₂	% vol.	<5	ISO 6974
Contenido en O ₂	% vol.	<1	ISO 6974
Contenido en agua	mg/Nm ³	32	SS-EN ISO 10101- 1, -2,-3
Azufre total	mg/Nm ³	23	ISO 6326
Contenido en nitrógeno (medido como NH ₃)	mg/Nm ³	<20	ISO 6974
Punto de rocío a la máxima presión de almacenamiento	°C	t-5 t=T ambiente	ISO 6327

FUENTE: Sánchez, F. J. G., Barrero, F. V., & Antolín, R. A. (2016)

Para el caso de la inyección de gas a la red de suministro, tampoco existen estándares internacionales. Al igual que ocurría anteriormente, algunos países han desarrollado estándares nacionales y procedimientos para la inyección de biogás a la red. En la legislación de Suiza se recogen dos diferentes calidades en el suministro de gas natural: el gas para

inyección limitada y el gas para inyección ilimitada. En la Tabla 2. Estándares para la inyección de gas en Suiza. se presenta el estándar para ambas calidades, siendo todos los parámetros iguales en ambas calidades salvo el contenido en metano, el cual es superior al 96% para el gas para inyección ilimitada, mientras que para el estándar para la inyección ilimitada de gas el contenido debe ser superior al 50% (Persson, Jönsson, & Wellinger, 2006).

Tabla 2: Estándares para la inyección de gas en Suiza

Parámetro	Unidades	Inyección de gas ilimitada	Inyección de gas limitada
Contenido en metano	% vol.	>96	>50
Humedad relativa	%	<60	
Polvo	-	Técnicamente libre de polvo	
CO ₂	% vol.	<6	
O ₂	% vol.	<0,5	
H ₂	% vol.	<5	
H ₂ S	mg/Nm ³	<5	
S	mg/Nm ³	<30	

FUENTE: Sánchez, F. J. G., Barrero, F. V., & Antolín, R. A. (2016)

En Alemania existe un estándar para la inyección de biogás elaborado en conjunto por la Asociación Alemana del Agua y el Gas y por la Asociación Alemana del Biogás, basado en el estándar alemán para el gas natural, DVGW G260. En la Tabla 3 se indican los requerimientos recogidos en este estándar. Al igual que ocurre con Suiza, en la norma alemana también se permite la inyección de dos tipos de gas, para inyección limitada y para inyección ilimitada (Persson, Jönsson, & Wellinger, 2006).

Tabla 3: Estándares para la inyección de gas en Alemania

Parámetro	Unidades	Valores límites
Índice Wobbe	MJ/Nm ³	46,1-56,5 para gas de alto poder calorífico 37,8-46,8 para gas de bajo poder calorífico
Densidad relativa	-	0,55-0,75
Polvo	-	Técnicamente libre
Punto de rocío	°C	< T del suelo
CO ₂	% vol.	<6
O ₂	% vol.	<3
S	mg/Nm ³	<30

FUENTE: Sánchez, F. J. G., Barrero, F. V., & Antolín, R. A. (2016)

En Francia, Gaz de France desarrolló en 2004 un estándar para la inyección de gas a la red de suministro nacional. Este estándar presenta unos límites más estrictos en cuanto a los niveles de oxígeno que los otros mencionados, además de incluir límites para metales pesados y halógenos. En la Tabla 4 se presenta los requerimientos en el gas que establece este estándar francés (Persson, Jönsson, & Wellinger, 2006).

Tabla 4: Estándares para la inyección de gas en Francia

Parámetro	Unidades	Valores límites
Índice Wobbe	MJ/Nm ³	48,2-56,52 para gas de alto poder calorífico 42,48-46,8 para gas de bajo poder calorífico
Poder calorífico	MJ/Nm ³	38,52-46,08 para gas de alto poder calorífico 34,2-37,8 para gas de bajo poder calorífico
Punto de rocío del hidrocarburo	°C	<-5
Punto de rocío del agua	°C	< -5
CO ₂	% vol.	<2
Polvo	mg/Nm ³	<5
Azufre total	mg/Nm ³	<75
O ₂	ppmv	<100
Hg	mg/Nm ³	<10 para gas natural <50 para GNL
Cl	mg/Nm ³	<1
F	mg/Nm ³	<10
H ₂	% vol.	<6
CO	% vol.	<2

FUENTE: Sánchez, F. J. G., Barrero, F. V., & Antolín, R. A. (2016)

Un estudio más exhaustivo de los requerimientos para los gases no convencionales utilizados para el suministro a la red de gas natural se hace en el informe técnico CEN/TR N 54:2011 (Technical Committee CEN/TC 234 “Gas Supply”, 2011), donde se compara una mayor cantidad de estándares para otros países, si bien en este trabajo se indica los más destacados.

En Estados Unidos existen unos estándares, los cuales son establecidos por los propietarios de redes de distribución y transmisión de gas natural, cada uno delimitando sus propios requisitos, pero siendo estos bastante similares (Ong, Williams, & Kaffka, 2014). Uno de los cuatro mayores distribuidores de Estados Unidos es Southern California Gas (SoCalGas) cuyos estándares para el biometano empleado para la inyección a la red de gas se indican en

la Tabla 5, obtenidos de la norma número 30 de sus estándares para la inyección a la red de gas natural (Company, 2015).

Tabla 5: Estándares para la inyección de gas en Southern California Gas (Estados Unidos).

Parámetro	Unidades	Valores límites
Poder calorífico	BTu/scf	990-1150
CO ₂	% vol.	<3
H ₂ S	% vol.	<4
Siloxanos	mg/Nm ³	<0,1
NH ₃	% vol.	<0,001
H ₂	% vol.	<0,1
Hg	mg/Nm ³	<0,08

FUENTE: Sánchez, F. J. G., Barrero, F. V., & Antolín, R. A. (2016)

2.7.3 Valorización del Biogás

En el proceso de valorización del biogás para obtener el biometano se parte del biogás procedente del proceso de limpieza, al cual se le realiza una separación de las impurezas que se encuentran en una menor cantidad y que no se han retirado en la etapa de limpieza, pero el objetivo principal de esta etapa es eliminar el CO₂ que transporta el biogás. La retirada de este CO₂ es el núcleo central de la valorización del biogás.

En la práctica, existen distintos métodos empleados industrialmente para la separación del CO₂, los cuales se basan en las operaciones unitarias de la ingeniería química: absorción física y química, adsorción, permeación de gases, y otros métodos como los criogénicos. Las técnicas más extendidas en Europa son la absorción física, la adsorción mediante sistemas PSA (Pressure Swing Adsorption), la absorción química y la separación con membranas.

El uso de estas tecnologías frente a otras se debe a varios factores. En primer lugar, se encuentra la característica del biogás, ya que su contenido en CO₂ es muy elevado. Esto hace que se deban encontrar técnicas específicas para eliminar el CO₂ del biogás. Otro factor es el tamaño de las aplicaciones, el cual es muy pequeño en comparación con las aplicaciones originales para las que se diseñaron estas técnicas, las petroquímicas. Por último, también influye en hecho de que los requerimientos de calidad para la separación no son muy

elevados, ya que se tienden a indicar en forma de puntos porcentuales enteros de CO₂ y puede tolerarse la presencia de algunos otros contaminantes como O₂ o N₂.

A. Comparación de las técnicas

A continuación, se va a realizar una comparativa de las ventajas e inconvenientes de las distintas técnicas, así como una comparación de las características del biogás obtenido mediante el empleo de cada una de las técnicas mencionadas (Ong, Williams, & Kaffka, 2014).

En cuanto a la PSA, mediante ella se obtiene un gas valorizado más limpio que si este mismo gas se tratara por medio de otras técnicas tales como la absorción física con agua. Sin embargo, es requerido un proceso más sofisticado y un mayor control del mismo, incluyendo la recirculación de una parte del gas para evitar unas excesivas pérdidas de metano. Otro inconveniente es la mayor probabilidad de ensuciamiento por la existencia de contaminantes en el biogás.

En relación a la absorción con agua, mediante esta técnica puede obtenerse un biometano con una pureza de un 95% de CH₄ con una mínima supervisión de la operación y un solo paso por la columna. Si existe recirculación se consiguen purezas mayores.

Las ventajas que tiene esta técnica es que es una tecnología simple, ampliamente usada en la industria y relativamente poco costosa. Además, el lavado con agua tiene pocas pérdidas de CH₄ (menos de un 2% de pérdidas) debido a la gran diferencia entre la solubilidad del CO₂ y del CH₄.

La desventaja de la absorción con agua es que es menos eficiente que otros procesos, tanto en términos de pérdidas de CH₄ como en consumo de energía. Sin embargo, algunas de las ineficiencias del proceso se pueden compensar mediante el uso de un sistema de lavado de un único paso, ya que otros procesos requieren etapas de regeneración.

En cuanto a la absorción con solventes orgánicos, este método tiene la ventaja de que la solubilidad del CO₂ y el H₂S con respecto al metano es mayor en Selexol que en agua, lo que resulta en una menor demanda de solvente y una disminución del bombeo. El Selexol se encuentra normalmente mantenido bajo presión, lo que mejora su capacidad para absorber los contaminantes. Además, el agua y los hidrocarburos halogenados se eliminan con Selexol durante la absorción, lo que hace que no se necesite instalar equipos adicionales para eliminar estos componentes individualmente.

Como inconveniente se tiene que durante la etapa de desorción del Selexol puede formarse azufre elemental si se desorbe con aire. Otro inconveniente es que este proceso resulta más caro para aplicaciones a pequeña escala que la absorción con agua o la PSA.

La absorción química con aminas cuenta con la ventaja de la alta selectividad de las aminas por el CO₂ y la gran reducción de volumen que supone este proceso con respecto a otros. Por ejemplo, mediante la absorción química se puede disolver de 1 a 2 órdenes de magnitud más de CO₂ por unidad de volumen que si se empleara la absorción con agua. Por otro lado, si existe algún calor residual que se pueda aprovechar para la etapa de absorción, el consumo de energía global resulta más bajo que en otros casos como la absorción con Selexol o con agua.

El principal inconveniente de la absorción química es la corrosión, la degradación de las aminas y la acumulación de contaminantes, que hacen disminuir los rendimientos y hace que su uso sea problemático cuando se emplea a pequeña escala.

En la Tabla 6 se resumen todas las ventajas y desventajas de cada una de las técnicas empleadas para la valorización del biogás.

Tabla 6: Ventajas e inconvenientes de las distintas técnicas para la valorización del biogás

Técnica	Ventaja	Desventaja
PSA	<ul style="list-style-type: none"> • Bajo uso energético • No hay demanda de calor • No emplea productos químicos • Es compacto • Aplicable a pequeña escala • Empleado con frecuencia en la industria 	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene un biometano con un contenido medio de CH₄ • Altas/medias pérdidas de metano • Se requiere un pretratamiento para el agua y el H₂S • Se requiere un gran control del proceso • Pérdidas de CH₄ cuando hay fallos en las válvulas
Absorción con agua	<ul style="list-style-type: none"> • Sencillo y fácil de operar • Poco costoso • Es el más empleado en la industria • También elimina el amoníaco y el H₂S • Es flexible, se puede adaptar su capacidad ajustando la presión o la temperatura 	<ul style="list-style-type: none"> • Emplea gran cantidad de agua • El H₂S puede dañar los equipos • Se obtiene un biometano con un contenido medio de metano • Altas/moderadas pérdidas de CH₄ • Posible formación de espumas • Baja flexibilidad en cuanto a la variación en la entrada de biogás • Es necesario secar el biometano una vez realizada la valorización
Absorción con solventes orgánicos	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene un biometano con alta pureza • Presenta una mayor solubilidad del CO₂ que el agua • Bajas pérdidas de CH₄ • También elimina amoníaco, H₂S y otras impurezas, pero se recomienda realizar un pretratamiento. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto coste de inversión y de operación • Dificultad de operación • Se requiere calentamiento para una completa regeneración
Absorción química con aminas	<ul style="list-style-type: none"> • Se obtiene la mayor pureza de biometano • Baja demanda de electricidad • No hay presurización del biogás • Alta eliminación de CO₂ • Bajas pérdidas de CH₄ 	<ul style="list-style-type: none"> • Altos costes de inversión • Gran demanda de calor para la regeneración • Corrosión • Las aminas se descomponen y se envenenan en presencia de O₂ • Precipitación de sales • Posible formación de espumas • Se necesita pretratamiento para eliminar el H₂S

Continuación...

Separación con membranas	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción simple • Operación sencilla • Requiere poco mantenimiento • Configuración modular • No se requiere calor no productos químicos • Alta fiabilidad • Se puede tratar pequeños caudales de gases sin gran incremento de los costes 	<ul style="list-style-type: none"> • Baja selectividad de la membrana • Se requieren varias etapas para conseguir una alta pureza de CH₄ • Se obtiene un biometano con un contenido medio de metano • Medias/altas pérdidas de CH₄ • Sustitución de la membrana en 1-5 años • No adecuado para un biogás con contaminante no determinados, como gas de vertedero o biogás de aguas residuales • Alto coste de las membranas • Poco extendido en la industria
Separación criogénica	<ul style="list-style-type: none"> • Se consigue un biometano de alta pureza • Bajas pérdidas de metano • Se obtiene CO₂ puro como subproducto • No requiere productos químicos • Solo se necesita un poco de energía adicional para hacer GNL 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto coste de capital y de operación • Es necesario un pretratamiento para eliminar contaminantes • Muy exigente técnicamente • Implantación a gran escala muy reciente • La eficiencia y la tecnología no está muy demostrada

FUENTE: Sánchez, F. J. G., Barrero, F. V., & Antolín, R. A. (2016)

A continuación, en la Tabla 7 se puede la pureza del biometano obtenido mediante cada técnica, así como las pérdidas de metano, algunas condiciones de operación, la necesidad de pretratamientos y los consumibles para cada una de ellas. Como se puede comprobar, mediante la absorción con aminas se obtiene el biometano más puro con las menores pérdidas de metano debido a la gran selectividad de las aminas por el CO₂. Por el contrario, mediante la absorción con agua se obtiene el biometano con la menor pureza debido a que el agua no es selectiva para el CO₂. Mediante la separación con membranas se pueden obtener altas o bajas purzas de biometano, dependiendo del número de etapas de membranas usadas. A mayor número de etapas, una mayor pureza del biometano se consigue, pero por contra se incurre en mayores pérdidas de metano.

Tabla 7.: Características de las distintas técnicas de valorización del biogás.

