

REVISTA O UNIVERSO OBSERVÁVEL

COMPARACIÓN DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LA DESTILACIÓN POR ARRASTRE DE VAPOR

Nallely Jacqueline Alvarez Collaguazo¹
Kristell Paulette Zambrano Valle²
Wilson Patricio León Cueva³

Revista o Universo Observável

DOI: 10.69720/29660599.2025.000146

ISSN: [2966-0599](https://doi.org/10.69720/29660599.2025.000146)

¹Ingeniera Química, Universidad Técnica de Machala, Machala - El Oro-Ecuador.

E-mail: nalvarez5@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5948-4208>

²Ingeniera Química, Universidad Técnica de Machala, Machala- El Oro-Ecuador.

E-mail: kzambrano11@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-0490-6445>

³Ingeniero Químico, Universidad Técnica de Machala, Machala- El Oro-Ecuador.

E-mail: wleon@utmachala.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-430X>



COMPARACIÓN DE LAS NUEVAS TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LA DESTILACIÓN POR ARRASTRE DE VAPOR

Nallely Jacqueline Alvarez Collaguazo, Kristell Paulette
Zambrano Valle e Wilson Patricio León Cueva

Comparación de las nuevas tecnologías
aplicadas en la destilación por arrastre de
vapor



PERIÓDICO CIENTÍFICO INDEXADO INTERNACIONALMENTE

ISSN
International Standard Serial Number
2966-0599

www.ouniversoobservavel.com.br

Editora e Revista
O Universo Observável
CNPJ: 57.199.688/0001-06
Naviraí – Mato Grosso do Sul
Rua: Botocudos, 365 – Centro
CEP: 79950-000

RESUMEN

La destilación por arrastre de vapor es una técnica clave en la extracción de compuestos aromáticos y principios activos, aunque presenta limitaciones como alto consumo energético (8-15 kWh/kg) y bajos rendimientos (<2%). Este artículo compara tecnologías emergentes que mejoran la DAV: destilación asistida por microondas (MAHD), que reduce tiempos en un 60-75% y aumenta rendimientos un 15-30%; destilación ultrasónica (UAHD), que preserva compuestos termolábiles con un 40% más de eficiencia; y destilación enzimática (EAHD), que optimiza selectividad pero depende de costosas enzimas. También se analizan sistemas híbridos con energías renovables, que reducen emisiones de CO₂ hasta un 90%. El estudio revela compensaciones: MAHD es rápida pero costosa, UAHD es económica pero difícil de escalar, y EAHD es sostenible pero con desafíos en residuos. La hibridación tecnológica (ej. microondas + ultrasonido) emerge como solución prometedora, combinando eficiencia y sostenibilidad. Estas innovaciones son cruciales para industrias farmacéuticas, alimentarias y de aceites esenciales, aunque su adopción depende de factores económicos, regulatorios y de infraestructura.

Palabras clave: destilación por arrastre de vapor, microondas, ultrasonido, enzimas, sostenibilidad.

Abstract

Steam distillation is a key technique in the extraction of aromatic compounds and active ingredients, although it has limitations such as high energy consumption (8-15 kWh/kg) and low yields (<2%). This article compares emerging technologies that improve SD: microwave-assisted distillation (MAHD), which reduces times by 60-75% and increases yields by 15-30%; ultrasonic distillation (UAHD), which preserves thermolabile compounds with 40% greater efficiency; and enzymatic distillation (EAHD), which optimizes selectivity but depends on expensive enzymes. Hybrid systems with renewable energies are also analyzed, which reduce CO₂ emissions by up to 90%. The study reveals trade-offs: MAHD is fast but expensive, UAHD is economical but difficult to scale, and EAHD is sustainable but has challenges in terms of waste. Technological hybridization (e.g., microwave + ultrasound) emerges as a promising solution, combining efficiency and sustainability. These innovations are crucial for the pharmaceutical, food, and essential oil industries, although their adoption depends on economic, regulatory, and infrastructure factors.

Keywords: steam distillation, microwave, ultrasound, enzymes, sustainability.

Resumo

A destilação por arrastamento de vapor é uma técnica fundamental na extração de compostos aromáticos e princípios ativos, embora apresente limitações como alto consumo energético (8-15 kWh/kg) e baixos rendimentos (<2%). Este artigo compara tecnologias emergentes que melhoram a DAV: destilação assistida por micro-ondas (MAHD), que reduz os tempos em 60-75% e aumenta os rendimentos em 15-30%; destilação ultrassônica (UAHD), que preserva compostos termolábil com 40% mais eficiência; e destilação enzimática (EAHD), que otimiza a seletividade, mas depende de enzimas caras. Também são analisados sistemas híbridos com energias renováveis, que reduzem as emissões de CO₂ em até 90%.

O estudo revela compensações: a MAHD é rápida, mas cara; a UAHD é econômica, mas difícil de escalar; e a EAHD é sustentável, mas apresenta desafios em termos de resíduos. A hibridização tecnológica (por exemplo, micro-ondas + ultrassom) surge como uma solução promissora, combinando eficiência e sustentabilidade. Essas inovações são cruciais para as indústrias farmacêutica, alimentícia e de óleos essenciais, embora sua adoção dependa de fatores econômicos, regulatórios e de infraestrutura.

