

Capítulo 7

Monitoreo y control de un reactor batch para la producción de biogás mediante la fermentación anaerobia de sustratos orgánicos de segunda generación, una perspectiva a la economía circular

*Luis Abraham Díaz Alcalá¹
Kelly Joel Gurubel Tun²*

<https://doi.org/10.61728/AE20251673>



¹ Ingeniero en Energía. Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México

² Doctor en Ciencias Departamento de Estudios del Agua y de la Energía, Centro Universitario de Tonalá, Universidad de Guadalajara, México <https://orcid.org/0000-0001-9999-9018>

Resumen

Las energías renovables han crecido rápidamente a nivel global para disminuir el uso de fuentes convencionales y mitigar el cambio climático, aunque actualmente representan solo el 20 % de la energía mundial. Los biocombustibles a partir de residuos agroindustriales, como el bagazo del agave, ofrecen una alternativa sostenible, alineada con los objetivos de desarrollo sostenible mediante la digestión anaerobia. Jalisco es el quinto estado con mayor consumo de energía (5.9 % aproximadamente), se ubica en el cuarto lugar en población, tercero en consumo per cápita de energía eléctrica y tercero en generación de residuos sólidos urbanos (Vera Romero et al., 2016). Además, en Jalisco la agricultura, especialmente el cultivo de agave, genera residuos que pueden aprovecharse en este proceso. Uno de los desafíos de la digestión anaerobia es desarrollar un sistema de monitoreo eficiente que mejore la producción de biogás y el tratamiento de efluentes.

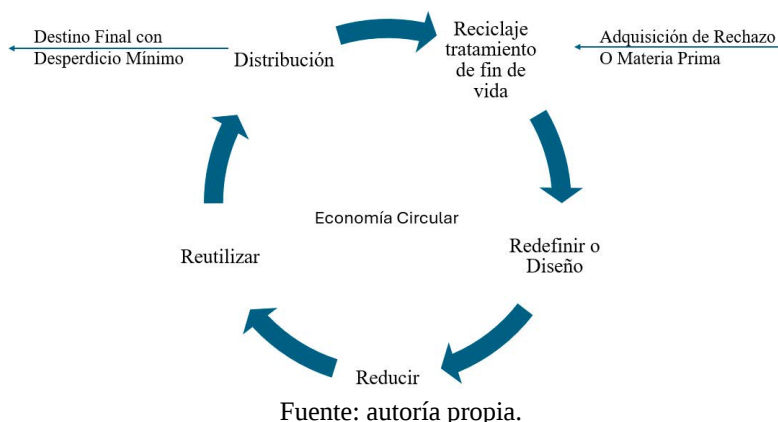
El análisis de datos y señales de los sensores se realiza mediante interfaces gráficas en el instrumento virtual (VI), usando el software LabVIEW en conjunto con un módulo NI PXIe 7042 del fabricante National Instruments para monitorear la conductividad proveniente del inóculo en el reactor Minifors 2. Esto permite integrar parámetros de recolección de señales, aplicando calibraciones y funciones de interpretación de variables para adquirir datos, controlar instrumentos, analizar mediciones y presentar los resultados. LabVIEW utiliza iconos en lugar de código textual para crear aplicaciones que facilitan el desarrollo y la implementación de sistemas industriales y de producción personalizados, aplicables a la caracterización de sensores y el control de motores en sistemas de monitoreo. La implementación de controladores robustos podría mejorar la consistencia de la calidad del efluente tratado, así como del biogás producido (Phaik Eong Poh, 2015). En el presente trabajo se diseñó una configuración P&ID (Piping and Instrumentation Diagram,

por sus siglas en inglés) de sensores y actuadores descritos en la Figura 4, para el monitoreo y control de variables clave del proceso que conducen a su óptima operación.

Introducción

La economía circular es una filosofía de organización de empresas y sistemas inspirada en los seres vivos, que persiguió el cambio de una economía lineal (producir, usar y tirar) cada vez más difícil de implementar por el agotamiento de los recursos hacia un modelo circular y regenerativo, tal y como ocurre en la naturaleza y que además supone una gran oportunidad en el ámbito empresarial (Hermida Balboa C. Catalina & Domínguez Somonte Manuel, 2014). El constante crecimiento y la demanda de recursos energéticos deben considerar el uso de tecnologías que permitan el mejor aprovechamiento de procesos productivos. Para Jalisco, el aprovechamiento de residuos orgánicos de procesos como la elaboración del tequila puede ser promotor para el desarrollo de economías circulares. La producción de biogases como el metano o el hidrógeno proveniente de procesos de fermentación anaeróbica ha tomado relevancia, dado que pueden generarse de procesos que producen materia orgánica no aprovechada y que contribuyen a las emisiones de gases de efecto invernadero. Este subproducto de la descomposición natural de la materia orgánica se puede aprovechar si esta se realiza de manera controlada; para esto se propone la utilización de un biodigestor que es instrumentado (Gómez-Camperos et al., 2022).

Figura 1. Diagrama general de la propuesta del ciclo de economía circular.



La digestión anaeróbica (DA) es un proceso biológico en el cual la materia orgánica decae en ausencia de aire. Esto porque el aire consiste en 21 % de oxígeno; el proceso anaeróbico en ocasiones se le conoce como anóxico (Rosato, 2018).

