

Diseño y Construcción de Agitadores Magnéticos para Proyecto de Evaluación de Biogás en las Islas Galápagos

Design and Construction of Magnetic Stirrers for Biogas Evaluation Project in the Galapagos Islands

Gabriel Bobadilla Carreño^a, Roberto Escutia Fernández^b, Marco Antonio Barceló Rendón^b, Oscar Emilio Báez Anaya^c, Gabriel Gonzalo Ahumada Miranda^c, Edgar Alberto Vélez-Pineda^d, Cecilia del Carmen Puertas Donoso^e, José Luis Zavala Aguirre^{f,*}, Marcos Alfredo Hernández Ortega^{g,*}

^a Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Guadalajara

^b Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Universidad Autónoma de Guadalajara

^c Facultad de Ingeniería Mecatrónica, Universidad Autónoma de Guadalajara

^d Agencia de Regulación y Control de la Bioseguridad y Cuarentena para Galápagos

^e Universidad Internacional del Ecuador UIDE

^f Departamento de Biotecnológicas y Ambientales, Universidad Autónoma de Guadalajara

^g Departamento de Electromecánica, Universidad Autónoma de Guadalajara

* autor por correspondencia

marcos.hernandez@edu.uag.mx; jzavala@edu.uag.mx

RESUMEN

Las islas Galápagos es un archipiélago ecuatoriano muy importante por su gran biodiversidad y endemismo y ha sido declarado Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO desde 1978. Sin embargo, a lo largo de muchos años, se han introducido diversas especies de plantas exóticas que afectan al ecosistema local poniendo en peligro a la fauna y flora nativas. Como una alternativa para su eliminación, se ha propuesto un proyecto para la evaluación del aprovechamiento de las plantas exóticas para la producción de biogás y composta, lo cual daría un beneficio económico adicional. Dentro de la propuesta mencionada, se tiene una importante condición de diseño: evitar la precipitación de los componentes en los digestores por medio de agitadores magnéticos. En este artículo, se propone el diseño y construcción de agitadores magnéticos de bajo costo, fácil mantenimiento y alta practicidad que puedan ser utilizados durante varios meses, proporcionando alta confiabilidad en su operación. Se presenta la metodología para la selección de sus componentes, su construcción y una comparación contra una alternativa comercial. El modelo de agitador magnético propuesto posee las características apuntadas, teniendo aproximadamente el 25% del tamaño entre el 20-25% de masa de un agitador magnético comercial, así como un 200% de alcance magnético y representando como máximo el 66% del costo. Los agitadores magnéticos construidos se usaron de forma continua durante aproximadamente 14 semanas en el laboratorio de la Agencia de Bioseguridad de las Islas Galápagos (ABG) en la Isla Santa Cruz, demostrando así su utilidad y confiabilidad. Un análisis de su rendimiento mediante la bitácora del proyecto de producción de biogás es proporcionado como evidencia de esto. La presente propuesta constituye una alternativa práctica, sencilla y de bajo costo que puede facilitar la implementación de experimentos de evaluación de producción de biogás en diversos entornos.

Palabras clave: agitador magnético, biogás, islas Galápagos, plantas exóticas.

2. Limitante de tamaño y logística: El diseño del experimento debía realizarse en México, mientras que la implementación debía ser realizada en las Islas Galápagos. Por esta razón, muchos materiales tendrían que ser trasladados por paquetería, donde el peso y el volumen son factores que determinan los costos y el tiempo de envío.
3. Tamaño del experimento: Durante el experimento, se tuvieron 39 mini reactores anaeróbicos del tamaño de una botella de plástico de 600 ml. Todos ellos debían ser mantenidos en un contenedor de plástico de 73×42×35 cm, abarcando una superficie de 0.3 m². Cada mini reactor debía contener una pastilla magnética (Fisher®, barra magnética octagonal de PTFE de 1/2 x 5/16 pulgada), la cual debía permanecer en movimiento durante toda la duración del experimento.
4. Duración del experimento y confiabilidad: El experimento planteado requería del funcionamiento continuo del esquema de agitación magnética durante aproximadamente 14 semanas y debía ser de fácil reparación y confiable ante los posibles imprevistos.

Tomando en cuenta los puntos anteriores, se procedió a evaluar opciones comerciales y de desarrollos tecnológicos similares. Dentro de la opción comercial, se observó que un equipo de agitación magnética con simple control de velocidad y temperatura se cotiza en el mercado a un precio de entre 1000 y 4500 pesos mexicanos, y cuyo radio de acción generalmente está limitado a las sustancias colocadas sobre su placa.

Por otro lado, se tienen algunos desarrollos tecnológicos en el estado del arte, los cuales se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Diseños de agitadores magnéticos encontrados en el estado del arte.

