

Análisis Físico-Matemático de la Cimática: De Vibraciones Modales a la Dinámica de Burbujas Toroidales

Introducción

Definición y Alcance

La cimática, término acuñado por el médico y científico suizo Hans Jenny, es la disciplina que se dedica al estudio y la visualización de los fenómenos ondulatorios, específicamente los efectos de las vibraciones, en particular las acústicas, sobre la materia.¹ Esta ciencia permite observar cómo las ondas sonoras pueden organizar la materia en patrones geométricos complejos y ordenados, revelando las formas inherentes a la vibración en medios como polvos, líquidos y gases.³ Aunque la belleza de estas formas ha inspirado aplicaciones en el arte, la música y la filosofía, el enfoque de este informe es rigurosamente científico.⁵ Se llevará a cabo un análisis exhaustivo de los principios físico-matemáticos que subyacen a estos fenómenos, desde las ecuaciones fundamentales de las ondas hasta la dinámica de fluidos no lineal que gobierna las formaciones más complejas.

Contexto Histórico y Pioneros

La intuición de una relación entre el sonido y la forma se remonta a diversas culturas antiguas.⁴ Sin embargo, la fundamentación científica de este campo comenzó en el siglo XVIII con el trabajo del físico y músico alemán Ernst Florens Friedrich Chladni. Utilizando un arco de violín para hacer vibrar placas metálicas cubiertas con arena fina, Chladni demostró que cada frecuencia de resonancia producía un patrón geométrico único y reproducible.¹ Estas formaciones, hoy conocidas como "Figuras de Chladni", fueron la primera visualización sistemática de los modos de vibración bidimensionales y sentaron las bases de la acústica experimental.⁴

En el siglo XX, Hans Jenny retomó y expandió significativamente el trabajo de Chladni, acuñando el término "Cimática" del griego *κύμα* (*kyma*), que significa "onda".² Jenny aplicó la

tecnología moderna de su tiempo, como generadores de frecuencia y osciladores piezoeléctricos, para estudiar sistemáticamente los efectos de las vibraciones sónicas no solo en polvos sobre placas, sino también en una amplia variedad de fluidos y medios pastosos.⁶ Sus meticulosos experimentos, documentados en sus volúmenes *Kymatik*, revelaron una asombrosa variedad de patrones dinámicos y ordenados, desde formas que recuerdan a organismos vivos hasta estructuras geométricas complejas.⁶ Previamente, en 1885, Margaret Watts Hughes había inventado el "Eidophone", un dispositivo que permitía visualizar los patrones generados por la voz humana sobre una membrana, un precursor importante en la visualización directa del sonido.⁵

Estructura del Informe

Este informe se estructura de manera progresiva para construir una comprensión profunda de la cimática desde sus cimientos. La Sección 1 establece el marco teórico indispensable, detallando la física de las oscilaciones y la ecuación de onda que gobierna los fenómenos modales vibratorios, con un enfoque en las Figuras de Chladni. La Sección 2 transita de los sistemas sólidos a los fluidos, abordando específicamente la física de la "burbuja címica" y el fenómeno de las ondas de Faraday. La Sección 3 analiza la interacción de la luz con estas superficies fluidas dinámicas, explicando cómo los patrones físicos se traducen en los fenómenos ópticos que observamos. Finalmente, la Sección 4 se adentra en la dinámica de fluidos avanzada y no lineal para describir la formación de estructuras toroidales, un fenómeno de gran complejidad. A través de este recorrido, se demostrará que los fenómenos címáticos son manifestaciones directas y predecibles de leyes físicas fundamentales.

Sección 1: Fundamentos Físicos de los Fenómenos Modales Vibratorios

Para comprender cualquier manifestación címica, es imperativo primero establecer el marco teórico de la física de oscilaciones y ondas. Los patrones visuales observados no son arbitrarios, sino soluciones físicas a ecuaciones matemáticas bien definidas que describen el comportamiento de la materia bajo la influencia de fuerzas periódicas.

1.1 La Ecuación de Onda General

En el corazón de la descripción de los fenómenos címáticos se encuentra la ecuación de onda, una ecuación diferencial parcial de segundo orden que gobierna la propagación de una variedad de ondas, como las sonoras, las luminosas o las vibraciones en un medio material. Para un sistema bidimensional, como una membrana delgada o una placa, la ecuación toma la

forma ¹²:

$$\partial^2 \partial^2 U = c^2 (\partial^2 \partial^2 U + \partial^2 \partial^2 U) = c^2 \nabla^2 U$$

donde $U(x,y,t)$ es el desplazamiento perpendicular de un punto de la placa en la posición (x,y) en el instante t , y c es la velocidad de propagación de la onda en el medio. Esta velocidad depende de las propiedades físicas del material, como la tensión, la densidad y la rigidez a la flexión.¹² Todas las figuras címáticas que se forman en superficies planas son, en esencia, visualizaciones de las soluciones a esta ecuación, sujetas a las condiciones de contorno específicas del sistema.