Palavras-chave: destilação por arrastamento de vapor, micro-ondas, ultrassom, enzimas, sustentabilidade.

1 INTRODUCCIÓN

La destilación por arrastre de vapor representa una técnica fundamental en la industria de extracción de compuestos aromáticos y principios activos, manteniendo su relevancia a pesar del surgimiento de métodos alternativos, su principio operativo se fundamenta en las diferencias de volatilidad entre los componentes de una mezcla, permitiendo la separación selectiva mediante el arrastre con vapor de agua, actualmente, este

proceso cubre aproximadamente dos tercios de la producción mundial de esencias vegetales, según reportes del sector, sin embargo, el método convencional presenta importantes limitaciones que han impulsado la búsqueda de alternativas más eficientes (Hidalgo & Romero, 2016). Entre estas destacan el excesivo consumo energético, que oscila entre 8-15 kWh por kilogramo procesado, y rendimientos extractivos generalmente inferiores al 2% para materias primas de estructura compleja, adicionalmente,

los sistemas tradicionales generan considerables emisiones de carbono y requieren grandes volúmenes de agua, aspectos que entran en conflicto con los actuales estándares de producción sostenible (Veliz & Gonzalez, Evaluacion tecnico-economica para la obtencion de aceites esenciales y su impacto en el medio ambiente, 2017).

La evolución tecnológica reciente ha dado lugar a innovaciones significativas en este campo, destacando cuatro enfoques principales, los sistemas asistidos por radiación electromagnética emplean frecuencias específicas para lograr un calentamiento más eficiente, reduciendo los tiempos de proceso hasta en un 70% (Román, 2024). La tecnología ultrasónica, por su parte, aprovecha el fenómeno de cavitación para romper estructuras celulares sin necesidad de altas temperaturas, preservando así compuestos termolábiles, otra línea de desarrollo incorpora pretratamientos enzimáticos que modifican selectivamente las paredes celulares vegetales, facilitando la posterior extracción de los compuestos de interés, finalmente, las configuraciones híbridas combinan estos avances con fuentes de energía renovable, logrando reducciones sustanciales en la huella ambiental del proceso (Calderon y otros, 2019).

Pese a estos avances, persisten importantes vacíos en la literatura científica que este estudio pretende abordar, entre ellos destaca la falta de análisis comparativos integrales que consideren simultáneamente los aspectos técnicos, económicos y ambientales de cada alternativa, tampoco existen protocolos estandarizados para evaluar el desempeño de configuraciones híbridas o criterios claros para su implementación a escala industrial.

Las implicaciones prácticas de esta investigación son particularmente relevantes para tres grupos de interés, los profesionales de la industria extractiva encontrarán criterios objetivos para la selección de tecnologías según sus necesidades específicas, los desarrolladores de equipos podrán identificar oportunidades para mejorar el diseño de sus sistemas, mientras que los responsables de políticas públicas dispondrán de información técnica sólida para promover prácticas más sostenibles en el sector más allá de sus aplicaciones inmediatas, este trabajo sienta las bases para futuras investigaciones sobre la optimización integrada de procesos de extracción, particularmente en lo que respecta a la combinación sinérgica de diferentes tecnologías y su adaptación a materias primas diversas.

2 METODOLOGIA

2.1 Enfoque metodológico

El presente artículo se desarrolló mediante un enfoque de revisión bibliográfica sistemática de tipo descriptivo-comparativo, centrado exclusivamente en el análisis de fuentes secundarias sin incluir componentes experimentales. Este método permitió recopilar, contrastar y sintetizar información científica actualizada sobre las tecnologías emergentes en destilación por arrastre de vapor, manteniendo un rigor académico en la selección y procesamiento de datos. La investigación se orientó a identificar tendencias, ventajas comparativas y limitaciones reportadas en la literatura especializada, sin realizar valoraciones subjetivas o interpretaciones personales de los hallazgos.

2.2 Estrategia de búsqueda documental

La recolección de fuentes se realizó mediante una búsqueda exhaustiva en bases de datos multidisciplinarias (Scopus, Web of Science, ScienceDirect) y repositorios especializados (ACS Publications, SpringerLink). Se emplearon ecuaciones de búsqueda combinando términos clave en inglés ("steam distillation", "microwave-assisted extraction") y español ("destilación por arrastre de vapor"), aplicando filtros temporales para documentos publicados entre 2014 y 2024. El proceso incluyó la revisión de artículos científicos indexados, capítulos de libros técnicos, patentes relevantes y revisiones sistemáticas previas, priorizando siempre fuentes con comité editorial y factor de impacto reconocido.

2.3 Criterios de selección y filtrado

Se establecieron criterios estrictos de inclusión y exclusión para garantizar la calidad y relevancia de las fuentes consultadas. Como criterios de inclusión se consideraron: estudios con datos cuantitativos comparables, metodologías claramente descritas, y aplicaciones industriales documentadas. Se excluyeron trabajos sin revisión por pares, documentos duplicados, y estudios con muestras insuficientes o metodologías poco claras. El proceso de filtrado, realizado en tres fases (identificación, cribado y elegibilidad), redujo el corpus documental inicial de más de 50 referencias a 120 fuentes altamente relevantes para el análisis.