Referencia	Características
(Guidote et al., 2015)	Fabricado con materiales reciclados de CPUs y elementos de tarjetas electrónicas. Con rotación y placa de calentamiento. Costo de 29 USD. Dimensiones: 23×7×47 cm. Se probó por 8 horas seguidas durante 5 días.
(Mercer et al., 2017)	Utilizando partes recicladas de computadores y un microcontrolador Arduino. Costo total de alrededor de 40 USD. Diseñado para aplicaciones en miniatura.
(De Paula et al., 2018)	Propone la reparación de agitadores magnéticos dañados para su reúso.
(Subratti et al., 2020)	Fabricado con partes recicladas. Costo de alrededor de 17.5 USD.

Como se puede notar de la Tabla 1, la gran mayoría de los diseños publicados se enfoca en el modelo clásico de agitador magnético en cuanto a tamaño y funciones, a excepción de Mercer et al., (2017). Además, la gran mayoría de los diseños se basa en el reúso de partes de computadoras o de tarjetas electrónicas y no se evalúa su uso ante condiciones de altos ciclos de trabajo. En contraste con estas observaciones, en el diseño requerido se puede descartar la función térmica y deben priorizarse su ligereza, su tamaño compacto y el área de influencia. Por lo tanto, un nuevo diseño de agitador magnético es necesario.

En este artículo, se presenta el proceso de diseño y construcción de un agitador magnético que cumpla con las condiciones enumeradas anteriormente. Para su validación, se presenta una comparación contra un agitador magnético comercial y se evalúa el potencial de uso de ambas opciones dentro del marco del proyecto de evaluación de AME en Islas Galápagos. Finalmente, se evaluó el arreglo de disposición geométrica de los agitadores que fue aplicado durante 14 semanas continuas en el proyecto antes mencionado. La bitácora de actividades del proyecto también fue usada como evidencia del desempeño de los agitadores.

En las siguientes secciones del artículo, la información se encuentra organizada de la siguiente manera: La sección 2 presenta un análisis de la estructura general de los agitadores magnéticos y su uso. En la sección 3 se desglosa el proceso de diseño del agitador magnético propuesto. La sección 4 contiene los resultados y su discusión. Finalmente, la Sección 5 contiene las principales

conclusiones del trabajo, así como posibles aplicaciones futuras.

2. Agitadores magnéticos

Los agitadores magnéticos son uno de los equipos más comúnmente usados para la realización de procesos de reacciones en laboratorio, ya que permiten mantener una cierta temperatura en las sustancias que están reaccionando y asegura la interacción de los reactivos al alcanzar una mezcla homogénea. Además, el uso de una pastilla magnética inocua e inerte evita la interacción de los reactivos con otros materiales ajenos al experimento, que puedan alterar los resultados o contaminar la solución resultante (Cherepanova et al., 2025; Schirmer et al., 2021; Reķēna et al., 2019).

Aunque se ha reportado que su uso puede conllevar a la no reproducibilidad de experimentos relacionados con la síntesis de nanopartículas, en la preparación de catalizadores y en algunas síntesis orgánicas (Cherepanova et al., 2025), su uso sigue siendo generalizado. Además, en varios trabajos recientes como (Gires et al., 2020; Nugraha et al., 2021; Cherkasov et al., 2020), se han presentado mejoras al modelo de agitador magnético convencional para lograr proporcionar las condiciones adecuadas para la realización de algunas reacciones.

Sin embargo, en este trabajo el enfoque ha sido únicamente sobre la función de agitación y con el objetivo de evitar estratificación mediante la rotación de las pastillas magnéticas en los contenedores. Con esto en mente, primero se analiza la estructura general de un agitador magnético convencional, la cual se ilustra en la Figura 1 e incluye únicamente: perilla de control, control de motor, motor e imán.

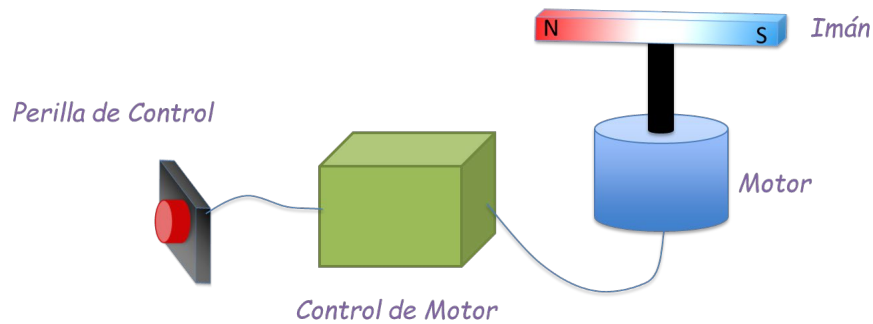


Figura 1. Componentes básicos de un agitador magnético.

