

Oportunidades de mejora en la supervisión de procesos biotecnológicos para la producción de bebidas fermentadas

Alan Jair Gamboa-Escobar ¹, Carlos Manuel Astorga-Zaragoza ^{1,*}, Jonathan Villanueva-Tavira ¹, Yurika Toledo-Sánchez ¹, Silvia Patricia Pérez-Sabino ²

¹ Departamento de Ciencias de la Ingeniería, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Cuernavaca, Morelos, México.

² Centro Morelense de Innovación y Transferencia Tecnológica, Emiliano Zapata, Morelos, México.

* Autor de correspondencia: carlos.az@cenidet.tecnm.mx

Artículo de divulgación científica

Recibido: 22 de abril de 2025 Aceptado: 5 de junio de 2025 Publicado: 16 de febrero de 2026

DOI: <https://doi.org/10.56845/terys.v5i2.447>

Resumen: Las bebidas fermentadas como el tepache y la sidra no solo representan un legado cultural y gastronómico, sino también un área de interés creciente en la biotecnología por su potencial funcional y comercial. Sin embargo, su producción artesanal aún enfrenta retos relacionados con la variabilidad del producto final y la falta de control durante el proceso de fermentación. En este artículo se exploran las oportunidades de mejora en la supervisión de procesos biotecnológicos aplicados a la fermentación de estas bebidas, enfocándose en el monitoreo de variables críticas como temperatura, pH y tiempo de fermentación. Además, se presenta un caso de estudio orientado al diseño de un sistema automatizado de fermentación de tepache con control preciso de parámetros clave. Los experimentos mostraron que el uso de kéfir como inóculo acelera la fermentación, mejora la calidad sensorial del producto y permite un mayor control sobre variables críticas como el pH y el tiempo de fermentación. Los resultados sugieren que la incorporación de estrategias de supervisión tecnológica no solo mejora la eficiencia del proceso, sino que también permite estandarizar la producción, reducir riesgos microbiológicos y promover la escalabilidad de estas bebidas hacia mercados más amplios. Estas mejoras también favorecen prácticas de producción más sustentables al reducir el consumo energético, minimizar desperdicios y optimizar el uso de recursos naturales.

Palabras clave: fermentación, tepache, sidra, kéfir, biorreactor, automatización, sostenibilidad, innovación tecnológica

Introducción

La fermentación es una técnica ancestral que ha acompañado a las civilizaciones humanas desde hace miles de años. Gracias a ella, las personas han podido conservar alimentos, potenciar su sabor y mejorar sus propiedades nutricionales. Hoy sabemos que muchos productos fermentados, como el yogur, la sidra, el kéfir o el tepache, aportan beneficios probióticos, es decir, contienen microorganismos vivos que ayudan al buen funcionamiento del sistema digestivo y fortalecen el sistema inmunológico (Marco *et al.*, 2021).

En los últimos años, ha crecido el interés por la fermentación casera y artesanal, impulsado por la búsqueda de una alimentación más saludable, natural y sin aditivos. Esta tendencia ha generado un nuevo campo de oportunidades para la biotecnología, especialmente en la supervisión y automatización del proceso fermentativo, donde intervienen variables como la temperatura, el pH, el tiempo de fermentación o la concentración de azúcares, todos ellos determinantes para la calidad del producto final (Lee *et al.*, 2023).

Ante esta necesidad, surge la propuesta de diseñar un biorreactor automatizado, que permita controlar y monitorear estas variables de forma precisa y en tiempo real. Este tipo de desarrollo no solo requiere creatividad, sino también la integración de conocimientos de diferentes disciplinas, como la ingeniería mecánica, electrónica y biotecnología. La automatización del proceso fermentativo no solo busca mejorar la calidad del producto, sino también hacer más eficiente su elaboración, reducir desperdicios y promover una producción más sustentable (Gao *et al.*, 2022).

Además, este tipo de iniciativas están alineadas con la Agenda 2030 para los Objetivos de Desarrollo Sostenible, impulsada por la ONU, especialmente en lo que respecta al ODS 2: Hambre cero, al fortalecer la seguridad alimentaria y apoyar modelos de producción local accesibles. También se relaciona con el ODS 3: Salud y bienestar, el desarrollo y consumo de estas bebidas con propiedades probióticas tiene un impacto positivo en la salud digestiva e inmunológica de la población (M. Ozen *et al.*, 2019). Finalmente impulsando el ODS:12 Producción y consumo responsables reduciendo el desperdicio de alimentos y fomentando prácticas sostenibles en la elaboración de bebidas fermentadas (FAO, 2023).