Técnica	Presión (bar)	Temperatura (°C)	Contenido en metano del biometano (%)	Pérdidas de metano (%)	Pretratamiento para el azufre	Consumibles
PSA	2 - 11	5 - 30	95 - 98	1 - 3,5	Requerido	Adsorbente
Absorción con agua	8 - 21	20 - 40	93 - 98	1 - 3	No necesario o aconsejable	Agua; agentes de secado; agentes antiensuciamiento
Absorción con solventes orgánicos	5 - 9	10 - 20	95 - 98	1,5 - 4	No necesario o aconsejable	Solvente orgánico
Absorción química con aminas	<11	35 - 50	99	0,04-0,1	Requerida o aconsejable	Solución de aminas; agentes antiensuciamiento; agentes de secado
Separación con membranas	8 - 42	25 - 60	85 - 99	0,5 - 20	Aconsejable	Membranas
Separación criogénica	19 - 31	-59 – (-45)	96 - 98	0,5 - 3	Requerido o aconsejable	Refrigerante

FUENTE: Sánchez, F. J. G., Barrero, F. V., & Antolín, R. A. (2016)

Además de eliminar el CO₂ del biogás, estas técnicas presentadas son capaces de eliminar otros contaminantes. De la misma forma que se expuso en el apartado de limpieza del biogás, en la Tabla 4-11 se muestra una la relación entre las distintas técnicas para la valorización del biogás y los tipos de contaminantes que son capaces de eliminar.

Tabla 8: Capacidad de eliminación de contaminantes de cada técnica de valorización del biogás.

Técnica	CO ₂	H ₂ S	O ₂	N ₂	COVs	NH ₃	Siloxanos	Agua
PSA	Sí	Sí con pretratamiento	Parcialmente	Parcialmente	Sí	Sí	Sí	Sí con pretratamiento
Absorción con agua	Sí	Sí	No	No	Sí	Sí	Sí	No
Absorción con solventes orgánicos	Sí	Sí	Parcialmente	Parcialmente	Sí	Sí	Sí	Sí
Absorción con aminas	Sí	Sí	Sí con pretratamiento	No	Parcialmente	Sí	Parcialmente	No
Separación con membranas	Sí	Parcialmente	Parcialmente	Parcialmente	Sí	Sí	Sí	Sí
Separación criogénica	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

FUENTE: Sánchez, F. J. G., Barrero, F. V., & Antolín, R. A. (2016)

En relación a los costes de inversión de cada una de las técnicas, en subapartados anteriores se han establecido sus valores. En la Tabla 9 se resumen los costes de inversión para cada técnica con respecto a una capacidad de referencia, incluyendo los costes de inversión para una capacidad de 500 Nm³/h y de 2000 Nm³/h. En dicha tabla también se introducen los consumos típicos de electricidad, agua y demás auxiliares necesarios para poder operar con estos métodos de valorización de biogás. En cuanto al coste de operación y mantenimiento, este se expresa como un porcentaje del coste de inversión (Bauer, Hulteberg, Persson, & Tamm, 2012). En relación a la separación criogénica, debido a que es un proceso que está en fase de desarrollo, no existen muchos datos económicos que hagan referencia a ello. En la publicación de Hannah Warren (Hannah Warren, 2012) se indica un coste de instalación y de mantenimiento para esta tecnología criogénica, para un caudal de biogás de 250 Nm³/h, siendo este coste de instalación de 908.500 €/año y de 397.500 €/año para el mantenimiento.

Tabla 9: Tabla comparativa de datos económicos y consumos de las distintas técnicas.

Técnica	PSA	Absorción con agua	Absorción con solventes orgánicos	Absorción química	Separación con membranas
Coste de inversión 500 Nm ³ /h (€/Nm ³ /h)	2800	2700	3400	3700	2800
Coste de inversión 2000 Nm ³ /h (€/Nm ³ /h)	1500	1400	1400	1400	1800
Costes de mantenimiento	2-4%	2-3%	2-3%	3%	3-4%
Consumo de energía (kWh/Nm ³ /h)	0,15-0,3	0,1-,015	0,2-0,25	0,67-0,69	0,2-,03
Consumo de agua (m ³ /día)	-	0,5-5	-	0,4-1,4	-

FUENTE: Sánchez, F. J. G., Barrero, F. V., & Antolín, R. A. (2016)

2.8 Contaminación por Uso de Combustibles Fósiles Comparados con el Uso de Combustibles no Fósiles.

El petróleo se origina a partir de compuestos orgánicos, principalmente hidrocarburos insolubles en agua; se produce en el interior de la Tierra, por transformación de la materia orgánica acumulada en sedimentos del pasado geológico.

Los procesos de combustión originan dióxido de carbono (CO₂), además de óxido nítrico (NO) y al oxidarse originan dióxido de nitrógeno (NO₂) y posteriormente ácido nítrico (HNO₃). Este último se absorbe por las gotas de lluvia y cae a la Tierra como lluvia ácida.

Además, el dióxido de nitrógeno, debida a su intensa actividad fotoquímica, es el ingrediente clave en la producción de smog. Otros compuestos que intervienen en la formación del smog son el monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos, derivados de procesos de combustión incompletos. Ambos producidos en el motor de un automóvil.

En conclusión, se puede decir que el petróleo es el principal causante del efecto invernadero, lluvia acida y contaminación del aire urbano.

El carbón depende de procesos de metamorfosis de plantas y vegetales. Es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono y con cantidades variables de otros elementos, principalmente hidrogeno, azufre, oxígeno y nitrógeno.

La combustión de carbón en estufas y hornos llena el aire de hollín y dióxido de azufre (SO_2), ocasionando problemas respiratorios. El uso actual más común de carbón es como combustible en plantas eléctricas, causando principalmente emisiones de: a) dióxido de azufre y óxido nítrico, causantes de la lluvia ácida y b) partículas atmosféricas, que influyen en la regulación del clima y en la salud humana, además de emitir dióxido de carbono (Spiro y Stigliani, 2004).

Mucha de la materia mineral en la combustión de los combustibles fósiles como el carbón, el lignito o el combustóleo se convierte, durante la combustión, a escoria fundida, vítrea, que no presenta ningún problema, de contaminación atmosférica. Las partículas más pequeñas de cenizas volantes entran en los conductos del horno y se recogen eficazmente en un sistema colector adecuadamente equipado. Sin embargo, algunas cenizas escapan a través de la chimenea y entran a la atmósfera. Estas cenizas volantes liberadas consisten de partículas muy pequeñas, que hacen mucho daño a las plantas y en la salud humana, reduciendo la visibilidad. Si contienen dióxido de azufre (SO_2) y trióxido de azufre (SO_3) son aún más dañinas (Manahan, 2007).

De los seis gases de efecto invernadero, el dióxido de carbono representa por sí solo las tres cuartas partes del total, y más del 90 por ciento de aquél es de origen energético. De acuerdo a los estudios realizados, la mayor fuente de emisión de dióxido de carbono se encuentra en la combustión de fósiles combustibles (Fernández, 2010).

El uso de energías renovables representa una reducción relativa del consumo de combustibles fósiles, además la opción más aceptable para neutralizar las emisiones de gases de efecto invernadero principalmente del dióxido de carbono y contaminantes atmosféricos. Además, que se utilizan residuos sólidos o líquidos que derramados en el medio ambiente provocarían efectos perjudiciales para el mismo (Camps y Marcos, 2008).

América Latina produce alrededor del 40 por ciento de los biocombustibles en el mundo, siendo una fuente de energía renovable de fácil implementación, sobre todo en sectores rurales.

Según Felipe Duhart, Oficial de Bioenergía de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), “el aprovechamiento de los residuos orgánicos de las actividades agropecuarias para la producción de biogás, puede ser excelente oportunidad para la sustentabilidad de los pequeños productores de la región”.

En los últimos años, la energía y los biocombustibles se han transformado en tema prioritario para los países de América Latina y el Caribe, producto de la alta volatilidad en los precios del petróleo, de las emisiones de gases de efecto invernadero y la necesidad de los países de independizar su matriz energética (FAO, 2012).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Materiales

- Módulo básico de química.

3.2 Biogás para el estudio

- Biogás proveniente de la Finca “Bioagricultura Casa Blanca” Pachacamac. Libre de sulfuros.

3.3 Reactivos

- Solución de Ácido Clorhídrico 0,1 M.
- Solución de Ácido Sulfúrico 0,1 M.
- Solución de Hidróxido de Sodio 0,5 M, 1,0 M y 2,0 M
- Solución de Fenolftaleína al 1%
- Solución de Cloruro de Bario 0,25 M

3.4 Equipos

- Equipo de llenado de biogás a purificar
- Equipo purificador de biogás

3.5 Delimitación Espacial.

La presente investigación se realizó en el laboratorio de tesis perteneciente al Departamento de Química de la Facultad de Ciencias en la Universidad Nacional Agraria la Molina (UNALM).

3.6 Métodos

3.6.1 Llenado de Biogás en la fuente y su transporte al laboratorio de tesis de la UNALM:

El biogás procedente de la Finca “Bioagricultura Casa Blanca” (Calle 14 Lote 20 Parcelación Casa Blanca, Pachacamac). Figura 1, fue transportado en cámaras de llantas (Figura 2) al laboratorio de tesis del Departamento de Química de la UNALM para ser transferido al equipo de llenado de biogás a purificar (Figura 3).

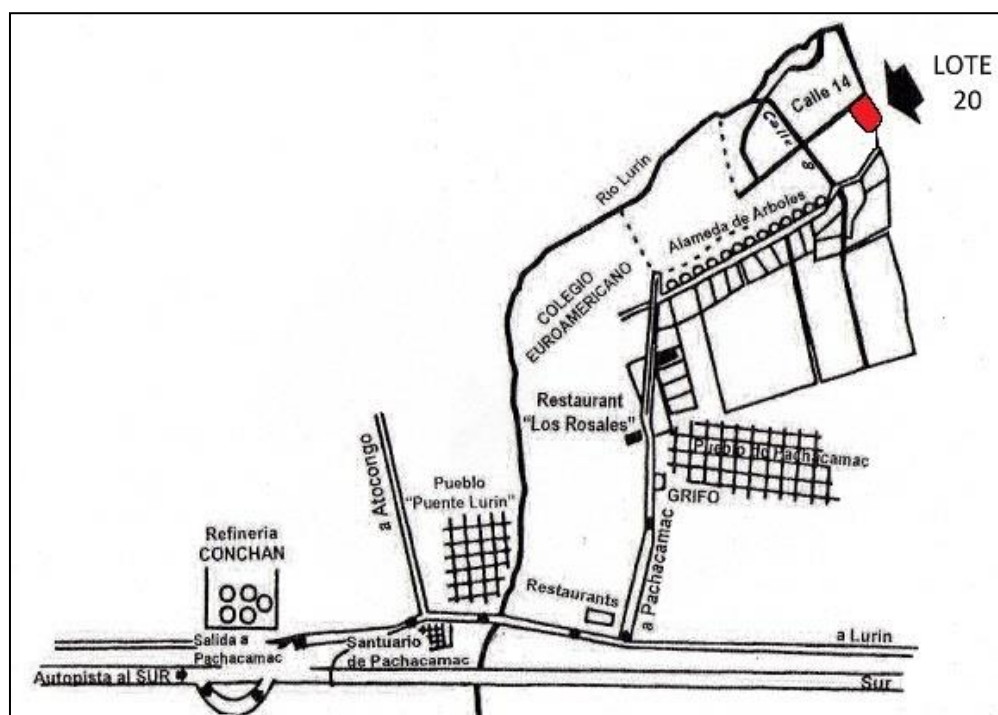


Figura 1: Mapa del lugar de abastecimiento de biogás

3.6.2 Medición del volumen del biogás a purificar

- Se llenó el bidón 1 de 20 L. de capacidad (Figura 3) con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,1 M*.
- Se desplazó el agua acidulada del bidón 1 con biogás a purificar. Esto, merced a la presión del biogás ejercido en el sistema.

(*): Para impedir la solubilización del dióxido de carbono del biogás en el agua acidulada.

NOTA: Como el sistema es hermético y aislado del medio ambiente, el biogás que fue llenado al bidón 1 no tuvo interferencia con el aire, como se muestra en la Figura 3.

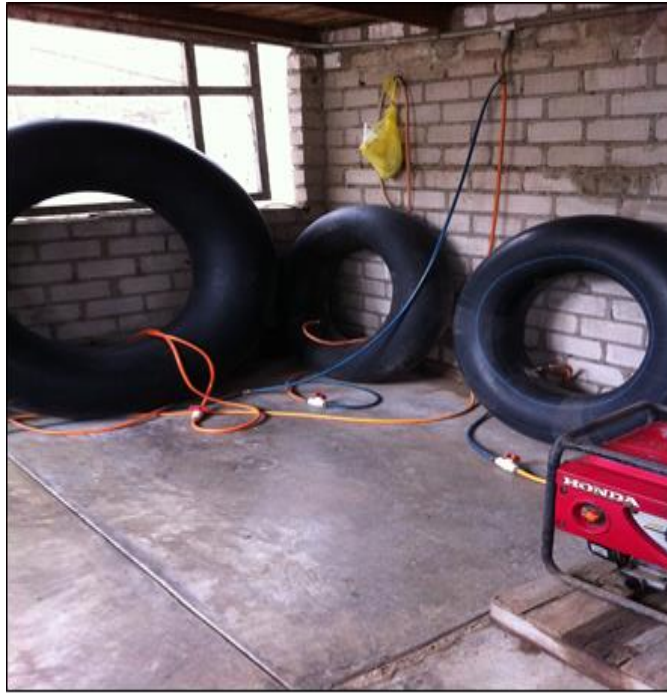


Figura 2: Cámaras con biogás de la Finca “Bioagricultura Casa Blanca”.

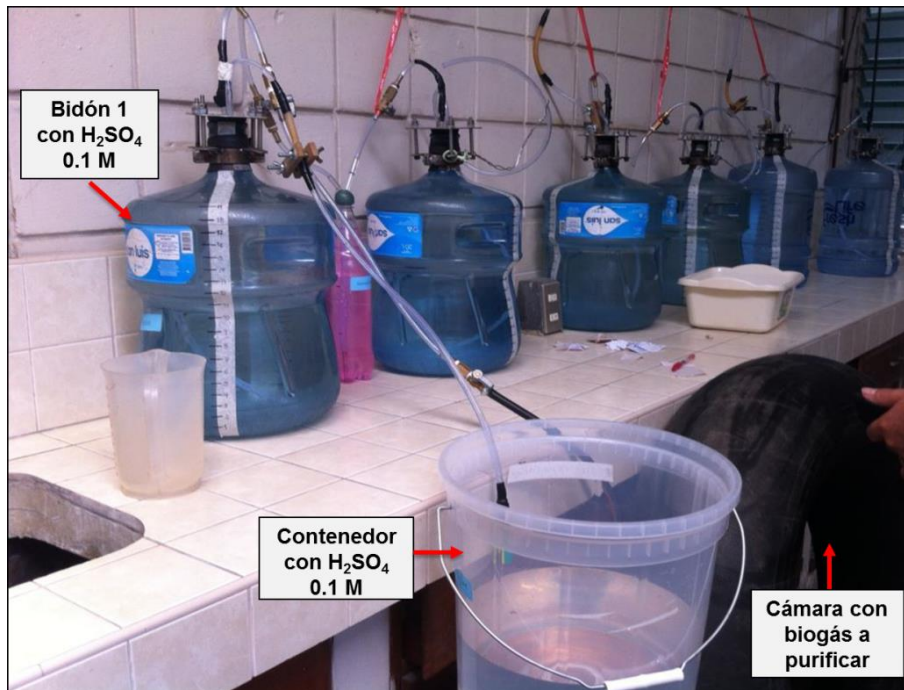


Figura 3: Sistema del equipo de llenado del biogás. Diseño propio.

