

Refrigeración Termoacústica: Principios, Tecnologías y Aplicaciones

Introducción a la Conversión de Energía Termoacústica

Definiendo la Termoacústica

La termoacústica es una ciencia interdisciplinaria que fusiona los principios de la termodinámica, la dinámica de fluidos y la acústica para describir y aprovechar la interacción entre el calor y el sonido.¹ En su núcleo, la tecnología se basa en dos procesos de conversión de energía inversos. Un motor termoacústico convierte la energía térmica, a menudo de una fuente de calor residual o solar, en energía acústica (ondas sonoras de alta amplitud). Por el contrario, un refrigerador o bomba de calor termoacústico utiliza esa energía acústica para bombear calor desde un depósito frío a uno caliente, creando así un efecto de refrigeración.² Esta capacidad única posiciona a la tecnología termoacústica como una alternativa prometedora y ambientalmente benigna a los sistemas convencionales de compresión de vapor, que dependen de refrigerantes químicos con un alto Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés).⁵

El Efecto Termoacústico Fundamental

El fenómeno subyacente que impulsa todos los dispositivos termoacústicos es el ciclo termodinámico que experimenta una pequeña parcela de gas compresible (como helio o aire) cuando oscila dentro de una onda sonora cerca de una superficie sólida.⁴ Este ciclo se puede desglosar en cuatro pasos secuenciales que, repetidos rápidamente, producen un bombeo de calor neto:

1. **Compresión Adiabática:** A medida que la onda sonora comprime la parcela de gas, su presión y temperatura aumentan de acuerdo con las leyes de los gases ideales. En su punto de máxima compresión, la parcela de gas está más caliente que la superficie sólida adyacente (conocida como "stack" o regenerador).²
2. **Transferencia de Calor Isobarica (Rechazo de Calor):** En este estado de alta

temperatura y presión, y a medida que la onda sonora desplaza la parcela, esta transfiere calor a la superficie sólida, que es comparativamente más fría.⁴

3. **Expansión Adiabática:** A continuación, la onda sonora entra en su fase de rarefacción, lo que hace que la parcela de gas se expanda. Esta expansión provoca una disminución de su temperatura, enfriándola por debajo de la temperatura de la superficie sólida.⁹
4. **Transferencia de Calor Isobarica (Absorción de Calor):** Mientras se desplaza de vuelta, la parcela de gas ahora fría absorbe calor de la superficie sólida, completando el ciclo.²

La acción colectiva de innumerables parcelas de gas que realizan este ciclo en sincronía crea un efecto de "brigada de cubos" (*bucket brigade*), que transporta calor de manera efectiva desde un extremo del material poroso al otro, estableciendo así un gradiente de temperatura macroscópico.⁴ La innovación central de la termoacústica no es el descubrimiento de una nueva ley física, sino la ingeniosa ingeniería de un sistema que fuerza la sincronización (o fase) del ciclo termodinámico de una parcela de gas con su desplazamiento físico. Esta "fase natural", orquestada por la geometría del resonador y el stack, permite que una simple onda sonora actúe como un pistón virtual, impulsando el calor sin necesidad de piezas móviles complejas.⁴

Parámetros Físicos Críticos

La eficacia del efecto termoacústico depende de varios parámetros físicos clave. Los más importantes son las profundidades de penetración térmica y viscosa. La profundidad de penetración térmica (δ_k) se define como el espesor de la capa de gas a través de la cual el calor puede difundirse eficazmente durante medio ciclo de oscilación de la onda sonora.¹⁵ De manera análoga, la profundidad de penetración viscosa define la capa donde las fuerzas de fricción con la pared sólida son significativas. El efecto termoacústico es más potente dentro de estas delgadas capas adyacentes a una superficie sólida, lo que dicta la geometría óptima de los canales dentro del stack o regenerador.¹⁵

El principio fundamental que gobierna la generación espontánea de sonido a partir del calor fue articulado por Lord Rayleigh hace más de un siglo: "Si se suministra calor al aire en el momento de mayor [densidad] o se le extrae en el momento de mayor rarefacción, se fomenta la vibración".¹⁸ Este criterio explica cómo un gradiente de temperatura a lo largo de un stack puede generar espontáneamente una onda sonora (un motor), y a la inversa, cómo una onda sonora puede consumir energía acústica para bombear calor en contra de un gradiente de temperatura (un refrigerador).¹⁸

Anatomía de un Sistema Termoacústico

El Resonador y el Impulsor Acústico

Los componentes de un sistema termoacústico son conceptualmente simples, aunque su optimización requiere una ingeniería acústica y termodinámica precisa.

