

Design and experimental evaluation of a renewable energy-assisted fermentation system with wind agitation and magnetic braking for thermal uniformity

Pascual-Panduro, Paolo¹; Damas-Flores, Carlos¹; Castro-Vidal, Raul¹; Tabacchi-Murillo, Jesus¹; Ramos-Palacios, Wilder²; Narciso-Gomez, Kennedy¹; Narciso-Huaccho, Yuleissi-Xiomara³

¹Universidad Nacional del Callao - (PE), Perú, cppascualp@unac.edu.pe; mcdamasf@unac.edu.pe; rpeastrov@unac.edu.pe; jatabacchim@unac.edu.pe; knarcisog@unac.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos - (PE), Perú, wramosp@unmsm.edu.pe

³Universidad Ricardo Palma - (PE), Perú, yuleissi.narciso@urp.edu.pe

Abstract— *Small- and medium-scale fermentation processes often present problems of thermal stratification and energy dependence due to the use of agitators and thermal systems powered by conventional electricity. This article presents the design and pilot-scale experimental evaluation of a renewable energy-assisted fermentation system that integrates: (i) two thermal tanks (primary for heating and secondary for cooling), (ii) wind-powered agitation with electrical recovery via a generator/charger, and (iii) servomotor-controlled magnetic braking to stabilize mixing speed under wind variations. Performance metrics were established in terms of thermal uniformity (ΔT), agitation stability (RPM), energy balance (E_{rec} , E_{cons}), and overall efficiency (η). The results indicate that wind agitation reduces thermal stratification from $\Delta T=5.4$ °C (without agitation) to $\Delta T=0.8$ °C with magnetic braking, and that the system recovers around 94% of its electrical demand in a 6-hour cycle under moderate wind conditions.*

Keywords— *fermentation, renewable energies, agitation, magnetic braking, thermal control.*

Diseño y evaluación experimental de un sistema de fermentación asistido por energía renovable con agitación eólica y frenado magnético para uniformidad térmica

Pascual-Panduro, Paolo¹; Damas-Flores, Carlos¹; Castro-Vidal, Raul¹; Tabacchi-Murillo, Jesus¹; Ramos-Palacios, Wilder²; Narciso-Gomez, Kennedy¹; Narciso-Huaccho, Yuleissi-Xiomara³

¹Universidad Nacional del Callao - (PE), Perú, cppascualp@unac.edu.pe; mcdamasf@unac.edu.pe; rpcastrov@unac.edu.pe; jatabacchim@unac.edu.pe; knarcisog@unac.edu.pe

²Universidad Nacional Mayor de San Marcos - (PE), Perú, wramosp@unmsm.edu.pe

³Universidad Ricardo Palma - (PE), Perú, yuleissi.narciso@urp.edu.pe

Resumen— Los procesos de fermentación en pequeña y mediana escala suelen presentar problemas de estratificación térmica y dependencia energética debido al uso de agitadores y sistemas térmicos alimentados por electricidad convencional. Este artículo presenta el diseño y la evaluación experimental a escala piloto de un sistema de fermentación asistido por energía renovable que integra: (i) dos tanques térmicos (primario para calentamiento y secundario para enfriamiento), (ii) agitación accionada por energía eólica con recuperación eléctrica mediante un generador/cargador, y (iii) un frenado magnético controlado por servomotores para estabilizar la velocidad de mezcla bajo variaciones de viento. Se establecieron métricas de desempeño en términos de uniformidad térmica (ΔT), estabilidad de agitación (RPM), balance energético (E_{rec} , E_{cons}) y eficiencia global (η). Los resultados indican que la agitación eólica disminuye la estratificación térmica de $\Delta T=5,4$ °C (sin agitación) a $\Delta T=0,8$ °C con frenado magnético, y que el sistema recupera alrededor del 94 % de su demanda eléctrica en un ciclo de 6 horas en condiciones de viento moderado.

Palabras clave— fermentación, energías renovables, agitación, frenado magnético, control térmico.

I. INTRODUCCIÓN

La inocuidad y calidad en las industrias alimentaria, farmacéutica y bioenergética están supeditadas al control de los procesos biotecnológicos. Entre ellos, la fermentación es un proceso clave para generar alimentos funcionales, bebidas fermentadas, enzimas, antibióticos, biocombustibles, entre otros productos de alto valor agregado. En tales procesos, mínimas variaciones de procedimiento pueden alterar la estabilidad microbiológica, la reproducibilidad y las características fisicoquímicas del producto final [1], [2].