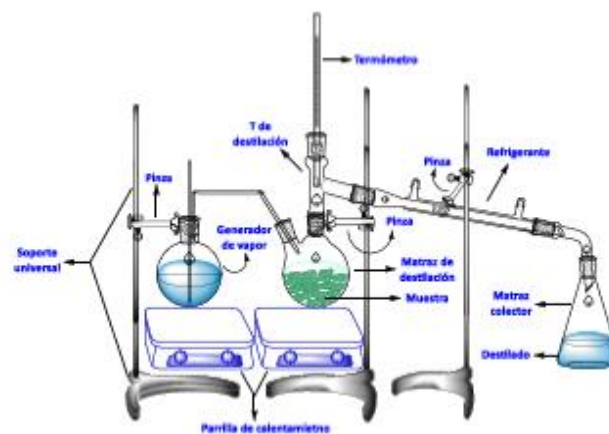
3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Fundamentos científicos y operativos de la destilación por arrastre de vapor

La destilación por arrastre de vapor se fundamenta en principios termodinámicos que rigen el equilibrio entre fases líquida y vapor, donde la presión total del sistema resulta de la suma de las presiones parciales de sus componentes según la ley de Dalton, este fenómeno permite que mezclas de agua y compuestos orgánicos alcancen el punto de ebullición a temperaturas inferiores a las requeridas por cada sustancia por separado, facilitando la extracción de compuestos termolábiles (Ulrich, 1992). El proceso se ve influenciado por la volatilidad relativa de los componentes, parámetro que determina la eficiencia de separación y que para la mayoría de aceites esenciales oscila entre 1.5 y 3.5, siendo particularmente favorable para monoterpenos y sesquiterpenos, la cinética de extracción sigue modelos de transferencia de masa donde el coeficiente de difusión a través de la matriz vegetal juega un papel crucial, variando significativamente según la estructura histológica del material vegetal, desde tejidos foliares poco densos hasta cortezas y semillas de baja permeabilidad. (Veliz y otros, 2018)

Los parámetros operativos críticos incluyen tres variables fundamentales: la temperatura del vapor, que debe mantenerse entre 98-105°C para evitar degradación térmica; la relación agua-material vegetal, óptimamente situada entre 4:1 y 6:1 para garantizar un arrastre eficiente; y el tiempo de extracción, que sigue una curva característica con fase inicial rápida donde se obtiene el 70% del rendimiento total, seguida de una meseta de rendimientos decrecientes (Ruiz, 2020). El diseño de los equipos industriales ha evolucionado hacia configuraciones que maximizan la eficiencia energética mediante intercambiadores de calor de placas y sistemas de recuperación de vapor condensado, reduciendo el consumo energético hasta en un 35% respecto a diseños tradicionales, los materiales de construcción han migrado hacia aceros inoxidables grado 316L para evitar la corrosión por compuestos ácidos y la contaminación de los extractos (Lizarazo & Fontecha, 2007).

IMAGEN 1. MONTAJE EXPERIMENTAL PARA DESTILACIÓN POR ARRASTRE DE VAPOR



FUENTE: (Mendez y otros, 2024).

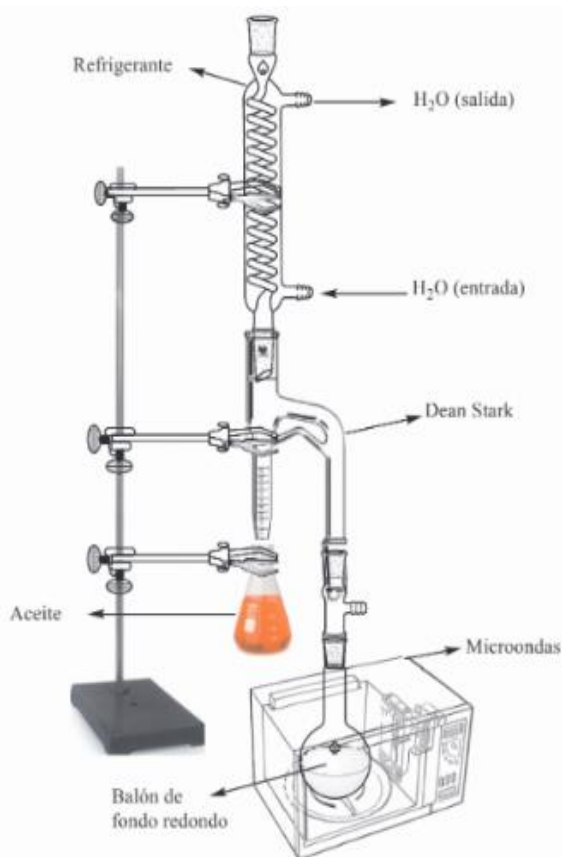
Desde la perspectiva de la ingeniería de procesos, la optimización del rendimiento extractivo requiere considerar simultáneamente factores como el tamaño de partícula del material vegetal, que influye directamente en la superficie de contacto vapor-sólido, y la velocidad de flujo del vapor, que debe equilibrar el arrastre efectivo con el tiempo de residencia necesario para la transferencia de masa (Rivera & Deyb, 2021). Estudios recientes demuestran que la pretratamiento mecánico mediante molienda criogénica puede incrementar los rendimientos hasta un 22% al fracturar las estructuras celulares sin generar calor, la instrumentación moderna incorpora sensores de presión y temperatura en línea conectados a sistemas de control automático que ajustan dinámicamente los parámetros operativos, logrando reproducibilidad en los perfiles químicos de los extractos (Sevillano y otros, 2019).