A continuación, se describe brevemente el proceso que se siguió para el diseño de los agitadores magnéticos. Cabe destacar que este diseño fue llevado a cabo en el Laboratorio de Electromecánica de la Universidad Autónoma de Guadalajara con ayuda de un grupo interdisciplinario de estudiantes de ingenierías mecatrónica, química y mecánica eléctrica.

3. Proceso de diseño

Para realizar el diseño, se comenzó por partir el problema en 6 partes: (1) imán, (2) acoplamiento imán/motor, (3) motor, (4) control de motor, (5) sistema de alimentación y (6) carcasa y ensamblaje final. En las siguientes subsecciones, se aborda el proceso en cada una de las partes del diseño.

3.1 Selección del imán

Para comenzar el diseño, una parte fundamental fue la selección del imán a utilizar. En este punto, se consideraron dos opciones de imanes: de ferrita y de neodimio. Aunque los imanes de neodimio tienen mayor costo/volumen, pueden generar 5 veces más densidad de campo magnético que los imanes de ferrita (Bernard, 2022), lo cual deriva en una mayor área de influencia/volumen. Debido a esto, se concluyó que los imanes de neodimio son superiores a los imanes de ferrita para cumplir

con la limitante de tamaño/logística.

En el mercado, se encontraron imanes de neodimio de dimensiones 60×10×10mm con un costo aproximado de \$200 pesos mexicanos cada uno y una masa de entre 46 y 48 g, como el ilustrado en la Figura 2, el cual fue seleccionado para el diseño.



Figura 2. Ilustración del imán de neodimio utilizado. Se observan 2 piezas. Tomado de: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Customized-Size-Strong-Cheap-Nikken-Neodymium-1600800217028.html>.

3.2 Selección del motor

El segundo paso de diseño fue seleccionar el motor a utilizar: se seleccionó uno de baja potencia y de fácil control como el que se muestra en la Figura 3. Este dispositivo es un motor de CD de imanes permanentes que cuenta con un motorreductor recto 48:1 y sus especificaciones son: 2 ejes, 3-12 V, 200 mA, a un costo aproximado de \$30 pesos cada uno. La composición en la caja de engranes (color amarillo en Figura 3) es de plástico, por lo que se evitan interacciones con el imán. Además, tiene una masa de 80 g y una velocidad máxima de 200 rpm.



Figura 3. Motorreductor recto 48:1, 2 Ejes; 3-12 V. Tomado de: [https://listado.mercadolibre.com.mx/motorreductor-48%3A1-3-12-v#D\[A:motorreductor%2048:1%203%2012%20v,L:undefined\]&origin=UNKNOWN&as.comp_t=SUG&as.comp_v=pwm%206%2028%20v&as.comp_id=HIS](https://listado.mercadolibre.com.mx/motorreductor-48%3A1-3-12-v#D[A:motorreductor%2048:1%203%2012%20v,L:undefined]&origin=UNKNOWN&as.comp_t=SUG&as.comp_v=pwm%206%2028%20v&as.comp_id=HIS)

3.3 Acoplamiento imán/motor

Una vez seleccionados tanto el motor como el imán, se procedió al diseño de una pieza de acoplamiento entre ellas. Debido a la inexistencia de una pieza comercial, la opción más viable fue diseñarla y construirla por medio de impresión en 3D. Debido a la baja velocidad que se manejaría en los agitadores, a la ausencia de un control de temperatura incluido en el agitador y a la baja masa del imán, en el diseño de esta pieza no consideramos necesario hacer un análisis de

esfuerzo/deformación ni de desempeño ante temperatura. En la Figura 4a, se ilustra la pieza diseñada en el software SolidWorks® y cómo fue utilizada para acoplar el motor y el imán (Figura 4b). El acoplamiento se aseguró únicamente usando un pegamento de uso común.

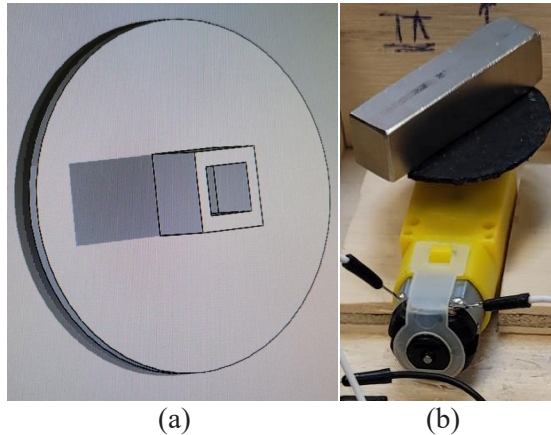


Figura 4. (a) Pieza de acoplamiento. (b) Vista del montaje del imán con el motor.