- **Resonador:** Es el cuerpo principal del dispositivo, típicamente un tubo o un bucle cerrado, que contiene el fluido de trabajo. Su geometría (especialmente su longitud) está diseñada para soportar una resonancia acústica a una frecuencia de operación específica, amplificando las ondas de presión.¹
- **Impulsor Acústico:** Este componente suministra la energía acústica necesaria para impulsar el ciclo de refrigeración. En prototipos iniciales y sistemas de baja potencia, se utilizan comúnmente altavoces electrodinámicos por su simplicidad.¹ Sin embargo, los sistemas comerciales modernos de alta eficiencia, como los desarrollados por BlueHeart Energy y Equium, emplean motores lineales o pistones. Estos sistemas a menudo utilizan dos pistones opuestos que se mueven linealmente para generar ondas de presión de gran amplitud (por ejemplo, ± 4 bar sobre una presión media de 60 bar) y, al mismo tiempo, cancelar las vibraciones, lo que resulta en un funcionamiento casi silencioso.⁸
- **Fluido de Trabajo:** Para aumentar la densidad de potencia acústica, los sistemas operan con un gas inerte a alta presión media, típicamente entre 30 y 60 bar.⁸ El helio es el gas preferido debido a sus propiedades termodinámicas favorables (alta velocidad del sonido y alta conductividad térmica), aunque también se utilizan argón, xenón, aire o mezclas de gases en diversas aplicaciones.¹⁹

El Núcleo Termoacústico: Stack vs. Regenerador

El corazón del sistema, donde ocurre la conversión de energía, es un medio sólido poroso que facilita el intercambio de calor crítico entre el gas y una superficie sólida. La arquitectura de este componente define los dos tipos principales de dispositivos termoacústicos.⁴

- **Stack:** Utilizado en dispositivos de onda estacionaria, el stack se caracteriza por tener canales relativamente anchos, varias veces más grandes que la profundidad de penetración térmica del gas.¹⁹ En este caso, las parcelas de gas no alcanzan un equilibrio térmico completo con las placas del stack durante una oscilación, lo que conduce a un ciclo termodinámico inherentemente irreversible.
- **Regenerador:** Es el componente clave en los dispositivos de onda progresiva. Presenta canales mucho más pequeños, con un radio hidráulico significativamente menor que la profundidad de penetración térmica.¹⁰ Este diseño garantiza un excelente contacto térmico, permitiendo que la temperatura del gas siga de cerca la del material del regenerador. Este intercambio de calor casi isotérmico es fundamental para aproximarse al ciclo de Stirling, que es termodinámicamente más eficiente.¹⁰

Ciencia de los Materiales de Stacks y Regeneradores

La elección del material y la geometría del núcleo termoacústico representa un equilibrio crítico entre la idealidad termodinámica, el rendimiento acústico y el costo de fabricación. Las propiedades ideales del material son una **baja conductividad térmica** en la dirección de la oscilación (para mantener el gradiente de temperatura) y una **alta capacidad calorífica** en comparación con el gas (para actuar como un amortiguador térmico eficaz).⁶

Se han investigado diversos materiales y geometrías:

- **Placas Paralelas y Espirales:** A menudo fabricadas con láminas de Mylar, esta geometría está bien caracterizada teóricamente pero puede ser difícil y costosa de producir con la precisión requerida.¹⁶
- **Cerámicas Celulares:** Sustratos cerámicos, como los utilizados en convertidores catalíticos, ofrecen estructuras de canales regulares y prefabricadas y han demostrado un rendimiento razonable.²⁵
- **Carbono Vítreo Reticulado (RVC):** Un material de espuma de poro abierto que ha mostrado un rendimiento comparable al de los stacks de rollos de plástico.¹⁶
- **Materiales de Bajo Costo:** Se han probado espumas metálicas, lanas de acero, estropajos y virutas cerámicas como alternativas económicas. Un estudio encontró que el aluminio y la lana de roca ofrecían el mejor rendimiento, logrando una diferencia de temperatura de 34 °C, mientras que materiales como el PTFE y la lana de vidrio funcionaron mal debido a su falta de transparencia acústica.²⁵
- **Mallas de Alambre Tejido:** Una opción común para los regeneradores, aunque su trayectoria tortuosa puede introducir pérdidas por viscosidad significativas.²⁶

