

ANÁLISIS DE MÉTODOS DE REGULARIZACIÓN EN EL MÉTODO DE HOLOGRAFÍA  
ACÚSTICA DE CAMPO CERCANO

Thomas Martinod

[tmartinods@eafit.edu.co](mailto:tmartinods@eafit.edu.co)

Proyecto Avanzado I

Tutor:

Nicolás Guarín Zapata

[nguarinz@eafit.edu.co](mailto:nguarinz@eafit.edu.co)

Pregrado en Ingeniería Física  
Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería  
Universidad EAFIT  
Medellín – Colombia  
2024 – 1

## TABLA DE CONTENIDOS

1.	INTRODUCCIÓN .....	3
2.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	3
3.	JUSTIFICACIÓN .....	4
4.	OBJETIVOS.....	4
4.1.	OBJETIVO GENERAL .....	4
4.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
5.	ANTECEDENTES .....	5
6.	ALCANCE .....	5
7.	METODOLOGÍA .....	6
8.	CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES.....	7
9.	PRESUPUESTO .....	7
10.	PROPIEDAD INTELECTUAL .....	7
11.	REFERENCIAS.....	8

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente documento corresponde al anteproyecto del proyecto de materia de la asignatura Proyecto Avanzado I dictado en el pregrado en Ingeniería Física de la Universidad EAFIT. En este, se aborda el análisis de distintos métodos de Regularización en el contexto del método de la Holografía Acústica de Campo Cercano.

## 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El proceso de determinar las causas de un conjunto de observaciones se conoce como problema inverso [1]. Un ejemplo clave de un problema inverso es la holografía acústica de campo cercano, originado en la física acústica.

La holografía acústica de campo cercano (NAH<sup>1</sup>, por sus siglas en inglés) es un método mediante el cual un conjunto de mediciones de presión acústica en puntos ubicados en una superficie específica (llamada holograma) se puede utilizar para crear imágenes de fuentes acústicas en el espacio tridimensional. Los datos del NAH se procesan para aprovechar el campo de ondas evanescentes y así poder generar imágenes de fuentes que están separadas por menos de un octavo de la longitud de onda acústica [2].

Por otro lado, la regularización es un proceso que permite convertir un problema mal planteado en uno bien planteado en el sentido de Hadamard. En el contexto de NAH, la regularización busca mejorar la calidad de las imágenes suprimiendo el ruido de fondo sin perder información relevante [3]. Existen diversas técnicas de regularización, incluyendo la regularización de Tikhonov [4], enfoques basados en aprendizaje de máquina [5] y la regularización mediante *sparsity*<sup>2</sup>, que consiste en descomponer la señal de campo acústico como una combinación lineal de funciones en un diccionario [6].

El proyecto se enfocará en implementar el método de NAH utilizando mediciones previas de campo acústico. Se implementarán y compararán cuatro métodos de regularización: Tikhonov, aprendizaje de máquina, *sparsity* y una nueva regularización a proponer basada en funciones de Green. Entonces, la pregunta que se buscará resolver mediante argumentos teóricos, estadísticos y computacionales, es ¿cuál de los cuatro métodos de regularización enunciados es el mejor a la hora de implementar el NAH planar?

---

<sup>1</sup> Near-field Acoustic Holography.

<sup>2</sup> Se usa el anglicismo *sparsity* al no existir una traducción ampliamente aceptada del término. Alternativas son dispersión y esparcidad.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La regularización es una técnica crucial en diversas disciplinas científicas, como el aprendizaje automático, procesamiento óptico y redes neuronales. Este proyecto dará continuidad a trabajos existentes en estas ramas, mediante la postulación y el desarrollo general de estos algoritmos. Además, a nivel local y nacional, la investigación en este ámbito es bastante reducida, por lo que el proyecto sería un precursor académico local.

En el contexto del NAH, resulta aún más vital el uso de la regularización. El NAH es utilizado por empresas como *Sorama*<sup>3</sup> en el contexto industrial para desarrollar cámaras acústicas, empleadas en la detección de fugas en oleoductos y gasoductos, y en la medición de la emisión acústica de vehículos y dispositivos electrónicos. En el ámbito médico, aunque se utilizan métodos distintos al NAH, la regularización sigue siendo vital en técnicas de imagen como la tomografía computarizada y las resonancias magnéticas.