3.4 Control del motor

En base al motor seleccionado en la Sección 3.2, se evaluó que la mejor opción para su control era el uso de un dispositivo de control PWM (“Pulse Width Modulation”) comercial, como el que se muestra en la Figura 5. El costo de estos controladores fue de aproximadamente \$70 pesos cada uno y es ideal para manejar motores pequeños como el de la Figura 3. El control seleccionado puede trabajar con voltaje de alimentación en un rango de 6 a 28 V, una corriente de salida máxima de 3A y puede regular el voltaje de salida en un rango del 5% al 85% del voltaje de entrada por medio de una perilla. Estas características lo hacen ideal para su aplicación en el control de velocidad de giro del modelo de agitador magnético buscado.



Figura 5. Control de velocidad PWM; 6-28 V. Tomado de: [https://listado.mercadolibre.com.mx/pwm-6-28v#D\[A:pwm%206%2028%20v,L:undefined\]&origin=UNKNOWN&as.comp_t=SUG&as.comp_v=%0A&as.comp_id=HIS](https://listado.mercadolibre.com.mx/pwm-6-28v#D[A:pwm%206%2028%20v,L:undefined]&origin=UNKNOWN&as.comp_t=SUG&as.comp_v=%0A&as.comp_id=HIS).

3.5 Sistema de alimentación

Considerando la necesidad de tener varios agitadores magnéticos trabajando simultáneamente durante un periodo de aproximadamente 14 semanas, se buscó una alternativa de bajo costo pero que pudiera ser muy confiable. Para ello, se decidió reutilizar un cargador de computadora portátil y adaptarle 9 terminales de alimentación para agitadores magnéticos. El sistema de alimentación construido se muestra en la Figura 6, mientras que sus parámetros se presentan en la Tabla 2.

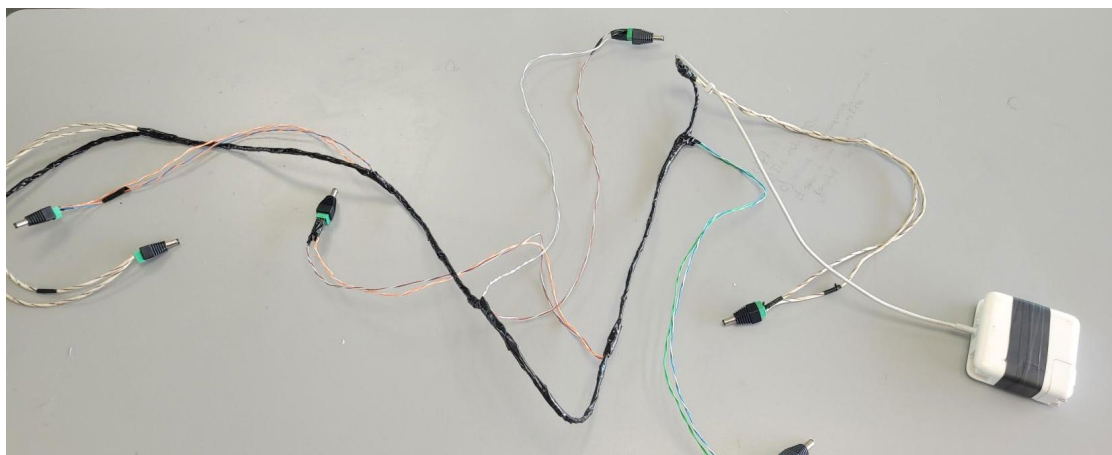


Figura 6. Sistema de alimentación construido (arnés y fuente de poder).

Tabla 2. Parámetros de la fuente de alimentación construida.

Parámetro	Valor
Voltaje de entrada	120 V CA
Voltaje de salida	20 V CD
Potencia máxima	60 W
Corriente máxima total	3 A
Número de salidas	7

3.6 Carcasa y ensamblaje final

parte final del diseño del agitador magnético consistió en el ensamblaje final y la construcción de una carcasa. Debido a su bajo costo, propiedades paramagnéticas y rigidez, se eligió madera triplay como material de construcción. Usando otras piezas de madera y pegamento de uso común, se fijaron las partes del agitador magnético, como se puede ver en la Figura 7.

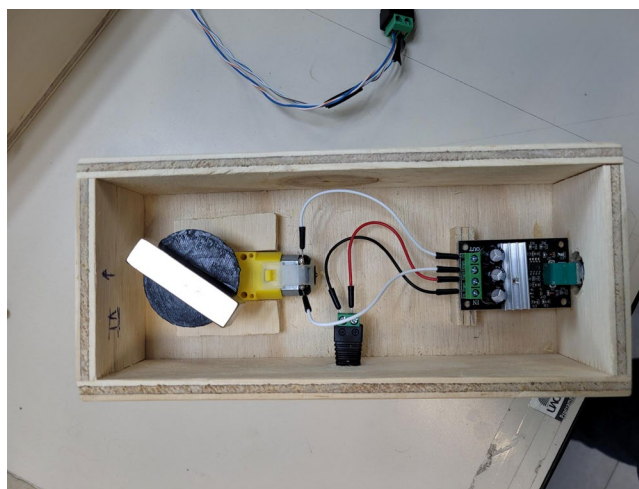


Figura 7. Ensamblaje de los componentes del agitador magnético dentro de la carcasa de madera.