El espaciado de los canales es un parámetro de diseño crucial. Un espaciado demasiado pequeño provoca altas pérdidas por viscosidad, mientras que un espaciado demasiado grande reduce el volumen de gas que participa en el intercambio de calor efectivo. Se considera que un espaciado óptimo es de 2 a 4 veces la profundidad de penetración térmica.⁷

El camino hacia la adopción generalizada de la termoacústica puede depender menos de encontrar un único material "perfecto" y más del desarrollo de modelos computacionales robustos que puedan predecir con precisión el rendimiento de estos medios porosos complejos, irregulares pero económicos, desbloqueando así la ventaja de costo de la tecnología.

Intercambiadores de Calor

Todo sistema termoacústico requiere dos intercambiadores de calor: uno frío para absorber la carga de refrigeración de una fuente externa y uno caliente para rechazar el calor (que incluye tanto el calor bombeado como el trabajo acústico de entrada) al ambiente.⁴ El diseño de intercambiadores de calor compactos y eficientes para un flujo oscilante sigue siendo un

desafío de ingeniería significativo. Los prototipos han utilizado componentes como radiadores de automóviles modificados, reconociendo que las imperfecciones en la transferencia de calor pueden comprometer el rendimiento general.¹³

Arquitecturas de Sistema y Ciclos Termodinámicos

Sistemas de Onda Estacionaria

En un resonador cerrado, una onda estacionaria se forma por la interferencia de dos ondas que viajan en direcciones opuestas.⁹ Una característica definitoria de una onda estacionaria pura es que las oscilaciones de presión y velocidad del gas están desfasadas 90 grados. Estos sistemas utilizan un **stack** y el ciclo termodinámico que experimentan las parcelas de gas se aproxima al **ciclo Brayton**.⁹ Este ciclo consta de cuatro procesos: compresión adiabática, rechazo de calor isobárico, expansión adiabática y absorción de calor isobárica.¹² Debido a que el intercambio de calor entre el gas y las placas del stack ocurre a través de una diferencia de temperatura finita, el proceso es termodinámicamente irreversible, lo que limita inherentemente la eficiencia de estos dispositivos.³⁰

Sistemas de Onda Progresiva

En una onda progresiva pura, las oscilaciones de presión y velocidad están en fase (desfase de 0 grados), lo cual es la condición óptima para realizar trabajo y transferir energía de manera eficiente.³¹ Para mantener una onda predominantemente progresiva, estos sistemas suelen emplear una geometría de bucle o toro.¹⁰ El componente central es un **regenerador**, que, con sus canales extremadamente finos, asegura un contacto térmico casi perfecto entre el gas y el material sólido.¹⁰ Este excelente intercambio de calor permite que el ciclo se aproxime al **ciclo de Stirling**, que es altamente eficiente.¹⁰ El regenerador permite los pasos de intercambio de calor casi isotérmicos que definen el ciclo de Stirling, haciéndolo mucho más reversible termodinámicamente que el ciclo Brayton. Por esta razón, los dispositivos de onda progresiva son inherentemente más eficientes y constituyen la base de todos los sistemas modernos de alto rendimiento.³⁰

Sistemas Híbridos de Onda Progresiva-Estacionaria

En la práctica, el campo acústico dentro de cualquier dispositivo real nunca es una onda puramente estacionaria o puramente progresiva, sino un híbrido complejo de ambas.³¹ La distinción es una idealización útil, pero el verdadero desafío de la ingeniería es manipular este campo acústico complejo. El objetivo de un diseño de alta eficiencia no es crear una onda progresiva pura en todo el dispositivo, sino más bien optimizar la red acústica global (la forma del resonador, el impulsor, los intercambiadores de calor) para lograr una relación de fase similar a la de una onda progresiva, es decir, un desfase cercano a cero entre la presión y la velocidad, específicamente donde más importa: dentro del regenerador.³¹ Esta optimización de la fase local dentro de un campo acústico global complejo es la clave para maximizar la eficiencia del sistema.

