Revista de Ciencias Tecnológicas (RECIT). Universidad Autónoma de Baja California ISSN 2594-1925
Volumen 9 (4): e508. Octubre-Diciembre, 2026. https://doi.org/10.37636/recit.v9n4e508

Artículo de revisión

Monitoreo y control inteligente de la fermentación alcohólica: avances en sensores, IoT e inteligencia artificial

Intelligent monitoring and control of alcoholic fermentation: advances in sensors, IoT and artificial intelligence

Nahomi Rubí Llontop-Ayasta[1], Elthon Steven Boñon-Rocha[1], Ulises Benjamín Narro-Altamirano[2], Víctor Javier Vásquez-Villalobos[2]

[1]Escuela de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II S/N, C.P. 13011. Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú.
[2]Laboratorio de Biotecnología y Agropecuaria con Tecnología (BIOAGROTEC), Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II S/N, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú. C.P. 13011. Urb. San Andrés, Trujillo, Perú.

Autor de correspondencia: Ulises Benjamín Narro-Altamirano, Laboratorio de Biotecnología y Agropecuaria con Tecnología (BIOAGROTEC), Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II S/N, Ciudad Universitaria, Trujillo, Perú. C.P. 13011. Urb. San Andrés, Trujillo, Perú. e-mail: unarro@unitru.edu.pe, ORCID ID: 0000-0002-8992-6154

Recibido: 31 de julio del 2026 **Aceptado:** 9 de noviembre del 2026 **Publicado**: 13 de noviembre del 2026

Resumen. - *La fermentación alcohólica es un bioproceso ampliamente utilizado en la industria alimentaria y biotecnológica, cuyo seguimiento depende de la medición precisa de variables críticas como etanol, glucosa, CO_2, pH y biomasa. Esta revisión analiza investigaciones publicadas entre 2021 y 2026 sobre sensores electrónicos, tecnologías IoT e inteligencia artificial aplicadas al monitoreo, estimación, predicción y control de procesos fermentativos. La revisión se complementó con un análisis bibliométrico de 69 documentos recuperados de Scopus, publicados entre 1984 y 2026. El análisis se realizó con programas como Bibliometrix, VOSviewer y Scimago Graphica. Se evaluaron sensores electroquímicos, sistemas biomiméticos, sensores ópticos y físicos, además de plataformas inteligentes para el control en tiempo real y análisis predictivo. Las investigaciones revisadas apuntan hacia sistemas automatizados que facilitan la supervisión y el ajuste del proceso. Los sensores electroquímicos destacan por su sensibilidad y por medir varios parámetros a la vez. Las narices y lenguas electrónicas hacen un análisis indirecto apoyado en aprendizaje automático, y aun así dan buenos resultados. La espectroscopía y otros sistemas no invasivos suman la posibilidad de seguir varias variables al mismo tiempo sin intervenir en el proceso. No obstante, persisten desafíos relacionados a la calibración, estabilidad operativa, costos y validación industrial. En conjunto, la integración de sensores inteligentes, IoT e inteligencia artificial constituye una tendencia esencial para la modernización y automatización del control fermentativo.*

Palabras clave: Biosensores; Internet de las Cosas (IOT); Bioprocesos; Análisis predictivo; Aprendizaje automático; Biomasa.

Abstract. - *Alcoholic fermentation is a widely used bioprocess in the food and biotechnology industries, the monitoring of which depends on the precise measurement of critical variables such as ethanol, glucose, CO_2, pH, and biomass. This review analyzes research published between 2021 and 2026 on electronic sensors, IoT technologies, and artificial intelligence applied to the monitoring, estimation, prediction, and control of fermentation processes. The review was complemented by a bibliometric analysis of 69 documents retrieved from Scopus, published between 1984 and 2026. The analysis was performed using software such as Bibliometrix, VOSviewer, and Scimago Graphica. Electrochemical sensors, biomimetic systems, optical and physical sensors, as well as intelligent platforms for real-time control and predictive analysis, were evaluated. The reviewed research points toward automated systems that facilitate process monitoring and adjustment. Electrochemical sensors stand out for their sensitivity and ability to measure multiple parameters simultaneously. Electronic noses and tongues perform indirect analysis supported by machine learning, and still yield good results. Spectroscopy and other non-invasive systems add the ability to monitor several variables simultaneously without intervening in the process. However, challenges related to calibration, operational stability, costs, and industrial validation persist. Overall, the integration of smart sensors, IoT, and artificial intelligence is a key trend for the modernization and automation of fermentation control.*

Keywords: Biosensors; Internet of Things (IOT); Bioprocesses; Predictive analytics; Machine learning; Biomass.

ISSN: 2594-1925

1. Introducción

La fermentación alcohólica constituye uno de los bioprocesos más antiguos desarrollados por el ser humano y ha sido esencial en la elaboración de alimentos y bebidas desde las primeras civilizaciones. Egipcios y mesopotámicos ya la utilizaban para producir cerveza y vino, aunque desconocían los mecanismos biológicos involucrados [1]. En la actualidad, desempeña un papel estratégico en la industria alimentaria y agroindustrial al participar en la producción de bebidas, biocombustibles y diversos productos fermentados, gracias a la capacidad metabólica de las levaduras para utilizar azúcares como sustrato y generar etanol y dióxido de carbono [2]. Tradicionalmente, los productores supervisan la fermentación mediante evaluaciones sensoriales y muestreos manuales periódicos [3], [4]. Sin embargo, estos métodos limitan el control del proceso en tiempo real, elevan los costos operativos y añaden variabilidad por la intervención humana (Figura 1) [5], [6], [7].

La Industria 4.0 impulsó tecnologías digitales para automatizar y controlar estos procesos. Los sensores electrónicos registran variables críticas con mayor precisión y frecuencia, y los sensores de gases detectan etanol y dióxido de carbono sin muestreo invasivo [8], [9]. Los microcontroladores integran estos sensores y envían los datos por redes inalámbricas a plataformas IoT, que muestran la información y sostienen las estrategias de control durante la fermentación [10].

En los últimos años, se han incorporado sensores MQ, tecnologías NDIR, espectroscopía infrarroja y biosensores para monitorear en tiempo real las variables críticas de la fermentación alcohólica. [11] encontraron alta sensibilidad al detectar cambios fermentativos con sensores electrónicos, mientras que [8] cuantificaron etanol con espectroscopía infrarroja sin necesidad de muestreo directo. [12] y [13], por su parte, integraron arquitecturas IoT y sensores distribuidos, con lo que lograron estimar en tiempo real variables clave de la fermentación y la calidad del producto; a pesar de ello, [14] advirtieron problemas de calibración, estabilidad operativa y validación a escala industrial en estas tecnologías.

Dos revisiones recientes contextualizan esta evolución. [15] señalan que el monitoreo inteligente de los procesos fermentativos está avanzando. Antes se usaba solo la experiencia tradicional, ahora se usan estrategias multimodales que combinan sensores, inteligencia artificial e Internet de las Cosas. También identifican desafíos que incluyen la generalización de los modelos, la estabilidad de los sensores y la interoperabilidad de las plataformas. Para la fermentación alcohólica, [16] destacan que las soluciones de monitoreo automatizado se enfocan principalmente en la temperatura y que las propuestas han sido evaluadas en su mayoría en condiciones de laboratorio, con una limitada validación en entornos industriales. Esto muestra que el desarrollo del campo no se limita a mejorar la medición, sino que requiere integrar de forma adecuada la adquisición de datos, su procesamiento y la toma de decisiones.

Bajo este contexto, el presente artículo revisa las estrategias actuales para el monitoreo y control de la fermentación alcohólica mediante sensores electroquímicos, sistemas biomiméticos, sensores ópticos y físicos, además de su integración con plataformas IoT e inteligencia artificial. Se examinan además las principales tendencias tecnológicas, las aplicaciones y los desafíos de implementar sistemas inteligentes en entornos industriales, para dar un panorama del estado actual y las perspectivas futuras de este campo de investigación.

ISSN: 2594-1925



Figura 1. Evolución del control de la fermentación alcohólica hacia sistemas inteligentes.

2. Metodología

2.1. Estrategia de revisión bibliográfica

Se hizo un análisis detallado de estudios sobre el uso de sensores electrónicos, tecnologías IoT e inteligencia artificial en la fermentación alcohólica. Las búsquedas se realizaron en Scopus, ScienceDirect, Springer e IEEE Xplore. El proceso se llevó a cabo de manera progresiva en junio de 2026. Se usaron términos clave y combinaciones relacionadas con las variables, tecnologías y enfoques del trabajo. No se utilizó una sola ecuación booleana. En lugar de eso, se fue ajustando la búsqueda a medida que se descubrían nuevos aspectos del tema. Esto ayudó a ampliar o aclarar los resultados obtenidos. Los artículos se seleccionaron según su pertinencia respecto al monitoreo, la estimación, la predicción o el control de variables asociadas a la fermentación alcohólica.