Este artículo explora cómo la incorporación de tecnologías como sensores de bajo costo, microcontroladores y algoritmos de automatización puede revolucionar la manera en que se producen bebidas fermentadas como el tepache o la sidra, con beneficios tanto para la salud como para la sostenibilidad (B. C. T. Bourrie *et al.*, 2016).

Desarrollo

La fermentación, aunque es un proceso natural, está influenciada por varios factores que determinan el resultado final en términos de sabor, textura, seguridad alimentaria y contenido nutricional. Para que una bebida fermentada como el tepache o la sidra mantenga su calidad y sea segura para el consumo, es fundamental controlar una serie de variables críticas durante todo el proceso.

Entre las principales variables que deben ser monitoreadas destacan:

- **Temperatura:** Es uno de los factores más importantes, ya que influye directamente en la actividad metabólica de las levaduras y bacterias. Una temperatura demasiado baja puede ralentizar o detener la fermentación, mientras que una demasiado alta puede matar a los microorganismos o generar subproductos indeseables (Lee *et al.*, 2023).
- **pH:** El nivel de acidez permite mantener un ambiente adecuado para la fermentación y evitar el crecimiento de microorganismos patógenos. Un pH que se sale del rango óptimo puede afectar negativamente tanto el sabor como la seguridad del producto (Gao *et al.*, 2022).
- **Tiempo de fermentación:** Cada bebida tiene un tiempo específico en el que se desarrolla su perfil ideal. Si se interrumpe antes de tiempo, el producto puede resultar insípido o poco fermentado; si se prolonga demasiado, puede volverse demasiado ácido o alcohólico.
- **Concentración de azúcares:** Los azúcares son el sustrato principal que las levaduras transforman en ácido, gas o alcohol. Monitorear su consumo permite estimar la evolución de la fermentación y cuándo ésta se ha completado.
- **Presencia de oxígeno:** En algunos casos, como en las etapas iniciales del tepache, una pequeña cantidad de oxígeno puede ser útil para activar a las levaduras, pero su exceso puede oxidar el producto y alterar su calidad.

Aunque se identificaron múltiples variables críticas en la fase teórica, el presente experimento se centró en aquellas más accesibles al entorno artesanal de validación, principalmente el comportamiento de la temperatura, pH y el tiempo de fermentación. La medición de la concentración de azúcares y oxígeno disuelto se plantea como trabajo futuro para un análisis más completo del sistema, estos parámetros serán considerados en futuras validaciones del sistema mediante reflectometría y cromatografía líquida, lo que permitirá establecer una cinética detallada del proceso.

Experimentación

Para explorar las condiciones óptimas de fermentación en la producción de bebidas tradicionales como el tepache y la sidra, se llevaron a cabo una serie de pruebas controladas utilizando como sustrato una mezcla de cáscara de piña y manzana como se muestra en la Tabla 1. El objetivo fue evaluar el comportamiento del proceso fermentativo tanto con la adición de kéfir (mezcla simbiótica de bacterias y levaduras) una comunidad simbiótica de levaduras y bacterias ácido-lácticas, que se presenta en forma de gránulos con una matriz polisacáridica, las cuales trabajan de forma sinérgica para fermentar azúcares y producir compuestos como ácido láctico, etanol y dióxido de carbono (Farnworth, 2019).

Tabla 1. Se prepararon cuatro lotes independientes bajo las siguientes condiciones

Producto	Sustrato	Inóculo (Kéfir)	Volumen	Temperatura	Tiempo
Tepache	Cáscara de piña	No	4 L	25 °C ±5	72 horas
Tepache con Kéfir	Cáscara de piña	Sí (5% v/v)	4 L	25°C ±5	48 horas
Sidra	Cáscara de manzana	No	4 L	25°C ±5	84 horas
Sidra con kéfir	Cáscara de manzana	Sí (5% v/v)	4 L	25°C ±5	60 horas

En cada uno de los ensayos se realizaron en fermentadores de vidrio con válvula de escape (tipo airlock) para evitar presión excesiva como se muestra en la Figura 1. Se midieron parámetros como pH, burbujeo, aroma y tiempo de aparición de la primera actividad fermentativa mostrado en la Tabla 2.