La eficiencia del proceso fermentativo depende en gran medida del control de variables tales como temperatura, régimen de agitación, tiempo de residencia y, en el caso de microorganismos aerobios, oxígeno disuelto. La temperatura afecta la cinética metabólica y la viabilidad celular, y una buena mezcla promueve la homogeneización térmica, la distribución de nutrientes y la disminución de gradientes locales que pueden inhibir el crecimiento microbiano o generar subproductos no

deseados [3], [4]. En sistemas mal mezclados, la convección natural es insuficiente para eliminar la estratificación térmica y mantener condiciones uniformes de fermentación en el reactor [5].

Para las aplicaciones a gran escala, estos problemas se resuelven con agitadores eléctricos de alto rendimiento, sistemas de transferencia de calor y control automático. Pero en sistemas pequeños y medianos, como los que se encuentran en laboratorios, plantas piloto y agroindustrias rurales, todavía existen grandes limitaciones técnicas y económicas. Entre los problemas más comunes se hallan la estratificación térmica por convección insuficiente, la variación no controlada de la velocidad de agitación, el alto o errático consumo energético y la poca automatización del proceso [6]. Estas fallas impactan en la homogeneidad del proceso, calidad del producto y escalabilidad del sistema.

Además, el uso de fermentadores industriales tradicionales se ve limitado por los altos costos iniciales, los costos de mantenimiento especializado y la dependencia de una fuente constante de energía. Esto es particularmente importante en lugares rurales o descentralizados que no tienen acceso a electricidad o donde la red es inestable, como ocurre en el Perú y otros países en vías de desarrollo [7], [8]. En este sentido, la integración de fuentes renovables de energía es una solución para disminuir la dependencia energética y mejorar la resiliencia operativa de los sistemas fermentativos.

Entre las fuentes renovables, la eólica es de bajo impacto ambiental, disponible en áreas rurales y capaz de ser utilizada directamente en aplicaciones mecánicas de baja potencia. Tradicionalmente, esta fuente se ha aplicado en sistemas de bombeo y ventilación, y más recientemente en aplicaciones mecatrónicas distribuidas [9]. Pero su propia naturaleza variable crea problemas de estabilidad del régimen de agitación que pueden afectar la uniformidad térmica y el control de la fermentación.

Para atenuar estos efectos, el uso de mecanismos de frenado magnético es una alternativa interesante para controlar la velocidad de giro. Este tipo de sistemas puede controlar y

estabilizar la velocidad a través de interacciones electromagnéticas sin contacto mecánico, disminuyendo el desgaste, mejorando la estabilidad dinámica y permitiendo un control ante perturbaciones externas, tales como cambios en la velocidad del viento [10]. Su uso en agitadores movidos con energía renovable es una nueva solución para procesos sensibles al régimen de mezcla.

En este artículo se diseña y prueba a escala piloto un sistema de fermentación asistido por energía renovable que combina: (i) una arquitectura de doble tanque térmico para procesos de calentamiento y enfriamiento controlados, (ii) un sistema de agitación eólica con recuperación eléctrica para alimentar componentes auxiliares y (iii) un sistema de frenado magnético servoaccionado para mantener constante la velocidad de agitación en condiciones variables de viento. El estudio de energía reveló que el sistema puede usar de nuevo casi el 94 % de la energía eléctrica que se usa en un ciclo de trabajo de 6 horas. Así, se necesita menos energía eléctrica de fuentes externas.

Si lo comparamos con las formas comunes de fermentación de alimentos que usan electricidad de la red, este sistema ofrece una temperatura uniforme y un funcionamiento estable. Además, es más sostenible en cuanto a energía, lo que lo hace útil para negocios pequeños y medianos en lugares alejados o con poca electricidad.

Aunque se ha avanzado mucho, se planea probar el sistema en condiciones reales de fermentación (con microbios, cambios en la viscosidad, calor producido por los microbios). También, se quiere que funcione por más tiempo y crear mejores formas de controlar el freno magnético para que responda a cambios rápidos en el viento.

En resumen, los resultados muestran que este método es viable y que la agitación eólica controlada por frenado magnético es una buena opción para crear sistemas de fermentación más eficientes, sostenibles y con buena energía. Se mostró un sistema de fermentación que usa energía renovable y tiene dos tanques térmicos, agitación con energía eólica, recuperación de electricidad y control de velocidad con frenado magnético. La prueba piloto demostró: (i) menos diferencia de temperatura, de $\Delta T=5,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sin agitación) a $\Delta T=0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (con agitación y frenado), (ii) velocidad de agitación estable ante cambios de viento y (iii) recuperación de energía que cubre casi el 94 % de la energía eléctrica usada en la prueba.