3.6.3 Purificación del biogás con Hidróxido de Sodio

Se construyó un equipo purificador de biogás (de diseño propio) tal como se muestra en la Figura 4; en donde se observa que el contenedor 1 con ácido sulfúrico (H_2SO_4) 0,1 M cuenta con una llave de salida que ingresa al bidón 1, el cual previamente ha sido llenado con biogás a purificar o tal cual. Por medio de un tubo de entrada, colocado aproximadamente a 1 cm de la base del bidón 1, se desplazó el biogás a purificar hacia la botella con hidróxido de sodio (NaOH) y con indicador fenolftaleína. Esto hizo que el dióxido de carbono (CO_2) reaccione con el hidróxido de sodio produciendo bicarbonato de sodio y carbonato de sodio y desprendiendo a su vez biogás enriquecido en metano. Este biogás enriquecido en metano o biogás purificado, por medio de un tubo, pasa al bidón 2, previamente llenado con una solución de ácido sulfúrico 0,1 M. El biogás purificado o enriquecido en metano desplaza el agua acidulada del bidón 2 hacia el contenedor 2. Es importante señalar que el nivel de salida de la manguera del bidón 2 al contenedor 2, en el proceso, debe estar a la misma altura del nivel del ácido sulfúrico 0,1 M del bidón 2, de tal manera que las presiones sean igualadas a la presión atmosférica.



Figura 4: Sistema del equipo purificador de biogás. Diseño propio.

NOTA: Se debe tener en cuenta que se utilizó solución de ácido sulfúrico 0,1 M y no agua, para impedir la solubilización del dióxido de carbono del biogás en el agua.

3.6.4 Determinación de parámetros cinéticos.

3.6.4.1 Determinación de la Concentración más adecuada de Hidróxido Sodio.

Para determinar la concentración más adecuada de hidróxido de sodio (NaOH) y generar la reacción entre el CO₂ del biogás y la base, se utilizó concentraciones de 0,5 M, 1,0 M y 2,0 M. Se inició el ensayo llenando la botella de 1500 mL de capacidad con solución de hidróxido de sodio 0,5 M, usando como indicador 0,30 ml de fenolftaleína al 1%, dejando sólo un espacio de aproximadamente 3 cm en la parte superior de la botella en referencia; espacio suficiente como para que el tubo de salida esté alejado de la superficie del álcali. En la botella tiene lugar la reacción química entre el dióxido de carbono (CO₂) y el hidróxido de sodio (NaOH), produciendo bicarbonato de sodio y carbonato de sodio, al mismo tiempo que el biogás se enriquece en metano. Finalmente, el biogás purificado o enriquecido emerge de la botella y es conducido hacia el bidón 2 (Figura 5). Este procedimiento se repitió por tres veces con cada concentración de hidróxido de sodio, para determinar cuál sería la concentración más eficiente.

Para realizar estos ensayos la velocidad de flujo que se utilizó fue de 100 mL/min y la boquilla del tubo de salida del biogás se colocó a 28 cm de profundidad en la botella con hidróxido de sodio (NaOH).



Figura 5: Biogás purificado

3.6.4.2 Determinación de la velocidad de flujo más adecuada

Se evaluó la velocidad de flujo en el bidón 1, mediante el ingreso de la solución de ácido sulfúrico del contenedor 1 al bidón 1 y, paralelamente, por la velocidad de flujo del agua acidulada que sale del bidón 2 hacia el contenedor 2. Los flujos que se ensayaron fueron: 50 mL/min, 100 mL/min y 200 mL/min. Se controló las velocidades de flujo con las llaves de entrada y salida del sistema (Figura 6).



Figura 6: Medición de la Velocidad de Flujo



Figura 7: Probeta para cuantificar el volumen con respecto al tiempo.

Además, se utilizó una probeta a la salida de la manguera del bidón 2 hacia el contenedor 2 (Figura 7) para que, con ayuda de un cronómetro, se ajuste el volumen respecto al tiempo. En la botella del sistema se utilizó Hidróxido de Sodio 1,0 M usando como indicador 0,30 mL de fenolftaleína y la boquilla del tubo de entrada del biogás se colocó a 28 cm de profundidad en la botella con NaOH 1 M. Este procedimiento se repitió por tres veces con cada velocidad de flujo

3.6.4.3 Determinación de la Presión Hidrostática más adecuada

En la botella con hidróxido de sodio, se colocó la boquilla del tubo de salida del biogás a diferentes profundidades: 7 cm, 14 cm y 28 cm, para evaluar la presión hidrostática en el sistema purificador de biogás. Se utilizó hidróxido de sodio 1,0 M y 0,30 mL de fenolftaleína. Además, la velocidad de flujo que se utilizó, para esta prueba, fue de 100 mL/min). Este procedimiento se repitió por tres veces con cada presión hidrostática (Figura 8).



Figura 8: Medición de la Presión Hidrostática.

3.6.4.4 Medición del Dióxido de Carbono (CO₂) por Diferencia de Volúmenes

Un método alternativo para cuantificar la cantidad de dióxido de carbono captado con el hidróxido de sodio es por diferencia de volúmenes de biogás; para ello, al iniciar el experimento de cada parámetro analizado se registró el volumen inicial de biogás a purificar

del bidón 1 y al finalizar el experimento se restó el volumen resultante de biogás purificado del bidón 2, como se muestra en la Figura 9. De aquí se sobreentiende que el volumen faltante es el que corresponde al dióxido de carbono que ha sido captado por la base.

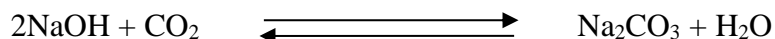


Figura 9: Cuantificación del Dióxido de Carbono

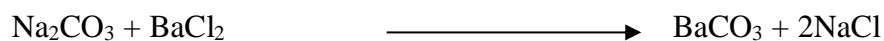
3.6.4.5 Titulación del Hidróxido de Sodio mezclado con Cloruro de Bario

Para realizar la titulación de las diferentes pruebas se tomó como referencia el artículo científico “*Determinación del calor de respiración de frutas por el método de titulación*”, (Montes y Arévalo, 2001; Anexo 1), en donde se adiciona cloruro de bario (BaCl_2) a la solución de hidróxido de sodio (NaOH) para que la reacción entre el CO_2 y el NaOH sea irreversible.

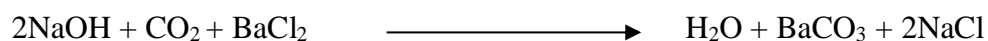
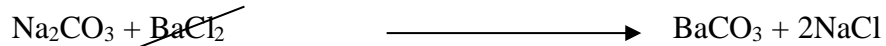
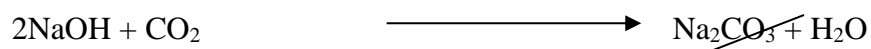
Al finalizar cada experimento se tomó una alícuota de 5 ml de hidróxido de sodio de la botella respectiva, para titular el hidróxido de sodio remanente que no reaccionó con el dióxido de carbono. Debido a que la reacción del dióxido de carbono (CO_2) con el hidróxido de sodio (NaOH) es reversible:



Es necesario atrapar el CO_2 de forma estable para evitar resultados irreales posteriores, por ello después de retirar la alícuota para la titulación, éste es recibido en 10 mL de una solución de cloruro de bario (BaCl_2) 0,25 M, cuya función es la formación del carbonato de bario insoluble que precipita, evitando el escape del dióxido de carbono de acuerdo a la siguiente reacción:



La reacción global se puede escribir de la siguiente manera:



Posteriormente se filtró el precipitado para retener el carbonato de bario insoluble y el hidróxido de sodio restante, previamente valorado y que pasó por el filtro, se tituló con ácido clorhídrico (HCl) 0,1M.

Los resultados de cuantificación de CO₂ obtenidos mediante volumetría, se compararon con el método de diferencia de volúmenes de biogás entre los bidones 1 y 2.



Figura 10: Titulación del NaOH mezclado con BaCl₂

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Procesamiento de datos

A continuación, a modo de ilustración, se presentan los cálculos realizados para la cuantificación de CO₂ absorbido del biogás a purificar con NaOH 0,5 M. Los cálculos obtenidos para todos los parámetros estudiados se detallan en el Anexo 2.

a) Cálculo del Porcentaje de CO₂ en el Biogás inicial (Cámara)

Volumen de biogás llenado al sistema con 5000 mL de solución de NaOH 0,5 M y 260 g. BaCl₂ = 5,00 L

Normalidad del HCl = 0,0970 eq / L (titulante)

- Cálculo de los gramos de NaOH inicial en 5 mL de NaOH 0,5171 M ≈ 0,5171 N:

$$\text{g.NaOH}_{\text{inicial}} = N_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}} \times \text{p.eq. NaOH}$$

$$\text{g.NaOH}_{\text{inicial}} = (0,0970 \text{ eq. / L} \times (26,83 \times 10^{-3} \text{ L} \times (40 \text{ g. / eq.}))$$

$$\text{g.NaOH}_{\text{inicial}} = 0,1041 \text{ g. contenidos en 5 mL de alícuota}$$

- Cálculo de los gramos de NaOH remanente, después de la absorción del CO₂ del biogás:

Volumen de alícuota filtrada a titular = 5mL

$$\text{g.NaOH}_{\text{final}} = N_{\text{HCl}} \times V_{\text{HCl}} \times \text{p.eq. NaOH}$$

$$\text{g.NaOH}_{\text{final}} = (0,0970 \text{ eq. / L} \times (24,67 \times 10^{-3} \text{ L} \times (40 \text{ g. / eq.}))$$

$$\text{g.NaOH}_{\text{final}} = 0,0957 \text{ g. contenidos en 5 mL de alícuota}$$

- Cálculo de los gramos de NaOH consumidos por el CO₂ del biogás:

$$\text{g.NaOH}_{\text{consumido}} = \text{g.NaOH}_{\text{inicial}} - \text{g.NaOH}_{\text{final}}$$

$$\text{g.NaOH}_{\text{consumido}} = 0,1041 \text{ g.} - 0,0957 \text{ g.}$$

$$\text{g.NaOH}_{\text{consumido}} = 0,0084 \text{ g. en 5mL de alícuota}$$

- **Cálculo de los gramos de NaOH consumidos en los 5000 mL de NaOH \approx 0,5 N:**

En 5 mL _____ se consume _____ 0,0084 g. NaOH

En 5000 mL _____ X

$X = 8,38 \text{ g. de Na OH}$

- **Cálculo de moles de CO₂ absorbido:**

1 mol de CO₂ = 44 g. CO₂

2 moles de NaOH = 2(40) = 80 g. NaOH, porque la relación estequiométrica es 2 a 1.

80 g. NaOH _____ es para _____ 44 g. CO₂

8,38 g. NaOH _____ X

X = 4,61 g. de CO₂ equivalente a los g. de NaOH consumidos.

Convirtiendo a moles de CO₂:

$$4,61 \text{ g. CO}_2 \times \frac{1 \text{ mol CO}_2}{44 \text{ g. CO}_2} = 0,1048 \text{ moles de CO}_2$$

Entonces 0,1048 moles de CO₂ es el total de CO₂ que está contenido en los 5000 mL de biogás inicial (de la cámara).

- **Cálculo del Volumen del CO₂ total absorbido (de la cámara) que a su vez es equivalente a los gramos de NaOH consumidos:**

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{n \times R \times T}{P}$$

n = 0,1048 mol
 R = 62,4 mm Hg. L / K mol
 T = 300 K
 P = 747 mm Hg

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{0,1048 \text{ mol} \times 62,4 \text{ mmHg} \cdot \text{L} / \text{K mol} \times 300 \text{ K}}{747 \text{ mmHg}}$$

$V_{\text{CO}_2} = 2,6253 \text{ L}$

Nota: La temperatura de trabajo fue 27°C y la presión en La Molina es de 747 mm Hg.

- **Cálculo del porcentaje del CO₂ total del biogás inicial (de la cámara):**

$$\%CO_2 \text{ inicial (cámara)} = \frac{V.CO_2 \times 100}{V. \text{ biogás llenado al sistema}}$$

$$\%CO_2 \text{ inicial (cámara)} = \frac{2,6253 \text{ L} \times 100}{5,00 \text{ L}}$$

$\% CO_2 \text{ inicial (cámara)} = 52.51 \%$

b) Cálculo de Moles y Litros de CO₂ absorbido del biogás a purificar con NaOH 0,5M por Titulación del NaOH remanente con HCl 0,1 M

Volumen de biogás a purificar: 19,00 L contenidos en el bidón 1

Alícuota filtrada de NaOH mezclado con BaCl₂: 5 mL

Nota: La alícuota de 5 mL de NaOH 0,50M se recibió en 10 mL de BaCl₂, dando un volumen total de 15 mL; este volumen resultante se filtró y se tomó 5 mL para ser titulado. Este resultado debe ser multiplicado por 3 que es la división de 15/5.