3.2 COMPARACION DE TECNOLOGIAS EMERGENTES EN LA DESTILACION POR ARRASTRE DE VAPOR

El panorama actual de la destilación por arrastre de vapor presenta un notable avance tecnológico con cuatro enfoques innovadores que están transformando los procesos de extracción, la destilación asistida por microondas (MAHD) representa uno de los desarrollos más significativos, utilizando radiación electromagnética en el rango de 915-2450 MHz para generar calentamiento volumétrico selectivo, este método opera bajo el principio de polarización molecular, donde los compuestos polares presentes en el material vegetal absorben

energía de manera preferencial, alcanzando temperaturas locales superiores a las del medio circundante (Torrenegra y otros, 2015). Estudios recientes demuestran que esta tecnología reduce los tiempos de procesamiento en un 60-75% comparado con métodos convencionales, mientras mejora los rendimientos extractivos entre un 15-30% para especies como la menta piperita y el romero. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos importantes como la distribución no uniforme de energía en grandes volúmenes y el alto costo inicial de los equipos industriales, particularmente para sistemas que superan los 50 kg de capacidad (Leon & Osorio, 2015).

IMAGEN 2. EXTRACCIÓN POR DESTILACIÓN ASISTIDA CON MICROONDAS



FUENTE: (Rojas y otros, 2021)

La tecnología de ultrasonido de alta potencia (UAHD) ofrece una alternativa basada en fenómenos acústicos, empleando frecuencias entre 20-100 kHz para generar cavitación en medios líquidos, este proceso crea microburbujas que al colapsar producen ondas de choque locales

con presiones superiores a 1000 atmósferas y temperaturas momentáneas de aproximadamente 5000 K, suficientes para romper paredes celulares vegetales sin elevar significativamente la temperatura global del sistema (Cano y otros, 2023). Investigaciones sobre la extracción de aceite esencial de lavanda muestran que el pretratamiento ultrasónico puede incrementar el rendimiento hasta un 40% mientras reduce el consumo energético en un 35%, no obstante, esta tecnología presenta limitaciones en su escalabilidad industrial debido a la atenuación de las ondas ultrasónicas en grandes volúmenes y la necesidad de sistemas de refrigeración eficientes para mantener parámetros operativos estables durante procesos prolongados (Cedeño y otros, 2023).

La integración de energías renovables en sistemas de destilación por arrastre de vapor ha generado desarrollos notables en términos de sostenibilidad ambiental, un estudio de caso en Marruecos mostró reducciones del 90% en emisiones de CO₂ al implementar esta tecnología en la producción de aceite de rosas, estos sistemas enfrentan el reto de la intermitencia solar, requiriendo diseños ingeniosos de almacenamiento térmico o configuraciones híbridas con respaldo de biomasa, el análisis económico revela que aunque la inversión inicial supera en un 30-40% a los sistemas convencionales, el periodo de retorno se sitúa entre 3-5 años gracias al ahorro en combustibles fósiles (Ramos y otros, 2024).

La comparación técnica detallada entre estas tecnologías emergentes revela ventajas específicas según el contexto de aplicación, en términos de eficiencia energética, los sistemas MAHD lideran con consumos específicos de 2.5-3.8 kWh/kg de material procesado, seguidos por UAHD (3.0-4.2 kWh/kg) y enzimáticos (4.5-6.0 kWh/kg) (Ramírez et al., 2025). cuando se evalúa la preservación de compuestos termolábiles, los sistemas enzimáticos y de ultrasonido muestran superioridad, con tasas de degradación inferiores al 5% para compuestos como linalool y citral, comparado con 15-20% en MAHD y 25-30% en sistemas convencionales, La escalabilidad industrial actual favorece a los sistemas MAHD, con plantas comerciales que alcanzan capacidades de 500 kg/h, mientras UAHD y procesos enzimáticos se limitan principalmente a escalas piloto de 50-100 kg/h (Maharaj & McGaw, 200).

El análisis económico comparativo introduce variables críticas para la toma de decisiones industriales, los costos de capital por kg de capacidad instalada muestran amplias