II. ESTADO DEL ARTE

2.1. Diseño: Fermentación y control de variables críticas.

La fermentación en biorreactores necesita condiciones controladas para obtener buenos rendimientos, reproducibilidad y calidad del producto. En específico, la temperatura y la mezcla afectan la cinética metabólica, la viabilidad celular y la producción de subproductos, por lo que el control térmico y la agitación son subsistemas críticos en fermentadores a escala industrial y piloto [1]–[4]. En sistemas con fluidos más viscosos o no newtonianos, la mezcla es aún más importante, ya que

aumenta la posibilidad de zonas con tasas de reacción y transporte de masa/energías diferentes [4], [11].

2.2. Transferencia de calor y estratificación térmica en tanques.

La estratificación térmica se produce cuando la convección natural no puede mezclar el fluido, por ejemplo, en condiciones de calentamiento localizado o pérdidas de calor no uniformes. En biorreactores agitados, el coeficiente global de transferencia de calor está altamente influenciado por la velocidad de agitación y el régimen hidrodinámico; estudios experimentales en biorreactores tipo tanque agitado muestran cambios en el rendimiento térmico en función de la velocidad de agitación y el diseño del sistema de intercambio [12], [13]. Por lo tanto, el diseño térmico (camisa, serpentín, resistencias/camisa interna) se debe estudiar en conjunto con la mezcla, ya que definen el gradiente térmico interno y el tiempo de estabilización ante perturbaciones [12], [13].

2.3. Salida: Agitación, tiempo de mezcla y esfuerzo cortante.

La agitación no sólo sirve para "mover" el medio, sino para controlar el tiempo de mezcla, disminuir gradientes de temperatura/concentración y mejorar la transferencia de masa. Pero un aumento excesivo de la agitación puede aumentar el esfuerzo cortante, dañar microorganismos sensibles y aumentar el consumo de energía; por lo tanto, se debe trabajar en un rango de RPM especificado por el proceso y la reología del medio [4], [14], [15]. Estudios recientes de optimización de impulsores en biorreactores señalan el compromiso entre eficiencia de mezcla y potencia consumida, y la necesidad de caracterizar el régimen hidrodinámico (y sus consecuencias biológicas) al cambiar el sistema de agitación [14], [16].

2.4. Salida: Integración de energías renovables para sistemas de mezcla y operación descentralizada.

La dependencia energética es una restricción común en sistemas pequeños y medianos, especialmente en contextos descentralizados. En agroindustria y procesamiento de alimentos, organismos internacionales han destacado las estrategias "energy-smart" para fortalecer la resiliencia operativa y disminuir los costos energéticos en la cadena de valor [7]. En este contexto, la energía eólica se puede aprovechar de forma mecánica para mover mezcladores o subsistemas auxiliares cuando haya viento disponible. Un ejemplo reciente y real de la integración eólica en sistemas de agitación es la instalación de una pala agitadora movida por viento en un fotobiorreactor flotante, en el cual se observaron mejoras significativas en tiempo de mezcla y coeficiente de transferencia de masa, demostrando el potencial del acoplamiento directo viento-agitación en reactores de baja potencia [17]. Sin embargo, el viento es variable y crea fluctuaciones de torque y RPM que deterioran la estabilidad del proceso si no se cuenta con un regulador de velocidad.

2.5. Freno magnético / freno por corrientes parásitas para control de velocidad

Los frenos magnéticos (corrientes parásitas, eddy-current brakes) regulan la velocidad y disipan energía sin contacto mecánico, disminuyendo el desgaste y el mantenimiento. Estudios recientes explican su principio de funcionamiento, evolución tecnológica y parámetros de diseño (material conductor, geometría, entrehierro, flujo magnético) que definen el par de frenado y el rendimiento térmico del conjunto [18], [19]. Además, se han propuesto modelos paramétricos y validaciones experimentales para estudiar el comportamiento del freno ante fenómenos comunes como temperatura, desmagnetización y no linealidades, lo que apoya su uso como dispositivo de control de velocidad en aplicaciones industriales [19]. En resumen, el frenado magnético es una buena opción para estabilizar RPM en sistemas donde la fuente motriz es variable (viento, por ejemplo), siempre y cuando se diseñe un esquema de control y calibración que prevenga oscilaciones y pérdidas excesivas.

2.6. Brecha identificada y contribución de la presente investigación

De la literatura se desprenden dos grandes vacíos:

Hay evidencia de que la agitación favorece la homogeneización y la transferencia de calor en reactores agitados, pero a pequeña escala aún se depende mucho de la red eléctrica y se elevan los costos de soluciones robustas [12]–[16]; y la integración eólica para agitación es viable, pero necesita un sistema de control de velocidad para prevenir fluctuaciones de RPM que alteren el proceso [17].