1.2 Ondas Estacionarias, Resonancia y Modos Normales

Los patrones címáticos no se forman a cualquier frecuencia, sino solo a frecuencias muy específicas denominadas frecuencias de resonancia. A estas frecuencias, el sistema exhibe patrones de vibración estables conocidos como ondas estacionarias.

Formación de Ondas Estacionarias

Una onda estacionaria no es una onda viajera que se propaga a través del medio, sino un patrón de vibración en el que la posición de la amplitud máxima y mínima no se mueve.¹⁴ Se forma por la superposición (interferencia) de dos ondas idénticas (misma frecuencia y amplitud) que viajan en direcciones opuestas.¹⁴ En un sistema finito como una placa de Chladni, esta condición se logra cuando la onda generada por la fuente de vibración se refleja en los bordes de la placa e interfiere consigo misma.¹⁶

Nodos y Antinodos

La interferencia constructiva y destructiva resultante crea puntos fijos en el espacio. Los **nodos** son puntos, o en el caso bidimensional, líneas, donde la amplitud de la vibración es siempre cero debido a una interferencia destructiva perfecta.¹ Por el contrario, los **antinodos** son puntos donde la amplitud de la vibración es máxima, debido a una interferencia constructiva perfecta.¹⁷ En los experimentos de Chladni, las partículas sueltas (como arena o sal) son expulsadas de las regiones de alta vibración (antinodos) y se acumulan en las líneas de quietud (nodos), haciendo así visible el patrón de la onda estacionaria.¹

Resonancia y Frecuencias Naturales (Eigenfrecuencias)

Un sistema físico, como una placa, tiene un conjunto discreto de frecuencias a las que puede

vibrar de forma natural. Estas se denominan **frecuencias naturales** o **eigenfrecuencias**.¹⁶ Cuando el sistema es excitado por una fuerza externa cuya frecuencia coincide con una de estas frecuencias naturales, ocurre la **resonancia**. En este estado, la energía se transfiere de manera muy eficiente al sistema, lo que resulta en un aumento dramático de la amplitud de la vibración.¹⁶ Los patrones cimáticos solo se manifiestan de forma clara y estable en estas frecuencias de resonancia, ya que es cuando la amplitud es lo suficientemente grande como para organizar la materia.²⁰ Cada frecuencia de resonancia corresponde a un patrón de onda estacionaria específico, conocido como **modo normal** o **eigenmodo** de vibración del sistema.

1.3 Aplicación a Superficies Planas: Las Figuras de Chladni

El análisis matemático de las figuras de Chladni implica resolver la ecuación de onda bidimensional para la geometría y las condiciones de contorno de la placa. Para una placa rectangular de dimensiones $a \times b$ con bordes fijos, una solución general para el desplazamiento $U(x,y,t)$ es una superposición de sus modos normales¹²:

$$U(x,y,t) = \sum_m \sum_n A_{mn} \sin(a_m \pi x) \sin(b_n \pi y) \cos(\omega_{mn} t)$$

donde m y n son números enteros que definen el modo, A_{mn} y B_{mn} son constantes determinadas por las condiciones iniciales, y ω_{mn} es la frecuencia angular de resonancia para el modo (m,n) , dada por¹²:

$$\omega_{mn} = c\pi \sqrt{a_m^2 + b_n^2}$$

Las líneas nodales, donde se acumula la arena, son las curvas donde la parte espacial de la solución es cero: $\sin(a_m \pi x) \sin(b_n \pi y) = 0$.

Los patrones observados dependen críticamente de varios factores:

1. **Frecuencia:** Frecuencias más altas corresponden a valores enteros más grandes de m y n . Esto implica que la función sinusoidal oscila más rápidamente en el espacio, creando una mayor densidad de líneas nodales y, por lo tanto, patrones geométricos más complejos e intrincados.⁸ Esta es una relación causal directa: el aumento de la frecuencia de excitación permite al sistema acceder a modos normales de orden superior, que intrínsecamente poseen una estructura espacial más compleja.
2. **Geometría de la Placa:** La forma de la placa dicta las condiciones de contorno y, por tanto, la simetría de las soluciones matemáticas. Mientras que las placas rectangulares producen patrones basados en funciones sinusoidales cartesianas, las placas circulares generan patrones con simetría radial y circular, descritos por funciones de Bessel.¹¹
3. **Propiedades del Material:** La velocidad de la onda, c , y por consiguiente el conjunto de frecuencias de resonancia, dependen de las propiedades intrínsecas del material de la placa, como su densidad (ρ), su módulo de Young (elasticidad) y su espesor (h).¹¹

La universalidad de la matemática subyacente es profunda. Los patrones de Chladni no son fenómenos esotéricos, sino visualizaciones directas y macroscópicas de las soluciones (eigenfunciones) de la ecuación de onda. La misma estructura matemática que describe

estos modos vibratorios también describe los orbitales de un electrón confinado en un pozo cuántico, como lo demuestra la ecuación de Schrödinger, que es una forma de ecuación de onda.⁷ Esto revela que la cimática ofrece una ventana tangible a principios fundamentales que operan tanto a escala macroscópica como cuántica.