Se priorizaron artículos originales publicados entre 2021 y 2026 en revistas indexadas de ingeniería, automatización y agroindustria, en español o inglés, incorporando puntualmente antecedentes anteriores a este periodo cuando aportaron valor conceptual. Se excluyeron documentos sin relación directa con la fermentación alcohólica o las tecnologías analizadas, y aquellos cuyo contenido no permitía identificar claramente su aplicación, variable de interés o contribución. Los trabajos de revisión se consideraron únicamente como referencia del estado del conocimiento, sin formar parte del corpus de artículos originales analizado en las secciones siguientes. Como resultado, se incluyeron 63 fuentes bibliográficas a lo largo de la revisión narrativa, independientes del corpus utilizado en el análisis bibliométrico.

ISSN: 2594-1925

A lo largo de esta revisión se diferencian los términos monitoreo, estimación, predicción y control, ya que suelen usarse de forma indistinta en la literatura. El monitoreo es la medición directa de una variable del proceso. La estimación calcula una variable que no se mide directamente, usando otras señales que sí están disponibles. La predicción anticipa el valor futuro de una variable, calculando a partir de datos históricos. El control incluye, además de la medición o estimación, una estrategia de retroalimentación con una variable que se puede ajustar para modificar el proceso.

2.2. Análisis bibliométrico

Como complemento de la revisión, se desarrolló un análisis bibliométrico a partir de un corpus bibliográfico obtenido de la base de datos Scopus para identificar tendencias de investigación y la evolución científica de sensores electrónicos y tecnologías IoT aplicadas al control fermentativo.

Para este análisis, la búsqueda utilizó la siguiente ecuación:

(TITLE-ABS-KEY (“alcoholic fermentation” AND sensor) OR TITLE-ABS-KEY (“alcoholic fermentation” AND IoT) OR TITLE-ABS-KEY (“alcoholic fermentation” AND “Internet of Things”) OR TITLE-ABS-KEY (“alcoholic fermentation” AND microcontrollers)) AND TITLE-ABS-KEY (CO2 OR ethanol OR pH OR temperature)

La búsqueda recuperó un total de 69 documentos publicados entre 1984 y 2026.

Con Bibliometrix se generó el gráfico de la producción científica anual considerando todos los registros del período 1984-2026 (Figura 2a). Las nubes de palabras clave (Figura 2b) se generaron por separado para tres períodos definidos según los puntos de inflexión observados en la curva de producción: Periodo I (1984-2005), Periodo II (2006-2019) y Periodo III (2020-2026), utilizando palabras clave de autor (Author Keywords) y limitando el análisis a los 10 términos más frecuentes por periodo. Ambas figuras se integraron en un panel único para facilitar la lectura conjunta de la dinámica temporal y la evolución conceptual del campo.

La distribución geográfica de la producción científica por país (Figura 3a) se analizó en Bibliometrix a partir del corpus exportado de Scopus. El gráfico de burbujas (Figura 3b) se elaboró en Scimago Graphica utilizando tres variables por país: número de documentos, citas acumuladas y promedio de citas por documento. En este gráfico, el eje X representa el número de publicaciones, el eje Y el promedio de citas y el tamaño de la burbuja las citas acumuladas, lo que permite visualizar simultáneamente productividad e impacto científico. Ambos paneles se integraron en una figura compuesta para facilitar su comparación.

La red de coocurrencia de palabras clave (Figura 4) se generó en VOSviewer mediante análisis de coocurrencia sobre todas las palabras clave (All Keywords), con un mínimo de cuatro ocurrencias por término y un total de 33 términos seleccionados. Antes de construir el mapa, se aplicó un archivo de thesaurus con 153 reglas de normalización terminológica para unificar variantes sinónimas y eliminar 25 términos de ruido provenientes de los metadatos de indexación de Scopus (article, nonhuman, controlled study, entre otros). El tamaño del nodo representa la frecuencia de aparición de cada término y el grosor del enlace la fuerza de coocurrencia entre pares de palabras clave, mientras que los clústeres temáticos se diferenciaron mediante el algoritmo de Leiden.

ISSN: 2594-1925

3. Análisis bibliométrico: evolución y tendencias de investigación

3.1. Producción científica y evolución temporal

La producción científica sobre control fermentativo muestra tres fases de desarrollo con vocabularios distintos que reflejan la evolución tecnológica del campo.

La Figura 2 muestra un crecimiento escalonado en la investigación sobre control fermentativo. Entre 1984 y 2005, la producción científica fue escasa y se concentró en desarrollar sensores y métodos analíticos para determinar etanol y compuestos asociados a la fermentación alcohólica. Los términos más frecuentes en este periodo (ethanol, fermentation, sensor) reflejan un enfoque en el control instrumental básico y las mediciones en línea, propio de las primeras etapas del control de bioprocesos [17].

Entre 2006 y 2019, en cambio, la producción fue más continua y la temática se diversificó, aunque de forma moderada. Además de mantenerse alcoholic fermentation como eje central, aparecen términos asociados con levaduras, software y determinación de variables del proceso, lo que indica una transición hacia sistemas de supervisión más integrados y automatizados [18].

El periodo 2020-2026 concentra la mayor parte de la producción científica y es donde más se diversifican los temas tratados. En estos años se vuelven frecuentes en la literatura términos como real-time monitoring, soft sensor, artificial neural network y nanomaterials, en paralelo con el desarrollo de sistemas de control basados en biosensores avanzados y modelos predictivos. [15] señalan que combinar sensores electroquímicos, visión computacional y algoritmos de machine learning no solo mejora la predicción de parámetros fermentativos, sino también la optimización del proceso en tiempo real.

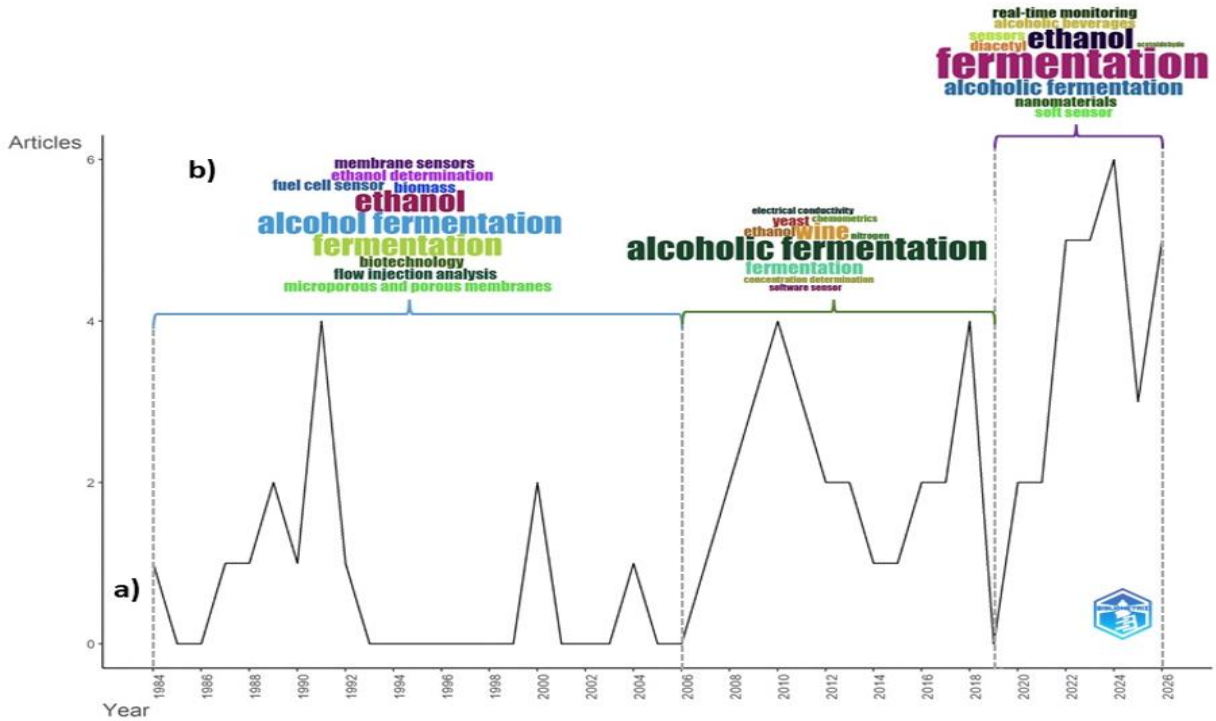


Figura 2. Evolución de la producción científica y tendencias temáticas en control fermentativo (1984-2026). a) Producción científica anual. b) Nubes de términos clave según el periodo.