Volumen de gasto de HCl: 1,95 mL

Volumen de la botella con NaOH: 1450 mL

- **Cálculo de los gramos de NaOH inicial en los 5mL de NaOH 0,5171 M ≈ 0,5171 N:**

$$g. \text{ NaOH inicial} = N. \text{ NaOH} \times V. \text{ NaOH} \times p. eq. \text{ NaOH}$$

$$g. \text{ NaOH inicial} = (0.5171 \text{ eq. /L}) \times (5.00 \times 10^{-3} \text{ L}) \times (40 \text{ g. / eq.})$$

$g. \text{ NaOH inicial} = 0,1034 \text{ g.}$

- **Cálculo de los gramos de NaOH remanente, después de la absorción del CO₂ del biogás:**

$$g. \text{ NaOH final} = N. \text{ HCl} \times V. \text{ HCl} \times p. eq. \text{ NaOH}$$

$$g. \text{ NaOH final} = (0,0970 \text{ eq. /L}) \times (1,95 \times 10^{-3} \text{ L}) \times (40 \text{ g. / eq.})$$

$g. \text{ NaOH final} = 0,0076 \text{ g}$
--

$$g.NaOH_{final} = (0,0076g.) \times (3)$$

$$g.NaOH_{final} = 0,0227g.$$

- **Cálculo de los gramos de NaOH consumidos por el CO₂ del biogás a purificar:**

$$g. NaOH_{consumido} = g. NaOH_{inicial} - g. NaOH_{final}$$

$$g. NaOH_{consumido} = 0,1034 g. - 0,0227 g.$$

$$g. NaOH_{consumido} = 0,0807 g.$$

- **Cálculo de los gramos de NaOH consumidos en los 1450 mL de NaOH ≈ 0,5 N:**

$$\begin{array}{rcl} 5 \text{ mL} & \text{Consume} & 0,0807 \text{ g. NaOH} \\ 1450 \text{ mL} & \text{-----} & X \end{array}$$

$$X = 23,4094 \text{ g. de NaOH}$$

- **Cálculo de los moles de CO₂ absorbido del biogás a purificar:**

$$1 \text{ mol de CO}_2 = 44 \text{ g. de CO}_2$$

$$2 \text{ moles de NaOH} = 2(40) = 80 \text{ g. de NaOH, porque la relación estequiométrica es 2 a 1.}$$

$$80 \text{ g. NaOH} \text{ Equivale a } 44 \text{ g.CO}_2$$

$$23,4094 \text{ g.NaOH} \text{ ----- } X$$

$$X = 12,8752 \text{ g. de CO}_2 \text{ equivalente a los } g.\text{de NaOH consumidos.}$$

Convirtiendo a moles de CO₂:

$$12,8752 \text{ g.CO}_2 \times 1 \text{ mol CO}_2 = 0,2926 \text{ moles de CO}_2$$

$$\overline{44 \text{ g. CO}_2}$$

- **Cálculo del Volumen de CO₂ absorbido del biogás a purificar, que a su vez es equivalente a los gramos de NaOH consumidos:**

$$V_{CO_2} = \frac{n \times R \times T}{P}$$

$$\begin{array}{l} n = 0,2926 \text{ mol} \\ R = 62,4 \text{ mm Hg. L / K} \\ \text{mol} \\ T = 300 \text{ K} \end{array}$$

$$V_{CO_2} = \frac{0,2926 \text{ mol} \times 62,4 \text{ mmHg.L/Kmol} \times 300 \text{ K}}{747 \text{ mmHg}}$$

$$V_{CO_2} = 7,3331 \text{ L}$$

Nota: La temperatura de trabajo fue 27°C y la presión en La Molina es de 747 mm Hg.

Entonces de los 19,00 L iniciales de biogás a purificar, se absorbió 7,3331 L de CO₂.

c) Cálculo de moles de CO₂ por diferencia de volúmenes en los bidones

Volumen de biogás inicial sin purificar del bidón 1 = 19,00 L

Volumen de biogás purificado que se obtiene del bidón 2 = 11,90 L

- Cálculo de litros de CO₂ absorbido por diferencia de volúmenes en los bidones 1 y 2:

$V_{CO_2} \text{ absorbido} = V. \text{ bidón 1} - V. \text{ bidón 2}$

$V_{CO_2} \text{ absorbido} = (19,00 \text{ L}) - (11,90 \text{ L})$

$$V_{CO_2} \text{ absorbido} = 7,10 \text{ L}$$

- Cálculo de moles de CO₂ relacionado al volumen de los bidones:

$$n = \frac{P \times V}{R \times T}$$

$V = 7,10 \text{ L}$

$R = 62,4 \text{ mm Hg. L / K mol}$

$T = 300 \text{ K}$

$P = 747 \text{ mm Hg}$

$$n = \frac{7,10 \text{ L} \times 747 \text{ mmHg}}{300 \text{ K} \times 62,4 \text{ mmHg.L/Kmol}}$$

$$n = 0,2833 \text{ moles de CO}_2$$

d) Cálculo del porcentaje de CO₂ absorbido, relacionado al NaOH Consumido, calculado en la sección b

Volumen de biogás inicial sin purificar del bidón 1 = 19,00 L

Volumen de CO₂ absorbido por el NaOH = 7,3331 L (obtenido de los cálculos de la sección b)

- **Cálculo del volumen de CO₂ contenido en el bidón 1:**

$$V \text{ CO}_2 \text{ contenido en bidón 1} = (V \text{ CO}_2 \text{ bidón 1}) \times (\% \text{ CO}_2 \text{ inicial cámara})$$

$$V \text{ CO}_2 \text{ contenido en bidón 1} = (19,00 \text{ L}) \times (52,51 \%) / 100$$

$$V \text{ CO}_2 \text{ contenido en bidón 1} = 9,9762 \text{ L}$$

- **Cálculo del porcentaje de CO₂ absorbido por el NaOH:**

$$\% \text{CO}_2 \text{ absorbido por NaOH} = \frac{(V \cdot \text{CO}_2 \text{ absorbido por NaOH}) \times 100}{V \cdot \text{total CO}_2 \text{ contenido en bidón 1}}$$

$$\% \text{CO}_2 \text{ absorbido por NaOH} = \frac{7,3331 \text{ L} \times 100}{9,9762 \text{ L}}$$

$$\% \text{ CO}_2 \text{ absorbido por NaOH} = 73,51 \%$$

4.2 Parámetro cinético relacionado a la absorción de CO₂ del biogás a purificar, respecto a la concentración de Hidróxido Sodio.

Los resultados del experimento se muestran en la Tabla 10 y la Figura 11.

Tabla 10: Resultados de la absorción de CO₂ del biogás a purificar, respecto a la concentración de Hidróxido Sodio

Repeticiones	Parámetro	Porcentaje de la absorción de CO ₂ respecto a la concentración del Hidróxido de		
		0,5 Molar	1,0 Molar	2,0 Molar
Repet 1		71,92 %	78,51 %	93,72 %
Repet 2		72,45 %	80,10 %	87,35 %
Repet 3		73,51 %	85,40 %	89,48 %
Promedio del % de CO ₂ absorbido por el NaOH		72,63	81,34	90,18

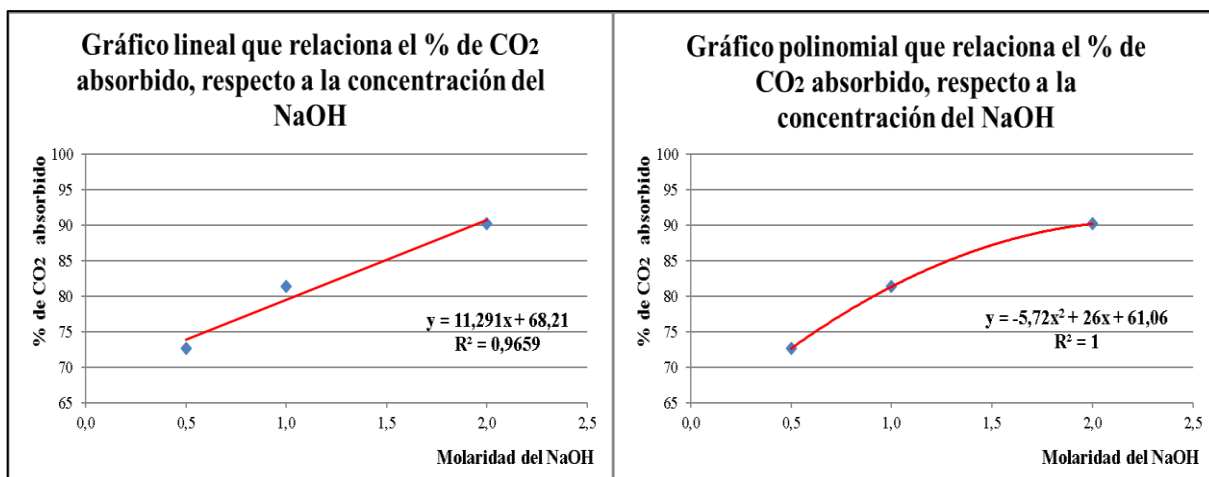


Figura 11: Comparación de Gráficos con Tendencia Lineal y Polinómica de la absorción de CO₂ del biogás, respecto a la concentración del NaOH.

En la Figura 11 se observa la relación que hay entre el porcentaje de dióxido de carbono absorbido del biogás a purificar, respecto a las diferentes concentraciones de hidróxido de sodio. Como se puede ver, las variables en estudio son directamente proporcionales, pero hay diferencias, si el tratamiento se hace de forma lineal o polinomial. La tendencia lineal no se ajusta muy bien a los datos obtenidos; aun cuando la aproximación es bastante buena, ya que $R^2 = 0,9659$; en cambio la tendencia polinómica se ajusta de forma perfecta a los valores obtenidos, puesto que $R^2 = 1$. A partir de esta gráfica se puede inferir que a 0,5 M de concentración de hidróxido de sodio, el porcentaje de absorción de dióxido de carbono, respecto a las concentraciones de NaOH de 1,0 M y 2,0 M, es menor debido a que la probabilidad de colisión molecular en el tiempo, entre el hidróxido de sodio y el dióxido de carbono es baja relativamente, ya que hay pocas moléculas de NaOH respecto al CO₂, en tales condiciones, para que se produzca la reacción eficientemente; además se puede ver que conforme se va incrementando la concentración de NaOH, es decir, cuando existe mayor cantidad de NaOH en solución, el porcentaje de dióxido de carbono absorbido aumenta.

Por otro lado, analizando la ecuación del gráfico de tendencia polinómica, se tiene que, al hallar la primera derivada de la ecuación, $y = -5,72x^2 + 26x + 61,06$, se obtiene la ecuación de la pendiente de la función inicial y, de aquí se puede inferir que, cuando la pendiente se hace cero, es porque es paralela al eje x, lo cual indica que ya no hay absorción de CO₂ en tales condiciones. Así pues, si la primera derivada se iguala a cero tenemos:

$$f'(x) = 2(-5,72x) + 26 = 0$$

$$Y: x = 2,27.$$

De este resultado se interpreta que a **2,27 Molar** de concentración de NaOH se produce la mayor probabilidad de colisión molecular en el tiempo y, por otro lado, si se halla el valor del porcentaje de absorción de CO₂ que es el valor de “y” este punto es igual a **90,18 %**. Esto nos indica que, si la concentración supera a **2,27 Molar**, la absorción de CO₂ en el sistema probado no será mayor a **90,18 %**.

4.3 Parámetro cinético relacionado a la absorción de CO₂ del biogás a purificar respecto a la Velocidad de Flujo:

Los resultados del experimento se muestran en la Tabla 11 y la Figura 12.

Tabla 11: Resultados de la absorción de CO₂ de biogás a purificar respecto a la Velocidad de Flujo del biogás

Repeticiones	Parámetro	Porcentaje de la absorción de CO ₂ , respecto a la velocidad de flujo del biogás		
		50 ml/min	100 ml/min	200 ml/min
Repet 1		96,79 %	90,58%	84,20%
Repet 2		91,40%	92,98%	86,60%
Repet 3		94,99%	89,98%	86,00%
Promedio del % de CO₂ absorbido por el NaOH		94,39	91,18	85,60

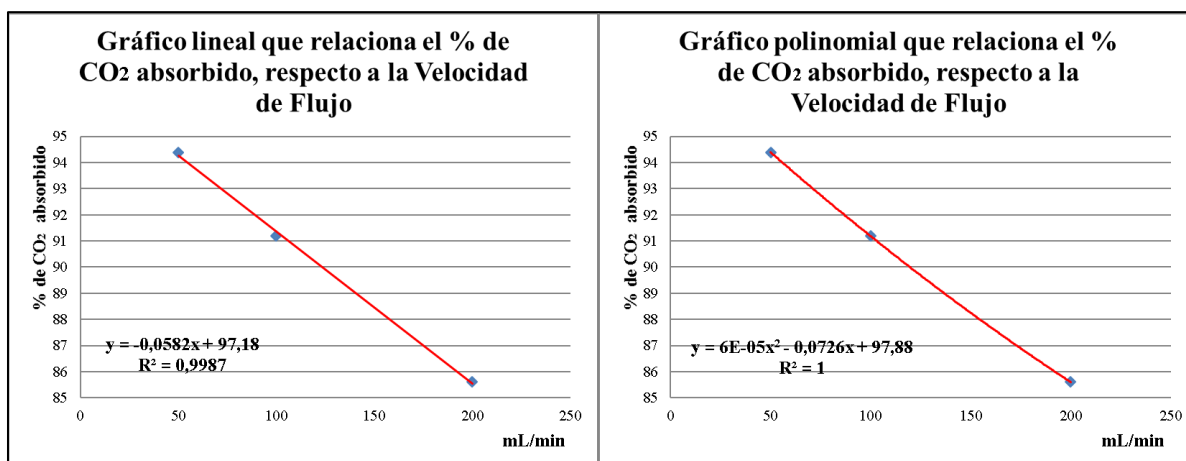


Figura 12: Comparación de Gráficos con Tendencia Lineal y Polinómica de la absorción de CO₂ del biogás, respecto a la velocidad de flujo.

En la Figura 12 se observa la relación que hay entre el porcentaje de dióxido de carbono absorbido del biogás, respecto a las diferentes velocidades de flujo del biogás. Como se puede ver las variables en estudio son inversamente proporcionales; pero hay diferencias si el tratamiento se hace de forma lineal o polinomial. La tendencia lineal no se ajusta muy bien a los datos obtenidos; aun cuando la aproximación es bastante buena, ya que

$R^2 = 0,9987$; en cambio la tendencia polinómica se ajusta muy bien a los valores obtenidos de la prueba, ya que $R^2 = 1$. A partir de esta gráfica se puede inferir que a 50 mL/min de velocidad de flujo se obtiene el mayor valor en el porcentaje de absorción de dióxido de carbono del biogás a purificar, puesto que a ésta velocidad de flujo la probabilidad de colisión molecular en el tiempo, entre el dióxido de carbono y el hidróxido de sodio es mayor, por lo tanto la cantidad de moléculas de CO_2 del biogás, que quedarán atrapadas en la solución, de NaOH será mayor. Asimismo, se ve que conforme se incrementa la velocidad de flujo del biogás, el porcentaje de dióxido de carbono absorbido disminuye, ya que la probabilidad de colisión molecular entre los reactantes, relacionados al volumen de biogás, respecto al tiempo de contacto, es menor.

Por otra parte, en la ecuación polinomial, $y = 6,00 \times 10^{-5} x^2 - 0,0726 x + 97,88$, tómesese en cuenta que x representa la velocidad de flujo del biogás en mL/min y si se aplica el concepto de límites, se le puede asignar el valor de cero a x , lo que se traducirá en ausencia de flujo, de donde tenemos que:

$$y = 6 \times 10^{-5} (0)^2 - 0,0726 (0) + 97,88$$

De aquí resulta que el porcentaje de CO_2 absorbido es: $y = 97,88$ % cuando $x = 0$, lo cual predice que, en el sistema dado, lo máximo que se puede absorber de CO_2 en estas condiciones es 97,88 % y no se puede llegar al 100% de absorción.

