

POSGRADOS

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA CON MENCIÓN EN MODELAMIENTO DE MATERIALES Y PROCESOS DE PRODUCCIÓN

RPC-SO-24-NO.540-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON
COMPONENTES DE INVESTIGACIÓN
APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

ESTUDIO DE PROPIEDADES FÍSICAS Y
MECÁNICAS DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS
Y/O CERÁMICOS, NANO-ESTRUCTURADOS
MEDIANTE SOFTWARE ESPECIALIZADO PARA
COMPONENTES DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA
SOMETIDOS A VIBRACIONES MECÁNICAS

AUTOR:

JORGE ALFREDO VILLAMARÍN PINO

DIRECTOR:

LUIS EDUARDO GARZÓN MUÑOZ

CUENCA – ECUADOR
2025

Autor:**Jorge Alfredo Villamarín Pino**

Ingeniero Industrial.

Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en Modelamiento De Materiales Y Procesos De Producción por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

jvillamarin@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**Luis Eduardo Garzón Muñoz**

Físico.

Magister Universitario en Biofísica.

Doctor en Ciencia de Materiales.

lgarzon@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2025 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

JORGE ALFREDO VILLAMARÍN PINO

Estudio de propiedades físicas y mecánicas de materiales piezoeléctricos y/o cerámicos, nano-estructurados mediante software especializado para componentes de recolección de energía sometidos a vibraciones mecánicas

DEDICATORIA

Este trabajo de maestría se lo dedico con entera devoción y amor a:

Mi amada esposa Evelyn, quién desde un principio alentaba, día a día, mi proceso de aprendizaje y desarrollo de mi estudio. Incansablemente entrego mañanas y noches su compañía, sin duda su amor fortaleció este proyecto y trabajo final.

A mis hijos Emma y Santiago, quienes desde su inocencia compartían momentos de estudio conmigo; sin duda esas sonrisas y dinamismo alentaba mi proceso y mi anhelo a culminar este proyecto.

A la comunidad científica e investigadora, para que pueda ser una fuente más de información relevante y verdadera para futuros proyectos.

AGRADECIMIENTO

Por este trabajo de maestría agradezco a:

Dios y a la Virgen Auxiliadora, ellos me han demostrado que en este proceso jamás estuve desamparado espiritualmente, siempre en cada amanecer recibía un rayo de luz quien me decía *“Hijo, hoy es un nuevo día para ti”*.

Además, agradezco a cada docente que, durante el tiempo de estudio compartió su conocimiento y experiencia, pero un agradecimiento especial al Doctor Luis Garzón, quien, con suma paciencia y acompañamiento, compartió experiencia, profesionalismo y una gran calidad humana.

También, agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana Ecuador, por ser esa fuente de conocimiento y de vida estudiantil desde un pregrado hasta ahora poder obtener un título de posgrado. Finalmente al Grupo de Investigación de Física de la sede Cuenca por su colaboración en la temática y acompañamiento en el desarrollo de la misma.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen	13
Abstract	15
1. Introducción	17
2. Determinación del Problema.....	20
3. Marco teórico referencial.....	22
3.1 Fundamentos de la piezoelectricidad	23
3.1.1 Requisitos estructurales de los materiales piezoeléctricos	23
3.1.2 Ecuaciones constitutivas.....	24
3.1.3 Coeficiente de acoplamiento piezoeléctrico d_{ij}	26
3.2 Propiedades mecánicas de materiales cerámicos piezoeléctricos	28
3.2.1 Propiedades eléctricas, mecánicas y físicas de los materiales piezoeléctricos.....	30
3.2.2 Materiales piezoeléctricos y cerámicos nanoestructurados.....	32
3.3 Recolección de energía mediante vibraciones.....	36
3.3.1 Fundamentos de recolección de energía por vibraciones.	37
3.3.2 Modelado de sistemas vibratorios.	38
3.3.3 Frecuencia de resonancia y ancho de banda.	39
4. Materiales y metodología.....	42
4.1 Descripción General.	42
4.2 Materiales Utilizados	43
4.3. Geometría.....	45
4.4 Mallado	47
4.5 Condiciones de frontera y carga.....	48
4.5.1 Análisis Modal.....	49
4.5.2 Análisis Coupled Field Harmonic.	51
4.5.3 Análisis Coupled Field Harmonic- Short	53
4.6 Configuración de parámetros ANSYS	55
4.6.1 Configuración Análisis Modal	56
4.6.2 Análisis Acoplado Armónico (Coupled Field Harmonic).....	59
4.6.3 Análisis acoplado armónico en cortocircuito (Coupled Field Harmonic-Short) 62	

4.7	Procedimiento Metodológico.....	64
5.	Resultados y discusión.....	65
5.1	Resultados Análisis Modal.....	66
5.1.1	Interpretación de resultados.....	74
5.1.2	Correlación con estudios previos.	75
5.2.	Resultados de Análisis Coupled Field Harmonic – (open circuit).....	75
5.2.1	Interpretación de resultados.....	79
5.2.2	Correlación con estudios previos.	81
5.3	Resultados de Análisis Coupled Field Harmonic – short.....	82
5.3.1	Interpretación de resultados.....	86
5.3.2	Correlación con estudios previos.	87
5.4	Discusión.....	89
5.4.1	Relación entre Rigidez – Densidad – Frecuencia Modal.....	89
5.4.2	Comparación entre Coupled Field Harmonic – Open Circuit y Coupled Field Harmonic – Short.....	89
5.4.3	Acoplamiento eléctrico-mecánico y eficiencia energética.....	90
5.4.4	Implicaciones para el diseño de recolectores de energía piezoeléctricos....	91
6.	Conclusiones.....	92
6.1	Sobre el Análisis Modal.	92
6.2	Sobre el Análisis Coupled Field Harmonic (open circuit).	92
6.3	Sobre el Análisis Coupled Field Harmonic – Short.	93
6.4	Sobre el Acoplamiento Eléctrico-Mecánico.	93
6.5	Sobre la Metodología.	94
6.6	Sobre el Estudio Final.	94
	Referencias.....	97

TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Espectros Raman de cerámicas (e) KNN-BAH-1080 y (f) KNN-BAH-1120 [45]. 36

Figura 2 muestra un esquemática del mecanismo de sintonización automática por resonancia (ART) para la captación de energía de vibración. (a) Ilustración del captador de energía de viga de doble sujeción con la masa de prueba fija. (b) formas del modo de vibración en función del orden modal (del 1.^o al 4.^o) en simulación FEM. (c) Frecuencia natural de la estructura de la viga de doble sujeción, simulación FEM y experimento [55]...... 40

Figura 3 muestra las diferentes formas de los modos de vibración y sus frecuencias naturales mecánicas del actual modelo de placa (SSFF) de ANSYS utilizados para la comparación de resultados [52]...... 41

Figura 4 Geometría utilizada con dimensiones de 40mm x 10mm x 1mm. Modelado en SpaceClaim de ANSYS 2025R2 46

Figura 5 Ubicación del Eje Z como polarización CS_Poling_Z 46

Figura 6 En la figura se observa el número de divisiones y la distribución uniforme en sentido del Eje Z - espesor del Cantiléver 47

Figura 7 Se muestra la ubicación del Fixed Support en la placa tipo Cantiléver en una posición de X=0..... 49

Figura 8 Se observa las frecuencias naturales identificadas en la simulación con el BaTiO3 está en el rango de 463.2 Hz hasta los 8082 Hz. Se identifica la masa con mayor efecto en el eje de polarización de 0.139e-2 50

Figura 9 Se observa las frecuencias naturales identificadas en la simulación con el AlN está en el rango de 1018 Hz hasta los 9664 Hz. Se identifica la masa con mayor efecto en el eje de polarización de 0.796e-3..... 50

Figura 10 Se observa las frecuencias naturales identificadas en la simulación con el KNN está en el rango de 532.3 Hz hasta los 9290 Hz. Se identifica la masa con mayor efecto en el eje de polarización de 0.109e-2 50

Figura 11 Se observa las frecuencias naturales identificadas en la simulación con el ZnO está en el rango de 494.3 Hz hasta los 8624 Hz. Se identifica la masa con mayor efecto en el eje de polarización de 0.136e-2..... 51

Figura 12 **Fixed Support**. Se observa el punto de anclaje de la placa para los análisis Couple Field Harmonic. Ubicada en X=0 52

Figura 13 **Acceleration**. En esta figura se puede observar cómo es aplicada la excitación equivalente a 1g sobre la cara Face_Z_Plus 53

Figura 14 **Voltage Ground**. Se observa que en la cara inferior de la placa Face_Z_Minus, se tiene el potencial de referencia igual a 0 voltios 53

Figura 15 Línea de comando para refinar y automatizar los valores de desplazamiento dieléctrico Dz y el voltaje en circuito abierto Voc 53

Figura 16 Se puede visualizar las condiciones de frontera establecidas en este análisis. A: Voltaje en la cara Face_Z_minus (cara posterior). B: Excitación aplicando 1 g (cara frontal). C: Anclaje X=0. D: Voltaje inducido en la cara superior 54

Figura 17 Proceso de análisis realizado con cada uno de los materiales..... 55

Figura 18 Flujo de trabajo realizado en el análisis de los materiales y sus resultados obtenidos..... 64

Figura 19 Deformación del BaTiO ₃ en sus principales frecuencias naturales reconocidas. Frecuencia de mayor masa efectiva f ₁ : 463.18Hz.	70
Figura 20 Deformación del AlN en sus principales frecuencias naturales reconocidas. Frecuencia de mayor masa efectiva f ₁ : 1018Hz.....	71
Figura 21 Deformación del KNN en sus principales frecuencias naturales reconocidas. Frecuencia de mayor masa efectiva f ₁ : 532,29Hz.....	72
Figura 22 Deformación del ZnO en sus principales frecuencias naturales reconocidas. Frecuencia de mayor masa efectiva f ₁ : 494,34Hz.....	73
Figura 23 Se observa el material BaTiO ₃ . En la figura a. la deformación en estado Armónico Acoplado. En la figura b. el Voc evaluado en la frecuencia de mayor eficiencia de masa 463,18 Hz.	77
Figura 24 Se observa el material AlN. En la figura a. la deformación en estado Armónico Acoplado. En la figura b. el Voc evaluado en la frecuencia de mayor eficiencia de masa 1018 Hz	78
Figura 25 Se observa el material KNN. En la figura a. la deformación en estado Armónico Acoplado. En la figura b. el Voc evaluado en la frecuencia de mayor eficiencia de masa 532,29 Hz	78
Figura 26 Se observa el material ZnO. En la figura a. la deformación en estado Armónico Acoplado. En la figura b. el Voc evaluado en la frecuencia de mayor eficiencia de masa 494,34 Hz	79
Figura 27 Se observa el material BaTiO ₃ en la figura a. la deformación en estado armónico en corto circuito. En la figura b. la densidad de flujo eléctrico. La frecuencia natural es de 468,13 Hz.	84
Figura 28 Se observa el material AlN en la figura a. la deformación en estado armónico en corto circuito. En la figura b. la densidad de flujo eléctrico. La frecuencia natural es de 1018 Hz.	84
Figura 29 Se observa el material KNN en la figura a. la deformación en estado armónico en corto circuito. En la figura b. la densidad de flujo eléctrico. La frecuencia natural es de 532,29 Hz.	85
Figura 30 Se observa el material ZnO en la figura a. la deformación en estado armónico en corto circuito. En la figura b. la densidad de flujo eléctrico. La frecuencia natural es de 494,34 Hz.	85

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades mecánicas representativas del PZT. Fuente. adaptada	29
Tabla 2 Relación de propiedades eléctricas, mecánicas y físicas de materiales piezoeléctricos. Fuente: adaptada	32
Tabla 3 Valores d33 para estructuras ZnO dopadas.[42]	34
Tabla 4 Propiedades del Titanato de Bario considerando una temperatura de 25C.....	43
Tabla 5 Propiedades del Nitruro de Aluminio considerando una temperatura de 25C.	44
Tabla 6 Propiedades del Niobato de Sodio y Potasio considerando una temperatura de 25C.	44
Tabla 7 Propiedades del Óxido de Zinc considerando una temperatura de 25C.....	45
Tabla 8 Estos valores generaron un tipo de malla Hexa/prismático con un método Sweep garantizando una malla precisa y ordenada. Al ser luna malla de primer orden tendremos en cada arista solo dos nodos en los vértices.....	48
Tabla 9 Se observan los 5 valores de frecuencias naturales identificadas en el análisis Modal. Simulación FEM, realizado en ANSYS Workbench 2025 R2.	67
Tabla 10 Se puede observar la relación de frecuencias, Voltaje y deformación entre los distintos materiales piezoeléctricos analizados.	76
Tabla 11 Valores obtenidos en la simulación FEM en ANSYS Workbench 2025 R2.....	83

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Gráfica comparativa entre materiales y sus frecuencias naturales identificadas	68
Gráfica 2 Cantidad de masa efectiva con carga orientada a +Z. Datos obtenidos en simulación Modal - BaTiO3 - ANSYS Workbench 2025 R2	68
Gráfica 3 Cantidad de masa efectiva con carga orientada a +Z. Datos obtenidos en simulación Modal - AlN - ANSYS Workbench 2025 R2	69
Gráfica 4 Cantidad de masa efectiva con carga orientada a +Z. Datos obtenidos en simulación Modal - KNN - ANSYS Workbench 2025 R2.....	69
Gráfica 5 Cantidad de masa efectiva con carga orientada a +Z. Datos obtenidos en simulación Modal - ZnO - ANSYS Workbench 2025 R2	69
Gráfica 6 En esta gráfica se observa la relación de a menor frecuencia natural menor módulo, pero una mayor densidad.	74
Gráfica 7 Se muestra la cantidad de potencia producida por cada material en su frecuencia de mayor eficiencia de masa.	76
Gráfica 8 Deformación del cantiléver de cada material en su frecuencia natural de mayor eficiencia de masa	77
Gráfica 10 Valores obtenidos del Voltaje en el análisis CFH-S - ANSYS Workbench 2025 R2	83
Gráfica 9 Valores obtenidos de flujo eléctrico máximo en el análisis CFH-S - ANSYS Workbench 2025 R2	83
Gráfica 11 Se observa una relación indirecta entre el módulo de rigidez y el flujo eléctrico máximo observado en sus frecuencias naturales de mayor eficiencia de masa. Valores de ANSYS Workbench 2025 R2.....	83

ESTUDIO DE PROPIEDADES
FÍSICAS Y MECÁNICAS DE
MATERIALES
PIEZOELÉCTRICOS Y/O
CERÁMICOS,
NANOESTRUCTURADOS
MEDIANTE SOFTWARE
ESPECIALIZADO PARA
COMPONENTES DE
RECOLECCIÓN DE ENERGÍA
SOMETIDOS A VIBRACIONES
MECÁNICAS.