Análisis de Rendimiento y Desafíos Técnicos

Ventajas Intrínsecas

La tecnología termoacústica ofrece varias ventajas fundamentales sobre los sistemas de refrigeración y calefacción convencionales:

- **Fiabilidad y Longevidad:** La ausencia casi total de piezas móviles que sufran desgaste (como sellos deslizantes o sistemas de lubricación) se traduce en una fiabilidad extremadamente alta y una larga vida útil. Las unidades comerciales proyectan una vida útil de 20 a 30 años, y un prototipo militar funcionó de forma continua durante más de 11,000 horas sin degradación observable del rendimiento.⁸
- **Sostenibilidad Ambiental:** El uso exclusivo de gases inertes como el helio significa que la tecnología tiene un Potencial de Agotamiento del Ozono (PAO) y un Potencial de Calentamiento Global (PCG) nulos. Esto la hace inherentemente compatible con las regulaciones ambientales más estrictas, actuales y futuras.⁶
- **Funcionamiento Silencioso:** Los sistemas pueden diseñarse para ser excepcionalmente silenciosos, con niveles de ruido inferiores a 30-35 dB(A), lo que representa una ventaja competitiva significativa para aplicaciones residenciales.⁸
- **Control Proporcional:** A diferencia de los sistemas de compresión de vapor que operan en ciclos de encendido/apagado, la capacidad de refrigeración o calefacción de un dispositivo termoacústico puede modularse continuamente ajustando la potencia del impulsor acústico. Esto permite una adaptación más precisa a la carga térmica y puede mejorar la eficiencia estacional general.⁸

Rendimiento Cuantitativo y la Barrera de la Eficiencia

Históricamente, la principal desventaja de la termoacústica ha sido un Coeficiente de Rendimiento (COP) inferior al de la tecnología de compresión de vapor, que está muy madura.⁵ Sin embargo, los avances recientes, especialmente en los sistemas de onda progresiva, han reducido significativamente esta brecha. La siguiente tabla resume las métricas de rendimiento cuantitativas de varios prototipos y sistemas comerciales a lo largo de los años.

| Prototipo/Sistema | Tipo | Fluido de Trabajo | Potencia de Refrigeración (W) | Diferencial de Temp. (°C) | COP Reportado / Eficiencia | Fuente/Año |
|--|----------------------------|-------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| STAR (modificado) | Onda estacionaria | - | 30 | - | - | ³⁷ / 2000 |
| CFIC/Ejército de EE. UU. | Onda progresiva (Stirling) | Helio | - | >80 | ~0.5 | ²⁹ / 2008 |
| Prototipo de Patarnott | Onda estacionaria | Mezcla He/Ar | 130 | 6.7 | <3% de Carnot | ²² / 1999 |
| Ballister & McKelvey | - | - | >400 | 12 | - | ³⁸ / 1995 |
| Sistema impulsado por calor | Onda progresiva | Helio | 40 (@ 0°C) | 30 | - | ³² / 2010 |
| Sistema de tubo en bucle (Sim) | Onda progresiva | - | - | - | 53% de Carnot | ³⁹ / 2017 |
| BlueHeart Energy | Onda progresiva | Helio | 1000-6000 (calefacción) | >100 (80°C caliente, -20°C frío) | SCOP alto (no especificado) | ⁸ / 2024 |
| Equium | Onda progresiva | Helio | 3000-4000 (calefacción) | >80°C caliente | SCOP alto (no especificado) | ²¹ / 2023 |
| Motor TA "húmedo" (Sim) | Onda estacionaria | - | - | <90 | >40% de Carnot | ⁴⁰ / 2022 |
| Refrigerador impulsado por calor (Exp) | - | - | 117 (@ 110K) | >663 | 13.4% Efic. Exergética | ⁴⁰ / 2023 |