4.4 Parámetro cinético relacionado a la absorción de CO_2 del biogás a purificar respecto a la Presión Hidrostática:

Los resultados del experimento se muestran en la Tabla 12 y la Figura 13.

Tabla 12: Resultados de absorción de CO_2 del biogás a purificar respecto a la Presión Hidrostática del sistema

Repeticiones	Parámetro	Porcentaje de absorción de CO_2 , respecto a la Presión Hidrostática del sistema		
		7 cm de agua	14 cm de agua	28 cm de agua
Repet 1		88,43 %	90,15 %	96,27 %
Repet 2		86,71 %	90,72 %	92,26 %
Repet 3		86,14 %	92,44 %	93,97 %
Promedio del % de CO_2 absorbido por el NaOH		87,09	91,10	94,17

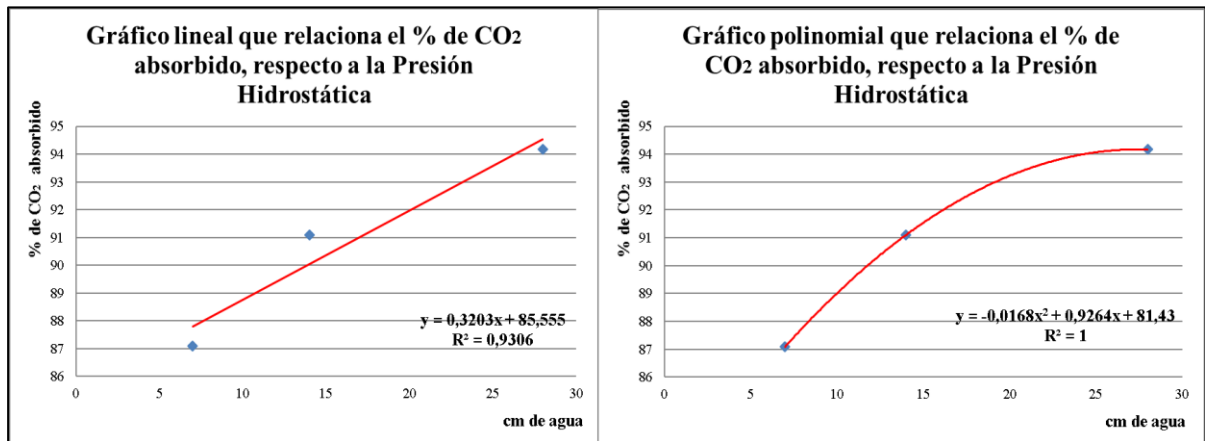


Figura 13: Comparación de Gráficos con Tendencia Lineal y Polinómica de la absorción de CO₂ del biogás, respecto a presión hidrostática.

En la Figura 13 se observa la relación que hay entre el porcentaje de dióxido de carbono absorbido del biogás, respecto a las diferentes alturas de la manguera en el sistema que a su vez implica la presión hidrostática en centímetros de agua. Como se puede ver las variables en estudio son directamente proporcionales, pero hay diferencias si el tratamiento se hace de forma lineal o polinomial. La tendencia lineal no se ajusta muy bien a los datos obtenidos; aun cuando la aproximación es bastante buena, ya que $R^2 = 0,9306$, sin embargo, la tendencia polinómica se ajusta perfectamente a los valores obtenidos, puesto que $R^2 = 1$. En la gráfica polinómica se puede observar que al colocar la salida de la manguera a 7 cm de profundidad en la botella que representa una presión hidrostática de 7 cm de agua, el porcentaje de absorción de dióxido de carbono es menor debido a que la probabilidad de colisión molecular, en el tiempo, entre el dióxido de carbono con el hidróxido de sodio es baja, ya que la distancia que recorre la burbuja de biogás al salir a la superficie es corta. Esta probabilidad de colisión se va incrementando progresivamente cuando la presión hidrostática es de 14 cm y 28 cm de agua; probablemente debido al tiempo de recorrido mayor de las burbujas de biogás hacia la superficie; sin embargo, esto parece tener un límite, ya que analizando la ecuación del gráfico de la línea de tendencia polinómica se tiene que, al hallar la primera derivada de la ecuación, $y = -0,0168 x^2 + 0,9264 x + 81,43$, se obtiene la ecuación de la pendiente de la función dada y cuando la pendiente se hace cero indica que ya no hay absorción de CO₂ en tales condiciones. Así pues, si la primera derivada se iguala a cero tenemos que:

$$f'(x) = 2(-0,0168 x) + 0,9264 = 0,$$

$$Y: x = 27,57 \text{ cm de H}_2\text{O}.$$

De este resultado se interpreta que a **27,57** cm de presión hidrostática en cm de H₂O se produce la mayor probabilidad de colisión molecular entre los reactantes a tales condiciones y, por otro lado, si se halla el valor del porcentaje de absorción de CO₂ que es el valor de “y” es **94,17** %. Esto nos indica que cuando la profundidad de la manguera supera los **27,57**cm, la absorción de CO₂ en el sistema probado no será mayor a **94,17** %.

Analizando con mayor detalle lo discutido anteriormente es posible teorizar que la influencia de la presión hidrostática no influye significativamente en la eficiencia de reacción entre el CO₂ del biogás y el NaOH en tales condiciones, ya que un análisis más profundo explicaría que la reacción es influenciada en mayor grado por el tiempo de recorrido de la burbuja hacia la superficie y no por la presión hidrostática. Para clarificar mejor el hecho considérese una burbuja de biogás en particular. Si esta burbuja está a 7 cm de profundidad tiene 7 cm que recorrer hacia la superficie, y al momento de iniciar su ascenso está “poco comprimida” y entonces la burbuja es relativamente grande, por lo que la probabilidad de colisión entre los reactantes está en función del área superficial de contacto entre los mismos; pero si la misma burbuja está a 28 cm de profundidad el recorrido hacia la superficie es 4 veces el de 7 cm visto anteriormente; pero la burbuja al salir de la manguera, es decir cuando inicia su ascenso, estará sometida a una presión hidrostática mucho mayor y por lo tanto una superficie de contacto menor que dará como resultado menor interacción entre los reactantes; que sin embargo mejora a medida que la burbuja sube a la superficie, ya que se “descomprime” al tener cada vez menor presión hidrostática.

Así pues, de lo analizado se podría creer que la influencia de la presión hidrostática en tales condiciones no es significativa o en su defecto es despreciable a partir de 27,57 cm de presión hidrostática de agua.

V. CONCLUSIONES

Del estudio realizado se puede concluir lo siguiente:

Al estudiar el comportamiento de las diferentes concentraciones de hidróxido de sodio (0,5 M, 1,0 M y 2,0 M) en la purificación de biogás, se pudo determinar que la tasa de captación de dióxido de carbono aumenta a medida que aumenta la concentración de hidróxido de sodio; es decir, siendo que a 2,0 M se produce la reacción más eficiente. Asimismo, al hacer el procesamiento matemático de la ecuación polinómica se obtuvo que a una concentración de 2,27 Molar de hidróxido de sodio se produce la mayor captación de CO₂ del biogás y que un incremento en la concentración de NaOH no se traducirá en más captación de CO₂.

En la purificación del biogás se examinaron tres velocidades de flujo, observando en las pruebas realizadas a menor velocidad de flujo se genera una mayor tasa de captación de dióxido de carbono en la solución base; sin embargo, del procesamiento matemático de la ecuación polinómica se observa que esta tendencia tiene un límite, puesto que cuando la velocidad de flujo tiende a cero la tasa de captación de CO₂ es de 97,88%. Es decir que la absorción total de CO₂ no es posible.

Se analizó el efecto de la presión hidrostática en la purificación de biogás colocando la manguera de salida del biogás a tres profundidades: 7 cm, 14 cm y 28 cm de profundidad, comprobando que a medida que aumenta la presión hidrostática, la tasa de captación del dióxido de carbono también aumenta; sin embargo, este tiene un límite hasta 27,57 cm en el sistema dado, que es lo que predice el procesamiento matemático de la ecuación polinómica inherente. Así pues, un incremento en la presión hidrostática que supera dicho valor no significa una mayor captación de CO₂ del biogás. Por otro lado, la presión hidrostática no parece ser significativa en el intento de captación del biogás, ya que el tiempo de recorrido de la burbuja de biogás hasta alcanzar la superficie de la solución alcalina parece ser un parámetro de mayor importancia que la presión hidrostática del sistema.

Se propuso un método alternativo por diferencia de volúmenes para cuantificar la cantidad de dióxido de carbono captado por el hidróxido de sodio, para lo cual, al iniciar el experimento en cada parámetro analizado se midió el volumen inicial de biogás a purificar

en el bidón 1 y al finalizar el experimento se restó con el volumen resultante de biogás purificado del bidón 2 y se comparó con los resultados estequiométricos y se comprobó que si hubo una estrecha correspondencia en los resultados.

Al finalizar las pruebas se titularon las muestras, la alícuota de hidróxido de sodio a titular, fue mezclada con solución de Cloruro de Bario (BaCl_2) 0,25 M, estabilizando a la reacción del dióxido de carbono (CO_2) con el Hidróxido de Sodio (NaOH), y así evitar resultados erróneos. Por ello es importante la adición de Cloruro de Bario, cuya función es la formación de carbonato de bario insoluble, que precipita, evitando que el dióxido de carbono escape.

VI. RECOMENDACIONES

Como una ampliación de los estudios realizados en el presente trabajo, se recomienda lo siguiente:

1. Ampliar los estudios de parámetros cinéticos (Molaridad, Velocidad de Flujo y Presión Hidrostática) en el equipo purificador de biogás, adicionando al sistema botellas consecutivas con solución de NaOH hasta obtener una captación casi completa del CO₂ del biogás a purificar.
2. Reutilizar los productos obtenidos a partir de la purificación del biogás: el bicarbonato de sodio y el carbonato de sodio (HNaCO₃ y Na₂CO₃), como fuente de carbono para el crecimiento de biomasa de algunos microorganismos autótrofos apropiados.

VII. BIBLIOGRAFÍA

- Adame Romero, A. (2010). Contaminación Ambiental y Calentamiento Global. Editorial Trillas. México. pp 58, 91-93.
- Camps Michelena, M.; & Marcos Martín, F. (2008). Los biocombustibles, Energías Renovables. Editorial Mundi-Prensa. Segunda edición. España. pp18.
- Cárdenas S., F.A.; & Gélvez S., C.A. (2004). Química y Ambiente 1. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana, S.A. Segunda edición. Colombia. pp 188-192.
- Chang, R. (2007). Química. Editorial Mc Graw-Hill Interamericana. Novena edición. México. pp 123.
- Dreifuss, S. W. (1983). Consideraciones básicas y prácticas para la conversión de Biomasa en carburantes e insumos químicos. Editorial Politecnia. Santo Domingo. pp 360-361.
- Fernández Salgado, J.M. (2010). Guía completa de la biomasa y los biocombustibles Editorial A. Madrid Vicente (AMV EDICIONES). Primera edición. España. pp 4,164-165.
- Good New Energy. (2019). Recuperado de <https://goodnewenergy.enagas.es/sostenibles/biometano/>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC). (2007). Recuperado de http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf
- Izquierdo, J.F.; Cunill, F.; Tejero, J.; Ibora, M.; & Fité, C. (2004). Cinética de las Reacciones Químicas. Ediciones de la Universidad de Barcelona. Graficas Rey S.L. España. pp 8,113.
- King, E.L. (1969). Como Ocurren las Reacciones Químicas, Una introducción a la Cinética Química y los Mecanismos de Reacción. Editorial Reverté S.A. España. pp 12.

- Ludevid Anglada, M. (1997). El Cambio Global en el Medio Ambiente, Introducción a sus causas humanas. Editorial Alfaomega Marcombo. México. pp 41.
- Llaneza, M. A.; González, L.; & González, E. (2010). Estudio de Viabilidad de Sistemas de Purificación y Aprovechamiento de Biogás. Recuperado de [http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/7559B244B63EB155C125753F0058E255/\\$FILE/Cap1.pdf](http://213.229.136.11/bases/ainia_probiogas.nsf/0/7559B244B63EB155C125753F0058E255/$FILE/Cap1.pdf)
- Manahan, S.E. (2007). Introducción a la Química Ambiental. Editorial Reverté. México. pp 389.
- Maron, S.H.; & Prutton; C.F. (2010). Fundamentos de Físico Química. Editorial Limusa. México. pp 304.
- Ministerio de Energia y Minas (MEM). (2012). Balance Nacional de Energía. Recuperado de http://www.minem.gob.pe/_publicaSector.php?idSector=12
- Montes, J.; & Arevalo, S. (2001). Determinación del Calor de Respiración de Frutas por el Método de Titulación. Recuperado de <http://www.unapiquitos.edu.pe/pregrado/facultades/alimentarias/descargas/vol2/3.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentacion y la Agricultura (FAO). (2012). Recuperado de <http://www.rlc.fao.org/es/prensa/noticias/el-biogas-atractiva-fuente-de-energia-renovable-para-el-desarrollo-de-los-pequenos-productores-agropecuarios-en-america-latina-y-el-caribe/>
- Sánchez, F.J.G., Barrero, F.V., & Antolín, R.A. (2016). Producción de biometano a partir de biogás de vertedero. Recuperado de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/objetos/tutorial304.pdf>.
- Spiro, T.G.; & Stigliani, W.M. (2004). Química Medioambiental. Editorial PEARSON EDUCACION S.A. Segunda edición. España. pp 29-39.
- Verástegui Lazo, J.; & Mateo Bruno, M. (1980). Biogás. Alternativa Energética para zonas rurales en el Perú. Revista Avance Técnico. División de Energía del ITINCEC, Dirección de Tecnología. Perú. pp 24-29.
- Zumdahl, S.S.; & Decoste, D.J. (2012). Principios de Química. Editorial CENGAGE Learning. Séptima edición. México. pp 147.

VIII. ANEXOS

A continuación, se presenta el Anexo 1 donde se adjunta el artículo científico “*Determinación del calor de respiración de frutas por el método de titulación*”, el cual se usó como referencia en la presente Tesis y el Anexo 2 en el cual se muestran todos los resultados obtenidos para el presente estudio:

Anexo 1: Determinación del calor de respiración de frutas por el método de titulación.