AUTOR(ES):

JORGE ALFREDO VILLAMARÍN PINO

RESUMEN

Este trabajo presenta un estudio completo del comportamiento dinámico y electromecánico de materiales piezoeléctricos aplicados a la recolección de energía a partir de vibraciones mecánicas. Se analizaron cuatro materiales ampliamente utilizados en dispositivos piezoeléctricos: **BaTiO₃**, **KNN**, **ZnO** y **AlN**, empleando simulaciones por elementos finitos (FEM) en ANSYS Workbench 2025 R2 para caracterizar su respuesta estructural y acoplada bajo excitación armónica. La metodología se basó en tres etapas: **análisis modal**, **análisis acoplado armónico en circuito abierto** y **análisis acoplado armónico en cortocircuito (CFH-Short)**. El análisis modal permitió determinar las frecuencias naturales asociadas a cada material, evidenciando una relación directa con la rigidez específica y la densidad. Los análisis acoplados permitieron evaluar dos parámetros fundamentales para la conversión energética: el **voltaje inducido [Voc]** y la **densidad de flujo eléctrico [Dmax]**, de acuerdo con el estado eléctrico del sistema.

Los resultados mostraron que el **BaTiO₃** alcanzó el mejor desempeño integral en la transferencia de carga bajo condiciones de cortocircuito, atribuible a su elevado coeficiente piezoeléctrico. Por su parte, el **ZnO** registró el mayor voltaje en circuito abierto, mientras que el **KNN** presentó un comportamiento intermedio competitivo. El **AlN**, aunque demostró alta estabilidad mecánica y una frecuencia modal elevada, presentó la respuesta eléctrica más baja debido a su limitado acoplamiento piezoeléctrico.

La comparación con estudios previos confirma la consistencia de los resultados y valida el uso de la metodología FEM para caracterizar materiales piezoeléctricos sometidos a vibraciones. Finalmente, los resultados permiten establecer criterios para la selección de materiales según la aplicación y constituyen una base sólida para el diseño y optimización de dispositivos recolectores de energía piezoeléctrica.

Palabras clave:

Piezoelectricidad, recolección de energía, análisis modal, análisis acoplado, BaTiO₃, AlN, KNN, ZnO, elementos finitos, ANSYS

ABSTRACT

This paper presents a comprehensive study of the dynamic and electromechanical behavior of piezoelectric materials applied to energy harvesting from mechanical vibrations. Four materials widely used in piezoelectric devices were analyzed: BaTiO₃, KNN, ZnO, and AlN, using finite element simulations (FEM) in ANSYS Workbench 2025 R2 to characterize their structural and coupled response under harmonic excitation. The methodology was based on three stages: modal analysis, open-circuit harmonic coupled analysis, and short-circuit harmonic coupled analysis (CFH-Short). The modal analysis allowed the natural frequencies associated with each material to be determined, showing a direct relationship with specific stiffness and density. The coupled analyses made it possible to evaluate two fundamental parameters for energy conversion: the induced voltage [Voc] and the electric flux density [Dmax], according to the electrical state of the system.

The results showed that BaTiO₃ achieved the best overall performance in charge transfer under short-circuit conditions, attributable to its high piezoelectric coefficient. ZnO recorded the highest open-circuit voltage, while KNN showed competitive intermediate performance. AlN, although demonstrating high mechanical stability and a high modal frequency, had the lowest electrical response due to its limited piezoelectric coupling.

Comparison with previous studies confirms the consistency of the results and validates the use of the FEM methodology to characterize piezoelectric materials subjected to vibrations. Finally, the results allow criteria to be established for the selection of materials according to the application and constitute a solid basis for the design and optimization of piezoelectric energy harvesting devices.

Palabras clave:

Piezoelectricity, energy harvesting, modal analysis, coupled analysis, BaTiO₃, AlN, KNN, ZnO, finite elements, ANSYS

1. INTRODUCCIÓN

Los materiales piezoeléctricos se han estudiado durante casi un siglo. Inicialmente empleados en la tecnología de sonares, ahora tienen una amplia gama de aplicaciones, como la captación de energía, la detección y la actuación, y se han integrado en nuestra vida cotidiana. Sus propiedades se están mejorando para optimizar su rendimiento y permitir su uso en nuevas aplicaciones. Esta revisión ofrece una visión general de los materiales piezoeléctricos y una perspectiva de la ciencia de materiales y la fabricación sobre el progreso hacia el desarrollo de captadores de energía piezoeléctricos y sensores prácticos [1]. La creciente demanda de fuentes de energía sostenibles ha impulsado la investigación en tecnologías de recolección de energía, especialmente aquellas que convierten vibraciones mecánicas en electricidad utilizable. Los materiales piezoeléctricos han demostrado ser particularmente prometedores en este ámbito debido a su capacidad intrínseca para transformar energía mecánica en eléctrica.

Tradicionalmente, las cerámicas basadas en titanato de plomo y zirconio (PZT) han sido ampliamente utilizadas en aplicaciones de recolección de energía debido a su alta constante piezoeléctrica y estabilidad térmica. Sin embargo, la presencia de plomo en estos materiales plantea preocupaciones ambientales y de salud, lo que ha motivado la búsqueda de alternativas libres de plomo. En este contexto, materiales como el niobato de potasio y sodio (KNN) y el titanato de bismuto ($\text{Bi}_4\text{T}_3\text{O}_{12}$) han emergido como candidatos potenciales, mostrando propiedades piezoeléctricas comparables a las de PZT [2].

La nano estructuración de estos materiales ha demostrado mejorar significativamente sus propiedades piezoeléctricas y mecánicas. Por ejemplo, la incorporación de nano fibras de niobato de potasio (KNbO_3) en matrices poliméricas ha resultado en generadores piezoeléctricos flexibles con altos voltajes de salida. Además, la texturización de cerámicas de $(\text{K},\text{Na})\text{NbO}_3$ ha permitido alcanzar

densidades de potencia de salida comparables a las de los recolectores de energía basados en PZT [3].

La caracterización de estos materiales bajo condiciones de vibración mecánica es esencial para evaluar su rendimiento en aplicaciones de recolección de energía [4]. Parámetros como la constante piezoeléctrica (d_{33}), el factor de acoplamiento electromecánico (k_p) y la temperatura de Curie (T_C) son críticos para determinar la eficiencia y estabilidad del material. Estudios recientes han demostrado que la optimización de estos parámetros, a través de técnicas como la texturización y la dopaje, puede mejorar significativamente el rendimiento de los dispositivos de recolección de energía [5].

La aplicación de software especializado para la modelación y simulación de las propiedades físicas y mecánicas de materiales avanzados constituye una herramienta indispensable en la predicción de su comportamiento frente a distintas condiciones de carga y frecuencia. En este contexto, los métodos numéricos, como el análisis por elementos finitos, permiten evaluar con precisión la distribución de esfuerzos y deformaciones en estructuras de alta complejidad, optimizando así el diseño de dispositivos destinados a la recolección eficiente de energía.

Además, la integración de materiales piezoeléctricos nanoestructurados en sistemas de recolección de energía sometidos a vibraciones mecánicas presenta desafíos relacionados con la durabilidad y la fatiga del material. Estudios han demostrado que la fatiga inducida por cargas cíclicas puede afectar significativamente el rendimiento de los dispositivos piezoeléctricos, lo que subraya la importancia de una caracterización mecánica detallada y de estrategias de diseño que mitiguen estos efectos [6].

En conclusión, la investigación orientada al desarrollo de materiales piezoeléctricos y cerámicos nanoestructurados para aplicaciones en recolección de energía constituye un área de estudio en constante crecimiento, caracterizada por la convergencia de avances en ciencia de materiales, modelado computacional y diseño funcional de dispositivos. La consolidación de estos materiales y tecnologías

emergentes posee un elevado potencial para contribuir al desarrollo de soluciones energéticas sostenibles, eficientes y adaptadas a las demandas tecnológicas del futuro inmediato.

2. DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA

En la actualidad, uno de los principales desafíos en el ámbito de la generación y almacenamiento de energía renovable es la identificación y optimización de materiales avanzados capaces de convertir eficientemente estímulos del entorno, como las vibraciones mecánicas, en energía eléctrica utilizable. Los materiales con respuesta piezoeléctrica, especialmente aquellos con estructuras cerámicas nanoestructuradas, han despertado un creciente interés debido a su capacidad inherente para transformar energía mecánica en señales eléctricas [7]

La evolución de los sistemas de recolección de energía ha transitado desde tecnologías convencionales, como las hidroeléctricas, hacia métodos más limpios y sostenibles basados en el aprovechamiento de fuentes dispersas y de baja intensidad, como las vibraciones ambientales. Sin embargo, la conversión eficiente de vibraciones mecánicas en energía útil aún presenta limitaciones importantes, tanto en el rendimiento de los materiales como en la integración efectiva de estos en dispositivos funcionales. Actualmente, muchos sistemas piezoeléctricos exhiben problemas de fatiga, bajo nivel de salida eléctrica o escasa adaptabilidad estructural frente a condiciones reales de operación, lo que impide su aplicación masiva en entornos industriales o urbanos [8]

Este escenario ha impulsado la necesidad de estudiar en profundidad las propiedades físicas y mecánicas de nuevos materiales funcionales, que puedan responder eficientemente ante excitaciones mecánicas y contribuir al diseño de dispositivos recolectores de energía compactos, eficientes y sostenibles. Entre estos materiales, destacan los cerámicos nanoestructurados, que han demostrado mejoras significativas en propiedades funcionales como la constante piezoeléctrica, el factor de acoplamiento electro-mecánico y la durabilidad frente a ciclos de carga [9]

No obstante, la problemática no se limita únicamente a la caracterización de dichos materiales, sino que también abarca la necesidad de desarrollar modelos computacionales que permitan predecir su comportamiento dinámico bajo diferentes condiciones de carga y frecuencia. Asimismo, es fundamental el diseño de componentes capaces de maximizar la captación y transferencia de la energía generada, asegurando así una integración efectiva en sistemas reales de aprovechamiento energético. La ausencia de estudios integrales que combinen simulación, caracterización y diseño de dispositivos limita el aprovechamiento pleno del potencial de los materiales piezoeléctricos y cerámicos nanoestructurados en aplicaciones de recolección de energía generada por vibraciones mecánicas [10]

→ **Problema general**

¿Es probable estudiar las propiedades físicas y mecánicas de materiales piezoeléctricos y/o cerámicos, nanoestructurados mediante software especializado para componentes de recolección de energía sometidos a vibraciones mecánicas?

→ **Problemas específicos**

- a. ¿Se podrá establecer las condiciones iniciales de los materiales piezoeléctricos y/o cerámicos considerados para componentes utilizados en recolección de energía sometidos a vibraciones mecánicas?
- b. ¿Será factible analizar las condiciones iniciales de los materiales piezoeléctricos y/o cerámicos idóneos para componentes nanoestructurados utilizados en recolección de energía sometida a vibraciones mecánicas?
- c. ¿Será posible proponer un material con respuesta piezoeléctrica ya analizado para la recolección de energía sometido a vibraciones mecánicas?
- d. ¿Es posible diseñar un componente de recolección de energía basado en un material mediante software especializado con respuesta piezoeléctrico sometido a vibraciones mecánicas?

3. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

El estudio y aplicación de materiales piezoeléctricos ha evolucionado notablemente desde su descubrimiento en el siglo XIX. Inicialmente limitados a cristales naturales como el cuarzo, estos materiales dieron paso a cerámicas sintéticas como el titanato de plomo y zirconio (PZT), ampliamente utilizadas por sus excelentes propiedades piezoeléctricas [11]. Sin embargo, las preocupaciones medioambientales y sanitarias asociadas al plomo han impulsado el desarrollo de alternativas libres de este elemento, destacando compuestos como el niobato de potasio y sodio (KNN) y el titanato de bismuto ($\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$) [12].

La incorporación de técnicas de nanoestructuración, como el uso de películas delgadas, fibras orientadas y dopaje selectivo, ha permitido mejorar significativamente parámetros como la constante piezoeléctrica (d_{33}), el acoplamiento electro-mecánico (k_p) y la flexibilidad estructural, haciendo viables nuevas aplicaciones en entornos dinámicos [9]. Estos avances han sido fundamentales para el desarrollo de sistemas de recolección de energía basados en vibraciones mecánicas, especialmente en dispositivos portátiles, sensores inalámbricos y sistemas autónomos [13].

Diversos estudios han abordado la fabricación de nanogeneradores piezoeléctricos utilizando materiales como ZnO, PVDF y combinaciones híbridas con KNN o BiTiO. Por ejemplo, Wang et al. [14] demostraron la viabilidad de un nanogenerador flexible basado en fibras de PVDF dopadas con nanopartículas cerámicas, capaz de generar tensiones de salida de hasta 20 V bajo vibraciones mecánicas moderadas. Sin embargo, muchos de estos desarrollos aún presentan limitaciones en cuanto a durabilidad, eficiencia energética y compatibilidad con procesos de fabricación a gran escala [8].