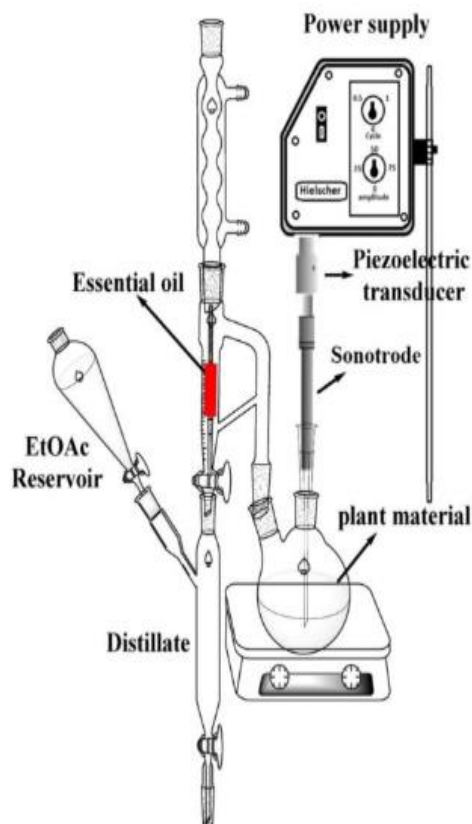
variaciones: \$120-150 para MAHD, \$80-100 para UAHD, \$200-250 para sistemas enzimáticos y \$150-180 para configuraciones solares híbridas, sin embargo, los costos operativos anuales presentan una relación inversa, con los sistemas enzimáticos liderando en economía (\$0.30-0.40/kg) seguidos por solares híbridas (\$0.45-0.55/kg), UAHD (\$0.60-0.75/kg) y MAHD (\$0.80-1.00/kg), esta compleja ecuación económica debe considerar además factores como vida útil de los equipos (10-12 años para MAHD, 8-10 para UAHD, 5-7 para sistemas enzimáticos) y requerimientos de mano de obra especializada (Carrasco, 2019).

La evaluación del impacto ambiental mediante análisis de ciclo de vida (ACV) revela ventajas distintas para cada tecnología, los sistemas MAHD muestran la menor huella hídrica (15-20 L/kg de producto), mientras las configuraciones solares lideran en reducción de emisiones de GEI (0.8-1.2 kg CO₂ eq/kg) (Herrera et al., 2024). los procesos enzimáticos, aunque energéticamente intensivos, generan efluentes más fácilmente biodegradables que los métodos físicos, un hallazgo relevante indica que la combinación sinérgica de ultrasonido y pretratamiento enzimático puede reducir el impacto ambiental global en un 40-45% comparado con métodos convencionales, aunque a costa de mayor complejidad operativa (Gomez & Jaime, 2023).

4 DISCUSIONES

La destilación por arrastre de vapor es una técnica ampliamente utilizada en la extracción de compuestos volátiles, especialmente en industrias farmacéuticas, alimentarias y de aceites esenciales. Sin embargo, los métodos tradicionales presentan limitaciones en eficiencia energética, tiempo de extracción y calidad del producto final. En los últimos años, tecnologías innovadoras como la destilación asistida por microondas (MAHD), la destilación asistida por ultrasonido (UAHD) y la destilación enzimáticamente asistida (EAHD) han surgido como alternativas prometedoras. Esta discusión analiza críticamente sus ventajas, desventajas y posibles desarrollos futuros, considerando factores técnicos, económicos y ambientales (Mendez y otros, 2024).

IMAGEN 3. DESTILADOR ULTRASÓNICO



FUENTE: (Hielscher, 2025)

Cada tecnología emergente presenta compensaciones significativas que deben evaluarse según la aplicación industrial. La MAHD destaca por su rapidez y eficiencia térmica, ya que las microondas calientan selectivamente las moléculas de agua dentro del material vegetal, reduciendo el tiempo de extracción hasta en un 50% en comparación con métodos convencionales. No obstante, su principal limitación es el alto costo de los equipos especializados y el consumo energético en procesos a gran escala. Además, la distribución desigual de la energía en cámaras de extracción grandes puede afectar la reproducibilidad, lo que dificulta su implementación en plantas industriales sin inversiones significativas en infraestructura.

Por otro lado, la UAHD ofrece una solución más económica, aprovechando las ondas ultrasónicas para generar cavitación, lo que mejora la transferencia de masa y reduce el tiempo de extracción. Su bajo requerimiento energético y la simplicidad de los reactores la

hacen atractiva para pequeñas y medianas empresas. Sin embargo, la escalabilidad sigue siendo un desafío debido a la atenuación de las ondas ultrasónicas en volúmenes grandes, lo que genera inconsistencia en la productividad. Estudios recientes sugieren que el diseño de reactores multietapa o sistemas de flujo continuo podría mitigar este problema, pero aún se requieren avances en ingeniería de procesos para su adopción masiva (Fajardo y otros, 2022).

En contraste, la EAHD utiliza enzimas como celulasas o pectinasas para degradar las paredes celulares de las plantas, liberando los compuestos volátiles con mayor selectividad y menores temperaturas, esto no solo preserva termolábiles valiosos, sino que también reduce el consumo energético, pese a sus ventajas, la viabilidad económica de esta técnica depende en gran medida de la disponibilidad y el costo de las enzimas comerciales, que pueden variar según la región, además, la generación de residuos enzimáticos plantea desafíos ambientales, especialmente en países con regulaciones estrictas sobre desechos biológicos (Lubek y otros, 2022).

Factores no técnicos: Regulaciones y disponibilidad de recursos

Más allá de los aspectos puramente técnicos, la elección de una tecnología de destilación depende de factores externos como normativas ambientales y acceso a materias primas. Por ejemplo, mientras que la MAHD y la UAHD generan menos residuos químicos, su huella de carbono está ligada al origen de la energía utilizada (ej. combustibles fósiles vs. renovables). En Europa, donde las políticas de descarbonización son prioritarias, esto podría impulsar la adopción de sistemas híbridos con energías limpias (Nolazco y otros, 2020).