Revista Amazónica de Investigación
Alimentaria, v.2, n° 1, p. 27- 37 (2001)

Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias
UNAP, Iquitos-Perú
ISSN:

DETERMINACIÓN DEL CALOR DE RESPIRACIÓN DE FRUTAS POR EL MÉTODO DE TITULACIÓN

Juana Montes; Segundo Arévalo

Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la UNAP, Iquitos, Perú
jemonda@hotmail.com

ABSTRACT

The respiration heating of fruits, specially in apples, was the principal objective of the present work by starting with a titration method. An alkaline solution of titration is used by this method where air exempt of CO₂ is circulating through a drier to hold the fruit to be studied at a determined temperature. Then, it is bubbled by an alkaline solution where the absorption of the present CO₂ happens. A decreasing about the equivalence number (EN) of the solution occurs in the reaction of CO₂ with the alkaline solution and this variation is equal to the equivalent number of CO₂ that had such reaction. This equality permits to quantify the CO₂ absorbed into a determined period of time.

A system was necessary to build in order to get the mentioned objective. And such system consisted in setting the product in a drier which at the same time was installed into a small respiratory chamber where air circulates at a established temperature activated by a thermostat. A vacuum pump was used to renovate continually the existent air at the interior of the drier. The humidifying air is conducted through the drier and later bubbled in the pipes that are connected in series, containing the alkaline solution.

A leak air test in the critic points of the equipment was done to measure about its veridical results as well as its grade of confidence. The test consists in simulating a defined quantity of CO₂ into the drier and in verifying its recovery through the equivalent number of the basic solution between two titration—the recovered CO₂ was about 91,2%.

The heating respiratory values of the apples at room temperature were determined with the system while it was working properly, and the results of the first test were: 2483,8 kcal/(tn).(24h) to 26,55°C, the second: 2586,0 kcal/(tn). (24h) to 26,68°C and in the last test the value was: 2862,9kcal/(tn). (24h) to 26,73°C.

The results indicate that as soon as the temperature augments, the heating respiratory value of the studied fruit also increases while the fruit is between the ripe time and senescence moment; therefore a temperature reduction implies less fruit respiration, and that augments in such a way its storage time(useful life).

Key Words: Respiration heat; CO₂; NaOH; Equivalent Number; Fruits; Apple.

RESUMEN

El presente trabajo tuvo por objetivo determinar el calor de respiración de frutas (manzanas) empleando el método de titulación. Este método emplea la titulación de solución alcalina, donde el aire exento de CO₂ es circulado a través del desecador conteniendo la fruta a ser estudiada a una determinada temperatura. Enseguida es burbujeado a una solución alcalina donde ocurre la absorción de CO₂ presente. En la reacción del CO₂ con la solución alcalina, ocurre un decrecimiento del número equivalente (NE) de la solución, esta variación es igual al número equivalente al CO₂ que reaccionó. La igualdad permite cuantificar el CO₂ absorbido en un determinado período de tiempo.

Para conseguir el objetivo en mención se construyó un sistema, donde el producto es colocado en un desecador y éste a su vez es instalado en el interior de una pequeña cámara de respiración, donde el aire circula a una temperatura establecida por la acción de un termostato. Para renovar continuamente el aire existente en el interior del desecador se utilizó una bomba de vacío. El aire humidificado es conducido a través del desecador y posteriormente burbujeado en los tubos conectados en serie conteniendo la solución alcalina.

Para medir el grado de confiabilidad del equipo y la veracidad de los resultados, se realizó una prueba de fuga de aire en los puntos críticos del equipo. Esta prueba consiste en simular una cantidad definida de CO₂ interno en el desecador y verificar su recuperación a través de la variación del número equivalente de la solución básica entre dos titulaciones. El CO₂ recuperado fue del 91.2%.

Con el sistema en funcionamiento fueron determinados los valores del calor de respiración de manzanas a temperatura ambiente, teniendo como resultado del primer ensayo 2483.8 kcal/tn.24h a 26.55°C; del segundo 2586.0 kcal/tn.24h a 26.68°C y del último ensayo se tuvo un valor de 2852.9 kcal/tn.24h a 26.73°C.

Los resultados indican que conforme aumenta la temperatura, aumenta también el valor del calor de respiración de la fruta estudiada, estando la fruta entre la madurez y la senescencia, por tanto, una reducción de la temperatura implica una disminución de la respiración de la fruta aumentando así su tiempo de almacenamiento (vida útil).

Palabras Claves: Calor de respiración; CO₂; NaOH; Número Equivalente; Frutas; Manzana.

1. INTRODUCCIÓN

La tasa de respiración es un excelente indicador de la actividad metabólica del tejido y por tanto, es muy útil la precisión del potencial de almacenamiento del producto. La fórmula general para la respiración es $(CH_2O)_n + nO_2 \rightarrow nCO_2 + nH_2O + \text{energía}$.

Según Neves Filho (1991), en el proceso de la respiración ocurre una pérdida de sustrato que en frutas y hortalizas cogidas, no son repuestos, dando inicio el proceso de deterioro del producto. La respiración que

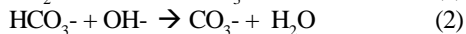
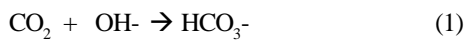
ocurre en presencia de oxígeno es un excelente indicador de la actividad metabólica del tejido, por tanto puede ser usada como guía de la vida útil del producto. La respiración es un proceso complejo, afectado por un gran número de factores. En el caso de frutos tropicales los factores ambientales son los más importantes, desde el punto de vista de su tecnología post-cosecha.

En la actualidad la existencia de estudios sobre equipos que determinen el calor de

respiración de frutas y hortalizas tropicales, en nuestra zona, es muy escasa existiendo solamente una adaptación de un respirómetro en el laboratorio de Fisiología Vegetal - UNAP (Rovalo y Rojas, 1993). La mayor parte de los métodos empleados para medir la intensidad de la respiración requieren determinaciones cuantitativas del CO₂ producido o del oxígeno consumido (Devlin, 1982).

Para las determinaciones cuantitativas de la tasa de respiración existen métodos de medida tipo sistema abierto y los métodos de medida tipo sistema cerrado. En los métodos de medida de tasas de respiración tipo sistema abierto, en los cuales el aire exento de CO₂ pasa a través de una cámara de respiración donde se encuentra el producto, la posibilidad de error aumenta.

Los métodos de medida de tasas de respiración tipo sistemas cerrados, en el cual el CO₂ producido es absorbido por una solución y el O₂ es circulado por todo el sistema, tienen la ventaja de dar la medida de O₂ consumido paralelo a la producción de CO₂. Uno de los métodos de medida tipo sistema cerrado, es el método por titulación. Este método emplea la titulación de solución alcalina, donde el aire exento de CO₂ es circulado a través del desecador conteniendo el vegetal a ser estudiado a una determinada temperatura. Enseguida es burbujeado en una solución alcalina donde ocurre absorción de CO₂ presente, que es convertido a ión carbónico conforme las reacciones:



Un pH elevado de la solución alcalina garantiza que todo el CO₂ sea capturado conforme la reacción anterior, pues un alto pH indica alta concentración de iones OH⁻ haciendo que la reacción se desplace hacia la derecha. En la reacción de CO₂ con la solución alcalina ocurre un decrecimiento del número equivalente de la solución, siendo esta variación igual al número de equivalente de CO₂ que

reaccionó. La igualdad permite cuantificar el CO₂ absorbido en un determinado periodo de tiempo.

La temperatura está íntimamente relacionada con la intensidad respiratoria después de la cosecha. La temperatura puede interferir directamente en la velocidad de reacción de los procesos metabólicos, en el tiempo de almacenamiento, causando disturbios fisiológicos (daños por el frío) en estos productos (Monteiro Sigríst, 1988). Cuanto más elevada sea la temperatura, más intensa es la respiración. Asimismo la crisis climática es muy acentuada y coincide con la maduración gustativa (Herrero y Guardia, 1992).

Como la respiración es una combinación de muchas reacciones químicas, se puede esperar una relación matemática existente entre la tasa de respiración del producto a dos diferentes temperaturas. Tal relación puede ser expresada de la siguiente forma:

$$\log K_1 = \log K_0 + a\Delta T \quad (3)$$

donde K₁ y K₀ son las intensidades respiratorias a las temperatura T₁ y T₀ respectivamente, "a" es una constante igual a 0.0376 y ΔT es la diferencia de temperatura (T₁ - T₀). Si se expresa la relación entre las dos Intensidades Respiratorias a diferentes temperaturas, de forma que ΔT sea igual a 10, se obtiene:

$$\quad (4)$$

Al incrementar la temperatura en 10 °C, se incrementa la intensidad respiratoria en 2.38 veces. En general Q₁₀ (cociente de temperatura) varía entre 2 - 2.25 (Herrero y Guardia, 1992).

Con base, en la preocupación existente, el principal objetivo del presente trabajo de investigación fue determinar el calor de respiración de frutas utilizando un método de titulación. A través de su utilización y el mis-

mo conocimiento de parámetros de la materia prima a estudiar, existe la posibilidad de determinar su tiempo de almacenamiento y por consiguiente la conservación de las diversas frutas en estado natural.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Materia prima

Para el desarrollo del presente estudio, se utilizó como materia prima manzanas (*Malus comunis*) de la variedad "delicious", procedente de los cultivos de la costa peruana, y adquiridos en las fruterías de la ciudad de Iquitos.

La manzana fue de coloración jaspeada rojiza con tonos amarillentos, de textura firme. Fue estudiada debido a que este fruto es uno de los más consumidos en la región amazónica peruana. Antes de la realización del estudio las manzanas procedentes de la costa peruana fueron almacenadas en conservadores a 5°C de temperatura. Otra de las razones por la que se tomó este fruto, fue que en estudios o investigaciones realizadas del calor de respiración, utilizan manzanas que a una temperatura de 20°C tiene valores entre 1209 - 2520 kcal/tn/ 24h (Neves Filho, 1983).

La temperatura interna de la cámara de respiración fue controlada por un termómetro de escala 0°C - 50°C, el cual fue instalado dentro de la cámara lo que permitió la lectura de las temperaturas por el visor de vidrio instalado en la puerta de la cámara. Su sensibilidad y precisión es menor que la del termostato y más seguro en caso de algún daño causado por el corte de energía eléctrica.

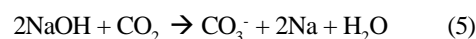
2.2 Reactivos

Para la determinación del calor de respiración se usaron los siguientes hidróxido de sodio, ácido clorhídrico, cloruro de bario, carbonato de sodio, carbonato de calcio, biftalato de potasio, agua destilada y los

indicadores: fenolftaleína y anaranjado de metilo.

2.3 Método

El método usado para la determinación de calor de respiración en el presente trabajo, se basa en la capacidad de reacción de soluciones básicas (NaOH) con dióxido de carbono, haciendo la reacción de esta solución en forma de ión carbonato (CO₃⁻). La reacción global es:



Para esto, el aire conteniendo CO₂ es burbujeadado en un recipiente conteniendo un volumen conocido de solución de hidróxido de sodio 1N. A través de titulaciones de esta solución con HCl 0.1N valorado, se puede saber el número equivalente de solución de hidróxido de sodio, usando como indicador la fenolftaleína (Kolthof *et al.*, 1969).

Una alícuota de solución alcalina colectada para la titulación con HCL valorado contiene iones carbónicos. Puesto que la reacción del CO₂ con NaOH es reversible, puede haber desprendimiento de gas que llevará a resultados irreales posteriores. Por ello, después de retirada una alícuota para la titulación, debe ser inmediatamente añadido el cloruro de bario, cuya función es la formación de carbonato de bario, que precipita evitando la salida del CO₂:



Es usado un exceso de sal para que la reacción (6) siga en el sentido de precipitar todo ión carbonatado (CO₃) en forma de BaCO₃. La adición de 15 mL de BaCl₂ en cada alícuota de 2 mL de NaOH garantiza este exceso.

2.4 Procedimiento experimental

Basado en Montes (1998), la Figura 1 diagrama la unidad experimental de la Figura 2, y

muestra el recorrido del aire por todo el sistema. La entrada de aire es por el filtro, para después entrar al primer tubo que contiene

solución alcalina, la cual va a absorber el CO_2 del aire y permitir de esta manera la entrada de aire exento de CO_2 al desecador.

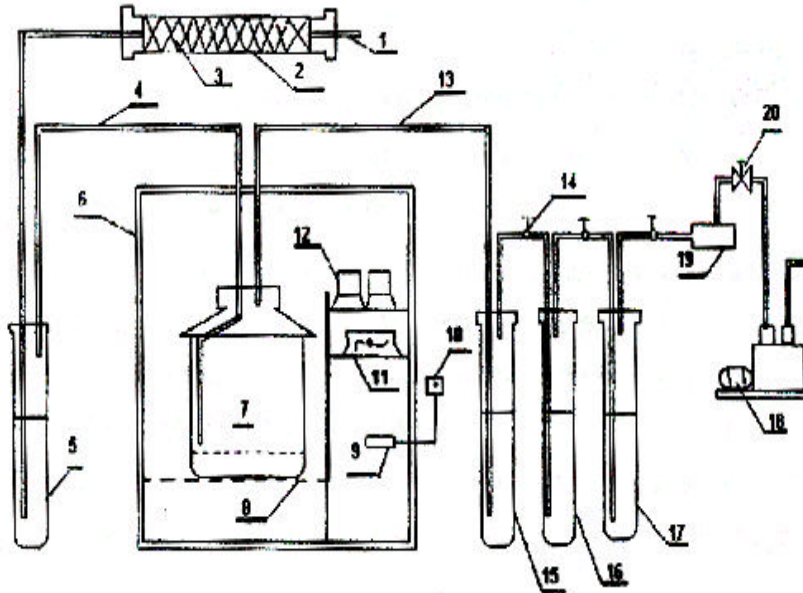


Figura 1: Diagrama del equipo para la determinación del calor de respiración de frutas y hortalizas.

1. Entrada de aire
2. Tubo de vidrio
3. Lana de vidrio embebida con NaOH
4. Manguera para acceso de aire al desecador
5. Tubo de vidrio pirex, conteniendo NaOH 1N
6. Caja de madera con aislamiento de poliuretano expandido
7. Desecador, conteniendo el vegetal a ser estudiado
8. Soporte de madera
9. Bulbo del termostato
10. Termostato
11. Micro ventilador
12. Lámparas para calentamiento
13. Manguera para acceso de aire que sale del desecador al tubo de vidrio
14. Placas de Hoffman para control de salida del aire
15. Tubo de vidrio conteniendo solución deshumidificante de aire - HCL
16. Tubo de vidrio conteniendo solución NaOH 1N, para absorber CO_2
18. Bomba de vacío para permitir que el aire circule por todo el sistema
19. Recipiente de seguridad para cuantificar la solución
20. Válvula de control manual de flujo de aire.