En la siguiente sección, se presenta una comparación entre el agitador magnético construido y un par de agitadores magnéticos comerciales. Además, se describe el desempeño del diseño propuesto en una aplicación real en Islas Galápagos.

4. Resultados

4.1 Carcasa y ensamblaje final

Con el objetivo de validar el modelo propuesto respecto al cumplimiento de los requerimientos expuestos en la Sección 1, se realizó una comparación contra dos agitadores comerciales: el Felisa® FE- 310 y el Benchmark Scientific® H3760-HS.

Primero, en la Tabla 3 se presenta una comparación respecto a propiedades físicas de los dos modelos comerciales y el modelo de agitador magnético construido. Los valores reportados fueron tomados de los datos del fabricante (Felisa, s.f.), (Benchmark Scientific, s.f.). Como se puede apreciar, el modelo propuesto es superior en términos de ligereza, volumen y masa.

Tabla 3. Parámetros de la fuente de alimentación construida.

Modelo	Dimensiones (cm)	Volumen (cm ³)	Masa (Kg)	Potencia
Modelo propuesto	6×22×10	1,320	0.5	2.4 W
Felisa FE-310	18×23×12	4,968	2.5	10 W
Benchmark Scientific H3760-HS	17.78×26.67×10.16	4,817.8	2.072	500 W

Además de la comparación de la Tabla 3, respecto a costos, una de las opciones más baratas en el mercado es el agitador Xin Tester® XT-MS-5L con un precio de alrededor de \$600 pesos mexicanos, mientras que el costo del agitador magnético propuesto fue de \$400 pesos mexicanos (66% de la opción más barata). En este proyecto, se construyeron 7 agitadores. En la Tabla 4 se presenta el desglose de los materiales y sus precios en el mercado local.

Tabla 4. Lista de materiales utilizados y sus precios (MXN \$).

Concepto	Costo
Hoja de madera de triplay	\$ 200
14 juegos de terminales plug	\$ 150
7 imanes de neodimio	\$ 1,400
7 controladores PWM	\$ 490
7 motorreductores	\$ 210
1 cargador AC / DC (equipo reciclado)	\$ 0.0
Materiales varios (broca, lija, engrapadora, pegamento)	\$ 350
Total	\$ 2,800

Este costo total representa tan solo un 14% del presupuesto asignado. Lo anterior llevó al cumplimiento de otro de los objetivos: bajo costo. Para ahondar más en este aspecto, se realizó un análisis de alcance del agitador propuesto y del agitador Benchmark Scientific® H3760-HS. En esta prueba, se utilizó una pastilla magnética de 12.7×8mm (Fisherbrand®, Grado FDA con cubierta de Teflón®) dentro de un recipiente de plástico y se evaluó el radio de acción donde el agitador logra que la pastilla magnética realice rotaciones. El resultado obtenido fue que el agitador propuesto tiene un radio de acción de 15 cm, mientras que el modelo H3760-HS tiene un radio de 7.5 cm. Este dato es utilizado en la siguiente subsección para continuar la comparación de ambos modelos en el marco del proyecto de evaluación de AME en las Islas Galápagos.

4.2 Caso de aplicación: Evaluación de AME en las Islas Galápagos

En el marco del proyecto mencionado en la Sección 1, primero se evaluó la cantidad de agitadores magnéticos necesarios para cubrir el tamaño del experimento (aproximadamente 3000 cm²). Los resultados obtenidos se encuentran en la Tabla 5, donde el cálculo de cuántos agitadores se requeriría para el proyecto se hizo de una manera muy simple: (Área del experimento) / (Área de acción del agitador).

Tabla 5. Comparación del agitador construido contra el modelo Benchmark Scientific® H3760-HS en el marco del proyecto de evaluación de AME en las Islas Galápagos.

Modelo	Área de Acción (cm ²)	Cantidad de Agitadores Requeridos
Modelo Propuesto	707	5
Benchmark Scientific H3760-HS	176.72	17

Como se puede notar de los resultados de la Tabla 5, además de ser más barato de fabricar, el modelo propuesto requeriría menor cantidad de agitadores para el caso de aplicación considerado. Por otro lado, aunque el cálculo de la cantidad de agitadores necesarios se hizo de manera muy simplificada, se comprobó empíricamente que un arreglo de 5 agitadores magnéticos fue suficiente para mover los 39 biorreactores del experimento. En la Figura 8 se muestra una fotografía del prototipo básico ensamblado en laboratorio (agitadores, fuente de poder, caja contenedora, biorreactores con pastilla magnética). Cabe resaltar que algunas pastillas magnéticas giraban en un plano paralelo al campo magnético y otras lo hacían en un plano perpendicular, consiguiendo el objetivo de un sistema dinámico en el interior de cada botella para facilitar el rompimiento de posibles estratificaciones físicas y químicas durante el proceso de metanogénesis.