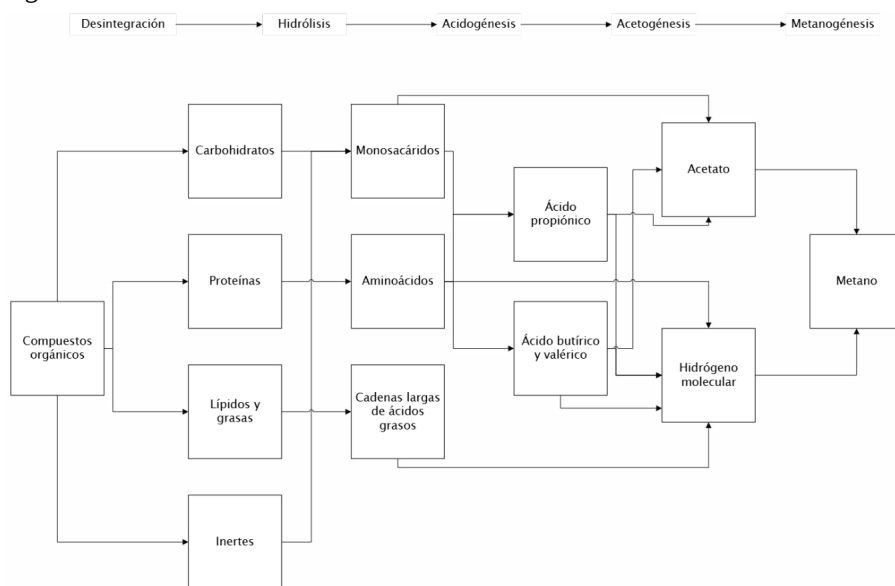
En la naturaleza existen diferentes tipos y procesos de digestión anaeróbica:

- Fermentación alcohólica.
- Fermentación butírica.
- Fermentación láctica.
- Fermentación metanogénica.
- Fermentación oscura.
- Fermentación propiónica.
- Foto fermentación.

Los procesos anaeróbicos son clasificados como fermentación o respiración anaeróbica dependiendo de los tipos de aceptantes de electrones que estén involucrados. En este caso estudiaremos los procesos de fermentación metanogénica y oscura; los microorganismos usarán las rutas energéticas más bajas o que permiten el transporte de electrones de un estado a otro. La producción de biogás en un proceso de fermentación anaeróbica en un reactor depende, en gran medida, de las condiciones de control esperadas. En este sentido, es importante tener en conside-

ración el correcto monitoreo y control de las variables de interés como la temperatura, el oxígeno total disuelto, ácidos grasos volátiles, pH, entre otras. La Figura 2 muestra las etapas relacionadas con la digestión anaerobia. Los compuestos orgánicos de la biomasa son digeridos hasta obtener los componentes esenciales de proteínas, lípidos y carbohidratos; a esta etapa se le denomina hidrólisis. Los monosacáridos, aminoácidos y ácidos grasos son convertidos en ácidos como el butírico o el propiónico; en esta etapa se obtiene como subproducto el biohidrógeno y la acidificación de medio. Finalmente, los ácidos volátiles son convertidos en acetato y, junto con el biohidrógeno, pueden ser convertidos en metano por consorcios de arqueas (Khanal, 2008).

Figura 2. Adaptación de las rutas biológicas principales de la conversión de materia orgánica

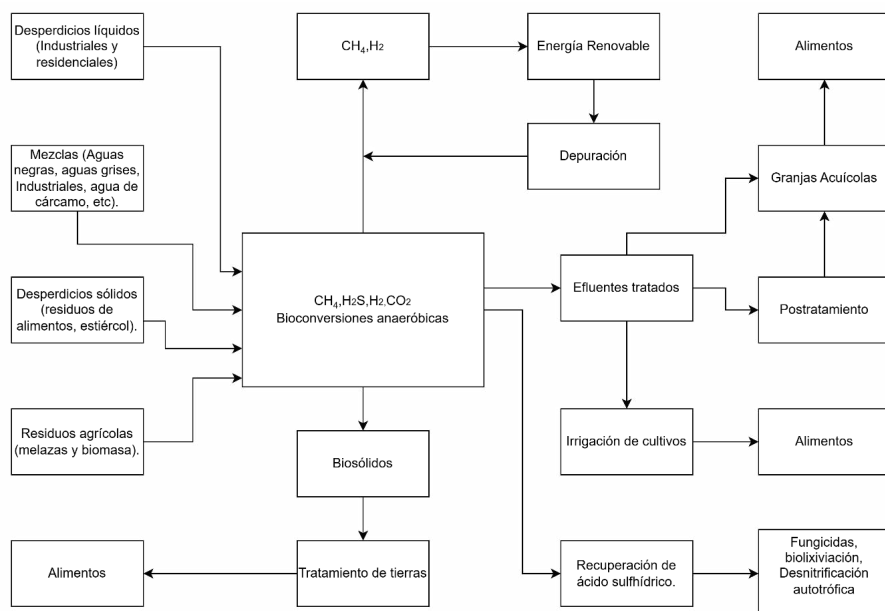


Fuente: Elaboración a partir de Khanal (2008).

Los procesos de digestión se pueden clasificar en dos categorías de transformación bioquímica: el anabolismo, donde existe una producción de células, y los procesos de degradación o catabolismo, que usualmente liberan energía (Ruggeri et al., 2015). En la Figura 3 se muestran los posibles potenciales de la recuperación de energía, de productos, sub-

productos y biocombustibles. Carbono, nitrógeno, hidrógeno y azufre provenientes de residuos de fuentes industriales, municipales y agrícolas se pueden aprovechar para ser convertidos en productos de valor agregado. Esto incluye biogases, biocombustibles, fertilizantes, entre otros (Khanal, 2008).

Figura 3. Adaptación del diagrama esquemático del ciclo de vida del aprovechamiento de diferentes fuentes de desperdicios



Fuente: Elaboración a partir de Khanal (2008)

Para lo anterior, se propone un monitoreo, adquisición y procesamiento de datos según el siguiente diagrama de bloques, el cual describe que el prototipo contempla tres elementos principales de hardware y uno de software. El primer elemento de hardware es el biorreactor Minifors 2 de la marca HT, descrito en la Tabla 1, el cual tiene integrado sistemas de control para la regulación de 3 variables importantes: el pH, la temperatura del inóculo y la agitación. El segundo es un instrumento de medición de gas uFlow de la marca bioprocess que monitorea el flujo en Nml/hr y el volumen acumulado en Nml del biogás generado pro-

ducto de la fermentación anaeróbica y el último elemento de hardware es un chasis PXIe de National Instruments que estará conectado a dos elementos auxiliares, el primero es un sensor Conducell 4uXF procesa señales analógicas en mA y las convierte en unidades de microSiemens en un lazo de adquisición de datos programado en LabView y el segundo elemento auxiliar consta de una placa Arduino, la cual procesa señales analógicas de un termistor NTC (Negative Temperature Coefficients, por sus siglas en inglés) para el monitoreo de la temperatura ambiental del laboratorio.