ISSN: 2594-1925

3.2. Distribución geográfica e impacto científico

La Figura 3 muestra la distribución geográfica y el impacto científico de las publicaciones analizadas. Europa occidental concentra la mayor producción, encabezada por Francia, Alemania, Italia y España (Figura 3a). China, Brasil y Japón desempeñan un papel importante fuera de Europa, lo que coincide con el creciente avance en I+D de estos países [14]. No obstante, el volumen de producción no siempre corresponde al impacto alcanzado por cada país.

La Figura 3b indica que Francia lidera la cantidad de documentos (15) y presenta uno de los mayores impactos en citas. Australia, en cambio, con una producción inferior, registra el mayor número de citas (22), lo que sugiere una influencia científica alta en comparación con su número de publicaciones. Alemania e Italia presentan un equilibrio entre productividad e impacto. Esto confirma que el impacto científico no se basa únicamente en la cantidad de publicaciones, sino también en la calidad y visibilidad de las investigaciones.

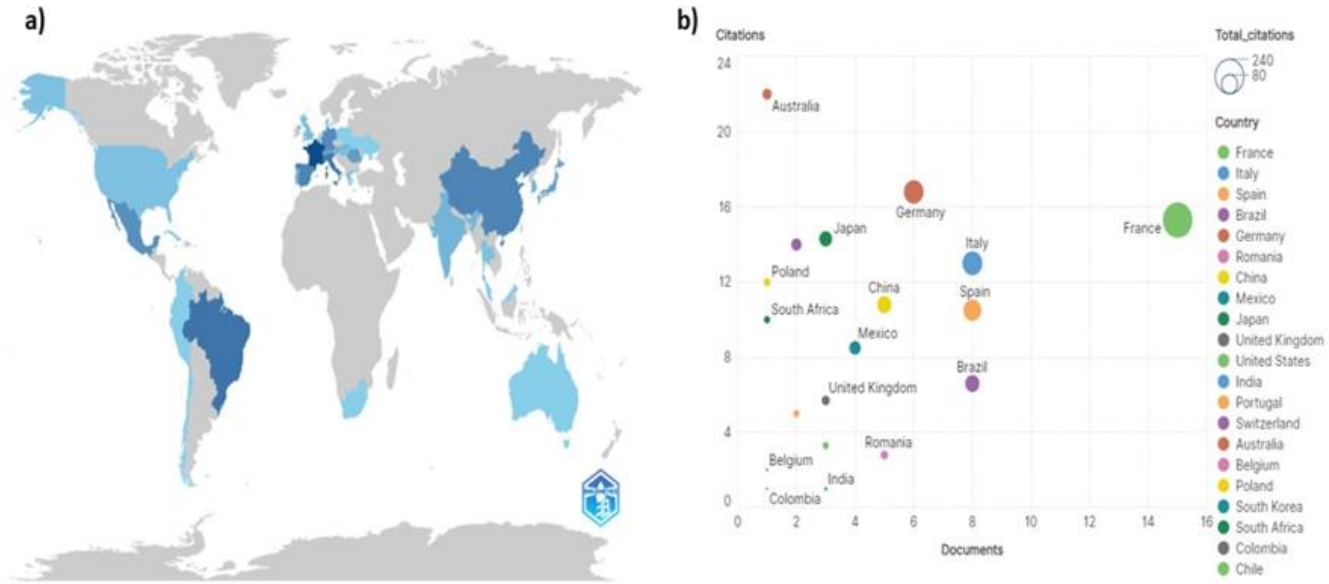


Figura 3. Análisis geográfico de la producción científica sobre control fermentativo. a) Mapa global de distribución de publicaciones según el país. b) Gráfico de burbujas de documentos, citaciones y total de citas por país.

3.3. Red de coocurrencia y tendencias temáticas

La Figura 4 muestra la red de coocurrencia de palabras clave obtenida mediante VOSviewer. El término "fermentation" es el nodo central y de mayor conexión, lo que confirma que constituye el principal eje de investigación. A su alrededor destacan ethanol, yeast, Saccharomyces cerevisiae y biosensor, términos ligados directamente a los procesos fermentativos y su control.

También aparecen términos como real-time monitoring, soft sensor, artificial intelligence y mathematical models, que apuntan hacia sistemas inteligentes y predictivos para el control fermentativo. Palabras como electronic nose system y electrochemical analysis muestran, además, el uso creciente de tecnologías avanzadas para el seguimiento del proceso en tiempo real [19].

ISSN: 2594-1925

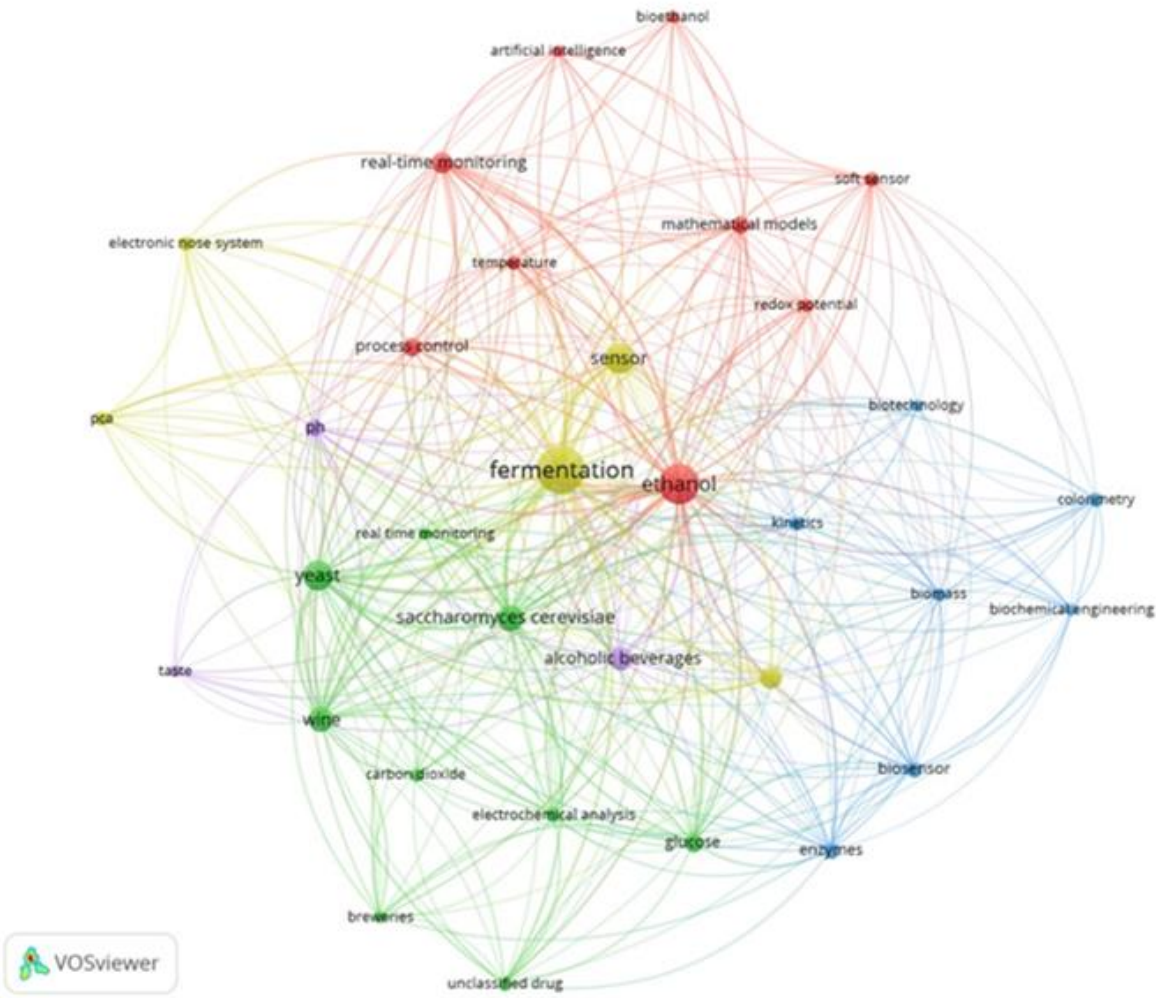


Figura 4. Mapa de coocurrencia de palabras clave sobre control de procesos fermentativos.

4. Revisión de literatura: tipos de sensores electrónicos aplicados al control de la fermentación alcohólica

4.1. Sensores electroquímicos

Los sensores electroquímicos aplicados en el control de la fermentación alcohólica emplean diferentes mecanismos de transducción. Entre los más utilizados se encuentra la amperometría, la voltametría diferencial de pulsos (DPV), la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y los sistemas multisensor integrados en chip [20], [21], [22]. La Tabla 1 resume los principales avances reportados.