El aire aspirado del desecador conteniendo CO_2 y alta humedad, que son productos de la respiración del vegetal, es burbujeado en serie en las siguientes soluciones:

a) Solución de ácido clorhídrico 1N, cuya función es retirar la humedad sin absorber el CO_2 presente, pues debido al medio ácido no dispone de hidróxido ($-\text{OH}$) para reaccionar con el CO_2 , el volumen a usar es 150 mL.

b) Solución de hidróxido de sodio 1N; cuya función es absorber todo el CO_2 pre-

sente en el aire, el volumen usado es 150 mL.

c) Solución de hidróxido de sodio 1N; utilizada con la finalidad de absorber, en caso haya residuos de CO_2 del aire, el volumen usado es de 150 mL.

Para retirar una alícuota de 2 mL de las soluciones que absorben el CO_2 del aire aspirado del desecador, y en los cuales el gas será cuantificado, se sigue el procedimiento:

a) El cerrado de las válvulas (pinzas de Hoffman), que permiten la llegada y salida del aire en el tubo.

b) Se desconecta la bomba aspiradora interrumpiendo el flujo de aire.

c) Se retira con cuidado la cinta del cerrado entre la embocadura del tubo y el tapón, lo que permite la retirada del tapón que también debe ser realizada con cuidado para no quebrar los tubos.

d) Se colecta una alícuota con pipeta volumétrica de 2 mL

El procedimiento para retomar el funcionamiento debe realizarse obedeciendo el orden inverso de lo mencionado líneas arriba (a, b, c, y d). La regulación del flujo de aire debe ser realizada como se indicó anteriormente.



Figura 2: Equipo para la determinación del calor de respiración de frutas y hortalizas (Montes, 1998)

Fue necesario determinar posibles fugas de aire en el equipo experimental, lo que permitió tener seguridad en la obtención de los datos, para la posterior determinación del calor de respiración del vegetal. Durante el funcionamiento del sistema, el CO_2 liberado por la respiración del vegetal debe ser recuperado a través de la bomba de aspiración y conducido por tubos hasta una solución básica absorbente. Esta prueba consiste en simular una cantidad definida de CO_2 interna en el desecador y verificar su recuperación a través de la diferencia de NE (número equivalente) de la solución básica entre dos

titulaciones. Con esta finalidad, fue colocado dentro del desecador un vaso de precipitado conteniendo 0.4082g de CaCO_3 , cerrando luego cuidadosamente el sistema en puntos posibles de fuga. Se detalla a continuación estos puntos posibles de fuga:

a) Las conexiones de los tubos con el tapón, hechas con silicona y cinta adhesiva.

b) La conexión entre la embocadura del desecador y los tubos, en el cual fue colocada la silicona.

c) En la tapa del desecador donde fue colocada vaselina.

Los ensayos, para la determinación del

calor de respiración fueron realizados en triplicado en un solo sistema, que estuvo funcionando a una temperatura promedio de 26.65 °C. Para el primer ensayo se colocaron 3 manzanas con un peso global de 274.5 g en el desecador, realizándose tres determinaciones del calor de respiración y el resultado final fue la media del mismo, la temperatura promedio durante el tiempo que estuvo funcionando para este ensayo fue de 26.55°C. Para el segundo ensayo se colocaron en el desecador 3 manzanas con un peso de 271g, efectuándose cuatro determinaciones del calor de respiración y el resultado también fue la media de los mismos, con una temperatura promedio de 26.68°C. Para el último ensayo se colocó dentro del desecador 3 manzanas con peso global de 260.5 g, realizando en este ensayo 5 determinaciones y el resultado final fue expresado por la media aritmética de las lecturas tomadas, y con un promedio de temperatura de 26.73°C.

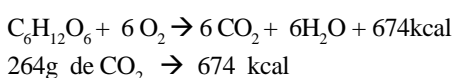
2.5 Metodología de cálculo del calor de respiración

Primero es preciso calcular la masa de CO₂ absorbida por la solución alcalina que se detalla en el ítem 3.1. El resultado obtenido

se divide por el tiempo y por la masa de la fruta presente en el desecador, obteniéndose la masa de CO₂ por hora de proceso y por kilogramo de fruta (mg/h.kg) :

$$\text{Producción de calor} = \text{mg CO}_2/\text{h.kg}; \text{ y}$$

Según Neves Filho (1983) el proceso de respiración es:



Esto es, por cada 264g de dióxido de carbono absorbido se produce 674 kcal. Detalles de los cálculos se observan en Montes (1998).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Determinación de fuga en la unidad experimental

La masa total de CO₂ absorbida es la suma de la masa calculada para cada uno de los tubos 3 y 4 de la Figura 1; por tanto, tal como se observa en la Tabla 1, la masa total de CO₂ es igual a 0.1632g.

Tabla 1: Determinación de fuga de aire dentro de la cámara de respiración

Colectores	NE inicial (x10 ⁻³)	NE final (x10 ⁻³)	ΔNE (x10 ⁻³) (g)	Masa de CO ₂
Tubo3	160.33	157.300	3.030	0.0667
Tubo4	204.40	200.015	4.385	0.0965
Total			0.1632	

Considerando que la cantidad de CaCO₃ colocada dentro del desecador fue de 0.408 g, el porcentaje de recuperación fue de:

$$\frac{\text{Masa recuperada}}{\text{Masa liberada}} \times 100 = \frac{(0.1632)(100)}{0.179} = 91.17 \%$$

El CO₂ que se espera recolectar, considerando que en el vaso se tiene 0.408g de CaCO₃, es 100.09g, equivalente a 44g de CO₂, luego por regla de tres se tiene que 0.408g de CaCO₃ equivale a 0.179g de CO₂ (Montes, 1998). Este resultado puede llevar a concluir que todo el CO₂ presente en el desecador será capturado por la solución básica, sin embargo la recuperación puede no haber sido total en esta prueba debido a:

a) La reacción del CaCO₃ con HCl no ha sido total. En este caso mínimas cantidades de CaCO₃ que no reaccionan llevan a variaciones sensibles en el resultado.

b) El tiempo de captura del CO₂ liberado no fue suficiente, asimismo una pequeña cantidad de CO₂ puede haber quedado retenido en el desecador o en el tubo flexible que da acceso a la solución absorbente.

Basado en los resultados de captura casi total de CO₂ en el equipo, éste puede ser considerado adecuado para operaciones que envuelven captura de CO₂ interno en el desecador por la solución básica, donde el acceso es realizado por tubos y conexiones; sin embargo se debe reconocer los puntos críticos de fuga y trabajar con mucho cuidado para que ello no ocurra.

3.2 Determinación del calor de respiración para la manzana

En cada caso el resultado expresado es la media de 3 controles de temperaturas tomadas al inicio, intermedio y final de las titulaciones entre las determinaciones.

Al igual que todas las reacciones químicas, las reacciones bioquímicas de la respiración son sensibles a los cambios de temperatura. Puesto que las reacciones de respiración están reguladas por enzimas, los límites de temperatura dentro de los cuales pueden tener lugar son muy estrechos. A temperaturas próximas a 0°C, la intensidad de la respiración va aumentando hasta que se alcanzan temperaturas destructoras de la actividad de las enzimas, esto se comprobó con el equipo a temperatura ambiente (27°C), el calor de respiración del vegetal estaba aumentando a medida que la temperatura ascendía, además que el fruto estaba entre la madurez y la senescencia. Asimismo hay que tener en cuenta el factor tiempo cuando se estudia el efecto de la temperatura sobre la respiración.

En general, cuanto más elevada es la temperatura, más corto es el período de tiempo

Tabla 2: Calor de respiración de 274.5g de manzanas a 26.55°C

Determinaciones	mgCO ₂	Horas	mgCO ₂ /(h) (k)g	cal/(h)(k)g
A	265.43	30.20	32.02	81.74
B	217.25	18.22	43.44	110.90
C	292.05	23.05	46.16	117.85
Media				103.49

Se observa una media de 103.49 cal/h.kg que representa 2472 kcal/día.tn, dentro del rango de los 1209 a 2520 kcal/día.tn reportado por Neves Filho (1983) para las manzanas tipo precoz. La pérdida de peso del produc-

to durante el periodo en que estuvo siendo estudiado fue de 0.546%.

En la Tabla 3 se observa los resultados del segundo ensayo con 271g de manzanas a 26.68°C.

necesario para que la intensidad de la respiración se anule; por consiguiente menor tiempo de duración en almacenaje y conservación del vegetal.

Los resultados obtenidos en los tres ensayos se muestran en las Tablas 2, 3 y 4, correspondiente a los ensayos 1, 2 y 3, respectivamente.

Tabla 3: Calor de respiración de 271g de manzanas a 26.68°C

Determinaciones	mgCO ₂	Horas	mgCO ₂ /(h) (kg)	cal/(h)(kg)
B	159.92	22.45	26.29	67.12
C	338.80	27.20	45.96	117.34
D	316.00	21.45	54.36	138.78
Media				107.75

Se observa una media de 107.75 cal/h.kg que representa 2586 kcal/día.tn, fuera del rango de los 1209 a 2520 kcal/día.tn reportado por Neves Filho (1983) para las manzanas tipo precoz, pero en un porcentaje sumamente pequeño. La pérdida de peso del producto durante el periodo en que estuvo siendo estudiado fue de 0.369%.

En este ensayo fueron observadas gotas de agua en la pared interna del desecador lo que revela alta humedad relativa interna.

En la Tabla 4 se observa los resultados del tercer ensayo con 260.5g de manzanas a 26.73°C.

Tabla 4: Calor de respiración de 260.5g de manzanas a 26.73°C

Determinaciones	mgCO ₂	Horas	mgCO ₂ /(h)(kg)	cal/(h)(kg)
A	241.71	23.30	39.82	101.66
B	286.11	22.40	49.03	125.17
C	307.89	23.25	50.84	129.79
E	857.56	16.25	202.58	517.19
Media				118.87

Se observa una media de 118.87 cal/h.kg que representa 2853 kcal/día.tn, fuera del rango de los 1209 a 2520 kcal/día.tn reportado por Neves Filho (1983) para las manzanas tipo precoz. La pérdida de peso del producto durante el periodo en que estuvo siendo estudiado fue de 0.883%.

Nuevamente la alta humedad interna al desecador es responsable de la pérdida de peso del vegetal. Esta pérdida de peso por evaporación de agua, aunque es mayor que en el segundo ensayo, es pequeña, pues según Meléndez (1990) es aceptable hasta

un 3% de pérdida de peso como consecuencia de la humedad relativa. Además se nota una coloración uniforme del fruto, indicando que no hay alteraciones significativas.

Probablemente el incremento también esté presente el efecto de la acumulación de CO₂ interno en el desecador, lo que sugiere que después de tres o más determinaciones es necesario realizar una limpieza del sistema. Al comparar los resultados con los reportados por Neves Filho (1983), es razonable afirmar que los mismos son comparables entre sí.

4. CONCLUSIONES

El aumento de la temperatura de almacenamiento provoca un aumento en la tasa de respiración de la manzana. Según la literatura, para cada aumento de 5°C entre 0°C y 5°C, ocasiona un crecimiento de aproximadamente 1.6 veces el valor del calor de respiración. Este crecimiento observado es consecuencia del aumento de la actividad metabólica de la fruta, llevando asimismo a un aumento de la velocidad de maduración, por consiguiente disminución en el periodo de almacenaje y comercialización del producto. Este factor es bien notado a través de un análisis de los datos colectados en la determinación del calor de respiración del primer ensayo, para la manzana a 26.55 °C. Se aprecia un incremento de los valores en consecuencia de la evolución del proceso de maduración por influencia de una alta temperatura.

La manzana fue mantenida en ambiente con alta humedad, lo que permitió que la textura se mantuviese firme y la disminución del peso por la pérdida de agua por el producto se mantuviese a niveles insignificantes. Las condiciones de estudio permitieron que el producto se mantuviese visualmente atractivo, con textura firme tanto interna como externamente. Por lo tanto un factor extremadamente importante es que la atmósfera que envuelve al producto, durante el almacenamiento, tenga una alta humedad relativa. En un sistema frigorífico donde se tiene aire circulando por el evaporador, ocurre una condensación y consecuentemente disminución de la humedad relativa de la atmósfera de almacenamiento.

Debido a la diferencia de humedad entre el aire y la superficie del vegetal ocurre transferencia del agua del segundo para el primero. La consecuencia es la pérdida de textura, peso y calidad visual del producto, factores que ocasionan su rechazo por el consumidor. Asimismo la reposición del agua condensada y la manutención de la atmósfera

con alta humedad relativa propician diferencias pequeñas de humedad entre el aire y la superficie del vegetal, lo que impide la transferencia de agua.

En las manzanas el calor de respiración corresponde del 34% de la carga térmica al ser retirada la temperatura de almacenamiento a 0°C. Asimismo el levantamiento de la carga térmica durante el almacenaje de la fruta a 0°C fue calculado usando el calor de respiración a temperatura de 5°C. El porcentaje del calor de respiración pasa a 45 % acarreado mayor inversión con equipamiento de mayor potencia, aumentando el consumo de energía y la operación del sistema frigorífico con capacidad ociosa.

No se observaron fugas de CO₂ liberado por el vegetal dentro del desecador. El mismo es totalmente absorbido por la solución alcalina. Suponiendo que ocurre el mismo porcentaje de captura de CO₂ liberado durante la determinación del calor de respiración de frutas, se puede acrecentar al valor final un porcentaje en torno al 9%, lo que permite un margen de seguridad en los cálculos de dimensionamiento de carga térmica durante el almacenaje de vegetales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Calzada Benza, J. Algunos frutales nativos de la selva amazónica de interés para la industria. IICA, Publicaciones Misceláneas, Lima (1985)
- Devlin R.M. Fisiología vegetal. 4ta. Edición, Ediciones Omega S.A., Barcelona (1982)
- Herrero A.; Guardia J. Conservación de frutos. Manual Técnico, Editorial Mundi – Prensa, Madrid (1992)
- Kolthoff I.M.; Sandell E.B.; Meehan E.V. Quantitative chemical analyses. Mac Millan Limited, London (1969)
- Meléndez F. Fisiología y manipulación de frutas y hortalizas. Editorial. Mundi – Prensa, Madrid (1990)
- Monteiro Sigríst J.M. et al. Tecnología de post-colheita de frutas tropicais.

- Instituto de Tecnología de Alimentos, Campinas, SP, Brasil (1988)
- Montes D.J.E. Determinación del calor de respiración de frutas por el método de titulación. Trabajo de Fin de Carrera, Facultad de Ingeniería en Industrias Alimentarias, Universidad Nacional de la Amazonía Peruana (UNAP), Iquitos, Perú (1998)
- Neves Filho L.C. Armazenamento de géneros e produtos alimentícios. Governo do Estado de São Paulo, Coordenadoria de Indústria e Comercio, São Paulo, Brasil (1983)
- Neves Filho L.C. Resfriamento, congelamento e estocagem de alimentos. Ibf-Abrava – Sindratar, São Paulo, Brasil (1991)
- Rovalo M.M.; Rojas G. M. Fisiología vegetal experimental: Prácticas de laboratorio. Editorial Limusa S. A., México D.F. (1993)

Anexo 2: Resultados de los parámetros cinéticos medidos en la purificación del biogás (molaridad, velocidad de flujo y presión hidrostática).