A nivel computacional, se ha incrementado el uso de herramientas como el método de elementos finitos (FEM) para modelar el comportamiento dinámico de estos materiales bajo condiciones reales. Esto ha permitido optimizar diseños antes de su

fabricación, pero la falta de modelos que integren simultáneamente propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas sigue siendo una barrera para su implementación masiva [15].

En consecuencia, persiste la necesidad de investigaciones integrales que combinen el estudio de materiales piezoeléctricos y cerámicos nanoestructurados con metodologías de simulación avanzada, orientadas a la creación de componentes eficientes para la recolección de energía a partir de vibraciones mecánicas. Esta tesis se posiciona dentro de ese contexto, proponiendo el análisis físico-mecánico de estos materiales mediante software especializado, con miras a su aplicación en sistemas energéticos sostenibles.

3.1 FUNDAMENTOS DE LA PIEZOELECTRICIDAD

La piezoelectricidad es un fenómeno físico que ocurre en materiales anisotrópicos, donde se genera una polarización eléctrica al aplicar una deformación mecánica. Este efecto fue descubierto en 1880 por los hermanos Curie, y desde entonces se ha utilizado en una amplia gama de aplicaciones, como sensores, actuadores y sistemas de recolección de energía [16]. El efecto piezoeléctrico directo describe la generación de carga eléctrica cuando el material es sometido a una tensión mecánica, mientras que el efecto inverso corresponde a una deformación inducida por un campo eléctrico [17].

Los materiales piezoeléctricos incluyen cristales naturales (cuarzo, turmalina), compuestos poliméricos (PVDF) y cerámicas ferroeléctricas como el titanato de plomo y zirconio (PZT), siendo estos últimos los más utilizados debido a su alta constante piezoeléctrica y facilidad de procesamiento [18].

3.1.1 REQUISITOS ESTRUCTURALES DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

La piezoelectricidad es un atributo que surge del nivel atómico de asimetría, que es la falta de un centro simétrico en una célula unitaria de cristal uniforme. Esta condición es necesaria, por lo que existe la electrólisis pura

causada por la deformación mecánica. De los 32 grupos cristalográficos existentes, 21 de ellos son no centro-simétricos, y dentro de estos, 20 presentan propiedades piezoeléctricas [18]. Esta clase de materiales posee un eje polar, lo cual significa que existe una dirección preferencial de polarización cuando se aplica esfuerzo mecánico.

Los materiales piezoeléctricos pueden clasificarse según su origen estructural en:

- **Cristales naturales:** como el cuarzo, topacio y turmalina. Estas sustancias poseen estructuras no centro-simétricas de forma intrínseca y no requieren tratamientos adicionales.
- **Cerámicos policristalinos:** como el titanato de plomo y zirconio (PZT) y el titanio de bario (BaTiO_3). Aunque presentan dominios cristalinos con orientaciones aleatorias, estos materiales se someten a un proceso de polarización inducida o “poling”, aplicando un campo eléctrico intenso a alta temperatura para alinear los dipolos [19].

Además de la estructura cristalina, la microestructura (tamaño de grano, porosidad, distribución de fases) también influye en el comportamiento piezoeléctrico. Estudios recientes en materiales nanoestructurados han demostrado que la reducción del tamaño de grano puede aumentar la constante piezoeléctrica y la permitividad, gracias a la mayor movilidad de las paredes de dominio [20], [21].

3.1.2 ECUACIONES CONSTITUTIVAS

Las ecuaciones constitutivas son relaciones matemáticas que describen el comportamiento de los materiales al relacionar variables físicas fundamentales como esfuerzo, deformación, campo y desplazamiento eléctricos. En materiales piezoeléctricos, estas ecuaciones combinan fenómenos mecánicos y eléctricos de forma acoplada [22].

Las formas más comunes de expresar las ecuaciones constitutivas de los materiales piezoeléctricos vienen determinadas por esfuerzos en función de la deformación y

campo eléctrico o determinadas por el desplazamiento eléctrico en función de la deformación y campo eléctrico.

De esta forma, podemos mencionar las ecuaciones lineales acopladas (tensorial) o en forma matricial (forma ingenieril simplificada):

Forma tensorial.

$$\begin{cases} T_{ij} = c_{ijkl}^E S_{kl} - e_{kij} E_k \\ D_i = e_{ikl} S_{kl} + \varepsilon_{ik}^S E_k \end{cases} \quad (1)$$

Forma matricial.

$$\begin{cases} \mathbf{T} = [c^E] \mathbf{S} - (e)^T \mathbf{E} \\ \mathbf{D} = (e) \mathbf{S} + (\varepsilon^S) \mathbf{E} \end{cases} \quad (2)$$

En su estructura tensorial se indica como un esfuerzo puede surgir de una deformación mecánica y un campo eléctrico aplicado; como se muestra en la ecuación (1), donde T_{ij} es el tensor de esfuerzos mecánico (Pa), C_{ijkl}^E es el módulo elástico del campo eléctrico constante (Pa), S_{kl} es el tensor de deformación unitaria, e_{kij} es el coeficiente piezoeléctrico (C/m²), E_k es el componente eléctrico (V/m), D_i es el desplazamiento eléctrico (C/m²) y ε_{ik}^S es la permitividad dieléctrica a deformación constante (F/m).

Y en su forma matricial como un desplazamiento eléctrico puede generarse por una deformación mecánica y campo eléctrico como se muestra en la ecuación (2), donde T es el vector de esfuerzos mecánicos, S es el vector deformación, D vector de desplazamiento eléctrico, E es el vector del campo eléctrico, C^E es la matriz de rigidez, e es la matriz de coeficientes piezoeléctricos y ε^S es la matriz de permitividad dieléctrica. [23], [24].

3.1.3 COEFICIENTE DE ACOPLAMIENTO PIEZOELÉCTRICO d_{ij}

La relación entre el campo eléctrico y la deformación mecánica en un material piezoeléctrico se caracteriza mediante los coeficientes d_{ij} , componentes de un tensor de segundo orden. Estos coeficientes cuantifican la carga eléctrica generada por unidad de esfuerzo (*efecto piezoeléctrico directo*) o, inversamente, la deformación producida por unidad de campo eléctrico aplicado (*efecto piezoeléctrico inverso*).

Frente a este comportamiento de los piezoeléctricos la formulación matemática y sus ecuaciones constitutivas acopladas cuando la generación de carga está relacionada a un esfuerzo mecánico, ecuación (3) a esto se lo conoce como efecto directo. Pero si se toma en cuenta la deformación mecánica inducida por campo eléctrico se denomina efecto inverso, ecuación (4)

Efecto directo

$$D_i = \sum_{j=1}^6 d_{ij} * \sigma_j \quad (3)$$

Efecto inverso

$$\varepsilon_i = \sum_{j=1}^3 d_{ij} * E_j \quad (4)$$

Considerando las ecuaciones 3 y 4, D_i representa el desplazamiento eléctrico y ε_i la deformación mecánica adimensional cada una en función del esfuerzo σ_j y el campo eléctrico aplicado E_j correspondientemente. El coeficiente piezoeléctrico¹ d_{ij} se representa en pC/N o m/V [23].

¹ Los coeficientes mencionados se organizan en una matriz de 3x6 esto en consecuencia de la simetría del tensor de esfuerzo y deformación; para reducir la representación de los tensores de segundo orden se utiliza la notación de Voigt [25].

Se conoce que el **primer índice i** del coeficiente de piezoelectricidad se relaciona con la dirección de la respuesta eléctrica D_i y el **segundo índice j** tiene relación con la excitación mecánica es decir el esfuerzo σ_j o campo eléctrico E_j . En sistemas cristalinos tetragonales o trigonales, presentes en los materiales PZT o ZnO los índices de los coeficientes se reducen a componentes independientes. Especialmente, los coeficientes d_{11} , d_{22} , d_{33} representan la conversión piezoeléctrica en direcciones ortogonales respecto a los ejes cristalográficos [16].

d_{33} : corresponde a la polarización eléctrica inducida en la misma dirección que la tensión aplicada (eje z). Es el más utilizado en aplicaciones de recolección de energía, ya que maximiza la respuesta bajo cargas normales [26].

d_{11} y d_{22} : representan la respuesta transversal, es decir, la polarización eléctrica en dirección perpendicular a la tensión aplicada. Estos parámetros son particularmente útiles para estructuras sometidas a esfuerzos biaxiales o en configuraciones de placas delgadas . Los coeficientes generan una matriz en donde relacionan los componentes del campo eléctrico con los esfuerzos mecánicos, como se observa en la ecuación (5). Usando la notación de Voigt se obtiene:

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Por razones de simetría, ciertos factores se anulan y la matriz se reduce a una matriz **d** , ecuación (6) que será representativa para materiales piezoeléctricos con sistemas tetragonales [27].

$$d = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{31} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

En ella, los coeficientes **d_{31}** y **d_{33}** predominan por su contribución longitudinal y transversal respectivamente. Para estudios de captación de energía, el parámetro

d_{33} se considera importante debido a su fuerte acoplamiento con cargas normales provocadas por vibración. El coeficiente d_{15} refleja la polarización en el x debido a esfuerzos de cizallamiento.

Últimos estudios sobre materiales piezoeléctricos nanoestructurados como nanohilos de ZnO y películas delgadas de PZT manifiestan que el valor de d_{33} puede aumentar considerablemente debido a efectos de confinamiento cuántico y alineación cristalina preferente [28] [29]

Adicional, la relación existente entre los coeficientes d_{ij} y los parámetros de acoplamiento eléctricos y mecánicos se pueden expresar mediante el coeficiente de acoplamiento k , ecuación (7); en donde S_{jj} es la compliancia mecánica y ϵ_{ii} es la permitividad eléctrica del material.

La ecuación (7), muestra el coeficiente de acoplamiento la evaluación del material y da a conocer que tan eficiente es al convertir la energía eléctrica a mecánica y viceversa, considerando también las propiedades dieléctricas y los módulos de elasticidad [30].

$$k_{ij}^2 = \frac{d_{ij}^2}{S_{jj} * \epsilon_{ii}} \quad (7)$$

3.2 PROPIEDADES MECÁNICAS DE MATERIALES CERÁMICOS PIEZOELÉCTRICOS

La presencia de materiales cerámicos piezoeléctricos como el BaTiO₃ (Titanato de Bario) o como el PZT (Zirconato-Titanato de Plomo) tienen una singular combinación cristalina anisotrópica orientada que facilita la polarización eléctrica y una destacada rigidez mecánica. Bajo este esquema estructural, se ve limitado por su naturaleza frágil, la cual dificulta su uso en aplicaciones sometidas a tracción o impacto directo [19]. Este tipo de cerámicos se caracteriza por una elevada resistencia a la compresión, bajo alargamiento a la fractura y una baja tenacidad, lo que los hace vulnerables a la propagación de grietas bajo cargas cíclicas o impactos.

En contraste, su módulo elástico alto los convierte en excelentes candidatos para dispositivos donde se requiere estabilidad dimensional y mínima deformación bajo carga. [24]

En la siguiente Tabla 1 se resumen algunos valores representativos de propiedades mecánicas para el PZT, uno de los compuestos piezoeléctricos más utilizados en aplicaciones tecnológicas.

Propiedad	Símbolo	Unidad	Intervalo típico
Módulo de elasticidad	E	GPa	50 – 100
Relación de Poisson	ν	–	0.31 – 0.36
Dureza Vickers	H_v	GPa	5 – 8
Resistencia a la flexión	σ_f	MPa	70 – 150
Tenacidad a la fractura	K_{IC}	MPa·Vm	0.8 – 1.5
Densidad	ρ	g/cm ³	7.5 – 7.8
Deformación elástica límite	ϵ_{max}	%	0.1 – 0.2

Tabla 1 Propiedades mecánicas representativas del PZT. Fuente. adaptada

Las propiedades mecánicas mencionadas pueden verse alteradas por factores microestructurales, como el tamaño del grano, la densidad del material, la presencia de poros y la orientación cristalina. En particular, técnicas de nanoestructuración han demostrado mejorar tanto la resistencia mecánica como el comportamiento piezoeléctrico, permitiendo su integración en sistemas más exigentes desde el punto de vista estructural [31].

Para aplicaciones en sistemas de captación de energía por vibración, estos materiales deben ser seleccionados con base en su capacidad para resistir esfuerzos dinámicos sin comprometer su integridad. Por ejemplo, una mayor rigidez puede potenciar la generación de carga eléctrica en condiciones resonantes, aunque también implica un riesgo mayor de falla súbita si no se controlan adecuadamente las tensiones inducidas. Por ello, el conocimiento preciso de las propiedades mecánicas de estas cerámicas resulta esencial para su correcta aplicación en dispositivos funcionales, especialmente aquellos expuestos a cargas vibracionales constantes [32].

3.2.1 PROPIEDADES ELÉCTRICAS, MECÁNICAS Y FÍSICAS DE LOS MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS.

Los materiales piezoeléctricos demuestran un conjunto de combinaciones de sus propiedades eléctricas, mecánicas y físicas que han sido aplicadas en equipos tecnológicos como sensores, actuadores, sistemas de almacenamiento de energía y en dispositivos microelectromecánicos.

De características eléctricas, la capacidad de generar una carga eléctrica en respuesta a una deformación mecánica o, inversamente, deformarse al aplicar un campo eléctrico destacan parámetros como:

Constante Piezoeléctrica (d_{ij}), Permisividad Dieléctrica (ϵ_r), Resistencia Eléctrica y Conductividad Eléctrica. La interacción entre la constante piezoeléctrica y la permisividad dieléctrica condiciona el coeficiente de acoplamiento electromecánico k^2 , que indica la eficiencia de conversión de energía entre dominios eléctricos y mecánicos [13].