Investigación Actual en la Mejora del Rendimiento

La investigación actual ha pasado de superar las limitaciones físicas fundamentales a resolver desafíos de ingeniería relacionados con el costo, la fabricabilidad y la optimización de componentes. Los avances recientes son notables, con un sistema experimental que alcanzó una eficiencia exergética de conversión de calor a refrigeración del 13.4% y 117 W de refrigeración a 110 K, lo que representa una mejora del 34% sobre los récords anteriores.⁴⁰ Los modelos teóricos continúan mostrando un potencial aún mayor, con predicciones de COP de hasta 4.89 y eficiencias de motor que alcanzan el 75% del límite de Carnot.³⁹ Además, se están explorando conceptos novedosos como la termoacústica de "transferencia de masa en la pared", que teóricamente podría aumentar la potencia en un orden de magnitud y la eficiencia a más del 40% del límite de Carnot, incluso utilizando fuentes de calor de baja calidad.⁴²

Aplicaciones: Desde la Criogenia hasta las Bombas de Calor Comerciales

Aplicaciones de Alto Rendimiento y de Nicho

Históricamente, las primeras aplicaciones de la termoacústica se encontraron en áreas donde su fiabilidad y simplicidad superaban las consideraciones de eficiencia.

- **Criogenia y Aplicaciones Espaciales (NASA):** La NASA ha sido pionera en el uso de la tecnología para criorefrigeradores de larga duración y alta fiabilidad destinados a enfriar sensores y electrónica en el espacio. Se han desarrollado convertidores de potencia termoacústicos-Stirling (como los convertidores STAR y DELTA) para sistemas de energía espacial.⁴³
- **Defensa y Militar (DARPA):** El Ejército de EE. UU. financió un prototipo de refrigerador robusto para cocinas militares móviles, valorando su resistencia a los golpes y la simplificación logística.²⁹ Tecnologías relacionadas, como los motores Stirling, forman parte del programa de Tecnologías de Gestión Térmica (TMT) de DARPA para la refrigeración activa de electrónica de alta potencia.⁴⁶ El proyecto TREES, una colaboración entre ACT y la NASA, tiene como objetivo utilizar la termoacústica para enfriar la electrónica de potencia a escala de megavatios en futuras aeronaves eléctricas.⁴⁷
- **Procesos Industriales:** Existe un potencial significativo para la licuefacción de gas natural y la recuperación de calor residual industrial, convirtiendo el calor de bajo grado en energía acústica útil o refrigeración.⁴

La Nueva Frontera: Calefacción y Refrigeración Residencial

La aplicación más transformadora de la tecnología termoacústica es el mercado de la calefacción y refrigeración residencial. Las bombas de calor termoacústicas pueden abordar una necesidad crítica del mercado: la calefacción sostenible en edificios existentes. A diferencia de las bombas de calor convencionales, que luchan por alcanzar las altas temperaturas requeridas por los sistemas de radiadores antiguos, las bombas de calor termoacústicas pueden suministrar agua caliente a temperaturas de hasta 80 °C, lo que permite la sustitución directa de las calderas de combustibles fósiles sin necesidad de costosas renovaciones del sistema de calefacción del hogar.⁸

Esto abre la puerta a una visión futura de sistemas energéticos totalmente autónomos. Se puede concebir una unidad autónoma en la que un motor termoacústico, alimentado por una fuente de calor como la energía solar térmica o el calor residual, impulse directamente un refrigerador termoacústico. Un sistema de este tipo proporcionaría refrigeración sin necesidad de entrada de electricidad, un concepto explorado en sistemas experimentales impulsados por calor.³²

Estudios de Caso Comerciales: BlueHeart Energy y Equium

Dos empresas europeas, BlueHeart Energy y Equium, están a la vanguardia de la comercialización de bombas de calor termoacústicas para el mercado residencial. Ambas están desarrollando sistemas de onda progresiva basados en helio e impulsados por pistones lineales.⁴⁹

- **BlueHeart Energy:** Surgida de TNO, una organización de investigación holandesa líder en termoacústica, BlueHeart está desarrollando una unidad compacta de 6 kW (55x55x55 cm) diseñada para la producción en masa y la fácil integración por parte de los fabricantes de equipos originales (OEM). Su lanzamiento al mercado está previsto para 2024-2025.⁸
- **Equium:** Esta startup francesa también está desarrollando un "núcleo" de bomba de calor para socios OEM, afirmando una producción de calor de 3-4 kW por cada kW de electricidad consumida, con una entrada al mercado prevista para 2024.²¹