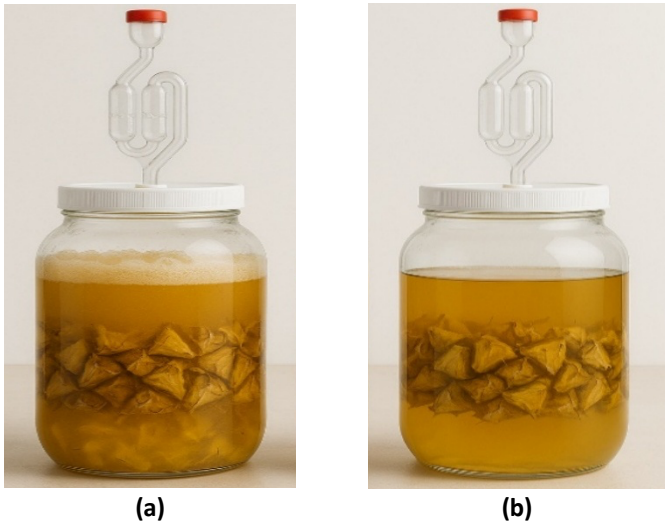


Figura 1. Comparación del proceso de fermentación. (a) contiene kéfir, presenta un líquido de espumoso y mayor turbidez, indicando una fermentación más activa y (b) no contiene kéfir, presentando un líquido más claro y menor actividad fermentativa

Tabla 2. Comparación de resultados de la fermentación de cáscara de piña y manzana con y sin kéfir

Producto	pH inicial	pH final	Inicio del burbujeo	Intensidad del burbujeo	Aroma	Actividad fermentativa
Tepache	4.5	3.6	24 horas	Moderado	Suave, afrutado	Natural lenta pero estable
Tepache con kéfir	4.4	3.7	8 horas	Intenso	Ácido, cítrico	Rápida y activa
Sidra	4.6	3.1	36 horas	Débil	Dulce, poco ácido	Espontánea muy lenta
Sidra con kéfir	4.5	3.2	12 horas	Activo	Ácido, frutal suave	Moderada con mayor control

Observaciones clave:

- El kéfir redujo significativamente el tiempo necesario para completar la fermentación en ambos sustratos.
- La piña mostró una fermentación más rápida y activa en comparación con la manzana, probablemente por su mayor contenido de azúcares fermentables y enzimas naturales.
- Sin Kéfir, la fermentación fue más lenta, lo que puede comprometer la estabilidad microbiológica del producto.

Diseño del fermentador automatizado

Para garantizar la estabilidad y eficiencia del proceso fermentativo, se diseñó un fermentador automatizado que integra la selección de sensores se enfocó en variables críticas que pueden ser monitoreadas con alta precisión mediante tecnologías accesibles y de bajo costo, como el pH y la temperatura. Aunque variables como la concentración de azúcares, oxígeno disuelto y tiempo de fermentación también son relevantes, su integración en esta etapa se pospuso por limitaciones presupuestarias y será considerada en versiones futuras del dispositivo. En la Figura 2 se presenta el diagrama de tubería e instrumentación (P&ID).

Este fermentador cuenta con:

- Un sensor de pH (pHT), que monitorea continuamente la acidez del medio.

- Un sensor de temperatura (TT) junto con un elemento calefactor, que permite mantener la temperatura del proceso dentro del rango óptimo (27–32 °C).
- Un motor eléctrico acoplado a un sistema de agitación mecánica, activado según la necesidad del proceso.
- Controladores lógicos que reciben la señal de los sensores y, en función de los parámetros establecidos, activan los actuadores correspondientes (calentador, motor de agitación o válvulas).
- Este sistema cuenta con dos lazos de automatización cerrados:
- Lazo de automatización de pH (Cerrado): Es un lazo automatizado de retroalimentación, ya que mide constantemente el pH y ajusta la dosificación del corrector de pH mediante el mecanismo de agitación.
- Lazo de automatización de temperatura (Cerrado): También es automatizado de retroalimentación, pues mide la temperatura en el reactor y ajusta el sistema calefactor para mantener la temperatura dentro del rango establecido.