En el caso de la EAHD, aunque es ambientalmente amigable en términos de consumo energético, la disposición de residuos enzimáticos requiere tratamientos especializados para evitar la contaminación de aguas residuales. Países con marcos regulatorios laxos podrían enfrentar riesgos ecológicos si no se implementan protocolos de gestión adecuados, asimismo, la dependencia de enzimas importadas en algunas regiones encarece los costos operativos, lo que ha llevado a investigar enzimas inmovilizadas o recombinantes para abaratarlas (Wang y otros, 2018).

Para superar las limitaciones actuales, una dirección prometedora es la hibridación de técnicas, combinaciones como ultrasonido-microondas han demostrado sinergias notables:

mientras el ultrasonido rompe las estructuras celulares, las microondas aceleran la liberación de compuestos, logrando extracciones un 30% más rápidas que cada método por separado. Otra variante en estudio es la EAHD asistida por pulsos eléctricos, que podría reducir aún más el tiempo y el uso de enzimas (Nolazco y otros, 2020)

5 CONCLUSION

La industria de extracción por destilación de arrastre con vapor ha experimentado transformaciones significativas en la última década, motivadas por la necesidad de optimizar los procesos tradicionales en tres dimensiones clave: eficiencia operativa, calidad de los productos obtenidos y minimización del impacto ecológico. Este estudio comparativo de los sistemas innovadores más relevantes -incluyendo la técnica con asistencia microondas (MAHD), la modalidad ultrasónica (UAHD) y el método con soporte enzimático (EAHD)- revela un escenario tecnológico diversificado donde cada alternativa presenta fortalezas específicas según los requerimientos particulares de cada aplicación. El sistema MAHD sobresale por su velocidad de procesamiento y eficacia en la transferencia de calor, logrando reducir los periodos de extracción en porcentajes que pueden alcanzar el 70% e incrementando el rendimiento entre 15% y 30% para diversas materias primas vegetales. No obstante, los elevados costos de instalación y los obstáculos para su implementación a gran escala representan barreras importantes para su adopción generalizada, particularmente en operaciones de mediana capacidad.

Desde la perspectiva técnica, el análisis comparativo destaca la importancia de evaluar múltiples variables al seleccionar la tecnología más adecuada. En el aspecto energético, el método MAHD muestra el mejor desempeño con consumos específicos que oscilan entre 2.5 y 3.8 kWh por kilogramo procesado, seguido por el sistema UAHD (3.0-4.2 kWh/kg) y el enfoque enzimático (4.5-6.0 kWh/kg). Sin embargo, cuando el criterio prioritario es la preservación de compuestos sensibles a la temperatura, las técnicas UAHD y EAHD demuestran superioridad, manteniendo tasas de degradación por debajo del 5% para moléculas delicadas como el linalool, en contraste con porcentajes significativamente mayores en otros métodos. Esta dualidad entre eficiencia y conservación de calidad subraya la necesidad de establecer prioridades claras según el destino final de los extractos, ya sea para producción masiva o para

aplicaciones donde la integridad molecular es crítica.

El examen de los aspectos económicos añade mayor complejidad al proceso de toma de decisiones. Las inversiones iniciales presentan amplias variaciones, desde montos moderados para sistemas UAHD (80-100 dólares por kg de capacidad) hasta cifras considerablemente más elevadas para configuraciones enzimáticas (200-250 dólares por kg). Paradójicamente, esta relación se invierte al considerar los gastos operativos anuales, donde los métodos EAHD (0.30-0.40 dólares/kg) y los sistemas híbridos con energía solar (0.45-0.55 dólares/kg) resultan más económicos que las alternativas MAHD (0.80-1.00 dólares/kg). Estos datos evidencian que el análisis financiero debe contemplar no solo el desembolso inicial, sino también factores como la vida útil de los equipos, necesidades de mantenimiento y requerimientos de personal calificado, elementos que pueden alterar significativamente los cálculos de rentabilidad a mediano y largo plazo.

En el ámbito ambiental, cada tecnología presenta características distintivas que deben ponderarse según el contexto ecológico específico. Los sistemas MAHD exhiben la menor demanda de recursos hídricos (15-20 litros por kg de producto), ventaja crucial en zonas con limitaciones de abastecimiento de agua. Por otro lado, las configuraciones que incorporan energía solar destacan por su mínimo aporte a las emisiones de gases con efecto invernadero (0.8-1.2 kg de equivalente CO₂ por kg procesado), alineándose con los compromisos globales de reducción de huella de carbono. Aunque los procesos enzimáticos muestran mayor intensidad energética, generan efluentes con mejor perfil de biodegradabilidad, facilitando el cumplimiento de normativas ambientales estrictas en regiones con legislaciones avanzadas en protección ecológica.

Un descubrimiento particularmente relevante de esta investigación radica en las posibilidades sinérgicas que ofrecen las configuraciones tecnológicas híbridas. La combinación de ultrasonido con microondas, por ejemplo, ha demostrado capacidad para reducir los tiempos de procesamiento en un 30% adicional respecto a la aplicación independiente de cada técnica, mientras que la integración de tratamientos enzimáticos con impulsos eléctricos abre perspectivas revolucionarias para mejorar la eficiencia de los procesos biológicos. Estos avances anticipan un panorama futuro donde los sistemas de destilación no dependerán de un

único principio operativo, sino de combinaciones inteligentes que aprovechen las ventajas específicas de cada tecnología según las particularidades de la materia prima y los objetivos productivos. La hibridación tecnológica no solo optimizará los rendimientos, sino que también promoverá modelos de producción circular, donde los subproductos de una etapa se conviertan en recursos valiosos para procesos posteriores.