En relación con los analitos evaluados, el etanol y la glucosa destacan como las variables más investigadas, debido a que actúan como producto y sustrato principal de la fermentación alcohólica, respectivamente. [23] demostraron la viabilidad de los biosensores amperométricos para cuantificar etanol. Dos años después, [24] y [25] mejoraron el desempeño analítico al modificar el electrodo y confirmaron que los nanomateriales incrementan la sensibilidad y la transferencia electrónica.

ISSN: 2594-1925

[26] registraron un aumento en la utilización de estos sistemas en el sector y validaron un sistema en flujo en comparación con HPLC con errores menores al 2%. Esta validación, sin embargo, abarca pocos casos frente a otros sensores más sensibles que aún no se han evaluado adecuadamente en procesos continuos.

Los avances más importantes están en los sistemas multiparamétricos. [27] y [5] mostraron que la consideración simultánea de varias mejoras la evaluación del proceso fermentativo. [28], [29] fueron un paso más allá al mostrar la capacidad de los dispositivos impresos en 3D para integrar distintas determinaciones. [11] y [30] tomaron un camino distinto: propusieron estrategias indirectas de estimación sin recurrir a biosensores enzimáticos convencionales, priorizando la estabilidad y la sencillez operativa por encima de la precisión analítica. Pese a los avances, [25] señalaron un problema que se repite en el área. La mayoría de las investigaciones todavía tiene poca validación en condiciones industriales reales.

Table 1. Sensores electroquímicos reportados para el control de la fermentación alcohólica.

Tecnología electroquímica	Aplicación en el monitoreo fermentativo	Variable monitoreada	Ventaja principal	Fuente
Biosensor amperométrico	Cuantificación de etanol	Etanol	Bajo costo y estabilidad	[23]
Plataforma MEMS multianalito	Monitoreo integral en línea	Glucosa, lactato, pH, O_2 y biomasa	Integración multiparamétrica en tiempo real	[27]
Capacitancia dieléctrica + sensores MOS	Seguimiento del crecimiento celular y producción de etanol	Biomasa y etanol	Monitoreo continuo sin muestreo	[11]
Biosensor amperométrico	Monitoreo de fermentación fed-batch	Glucosa	Amplio rango de detección	[26]
EIS	Seguimiento indirecto mediante CO_2	Actividad fermentativa	Método no invasivo	[30]
Lengua electrónica	Detección temprana de fermentaciones atascadas	Glucosa, etanol y metabolitos	Análisis multianalito	[5]
Biosensor amperométrico con nanomateriales	Monitoreo sensible de etanol	Etanol	Alta sensibilidad	[24]
Sensor electroquímico 3D-impreso	Análisis en bebidas fermentadas	Glucosa	Alta estabilidad y reproducibilidad	[28]
Biosensor amperométrico	Monitoreo del proceso cervecero	Glucosa, lactato	Mayor transferencia electrónica	[25]
Biosensor dual 3D-impreso	Monitoreo simultáneo de sustrato y producto	Glucosa, etanol	Determinación dual en tiempo real	[29]

ISSN: 2594-1925

4.2. Sistemas biomiméticos: narices y lenguas electrónicas

Las narices y lenguas electrónicas representan una alternativa a los sensores electroquímicos convencionales en el control de la fermentación alcohólica. Estos sistemas no cuantifican analitos específicos, sino que generan un perfil químico a partir de compuestos volátiles o señales iónicas [31], [32]. Los algoritmos de aprendizaje automático interpretan estas señales, por lo que el desempeño depende de que los datos de entrenamiento sean suficientes y representativos.

Los estudios recientes tienden hacia modelos de aprendizaje automático más complejos (Tabla 2) [33]. Esto mejora el análisis de señales no lineales, pero también traslada el desafío: ya no es tanto adquirir los datos como interpretarlos de forma robusta.

En narices electrónicas, [34] y [35] obtuvieron resultados aceptables con métodos clásicos y redes neuronales. [36] y [37] mostraron que las redes recurrentes representan mejor la dinámica fermentativa, y que combinarlas con NIR mejora todavía más la capacidad predictiva al sumar distintas fuentes de información. [38] y [39], en cambio, priorizaron modelos más robustos y portátiles, e insistieron en que hay que equilibrar precisión computacional y aplicabilidad práctica.

En lenguas electrónicas, [40], [41] y [42] centraron sus sistemas en productos terminados. Eso limita su uso para controlar el proceso y reduce su peso durante la fermentación activa.

[11] utilizaron señales de nariz electrónica para ajustar la alimentación del biorreactor, mientras que [12] integraron nariz y lengua electrónica en una plataforma IoT para estimar variables del proceso sin sensores directos. Aunque ambos estudios avanzan hacia el control en tiempo real, la validación industrial aún sigue siendo limitada.

ISSN: 2594-1925

Tabla 2. Narices y lenguas electrónicas aplicadas al control de la fermentación alcohólica.

Sistema biomimético	Aplicación en fermentación alcohólica	Analito(s) / parámetro(s)	Método analítico	Ventaja principal	Limitación principal	Fuente
Nariz electrónica (MOS), sensor de capacitancia	Estimación en línea en biorreactor	Etanol, biomasa viable	ML correlacional	Optimización del proceso fermentativo sin medición invasiva	Validación en una sola cepa y escala	[12]
Nariz electrónica, NIR	Control de calidad en productos fermentados	VOCs defectuales de vino	ANN, PCA	Alto desempeño con hardware de bajo costo	No validado durante fermentación activa	[35]
Nariz electrónica portátil (MOS)	Evaluación aromática de cerveza	VOCs aromáticos	Red neuronal	Arquitectura portátil y de bajo costo	No cuantifica analitos	[39]
Nariz electrónica	Monitoreo de fermentación industrial de etanol	Glucosa, etanol	Deep learning recurrente	Mejor desempeño temporal frente a ML convencional	Requiere grandes volúmenes de datos	[36]
Nariz electrónica prototipo	Control de calidad en vino	VOCs totales	PCA, LDA	Huella volátil como indicador de proceso y origen	Baja generalización	[34]
Nariz electrónica, NIR	Monitoreo de fermentación industrial	Glucosa, etanol	Deep learning multimodal	Mayor precisión mediante fusión multimodal	Alta complejidad computacional	[37]
Nariz electrónica, red neuronal ligera	Control de calidad en productos fermentados	VOCs indicadores de calidad	Deep learning ligero	Implementación viable en dispositivos embebidos	Validación limitada en laboratorio	[38]
Lengua electrónica potenciométrica	Control de calidad en vinos	Ácidos orgánicos, descriptores sensoriales	ML supervisado	Evaluación sensorial automatizada	No aplicado en fermentación activa	[40]
Lengua bioelectrónica	Control post-fermentación en vino	Fenoles, azúcares, ácidos orgánicos	PCA, SVMR	Cuantificación simultánea de múltiples compuestos	No validado en proceso activo	[41]
Lengua electrónica comercial	Control de oxidación post-fermentación	Marcadores de oxidación	Índice de discriminación	Detección temprana de oxidación	Aplicable solo post-proceso	[42]
Sistema IoT integrado (E-nose, E-tongue)	Monitoreo y estimación en tiempo real de tanques	Etanol, CO, CO_2, pH, azúcar	IA híbrida (V-LSTM, lógica difusa)	Estimación adaptativa indirecta	Validado en una sola variedad y bodega	[12]

ISSN: 2594-1925

4.3. Sensores ópticos y físicos

Las tecnologías espectroscópicas, acústicas, dieléctricas, colorimétricas y resonantes han ampliado las alternativas disponibles para el control de la fermentación alcohólica (Tabla 3) [43], [44]. Estos sistemas permiten obtener información simultánea de distintos parámetros del proceso mediante mediciones no invasivas [45].

En sensores Raman, [46], [47] resolvieron interferencias causadas por la biomasa celular durante la fermentación activa. Esto permitió aplicar modelos calibrados con soluciones estándar en monitoreo en línea sin recalibraciones complejas. De igual forma, [48] y [49] confirmaron el potencial de los sistemas Raman portátiles para análisis no invasivos. Sin embargo, todavía predominan aplicaciones en laboratorio y producto terminado.

En sistemas NIR, [50] y [51] integraron sensores multiespectrales para monitorear azúcares, compuestos fenólicos y color simultáneamente. Esto evidencia el avance hacia plataformas multisensoriales, aunque la estabilidad frente a sólidos y las recalibraciones prolongadas siguen siendo un desafío.

Por su parte, [8], [52], [53] y [54] desarrollaron sensores NDIR, acústicos y ultrasónicos para monitoreo no invasivo de gases fermentativos, biomasa y cinética. No obstante, las interferencias térmicas, las burbujas y la limitada validación industrial aún restringen su aplicación.