De carácter mecánico, se describe a la reacción del material expuesto a fuerzas aplicadas en particular a vibraciones e impactos frecuentes. Frente a esto consideramos parámetros como:

Módulo de elasticidad (E) y Módulo de corte (G), Coeficiente de Poisson (ν), Tenacidad y Dureza, ser tomados en cuenta en un contexto de fatiga o impacto y por último la Fatiga Mecánica con la particularidad de no perder sus propiedades piezoeléctricas frente a ciclos de carga repetidos. En cerámicos como el PZT (zirconato-titanato de plomo), el compromiso entre alta rigidez y resistencia a la fractura representa un desafío de diseño, y puede ser mitigado mediante técnicas de nanoestructuración [33].

De carácter físico, en estos materiales se consideran la Densidad (ρ), estabilidad térmica tomando en cuenta la Temperatura de Curie y el Coeficiente de Expansión

Térmica. Los materiales piezoeléctricos están condicionados en el comportamiento direccional de sus propiedades eléctricas y mecánicas debido a su anisotropía cristalina, por ejemplo los cristales de cuarzo tiene una respuesta direccional definida, mientras que los cristales policristalinos requieren un proceso de polarización para alinear los dominios [34].

Estas propiedades y sus acoplamientos garantizarán un buen funcionamiento en sus dominios eléctricos o mecánicos, es decir si se optimiza una propiedad mecánica, podrá verse afectada una propiedad eléctrica y viceversa. Si aumentamos la rigidez en el material puede verse afectada la constante piezoeléctrica, mejorar la estabilidad térmica podrá reflejar una disminución en la constante d_{ij} ; en otros términos, debe de existir un equilibrio en sus propiedades en condiciones especiales de trabajo como sensores de presión, dispositivos MEMS o en los sistemas de recolección de energía por vibraciones [23], [35].

Como se muestra en la Tabla 2, las propiedades piezoeléctricas guardan relación entre eléctricas, mecánicas y físicas [36] [37] [27].

Material	Tipo	d_{33} (pC/N)	ϵ_r (1 kHz)	k_{33}	g_{33} (mV·m/N)	Densidad (g/cm ³)	T (°C)	Notas
PZT-5A	Cerámico	390	1800	0.72	24.0	7.8	~350	Buena relación entre rigidez y estabilidad térmica.
PMN-PT	Monocristal	1285	4753	0.89	30.5	8.12	~150	Eficiencia de conversión entre energía eléctrica y mecánica
PVDF	Polímero	20–30	10–12	0.1–0.2	216	1.78	~100	Genera una carga eléctrica en respuesta a la tensión mecánica. Útil en aplicaciones como sensores y actuadores.
PVDF-TrFE	Copolímero	30–40	12–15	0.2–0.3	250	~1.9	~110	Mejor rendimiento que PVDF puro; ideal para generar a partir de vibraciones

ZnO	Inorgánico	12–15	8–10	0.3– 0.4	50–60	5.6	~197	Utilizado en películas delgadas y nanogeneradores.
BaTiO₃	Cerámico	190	1700	0.49	12	6.0	~120	Puede generar carga eléctrica bajo presión. Estructura de perovskita cúbica.
KNN	Cerámico sin plomo	80–160	500– 1000	0.4– 0.6	20–30	4.5–4.8	~420	Opción ecológica al PZT; en estudio y análisis.
MoS₂- PVDF	Compuesto	~50	~15	0.3– 0.4	~100	~2.0	~100	Mejora la sensibilidad de PVDF; adecuado para sensores flexibles.
PIN- PMN-PT	Monocristal	1330– 4800	6000 – 1420 0	0.92 – 0.96	28.9–38.2	7.5–8.1	109– 148	Alto acoplamiento electromecánico, constante piezoeléctrica y baja pérdida dieléctrica

Tabla 2 Relación de propiedades eléctricas, mecánicas y físicas de materiales piezoeléctricos². Fuente: adaptada

3.2.2 MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS Y CERÁMICOS NANOESTRUCTURADOS.

Podemos clasificar a los materiales piezoeléctricos según su origen en cristales naturales aquí están presentes los de estructuras cristalinas no centro-simétricas de forma natural como el cuarzo, la turmalina y el topacio [19]. Destacan también los materiales cerámicos que no son más que compuestos artificiales, presentes están el zirconato-titanato de plomo (PZT), el titanato de bario (BaTiO₃), el niobato de litio (LiNbO₃) entre otros, estos materiales requieren procesos de sinterización y orientación mediante pooling [38]. Cabe mencionar los polímeros piezoeléctricos que combinan flexibilidad con propiedades piezoeléctricas como el copolímero PVDF-TrFE (Polivinilidemo fluoruro) [39].

En la última década, el progreso en el diseño y caracterización de los materiales piezoeléctricos nanoestructurados ha sido fundamental para el desarrollo de dispositivos de recolección de energía con mayor eficacia, versatilidad y capacidad

² Las propiedades mostradas en la Tabla 2 corresponden al coeficiente piezoeléctrico (d_{33}), a la capacidad del material para almacenar carga eléctrica (ϵ_r), coeficiente de acoplamiento electromecánico (k_{33}), coeficiente de tensión piezoeléctrica (g_{33}), temperatura a la cual el material pierde sus propiedades piezoeléctricas-temperatura de Curie (T).

de adaptación. Se mencionan los materiales piezoeléctricos más relevantes en los últimos años.

A. Compuesto PMN-0.3PT/PDMS.

Una perspectiva actual sugiere la mezcla de cristales piezoeléctricos de $\text{Pb}(\text{Mg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3})\text{O}_3$ -0.3 PbTiO_3 (PMN-0.3PT) con una matriz adaptable de PDMS. Esta disposición en arquitectura 2-2 consigue mantener las características piezoeléctricas del PMN-0.3PT a la vez que incrementa significativamente su flexibilidad mecánica. Registra una densidad de potencia de salida de $13 \mu\text{W}/\text{cm}^3$, que es cerca del doble de la alcanzada con PMN-0.3PT puro. Además, contiene una flexibilidad estructural aproximada de un 53% más, lo que resulta ideal para aparatos portátiles y usos biomecánicos. Son ampliamente reconocidos como sistemas ejemplares para la recolección de energía, debido a su coeficiente de carga piezoeléctrica significativamente más alto en comparación con otras piezocerámicas [40] [41].

B. Nanorods de óxido de zinc (ZnO).

Una investigación reciente ha evidenciado que la adición de neodimio (Nd) a los nanorods de óxido de zinc (ZnO) puede potenciar de manera notable sus características piezoeléctricas. Los nanorods de ZnO dopados con Nd mostraron una constante de deformación piezoeléctrica (d_{33}) que alcanzó los $512 \text{ pm}/\text{V}$, equiparable a la de materiales piezoeléctricos de plomo, tal como el PZT. Esta mejora se debe a la disminución de fallos estructurales y al incremento de la alineación de dominios piezoeléctricos, lo que conduce a una eficiencia superior en la transformación de energía mecánica en eléctrica. Estos descubrimientos sitúan a los nanorods de ZnO dopados con Nd como potenciales aspirantes para usos en nanogeneradores piezoeléctricos. En la tabla 3 se muestra los valores de d_{33} de algunas muestras de nanorods de ZnO dopadas [42].

	d_{33} pm/V	Pureza/Forma	Dimensiones	Método de medición
ZnO a granel	12.4	-		
NR	43.38	Dopado con Eu^{+3}	Φ 78,92 nm L=302,33 nm	Curva DV
	45.49	Gd^{+3} dopado	Φ 59,85 nm L=245,13 nm	Curva DV
	100.30	La^{+3} dopado	Φ 123,49 nm L=704,38 nm	Curva DV
	30	Ce^{+3} dopado	Φ 16-20 nm L=80-120 nm	Curva DV
	512	Dopado con Nd	Φ 101 nm L=412 nm	Curva DV
	41.28	Ba^{+2} dopado	Φ 73,25 nm L=476,51 nm	Curva DV
SN	420	Y^{+3} dopado	\sim 34 nm	Curva DV
Película	85	Dopado con V (sustrato de Si)	285 nm de espesor	Curva DV / AFM

Tabla 3 Valores d_{33} para estructuras ZnO dopadas.[42]

C. Nano hilos de nitruro de aluminio (AlN).

Estudios recientes han demostrado interés en los nanohilos de nitruro de aluminio (AlN) como materiales activos en diferentes equipos de conversión de energía, presentando una elevada rigidez dieléctrica, excelente estabilidad térmica, permanencia química y biocompatibilidad. Estas ventajas funcionales, han sido de análisis de los nanohilos de AlN en nanogeneradores piezoeléctricos.

En uno de estos estudios, pudieron desarrollar nanogeneradores piezoeléctricos integrados verticalmente llamados VINGs basándose en nanohilos de AlN y enfatizando su caracterización eletro-mecánica. Demostraron que el dispositivo, mediante carga inducida, impedancia y mediciones de voltaje, generaba una constante de voltaje piezoeléctrico y un producto $d.g$ notablemente superior en comparación a materiales como el GaN y el cuarzo [43].

Los nanogeneradores piezoeléctricos PENG han demostrado gran utilidad en algunas áreas de estudio y en el campo de la biomedicina en los sensores de presión. Configurando películas delgadas de AlN estructuradas como diafragmas piezoeléctricos, los dispositivos lograron una sensibilidad de 0.091 V/kPa con una densidad de potencia de 0.9 mW/cm³, estos resultados son altamente positivos y

competitivos para sistemas portátiles de monitoreo fisiológico. También presenta una biocompatibilidad para tecnologías de implantes [44].

D. Cerámica piezoeléctrica sin plomo (KNN-BAH).

Gallardo-Durán *et al.* llevaron a cabo el desarrollo de nuevas cerámicas piezoeléctricas sin plomo basadas en el sistema $K_{0.5}Na_{0.5}NbO_3$ (KNN), incorporando elementos dopantes como Bi^{3+} y Ag^+ en los sitios A, y Hf^{4+} en el sitio B, con el fin de modificar su estructura y propiedades funcionales. La composición resultante, identificada como KNN-BAH, logró estabilizar una mezcla de fases ortorrómbica y tetragonal que, en conjunto con un tamaño de grano reducido y un bajo contenido de vacancias de oxígeno, favoreció una mayor movilidad de las paredes de dominio ferroeléctrico.

La cerámica sinterizada a 1080 °C presentó un valor sobresalientemente bajo del factor de calidad mecánica ($Q_m = 27.2$), acompañado de una constante piezoeléctrica d_{33} de hasta 225 pC/N, características que la hacen especialmente apta para aplicaciones que requieren alta sensibilidad, como transductores ultrasónicos y sensores de fuerza. Los autores concluyen que estas propiedades mejoradas se deben a la microestructura fina, la coexistencia de fases cristalinas y la facilidad de orientación de los dominios bajo campo eléctrico aplicado.

En conjunto, este estudio demuestra el potencial del sistema KNN-BAH como una alternativa prometedora y ecológica a los materiales ferroeléctricos basados en plomo, destacando su aplicabilidad en tecnologías piezoeléctricas emergentes [45].

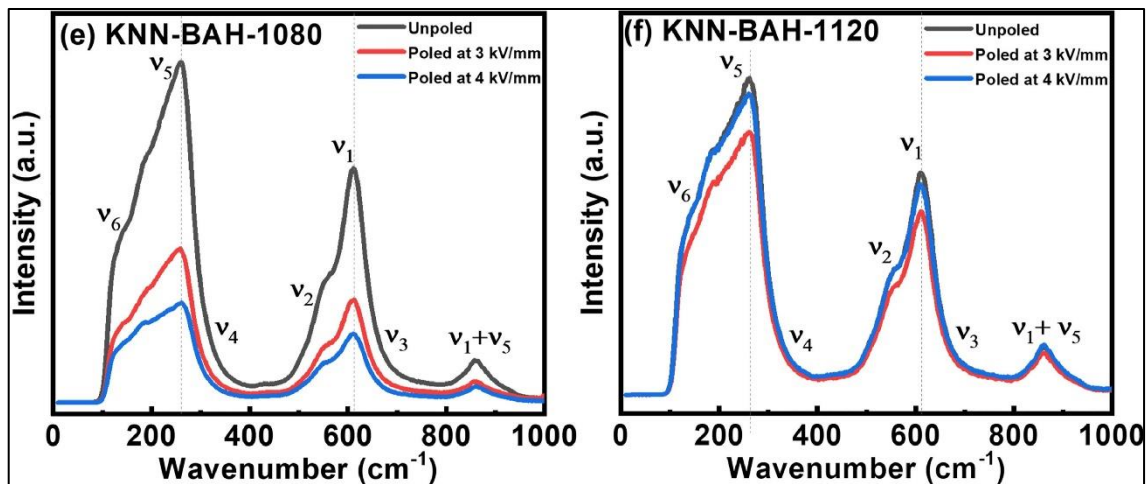


Figura 1 Espectros Raman de cerámicas (e) KNN-BAH-1080 y (f) KNN-BAH-1120 [45]

3.3 RECOLECCIÓN DE ENERGÍA MEDIANTE VIBRACIONES.

La captación de energía, también conocida como *energy harvesting*, consiste en transformar energía disponible en el entorno en electricidad útil para alimentar dispositivos electrónicos de bajo consumo, eliminando en muchos casos la dependencia de baterías tradicionales [46]. Esta técnica se ha consolidado como una solución viable en sistemas electrónicos autónomos, incluyendo sensores inalámbricos, plataformas embebidas para monitoreo estructural, dispositivos biomédicos y redes IoT.