Un aspecto adicional que se evaluó previo al proyecto de aplicación fue la verificación del consumo eléctrico de los agitadores. Al medirlo, se observó un valor aproximado de 0.5 A al arranque y 0.2 A en funcionamiento normal. Si se consideran los 5 agitadores requeridos, la demanda al arranque es de 2.5 A con un voltaje de entre 6 y 28 V, por lo que la fuente de alimentación presentada en la Sección 3.5 es utilizada al 83.33% durante el arranque y al 33.33% durante la operación normal.



Figura 8. Ensamble del prototipo básico y evaluación del desempeño de los agitadores magnéticos diseñados.

Como se mencionó anteriormente, se construyeron en total 7 dispositivos. Basándose en las pruebas anteriores, se consideró destinar 5 al experimento y 2 como respaldo para tener la posibilidad de reemplazo en contingencias; esto con el objetivo de tener una mayor confiabilidad y poder asegurar la meta del experimento. Por lo tanto, los 7 agitadores magnéticos fueron enviados a las islas Galápagos.

El reporte del desempeño se consiguió mediante el registro diario del funcionamiento de los dispositivos AME (Tabla 6), consistente en: A) Verificación del funcionamiento de agitadores por medio del impulso magnético observado al aproximar una pastilla PTFE a la base de cada biorreactor y también por medio de la audición del cambio en la frecuencia del sonido del motor al variar la perilla del control de voltaje y velocidad; B) Aislamiento aeróbico mediante la ausencia de desarrollo de micelios de hongos facultativos dentro de cada biorreactor; C) Acidez en las botellas invertidas mediante la pérdida del color rosa del indicador de fenolftaleína y corrección de pH y alcalinidad por medio de la adición de Ca(OH)₂; D) Medición del gas producido mediante el volumen desplazado en cada botella invertida; E) Composición del gas con muestreo anaeróbico de la cámara superior de cada biorreactor.

El desempeño de los agitadores magnéticos diseñados fue exitoso, ya que se logró el objetivo de mantener

en movimiento las pastillas PTFE que se colocaron dentro de los biorreactores. Únicamente se tuvieron las siguientes dos observaciones:

1. como consecuencia del transporte contratado a la empresa de mensajería y paquetería (“courier”) varios agitadores llegaron bastante golpeados y fue necesario volverlos a armar, pero uno de los equipos ya no funcionó por daño en el motor;
2. Otro de los agitadores presentó ruido excesivo atribuido al desgaste de los engranes del motorreductor y al maltrato durante el transporte, por lo que tuvo que ser retirado a los dos meses de operación y sustituido por uno de los agitadores de respaldo.

Los demás agitadores no presentaron problemas y todo el esquema de agitación del experimento cumplió con el objetivo de confiabilidad. Como se aprecia en la Tabla 6, el reporte con más incidencia fue el ajuste semanal del pH en la solución alcalina de las botellas invertidas en todos los reactores (C); esta condición, más que un problema, es una característica natural por la actividad microbiológica dentro de los biorreactores por la generación de gases ácidos (H₂, CO₂) que son atrapados en la solución alcalina (Torres-Lozada y Pérez, 2010). Un segundo reporte fue la sustitución del agitador con exceso de ruido (A) que se realizó en el día 54 (S8-D7). Un tercer reporte fue la corrección del aislamiento aeróbico (B) de uno de los reactores, realizado el día 64 (S10-D3). Finalmente, el último reporte fue la corrección de una de las botellas invertidas para la medición del volumen de metano producido, la cual se vació por completo debido a la pérdida de aislamiento en una de las mangueras (D); el evento ocurrió el día 83 (S13-D1).

Tabla 6. Eventos que requirieron atención durante la rutina diaria de mantenimiento* de los reactores durante los 100 días de operación del proyecto.

Semana/Día	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7
S1	Montaje		-	-	-	C	-
S2	-	-	-	-	-	C	-
S3	-	-	-	-	-	C	-
S4	-	-	-	-	-	C	-
S5	-	-	-	-	-	C	-
S6	-	-	-	-	-	C	-
S7	-	-	-	-	-	C	-
S8	-	-	-	-	-	C	A
S9	-	-	-	-	-	C	-
S10	-	-	B	-	-	C	-
S11	-	-	-	-	-	C	-
S12	-	-	-	-	-	C	-
S13	D	-	-	-	-	C	-
S14	-	-	-	-	-	C	-
S15	-	-	-	-	-	Término	

* A) Funcionamiento de agitadores; B) Aislamiento aeróbico; C) Corrección de pH y alcalinidad; D) Volumen de gas producido; E) Composición del gas. La ausencia de eventos es indicada con el símbolo “-”.