Un momento crucial para la industria ocurrió en abril de 2025, cuando Copeland, un gigante mundial en soluciones climáticas, anunció una inversión estratégica en BlueHeart Energy.⁵³ Esta asociación no solo proporciona a BlueHeart capital crucial, sino también acceso a la vasta experiencia en fabricación a gran escala, conocimiento del mercado y canales de venta de Copeland. Este movimiento es una validación significativa de la madurez comercial de la tecnología y señala una aceleración en su camino hacia la adopción generalizada.

Conclusión y Perspectivas Futuras

La tecnología termoacústica ha madurado desde ser una curiosidad científica con aplicaciones de nicho hasta convertirse en una plataforma comercialmente viable, especialmente en la forma de bombas de calor de onda progresiva. Las ventajas fundamentales de fiabilidad, longevidad y seguridad ambiental se combinan ahora con métricas de eficiencia que mejoran rápidamente, haciéndolas competitivas con las tecnologías establecidas.

Aunque la física fundamental está bien entendida, persisten desafíos de ingeniería, principalmente en la reducción de costos a través de la producción en masa, la optimización del diseño de intercambiadores de calor para flujos oscilantes y la construcción de una cadena de suministro robusta para componentes especializados.²⁹

La trayectoria futura de la tecnología parece prometedora. Está a punto de irrumpir en el mercado de la calefacción residencial como una fuerza disruptiva, particularmente en Europa, donde las estrictas regulaciones sobre los gases fluorados crean una fuerte demanda de alternativas. La inversión de actores establecidos de la industria, como Copeland, probablemente acelerará esta transición. La investigación futura se centrará en conceptos avanzados como los sistemas de transferencia de masa en la pared y la integración en sistemas energéticos holísticos impulsados por calor.⁴² El viaje de la tecnología desde aplicaciones criogénicas especializadas hasta productos de consumo masivo ilustra un ciclo clásico de maduración tecnológica, que ahora entra en su fase de crecimiento comercial.

Obras citadas

1. Thermo Acoustic Refrigeration - IOSR Journal, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://www.iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/Conf-17026-2017/Volume-5/11.%2058-63.pdf>
2. (PDF) Thermoacoustic Effect: the Power of Conversion of Sound Energy & Heat Energy: Review - ResearchGate, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://www.researchgate.net/publication/305722594_Thermoacoustic_Effect_the_Power_of_Conversion_of_Sound_Energy_Heat_Energy_Review
3. Special Session: Advances in Thermoacoustic Technology - Squarespace, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://static1.squarespace.com/static/5313d422e4b0aeaef76ef185/t/63b86fab4e9dde0053e08793/1673031595527/2023+Session+%231.pdf>
4. The Power of Sound | American Scientist, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://www.americanscientist.org/article/the-power-of-sound>
5. www.researchgate.net, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://www.researchgate.net/publication/319151705_A_Critical_Review_on_Thermoacoustic_Refrigeration_and_its_Significance#:~:text=Some%20key%20advantages%20include%20no,is%20lessor%20Coefficient%20of%20Performance.
6. A Critical Review on Thermoacoustic Refrigeration and its Significance, fecha de

acceso: julio 27, 2025,

[https://sphinxsai.com/2017/ch_vol10_no7/2/\(540-552\)V10N7CT.pdf](https://sphinxsai.com/2017/ch_vol10_no7/2/(540-552)V10N7CT.pdf)