Tabla 1: Ecuaciones Fundamentales de los Sistemas Vibratorios

Fenómeno	Ecuación Diferencial Gobernante	Ecuación de Posición/Desplazamiento Característica
Movimiento Armónico Simple (MAS)	$m\ddot{x} + kx = 0$	$x(t) = A\cos(\omega t + \phi)$
MAS Amortiguado	$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$	$x(t) = Ae^{-\gamma t}\cos(\omega' t + \phi)$
MAS Forzado con Amortiguamiento	$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0\cos(\omega t)$	Solución en estado estacionario con amplitud dependiente de ωf
Ecuación de Onda (1D)	$\partial_t^2 \partial_x^2 u = c^2 \partial_x^2 \partial_t^2 u$	$u(x,t) = f(x-ct) + g(x+ct)$
Ecuación de Onda (2D)	$\partial_t^2 \partial^2 U = c^2 (\partial_x^2 \partial_t^2 U + \partial_y^2 \partial_t^2 U)$	$U(x,y,t) = \sum_{m,n} F_{mn}(x,y) G_{mn}(t)$

Fuentes: ¹²

Sección 2: Cimática en Fluidos: La Física de la Burbuja Cimática

La transición del estudio de placas sólidas a interfaces fluidas, como la superficie de una burbuja, introduce una física considerablemente más compleja y fenómenos nuevos. Una "burbuja cimática" es aquella cuya superficie, al ser sometida a un campo sonoro, exhibe patrones de ondas estacionarias tridimensionales, a menudo de gran belleza y complejidad.²⁸

2.1 Dinámica de una Burbuja en un Campo Acústico

Cuando una burbuja se encuentra en un líquido expuesto a una onda de sonido, la presión oscilante del campo acústico la fuerza a expandirse y contraerse periódicamente. Este es el modo de oscilación fundamental, conocido como **oscilación volumétrica** o modo de "respiración".³¹ La dinámica radial de una burbuja esférica en un líquido incompresible está descrita, en su forma más fundamental, por la **ecuación de Rayleigh-Plesset**.³³ Modelos más avanzados y no lineales, que tienen en cuenta la compresibilidad del líquido, la viscosidad y otros efectos, proporcionan una descripción más precisa de la dinámica de la burbuja bajo excitaciones intensas.³⁵

2.2 El Origen de los Patrones: Inestabilidad Paramétrica y Ondas de Faraday

A diferencia de la respuesta lineal de una placa sólida, el mecanismo que genera patrones en la superficie de una burbuja es fundamentalmente no lineal. Cuando la amplitud de la oscilación volumétrica supera un umbral crítico, la superficie esférica de la burbuja se vuelve inestable. Esta inestabilidad se conoce como **inestabilidad paramétrica** y da lugar a la formación de ondas superficiales estacionarias conocidas como **ondas de Faraday**.³⁹

El mecanismo es distinto al de la resonancia lineal. En la resonancia lineal (como en las placas de Chladni), el sistema responde a la misma frecuencia que la excitación. En la inestabilidad paramétrica, el sistema responde a una fracción de la frecuencia de excitación. Una característica distintiva de las ondas de Faraday es que su frecuencia de oscilación es exactamente la mitad de la frecuencia de la onda sonora que las excita

($f_{\text{Faraday}} = f_{\text{excitación}}/2$).³⁹ Son, por tanto, ondas

subarmónicas.

Este fenómeno es análogo al que se observa en la superficie de un líquido contenido en un recipiente que vibra verticalmente. La aceleración periódica del recipiente actúa como una modulación de la gravedad efectiva. De manera similar, la oscilación radial de la burbuja (su expansión y contracción) modula paraméricamente la curvatura y la tensión superficial de su interfaz, y cuando esta modulación es suficientemente fuerte, excita espontáneamente las ondas de Faraday.⁴⁰ Por lo tanto, el mecanismo físico que gobierna la cimática de burbujas no es un análogo directo de las figuras de Chladni, sino un fenómeno no lineal más complejo que implica una transición de un estado estable a uno inestable.