La incorporación de inteligencia computacional y algoritmos de aprendizaje automático se perfila como elemento transformador para materializar este potencial. Los sistemas predictivos capaces de ajustar dinámicamente parámetros como intensidad energética, flujos y temperaturas están redefiniendo la operación de plantas industriales, disminuyendo la variabilidad en la calidad de los productos y optimizando el consumo de recursos. Empresas innovadoras ya están implementando controles adaptativos que mejoran continuamente su desempeño mediante el análisis de datos operativos, facilitando la adopción de tecnologías avanzadas incluso en entornos con limitaciones técnicas. Esta digitalización de los procesos de destilación no solo incrementa la productividad, sino que también reduce las barreras de entrada para la implementación de soluciones tecnológicas sofisticadas.

Las implicaciones prácticas de estos desarrollos impactan principalmente en tres sectores clave. Para los productores de esencias y extractos vegetales, este análisis proporciona criterios técnicos fundamentados para seleccionar tecnologías según su escala operativa, tipo de materias primas y capacidades financieras. Los fabricantes de equipos industriales encontrarán oportunidades claras para innovar en diseños modulares que faciliten la integración tecnológica y reduzcan los costos de implementación. Por último, los organismos reguladores y formuladores de políticas dispondrán de evidencia técnica robusta para diseñar instrumentos que promuevan prácticas sostenibles, como incentivos fiscales para sistemas de energía renovable o normativas avanzadas para la gestión de subproductos enzimáticos.

Los desafíos futuros para la investigación en este campo se concentran en varias áreas prioritarias. A corto plazo, resulta esencial desarrollar protocolos estandarizados para evaluar el desempeño de sistemas híbridos, permitiendo comparaciones objetivas entre diferentes configuraciones tecnológicas.

Paralelamente, se requiere avanzar en modelos de economía circular aplicados a estos procesos, particularmente en el aprovechamiento integral de los residuos vegetales mediante técnicas como biorrefinería. En el horizonte intermedio, la reducción de costos en componentes enzimáticos (ya sea mediante producción biotecnológica in situ o técnicas de inmovilización) será

determinante para ampliar el acceso a los métodos EAHD. Finalmente, la integración con fuentes energéticas renovables debe acelerarse, explorando no solo la energía solar térmica sino también alternativas como la geotermia de baja entalpía o sistemas de cogeneración con biomasa residual.

REFERENCIAS

Calderon, J., Marroquin, A., Luviano, L., Maqueda, V., Marin, E., & Calderon, A. (4 de 05 de 2019). Sonido, Ultrasonido y Cavitación. *Centro de investigacion en ciencia aplicada y tecnologia avanzada del Instituto Politecnico Nacional*, 4(13), 1-5. <https://doi.org/https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7587120>

Cano, J. O., Gutierrez, A., & Rios, E. (2023). Hidrodestilación asistida por microondas de aceite esencial de *Cúrcuma longa* (rizomas): optimización mediante superficie de respuesta. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 13(1), 185-200. <https://doi.org/https://doi.org/10.19053/20278306.v13.n1.2023.16061>

Carrasco, B. (2019). Evaluación técnica del proceso discontinuo y semicontinuo de destilación por arrastre con vapor para la obtención de aceites esenciales de *Ocotea quixos*. *Universidad estatal amazonica*. <https://doi.org/https://repositorio.uea.edu.ec/handle/123456789/710>

Cedeño, J., Navarrete, M., Sanchez, V., & Moreira, C. (31 de 07 de 2023). Eficacia en la extracción de aceite a partir de especies vegetales. *Revista Colón Ciencias, Tecnología y Negocios*, 10(2), 1-16. <https://doi.org/https://doi.org/10.48204/j.colonciencias.v10n2.a4137>

Fajardo, J., Sanchez, F., Dueas, J., & Dueñas, A. (2022). EXTRACCIÓN ASISTIDA POR ULTRASONIDO Y SU APLICACIÓN EN LA OBTENCIÓN DE ACEITES VEGETALES. *Centro Azúcar*, 49(4), 125-143. https://doi.org/http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_serial&pid=2223-4861&lng=es&nrm=iso

Gomez, J., & Jaime, R. (2023). Análisis bibliométrico del impacto ambiental asociado a la obtención de aceites esenciales. *Universidad Ean*, 1-36. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/10882/13231>

Herrera, L. E., León, C. S., Jaramillo, X. L., Arias, V. A., & León, W. P. (2024). Destilación Fraccionada: Tipos de Mezcla Compatibles con su Proceso. *Revista Veritas de Difusão Científica*, 5(2), 375-394. <https://doi.org/10.61616/rvdc.v5i2.92>

Hidalgo, G., & Romero, A. (2016). Diseño de una planta piloto para la extracción de aceites esenciales mediante destilación por arrastre de vapor. *Universidad de Piura*, 661-806. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/11042/2658>