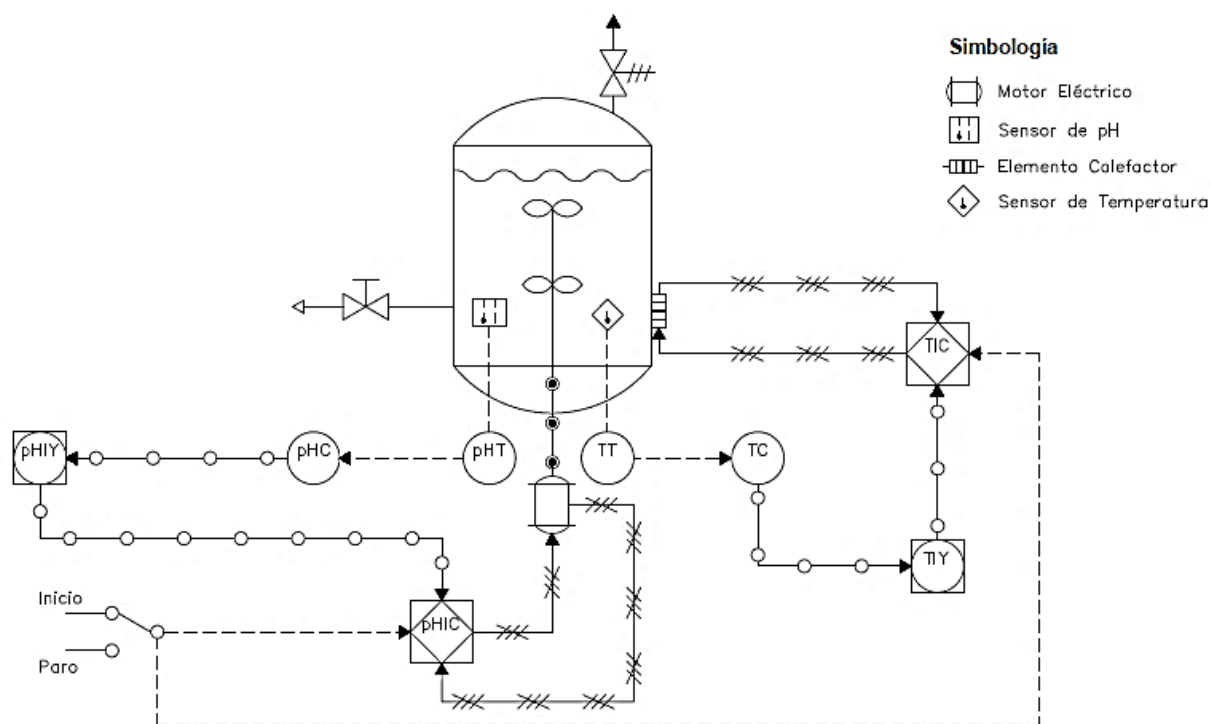


Figura 2. Diagrama de Tubería e Instrumentación (P&ID) del fermentador automatizado

Ambos lazos son automatizados y de retroalimentación, pues monitorean las variables en tiempo real y ajustan los actuadores en respuesta a los cambios en el sistema.

La selección de sensores se enfocó en variables críticas que pueden ser monitoreadas con alta precisión mediante tecnologías accesibles y de bajo costo, como el pH y la temperatura. Aunque variables como la concentración de azúcares, oxígeno disuelto y tiempo de fermentación también son relevantes, su integración en esta etapa se pospuso por limitaciones presupuestarias y será considerada en versiones futuras del dispositivo.

Discusión

Diversos estudios han reportado que el uso de cultivos iniciadores como el kéfir mejora la eficiencia fermentativa y la seguridad microbiológica en productos tradicionales. Por ejemplo, Bourrie *et al.* (2016) reportaron que el kéfir acelera la acidificación del medio y reduce la actividad de patógenos en bebidas fermentadas, lo cual coincide con la reducción del pH y la intensidad del burbujeo observados en nuestros ensayos. Asimismo, trabajos como el de Gao *et al.* (2022) destacan que el monitoreo continuo de pH y temperatura es una estrategia efectiva para reducir la variabilidad entre lotes, lo que valida la utilidad del sistema automatizado propuesto en este estudio.