5. Conclusiones

En este artículo, se presentó el diseño y construcción de un modelo de agitador magnético de bajo costo, mayor alcance, ligero y de fácil ensamblaje; todas estas fueron características necesarias para la realización de un proyecto de evaluación de actividad metanogénica específica (AME) con flora exótica en las Islas Galápagos. En comparación con algunos diseños anteriores y agitadores

comerciales, el diseño propuesto cumplió con todos los puntos mencionados. En particular, la comparación contra modelos comerciales mostró que el modelo propuesto tiene un 25% del tamaño de los agitadores comerciales, entre el 20% y el 25% de su masa y un 100% más de radio de alcance, además de tener un costo de alrededor del 66% del agitador comercial más barato. Para el diseño, se usaron materiales de fácil acceso y de uso común, asegurando su fácil construcción y mantenimiento. La evaluación de la utilidad del diseño alcanzado se realizó en laboratorio con un prototipo básico del experimento de evaluación de AME, demostrando la necesidad de solo 5 agitadores magnéticos construidos, en lugar de 17 agitadores comerciales. Para asegurar la confiabilidad del esquema de agitación magnética propuesto, se fabricaron 2 dispositivos adicionales, dando un total de 7 agitadores magnéticos.

Para la validación final en campo, los 7 agitadores magnéticos fueron enviados a las Islas Galápagos y en el trayecto uno de ellos resultó dañado e inhabilitado, evidenciando la baja robustez y resistencia física ante las condiciones del traslado. De los 6 restantes, uno de ellos tuvo fallas y fue retirado a los 2 meses, presumiblemente debido a consecuencias del traslado. Los demás dispositivos funcionaron sin presentar fallas y permitieron la exitosa realización del proyecto.

Con esto, se mostró que el diseño propuesto fue adecuado para las condiciones específicas que se tuvieron. Para futuras aplicaciones, se recomienda mejorar la robustez física del diseño para garantizar condiciones de traslado. Sin embargo, el agitador magnético construido representa una gran oportunidad para lograr la realización de experimentos de gran tamaño y larga duración. De esta forma se puede extender el alcance y la viabilidad de este tipo de proyectos. Se espera la utilización de este modelo de agitador en futuros proyectos similares.

Financiamiento y/o Agradecimientos

El presente artículo científico es el resultado del proyecto “Compost production based on biomass from exotic plants at Galapagos Islands” con código UIDE-DGIP-MAT-PROY-EXTR-22-01 financiado con el Programa de Fondos Concursables Convocatoria extraordinaria 2022 de la Universidad Internacional del Ecuador – UIDE.

Conflictos de interés

No se declaran conflictos de interés.

Contribución de autores

Gabriel Bobadilla Carreño participó en forma directa en el trabajo de laboratorio en las Galápagos utilizando y haciendo los registros del desempeño de los agitadores magnéticos. Roberto Escutia Fernández, Marco Antonio Barceló Rendón, Oscar Emilio Báez Anaya, Gabriel Gonzalo Ahumada Miranda estudiantes de carreras de ingeniería, colaboraron en el diseño y construcción de los agitadores magnéticos. Edgar Alberto Vélez-Pineda participó en la gestión para que la agencia ABG prestara el laboratorio en el cual se llevó a cabo la investigación; participó como revisor del manuscrito. Cecilia del Carmen Puertas Donoso es coautor intelectual del proyecto apuntado en la sección de financiamiento; participó como revisor del manuscrito. José Luis Zavala Aguirre es coautor intelectual del proyecto apuntado en la sección de financiamiento, participó como analista de los datos y como redactor principal del presente manuscrito. Marcos Alfredo Hernández Ortega coordinó el trabajo de diseño y construcción realizado por los estudiantes de ingeniería y participó como redactor principal del presente manuscrito. José Luis Zavala Aguirre y Marcos Alfredo Hernández Ortega comparten los créditos como autores para correspondencia del presente manuscrito.

Referencias (APA 7)

- Aquino, S.F., Chernicharo, C.A.L., Foresti, E., Florêncio, L., Montegia, L.O. (2007). Metodologias para determinação da atividade metanogênica específica (AME) em lodos anaeróbios. *Eng San Amb*, 12, 192–201. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522007000200010>.
- Benchmark Scientific (s.f.) *Digital Hotplates, Stirrers, & Hotplates. Manual de operación.*