Entre las distintas fuentes de energía ambiental aprovechables se encuentran la radiación solar, los gradientes térmicos, las ondas electromagnéticas y las vibraciones mecánicas. Estas últimas destacan por su presencia constante en una amplia variedad de entornos como vehículos, maquinaria industrial, estructuras civiles y organismos vivos. Los sistemas que transforman vibraciones en electricidad lo hacen mediante transductores, siendo los dispositivos piezoeléctricos los más populares debido a su alta densidad energética, bajo mantenimiento y facilidad de miniaturización [8]. El rendimiento de estos sistemas depende en gran medida de la correspondencia entre la frecuencia de excitación y la frecuencia natural del recolector. Factores como la amplitud de vibración y las propiedades del material

activo también influyen significativamente. Cuando el sistema opera en resonancia, la conversión energética se optimiza considerablemente [47]. Para superar la limitación de operar únicamente en condiciones resonantes, se han investigado configuraciones no lineales como los sistemas biestables. Estas estructuras permiten ampliar el ancho de banda de recolección y mejorar el rendimiento en ambientes con vibraciones no armónicas o aleatorias. El uso de un recolector biestable acoplado con una carga eléctrica óptima puede generar un aumento considerable en la energía captada bajo condiciones estocásticas, representando una solución prometedora para aplicaciones reales [48].

3.3.1 FUNDAMENTOS DE RECOLECCIÓN DE ENERGÍA POR VIBRACIONES.

El proceso de recolección de energía mediante vibraciones mecánicas implica transformar la energía del movimiento en una forma que se pueda utilizar y almacenar. Este tipo de recolección de energía se ha convertido en una forma mas conocida y efectiva para alimentar dispositivos electrónicos que no necesitan la presencia de una persona, especialmente en momentos donde el cambio o reemplazo de baterías es más difícil y con valores económicos elevados [49]

La posibilidad de transformar las vibraciones a energía eléctrica es posible con el uso de transductores que se rigen a ciertos principios físicos como el **efecto piezoeléctrico** cuya característica en algunos materiales como los cerámicos y polímeros piezoeléctricos, han sido capaces de generar cierto porcentaje de carga eléctrica cuando han sido sometidos a esfuerzos mecánicos y ha sido aceptado por su alta densidad de potencia y una mejorada respuesta dinámica [8].

Otro principio físico para destacar es la inducción electromagnética principio basado en la ley de Faraday que implica el movimiento entre un imán y una bobina con el objetivo de inducir una corriente eléctrica, pero por su robustez el sistema es necesario mayores volúmenes físicos [49].

En los sistemas microelectromecánicos MEMS se considera la **variación de capacitancia** como una importante propiedad física en la recolección de energía

por vibraciones, esto debido a que su mecanismo se basa en los cambios de la capacitancia de un condensador por causas de deformaciones estructurales inducidas por vibraciones [50].

3.3.2 MODELADO DE SISTEMAS VIBRATORIOS.

El modelado de sistemas vibratorios es una herramienta esencial para estudiar el comportamiento dinámico de estructuras y componentes expuestos a excitaciones mecánicas. Mediante la formulación matemática apropiada, es posible predecir la respuesta de un sistema frente a diferentes frecuencias de vibración, lo cual resulta clave en el diseño de dispositivos de recolección de energía [51].

El modelo más simple y ampliamente utilizado es el de **un grado de libertad (1-DOF)**, el cual consiste en una masa m , un resorte con rigidez k , y un amortiguador con coeficiente de amortiguamiento c . La ecuación de movimiento para este sistema se expresa como:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) \quad (8)$$

donde $x(t)$ es el desplazamiento de la masa respecto a su posición de equilibrio y $F(t)$ representa la fuerza externa aplicada. Este modelo permite analizar diferentes regímenes de vibración: libre no amortiguada, libre amortiguada, y forzada. Estas *vibraciones no amortiguadas* ocurren cuando el coeficiente de amortiguamiento y la fuerza aplicada es igual a cero, como resultado se obtiene oscilaciones perpetuas a la frecuencia natural. Las *vibraciones libres amortiguadas* mantienen el valor de la fuerza a cero, pero el amortiguador debe ser mayor a cero, con estos parámetros las oscilaciones disminuyen debido a la disipación de energía. Como modelo final están las *vibraciones forzadas*, aquí la fuerza se mostrará como una función periódica, causando que el sistema responda de manera combinada entre oscilaciones transitorias y estacionarias y cuya magnitud dependerá de la cercanía a la frecuencia de resonancia [52].

Para representar sistemas más complejos, como estructuras con múltiples componentes móviles, se utilizan modelos de **múltiples grados de libertad (MDOF)**. Estos sistemas se describen mediante un conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas, ecuación (9):

$$M\ddot{x}(t) + C\dot{x}(t) + Kx(t) = F(t) \quad (9)$$

Donde **M**, **C** y **K** son las matrices de masa, amortiguamiento y rigidez, respectivamente. Este sistema nos permite encontrar las frecuencias naturales y los modos de vibración de un sistema, que son importantes para prevenir resonancias y crear sistemas efectivos [53].

En ciertas aplicaciones, existen sistemas no lineales para ampliar el rango de frecuencias operativas y mejorar la eficiencia en el proceso de recolección de energía. Estos sistemas pueden incluir resortes no lineales a configuraciones biestables. Para estos sistemas la ecuación (9) de movimiento puede expresarse como:

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) + \alpha x^3(t) = F(t) \quad (10)$$

La no linealidad del sistema está representada por α . Para estudiar estos sistemas es necesario técnicas sofisticadas como la teoría de las perturbaciones o simulaciones numéricas, para comprender su comportamiento dinámico y su diseño [54].

3.3.3 FRECUENCIA DE RESONANCIA Y ANCHO DE BANDA.

La eficiencia de la conversión de energía en los sistemas de recolección de energía basados en vibraciones mecánicas depende de la frecuencia de resonancia. La amplitud máxima de oscilación se alcanza cuando el sistema vibratorio vibra a esta frecuencia, lo que permite una eficiente transferencia de energía vibratoria mecánicas hacia una energía eléctrica.

Sin embargo, un gran inconveniente de los sistemas resonantes convencionales es su rango de frecuencia restringido, lo que implica que son muy eficientes solo en una pequeña porción del espectro posible, el problema es que es difícil usar este método en situaciones reales donde las frecuencias de vibración pueden cambiar debido a diferentes factores en el entorno o la operación.

Frente a estas situaciones de ampliar el ancho de banda de los recolectores de energía mediante vibraciones, se han desarrollado estrategias que encierran técnicas o elementos capaces de optimizar los procesos de recolección. Una técnica que permite que el sistema ajuste de manera dinámica su frecuencia de resonancia es la **Sintonización Automática de Resonancia (ART)**, esto como respuesta a cambios en las condiciones de vibración, manteniendo una alta eficiencia y rangos más amplios de frecuencia [55].

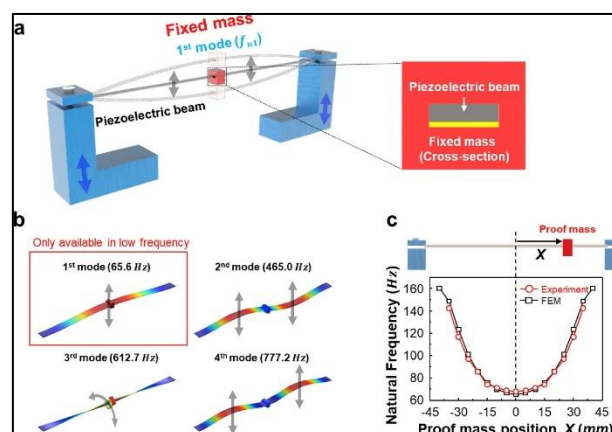


Figura 2 muestra un esquemática del mecanismo de sintonización automática por resonancia (ART) para la captación de energía de vibración. (a) Ilustración del captador de energía de viga de doble sujeción con la masa de prueba fija. (b) formas del modo de vibración en función del orden modal (del 1.º al 4.º) en simulación FEM. (c) Frecuencia natural de la estructura de la viga de doble sujeción, simulación FEM y experimento [55].

La incorporación de múltiples modos de vibración o configuraciones biestables en el diseño del recolector permite capturar energía de una gama más amplia de frecuencias, mejorando la adaptabilidad del sistema a diferentes fuentes de vibración a lo que se denominan **Diseños Multimodales y Biestables** [56]. Como dato adicional, la incorporación de **Materiales y Estructuras no Lineales** como resortes con rigidez variable, puede contribuir a una respuesta más amplia en frecuencia garantizando la recolección de energía más eficiente en condiciones de vibración variables [52].

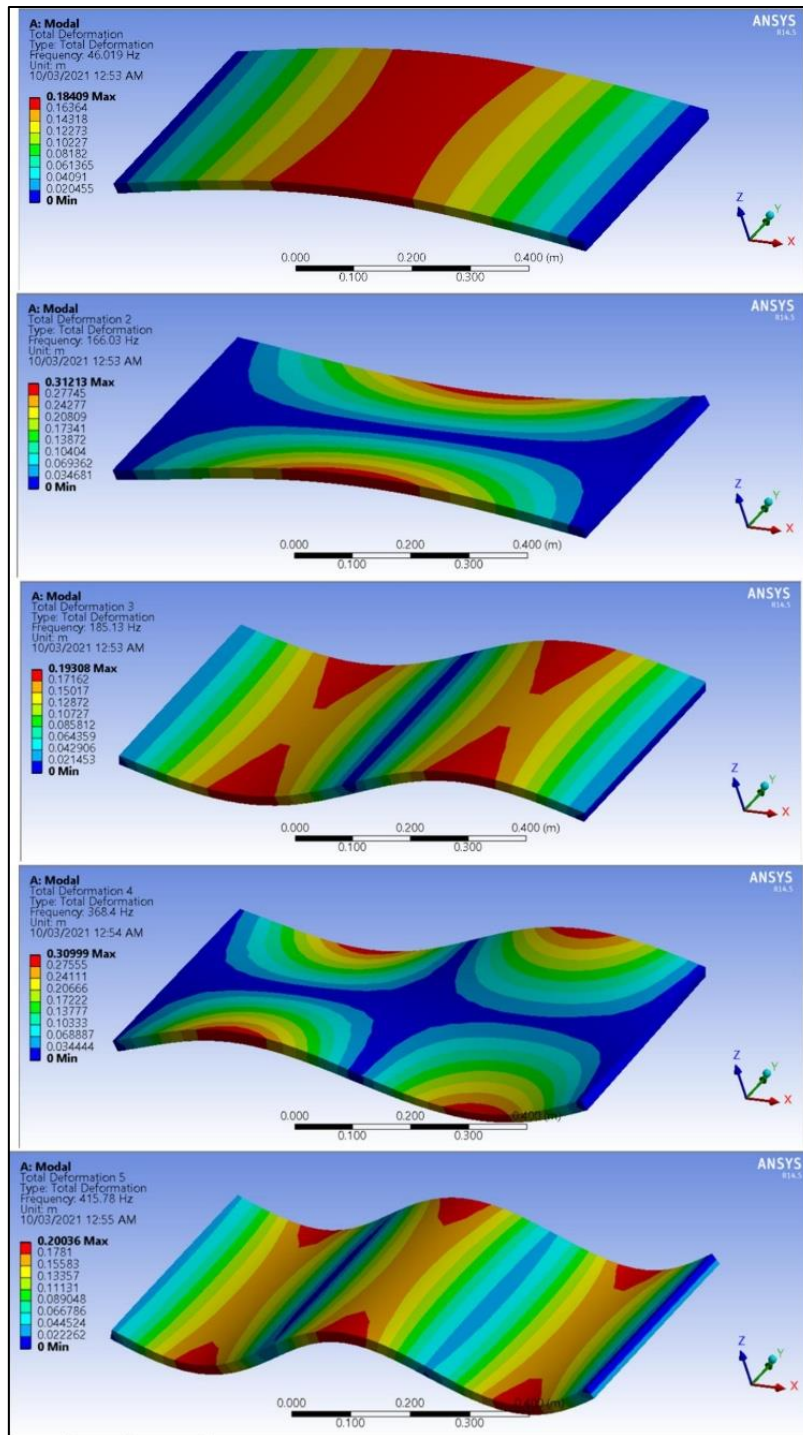


Figura 3 muestra las diferentes formas de los modos de vibración y sus frecuencias naturales mecánicas del actual modelo de placa (SSFF) de ANSYS utilizados para la comparación de resultados [52].

4. MATERIALES Y METODOLOGÍA

4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.

En el ámbito del desarrollo de dispositivos destinados a la recolección de energía a través de vibraciones mecánicas, seleccionar el material piezoeléctrico es un aspecto fundamental para asegurar una conversión efectiva de energía mecánica en energía eléctrica. Históricamente, materiales como el titanato de plomo zirconato (PZT) han sido preponderantes en este campo debido a su elevada constante piezoeléctrica. No obstante, la presencia de plomo plantea una preocupación ambiental y regulatoria en aumento, sobre todo en aplicaciones que buscan ser sostenibles y cumplir con la normativa RoHS [57].

En este capítulo se describen los materiales cerámicos piezoeléctricos seleccionados que no contienen plomo, los cuales sean aptos para usarlos en sistemas microelectromecánicos o nanoestructurados y la metodología aplicada para el análisis mediante el método de elementos finitos (FEM) usando el software de ANSYS Workbench 2025 R2.

Siendo el principal propósito caracterizar el comportamiento mecánico y eléctrico de distintos materiales piezoeléctricos expuestos a vibraciones mecánicas con el objetivo de determinar su capacidad de generación de carga eléctrica inducida. También se detallan propiedades físicas, mecánicas y eléctricas de los materiales seleccionados, condiciones de frontera, mallado, los tipos de análisis efectuados en el software y la configuración de acoplamiento eléctrico-mecánico.

Finalmente se presentarán los resultados y la comparación entre los materiales analizados.

4.2 MATERIALES UTILIZADOS

En base a la literatura científica existente y la eficiencia en la recolección de energía se utilizaron 4 materiales de naturaleza cerámica piezoeléctricos, cada una presenta sus propiedades distintas en rigidez mecánica, coeficientes piezoeléctricos, densidad, módulo de Young, permitividad relativa y coeficiente de Poisson con estos valores permitir una comparación integral de desempeño.