7. A Critical Review on Thermoacoustic Refrigeration and its Significance - ResearchGate, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://www.researchgate.net/publication/319151705_A_Critical_Review_on_Thermoacoustic_Refrigeration_and_its_Significance
8. Technical development and use-case aspects of thermoacoustic heat pumps for existing houses | BUILD UP, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://build-up.ec.europa.eu/en/resources-and-tools/articles/technical-development-and-use-case-aspects-thermoacoustic-heat-pumps>
9. What is a Thermoacoustic Heat Pump?, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://sprsunheatpump.com/what-is-a-thermoacoustic-heat-pump.html>
10. Professor Artur J. Jaworski - Thermoacoustics - Google Sites, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://sites.google.com/view/professorarturjaworski-new/thermoacoustics>
11. ELI5: How do Thermoacoustics work? How would a thermoacoustic refrigerator work? : r/explainlikeimfive - Reddit, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://www.reddit.com/r/explainlikeimfive/comments/stayjf/eli5_how_do_thermoacoustics_work_how_would_a/
12. Thermoacoustic heat engine - Wikipedia, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoacoustic_heat_engine
13. Thermoacoustic Refrigerator - DigitalCommons@USU, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://digitalcommons.usu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1827&context=honors>
14. Thermoacoustic refrigeration - NASA Technical Reports Server (NTRS), fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://ntrs.nasa.gov/citations/19920013477>
15. Thermoacoustics - Wikipedia, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Thermoacoustics>
16. AN OVERVIEW OF STACK DESIGN FOR A THERMOACOUSTIC REFRIGERATOR - IJRET, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://ijret.org/volumes/2015v04/i06/IJRET20150406010.pdf>
17. Review Thermoacoustic | PDF | Chlorofluorocarbon | Nature - Scribd, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://www.scribd.com/document/591488371/Review-thermoacoustic>
18. ASA 147th Meeting Lay Language Papers -A Brief Description of Thermoacoustics, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://acoustics.org/pressroom/httpdocs/147th/thermoacoustics.htm>
19. THERMOACOUSTIC REFRIGERATION - 123SEMINARONLY, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://www.grimsby.ac.uk/documents/defra/tech-thermoacoustic.pdf>
20. Thermoacoustic Refrigerator | DOC - SlideShare, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://www.slideshare.net/slideshow/thermoacoustic-refrigerator-76267337/76267337>
21. New residential thermo-acoustic heat pump makes no compressor noise, can deliver 80 c (180 F) water : r/Futurology - Reddit, fecha de acceso: julio 27, 2025,

- https://www.reddit.com/r/Futurology/comments/102hebv/new_residential_thermoacoustic_heat_pump_makes_no/
22. EVALUATING THE PERFORMANCE OF, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://www.patarnott.com/pdf/thermoacousticRefrig.pdf>
 23. Our technology — BlueHeart Energy, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://www.blueheartenergy.com/ourtechnology>
 24. A Review on Thermoacoustic Refrigeration - iijrset, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://www.iijrset.com/upload/2017/june/63_2_A_REVIEW.PDF
 25. Evaluation of Random Stack Materials for Use in Thermoacoustic ..., fecha de acceso: julio 27, 2025, https://www.researchgate.net/publication/267493975_Evaluation_of_Random_Stack_Materials_for_Use_in_Thermoacoustic_Refrigerators
 26. Selection and experimental evaluation of low-cost porous materials for regenerator applications in thermoacoustic engines - CORE, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://core.ac.uk/download/pdf/29031538.pdf>
 27. Influence of Material Used for the Regenerator on the Properties of a Thermoacoustic Heat Pump, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://journals.pan.pl/Content/101562/PDF/15_paper.pdf?handler=pdf
 28. Influence of material used for the regenerator on the properties of a thermoacoustic heat pump - SciSpace, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://scispace.com/pdf/influence-of-material-used-for-the-regenerator-on-the-5ahn0rye1n.pdf>
 29. The World's First Thermoacoustic Appliance, After ... - Purdue e-Pubs, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1950&context=iracc>
 30. Multiple-stage Traveling-wave thermoacoustic refrigerator for efficient room-temperature cooling application - Advances in Engineering, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://advanceseng.com/multiple-stage-traveling-wave-thermoacoustic-refrigerator-efficient-room-temperature-cooling-application/>
 31. Thermoacoustic effect of traveling-standing wave | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://www.researchgate.net/publication/243211562_Thermoacoustic_effect_of_traveling-standing_wave
 32. Heat driven thermoacoustic cooler based on traveling-standing wave - ResearchGate, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://www.researchgate.net/publication/223722958_Heat_driven_thermoacoustic_cooler_based_on_traveling-standing_wave
 33. Thermoacoustic heat pump is sound development - Cooling Post, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://www.coolingpost.com/features/thermoacoustic-heat-pump-is-sound-development/>
 34. Thermoacoustic Refrigeration, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://ffden-2.phys.uaf.edu/webproj/212_spring_2014/Timothy_Ballard/Timothy_Ballard/advantages.html