2.3 Caracterización de los Modos Superficiales

La simetría del sistema impone la simetría de las soluciones. Así como una placa rectangular produce patrones basados en funciones sinusoidales cartesianas, la geometría esférica de la burbuja dicta que los patrones de ondas estacionarias que se forman en su superficie se describen matemáticamente mediante **armónicos esféricos**.⁴⁰ Estas son las mismas funciones que se utilizan en física cuántica para describir los orbitales atómicos y en astrofísica para modelar campos gravitacionales.

La complejidad del patrón, que corresponde al "grado" del armónico esférico, está directamente relacionada con la frecuencia y la amplitud de la excitación acústica, así como con el tamaño de la burbuja. Experimentos han demostrado que para un diámetro de burbuja dado, existen frecuencias de excitación específicas que provocan la aparición de modos de simetría definidos (triangular, cuadrangular, pentagonal, etc.), siguiendo una progresión armónica.¹⁰ Frecuencias más altas tienden a excitar armónicos esféricos de mayor grado, resultando en patrones superficiales más intrincados.

Sección 3: El Comportamiento de la Luz en una Interfaz Fluida Oscilante

Los patrones físicos en la superficie de la burbuja se hacen visibles a través de su interacción con la luz. La superficie vibrante no es un reflector pasivo, sino un modulador óptico activo que esculpe el campo de luz incidente a través de varios mecanismos simultáneos, dando lugar a los complejos patrones visuales que se observan.

3.1 Reflexión y Refracción en una Superficie Dinámica

Las leyes fundamentales de la óptica geométrica, la ley de la reflexión y la ley de Snell para la refracción, dictan que la dirección de un rayo de luz después de interactuar con una superficie depende del ángulo de incidencia y de la orientación de la normal a la superficie en el punto de interacción.⁴⁴

La superficie de una burbuja cimática, cubierta por las crestas y valles de las ondas de Faraday, actúa como un arreglo dinámico de millones de microlentes cóncavas y convexas.⁴⁷ La curvatura local de la superficie cambia continuamente tanto en el espacio como en el tiempo. Un haz de luz incidente, compuesto por rayos paralelos, es enfocado y desenfocado por estas microlentes dinámicas. Este re-direccionamiento geométrico de la luz crea patrones complejos de concentración de luz, conocidos como **cáusticas**, que se mueven y parpadean en sincronía con la vibración de la superficie.⁴⁸

3.2 Efectos de Interferencia y Difracción

Además de la refracción y reflexión geométricas, los fenómenos ondulatorios de la luz juegan un papel crucial.

Interferencia de Película Delgada

Los colores iridiscentes característicos de una burbuja de jabón se deben a la **interferencia de película delgada**.⁴⁹ La luz que se refleja en la superficie exterior de la película de jabón interfiere con la luz que se refleja en la superficie interior. Dependiendo del grosor de la película y del ángulo de visión, ciertas longitudes de onda (colores) experimentan interferencia constructiva (se refuerzan) mientras que otras experimentan interferencia destructiva (se cancelan). Las ondas de Faraday en la superficie de la burbuja provocan una modulación dinámica del grosor de la película. Las crestas de las ondas corresponden a regiones más delgadas y los valles a regiones más gruesas. Esta variación de espesor se

traduce directamente en un patrón de colores de interferencia que se mueve y oscila en perfecta sincronía con la vibración acústica.

Difracción por una Red Periódica

Cuando las ondas de Faraday forman un patrón regular y periódico en la superficie de la burbuja, esta puede actuar como una **red de difracción de reflexión**.⁵¹ De manera análoga a cómo la superficie de un disco compacto descompone la luz blanca en sus colores constituyentes, la estructura periódica de las ondas en la burbuja difracta la luz incidente en múltiples direcciones, creando patrones de interferencia adicionales que contribuyen a la complejidad visual del fenómeno.⁵²

Estos tres mecanismos —re-direccionamiento geométrico, modulación de interferencia por espesor y difracción por periodicidad— operan simultáneamente. La superficie vibrante actúa como un modulador óptico espacial y temporal, acoplando directamente el dominio acústico con el óptico. La frecuencia temporal de las ondas de Faraday ($f_{\text{acústica}}/2$) determina la frecuencia de parpadeo de los patrones de luz, mientras que su longitud de onda espacial determina la escala característica de los patrones de cáusticas, interferencia y difracción.

Sección 4: Dinámica de Fluidos Avanzada: La Formación de Estructuras Toroidales

La formación de un toroide en la superficie de una burbuja representa un salto en complejidad, pasando de oscilaciones estables a fenómenos transitorios, altamente no lineales y que implican un cambio en la topología del sistema.