En las siguientes tablas podremos observar los valores de las propiedades mencionadas, los valores son corroborados por artículos científicos publicados de alto impacto.

Titanato de Bario – [BaTiO₃]:

Propiedad	Valores	Referencias
Densidad [ρ]:	5720 kg/m ³	[58],[59]
Rigidez Elástica		
- Módulos de Young [E]:		[58]
EX:	116.8 GPa.	
EY:	116.8 GPa.	
EZ:	116.8 GPa.	
- Coeficiente de Poisson [ν]:		
ν_X:	0.305	
ν_Y:	0.334	
ν_Z:	0.334	
- Módulo de corte [G]:		
GXY:	44.8 GPa.	
GYZ:	42.9 GPa.	
GXZ:	42.9 GPa.	
Permitividad Relativa [ϵ_r]		[58]
ϵ_{r1}:	1268	
ϵ_{r2}:	1268	
ϵ_{r3}:	1419	
Matriz Piezoeléctrica [C/m ²]:		[58]
e15:	11.6	
e31:	-4.38	
e33:	18.6	

Tabla 4 Propiedades del Titanato de Bario considerando una temperatura de 25C.

Nitruro de Aluminio – [AlN]

Propiedad	Valores	Referencias
Densidad [ρ]:	3260 kg/m ³	[60]
Rigidez Elástica		
- Módulos de Young [E]:		[61],[62]
EX:	325 GPa.	
EY:	325 GPa.	
EZ:	345 GPa.	
- Coeficiente de Poisson [ν]:		
ν_X :	0.25	
ν_Y :	0.24	
ν_Z :	0.24	
- Módulo de corte [G]:		
GXY:	130 GPa.	
GYZ:	125 GPa.	
GXZ:	125 GPa.	
Permitividad Relativa [ϵ_r]		[63], [61]
ϵ_{r1} :	8.7	
ϵ_{r2} :	8.7	
ϵ_{r3} :	10.4	
Matriz Piezoeléctrica [C/m ²]:		[64], [65]
e15:	-0.58	
e31:	1.55	
e33:	-0.48	

Tabla 5 Propiedades del Nitruro de Aluminio considerando una temperatura de 25C.

Niobato de Sodio y Potasio – [KNN]

Propiedad	Valores	Referencias
Densidad [ρ]:	4510 kg/m ³	[66], [67]
Rigidez Elástica		
- Módulos de Young [E]:		[68], [69]
EX:	121 GPa.	
EY:	121 GPa.	
EZ:	121 GPa.	
- Coeficiente de Poisson [ν]:		
ν_X :	0.33	
ν_Y :	0.33	
ν_Z :	0.33	
- Módulo de corte [G]:		
GXY:	455 GPa.	
GYZ:	455 GPa.	
GXZ:	455 GPa.	
Permitividad Relativa [ϵ_r]		[68], [69]
ϵ_{r1} :	850	
ϵ_{r2} :	850	
ϵ_{r3} :	850	
Matriz Piezoeléctrica [C/m ²]:		[68], [69]
e15:	-0.58	
e31:	1.55	
e33:	-0.48	

Tabla 6 Propiedades del Niobato de Sodio y Potasio considerando una temperatura de 25C.

Óxido de Zinc – [ZnO]

Propiedad	Valores	Referencias
Densidad [ρ]:	5606 kg/m ³	[70]
Rigidez Elástica		
- Módulos de Young [E]:		[71]
EX:	126.6 GPa.	
EY:	126.6 GPa.	
EZ:	144.2 GPa.	
- Coeficiente de Poisson [ν]:		
ν_X:	0.4386	
ν_Y:	0.2794	
ν_Z:	0.2794	
- Módulo de corte [G]:		
GXY:	44.0 GPa.	
GYZ:	42.0 GPa.	
GXZ:	42.0 GPa.	
Permitividad Relativa [ϵ_r]		[72]
ϵ_{r1}:	7.77	
ϵ_{r2}:	7.77	
ϵ_{r3}:	8.91	
Matriz Piezoeléctrica [C/m ²]:		[73]
e15:	-0.489	
e31:	-0.66	
e33:	1.243	

Tabla 7 Propiedades del Óxido de Zinc considerando una temperatura de 25C.

4.3. GEOMETRÍA.

En las simulaciones, determinar la geometría es importante considerar tres características que garantizan los valores obtenidos, cabe recalcar que la misma geometría fue utilizada en los distintos materiales y bajo las mismas condiciones.

La funcionalidad de la geometría, considerándola primera característica, mantiene una forma de cantiléver; esta topología es la más utilizada para la recolección de energía con piezoeléctricos por sus bajas frecuencias naturales, altas deformaciones promedios y una construcción simple y fácil instrumentación [49].

Considerando un *criterio experimental*, segunda característica, en los análisis en prototipos PZT se consideran dimensiones aproximadas a las utilizadas con una estimulación armónica en baja potencia [74]. También estas características son reflejadas en piezas bimorfas PZT-5H, en actuadores multilámina donde el espesor

presenta distintos rangos de medidas, siendo la industria quien presenta ese “form-factor por desempeño y compatibilidad [75].

Como última característica de la forma de la geometría, podemos considerar las *medidas o el diseño* mismo. Las frecuencias naturales en un primer modo de flexión están entre las decenas o centenas de Hertz, zonas conocidas para las vibraciones ambientales. Una relación de 4:1 – 10:1 permite que el haz se extienda y pueda incrementar su deformación, además un ancho de 10 mm mantenemos una rigidez constante y facilita la cubierta de los electrodos. El espesor usado de 1 mm compromete efectos de capacitancia, campo y acoplamiento [76], [77].

En la figura 4 observamos las dimensiones de 40mm x 10mm x 1mm y forma del cantiléver utilizada. Cabe mencionar que se considera al Eje Z como la dirección de polarización (CS_Poling_Z) figura 5, ubicando los electrodos en las caras laterales paralelas al plano XY y habilitando el modo d_{31}/e_{15} en flexión [75].

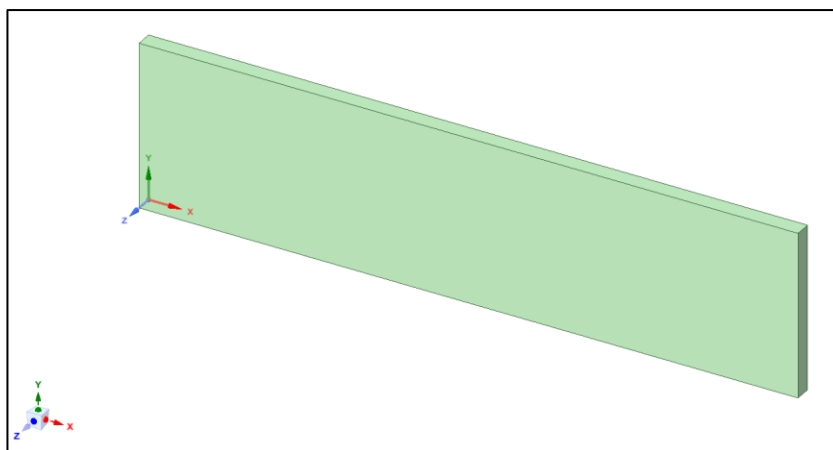


Figura 4 Geometría utilizada con dimensiones de 40mm x 10mm x 1mm. Modelado en SpaceClaim de ANSYS 2025R2

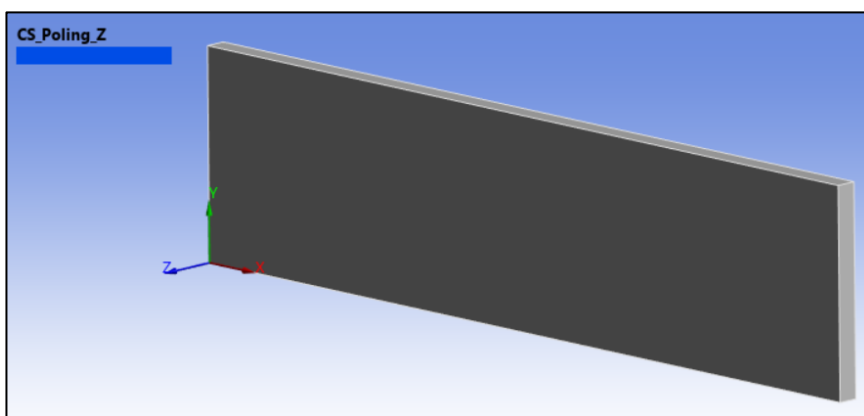


Figura 5 Ubicación del Eje Z como polarización CS_Poling_Z

4.4 MALLADO

Para todos los materiales analizados en este estudio —BaTiO₃, KNN, ZnO y AlN— se utilizó una placa rectangular de **40 mm × 10 mm × 1 mm**, con electrodos ubicados en las caras superior e inferior. Esta configuración geométrica se mantuvo constante con el propósito de garantizar la comparabilidad de los resultados obtenidos en los distintos análisis numéricos.

La discretización del dominio se realizó en el entorno **ANSYS Workbench 2025 R2**, empleando el **método de barrido (Sweep)**. Este método genera una malla estructurada al extruir una malla superficial inicial a lo largo de la dirección del espesor, obteniéndose así **elementos hexaédricos** distribuidos de manera uniforme. Se utilizó el **elemento SOLID226**, correspondiente a un elemento **tridimensional de primer orden (lineal)** con formulación para acoplamiento **estructural-eléctrico**, adecuado para modelar materiales piezoeléctricos. Cada nodo de este elemento posee grados de libertad de desplazamiento (UX, UY, UZ) y potencial eléctrico (VOL), lo que permite simular simultáneamente la respuesta mecánica y eléctrica del material.

En el mallado que se muestra en la figura 6, se definieron **cuatro divisiones a lo largo del espesor (Number of Divisions = 4)**, lo que resultó en **cuatro capas de elementos** entre los electrodos, con un tamaño promedio de elemento de **0.25 mm en la dirección Z**. Esta densidad permitió representar adecuadamente el gradiente del campo eléctrico sin incrementar de forma significativa el tiempo de cálculo.

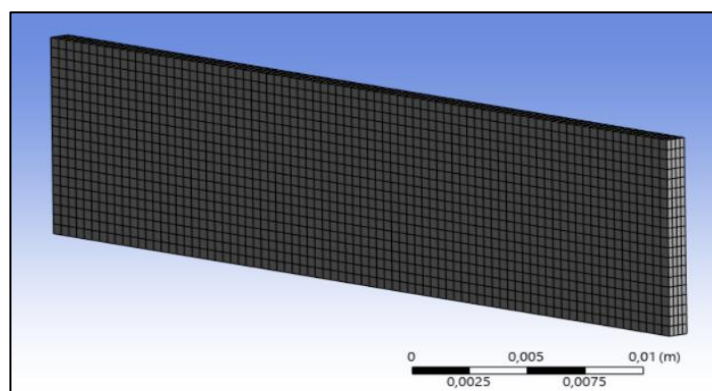


Figura 6 En la figura se observa el número de divisiones y la distribución uniforme en sentido del Eje Z - espesor del Cantiláver

La malla final presentó una distribución estructurada, con una buena relación de aspecto entre elementos y una adecuada continuidad entre capas. La calidad del mallado se verificó mediante los criterios de **skewness < 0.85** y **Jacobian Ratio > 0.5**, asegurando la estabilidad numérica del modelo durante el proceso de solución.

Este mismo esquema de mallado se empleó en los tres tipos de análisis realizados —**modal, coupled field harmonic** y **coupled field harmonic short**—, garantizando coherencia geométrica y comparativa entre los resultados estructurales y eléctricos obtenidos para cada material piezoeléctrico.

En la tabla 8 se especifica valores y características de la malla que se configuro en el entorno de **ANSYS Workbench 2025 R2**.

Características	Valores
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Linear
Number of divisions	4
Element Size	5e-004m
Transition Ratio	0.272
Growth Rate	1.85
Sweepable Body Method	Sweep
Nodes	8505
Elements	6400

Tabla 8 Estos valores generaron un tipo de malla Hexa/prismático con un método Sweep garantizando una malla precisa y ordenada. Al ser una malla de primer orden tendremos en cada arista solo dos nodos en los vértices.

4.5 CONDICIONES DE FRONTERA Y CARGA.

Para el desarrollo de las simulaciones ejecutadas en **ANSYS Workbench 2025 R2**, se establecieron las condiciones de frontera y las cargas necesarias para representar lo más real posible, el comportamiento físico de los materiales piezoeléctricos analizados. Estas configuraciones fueron definidas con el propósito de garantizar la

estabilidad del modelo, evitar desplazamientos rígidos y reproducir de forma adecuada las condiciones de operación bajo las cuales los dispositivos de recolección de energía suelen funcionar. Las condiciones aplicadas se mantuvieron uniformes para todos los materiales y tipos de análisis, permitiendo una comparación directa entre los resultados obtenidos.

En la geometría simulada, correspondiente a una placa rectangular de **40 mm × 10 mm × 1 mm**, se impuso una **restricción mecánica tipo “Fixed Support”** en una de las caras extremas, ubicada en el plano **X = 0** como se muestra en la figura 7. Dicha restricción eliminó los grados de libertad de desplazamiento y rotación en los tres ejes, simulando el punto de sujeción del elemento piezoeléctrico dentro de un sistema estructural fijo. Las demás superficies permanecieron libres, permitiendo la propagación de las vibraciones y la interacción con el campo eléctrico inducido.