En la Tabla I se resumen los métodos más comunes encontrados en la literatura para la agitación y control de temperatura en sistemas de fermentación a pequeña y mediana escala. Aunque los fermentadores industriales convencionales son muy estables, dependen de la red eléctrica, lo que restringe su uso en lugares descentralizados. Por otro lado, los sistemas pasivos o movidos por viento son menos dependientes de energía, pero no tienen medios para regular la velocidad de agitación y comprometen la uniformidad térmica. En tal sentido, el sistema planteado viene a llenar este vacío combinando agitación eólica con recuperación eléctrica y freno magnético para control de velocidad de mezcla, logrando estabilidad de funcionamiento y sostenibilidad energética.

TABLA I

COMPARACIÓN DE ENFOQUES REPORTADOS PARA AGITACIÓN Y CONTROL TÉRMICO EN SISTEMAS DE FERMENTACIÓN DE PEQUEÑA ESCALA

Enfoque reportado en la literatura	Fuente de energía	Control de velocidad (RPM)	Uniformidad térmica	Dependencia de energía externa
Agitación eléctrica convencional en fermentadores industriales	Red eléctrica	Alta (control electrónico)	Alta	Alta
Sistemas de pequeña escala con agitación limitada o intermitente	Red eléctrica / manual	Baja	Baja–media	Media
Agitación mecánica pasiva (manual, hidráulica)	Humana / hidráulica	Muy baja	Baja	Baja
Agitación eólica sin regulación	Energía eólica	Baja	Media	Muy baja
Sistema propuesto en este trabajo	Sistema propuesto en este trabajo	Sistema propuesto en este trabajo	Sistema propuesto en este trabajo	Sistema propuesto en este trabajo

III. MÉTODOS

3.1. Diseño del sistema propuesto

La investigación se llevó a cabo bajo un enfoque experimental aplicado, de diseño, construcción y evaluación de un prototipo funcional de sistema de fermentación energizado con renovables. La investigación es un diseño experimental comparativo en el que se comparó el rendimiento del sistema propuesto con una condición de referencia sin agitación, pero con las mismas condiciones de operación.

La validación se llevó a cabo a escala piloto para verificar la viabilidad técnica del enfoque para aplicaciones de pequeña y mediana escala.

3.2. Arquitectura del sistema

En la Fig. 1 se muestra un esquema conceptual del sistema experimental utilizado, basado en un diseño previamente patentado. La ilustración se simplifica para fines pedagógicos, mostrando solo los subsistemas de interés para la evaluación experimental de este trabajo.

El sistema planteado consiste en una arquitectura de doble tanque térmico en el mismo nivel hidráulico que permite el trasvase bidireccional del medio fermentado según la etapa del

proceso. El tanque principal es para procesos en caliente y el tanque secundario para procesos en frío (enfriamiento por serpentín).

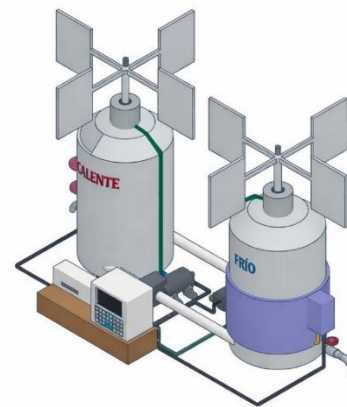


Fig. 1 Esquema simplificado del sistema de fermentación asistido por energía renovable basado en el diseño

3.3. Subsistema térmico

3.3.1) *Calentamiento anular del tanque primario:* El tanque principal está equipado con un sistema de calefacción anular integrado en la pared interior para permitir una mejor

distribución térmica en el fluido. El material de la pared interna es altamente conductor térmico y el aislamiento exterior disminuye las pérdidas al ambiente y mejora la seguridad del operador.

3.3.2) Enfriamiento por serpentín del tanque secundario: El tanque secundario cuenta con un serpentín externo de enfriamiento, el cual se ubicará preferentemente en la parte inferior del tanque para favorecer la extracción de calor por convección forzada. El sistema es capaz de controlar procesos por debajo de la temperatura ambiente, expandiendo la capacidad del prototipo.

La instrumentación térmica consta de sensores de temperatura localizados en diferentes niveles de cada tanque, datos que son leídos por el controlador para monitoreo y control.

3.4. Subsistema de agitación eólica y recuperación eléctrica

Cada tanque cuenta con un agitador mecánico de eje vertical, acoplado a un sistema de varillas de agitación, para generar patrones de flujo axial y radial. El eje gira gracias a un rotor eólico con alerones aerodinámicos hechos de material ligero y resistente, que capturan la energía cinética del viento y la convierten en energía mecánica de agitación.

Además, el eje hace girar un generador eléctrico, convirtiendo parte de la energía mecánica en energía eléctrica. Esta energía se aprovecha para cargar una batería que alimenta el sistema de control, sensores y bombas de transferencia, disminuyendo la dependencia de la red eléctrica.