4.1 Flujo Acústico (Acoustic Streaming) y Generación de Vorticidad

Un campo acústico intenso no solo causa oscilaciones, sino que también puede inducir un flujo de fluido estacionario, un efecto no lineal de segundo orden conocido como **flujo acústico** o *acoustic streaming*.⁵³ Este fenómeno surge de la absorción de momento de la onda sonora por el fluido, especialmente cerca de fronteras oscilantes. Alrededor de una burbuja en oscilación, se generan patrones de microflujo (*microstreaming*) caracterizados por vórtices que arrastran el fluido circundante.³³ Este microflujo es más intenso cuando la burbuja es excitada cerca de su frecuencia de resonancia y juega un papel clave en la transferencia de momento y en la interacción de la burbuja con su entorno.⁵⁴

4.2 De la Oscilación al Toroide: Formación de Chorro y Transición

Topológica

Si bien el flujo acústico genera vorticidad, el mecanismo más dramático para la formación de un toroide es el **colapso asimétrico** de una burbuja, un fenómeno común en la cavitación.⁵⁷

Cuando una burbuja colapsa violentamente cerca de una superficie sólida o en un gradiente de presión, la asimetría del entorno impide un colapso perfectamente esférico. En su lugar, el lado de la burbuja más alejado de la superficie (donde la presión es mayor) se invagina y forma un

chorro líquido de alta velocidad que se acelera a través del interior de la burbuja.⁵⁸

Este chorro de alta energía es el agente de la transformación. Al impactar con la pared opuesta de la burbuja, la perfora. Este evento cambia fundamentalmente la topología de la burbuja, transformándola de un dominio simplemente conexo (una esfera) a un dominio doblemente conexo (un **toroide**).⁵⁸ Este proceso de enfoque de energía no lineal es fundamentalmente diferente de los patrones de ondas estacionarias discutidos anteriormente; no es una vibración estable, sino un evento transitorio y reconstructivo.

4.3 El Modelo del Anillo de Vórtice: Ecuaciones Gobernantes de las Burbujas Toroidales

Una vez que la burbuja adquiere forma toroidal, su dinámica ya no se describe adecuadamente por modelos basados en la presión y la tensión superficial (como la ecuación de Rayleigh-Plesset). En su lugar, se modela como un **anillo de vórtice con un núcleo gaseoso**.⁵⁷ La física que gobierna su comportamiento es la dinámica de vórtices, dominada por la vorticidad y la circulación.

Las ecuaciones clave que describen sus propiedades son:

1. **Geometría:** La forma del toroide se define por dos parámetros: el radio mayor del anillo (R) y el radio menor del núcleo gaseoso (a).⁶²
2. **Volumen:** El volumen de la burbuja toroidal (V_b) está dado por la expresión geométrica:
$$V_b = 2\pi^2 R a^2$$

.62

3. **Circulación (Γ):** Este es el parámetro dinámico más importante, que cuantifica la intensidad del flujo rotacional alrededor del núcleo del toroide. La circulación está directamente relacionada con la velocidad de propagación autoinducida del anillo (U). Una de las formulaciones que las relaciona es:

\$\$

$$\Gamma = 4\pi R U$$

\$\$

.62

4. Energía y Velocidad: La dinámica de un anillo de vórtice tiene propiedades contraintuitivas. Su velocidad de propagación es inversamente proporcional a su radio. Si se añade energía al sistema (por ejemplo, a través de un campo acústico), el anillo no se acelera; en cambio, su radio R aumenta, y como resultado, su velocidad de propagación U disminuye.⁶¹

El sistema ha transitado de ser un oscilador impulsado por presión a ser un sistema de transporte de momento gobernado por la vorticidad. Su comportamiento está dictado por la conservación de la circulación y la interacción del vórtice con el fluido circundante.

Tabla 2: Parámetros Clave en la Dinámica de Burbujas Toroidales (Modelo de Anillo de Vórtice)

Parámetro	Símbolo	Descripción Física	Ecuación/Relación Clave
Radio del Anillo	R	El radio desde el centro del toroide hasta el centro del núcleo gaseoso.	Define la escala general de la estructura.
Radio del Núcleo	a	El radio de la sección transversal del tubo gaseoso.	Define el grosor del anillo.
Volumen	V_b	El volumen total de gas contenido en el toroide.	$V_b = 2\pi^2 R a^2$
Velocidad de Propagación	U	La velocidad a la que el anillo de vórtice se traslada a través del fluido.	$U \approx 4\pi R \Gamma (\ln 8R - 41)$
Circulación	Γ	Medida integral de la vorticidad del fluido que gira alrededor del núcleo gaseoso.	$\Gamma = \oint \mathbf{v} \cdot d\mathbf{l}$. Governa la estabilidad y la velocidad.