Materiales y métodos

Inóculo

La inoculación se hizo en tres corridas independientes de 48 horas cada una con la finalidad de observar la generación de biogás en el proceso de acidogénesis, donde existe mayor proporción de biohidrógeno, y monitorear las variables como la conductividad electrolítica, el pH, la temperatura del inóculo y temperatura ambiental. Se realizaron digestiones de muestras de biomasa de una planta de tratamiento de aguas residuales de la planta de tratamiento del Centro Universitario de Tonalá (CUT). Colocando el inóculo a un pH de 6 durante 48 h y a 35 °C de temperatura; lo anterior se realizó para favorecer la eliminación de arqueas y el enriquecimiento de bacterias formadoras de esporas, las cuales en su mayoría tienen la capacidad de producir biohidrógeno (Ntaikou, 2021).

Sustrato y medio de crecimiento

Este proyecto contempla varias etapas de experimentación. En el caso de nuestro estudio, se utiliza un reactor de mezcla continua CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor, por sus siglas en inglés). Y se realizaron digestiones con soluciones minerales conforme a la propuesta conocida en la literatura. La dieta ideal debe tener una tasa de relación entre carbono y nitrógeno (C/N) lo más cercana posible a 30. Dado que el fósforo es un elemento esencial para la vida, los microorganismos deben también alimentarse de este elemento; por tanto, el fósforo debe tomarse en cuenta.

Lo que resulta en una relación óptima de crecimiento para una relación C/N/P cuando es 150/5/1 (Rosato, 2018). Para el sustrato mineral, se preparó una solución 100 ml de agua destilada con 10 g de glucosa ($C_6H_{12}O_6$), 2.5 g de cloruro de amonio (NH_4Cl) y 0.5 g de fosfato de sodio monobásico hidratado ($NaH_2PO_4 \cdot H_2O$). Con esta proporción, el resultado C/N/P se acerca a 100/25/1. La solución restante se mezcla con 3 L de agua destilada y 1 L de inóculo de reúso del lote anterior.

Biorreactor Minifors 2 HT

Los experimentos se realizaron en un biorreactor de fermentación de 4 L Minifors instrumentado con sensores de pH, conductividad, temperatura y volumen de biogás. El proceso fue realizado por lotes y controlado a una temperatura de 35 °C, pH de 6 y una agitación de 50 rpm. Los componentes del biorreactor se describen en la Tabla 1 y los instrumentos de medición y control en la Tabla 2.

Tabla 1. Características y dimensiones del biorreactor de referencia (INFORS HT, 2023)

Componente	Capacidad
Recipientes	6 L
Volumen de trabajo	0.3–1.0 l / 0.6–2.0 l / 1.1–4.0 l
Dimensiones (anch. x prof. x alt.)	455 mm x 375 mm x 740 mm
Impulsores	Accionamiento para microorganismos: 150 min ⁻¹ hasta 1600 min ⁻¹ , accionamiento para culturas celulares: 24 min ⁻¹ hasta 600 min ⁻¹
Temperatura	+ 15 °C (Temperatura del refrigerante + 5 °C) hasta 60 °C
Gasificación por recipiente	Hasta 5 MFCs 2 min ⁻¹ (vvm)
Velocidad de la bomba por recipiente	4 x configurable (velocidad fija o variable) de fábrica: 3x fijo (ácido, álcali, anti-espuma), 1 x variable (alimentación)
Prestación de la bomba	0.0034 bis 3.52 ml min ⁻¹ (estándar), 0.017 hasta 16.13 ml min ⁻¹ , 0.0012 hasta 1.12 ml min ⁻¹
Puertos por recipiente	7.5 mm 4x
	10 mm 4x
	12 mm (Pg13,5) max. 7x
Esterilización	Autoclave

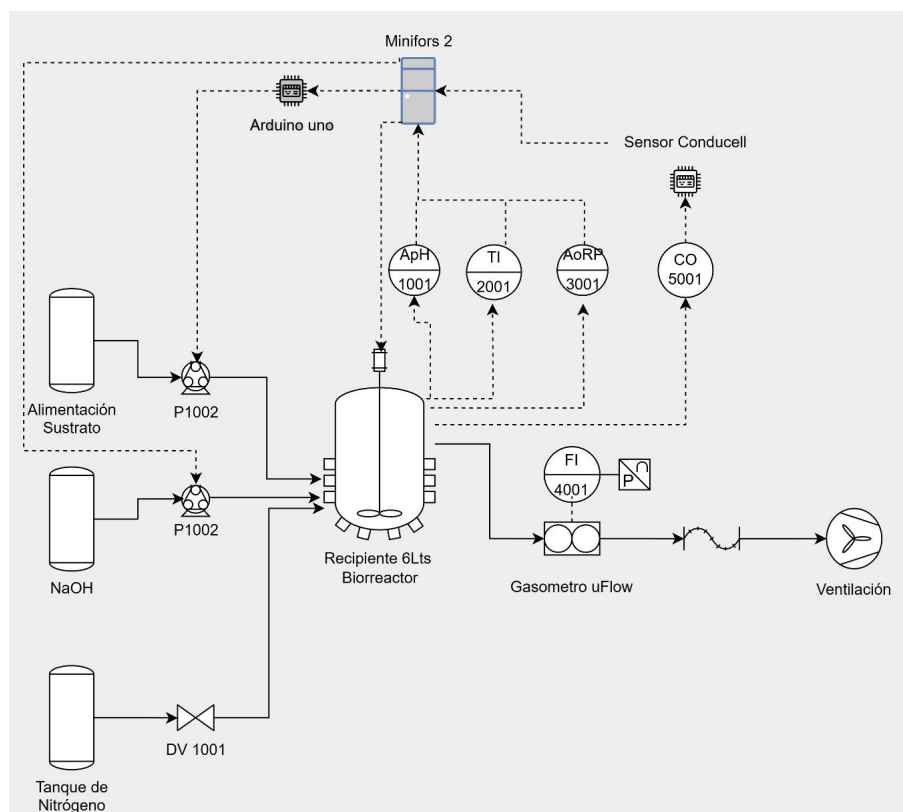
Tabla 2. Características y capacidades de los sensores y del reactor.