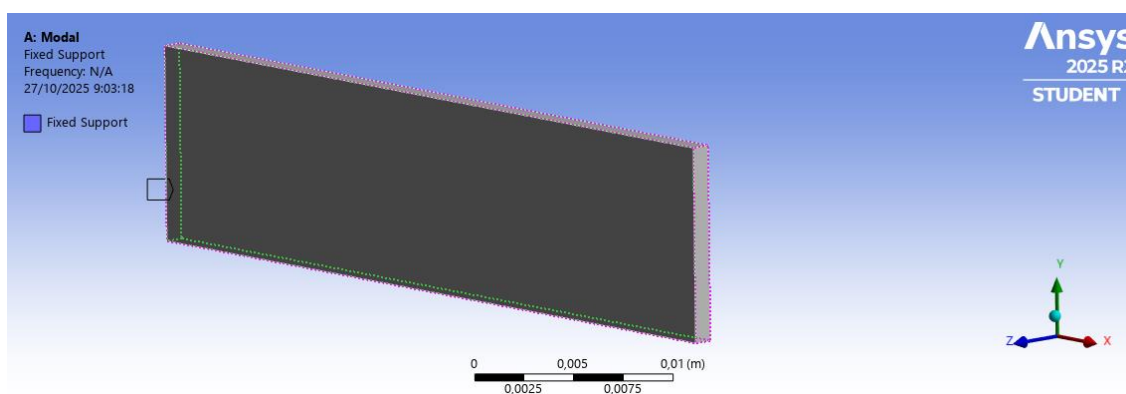


Figura 7 Se muestra la ubicación del Fixed Support en la placa tipo Cantiléver en una posición de $X=0$

4.5.1 ANÁLISIS MODAL.

En el **análisis modal**, no se aplicaron cargas externas, ya que su finalidad fue determinar las **frecuencias naturales de vibración** y los **modos propios** del sistema a partir de las condiciones de frontera establecidas. Se evaluaron los primeros cinco modos de vibración, lo que permitió identificar el rango de frecuencias representativas para los posteriores análisis acoplados.

Se obtuvieron valores representativos de cada material relacionado a la masa efectiva traslacional según las frecuencias identificadas y su energía cinética.

Los resultados se podrán observar en las siguientes figuras identificadas por su material.

Material BaTiO3.

```

***** MODAL MASSES, KINETIC ENERGIES, AND TRANSLATIONAL EFFECTIVE MASSES SUMMARY *****

```

MODE	FREQUENCY	MODAL MASS	KENE		X-DIR	EFFECTIVE MASS					
						RATIO%	Y-DIR	RATIO%	Z-DIR	RATIO%	
1	463.2	0.5685E-03	2407.		0.000	0.00	0.000	0.00	0.1396E-02	61.00	
2	2891.	0.5686E-03	0.9381E+05		0.000	0.00	0.000	0.00	0.4327E-03	18.91	
3	3608.	0.3559E-03	0.9143E+05		0.000	0.00	0.000	0.00	0.7806E-15	0.00	
4	4376.	0.6020E-03	0.2275E+06		0.000	0.00	0.1403E-02	61.34	0.000	0.00	
5	8082.	0.5596E-03	0.7216E+06		0.000	0.00	0.000	0.00	0.1502E-03	6.57	
sum						0.000	0.00	0.1403E-02	61.34	0.1979E-02	86.48

Figura 8 Se observa las frecuencias naturales identificadas en la simulación con el BaTiO3 está en el rango de 463.2 Hz hasta los 8082 Hz. Se identifica la masa con mayor efecto en el eje de polarización de 0.139e-2

Material AlN.

```

***** MODAL MASSES, KINETIC ENERGIES, AND TRANSLATIONAL EFFECTIVE MASSES SUMMARY *****

```

MODE	FREQUENCY	MODAL MASS	KENE		X-DIR	EFFECTIVE MASS					
						RATIO%	Y-DIR	RATIO%	Z-DIR	RATIO%	
1	1018.	0.3248E-03	6643.		0.000	0.00	0.000	0.00	0.7969E-03	61.11	
2	6357.	0.3249E-03	0.2592E+06		0.000	0.00	0.000	0.00	0.2464E-03	18.90	
3	8119.	0.2036E-03	0.2649E+06		0.000	0.00	0.000	0.00	0.2728E-15	0.00	
4	9664.	0.3429E-03	0.6323E+06		0.000	0.00	0.7996E-03	61.32	0.000	0.00	
5	0.1776E+05	0.3211E-03	0.2000E+07		0.000	0.00	0.000	0.00	0.8531E-04	6.54	
sum						0.000	0.00	0.7996E-03	61.32	0.1129E-02	86.55

Figura 9 Se observa las frecuencias naturales identificadas en la simulación con el AlN está en el rango de 1018 Hz hasta los 9664 Hz. Se identifica la masa con mayor efecto en el eje de polarización de 0.796e-3

Material KNN.

```

***** MODAL MASSES, KINETIC ENERGIES, AND TRANSLATIONAL EFFECTIVE MASSES SUMMARY *****

```

MODE	FREQUENCY	MODAL MASS	KENE		X-DIR	EFFECTIVE MASS					
						RATIO%	Y-DIR	RATIO%	Z-DIR	RATIO%	
1	532.3	0.4477E-03	2504.		0.000	0.00	0.000	0.00	0.1099E-02	60.95	
2	3322.	0.4477E-03	0.9752E+05		0.000	0.00	0.000	0.00	0.3413E-03	18.92	
3	4102.	0.2801E-03	0.9306E+05		0.000	0.00	0.000	0.00	0.7864E-15	0.00	
4	5015.	0.4748E-03	0.2358E+06		0.000	0.00	0.1107E-02	61.36	0.000	0.00	
5	9290.	0.4397E-03	0.7491E+06		0.000	0.00	0.000	0.00	0.1187E-03	6.58	
sum						0.000	0.00	0.1107E-02	61.36	0.1559E-02	86.45

Figura 10 Se observa las frecuencias naturales identificadas en la simulación con el KNN está en el rango de 532.3 Hz hasta los 9290 Hz. Se identifica la masa con mayor efecto en el eje de polarización de 0.109e-2

Material ZnO.

***** MODAL MASSES, KINETIC ENERGIES, AND TRANSLATIONAL EFFECTIVE MASSES SUMMARY *****										
MODE	FREQUENCY	MODAL MASS	KENE		X-DIR	EFFECTIVE MASS				
						RATIO%	Y-DIR	RATIO%	Z-DIR	RATIO%
1	494.3	0.5540E-03	2672.		0.000	0.00	0.000	0.00	0.1362E-02	60.69
2	3080.	0.5539E-03	0.1037E+06		0.000	0.00	0.000	0.00	0.4258E-03	18.98
3	3632.	0.3461E-03	0.9015E+05		0.000	0.00	0.000	0.00	0.2360E-14	0.00
4	4597.	0.5915E-03	0.2468E+06		0.000	0.00	0.1379E-02	61.44	0.000	0.00
5	8624.	0.5396E-03	0.7921E+06		0.000	0.00	0.000	0.00	0.1492E-03	6.65
sum					0.000	0.00	0.1379E-02	61.44	0.1937E-02	86.32

Figura 11 Se observa las frecuencias naturales identificadas en la simulación con el ZnO está en el rango de 494.3 Hz hasta los 8624 Hz. Se identifica la masa con mayor efecto en el eje de polarización de 0.136e-2

4.5.2 ANÁLISIS COUPLED FIELD HARMONIC.

Para el análisis acoplado armónico se utilizó la misma geometría rectangular de $40 \times 10 \times 1$ mm aplicado en todo el proyecto, manteniendo el eje de polarización orientado en la dirección **+Z**, correspondiente al espesor del material. Este análisis tuvo como objetivo estudiar la interacción entre los campos estructural y eléctrico bajo excitaciones mecánicas armónicas, reproduciendo condiciones dinámicas reales de vibración.

Como primera condición de frontera fue el soporte mecánico **Fixed Support** restringiendo el desplazamiento de la cara inferior en $X=0$, con el objetivo de simular el anclaje o sujeción del dispositivo piezoeléctrico en un punto fijo, evitando traslación o rotación en dicha cara. Se aplicó una excitación mecánica en la cara superior (**Face_Z_Plus Acceleration**) esta aceleración armónica de magnitud de 1 g equivalente a $9,81 \text{ m/s}^2$ en sentido del espesor y polarización **+Z**, normal al plano de superficie.

Se determinó el valor de 1 g por dos motivos; primero permite obtener una respuesta representativa dentro del régimen lineal del material, evitando efectos no lineales o de saturación. Y segundo, facilita la comparación con otros estudios experimentales y numéricos en los que se adopta esta magnitud como referencia estándar para evaluar la sensibilidad piezoeléctrica frente a aceleraciones mecánicas controladas.

Para la excitación se estableció un rango de barrido en frecuencias (*frequency sweep*) centrado en la frecuencia con mayor masa modal efectiva, obtenido en el análisis Modal. De este modo, se identificaron los valores máximos de desplazamiento y voltaje inducido, garantizando una caracterización completa del comportamiento armónico del material.

En condiciones eléctricas, se asignó un potencial de referencia de **0 V Voltage Ground** en la cara inferior (*face_Z_Minus*), generando un campo eléctrico transversal al espesor del material; esta configuración reproduce el comportamiento típico de un elemento piezoeléctrico polarizado, permitiendo medir la respuesta eléctrica inducida por la deformación mecánica.

Sobre el sistema de coordenadas y orientación, se utilizó un sistema de coordenadas denominado **CS_Poling_Z**, donde el eje **Z** se alinea con la dirección de polarización del material, asegurando que las constantes piezoeléctricas d_{33} y e_{33} correspondan al eje de espesor, coherente con el modo de vibración dominante.

Para finalizar el análisis Coupled Field Harmonic, se introdujeron **APDL Commands** adicionales en **ANSYS Workbench 2025 R2** para establecer condiciones paramétricas del análisis armónico (frecuencia inicial, final e intervalos), automatizar la extracción de resultados eléctricos como el desplazamiento dieléctrico (D_z) y el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y asegurar el acoplamiento correcto entre los grados de libertad estructurales (UX, UY, UZ) y eléctricos (VOLTS) durante la resolución del modelo.

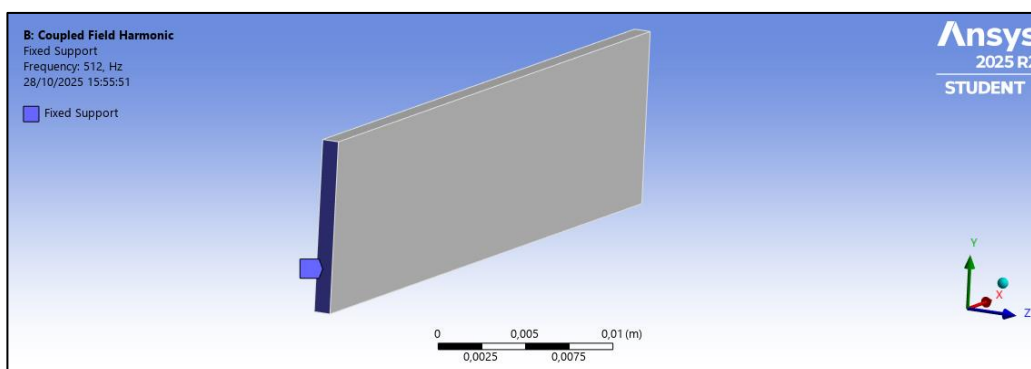


Figura 12 **Fixed Support**. Se observa el punto de anclaje de la placa para los análisis Couple Field Harmonic. Ubicada en $X=0$

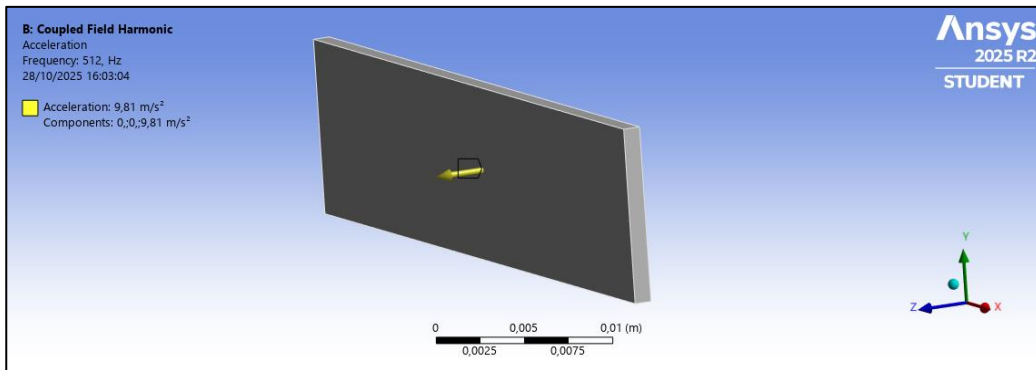


Figura 13 **Acceleration**. En esta figura se puede observar cómo es aplicada la excitación equivalente a 1g sobre la cara Face_Z_Plus

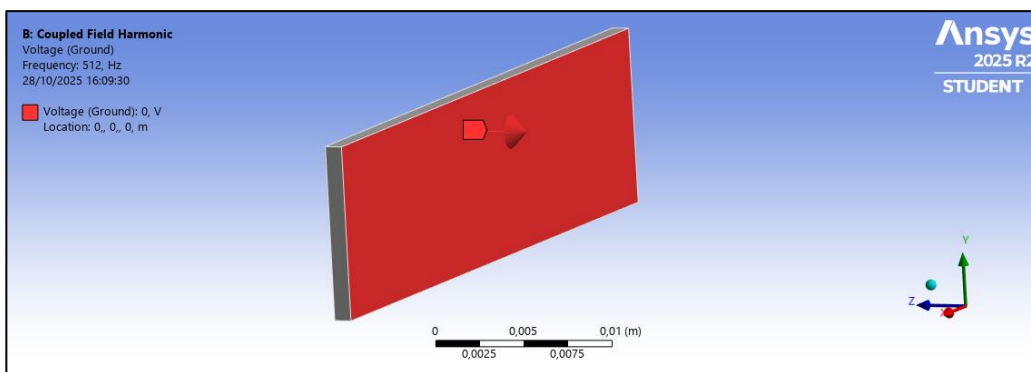


Figura 14 **Voltage Ground**. Se observa que en la cara inferior de la placa Face_Z_Minus, se tiene el potencial de referencia igual a 0 voltios

```

Commands
1  ! Commands inserted into this file will be executed just prior to the ANSYS SOLVE command.
2  ! These commands may supersede command settings set by Workbench.
3
4  ! Active UNIT system in Workbench when this object was created: Metric (m, kg, N, s, V, A)
5  ! NOTE: Any data that requires units (such as mass) is assumed to be in the consistent solver unit system.
6  ! See Solving Units in the help system for more information.
7
8
9  ! Make top electrode equipotential (Face_Z_Plus)
10 CMSEL,S,Face_Z_Plus
11 *GET,NCOUNT,NODE,0,COUNT
12 *IF,NCOUNT,GT,0,THEN
13   N,900001
14   CP,1000,VOLT,900001,ALL
15 *ENDIF
16 ALLSEL,ALL
17
18 ! Ground bottom electrode (Bot_Z_Minus)
19 CMSEL,S,Bot_Z_Minus
20 *GET,NREF,NODE,0,NUM,MAX
21 D,NREF,VOLT,0
22 ALLSEL,ALL
23
24
  