- Disponible en:
https://res.cloudinary.com/iwh/image/upload/q_auto,g_center/assets/1/26/Benchmark_Digital_Hotplates_Stirrers_User_Manual.pdf
- Bernad, S., & Bernad, E. (2022). Magnetic Forces by Permanent Magnets to Manipulate Magnetoresponsive Particles in Drug-Targeting Applications. *Micromachines*, 13. <https://doi.org/10.3390/mi13111818>.
- Bobadilla-Carreño G. (2024). *Determinación del potencial metanogénico de sustratos a partir de diferentes especies de plantas invasivas en las islas Galápagos* [Tesis de Licenciatura no publicada]. Universidad Autónoma de Guadalajara.
- Bobadilla-Carreño, G., Lomelí-García, S., Guzmán-Quezada, E.E., del Carmen Puertas-Donoso, C., Aguilar-Juárez, Ó., Zavala-Aguirre, J.L. (2025). Design and Evaluation of a Low-Cost Methane Concentration Measurement Prototype Using Sensor Integration and Gas Chromatograph Calibration. En Espinoza-Andaluz, M., Santana-Villamar, J., Ordóñez-Saca, B., Vallejo-Cervantes, C., & Rodríguez-Álava, L. (Eds), *Congress on Research, Development and Innovation in Renewable Energies* (Green Energy and Technology). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-88995-0_14
- Cherepanova, V. A., Gordeev, E. G., & Ananikov, V. P. (2025). Magnetic Stirring May Cause Irreproducible Results in Chemical Reactions. *JACS Au*, 5(8), 3789-3798. <https://doi.org/10.1021/jacsau.5c00412>.
- Cherkasov, N., Baldwin, S., Gibbons, G., & Isakov, D. (2020). Monitoring chemistry in situ with the Smart Stirrer - a magnetic stirrer bar with an integrated process monitoring system. *ACS sensors*. <https://doi.org/10.1021/acssensors.0c00720>.
- Cooper D., & Vega-Delgado G. (2023). *Potential By-products from the Harvesting of Introduced Plants in Galápagos Islands*. Small-scale funding agreement between the Secretariat of the Convention on Biological Diversity by the United Nations Environment Programme and Universidad Internacional del Ecuador.
- De Paula, L. F., & Ruggiero R. (2018) Teaching Students How To Troubleshoot, Repair, and Maintain Magnetic Stirring Hot Plates Using Low-Cost Parts or Repurposed Materials. *Journal of Chemical Education*, 95 (11), 2050-2054. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.8b00267>.
- Felisa. (s.f.) *Instructivo de operación para agitadores magnéticos*. <http://felisa.com.mx/uploads/6830bc6fbc3580245c78e4d2c06ea070.pdf>
- Gires, P., Thampi, M., & Weiss, M. (2020). Miniaturized magnetic stir bars for controlled agitation of aqueous microdroplets. *Scientific Reports*, 10. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-67767-z>.
- Guidote, A., Pacot, G., & Cabacungan, P. (2015). Low-Cost Magnetic Stirrer from Recycled Computer Parts with Optional Hot Plate. *Journal of Chemical Education*, 92 (1), 102-105. <https://doi.org/10.1021/ED500153R>.
- Jäger, H., Tye, A. & Kowarik, I. (2007). Tree invasion in naturally treeless environments: Impacts of quinine (*Cinchona pubescens*) trees on native vegetation in Galápagos. *Biological Conservation*, 140 (3-4), 297-307. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.08.014>
- Laso, F.J.; Benítez, F.L.; Rivas-Torres, G.; Sampedro, C.; Arce-Nazario, J. (2020). Land Cover Classification of Complex Agroecosystems in the Non-Protected Highlands of the Galapagos Islands. *Remote Sens*, 12(65). <https://doi.org/10.3390/rs12010065>
- Mercer, C. & Leech, D. (2017) Inexpensive Miniature Programmable Magnetic Stirrer from Reconfigured Computer Parts. *Journal of Chemical Education*, 94(6), 816-819. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00395>.
- Nugraha, I., Mahardiananta, I., Putra, P., & Adnyana, I. (2021). Magnetic Stirrer with Speed Advisor and Timer Based on Microcontroller. *Journal of Robotics and Control*. <https://doi.org/10.18196/jrc.v3i1.11279>.
- Reķēna, A., Didrihsone, E., & Veģere, K. (2019). The role of magnetic field in the biopharmaceutical production: Current perspectives. *Biotechnology Reports*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00334>.
- Schirmer, C., Maschke, R. W., Pörtner, R., & Eibl, D. (2021). An overview of drive systems and sealing types in stirred bioreactors used in biotechnological processes. *Applied Microbiology and*

- Biotechnology*, 105, 2225-2242. <https://doi.org/10.1007/s00253-021-11180-7>
- Subratti, A., Lalgee, L., & Jalsa, N. (2020). Robust, Efficient, and Economical Magnetic Stirrer: A Device Based on Pulsed Width Modulation, Built Using Mainly Recycled Parts. *Journal of Chemical Education*, 97(1), 305-307. <https://doi.org/10.1021/acs.jchemed.9b00395>.
- Torres-Lozada, P., & Pérez, A. (2010). Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales. *Ingeniería de Recursos Naturales y del Ambiente*, (9),5-14 <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=231116434001>