3.5. Mecanismo de frenado magnético y control de velocidad

Para controlar la velocidad de giro ante cambios de viento se diseñó un sistema de frenado magnético sin contacto mecánico. El sistema consiste en un disco metálico sujeto al eje del agitador y unos imanes montados en un servomotor. Al variar la posición relativa entre el disco y los imanes se genera un par de frenado que limita la velocidad de giro.

La velocidad del agitador se captura con un sensor RPM y el controlador hace una lógica de control por rangos, definiendo un rango seguro de operación $[RPM_{mín}, RPM_{máx}]$. Si la velocidad supera el límite superior, se refuerza el frenado magnético; si queda por debajo del límite inferior, se reduce.

3.6. Modelo térmico simplificado y estrategia de control.

Para propósitos de análisis, se modeló un modelo térmico de parámetros concentrados, suponiendo que la agitación aumenta el coeficiente efectivo de transferencia de calor interno y disminuye los gradientes térmicos locales. El balance energético simplificado del sistema es:

$$C \frac{dT}{dt} = (Q_{in} - Q_{loss} + Q_{mix}) \quad (1)$$

Donde C representa la capacidad térmica del efectiva, Q_{mix} la potencia de calentamiento o enfriamiento Q_{loss} , pérdidas de ambiente y Q_{mix} un término efectivo asociado a la mejora en convección interna debido a la agitación. En ausencia de agitación, $Q_{mix} \approx 0$ y la distribución térmica depende principalmente de convección natural, favoreciendo estratificación.

3.7. Protocolo experimental

La evaluación experimental se llevó a cabo durante ciclos de operación de 6 horas, bajo tres condiciones comparativas:

- Fermentación sin agitación
- Fermentación con agitación eólica sin frenado magnético
- Fermentación con agitación eólica y frenado magnético activo

Durante cada ensayo se registraron temperaturas en distintos puntos del tanque, velocidad de agitación (RPM), energía eléctrica recuperada por el sistema eólico y consumo energético de bombas y sistema de control. Las condiciones ambientales y el volumen de operación se mantuvieron constantes para garantizar comparabilidad.

3.8. Métricas de evaluación

El desempeño del sistema se evaluó mediante las siguientes métricas:

- Uniformidad térmica (ΔT): diferencia entre la temperatura máxima y mínima medida dentro del tanque.
- Estabilidad de agitación: variación de RPM frente a cambios en la velocidad del viento.
- Balance energético: comparación entre la energía recuperada por el sistema eólico (E_{rec}) y la energía consumida por los subsistemas eléctricos (E_{cons}).
- Eficiencia energética global: definida como

$$\eta = E_{rec}/E_{cons} \quad (2)$$

Estas métricas permiten cuantificar de manera objetiva el impacto de la agitación eólica y del frenado magnético sobre el desempeño térmico y energético del sistema.

IV. RESULTADOS

4.1. Uniformidad térmica

La Tabla II resume la distribución de temperatura medida en tres alturas del tanque bajo tres condiciones: (i) sin agitación, (ii) con agitación eólica sin frenado, y (iii) con agitación eólica y frenado magnético. Se observa una reducción marcada de ΔT con la agitación, y una mejora adicional al estabilizar RPM mediante frenado.

TABLA II
DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA Y GRADIENTE TÉRMICO (ΔT)

Condición	Superior (°C)	Media (°C)	Inferior (°C)	ΔT (°C)
Sin agitación	34,8	32,1	29,4	5,4
Agitación eólica (sin frenado)	33,5	32,8	31,9	1,6
Agitación eólica + frenado magnético	33,2	32,9	32,4	0,8

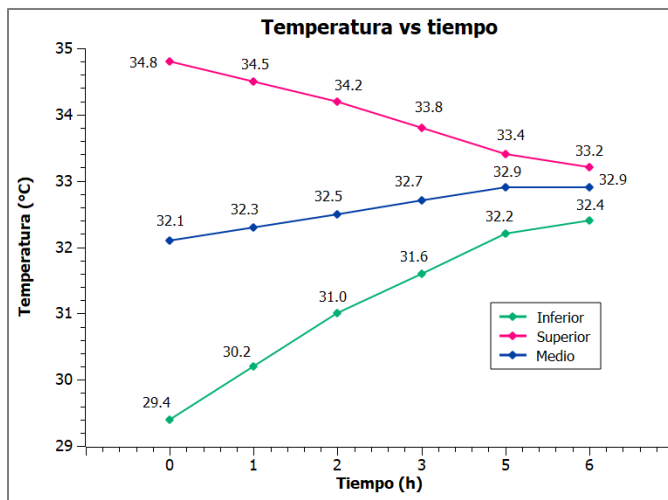


Fig. 2 Perfiles de temperatura en el tanque durante un ciclo de 6 horas

En términos relativos, la agitación eólica con frenado magnético reduce el gradiente térmico aproximadamente en 85 % respecto a la condición sin agitación. Esto respalda la hipótesis de que la mezcla inducida por viento incrementa la convección interna y homogeniza la temperatura, factor crítico para procesos con sensibilidad térmica.