Los problemas inversos son fundamentales en ciencia y requieren un sólido conocimiento físico y matemático. La implementación del NAH implica entender conceptos de física de ondas y acústica, como el dominio de la frecuencia espacial y las convoluciones. La regularización consiste en resolver problemas de optimización no lineales. La implementación y los análisis de resultados son los mecanismos que validan los métodos de la ingeniería. Luego, el proyecto destaca la importancia del ingeniero físico, que busca integrar conocimientos de física y matemáticas para problemas de ingeniería y tecnología.

### 4. OBJETIVOS

#### 4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar distintos métodos de regularización en el contexto de la holografía acústica de campo cercano de geometría planar.

#### 4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Modelar matemáticamente el problema inverso del NAH, comprendiendo los elementos del análisis de Fourier, acústica y las condiciones de frontera del problema.
- Implementar el NAH para un arreglo de sensores plano.
- Regularizar las imágenes de campo de presión acústica usando los métodos de Tikhonov, aprendizaje de máquina, *sparsity* y funciones de Green.

---

<sup>3</sup> <https://sorama.eu/>

- Probar la implementación de NAH con una fuente de campo acústico conocido y comparar las imágenes resultantes para las diferentes estrategias de regularización.

## 5. ANTECEDENTES

La holografía acústica (AH), precursora del NAH, surgió en los años 1960 [7]. A diferencia de la AH, el NAH ofrece una solución rigurosa al problema inverso, brindando una resolución casi ilimitada en la reconstrucción del campo acústico. Además, el NAH no solo reconstruye el campo de presión acústica, sino también las componentes de la velocidad del fluido y el vector de intensidad acústica [8]. Con respecto a la regularización, esta se lleva a cabo en el espacio del número de onda desde la concepción del método [9].

Los primeros trabajos en el ámbito estudiaban el problema planar usando arreglos cuadriculados de micrófonos ubicados cerca de la fuente y con pocas distancias entre los micrófonos<sup>4</sup> [10], [11]. Con la llegada del mundo digital, surgieron las primeras técnicas de regularización, como la regularización de Tikhonov [4].

Los avances modernos incluyen mejoras en las técnicas de regularización, utilizando distintas métricas [3], la descomposición en diccionarios [6], métodos de aprendizaje extremo [5], y matemáticas robustas para operadores lineales no acotados [12]. Además, existen otros avances en el NAH, incluyendo procesos estocásticos en el análisis de las condiciones de frontera en coordenadas prolatas [13], y el uso del dominio del tiempo [14].

No obstante, el proyecto tiene como antecedentes claros el texto clásico de acústica de Fourier de Williams [8], que exhibe gran parte del desarrollo matemático del problema inverso y el artículo de Chardon, Daudet, y coautores [6], que compara las imágenes obtenidas mediante la regularización de Tikhonov y *sparsity* en el caso de una guitarra.

## 6. ALCANCE

El alcance del proyecto es analítico y computacional. Para ello, se usará las base de datos de una guitarra en condiciones controladas, datos expuestos y descritos por Chardon, Daudet, y coautores en el artículo [6].

El NAH es un método muy general, con solución exacta en algunas geometrías, predominando la esférica la cilíndrica y la planar. En este proyecto, se hará referencia solo

---

<sup>4</sup> Con el fin de respetar el criterio de Nyquist en ondas periódicas.

al caso planar, cuya aplicación es mucho más usual. Por último, se usarán métodos numéricos para resolver integrales y no se considerarán análisis de convergencia en los métodos numéricos ni análisis de robustez en los estadísticos que permitan la comparación de los cuatro métodos. Se enunciarán matemáticamente los métodos de regularización empleados para fácil replicación en otros contextos.

## 7. METODOLOGÍA

El proyecto se realizará en un periodo de 18 semanas, dictaminado por el semestre académico. Se propone desarrollar el proyecto en los pasos metodológicos que se describen a continuación.