A su vez, [55], [56] y [57] desarrollaron dispositivos miniaturizados de bajo costo basados en resonadores, EIS y arrays colorimétricos. Aunque estos enfoques mejoran portabilidad y simplicidad operacional, la mayoría todavía opera bajo condiciones simplificadas.

ISSN: 2594-1925

Tabla 3. Sensores ópticos y físicos reportados para el control de la fermentación alcohólica.

Tecnología	Analito(s)	Método analítico	Contribución	Limitación principal	Fuente
Raman in-line	Glucosa, etanol, levadura	PLS, corrección de dispersión celular no lineal	Cuantificación simultánea del proceso fermentativo	Requiere corrección de dispersión celular	[46]
Raman in-line (estándares puros)	Glucosa, etanol, levadura	PLS, corrección vía banda de agua	Reduce necesidad de fermentaciones y de calibración	Dependiente de condiciones similares al entrenamiento	[47]
Raman SORS portátil	Densidad del mosto, pH	PLS + ASCA	Medición no invasiva del mosto	Validado solo a escala laboratorio	[48]
Raman portátil	Etanol, metanol, isopropanol	Calibración multivariada	Cuantificación rápida de alcoholes	Validado en producto terminado	[49]
NIR online + e-nose	Glucosa, fructosa, polifenoles, antocianinas, VOCs	PCR (NIR); E-nose	Supervisión simultánea de proceso y calidad	Requiere recalibración periódica	[50]
Multiespectral in-line (LEDs VIS/NIR)	Antocianinas (M3G), fenólicos, color	PLS, PCR, Ridge regression	Evaluación simultánea de compuestos de calidad	Sensible a interferencias por sólidos	[51]
FT-MIR/NDIR (headspace)	Etanol en fase gas	PLS (MC + SMA + 2a derivada)	Cuantificación no invasiva de etanol	Requiere control térmico estricto	[8]
NDIR on-chip (silicio, 7 mm2)	CO_2	Absorción infrarroja dual	Integración potencial en plataformas IoT	No validado en fermentación activa	[52]
Emisión acústica (hidrófono)	Densidad del mosto, cinética fermentativa	Análisis frecuencial	Validación en tanques industriales	Sensible a gradientes de temperatura	[53]
Ultrasonido no invasivo (3.5 MHz)	Concentración de levadura, fase líquida	Velocidad y atenuación acústica	Operación externa al fermentador	Interferencia por burbujas de CO_2 activo	[54]
Array colorimétrico (CSA)	pH	Calibración colorimétrica multicanal	Compatible con matrices fermentadas coloreadas	Requiere reemplazo periódico de membrana	[57]
Resonador SRR (microondas)	Agua, etanol y azúcar simultáneos	Extracción multivariable RF	Análisis simultáneo de múltiples compuestos	Sensible a cambios de temperatura	[55]
EIS + resonadores CDSRR	Etanol en agua	Circuito equivalente resonante	Alta sensibilidad sin funcionalización	Validado solo en solución binaria	[56]

ISSN: 2594-1925

4.4. Integración IoT y control inteligente

Las plataformas IoT aplicadas a fermentación alcohólica integran sensores, transmisión inalámbrica y modelos de inteligencia artificial para adquirir y analizar datos en tiempo real [58]. Estos sistemas han evolucionado desde esquemas de supervisión básica hacia arquitecturas capaces de detectar anomalías, estimar variables no medidas y optimizar el control del proceso.

Los estudios resumidos en la Tabla 4 evidencian una transición hacia plataformas IoT capaces de combinar monitoreo continuo, análisis predictivo y control automático. En este contexto, [12] y [13] representan dos enfoques distintos de integración IoT. El primero prioriza predicción mediante inteligencia artificial y sensores virtuales, mientras el segundo enfatiza estabilidad operativa y transmisión continua de datos. Esta diferencia muestra que el sector todavía no encuentra un equilibrio claro entre complejidad analítica y aplicabilidad industrial.

[59] demostró que una arquitectura simple, mediante un lazo de control PID, puede regular una variable fermentativa básica con bajo costo. [1], en cambio, mostró que una arquitectura igualmente simple permite monitorear variables fermentativas básicas sin necesidad de una plataforma compleja. El problema es que estos enfoques dependen sobre todo de comunicaciones inalámbricas de corto alcance; tecnologías como LoRaWAN y NB-IoT apenas se han explorado en aplicaciones fermentativas. [60] y [61] documentaron, por otra parte, un interés creciente por los *soft sensors* como opción a los sensores físicos, que a menudo son costosos o difíciles de integrar. Pero estos modelos todavía necesitan mucha información de buena calidad para ser entrenados y funcionar bien.

[62], [37] y [36] confirmaron que al combinar diferentes tipos de información y utilizar modelos que mezclan diferentes técnicas, se puede mejorar la exactitud de las predicciones. Esto es mejor que cuando se usan métodos que solo consideran una forma de datos. Un mayor número de variables y de capas computacionales, sin embargo, implica también más complejidad para calibrar y mantener el sistema.

[63] cierran esta línea con un enfoque completamente no invasivo basado en visión artificial. Esta estrategia reduce la instrumentación directa, aunque su desempeño depende de condiciones externas difíciles de estandarizar en ambientes industriales.

ISSN: 2594-1925

Tabla 4. Estudios sobre integración IoT y control inteligente en la fermentación alcohólica.

Arquitectura / Tecnología	Parámetros monitoreados	Modelo / IA	Contribución	Limitación principal	Fuente
IoT E-nose, E-tongue; ThingsBoard, Cassandra	CO_2, etanol gas, pH, azúcar residual, temperatura	V-LSTM, lógica difusa	Estimación indirecta de alcohol y de múltiples variables del proceso	Validado solo a pequeña escala	[12]
IoT modular (Winnie), NDIR, colorimétrico	CO_2, temperatura, humedad, SO_2	Adquisición continua	Implementación en entorno industrial con transmisión remota	Sin producción de etanol ni azúcar; SO_2 solo en hub	[13]
IoT por tanque; MQTT, Raspberry Pi	Temperatura, pérdida de masa por (CO_2)	Adquisición continua	Detección temprana de anomalías en fermentación	Aplicado solo a escala artesanal	[1]
ESP32, sensores térmicos y turbidez, Peltier, Cloud	Temperatura, turbidez (biomasa indirecta)	Control PID vía Peltier; transmisión continua a cloud	Arquitectura automatizada de bajo costo	No validado en fermentación productiva	[59]
E-nose PEN3, deep learning	Etanol y glucosa en SSF	BiLSTM, BiGRU	Predicción eficiente de metabolitos fermentativos	Específico para sustrato de yuca	[36]
Fusión NIR, e-nose	Etanol en SSF celulósica	CNN-RNN, NIR y e-nose	Mayor robustez predictiva mediante fusión de sensores	Mayor costo y complejidad operativa	[37]
Soft sensor con variables PAT	Etanol, sustrato de caña	FNN (feedforward)	Predicción usando variables accesibles del proceso	Dataset reducido	[60]
Soft sensor, VAE	Etanol en fermentación intensificada	VAE + regresión neuronal híbrida	Mejora predictiva mediante aumento artificial de datos	Evaluado en un solo caso de estudio	[61]
Modelo híbrido mecanístico-datos	Etanol, glucosa, biomasa	XG Boost, ANN, modelo cinético	Combina interpretabilidad y capacidad predictiva	Dependiente de parámetros cinéticos por lote	[62]
Visión artificial sobre airlock	Grado de fermentación, cinética de CO_2	CNN para clasificación de burbujas en tiempo real	Estimación no invasiva basada en imágenes	Dependiente de iluminación y visibilidad	[63]

4.5. Comparación entre familias tecnológicas

Las familias de sensores revisadas presentan fortalezas y limitaciones complementarias. Los sensores electroquímicos ofrecen la mayor especificidad analítica y permiten cuantificar directamente variables como etanol y glucosa, pero requieren contacto con el medio fermentativo y un mantenimiento más frecuente del electrodo. Los sistemas biomiméticos, al no cuantificar analitos específicos sino generar un perfil químico global, resultan más versátiles para detectar cambios generales del proceso o defectos del producto, aunque su desempeño depende en mayor medida de la calidad y el volumen de los datos de entrenamiento. Los sensores ópticos y físicos destacan por su carácter no invasivo y por permitir el seguimiento simultáneo de varias variables sin intervenir en el proceso, a costa de una mayor sensibilidad a interferencias como la turbidez o la temperatura. Las plataformas IoT, por su parte, no constituyen una

ISSN: 2594-1925

familia sensorial adicional sino un nivel de integración que combina varias de las tecnologías anteriores y puede soportar funciones de monitoreo, estimación, predicción y, cuando incorpora retroalimentación y una variable manipulada, control del proceso. En conjunto, ninguna familia tecnológica resuelve por sí sola los desafíos de calibración, estabilidad y validación industrial señalados en las secciones anteriores, lo que sugiere que las soluciones híbridas constituyen una alternativa con potencial para superar parte de estas limitaciones.