Componente	Capacidad y/o rango de operación
Sensor de pH	0-14 unidades de potencial hidrógeno
Bombas peristálticas	Operación máxima 12V a 7.5 W
Agitador	2750 RPM a 42V a 102 Watts
Sensor conductividad	Hamilton Conducell 4UxF de 4 - 20mA a 12V
Sensor temperatura de reactor	100Ω a 0 °C – 100 °C
Sensor temperatura ambiental	Termistor NTC 103
Minifors 2	120/230 VAC 50/60 Hz a 800 W
Control de temperatura	Placa térmica de 630 watts

Sistema y sensores de monitoreo y control

El monitoreo y control de un biorreactor es esencial para mantener las condiciones óptimas para el cultivo de células o microorganismos que promueven la producción de metabolitos de valor agregado y derivados para la producción de biocombustibles. En consecuencia, es importante considerar las variables de interés para la selección adecuada de los instrumentos de adquisición, medición y control. El diagrama de la Figura 4 describe una estructura P&ID de instrumentación y control del biorreactor de fermentación que puede escalarse para hemicelulosa de agave provenientes de alguna empresa productiva del estado de Jalisco.

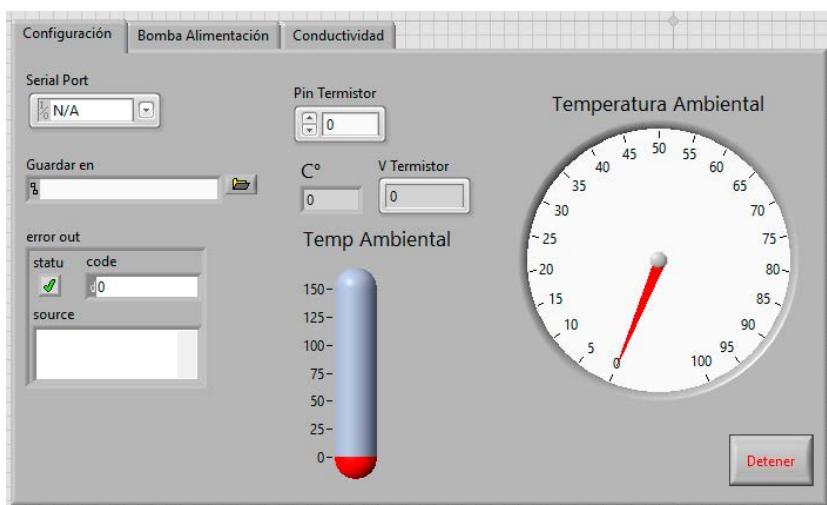
Figura 4. Diagrama P&ID del sistema de monitoreo y control del biorreactor Minifors 2.



Fuente: Elaboración propia.

La adquisición y procesamiento de señales obtenidas del proceso se realizan con equipo National Instruments: chasis PXIe-1078, controlador PXIe 8135, un módulo 4072, una placa Arduino UNO y con software LabVIEW y firmware de código abierto Arduino. El equipo tiene la capacidad para el diseño de estructuras y topologías para la adquisición y almacenamiento de datos para monitoreo y control periférico al biorreactor de fermentación para producción de biocombustibles en tiempo real. Con base en los requerimientos de los componentes para sincronización, validación y procesamiento, es pertinente contar con conocimientos del sistema y pruebas de validación para su correcto funcionamiento. El software y hardware permiten la construcción de esquemas de control en lazo abierto y cerrado para la regulación de los actuadores del reactor. Este proyecto contempla en una primera fase operación en lotes y bajo una estructura de lazo abierto. La Figura 5 muestra un extracto de la interfaz de usuario desarrollada en LabVIEW para la adquisición y gestión de datos provenientes de los sensores de monitoreo del reactor.

Figura 5. Interfaz de usuario para la configuración del sistema en LabView.



Fuente: Elaboración propia.

La estrategia de monitoreo y control consiste en mantener el pH, temperatura y agitación en valores de operación fijos o valor de consigna,

mientras que las variables conductividad y volumen gaseoso de biogás se monitorean con el equipo NI y se envían a un lazo abierto con registro por lotes. La conductividad es una variable importante ya que está relacionada con la etapa de acidogénesis, que indica la producción de ácido grasos volátiles que son necesarios para la producción de biogás. Esto es posible aproximar gracias a la dinámica cinética entre las bacterias acidogénicas y las acetogénicas (Alavi-Borazjani et al., 2020), la siguiente hipótesis ha sido documentada como una manera analítica para aproximar la cantidad de iones conforme la conductividad registrada en los procesos acidogénicos. La relación entre la conductividad y los iones para el proceso anaeróbico del biohidrógeno, con un pH inferior a 6, se puede escribir de la siguiente manera expresión (Aceves-Lara et al., 2012):

(1)

$$G = a * Ace + b * Bu + c * Na^+ + d * HCO_3^- + G_0$$

Donde G_0 es la conductividad inicial, Ace y Bu son la concentración de iones acetato y butirato, respectivamente, y Na es la concentración de iones de sodio utilizada para regular el pH a un valor constante de 6. Las conductividades molares específicas para Ace, Bu y HCO_3^- son 40.9, 35.1 y 44.5 ($Scm^2 mol^{-1}$), respectivamente. Lo cual para futuros estudios sería conveniente implementar.