35. THERMOACOUSTIC REFRIGERATION | PPTX | Indoor Environmental Quality - SlideShare, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://www.slideshare.net/slideshow/thermoacoustic-refrigeration/12179900>
36. The Reality of a Small Household Thermoacoustic Refrigerator - Purdue e-Pubs, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1343&context=iracc>
37. Performance measurements on a thermoacoustic refrigerator driven at high amplitudes, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/10830371/>
38. Experimental Investigation of a Thermoacoustic Cooler Prototype - CiteSeerX, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=b5aa9a814f41d9ff31d51af7026a3464a506a9d0>
39. Numerical Calculation of the Performance of a Thermoacoustic System with Engine and Cooler Stacks in a Looped Tube - ResearchGate, fecha de acceso: julio 27, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/318074272_Numerical_Calculation_of_the_Performance_of_a_Thermoacoustic_System_with_Engine_and_Cooler_Stacks_in_a_Looped_Tube
40. Review Advances in the utilization and suppression of thermoacoustic effect: A review, fecha de acceso: julio 27, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/384233095_Review_Advances_in_the_utilization_and_suppression_of_thermoacoustic_effect_A_review
41. Quantitative and Qualitative Analysis of Main Parameters and Their Interactions in Thermoacoustic Refrigerators Performance - MDPI, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/22/10470>
42. Special Session: Advances in Thermoacoustic Technology - Squarespace, fecha de acceso: julio 27, 2025,
https://static1.squarespace.com/static/5313d422e4b0aeaef76ef185/t/647deb336359f34446ce5b6e4/1685973812205/2023_Special_Session_1_GC.pdf
43. Thermal Management for Aircraft Propulsion Systems - NASA Technology Transfer Program, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-110>
44. Cryogenic Cooling for Myriad Applications—A STAR Is Born! | NASA Spinoff, fecha de acceso: julio 27, 2025, https://spinoff.nasa.gov/Spinoff2006/ip_1.html
45. Stirling Thermoacoustic Power Converter and Magnetostrictive Alternator | T2 Portal, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://technology.nasa.gov/patent/LEW-TOPS-80>
46. TMT: Thermal Management Technologies - DARPA, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://www.darpa.mil/research/programs/thermal-management-technologies>
47. Thermoacoustic Thermal Management for Electric Aircraft, fecha de acceso: julio 27, 2025,
https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20240015017/downloads/Rodriguez_Paper_TREES_2025SciTech_20240015017_3.pdf

48. Advances in thermoacoustic refrigeration - ResearchGate, fecha de acceso: julio 27, 2025,
https://www.researchgate.net/publication/289304935_Advances_in_thermoacoustic_refrigeration
49. Thermoacoustic Heat Pumps Startups - Heat Pumps - Climate Innovation Series - Climafix, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://www.climafix.in/ref/cis/innovation/thermoacoustic-heat-pumps/>
50. Thermoacoustic Heat Pumps Could Revolutionize the Way We Heat ..., fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://emag.directindustry.com/2023/02/22/thermoacoustic-heat-pumps-could-revolutionize-the-way-we-heat-and-cool-our-homes/>
51. BlueHeart Energy, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://www.blueheartenergy.com/>
52. Home - EQUIUM, fecha de acceso: julio 27, 2025, <https://www.equium.fr/home>
53. Copeland invests in thermo-acoustic heat pump - Cooling Post, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://www.coolingpost.com/world-news/copeland-invests-in-thermo-acoustic-heat-pump/>
54. Blue Heart Energy has new investors stepping in, fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://www.blueheartenergy.com/news/blueheart-energy-has-new-investors>
55. Copeland Invests in BlueHeart Energy to Advance Next-Generation ..., fecha de acceso: julio 27, 2025,
<https://www.copeland.com/en-us/news/copeland-invests-in-blueheart-energy>