El diseño del biorreactor automatizado parte de una necesidad práctica: permitir un proceso de fermentación más higiénico, eficiente y automatizado en comparación con métodos tradicionales. El prototipo del biorreactor propuesto

presenta una geometría cilíndrica con una capacidad para 5 L, donde se pueden identificar claramente los componentes funcionales integrados para garantizar un control más preciso del proceso.

Entre las innovaciones clave se encuentra el diseño de una canastilla con acoplamiento mecánico, diseñada para contener la cáscara de fruta (piña o manzana) sin que estas entren en contacto directo con los elementos sensores o salidas del sistema. Esta canastilla se acopla a un sistema de agitación rotativa, que permite una mezcla homogénea sin romper la integridad de los sólidos.

Oportunidades de mejora y tendencias

El prototipo de biorreactor automatizado desarrollado en este trabajo representa un primer paso hacia la estandarización tecnológica de procesos fermentativos tradicionales en pequeña escala. Este sistema, centrado en el control de pH y temperatura, ha demostrado ser funcional para mejorar la reproducibilidad y seguridad del tepache y la sidra artesanal. Esta innovación tecnológica, además de ser viable y adaptable a contextos de pequeña escala, se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible al fomentar una producción más saludable, sustentable y accesible. A partir de esta base, existen diversas oportunidades de mejora tecnológica. La incorporación de sensores de CO₂, refractómetros ópticos para monitorear azúcares y dispositivos para estimar el grado alcohólico permitirían obtener un perfil cinético completo del proceso. Asimismo, el uso de controladores avanzados como sistemas difusos o redes neuronales permitiría anticipar y ajustar dinámicamente el punto óptimo de fermentación, reduciendo la necesidad de intervención manual.

Finalmente, la miniaturización del hardware y el uso de materiales de grado alimenticio permitirían escalar el sistema para aplicaciones educativas, emprendedoras o de transferencia tecnológica en comunidades rurales, alineándose con modelos de producción local sustentable.

Conclusiones

Este estudio confirmó que el uso de kéfir como cultivo iniciador en bebidas fermentadas reduce significativamente el tiempo de fermentación y mejora el perfil sensorial, en comparación con procesos espontáneos. Estos resultados fueron particularmente notables en el caso del tepache, donde la actividad fermentativa fue más intensa y estable. Además, se diseñó y probó un biorreactor automatizado que incorpora sensores de temperatura y pH, un sistema de agitación programable y controladores lógicos, permitiendo mantener condiciones estables durante el proceso. Aunque el sistema no incluye todavía sensores para concentración de azúcares ni grado alcohólico, su desempeño demuestra la viabilidad de automatizar parcialmente la producción de estas bebidas de forma accesible.

Esta propuesta no solo mejora la reproducibilidad y la inocuidad del producto, sino que también facilita la integración de estas tecnologías en iniciativas de producción local, fortaleciendo la seguridad alimentaria y la sostenibilidad en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Bibliografía

- Bourrie, B. C. T., Willing, B. P., & Cotter, P. D. (2016). The microbiota and health-promoting characteristics of the fermented beverage kefir. *Frontiers in Microbiology*, 7, 647. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.00647>
- FAO. (2023). *Transforming agrifood systems to achieve the Sustainable Development Goals*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://www.fao.org>
- Farnworth, E. R. (2019). Kefir – A complex probiotic. *Food Microbiology*, 78, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.fm.2018.10.005>
- Gao, L., Zhang, W., Li, L., & Wang, Y. (2022). Application of smart sensors in food fermentation processes: A review. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 364, 131913. <https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131913>
- Lee, H., Kim, M., & Park, J. (2023). Intelligent monitoring and control technologies for optimized fermentation in food biotechnology. *Trends in Food Science & Technology*, 139, 345–356. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.02.013>
- Marco, M. L., Sanders, M. E., Gänzle, M., Arrieta, M. C., Cotter, P. D., De Vuyst, L., Hill, C., Holzapfel, W., Lebeer, S., & Reid, G. (2021). The International Scientific Association for Probiotics and Prebiotics consensus statement on fermented foods. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 18(3), 196–208. <https://doi.org/10.1038/s41575-020-00390-5>
- Ozen, M., Pons-Beltrán, M., & Dinleyici, E. C. (2019). Probiotics, diet, and gut microbiota: Interactions in health and disease. *Current Opinion in Biotechnology*, 61, 8–13. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.07.008>