Fuentes: ⁵⁷

Conclusión

Síntesis Integradora

El análisis de la cimática revela una fascinante jerarquía de principios físicos. Los patrones observados, lejos de ser fenómenos místicos, son manifestaciones directas y visuales de las

leyes matemáticas que gobiernan la materia en vibración. Este informe ha trazado un recorrido conceptual que demuestra esta progresión:

1. En su nivel más fundamental, la **ecuación de onda lineal** y el principio de superposición explican la formación de **modos normales** y ondas estacionarias, visualizados elegantemente en las Figuras de Chladni.
2. Al pasar a interfaces fluidas, las **inestabilidades no lineales** se vuelven dominantes. La oscilación volumétrica de una burbuja conduce a una **inestabilidad paramétrica**, generando **ondas de Faraday** subarmónicas en su superficie, cuya forma está dictada por los armónicos esféricos.
3. La interacción de la luz con estas superficies dinámicas actúa como un **modulador óptico activo**, donde la reflexión, la refracción, la interferencia de película delgada y la difracción se combinan para traducir los patrones de ondas físicas en complejos patrones visuales.
4. En regímenes de alta energía, el **enfoque no lineal de la energía acústica** puede inducir flujos violentos, como chorros de cavitación, que provocan **transiciones topológicas**, transformando una burbuja esférica en una estructura toroidal. La dinámica de esta nueva forma ya no está gobernada por la presión superficial, sino por la **vorticidad y la circulación**, requiriendo el uso de modelos de dinámica de vórtices.

La cimática, por lo tanto, sirve como un puente excepcional entre la teoría matemática abstracta y la observación empírica tangible, mostrando cómo principios físicos de creciente complejidad dan lugar a un universo de formas ordenadas y dinámicas.

Perspectivas Futuras

El campo de la cimática y la dinámica de burbujas acústicas sigue siendo un área de investigación activa y fructífera. Las investigaciones actuales exploran fenómenos en sistemas aún más complejos, como los fluidos no newtonianos, donde las propiedades del medio cambian con el esfuerzo aplicado, dando lugar a patrones aún más exóticos.⁶³ El estudio de la interacción entre burbujas oscilantes y partículas viscoelásticas tiene implicaciones directas en aplicaciones biomédicas y de ciencia de materiales.⁵⁵ Además, los principios de la cimática, en particular el flujo acústico y la manipulación de burbujas, se están aplicando activamente en el campo de la microfluídica para desarrollar dispositivos capaces de mezclar fluidos, atrapar y clasificar partículas a microescala con una precisión sin precedentes.³¹ Estas direcciones futuras posicionan a la cimática no solo como una disciplina para comprender la belleza de la física, sino también como una herramienta poderosa para la ingeniería y la tecnología del futuro.

Obras citadas

1. La Cimática: Cómo el Sonido Moldea la Realidad - Dabar Frecuencial, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://dabarfrecuencial.com/cimatica-sonido-realidad/>
2. Dr. Hans Jenny: Cymatics - Ecstatic Trance: Ritual Body Postures - Cuyamungue

- Institute, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
<https://www.cuyamungueinstitute.com/articles-and-news/dr-hans-jenny-cymatics/>
3. ¿QUÉ ES LA CIMÁTICA? - NEOMÚSICA | Tu blog de música, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://neomusica.es/blog/que-es-la-cimatica/>
 4. Hans Jenny: The Visionary Behind Cymatics - The Ohm Store, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
<https://www.theohmstore.co/blogs/our-stories/hans-jenny-the-visionary-behind-cymatics>
 5. La Cimática como herramienta de expresión artística - Dipòsit Digital UB, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/55773/1/01.FLLL_TESIS.pdf
 6. Cymatics – Hans Jenny – Sound Therapy Education, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://soundtherapy.education/sound-therapy-cymatics-hans-jenny/>
 7. Ernst Chladni - Wikipedia, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
https://en.wikipedia.org/wiki/Ernst_Chladni
 8. Hans Jenny (cymatics) - Wikipedia, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
[https://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Jenny_\(cymatics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Hans_Jenny_(cymatics))
 9. Jenny - Cycles Research Institute, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
<https://cyclesresearchinstitute.org/cycles-research/physics/jenny/>
 10. Article 121 - Part 3 - Cymatics & Dr. Hans Jenny - Cosmic Core, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
<https://www.cosmic-core.org/free/article-121-part-3-cymatics-dr-hans-jenny/>
 11. Cimática, visualizando el sonido - Trabajos premiados en el VIII Congreso Regional Investigadores Junior CMN-CARM (Curso 2016-2017), fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://www.carm.es/edu/pub/17401_2018/2_11_contenido.html
 12. PFC: Análisis modal de una placa cuadrada. - Universidad de Sevilla, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
<https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5483/fichero/An%C3%A1lisi+modal+de+una+placa+cuadrada.+Te%C3%B3rico%2C+num%C3%A9rico+y+experimental.pdf>
 13. Análisis vibratorio de una probeta de madera por medio de patrones de moteado láser - Universidad Autónoma de Querétaro, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
<https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/3905/1/RI006920.pdf>
 14. hyperphysics.phy-astr.gsu.edu, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Waves/standw.html#:~:text=El%20t%C3%A9rmino%20onda%20estacionaria%20suele.en%20un%20movimiento%20arm%C3%B3nico%20simple.>
 15. Onda estacionaria - Wikipedia, la enciclopedia libre, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://es.wikipedia.org/wiki/Onda_estacionaria
 16. 16.6 Ondas estacionarias y resonancia - Física universitaria ..., fecha de acceso: agosto 23, 2025,
<https://openstax.org/books/f%C3%ADsica-universitaria-volumen-1/pages/16-6-ondas-estacionarias-y-resonancia>
 17. 14.6: Ondas estacionarias y resonancia - LibreTexts Español, fecha de acceso:

agosto 23, 2025,

[https://espanol.libretexts.org/Vocacional/Tecnologia_Electronica/Libro%3A_Circuitos_electricos_II_-_Corriente_alterna_\(Kuphaldt\)/14%3A_L%C3%ADneas_de_Transmisi%C3%B3n/14.06%3A_Ondas_estacionarias_y_resonancia](https://espanol.libretexts.org/Vocacional/Tecnologia_Electronica/Libro%3A_Circuitos_electricos_II_-_Corriente_alterna_(Kuphaldt)/14%3A_L%C3%ADneas_de_Transmisi%C3%B3n/14.06%3A_Ondas_estacionarias_y_resonancia)

18. Ondas Estacionarias - HyperPhysics, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Waves/standw.html>
19. Chladni Plate | ICTS, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://www.icts.res.in/lab/CP>
20. Mathematical Exploration of Chladni Patterns - VCU Scholars Compass, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://scholarscompass.vcu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1098&context=jmsce_vamsc
21. Resonance and fundamental frequency - YouTube, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=eeee9UCwREk>
22. scholarscompass.vcu.edu, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://scholarscompass.vcu.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1098&context=jmsce_vamsc#:~:text=Chladni%20Patterns%20are%20formed%20when.driven%20at%20a%20resonant%20frequency.
23. Chladni Plates - Smithsonian, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://americanhistory.si.edu/science/chladni.htm>
24. MOVIMIENTOS VIBRATORIOS. MOVIMIENTO ARMÓNICO SIMPLE., fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://www.uv.es/jmarques/_private/MAS%20y%20ondas.pdf
25. Modelación del fenómeno de vibración forzada formulando una analogía eléctrica con el programa de elementos finitos "Ansys", fecha de acceso: agosto 23, 2025, http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092009000100001
26. Análisis Modal Teórico y Experimental de un Modelo Dinámico - Universidad de Sevilla, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/95210/fichero/TFG-5210+Llamas+Mart%C3%ADnez.pdf>
27. Lista de fórmulas clave de vibraciones y ondas - Superprof, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://www.superprof.es/apuntes/escolar/fisica/vibraciones-ondas/lista-de-formulas-clave-de-vibraciones-y-ondas.html>
28. Burbuja Cimática: La Ciencia Detrás del Sonido - TikTok, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://www.tiktok.com/@deep_frequencies/video/7515513729765723399
29. ¿Alguna vez has visto el sonido? Esta burbuja te lo muestra en 3D - YouTube, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://www.youtube.com/shorts/J8a9ArxytP4>
30. Bubble Cymatics: Visualizing Sound through Soap Films - MissBubblebliss, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://missbubblebliss.at/home/projects/bubble-cymatics/>
31. Acoustic streaming produced by a cylindrical bubble undergoing volume and