4.2. Estabilidad de agitación y efecto del frenado magnético

La Tabla III muestra la relación entre velocidad del viento y RPM para las condiciones con y sin frenado. Sin frenado, la velocidad del agitador escala de forma marcada con el viento, lo que podría inducir regímenes de mezcla excesivos. Con frenado magnético, la RPM se mantiene en un rango estrecho, mejorando estabilidad operativa.

TABLA III

DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA Y GRADIENTE TÉRMICO (ΔT)

Velocidad del viento (m/s)	RPM (sin frenado)	RPM (con frenado magnético)
2,5	42	40
4,0	71	45
6,0	108	47
7,5	132	48

El control por frenado magnético limita la RPM y reduce la variación frente a perturbaciones (cambios de viento), lo que permite definir condiciones de mezcla compatibles con la sensibilidad del proceso.

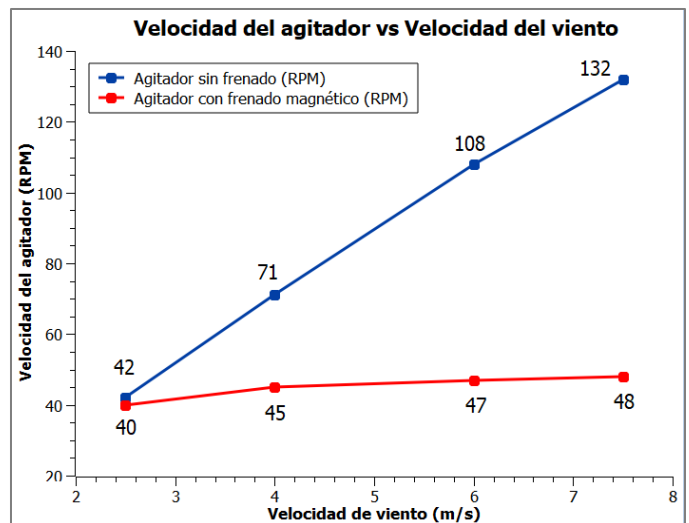


Fig. 1 Perfiles de temperatura en el tanque durante un ciclo de 6 horas

4.3. Balance energético del sistema

La Tabla IV resume el balance energético durante el ciclo de evaluación (6 h). Se estimó la energía recuperada por el sistema eólico y la energía consumida por bombas y sistema de control. Bajo condiciones moderadas de viento, el sistema recupera una fracción alta de la energía requerida, reduciendo casi a cero la demanda externa.

TABLA IV
BALANCE ENERGÉTICO (CICLO DE 6 HORAS)

Parámetro	Valor (Wh)
Energía recuperada por viento (E_{rec})	118
Consumo de bombas	92
Consumo de sistema de control	34
Consumo total (E_{cons})	126
Energía externa neta requerida	8
Eficiencia ($\eta = E_{rec}/E_{cons}$)	93,7 %

El resultado $\eta = 93,7 \%$ señala que, según el caso estudiado, la energía del viento obtenida cubre casi todo el gasto eléctrico. La energía auxiliar neta pedida (8 Wh) equivale a etapas de viento suaves y pérdidas del sistema.

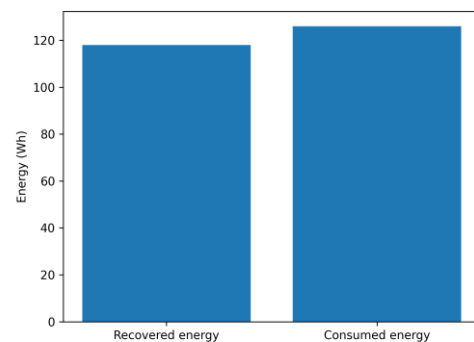


Fig. 1 Comparación entre energía recuperada y energía consumida (Wh)

4.4. Comparación global con un esquema convencional

Para poner en contexto el prototipo, en la Tabla V se comparan métricas importantes con un esquema tradicional (agitador eléctrico y control térmico conectado a la red). Aunque los valores varíen en magnitud y proceso, la comparación muestra tendencias favorables al sistema propuesto en uniformidad térmica y dependencia energética.