**Revisión y apropiación matemática:** Se realizará una revisión de literatura en el contexto del NAH y sus métodos de regularización y se estudiarán las herramientas matemáticas que requieren estos métodos (análisis de Fourier, ecuación de ondas, DFT, FFT, IFFT<sup>5</sup>, entre otros).

**Implementación del NAH:** Se implementará el método NAH planar en software libre, empleado frameworks como Scipy, Numpy y Sympy, usando la base de datos mencionada en el alcance.

**Regularización y análisis:** Se implementarán la regularización clásica de Tikhonov, la regularización por *sparsity*, la regularización mediante aprendizaje de máquina, y la regularización mediante funciones de Green, deduciendo el desarrollo matemático de esta última. Se generarán además las imágenes de cada método y se compararán estadísticamente.

**Documentación:** A lo largo del proyecto se documentarán los aspectos más importantes. Esto implica documentación del software, así como informes de avance parciales y el artículo final. Esta documentación será abierta y se ubicará en un repositorio en Github<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> Discrete Fourier Transform, Fast Fourier Transform, Inverse Fast Fourier Transform

<sup>6</sup> <https://github.com/thomas-martinod/proyecto-avanzado-1>

## 8. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

En sintonía con la metodología propuesta, se establece un cronograma de actualidades que debe ser un mecanismo constante de verificación durante la realización del proyecto. En la tabla a continuación se enseña el cronograma de actividades:

Actividad	Estado	Semana																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
<b>Revisión y apropiación matemática</b>	<b>80%</b>																		
Revisión de bibliografía del NAH y regularización.	70%																		
Estudio de la acústica	100%																		
Estudio del análisis de Fourier y modelación inversa	80%																		
<b>Implementación del NAH</b>	<b>25%</b>																		
Acceso a la base de datos	100%																		
Implementación del NAH en Python	0%																		
<b>Regularización</b>	<b>5%</b>																		
Implementación de la regularización de Tikhonov	0%																		
Implementación de la regularización por <i>sparcity</i>	0%																		
Implementación de la regularización por ML	0%																		
Deducción de la regularización por funciones de Green	15%																		
Implementación de la regularización por funciones de Green	0%																		
Generación de Imágenes	0%																		
Análisis de resultados y comparativa	0%																		
<b>Documentación</b>	<b>15%</b>																		
Entregas intermedias	0%																		
Redacción informe final	0%																		
Documentación en Github	0%																		

Tabla 1. Cronograma del proyecto.

## 9. PRESUPUESTO

En la tabla a continuación, se exhibe el presupuesto concebido para el proyecto descrito. Estos son costos estimados y no desembolsables cubiertos por la matrícula y el alumno.

Item	Costo Unitario	Cantidad	Costo Total
Hora del tutor	\$ 259,804.14	18	\$ 4,676,474.57
Hora del alumno	\$ 56,401.52	216	\$ 12,182,728.66
Computador	\$ 8,000,000.00	1	\$ 8,000,000.00
Suscripción revistas científicas	\$ 1,500,000.00	2	\$ 3,000,000.00
<b>Total:</b>			<b>\$ 24,859,203.24</b>

Tabla 2. Presupuesto del proyecto

## 10. PROPIEDAD INTELECTUAL

El anteproyecto, los informes de avance, el artículo final, los códigos, la documentación de estos y cualquier otro producto que pueda surgir de este proyecto se publicarán de acuerdo con los lineamientos de ciencia abierta<sup>7</sup> [17] a nombre de Martinod y Guarín.

<sup>7</sup> Las políticas nacionales de apropiación del conocimiento y ciencia abierta se encuentran en [15], [16].