El volumen de biogás producido es un indicador de la actividad biológica en el biorreactor y las rutas metabólicas del consorcio microbiano. Por lo cual, estas variables son primordiales para el control y optimización del rendimiento en la producción de biogás. Los convertidores de señales convierten señales eléctricas en medidas físicas utilizando una ecuación de calibración específica, proporcionando una interfaz visual para el seguimiento y ajuste de los parámetros del biorreactor. Las señales monitoreadas son utilizadas por el controlador para diseñar un modelo de control que regule la acidogénesis para la producción de biogás.

Resultados

Digestión anaerobia de solución mineral rica en glucosa

Es usual que, para calcular el potencial de producción de biogás de una molécula, esta se compare con una fuente de carbono probada y fácil de digerir como los monosacáridos. Se realizaron experimentos preliminares de producción de biogás utilizando una solución mineral que simule las vinazas ricas en azúcares fermentables. Para alimentar el inóculo se agregaron respectivamente 100 partes de glucosa, 25 partes de nitrógeno y una parte de fósforo (ver sección 2.2).

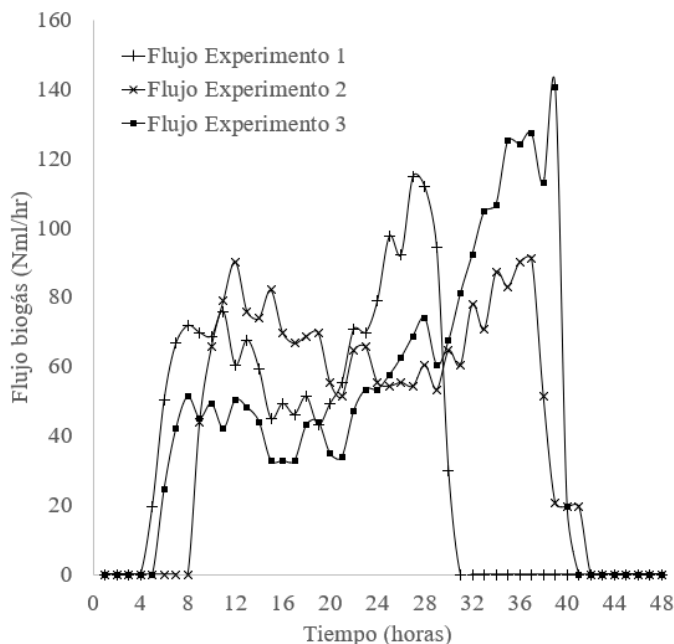
El uso de glucosa como fuente de carbono permitió obtener un potencial de producción de biogás de 508.17 mililitros normales (NmL) en promedio por cada gramo de glucosa agregado, según la siguiente tabla.

Tabla 3. Resumen de resultados generales de los 3 experimentos de 48 horas de DA.

Variable	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
Flujo promedio NmL hr-1	35.64	43.61	46.48
Volumen total NmL	1714	2165	2219
NmL biogás g-1 Carbono	428.50	541.25	554.75

El resultado anterior muestra que existe la posibilidad del uso de diferentes residuos como fuentes de carbono en procesos de digestión, por ejemplo, el uso de vinazas agave. Sin embargo, en términos de la generación de una estrategia de monitoreo y control se requiere un enfoque más práctico, debido a que el seguimiento de la demanda química de oxígeno (DQO) y las técnicas gravimétricas para el inóculo son limitantes debido a su complejidad y costo económico de implementación. La Figura 6 muestra el flujo de biogás obtenido en un periodo de 48 horas.

Figura 6. Flujo de la producción de biogás en el biorreactor instrumentado Minifors 2. a) La fuente de carbono utilizada corresponde a glucosa, además de una fuente de nitrógeno y formato en una relación 100:25:1.



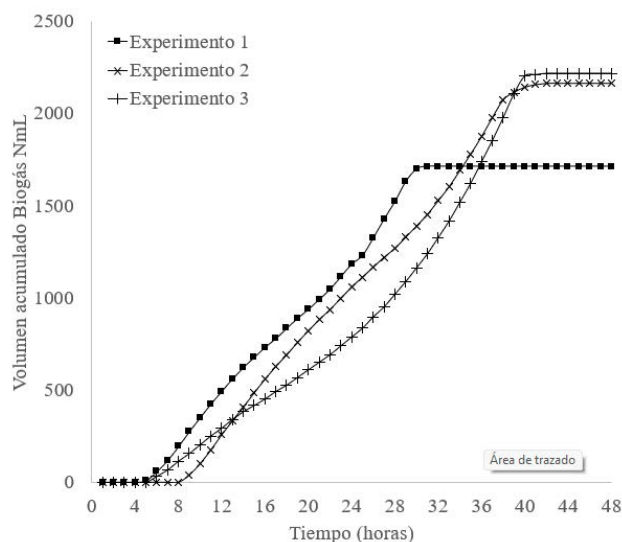
Fuente: Elaboración propia

Señales de monitoreo y control

En la generación de biogás a través de la digestión anaerobia se pueden utilizar diversos sensores. En el caso del biorreactor instrumentado Minifors 2, es relevante contar con un sensor de producción de biogás. Dado que la concentración de los gases (en realidad sus presiones parciales) depende de la temperatura y presión atmosférica, es necesario que el sensor realice los ajustes necesarios a las mediciones. Para el monitoreo de la producción volumétrica de biogás se utilizó un sensor μ Flow; se espera que, para proyectos adicionales, se puedan incorporar sensores de presión atmosférica y de concentración de gas, para que sean contrastados con una cromatografía de gases para una medición más exacta. Este experimento permitió la obtención de 508.17 NmL de biogás en promedio para las 3 corridas de 48 horas por cada gramo de glucosa agregada y por cada uno de los cuatro litros de trabajo del biorreactor. Durante los

experimentos, la mayor velocidad de producción de biogás se encuentra entre las 20 y 30 horas, como se muestra en la Figura 7; por lo que, para un proceso continuo o semicontinuo, los tiempos de retención hidráulica estarían calculados en esta ventana de tiempo.