5. Desafíos y perspectivas futuras

La integración de sensores inteligentes, plataformas IoT e inteligencia artificial en procesos de fermentación ha optimizado la capacidad de supervisión y control en tiempo real. No obstante, existen distintos problemas técnicos y operativos que continúan restringiendo su utilización a gran escala en el sector.

Uno de los retos principales es la calibración y estabilidad de los sensores durante periodos largos de operación. Los cambios de temperatura y las variaciones en el medio fermentativo afectan la precisión de las mediciones. La presencia de biomasa y la acumulación de metabolitos también influyen en esto. Estos elementos pueden provocar que los modelos de control se alejen de lo previsto.

La mayoría de los sistemas referidos en la literatura han sido evaluados únicamente en laboratorio o en instalaciones piloto. Falta investigación a escala industrial que confirme si estos sistemas son confiables, reproducibles y económicamente viables.

Integrar inteligencia artificial es otro desafío importante. Los modelos predictivos han demostrado ser bastante precisos, pero necesitan bases de datos amplias y bien organizadas para funcionar correctamente. El problema es que esto no siempre es posible. Además, muchos modelos modernos son difíciles de comprender. Esto hace que las empresas tengan dudas sobre su uso. En un entorno industrial, es muy importante entender por qué se toman ciertas decisiones. Estos modelos no siempre ofrecen esa explicación.

En el futuro, probablemente veremos plataformas que combinarán diferentes tipos de sensores. Estos sensores pueden ser electroquímicos, ópticos, físicos o biomiméticos. Todo esto se integrará en una sola arquitectura. Las tecnologías como LoRaWAN y NB-IoT permiten que los dispositivos se comuniquen entre sí a larga distancia, lo cual es muy útil para diferentes usos. Esto se combina con Edge Computing y aprendizaje automático explicable. Esto podría hacer que los sistemas de monitoreo fermentativo sean más autónomos y escalables, capaces de optimizar el proceso de fermentación en tiempo real y de contribuir a reducir el impacto ambiental de la agroindustria.

6. Conclusiones

Los recientes desarrollos en sensores inteligentes, sistemas biomiméticos, tecnologías ópticas y plataformas IoT han contribuido a mejorar la supervisión de la fermentación alcohólica, aunque su adopción generalizada en la industria continúa siendo limitada. Los sensores electroquímicos, Raman, NIR, NDIR, además de las narices y lenguas electrónicas, supervisan eficazmente variables clave como etanol, glucosa, CO_2, pH y biomasa en tiempo real, facilitando procesos más automáticos, precisos y menor necesidad de personas que intervengan manualmente.

ISSN: 2594-1925

La combinación de IoT e inteligencia artificial ha hecho posible crear sistemas predictivos que pueden detectar anomalías, calcular variables no medidas y ayudar en la toma de decisiones durante el proceso de fermentación. No obstante, gran parte de las investigaciones aún se encuentra restringida a escalas de laboratorio o piloto. Principalmente, se requiere validación en entornos industriales auténticos.

Entre los principales desafíos se encuentran la calibración y estabilidad de los sensores, las interferencias ocasionadas por matrices complejas, la disponibilidad de datos para el entrenamiento de los modelos y las altas demandas computacionales de las herramientas de inteligencia artificial. Más que barreras cerradas, estas limitaciones indican el camino que puede seguir la investigación para desarrollar estos sistemas de manera más sólida y utilizable.

[15] describen una transición hacia enfoques multimodales en fermentación de alimentos en general, y [16], señalan las mismas limitaciones de calibración y validación industrial para la fermentación alcohólica en particular. Este trabajo integra las tres familias tecnológicas revisadas bajo un marco conceptual común y muestra que ninguna resuelve por sí sola los desafíos descritos. El análisis bibliométrico complementario sitúa esta integración dentro de una trayectoria histórica más amplia, que pasó del control instrumental básico a los enfoques actuales. Las soluciones híbridas, más que el perfeccionamiento aislado de una sola tecnología, aparecen, así como la dirección más prometedora para la industria fermentativa.

7. Agradecimientos de autoría

Nahomi Rubí Llontop-Ayasta: Conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, curación de datos, visualización, redacción - borrador original. *Elthon Steven Boñon-Rocha*: Conceptualización, metodología, análisis formal, investigación, curación de datos, visualización, redacción - borrador original. *Ulises Benjamín Narro-Altamirano:* Conceptualización; Administración del proyecto; Supervisión; Redacción – revisión y edición. *Víctor Javier Vásquez-Villalobos:* Conceptualización; Administración del proyecto; Supervisión; Redacción – revisión y edición.

Referencias

[1] D. Buonocore, G. Ciavolino, D. D. Caro, y C. Liguori, «An IoT-based beer fermentation monitoring system», en *2021 IEEE International Workshop on Metrology for Agriculture and Forestry (MetroAgriFor)*, Trento-Bolzano, Italy: IEEE, nov. 2021, pp. 263-267. doi: 10.1109/MetroAgriFor52389.2021.9628536.

[2] P. Burkhardtsmaier, K. Pavlovskaja, D. Maier, S. Schäfer, U. Salat, y M. S. Schmidt, «Quantitative Monitoring of the Fermentation Process of a Barley Malt Mash by Benchtop 1H NMR Spectroscopy», *Food Anal. Methods*, vol. 14, n.º 7, pp. 1425-1431, jul. 2021, doi: 10.1007/s12161-021-01991-9.

[3] C. L. Gargalo, P. C. Lopez, A. Hasanzadeh, I. A. Udugama, y K. V. Gernaey, «On-line monitoring of process parameters during fermentation», en *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 2022, pp. 117-164. doi: 10.1016/B978-0-323-91167-2.00003-4.

[4] L. B. Ramos-Sánchez, L. Arias-Águila, J. A. L. Herrera, y R. A. V. Fajardo, «La Fermentación Alcohólica: Una Plataforma de Biomanufactura Global.», *Rev. Investig. Hatun Yachay Wasi*, vol. 5, n.º 1, pp. 121-137, ene. 2026, doi: 10.57107/hyw.v5i1.110.

[5] E. Cañete-Carmona, J.-J. Gallego-Martinez, C. Martin, M. Brox, J.-J. Luna-Rodriguez, y J. Moreno, «A Low-Cost IoT Device to Monitor in Real-Time Wine Alcoholic Fermentation Evolution