## 11. REFERENCIAS

- [1] A. Tarantola, *Inverse Problem Theory and Methods for Model Parameter Estimation*. Society for Industrial and Applied Mathematics, 2005. doi: 10.1137/1.9780898717921.
- [2] S. I. Hayek, «Nearfield Acoustical Holography», en *Handbook of Signal Processing in Acoustics*, D. Havelock, S. Kuwano, y M. Vorländer, Eds., New York, NY: Springer New York, 2008, pp. 1129-1139. doi: 10.1007/978-0-387-30441-0\_59.
- [3] J. Ni, Q. Zhang, L. Su, J. Liang, y W. Huo, «L1/2 Regularization Sar Imaging Via Complex Image Data: Regularization Parameter Selection for Target Detection Task», en *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia: IEEE, jul. 2018, pp. 2298-2301. doi: 10.1109/IGARSS.2018.8519138.
- [4] A. N. Tikhonov y V. I. Arsenin, *Solutions of ill-posed problems*. en Scripta series in mathematics. Washington : New York: Winston ; distributed solely by Halsted Press, 1977.
- [5] Q. Wu, T. Ma, y F. Wang, «Modified Lanczos Algorithm for L2,1 norm Regularization Extreme Learning Machine», en *2021 International Conference on Control, Automation and Information Sciences (ICCAIS)*, Xi'an, China: IEEE, oct. 2021, pp. 679-684. doi: 10.1109/ICCAIS52680.2021.9624517.
- [6] G. Chardon, L. Daudet, A. Peillot, F. Ollivier, N. Bertin, y R. Gribonval, «Near-field acoustic holography using sparse regularization and compressive sampling principles», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 132, n.º 3, pp. 1521-1534, sep. 2012, doi: 10.1121/1.4740476.
- [7] B. P. Hildebrand y B. B. Brenden, *An introduction to acoustical holography*. en A Plenum/Rosetta edition. New York: Plenum Publ. Co, 1974.
- [8] E. G. Williams, *Fourier acoustics: sound radiation and nearfield acoustical holography*. San Diego, Calif: Academic Press, 1999.
- [9] J. D. Maynard, E. G. Williams, y Y. Lee, «Nearfield acoustic holography: I. Theory of generalized holography and the development of NAH», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 78, n.º 4, pp. 1395-1413, oct. 1985, doi: 10.1121/1.392911.
- [10] D. L. Van Rooy, «DIGITAL ULTRASONIC WAVEFRONT RECONSTRUCTION IN THE NEAR FIELD», Texto, Rice University, 1971. Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repository.rice.edu/items/dbeb39f7-30af-4df1-8ffb-67c148615054>



- [11] E. G. Williams, J. D. Maynard, y E. Skudrzyk, «Sound source reconstructions using a microphone array», *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 68, n.º 1, pp. 340-344, jul. 1980, doi: 10.1121/1.384602.
- [12] N. V. Kinh, «On the Regularization Method for Solving Ill-Posed Problems with Unbounded Operators», *Open J. Optim.*, vol. 11, n.º 02, pp. 7-14, 2022, doi: 10.4236/ojop.2022.112002.
- [13] X. Zhang, J. Lou, J. Lu, R. Li, y S. Zhu, «Statistically Optimized Near-Field Acoustic Holography Using Prolate Spheroidal Wave Functions», *Shock Vib.*, vol. 2023, pp. 1-20, ago. 2023, doi: 10.1155/2023/9954054.
- [14] N. P. Valdivia, «Krylov Subspace iterative methods for time domain boundary element method based nearfield acoustical holography», *J. Sound Vib.*, vol. 484, p. 115498, oct. 2020, doi: 10.1016/j.jsv.2020.115498.
- [15] MINISTERIO DE CIENCIA TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN – MINCIENCIAS, «Política Nacional de Ciencia Abierta». 27 de mayo de 2022. Accedido: 15 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://minciencias.gov.co/sites/default/files/ckeditor\\_files/Documento%20consulta%20p%C3%BAblica%20-%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de%20Ciencia%20Abierta.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/ckeditor_files/Documento%20consulta%20p%C3%BAblica%20-%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de%20Ciencia%20Abierta.pdf)
- [16] MINISTERIO DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN, «Política Pública de Apropiación Social del Conocimiento en el marco de la CTel». marzo de 2021. Accedido: 15 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: [https://minciencias.gov.co/sites/default/files/politica\\_publica\\_de\\_apropiacion\\_social\\_de\\_l\\_conocimiento.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/politica_publica_de_apropiacion_social_de_l_conocimiento.pdf)
- [17] C. S. Marcum y R. Donohue, «Breakthroughs for All: Delivering Equitable Access to America's Research», OSTP blog. Accedido: 15 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2022/08/25/breakthroughs-for-alldelivering-equitable-access-to-americas-research/>