Figura 7. Producción volumétrica de biogás. Se muestran los valores normalizados de volumen de biogás relativos a la cantidad relativa de inóculo.

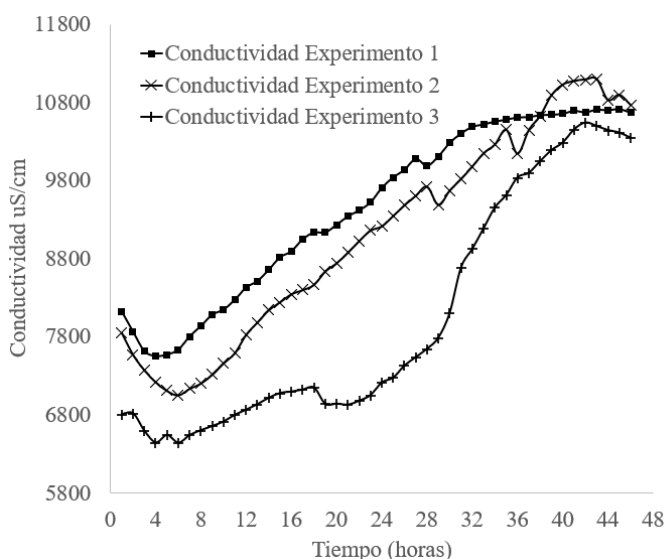


Fuente: Elaboración propia

Por otro lado, se pueden relacionar algunos parámetros con los procesos biológicos que acontecen dentro del biorreactor; tal es el caso del bioproceso de acidogénesis con el aumento de la conductividad eléctrica. Para monitorear este fenómeno, es necesario contar con un sensor adecuado debido a los altos valores de sólidos disueltos y iones característicos de los procesos de digestión anaerobia. El aumento de ácidos grasos volátiles dentro del biorreactor al final del proceso de acidogénesis hace necesario un control de pH, dado que si este bioproceso prosigue, la producción de biogás es inhibida. Para este experimento se utilizó un sensor de conductividad electrolítica Hamilton Conducell 4UxF, el cual emite una señal analógica de corriente en mA que se puede correlacionar linealmente con la conductividad eléctrica. Al igual que la producción de biogás el aumento de la conductividad eléctrica se encuentra entre las 4 y 24 horas del experimento (Figura 8). Se ha mencionado que el aumento

en la concentración de ácidos volátiles puede inhibir la producción de biogás debido a la modificación del pH, por lo que el monitoreo de la conductividad eléctrica podría ayudar a definir los tiempos de retención (Marín-Peña et al., 2020).

Figura 8. Monitoreo de la conductividad eléctrica en la digestión anaerobia de glucosa. Esta gráfica corresponde al experimento del diagrama implementado en la Figura 6 y con ayuda de la interfaz en la Figura 7.



Fuente: elaboración propia

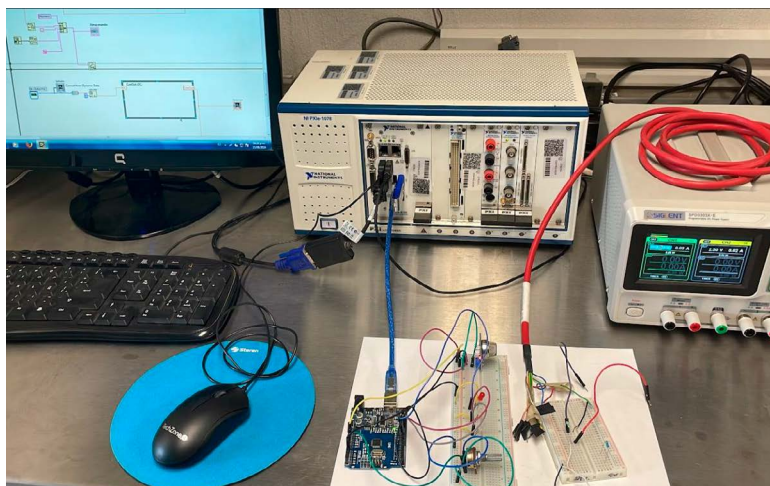
Además, la operación de distintos componentes requiere de un consumo eléctrico; si bien todos ellos están operados y regulados por el reactor con un consumo máximo total de 800 vatios, es importante considerar que los comportamientos de operación de los componentes están en función del control propio del Minifors. Es posible aproximarse y establecer un estimado de consumo energético en kWh dado los periodos de operación que oscilan en el orden de horas. La última corrida experimental cuya base de inóculo y sustrato son aguas de la planta de tratamiento del centro universitario de Tonalá y una solución a base de glucosa. Los resultados de operación de variables térmicas ambientales y del regulador térmico del reactor se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Tiempo de operación y consumo eléctrico.