Resultados de la concentración de hidróxido de sodio 0,5 M

Parámetros Medidos/Características	0,5 M			
	Rep. 1	Rep.2	Rep. 3	Prom
Velocidad de Flujo ml/min	100,0000	100,0000	100,0000	--
Altura de manguera	28,0000	28,0000	28,0000	--
Normalidad del NaOH	0,5171	0,5171	0,5171	--
Tipo de ácido utilizado	HCl	HCl	HCl	--
Normalidad del ácido Clorhídrico (HCl)	0,0970	0,0970	0,0970	--
Alícuota de NaOH utilizado	5,0000	5,0000	5,0000	--
Gasto de los mL de HCl en la titulación de las repeticiones	2,1000	2,0500	1,9500	2,0300
Moles de CO ₂ absorbido equivalente a gr. de NaOH consumidos	0,2863	0,2884	0,2926	0,2821
Volumen de CO ₂ en L absorbido del biogás a purificar, relacionado al NaOH consumido	7,1744	7,2263	7,3331	7,2446
Volumen de biogás llenado al bidón 1	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Volumen de biogás recibido en el bidón 2	12,1000	11,9000	11,9000	12,0000
Diferencia de volumen 1 y 2 es el CO ₂ absorbido por el NaOH	6,9000	7,1000	7,1000	7,0000
Moles de CO ₂ relacionado al volumen de los bidones 1 y 2	0,2753	0,2833	0,2833	0,2806
% de CO ₂ en el biogás de la cámara	52,5100	52,5100	52,5100	52,5100
% de CO ₂ absorbido relacionado al NaOH consumido	71,9200	72,4500	73,5100	72,6300

Resultados de la concentración de hidróxido de sodio 1,0 M

Parámetros Medidos/Características	1,0 M			
	Rep, 1	Rep,2	Rep, 3	Prom
Velocidad de Flujo ml/min	100,0000	100,0000	100,0000	--
Altura de manguera	28,0000	28,0000	28,0000	--
Normalidad del NaOH	0,9958	0,9958	0,9958	--
Tipo de ácido utilizado	HCl	HCl	HCl	--
Normalidad del ácido Clorhídrico (HCl)	0,0970	0,0970	0,0970	--
Alícuota de NaOH utilizado	5,0000	5,0000	5,0000	--
Gasto de los mL de HCl en la titulación de las repeticiones	9,7000	9,5500	9,0500	9,4300
Moles de CO ₂ absorbido equivalente a gr, de NaOH consumidos	0,3125	0,3189	0,3400	0,3238
Volumen de CO ₂ en L absorbido del biogás a purificar, relacionado al NaOH consumido	7,8323	7,9909	8,5198	8,1143
Volumen de biogás llenado al bidón 1	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Volumen de biogás recibido en el bidón 2	11,1000	11,3000	11,4000	11,3000
Diferencia de volumen 1 y 2 es el CO ₂ absorbido por el NaOH	7,9000	7,7000	7,6000	7,7000
Moles de CO ₂ relacionado al volumen de los bidones 1 y 2	0,3152	0,3073	0,3033	0,3086
% de CO ₂ en el biogás de la cámara	52,5100	52,5100	52,5100	52,5100
% de CO ₂ absorbido relacionado al NaOH consumido	78,5100	80,1000	85,4000	81,3400

Resultados de la concentración de hidróxido de sodio 2,0 M

Parámetros Medidos/Características	2,0 M			
	Rep, 1	Rep,2	Rep, 3	Prom
Velocidad de Flujo ml/min	100,0000	100,0000	100,0000	--
Altura de manguera	28,0000	28,0000	28,0000	--
Normalidad del NaOH	1,9875	1,9875	1,9875	--
Tipo de ácido utilizado	HCl	HCl	HCl	--
Normalidad del ácido Clorhídrico (HCl)	0,0970	0,0970	0,0970	--
Alícuota de NaOH utilizado	5,0000	5,0000	5,0000	--
Gasto de los mL de HCl en la titulación de las repeticiones	25,3000	25,9000	25,7000	25,6300
Moles de CO ₂ absorbido equivalente a gr, de NaOH consumidos	0,3731	0,3477	0,3562	0,3590
Volumen de CO ₂ en L absorbido del biogás a purificar, relacionado al NaOH consumido	9,3493	8,7147	8,9262	8,9967
Volumen de biogás llenado al bidón 1	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Volumen de biogás recibido en el bidón 2	10,4000	10,7000	10,6000	10,6000
Diferencia de volumen 1 y 2 es el CO ₂ absorbido por el NaOH	8,6000	8,3000	8,4000	8,4000
Moles de CO ₂ relacionado al volumen de los bidones 1 y 2	0,3432	0,3312	0,3352	0,3365
% de CO ₂ en el biogás de la cámara	52,5100	52,5100	52,5100	52,5100
% de CO ₂ absorbido relacionado al NaOH consumido	93,7200	87,3500	89,4800	90,1800

Resultados de la velocidad de flujo a 50 ml/min

Parámetros Medidos/Características	50 ml/min			
	Rep, 1	Rep,2	Rep, 3	Prom
Velocidad de Flujo ml/min	50,0000	50,0000	50,0000	--
Altura de manguera	28,0000	28,0000	28,0000	--
Normalidad del NaOH	0,9881	0,9881	0,9881	--
Tipo de ácido utilizado	HCl	HCl	HCl	--
Normalidad del ácido Clorhídrico (HCl)	0,0970	0,0970	0,0970	--
Alícuota de NaOH utilizado	5,0000	5,0000	5,0000	--
Gasto de los mL de HCl en la titulación de las repeticiones	8,9000	9,3500	9,0500	9,1000
Moles de CO ₂ absorbido equivalente a gr, de NaOH consumidos	0,3407	0,3217	0,3344	0,3323
Volumen de CO ₂ en L absorbido del biogás a purificar, relacionado al NaOH consumido	8,5385	8,0626	8,3799	8,3270
Volumen de biogás llenado al bidón 1	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Volumen de biogás recibido en el bidón 2	10,1000	10,5000	10,3000	10,3000
Diferencia de volumen 1 y 2 es el CO ₂ absorbido por el NaOH	8,9000	8,5000	8,7000	8,7000
Moles de CO ₂ relacionado al volumen de los bidones 1 y 2	0,3551	0,3392	0,3472	0,3472
% de CO ₂ en el biogás de la cámara	46,4300	46,4300	46,4300	46,4300
% de CO ₂ absorbido relacionado al NaOH consumido	96,7900	91,4000	94,9900	94,0700

Resultados de la velocidad de flujo a 100 ml/min

Parámetros Medidos/Características	100ml/min			
	Rep, 1	Rep,2	Rep, 3	Prom
Velocidad de Flujo ml/min	100,0000	100,0000	100,0000	--
Altura de manguera	28,0000	28,0000	28,0000	--
Normalidad del NaOH	0,9958	0,9958	0,9958	--
Tipo de ácido utilizado	HCl	HCl	HCl	--
Normalidad del ácido Clorhídrico (HCl)	0,0970	0,0970	0,0970	--
Alícuota de NaOH utilizado	5,0000	5,0000	5,0000	--
Gasto de los mL de HCl en la titulación de las repeticiones	9,5500	9,3500	9,6000	9,5000
Moles de CO ₂ absorbido equivalente a gr, de NaOH consumidos	0,3189	0,3273	0,3168	0,3210
Volumen de CO ₂ en L absorbido del biogás a purificar, relacionado al NaOH consumido	7,9909	8,2025	7,9380	8,0438
Volumen de biogás llenado al bidón 1	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Volumen de biogás recibido en el bidón 2	10,8000	10,9000	11,0000	10,9000
Diferencia de volumen 1 y 2 es el CO ₂ absorbido por el NaOH	8,2000	8,1000	8,0000	8,1000
Moles de CO ₂ relacionado al volumen de los bidones 1 y 2	0,3272	0,3232	0,3192	0,3232
% de CO ₂ en el biogás de la cámara	46,4300	46,4300	46,4300	46,4300
% de CO ₂ absorbido relacionado al NaOH consumido	90,5800	92,9800	89,9800	90,1800

Resultados de la velocidad de flujo a 200 ml/min

Parámetros Medidos/Características	200ml/min			
	Rep. 1	Rep.2	Rep. 3	Prom
Velocidad de Flujo ml/min	200,0000	200,0000	200,0000	--
Altura de manguera	28,0000	28,0000	28,0000	--
Normalidad del NaOH	0,9881	0,9881	0,9881	--
Tipo de ácido utilizado	HCl	HCl	HCl	--
Normalidad del ácido Clorhídrico (HCl)	0,0970	0,0970	0,0970	--
Alícuota de NaOH utilizado	5,0000	5,0000	5,0000	--
Gasto de los mL de HCl en la titulación de las repeticiones	9,9500	9,7500	9,8000	9,8300
Moles de CO ₂ absorbido equivalente a gr. de NaOH	0,2964	0,3048	0,3027	0,3013
Volumen de CO ₂ en L absorbido del biogás a purificar, relacionado al NaOH consumido	7,4279	7,6395	7,5866	7,5513
Volumen de biogás llenado al bidón 1	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Volumen de biogás recibido en el bidón 2	11,8000	11,5000	11,5000	11,6000
Diferencia de volumen 1 y 2 es el CO ₂ absorbido por el NaOH	7,2000	7,5000	7,5000	7,4000
Moles de CO ₂ relacionado al volumen de los bidones 1 y 2	0,2873	0,2993	0,2993	0,2953
% de CO ₂ en el biogás de la cámara	46,4300	46,4300	46,4300	46,4300
% de CO ₂ absorbido relacionado al NaOH consumido	84,2000	86,6000	86,0000	85,6000

Resultados de la presión hidrostática a 7 cm de agua

Parámetros Medidos/Características	7cm de agua			
	Rep. 1	Rep.2	Rep. 3	Prom
Velocidad de Flujo ml/min	100,0000	100,0000	100,0000	--
Altura de manguera	7,0000	7,0000	7,0000	--
Normalidad del NaOH	0,9881	0,9881	0,9881	--
Tipo de ácido utilizado	HCl	HCl	HCl	--
Normalidad del ácido Clorhídrico (HCl)	0,0970	0,0970	0,0970	--
Alícuota de NaOH utilizado	5,0000	5,0000	5,0000	--
Gasto de los mL de HCl en la titulación de las repeticiones	9,2500	9,4000	9,4500	9,3700
Moles de CO ₂ absorbido equivalente a gr. de NaOH	0,3259	0,3196	0,3175	0,3210
Volumen de CO ₂ en L absorbido del biogás a purificar, relacionado al NaOH consumido	8,1683	8,0097	7,9568	8,0449
Volumen de biogás llenado al bidón 1	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Volumen de biogás recibido en el bidón 2	11,0000	11,2000	11,2000	11,1000
Diferencia de volumen 1 y 2 es el CO ₂ absorbido por el NaOH	8,0000	7,8000	7,8000	7,9000
Moles de CO ₂ relacionado al volumen de los bidones 1 y 2	0,3192	0,3113	0,3113	0,3139
% de CO ₂ en el biogás de la cámara	48,6200	48,6200	48,6200	48,6200
% de CO ₂ absorbido relacionado al NaOH consumido	88,4300	86,7100	86,1400	87,0900

Resultados de la presión hidrostática a 14 cm de agua

Parámetros Medidos/Características	14cm de agua			
	Rep, 1	Rep,2	Rep, 3	Prom
Velocidad de Flujo ml/min	100,0000	100,0000	100,0000	--
Altura de manguera	14,0000	14,0000	14,0000	--
Normalidad del NaOH	0,9881	0,9881	0,9881	--
Tipo de ácido utilizado	HCl	HCl	HCl	--
Normalidad del ácido Clorhídrico (HCl)	0,0970	0,0970	0,0970	--
Alícuota de NaOH utilizado	5,0000	5,0000	5,0000	--
Gasto de los mL de HCl en la titulación de las repeticiones	9,1000	9,0500	8,9000	9,0200
Moles de CO ₂ absorbido equivalente a gr, de NaOH	0,3323	0,3344	0,3407	0,3358
Volumen de CO ₂ en L absorbido del biogás a purificar, relacionado al NaOH consumido	8,3270	8,3799	8,5385	8,4151
Volumen de biogás llenado al bidón 1	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Volumen de biogás recibido en el bidón 2	10,8000	10,9000	10,7000	10,8000
Diferencia de volumen 1 y 2 es el CO ₂ absorbido por el NaOH	8,2000	8,1000	8,3000	8,2000
Moles de CO ₂ relacionado al volumen de los bidones 1 y 2	0,3272	0,3232	0,3312	0,3272
% de CO ₂ en el biogás de la cámara	48,6200	48,6200	48,6200	48,6200
% de CO ₂ absorbido relacionado al NaOH consumido	90,1500	90,7200	92,4400	91,1000

Resultados de la presión hidrostática a 28 cm de agua

Parámetros Medidos/Características	28 cm de agua			
	Rep. 1	Rep.2	Rep. 3	Prom
Velocidad de Flujo ml/min	100,0000	100,0000	100,0000	--
Altura de manguera	28,0000	28,0000	28,0000	--
Normalidad del NaOH	0,9632	0,9901	0,9901	--
Tipo de ácido utilizado	HCl	HCl	HCl	--
Normalidad del ácido Clorhídrico (HCl)	0,0970	0,0970	0,0970	--
Alícuota de NaOH utilizado	5,0000	5,0000	5,0000	--
Gasto de los mL de HCl en la titulación de las repeticiones	8,1500	8,9500	8,8000	8,6300
Moles de CO ₂ absorbido equivalente a gr. de NaOH	0,3548	0,3401	0,3464	0,3471
Volumen de CO ₂ en L absorbido del biogás a purificar, relacionado al NaOH consumido	8,8922	8,5220	8,6807	8,6983
Volumen de biogás llenado al bidón 1	19,0000	19,0000	19,0000	19,0000
Volumen de biogás recibido en el bidón 2	10,2000	10,3000	10,3000	10,3000
Diferencia de volumen 1 y 2 es el CO ₂ absorbido por el NaOH	8,8000	8,7000	8,7000	8,7000
Moles de CO ₂ relacionado al volumen de los bidones 1 y 2	0,3512	0,3472	0,3472	0,3485
% de CO ₂ en el biogás de la cámara	48,6200	48,6200	48,6200	48,6200
% de CO ₂ absorbido relacionado al NaOH consumido	96,2700	92,2600	93,9700	94,1200