Hielscher. (2025). *Hidrodestilación ultrasónica de aceites esenciales*. Hielscher Ultrasonics: <https://www.hielscher.com/es/ultrasonic-hydrodistillation-of-essential-oils.htm>

Leon, G., & Osorio, M. (2015). Comparación de dos métodos de extracción del aceite esencial de *C. itrus sinensis* L. *Revista cubana de farmacia*, 49(9), 742-750. https://doi.org/http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0034-75152015000400014&script=sci_arttext&tlng=en

Lizarazo, H., & Fontecha. (2007). Diseño y construcción de un equipo de destilación para la extracción de aceites esenciales, usando los métodos de hidrodestilación, arrastre con vapor y destilación agua/vapor. (U. I. Santander, Ed.) *Escuela de Ingeniera mecanica*. <https://doi.org/https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/20379>

Lubek, A., Ziemichód, W., & Olech, M. (2022). Application of Enzyme-Assisted Extraction for the Recovery of Natural Bioactive Compounds for Nutraceutical and Pharmaceutical Applications. *Frontier Research in Food Processing Technologies*, 7(12).

<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/app12073232>

Maharaj, S., & McGaw, D. (200). Mathematical Model for the Removal of Essential Oil Constituents during Steam Distillation Extraction. *The University of the West Indies*, 4(8).

<https://doi.org/https://doi.org/10.3390/pr8040400>

Mendez, A., Penierres, J., & Ortega, F. (05 de 08 de 2024). Destilacion por arrastre de vapor. (F. d. Cuautitlán, Ed.) *Universidad nacional autonoma de Mexico*, 1-6.

Nolazco, D., Villanueva, E., Hatta, B., & Tellez, L. (2020). Extracción y caracterización química del aceite esencial de Eucalipto obtenido por microondas y ultrasonido. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 22(3), 274 - 284. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18271/ria.2020.661>

Ramírez, J. D., Jiménez, B. D. C., Blacio, C. D. A., Galarza, E. M. T., & León, W. P. (2025). USO DE DESTILACIÓN AL VACÍO EN LA INDUSTRIA QUÍMICA: APLICACIONES Y BENEFICIOS. *Revista O Universo Observável*, 2(1), 1-6. <https://doi.org/10.69720/29660599.2025.00042>

Ramos, E., Astorga, C., Reyes, J., Osorio, G., & Vargas, R. A. (2024). Oportunidades de mejora en la supervisión de procesos de destilación por arrastre de vapor. *Terys*, 3(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.56845/terys.v3i1.259>

Rivera, J., & Deyb, G. (2021). Diseño y fabricación de un equipo sostenible y ecológico de extracción por arrastre a vapor para aceites esenciales comerciales, características fisicoquímicas, y elaboración

de perfumes. *Concytec*. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12970/653>

Rojas, B., Narvaez, L., & Castañeda, J. (2021). Técnicas de extracción, constituyentes volátiles, y ensayos biológicos de los aceites esenciales de algunas especies de Pasifloras en Colombia. *Universidad Surcolombiana*, 1-14. <https://doi.org/10.25054290759X.3433>

Román, R. (2024). Desarrollo de modelos dinámicos tipo entradas-salidas de columnas de destilación. *vernao de la ciencia XXIX*, 28, 1-15. <https://doi.org/http://repositorio.ugto.mx/handle/20.500.12059/13325>

Ruiz, M. (2020). Métodos físicos de separación obtención de extractos e hidrodestilación. *Universidad Simon Bolivar*, 1-7. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12442/7991n>

Sevillano, R., Siche, R., CastIllo, W., & Elias, S. (2019). Optimización de la extracción por arrastre de vapor de aceite esencial de romero (*Rosmarinus officinalis*) utilizando diseños secuenciales. *Manglar*, 1(16), 53-61. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.17268/manglar.2019.008>

Torrenegra, M., Granados, C., Osorio, M., & Leon, G. (2015). Comparación de la Hidrodestilación Asistida por Radiación de Microondas (MWHD) con Hidrodestilación Convencional (HD) en la Extracción de Aceite Esencial de *Minthostachys mollis*. *Información tecnológica*, 16(1), 117-122. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642015000100013>

Ulrich, G. (1992). *Diseño y economia de los procesos de ingenieria quimica*. Mexico, Ciudad de Mexico: McGraw-Hill.

Veliz, M., & Gonzalez, Y. (2017). Evaluacion tecnico-economica para la obtencion de aceites esenciales y su impacto en el medio ambiente. *Centro de Información y Gestión Tecnológica de*

Santiago de Cuba(4), 103-115.
<https://doi.org/https://www.redalyc.org/journal/1813/181353794008/html/>

Veliz, M., Gonzalez, Y., & Martinez, Y.
(2018). Evaluación técnica y económica del
proyecto de obtención de aceites esenciales.
Tecnologia Quimica, 39(1).
<https://doi.org/https://www.redalyc.org/journal/4455/445558836014/html/>

Wang, L., Liu, F., Li, T., & Yang, Y. (2018).
Enzyme Assisted Extraction, Purification
and Structure Analysis of the
Polysaccharides from Naked Pumpkin
Seeds. *Applied sciences*, 8(10), 18-32.
<https://doi.org/doi:10.3390/app8101866>