Sensor / componente	Tiempo de operación	Consumo en kWh
Agitador	48:00:00	0.0629 kWh
Bombas peristálticas	03:25:00	0.0750 kWh
Calentador térmico	48:00:00	0.6000 kWh
Chasis PXIe 1078 (120 VAC a 60Hz a 7A MAX)	48:00:00	0.8400kWh
Total, componentes	Variable	1.5779 kWh
Total, potencia consumida	48:00:00	75.7392 kW

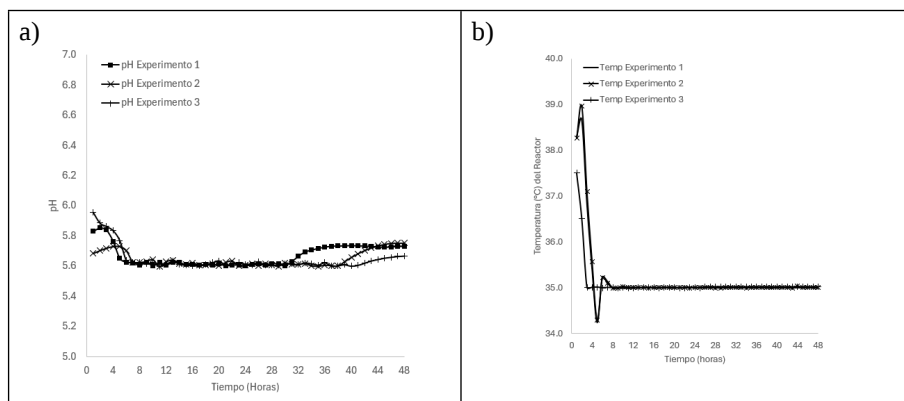
En la Figura 9 se muestra el montaje final del hardware para la adquisición de señales y procesamiento de datos analógicos a digitales. De izquierda a derecha, extracto de pantalla del diagrama de bloques del lazo de adquisición de señales en LabView; al centro, un chasis PXIe 1078 con 3 módulos operando, el controlador PXIe 8135, el módulo 4072 y una tarjeta Arduino Uno; a la derecha, la fuente de poder marca SILIGENT que suministra 24 V al sensor de conductividad 4xUF marca Hamilton.

Figura 9. Sistema de adquisición de señales y procesamiento de datos



Fuente: elaboración propia.

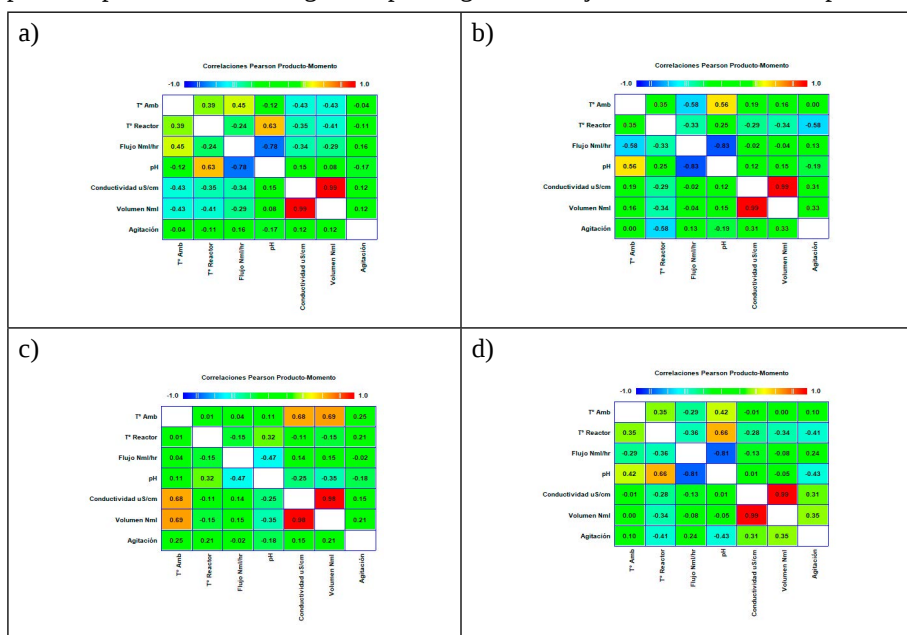
Figura 10. a) Perfil de pH en respuesta de la operación del agitador que mezcla la base alimentada por la bomba peristáltica. b) Perfil de temperatura en el reactor.



Fuente: Elaboración propia.

Una correlación se elaboró con ayuda del software especializado Statgraphic 19, para elaborar una matriz de correlación con los datos de todas las variables adquiridas para cada una de las corridas y una de valor promediado (Figura 11). La finalidad es observar si alguna de las variables monitoreadas tiene correlaciones directas o indirectas en el volumen acumulado de biogás producido. En el análisis se encontró que la conductividad tiene una alta correlación con el volumen acumulado de biogás generado para las condiciones de alimentación enunciadas anteriormente. La segunda variable de interés es el pH contra la temperatura del reactor, donde estas tienen moderadas covarianzas que promueven de manera inversa el biogás; es decir, si se aumenta el pH y la temperatura por encima de los puntos consignados 6 y 35 °C, es posible que se afecte la producción de biogás. El resto de las variables parecen no tener mayor correlación entre ellas. Por tanto, mayores estudios deben realizarse entre la conductividad, la temperatura y el pH en el proceso de la acidogénesis para lograr una mejor caracterización del proceso.

Figura 11. Matrices de correlación de variables, a) correlación de variables en la primera corrida, b) correlación de variables en la segunda, c) correlación de variables en la tercera y d) al promedio de todas ellas. Donde se encuentra que la conductividad tiene una alta correlación con el volumen acumulado de biogás generado para las condiciones de alimentación enunciadas anteriormente. La segunda variable de interés es el pH contra la temperatura del reactor, donde estas tienen moderadas covarianzas que promueven de manera inversa el biogás; es decir, si se aumenta el pH y la temperatura por encima de los puntos consignados 6 y 35 °C, es posible que se afecte la producción de biogás. El resto de las variables parecen no tener mayor correlación entre ellas. Por tanto, mayores estudios deben realizarse entre la conductividad, la temperatura y el pH en el proceso de la acidogénesis para lograr una mejor caracterización del proceso.



Fuente: Elaboración propia

Balance energético

La determinación de la energía neta producida en un biorreactor de DA que genera hidrógeno (H₂) implica un análisis microscópico del balance energético. Este balance se establece como la diferencia entre la energía contenida en el gas producido por unidad de volumen del biorreactor y la energía utilizada para mantener las condiciones de reacción. Es im-

portante mencionar que este análisis puede realizarse tanto en ejecuciones por lotes como en operaciones continuas, cada una con sus propias consideraciones.