- translational oscillations in a microfluidic channel | Phys. Rev. E, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.94.033109>
32. Secondary radiation force between two closely spaced acoustic bubbles | Phys. Rev. E, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.102.031101>
33. Acoustophoretic trapping of particles by bubbles in microfluidics - Frontiers, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/physics/articles/10.3389/fphy.2023.1062433/full>
34. Bubble nucleation and dynamics in acoustic droplet vaporization: a review of concepts, applications, and new directions, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10517405/>
35. Nonlinear bubble dynamics of cavitation | Phys. Rev. E - Physical Review Link Manager, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevE.85.016305>
36. Nonlinear Bubble Dynamics, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://pages.jh.edu/aprospe1/publications/PapersPublished/GasBubbles/ProsperettiCrumCommanderJASA.pdf>
37. Nonlinear bubble dynamics of cavitation - Physical Review Link Manager, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://link.aps.org/pdf/10.1103/PhysRevE.85.016305>
38. A unified theory for bubble dynamics | Physics of Fluids - AIP Publishing, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://pubs.aip.org/aip/pof/article/35/3/033323/2882023/A-unified-theory-for-bubble-dynamics>
39. Faraday Wave Turbulence on a Spherical Liquid Shell - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://www.researchgate.net/publication/13227626_Faraday_Wave_Turbulence_on_a_Spherical_Liquid_Shell
40. Faraday wave singularities trigger microbubble jetting - arXiv, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://arxiv.org/html/2503.20755v1>
41. Faraday Wave Turbulence on a Spherical Liquid Shell - NASA Technical Reports Server (NTRS), fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210001289>
42. (PDF) Condensates on the spherical shell: mixtures and Faraday waves - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://www.researchgate.net/publication/375742760_Condensates_on_the_spherical_shell_mixtures_and_Faraday_waves
43. Bubble Experiments - Cymatic Music, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <http://www.cymaticmusic.co.uk/bubble-experiments.html>
44. Introducción a la reflexión de la luz - Evident Scientific, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://evidentscientific.com/es/microscope-resource/knowledge-hub/lightandcolor/reflectionintro>
45. Las ondas - Proyecto Descartes, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://proyectodescartes.org/EDAD/materiales_didacticos/EDAD_4eso_las_onda

[s-JS/impresos/quincena11.pdf](#)

46. Reflexión y Refracción de la Luz - Fisicalab, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://www.fisicalab.com/apartado/reflexion-refraccion-luz>
47. A psychedelic bubble - Why Evolution Is True, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://whyevolutionistrue.com/2025/06/02/a-psychedelic-bubble/>
48. Comportamiento de la luz explicado con Lazors - Educatina - YouTube, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://www.youtube.com/watch?v=imv0Dj_1v_8
49. Datos sorprendentes sobre la ciencia de las burbujas para niños de todas las edades, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://www.cmosc.org/es/the-science-of-bubbles-for-kids/>
50. Reflexión (física) - Wikipedia, la enciclopedia libre, fecha de acceso: agosto 23, 2025, [https://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_\(f%C3%ADsica\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Reflexi%C3%B3n_(f%C3%ADsica))
51. ((6)) DIFRACCIÓN ((nuevo)) - UTN Rosario, fecha de acceso: agosto 23, 2025, [https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/\(\(6\)\)%20DIFRACCI%C3%93N.pdf](https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/basicas/fisica2/files/((6))%20DIFRACCI%C3%93N.pdf)
52. Dispersión refractiva - Wikipedia, la enciclopedia libre, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://es.wikipedia.org/wiki/Dispersi%C3%B3n_refractiva
53. Acoustic Streaming - ProSys Megasonic, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://prosysmeg.com/acoustic-streaming/>
54. Acoustic Bubbles, Acoustic Streaming, and Cavitation Microstreaming - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://www.researchgate.net/publication/304998236_Acoustic_Bubbles_Acoustic_Streaming_and_Cavitation_Microstreaming
55. [2502.07376] Acoustic microstreaming and shear stress produced by the interaction of an oscillating gas bubble with a viscoelastic particle - arXiv, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://arxiv.org/abs/2502.07376>
56. Trapping microswimmers in acoustic streaming flow - arXiv, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://arxiv.org/html/2504.17378v1>
57. Bubble ring - Wikipedia, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Bubble_ring
58. Vortex ring modelling of toroidal bubbles | Request PDF - ResearchGate, fecha de acceso: agosto 23, 2025, https://www.researchgate.net/publication/225917554_Vortex_ring_modelling_of_toroidal_bubbles
59. Ring Vortex Dynamics Following Jet Formation of a Bubble Expanding and Collapsing Close to a Flat Solid Boundary Visualized via Dye Advection in the Framework of OpenFOAM - MDPI, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://www.mdpi.com/2311-5521/8/7/200>
60. The formation of toroidal bubbles upon the collapse of transient cavities | Journal of Fluid Mechanics | Cambridge Core, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/formation-of-toroidal-bubbles-upon-the-collapse-of-transient-cavities/67BA44CD8C6BEEE1E76D214059635FBB>
61. Construction and Quantification of a Toroidal Bubble Apparatus - DTIC, fecha de acceso: agosto 23, 2025, <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA384658.pdf>

62. Interactions between a toroidal bubble and a free surface | Journal of Fluid Mechanics, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
<https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-fluid-mechanics/article/interactions-between-a-toroidal-bubble-and-a-free-surface/B03C7C87E0357D8969F68233D00CE43E>
63. How to Make Sound Come Alive - Cymatics : 10 Steps - Instructables, fecha de acceso: agosto 23, 2025,
<https://www.instructables.com/How-to-Make-Sound-Come-Alive-Cymatics/>