ISSN: 2594-1925

Through CO_2 Emissions», *IEEE Sens. J.*, vol. 20, n.º 12, pp. 6692-6700, jun. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2975284.
[6] A. J. Gamboa-Escobar, C. M. Astorga-Zaragoza, J. Villanueva-Tavira, Y. Toledo-Sánchez, y S. P. Pérez-Sabino, «Oportunidades de Mejora en la Supervisión de Procesos Biotecnológicos para la Producción de Bebidas Fermentadas», *Tend. En Energ. Renov. Sustentabilidad*, vol. 5, n.º 2, pp. 1-5, feb. 2026, doi: 10.56845/terys.v5i2.447.
[7] J. Vošahlík, «IoT and measurement of fermentation process of rice wine», p. 603.6Kb, 2023, doi: 10.15159/AR.23.081.
[8] M. V. Santos, K. C. S. Rodrigues, I. I. K. Veloso, A. C. Badino, y A. J. G. Cruz, «Real-Time Monitoring of Ethanol Fermentation Using Mid-Infrared Spectroscopy Analysis of the Gas Phase», *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 61, n.º 21, pp. 7225-7234, jun. 2022, doi: 10.1021/acs.iecr.2c00325.
[9] D. R. D. K. Siregar, M. S. Surbakti, Fadhli, Zakaria, Susilawati, y H. Akbar, «Real-Time Ethanol Monitoring System for Palm Sap Fermentation Using a MiCS-5524 Gas Sensor and Arduino Uno», *J. Technomaterial Phys.*, vol. 8, n.º 1, pp. 001-007, dic. 2025, doi: 10.32734/jotp.v8i1.23866.
[10] A. T. Naser, «ESP32-WiFi Network Smart Monitoring System.», *Sci. Res. J. Eng. Comput. Sci.*, vol. 03, n.º 02, pp. 1-3, dic. 2023, doi: 10.47310/srjecs.2023.v03i02.003.
[11] Y. Feng *et al.*, «Real-time and on-line monitoring of ethanol fermentation process by viable cell sensor and electronic nose», *Bioresour. Bioprocess.*, vol. 8, n.º 1, p. 37, dic. 2021, doi: 10.1186/s40643-021-00391-5.
[12] S. Kontogiannis, M. Tsoumani, G. Kokkonis, C. Pikridas, y Y. Kotseridis, «Proposed SmartBarrel System for Monitoring and Assessment of Wine Fermentation Processes Using IoT Nose and Tongue Devices», *Sensors*, vol. 25, n.º 13, p. 3877, jun. 2025, doi: 10.3390/s25133877.
[13] I. Kovačević, I. Aleksi, T. Keser, y T. Matić, «Winnie: A Sensor-Based System for Real-Time Monitoring and Quality Tracking in Wine Fermentation», *Appl. Sci.*, vol. 15, n.º 21, p. 11317, oct. 2025, doi: 10.3390/app152111317.
[14] A. Bowler, J. Escrig, M. Pound, y N. Watson, «Predicting Alcohol Concentration during Beer Fermentation Using Ultrasonic Measurements and Machine Learning», *Fermentation*, vol. 7, n.º 1, p. 34, mar. 2021, doi: 10.3390/fermentation7010034.
[15] J. Zhou *et al.*, «Intelligent monitoring technologies for food fermentation processes: transformation from traditional experience to multimodal approaches and challenges», *Food Sci. Biotechnol.*, may 2026, doi: 10.1007/s10068-026-02182-0.
[16] T. Horváth, S. Kun, L. Sipos, y D. T. Pham, «Automated monitoring of alcoholic fermentation: trends and challenges», *J. Food Sci. Technol.*, vol. 63, n.º 2, pp. 224-237, feb. 2026, doi: 10.1007/s13197-025-06528-0.
[17] G. K. Raju y C. L. Cooney, «Fermentation monitoring», *Curr. Opin. Biotechnol.*, vol. 3, n.º 1, pp. 40-44, feb. 1992, doi: 10.1016/0958-1669(92)90123-Z.
[18] V. Di Egidio, N. Sinelli, G. Giovanelli, A. Moles, y E. Casiraghi, «NIR and MIR spectroscopy as rapid methods to monitor red wine fermentation», *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 230, n.º 6, pp. 947-955, abr. 2010, doi: 10.1007/s00217-010-1227-5.
[19] M. Mirasoli, M. Guardigli, E. Michelini, y A. Roda, «Recent advancements in chemical luminescence-based lab-on-chip and microfluidic platforms for bioanalysis», *J. Pharm. Biomed. Anal.*, vol. 87, pp. 36-52, ene. 2014, doi: 10.1016/j.jpba.2013.07.008.
[20] A. Kharkova *et al.*, «Bionanocomposite Four-Channel Biosensor for Rapid and Convenient Monitoring of Glucose, Lactate, Ethanol and Starch», *Gels*, vol. 11, n.º 5, p. 355, may 2025, doi: 10.3390/gels11050355.

ISSN: 2594-1925

[21] C. Zanoni, L. V. Dallù, C. Costa, A. Cutaia, y G. Alberti, «A Screen-Printed Voltammetric Sensor Modified with Electropolymerized Molecularly Imprinted Polymer (eMIP) to Determine Gallic Acid in Non-Alcoholic and Alcoholic Beverages», *Polymers*, vol. 16, n.º 8, p. 1076, abr. 2024, doi: 10.3390/polym16081076.
[22] B. Li, J. Wang, y R. Zhang, «Detection and analysis of electrochemical signals in wine fermentation process», *J. Food Meas. Charact.*, vol. 17, n.º 5, pp. 5103-5109, oct. 2023, doi: 10.1007/s11694-023-02027-y.
[23] O. M. Istrate, L. Rotariu, y C. Bala, «A Novel Amperometric Biosensor Based on Poly(allylamine hydrochloride) for Determination of Ethanol in Beverages», *Sensors*, vol. 21, n.º 19, p. 6510, sep. 2021, doi: 10.3390/s21196510.
[24] O. M. Istrate, C. Bala, y L. Rotariu, «A New Highly Sensitive Electrochemical Biosensor for Ethanol Detection Based on Gold Nanoparticles/Reduced Graphene Oxide/Polyallylamine Hydrochloride Nanocomposite», *Biosensors*, vol. 13, n.º 11, p. 954, oct. 2023, doi: 10.3390/bios13110954.
[25] G. Sun, X. Wei, D. Zhang, L. Huang, H. Liu, y H. Fang, «Immobilization of Enzyme Electrochemical Biosensors and Their Application to Food Bioprocess Monitoring», *Biosensors*, vol. 13, n.º 9, p. 886, sep. 2023, doi: 10.3390/bios13090886.
[26] S. Yang *et al.*, «Online Glucose Analysis System With High Precision and Wide Detection Range for Fermentation Monitoring», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1-9, 2022, doi: 10.1109/TIM.2022.3218115.
[27] N. I. Rusli, I. P. Vincentini, F. Ceyssens, y M. Kraft, «Multi-Sensor Chip for Monitoring Key Parameters in Bioprocesses», *IEEE Sens. J.*, vol. 21, n.º 18, pp. 19675-19683, sep. 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3094034.
[28] E. Koukouviti, A. K. Plessas, V. Pagkali, A. Economou, G. S. Papaefstathiou, y C. Kokkinos, «3D-printed electrochemical glucose device with integrated Fe(II)-MOF nanozyme», *Microchim. Acta*, vol. 190, n.º 7, p. 274, jul. 2023, doi: 10.1007/s00604-023-05860-6.
[29] E. Koukouviti, C. Koulopoulou, N. Anastasiou, A. Economou, y C. Kokkinos, «3D printed electrochemical dual-sensor biodevice for the simultaneous determination of glucose and ethanol in wines», *Food Control*, vol. 181, p. 111784, mar. 2026, doi: 10.1016/j.foodcont.2025.111784.
[30] S. Kernbach *et al.*, «The biosensor based on electrochemical dynamics of fermentation in yeast Saccharomyces cerevisiae», *Environ. Res.*, vol. 213, p. 113535, oct. 2022, doi: 10.1016/j.envres.2022.113535.
[31] R. Muñoz-Castells *et al.*, «Application of an Electronic Nose to the Prediction of Odorant Series in Wines Obtained with Saccharomyces or Non-Saccharomyces Yeast Strains», *Molecules*, vol. 30, n.º 7, p. 1584, abr. 2025, doi: 10.3390/molecules30071584.
[32] R. Brito-Pereira, R. Policia, C. Ribeiro, P. Martins, S. Lanceros-Mendez, y F. N. Crespilho, «Hydrogel In-Tape Electronic Tongue», *ACS Appl. Electron. Mater.*, vol. 7, n.º 5, pp. 1792-1801, mar. 2025, doi: 10.1021/acsaelm.4c02059.
[33] C. Liu, T. Sun, W. Zeng, Y. Wang, X. Li, y Z. Wang, «Fusion the electronic tongue and electronic nose with a graph neural network-Mamba hybrid models for the rapid traceability of wine origin», *Eur. Food Res. Technol.*, vol. 251, n.º 11, pp. 3533-3547, nov. 2025, doi: 10.1007/s00217-025-04849-0.
[34] L. C. Schroeder *et al.*, «Discriminant analysis of volatile compounds in wines obtained from different managements of vineyards obtained by e-nose», *Smart Agric. Technol.*, vol. 6, p. 100343, dic. 2023, doi: 10.1016/j.atech.2023.100343.
[35] C. Gonzalez y S. Fuentes, «Digital Assessment and Classification of Wine Faults Using a Low-Cost Electronic Nose, Near-Infrared Spectroscopy and Machine Learning Modelling», *Sensors*, vol. 22, n.º 6, p. 2303, mar. 2022, doi: 10.3390/s22062303.