TABLA V
BALANCE ENERGÉTICO DURANTE EL CICLO DE 6 HORAS

Métrica	Convencional	Sistema propuesto
ΔT (°C)	5,4	0,8
Dependencia de energía externa	Alta	Baja
Estabilidad de agitación	Alta (si red estable)	Alta (con frenado magnético)
Complejidad mecánica	Media	Media-alta
Sostenibilidad energética	Limitada	Alta (recuperación eólica)
ΔT (°C)	5,4	0,8

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados experimentales verifican que la agitación por energía eólica, al ser controlada, mejora significativamente la uniformidad térmica en sistemas de fermentación a pequeña y mediana escala. La disminución del gradiente térmico desde $\Delta T=5.4^{\circ}\text{C}$ en la condición sin agitación hasta $\Delta T=0.8^{\circ}\text{C}$ con agitación eólica controlada demuestra la influencia de la mezcla en la intensificación de la convección interna, en línea con lo informado en la literatura para biorreactores agitados y transferencia de calor.

Varios autores han informado que, sin agitación, la convección natural no es suficiente para homogeneizar la temperatura en tanques fermentativos, sobre todo en presencia de fuentes localizadas de calentamiento o pérdidas de calor no uniformes. En este caso, los valores de los ΔT conseguidos con agitación eólica sin control (1.6°C) ya suponen una mejora considerable sobre el caso base, pero la disminución adicional conseguida al añadir el frenado magnético revela que no solo la presencia de agitación, sino la estabilidad del régimen de mezcla es determinante para la uniformidad térmica.

En el estudio de la dependencia entre velocidad del viento y RPM se puede ver que los sistemas de agitación movidos directamente por renovables son muy sensibles a perturbaciones externas, en concordancia con estudios anteriores en aerogeneradores de baja potencia. En el sistema mostrado, si falta manejo, las RPM crecen muy rápido cuando varía el viento. Esto puede generar mezclas muy cargadas, más estrés y quizás dañar a los microbios frágiles. Al agregar el freno magnético, la rapidez al menear se quedó pareja. Esto bajó los líos y brindó una función estable sin roce. Esto es mejor que usar frenos mecánicos comunes.

Energéticamente, el balance muestra que el sistema puede recobrar casi el 94 % de la energía eléctrica usada en el ciclo de prueba, pidiendo solo una leve energía de afuera. Esta idea es muy clave para las funciones descentralizadas, donde la red eléctrica no está disponible o es irregular. Frente a fermentadores tradicionales que dependen de la red, el enfoque baja mucho la necesidad energética externa, acorde con las

ideas de sostenibilidad y aguante operativo que se impulsan en la agroindustria y la biotecnología.

La comparación global con un esquema tradicional dice que el sistema creado logra igualdad térmica y firmeza de agitación parecidas a las de fermentadores eléctricos típicos, pero con menos necesidad de energía externa. Pero esta mejora se consigue a costa de mayor integración mecánica y de control, lo que complica ligeramente el sistema. Este compromiso es aceptable en aplicaciones donde la disminución del consumo energético y la autonomía son más importantes.

Cabe mencionar algunas limitaciones del estudio. En primer lugar, el viento es por naturaleza estocástico, por lo que la operación continua necesita un dimensionamiento apropiado del sistema de almacenamiento energético y, eventualmente, una fuente de respaldo. En segundo lugar, la validación experimental se llevó a cabo en un ciclo de 6 h y con un fluido patrón en el que no se consideran los efectos relacionados con la carga microbiana, cambios de viscosidad, generación de espuma o calor metabólico en procesos fermentativos reales.

Al final, el sistema de control que se usó para el frenado magnético fue un control por umbrales. Usar sistemas de control más modernos podría mejorar aún más la estabilidad si hay cambios rápidos en el viento.

A pesar de esto, los resultados indican que juntar la agitación eólica con la regulación por frenado magnético es una buena idea. Puede ayudar a que la temperatura sea más uniforme y a depender menos de la energía en sistemas de fermentación pequeños y medianos. El método planteado es escalable a través de diseño mecánico apropiado a otras operaciones en que la estabilidad de mezcla y el consumo energético sean determinantes.

V. CONCLUSIONES

En este estudio se diseñó y construyó un sistema de fermentación potenciado con energías renovables, con arquitectura de doble tanque y agitación eólica controlada en velocidad por frenado magnético, el cual fue verificado experimentalmente a escala piloto en condiciones comparativas.

Los resultados muestran que la agitación provocada por energía eólica mejora la uniformidad térmica del sistema, disminuyendo el gradiente de temperatura desde $^{\circ}\text{C}$ cuando se añade el frenado magnético.

La adición de un sistema de frenado magnético servoaccionado estabilizó la velocidad de agitación ante cambios en la velocidad del viento, manteniéndose dentro de un rango seguro para procesos fermentativos sensibles al régimen de mezcla.