Para lograr una comparación significativa, se establece un volumen de referencia y un período de tiempo de referencia para calcular cada término del balance energético

$$E_{neta} = E_{H2} - (E_C + E_p + E_A + E_B) \quad (2)$$

Donde;

E_{neta} = Energía del sistema

E_{H2} = Densidad energética del hidrógeno molecular producido durante el proceso de digestión.

E_C = Energía requerida para el proceso de tratamiento térmico.

E_p = Energía perdida en el proceso, se puede asumir como entropía global del sistema (reacción bioquímica, pérdidas mecánicas, pérdidas térmicas).

E_A = Energía requerida por el agitador.

E_B = Energía requerida por el sistema de bombeo.

La transferencia de calor para la combustión completa de hidrógeno en aire a 25 °C y 1 atm, con agua en su fase líquida en los productos, es -571.66 kJ, lo que significa que la reacción es exotérmica y esa cantidad de calor se libera al entorno. Si esta energía fuera consumida de manera regulada, la generación de hidrógeno molecular durante la acidogénesis varía según distintos autores en función de la concentración de azúcares iniciales (Mateus et al., 2020), esto quiere decir que la cantidad de hidrógeno puede ir desde el 10 % al 34 % de concentración volumétrica de biogás generado en esta etapa. Bajo la consideración anterior, si asumimos los parámetros máximos y mínimos mencionados y con la producción promedio de este estudio, se obtiene un rango menor de 2.5 litros por el

10% de una concentración mínima dando 250 Nml de hidrógeno y para un caso máximo de 850 Nml de hidrógeno molecular. Así pues, la equivalencia energética producida en esta primera etapa de digestión anaerobia también se puede utilizar como fuente de energía renovable (valor energético de 12.71 kJ L⁻¹) (Mateus et al., 2020) ofreciendo un máximo potencial de 10.80 kJ. Lo que está muy por debajo de la energía consumida por el sistema de monitoreo y del mismo biorreactor minifors, aun siendo quemada en presencia de oxígeno para generar una combustión.

Conclusiones

Las distintas fuentes productivas agroalimentarias generan de manera inherente residuos que no siempre son debidamente aprovechados. En el caso de la industria del tequila no es la excepción; su alta demanda nacional e internacional implica una gran cantidad de agave procesado y, en consecuencia, grandes cantidades de vinazas son desechadas. El presente estudio procura dar una aproximación de monitoreo y control de variables importantes en los procesos de DA. En el caso particular, se simuló una solución mineral rica en glucosa, aproximando la dieta ideal que propone la literatura. En este caso de estudio, se evidenció que el incremento de la conductividad electrolítica es acorde con la acetogénesis, con una producción paralela de ácidos que aumentan la conductividad y, en consecuencia, la generación de biogás. Si bien este biogás no fue perfilado mediante cromatografía, tiene una tendencia a una estabilización después de las 30 horas. Lo que nos permite sugerir que, en efecto, la generación de hidrógeno está presente en este proceso. Estudios adicionales e implementación de sistemas más robustos permitirán escalar estas configuraciones a un método productivo en semicontinuo y continuo para distintas fuentes de sustratos orgánicos de segunda generación, tales como los subproductos del proceso de elaboración del tequila, y contribuyendo al desarrollo de ciclos económicos más completos.

Referencias

Aceves-Lara, C., Latrille, E., Conte, T., & Steyer, J. (2012). Online estimation of VFA, alkalinity and bicarbonat e concentrations by electrical conductivity measurement during anaerobic fermentation. *Water*

- Science & Technology*, 65(7), 1281-1289. <https://doi.org/10.2166/wst.2012.703>
- Gómez-Camperos, J. A., Regino-Ubarnes, F. J., & Jaramillo, H. Y. (2022). Desarrollo de un sistema de supervisión de las variables de temperatura, presión y pH en un Biodigestor Anaeróbico. *Revista Ingenio*, 19(1), 37–42. <https://doi.org/10.22463/2011642x.3035>
- Hermida Balboa C Catalina, & Domínguez Somonte Manuel. (2014). Economía circular como marco para el ecodiseño: el modelo ECO-3. *Informador Técnico* (Colombia), 78(1).
- INFORS HT. (2023). minifors2. <https://www.infors-ht.com/es/biorreactores/biorreactor-de-sobremesa/minifors2/>
- Khanal, S. Kumar. (2008). *Anaerobic biotechnology for bioenergy production : principles and applications*. Wiley-Blackwell.
- Marín-Peña, O., Alvarado-Lassman, A., Vallejo-Cantú, N. A., Juárez-Barojas, I., Rodríguez-Jarquín, J. P., & Martínez-Sibaja, A. (2020). Electrical conductivity for monitoring the expansion of the support material in an anaerobic biofilm reactor. *Processes*, 8(1). <https://doi.org/10.3390/pr8010077>
- Mateus, S., Carvalheira, M., Cassidy, J., Freitas, E., Oehmen, A., & Reis, M. A. M. (2020). Two-stage anaerobic digestion system treating different seasonal fruit pulp wastes: Impact on biogas and hydrogen production and total energy recovery potential. *Biomass and Bioenergy*, 141, 105694. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105694>
- Ntaikou, I. (2021). Microbial production of hydrogen. In *Sustainable Fuel Technologies Handbook*. INC. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822989-7.00011-1>
- Rosato, M. A. (2018). *Managing Biogas Plants “A practical Guide”* (CRS Press, Ed.; 1st ed.). Taylor & Francis Group.
- Ruggeri, B., Tommasi, T., Sanfilippo Bioh, S., & Bioch, &. (2015). *Green Energy and Technology Through Anaerobic Digestion From Research to Full-scale Applications*. <http://www.springer.com/series/8059>
- Vera Romero, I., Estrada Jaramillo, M., González Vera, C., & Tejeda Jiménez, M. (2016). Biogás como una fuente alternativa de energía primaria para el Estado de Jalisco, México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, XVIII(3), 307–320.