ISSN: 2594-1925

[36] B. Wang, J. Deng, H. Jiang, y Q. Chen, «Electronic nose signals-based deep learning models to realize high-precision monitoring of simultaneous saccharification and fermentation of cassava», *Microchem. J.*, vol. 182, p. 107929, nov. 2022, doi: 10.1016/j.microc.2022.107929.
[37] H. Jiang, J. Deng, y Q. Chen, «Monitoring of simultaneous saccharification and fermentation of ethanol by multi-source data deep fusion strategy based on near-infrared spectra and electronic nose signals», *Eng. Appl. Artif. Intell.*, vol. 127, p. 107299, ene. 2024, doi: 10.1016/j.engappai.2023.107299.
[38] Q. D. N. Nguyen, H. V. A. Le, T. Nakano, y T. H. Tran, «Wine quality assessment through lightweight deep learning: integrating 1D-CNN and LSTM for analyzing electronic nose VOCs signals», *Appl. Comput. Inform.*, mar. 2024, doi: 10.1108/ACI-10-2023-0098.
[39] I. Zafar, Y. Cui, Q. Bai, y Y. Yang, «Classifying Beers With Memristor Neural Network Algorithm in a Portable Electronic Nose System», *Front. Phys.*, vol. 10, p. 907644, jun. 2022, doi: 10.3389/fphy.2022.907644.
[40] G. Gabrieli, M. Muszynski, y P. W. Ruch, «A reconfigurable integrated electronic tongue and its use in accelerated analysis of juices and wines», en *2022 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN)*, Aveiro, Portugal: IEEE, may 2022, pp. 1-3. doi: 10.1109/ISOEN54820.2022.9789630.
[41] S. Pettinelli, C. Pérez-Gonzàlez, C. Salvo-Comino, F. Mencarelli, C. Garcia-Cabezón, y M. L. Rodriguez-Mendez, «High-performance bioelectronic tongue for the simultaneous analysis of phenols, sugars and organic acids in wines», *J. Sci. Food Agric.*, vol. 105, n.º 3, pp. 1430-1438, feb. 2025, doi: 10.1002/jsfa.13174.
[42] R. I. Potter, J. Lee, y C. F. Ross, «Early Oxidation Detection in White Wine by Electronic Tongue: A Preliminary Study», *Food Sci. Nutr.*, vol. 13, n.º 6, p. e70366, jun. 2025, doi: 10.1002/fsn3.70366.
[43] S. Mamolar-Domenech, H. Crespo-Sariol, J. C. Sáenz-Díez, A. Sánchez-Roca, J.-I. Latorre-Biel, y J. Blanco, «A new approach for monitoring the alcoholic fermentation process based on acoustic emission analysis: A preliminary assessment», *J. Food Eng.*, vol. 353, p. 111537, sep. 2023, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2023.111537.
[44] W. Tang, Y. Qi, X. Yang, J. Wang, y Z. Li, «Low-cost and portable colorimetric platform for simultaneous detection of Fe, methanol, and total phenols in wine», *Food Chem.*, vol. 398, p. 133907, ene. 2023, doi: 10.1016/j.foodchem.2022.133907.
[45] L. Zeng, A. Pernet, M. Cléroux, B. Bach, L. Froidevaux, y I. Preda, «Development of Distillation Sensors for Spirit Beverages Production Monitoring Based on Impedance Spectroscopy Measurement and Partial Least-Squares Regression», *ACS Omega*, vol. 8, n.º 17, pp. 15323-15333, may 2023, doi: 10.1021/acsomega.3c00481.
[46] N. Yang, C. Guerin, N. Kokanyan, y P. Perré, «Raman spectroscopy applied to online monitoring of a bioreactor: Tackling the limit of detection», *Spectrochim. Acta. A. Mol. Biomol. Spectrosc.*, vol. 304, p. 123343, ene. 2024, doi: 10.1016/j.saa.2023.123343.
[47] N. Yang, C. Guerin, N. Kokanyan, y P. Perré, «In-line monitoring of bioreactor by Raman spectroscopy: Direct use of a standard-based model through cell-scattering correction», *J. Biotechnol.*, vol. 396, pp. 41-52, dic. 2024, doi: 10.1016/j.jbiotec.2024.10.007.
[48] D. Schorn-García *et al.*, «Spatially Offset Raman Spectroscopic (SORS) Analysis of Wine Alcoholic Fermentation: A Preliminary Study», *Fermentation*, vol. 9, n.º 2, p. 115, ene. 2023, doi: 10.3390/fermentation9020115.
[49] P. Papaspyridakou, P. Giannoutsou, y M. G. Orkoula, «Non-Destructive and Non-Invasive Measurement of Ethanol and Toxic Alcohol Strengths in Beverages and Spirits Using Portable Raman Spectroscopy», *Biosensors*, vol. 13, n.º 1, p. 135, ene. 2023, doi: 10.3390/bios13010135.

ISSN: 2594-1925

[50] E. Littarru *et al.*, «Optimizing the winemaking process: NIR spectroscopy and e-nose analysis for the online monitoring of fermentation», *J. Sci. Food Agric.*, vol. 105, n.º 3, pp. 1465-1475, feb. 2025, doi: 10.1002/jsfa.13336.
[51] J. Unterkofler, D. W. Jeffery, O. J. Macintyre, y R. A. Muhlack, «Prototyping a sensor-based instrument for in-line optical monitoring in red wine fermentation», *Appl. Food Res.*, vol. 6, n.º 1, p. 102069, jun. 2026, doi: 10.1016/j.afres.2026.102069.
[52] X. Jia, J. Roels, R. Baets, y G. Roelkens, «A Miniaturised, Fully Integrated NDIR CO2 Sensor On-Chip», *Sensors*, vol. 21, n.º 16, p. 5347, ago. 2021, doi: 10.3390/s21165347.
[53] A. Sanchez-Roca, J.-I. Latorre-Biel, E. Jiménez-Macías, J. C. Saenz-Díez, y J. Blanco-Fernández, «The Characterization of the Alcoholic Fermentation Process in Wine Production Based on Acoustic Emission Analysis», *Processes*, vol. 12, n.º 12, p. 2797, dic. 2024, doi: 10.3390/pr12122797.
[54] D. Geier, M. Mailänder, I. Whitehead, y T. Becker, «Non-Invasive Characterization of Different Saccharomyces Suspensions with Ultrasound», *Sensors*, vol. 24, n.º 19, p. 6271, sep. 2024, doi: 10.3390/s24196271.
[55] N. Hosseini y M. Baghelani, «Selective real-time non-contact multi-variable water-alcohol-sugar concentration analysis during fermentation process using microwave split-ring resonator based sensor», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 325, p. 112695, jul. 2021, doi: 10.1016/j.sna.2021.112695.
[56] A. Leo, A. G. Monteduro, S. Rizzato, A. Milone, y G. Maruccio, «Miniaturized Sensors for Detection of Ethanol in Water Based on Electrical Impedance Spectroscopy and Resonant Perturbation Method—A Comparative Study», *Sensors*, vol. 22, n.º 7, p. 2742, abr. 2022, doi: 10.3390/s22072742.
[57] A. Pastore, D. Badocco, L. Cappellin, M. Tubiana, y P. Pastore, «Real-time monitoring of the pH of white wine and beer with colorimetric sensor arrays (CSAs)», *Food Chem.*, vol. 452, p. 139513, sep. 2024, doi: 10.1016/j.foodchem.2024.139513.
[58] N. Adamashvili, N. Zhizhilashvili, y C. Tricase, «The Integration of the Internet of Things, Artificial Intelligence, and Blockchain Technology for Advancing the Wine Supply Chain», *Computers*, vol. 13, n.º 3, p. 72, mar. 2024, doi: 10.3390/computers13030072.
[59] L. M. Baicu, M. Andrei, G. A. Ifrim, y L. T. Dimitrievici, «Embedded IoT Design for Bioreactor Sensor Integration», *Sensors*, vol. 24, n.º 20, p. 6587, oct. 2024, doi: 10.3390/s24206587.
[60] E. C. Rivera, C. K. Yamakawa, C. E. Rossell, J. Nolasco, y H. J. Kwon, «Prediction of intensified ethanol fermentation of sugarcane using a deep learning soft sensor and process analytical technology», *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, vol. 99, n.º 1, pp. 207-216, ene. 2024, doi: 10.1002/jctb.7525.
[61] H. J. Kwon, J. H. Shiu, C. K. Yamakawa, y E. C. Rivera, «Enhancing Fermentation Process Monitoring through Data-Driven Modeling and Synthetic Time Series Generation», *Bioengineering*, vol. 11, n.º 8, p. 803, ago. 2024, doi: 10.3390/bioengineering11080803.
[62] X. Li *et al.*, «Dynamic hybrid modeling of fuel ethanol fermentation process by integrating biomass concentration XGBoost model and kinetic parameter artificial neural network model into mechanism model», *Renew. Energy*, vol. 205, pp. 574-582, mar. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2023.01.113.
[63] J. Jeong y S. Kim, «Application of machine learning for quantitative analysis of industrial fermentation using image processing», *Food Sci. Biotechnol.*, vol. 34, n.º 2, pp. 373-381, ene. 2025, doi: 10.1007/s10068-024-01744-4.

ISSN: 2594-1925

Derechos de Autor (c) 2026 Nahomi Rubí Llontop-Ayasta, Elthon Steven Boñon-Rocha, Ulises Benjamín Narro-Altamirano, Víctor Javier Vásquez-Villalobos

Este texto está protegido por una licencia Creative Commons 4.0.



Usted es libre para compartir —copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato — y adaptar el documento — remezclar, transformar y crear a partir del material— para cualquier propósito, incluso para fines comerciales, siempre que cumpla la condición de:

Atribución: Usted debe dar crédito a la obra original de manera adecuada, proporcionar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace de la obra.

Resumen de licencia - Texto completo de la licencia

ISSN: 2594-1925