El estudio de energía reveló que el sistema puede usar de nuevo casi el 94 % de la energía eléctrica que se usa en un ciclo de trabajo de 6 horas. Así, se necesita menos energía eléctrica de fuentes externas.

En comparación con métodos típicos de fermentación de alimentos que usan electricidad normal, este sistema proporciona una temperatura pareja y un funcionamiento

constante. Aparte de eso, es más sostenible con la energía, lo cual lo hace útil para negocios chicos y medianos en sitios remotos o con poca electricidad.

Pese a que se ha progresado bastante, se piensa probar el sistema en situaciones reales de fermentación (con microbios, cambios en la viscosidad, calor creado por los microbios). También, se quiere que funcione por más tiempo y crear mejores formas de controlar el freno magnético para que responda a cambios rápidos en el viento.

En resumen, los resultados muestran que este método es viable y que la agitación eólica controlada por frenado magnético es una buena opción para crear sistemas de fermentación más eficientes, sostenibles y con buena energía. Se mostró un sistema de fermentación que usa energía renovable y tiene dos tanques térmicos, agitación con energía eólica, recuperación de electricidad y control de velocidad con frenado magnético. La prueba piloto demostró: (i) menos diferencia de temperatura, de $\Delta T=5,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ (sin agitación) a $\Delta T=0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (con agitación y frenado), (ii) velocidad de agitación estable ante cambios de viento y (iii) recuperación de energía que cubre casi el 94 % de la energía eléctrica usada en la prueba. Estos resultados sustentan la viabilidad del enfoque para aplicaciones descentralizadas y sostenibles en pequeña y mediana escala.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al Vicerrectorado de Investigación de la Universidad Nacional del Callao por el apoyo institucional al desarrollo de la presente investigación y por fomentar y fortalecer la investigación científica y tecnológica en la universidad.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. Barbosa-Cánovas, A. Mortimer, D. Lineback y W. Spiess, *Food Engineering: Integrated Approaches*. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
- [2] World Health Organization, *WHO Guidelines on Good Manufacturing Practices*. Geneva, Switzerland: WHO Press, 2018.
- [3] P. Doran, *Bioprocess Engineering Principles*, 2nd ed. Oxford, UK: Academic Press, 2013.
- [4] M. L. Shuler and F. Kargi, *Bioprocess Engineering: Basic Concepts*, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2018.
- [5] J. Stanbury, A. Whitaker, and S. Hall, *Principles of Fermentation Technology*, 3rd ed. Oxford, UK: Elsevier, 2017.
- [6] R. Nielsen, "Mixing and mass transfer in bioreactors," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 85, pp. 1–15, 2014.
- [7] J. García-Ochoa and E. Gómez, "Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview," *Biotechnology Advances*, vol. 27, no. 2, pp. 153–176, 2009.
- [8] M. Müller et al., "Heat transfer characteristics of a stirred single-use bioreactor," *Trends in Biotechnology*, vol. 36, no. 5, pp. 475–489, 2018.
- [9] M. Müller et al., "Measurement of heat transfer coefficients in stirred single-use bioreactors at different scales," *Biochemical Engineering Journal*, vol. 150, 2019.
- [10] F. García et al., "Challenges in small-scale fermentation systems," *Journal of Cleaner Production*, vol. 172, pp. 320–330, 2018.
- [11] A. Ruzhansky et al., "Improving hydrodynamics and energy efficiency of a turbine mixer in a bioreactor," *Symmetry*, vol. 17, no. 5, Art. no. 693, 2025.
- [12] Q. Gu et al., "Optimization of oxygen transfer and power consumption in stirred-tank bioreactors," *Scientific Reports*, vol. 15, Art. no. 92463, 2025.
- [13] Food and Agriculture Organization of the United Nations, *Energy-Smart Food Processing*. Rome, Italy: FAO, 2021.
- [14] International Renewable Energy Agency, *Renewable Energy in Agro-Industry*. Abu Dhabi, UAE: IRENA, 2020.
- [15] Ministerio de Energía y Minas del Perú, *Plan Nacional de Electrificación Rural*. Lima, Perú.
- [16] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins y E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, 2nd ed. Chichester, UK: Wiley, 2011.
- [17] J. Fu et al., "Integrating wind-driven agitating blade into a floating photobioreactor to enhance fluid mixing and mass transfer," *Bioresource Technology*, vol. 371, 2023.
- [18] M. Gulec et al., "Eddy current brakes: A review on working principles and technology evolution," in *Proc. IEEE Int. Conf. Electrical Machines (ICEM)*, 2022.
- [19] H. Hassanpour et al., "Parametric study of permanent magnet eddy current brake considering temperature effects," *Results in Engineering*, vol. 18, 2025.