```

Figura 15 Línea de comando para refinar y automatizar los valores de desplazamiento dieléctrico Dz y el voltaje en circuito abierto Voc

4.5.3 ANÁLISIS COUPLED FIELD HARMONIC- SHORT

El análisis acoplado armónico en condición de cortocircuito tuvo como finalidad evaluar la respuesta electro-mecánica de los materiales piezoeléctricos bajo excitación armónica cuando ambos electrodos se encuentran conectados

eléctricamente, es decir, cuando el potencial entre las caras opuestas del material se anula. Este tipo de estudio permite determinar el comportamiento del material bajo condiciones de *short circuit*, complementando la información obtenida en el análisis ***Coupled Field Harmonic*** (en circuito abierto). El eje de polarización y orientación (CS_Poling_Z) sigue siendo el mismo, mismo mallado y la geometría también es la misma (Cantiléver de 40x10x1 mm). De esta manera, el voltaje inducido tiende a cero y la carga eléctrica generada se descarga de forma inmediata, permitiendo analizar la **densidad de flujo de desplazamiento eléctrico (D)** y la **capacidad del material para generar corriente alterna** en respuesta a una excitación mecánica periódica.

La excitación armónica se aplicó en la **cara superior del material**, con una **aceleración de 1 g (9.81 m/s²)** en dirección **+Z**, correspondiente al eje de polarización del material. Esta condición reproduce el efecto de una vibración mecánica controlada sobre el dispositivo piezoeléctrico. La **cara inferior** se fijó mediante la condición de *Fixed Support*, representando la restricción física del sistema en su base. En cuanto a las condiciones eléctricas, se estableció un **cortocircuito total entre los electrodos**, asignando un potencial eléctrico de 0 V tanto en la cara superior como en la inferior del modelo, lo que garantiza la ausencia de acumulación de carga en el volumen del material.

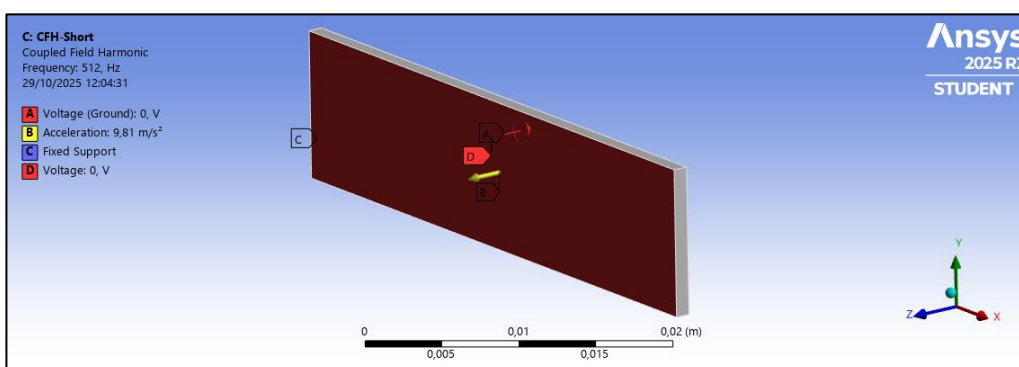


Figura 16 Se puede visualizar las condiciones de frontera establecidas en este análisis. A: Voltaje en la cara Face_Z_minus (cara posterior). B: Excitación aplicando 1 g (cara frontal). C: Anclaje X=0. D: Voltaje inducido en la cara superior

Durante el proceso de simulación, se utilizó el rango de frecuencia centrado en la **frecuencia de mayor masa efectiva obtenida del análisis modal**, subdividido en 20 intervalos armónicos con el fin de observar el comportamiento dinámico del

sistema en torno a la resonancia. El análisis permitió obtener la **densidad de desplazamiento eléctrico (Dz)** en el eje de polarización, expresada en C/m^2 , junto con el **desplazamiento armónico total** del sólido. Los valores obtenidos se encontraron dentro del orden de $10^{-10} C/m^2$, lo cual se considera coherente con los rangos reportados en materiales cerámicos piezoeléctricos excitados por vibraciones de baja amplitud [8] [78].

La realización del análisis *Coupled Field Harmonic Short* fue fundamental para validar el comportamiento acoplado electro–mecánico del modelo FEM y establecer la relación entre las condiciones de *open circuit* y *short circuit*, las cuales representan los límites eléctricos de operación de un material piezoeléctrico. Este procedimiento permitió cuantificar la respuesta del material cuando la energía eléctrica no se acumula, sino que se descarga instantáneamente, proporcionando información esencial sobre su capacidad de conversión de energía mecánica en corriente alterna. Asimismo, los resultados obtenidos sirvieron como base para el posterior análisis comparativo entre materiales y la evaluación de su desempeño en aplicaciones de **recolección de energía por vibraciones mecánicas (vibration energy harvesting)** [79], [80].

4.6 CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS ANSYS

Para el desarrollo de las simulaciones multifísicas se empleó el software ANSYS Workbench versión 2025 R2, el cual permite el acoplamiento directo entre los dominios estructural y eléctrico mediante el módulo Piezoelectric Analysis (Coupled Field). La configuración del modelo se orientó a evaluar la respuesta dinámica y piezoeléctrica de los materiales seleccionados bajo condiciones armónicas, siguiendo una secuencia estructurada de tres etapas:

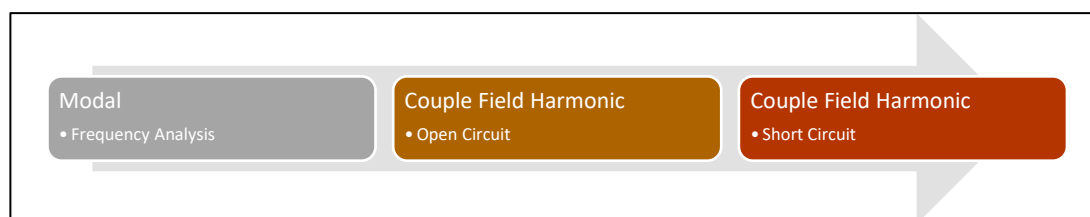


Figura 17 Proceso de análisis realizado con cada uno de los materiales

Cada simulación empleó la misma geometría, dimensiones y mallado, garantizando la comparabilidad entre materiales. El proceso de configuración se dividió según el tipo de análisis y las variables físicas involucradas.

4.6.1 CONFIGURACIÓN ANÁLISIS MODAL

El análisis modal fue la primera etapa del procedimiento numérico. Su objetivo fue determinar las frecuencias naturales y modos de vibración del sistema. En esta etapa únicamente se estudió el comportamiento mecánico, el modelo empleó el elemento finito **SOLID185**, correspondiente a un sólido tridimensional con tres grados de libertad por nodo (UX, UY, UZ). Este elemento es adecuado para representar vibraciones estructurales sin requerir acoplamiento eléctrico.

Se configuró el **solver** modal para obtener las cinco primeras frecuencias naturales del sistema, verificando la coherencia de los modos de vibración con la dirección de polarización del material. De los resultados obtenidos se ubicó la frecuencia con mayor masa efectiva utilizando en los siguientes análisis armónicos.

Se detalla a continuación la configuración utilizada en el proceso **Modal**.

Details of “SYS\Solid”

Definition

- Suppressed: No
- Stiffness Behavior: Flexible
- Coordinate System: CS_Poling_Z
- Material.
- Assignment: (material usado en cada análisis)

Details of “CS Polig Z”

Origin

- Define by: Geometry Selection
- Origin X: 0 m
- Origin Y: 0 m
- Origin Z: 1e-3 m

Principal Axis

- Axis: Z
- Define By: Geometry Selection
- Geometry: Face_Z_Plus

Orientation About Principal Axis

- Axis: X
- Define By: Geometry Selection
- Geometry: Arista sobre el Eje X

Named Selection

Statistics

- Named Selection: 4

Se crearon los siguientes Named Selection:

- Clamp: Punto de anclaje.
- Face_Z_Plus: Cara frontal del Cantiléver.
- Face_Z_Minus: Cara posterior del Cantilever
- Free_End: Cara frontal al anclaje.

Details of “Mesh”

Defaults

- Physics Preference: Mechanical
- Element Order: Linear
- Element Size: 5,e004 m

Sizing

- Growth Rate: 1,85
- Max Size: 1,e003 m

Automatic Methods

- Sheet Body Method: Prime Quad Dominant
- Sweepable Body Method: Sweep

Statistics

- Nodes: 8505
- Elements 6400

Edge Sizing

Scope

- Scoping Method: Geometry Selection
- Geometry: 1 Edge (arista en sentido del espesor)

Definition

- Suppressed: No
- Type: Number of Division
- Number of División: 4

Advanced

- Behavior: Hard

Details of “Modal”

Definition

- Physics Type: Structural
- Analysis Type: Modal
- Solver Target: Mechanical APDL

Analysis Setting

Options

- Max Modes of Find: 5

4.6.2 ANÁLISIS ACOPLADO ARMÓNICO (COUPLED FIELD HARMONIC)

El segundo análisis correspondió al estudio acoplado estructural–eléctrico bajo excitación dinámica armónica. En este caso, se utilizó el elemento finito **SOLID226**, que incorpora grados de libertad estructurales (UX, UY, UZ) y eléctricos (VOLTS), lo que permite resolver simultáneamente las ecuaciones constitutivas del acoplamiento piezoeléctrico directo e inverso.

El análisis se vinculó directamente con los resultados modales para considerar los efectos de resonancia. La excitación se definió como una **aceleración armónica** de 1 g aplicada en la **dirección del espesor (+Z)**, centrada en torno a la frecuencia modal dominante, con un número determinado de intervalos de 20, para garantizar una adecuada resolución espectral.

El sistema de coordenadas se fijó en el eje de polarización (**CS_Poling_Z**), con el fin de representar correctamente la generación de carga eléctrica inducida por esfuerzos mecánicos. Antes de realizar el Solve del análisis se ingresó un Commands (APDL) para garantizar los valores finales. Este análisis permitió obtener magnitudes como la **diferencia de potencial inducida (Voc)** y la **densidad de flujo eléctrico (Dz)**, parámetros clave para caracterizar la eficiencia de conversión piezoeléctrica bajo vibraciones armónicas.

Los parámetros de **Geometry, Coordinate Systems, Mesh, Named Selection** no fueron alteradas para que los resultados tengan relación entre los análisis. Se detalla a continuación la configuración utilizada en el proceso **Coupled Field Harmonic (open circuit)**.

Details of “Coupled Field Harmonic (B5)”

Physics Definition

- Structural: Yes
- Acoustics: No
- Electric: Yes

Definition

- Analysis Type: Harmonic Response
- Solver Target: Mechanical APDL

Details of “Analysis Settings”

Step Controls

- Multiple Step: No

Options

- Frequency Spacing: Linear
- Range Minimum: - 10 Hz de la frecuencia seleccionada
- Range Maximum: + 10 Hz de la frecuencia seleccionada
- Solution Intervals: 20

Output Controls

- Stress: Yes
- Back Stress: No
- Strain: Yes
- Nodal Forces: No
- Volumen and Energy: Yes
- Euler Angles: Yes

Damping Controls

- Constant Structural Damping Coefficient: 2,e-002
- Stiffness Coefficient: 4,e-002

Details of “Physics Region”

Scope

- Scoping Method: Geometry Selection
- Geometry: All Bodies

Definition

- Structural: Yes
- Acoustics: No
- Electric: Charge
- Suppressed: No

Coupling Options

- Piezoelectric: On

Details of “Acceleration”

Scope

- Geometry: All Bodies

Definition

- Base Excitation: No
- Define By: Components
- Coordinate System: CS_Poling_Z
 - X Component: 0 m/s²
 - Y Component: 0 m/s²
 - Z Component: 9,81 m/s²

Details of “Voltage (Ground)”

Scope

- Scoping Method: Named Selection
- Named Selection: Bot_Z_Minus

Definition

- Type: Voltage (Ground)
- Magnitude: 0,V
- Suppressed: No

Details of “Commands (APDL)”

Line of commands:

! Make top electrode equipotential
(Face_Z_Plus)

```
CMSEL,S,Face_Z_Plus
```

```
*GET,NCOUNT,NODE,0,COUNT
```

```
*IF,NCOUNT,GT,0,THEN
```

```
  N,900001
```

```
  CP,1000,VOLT,900001,ALL
```

```
*ENDIF
```

```
ALLSEL,ALL
```

! Ground bottom electrode (Bot_Z_Minus)

```
CMSEL,S,Bot_Z_Minus
```

```
*GET,NREF,NODE,0,NUM,MAX
```

```
D,NREF,VOLT,0
```

```
ALLSEL,ALL
```

4.6.3 ANÁLISIS ACOPLADO ARMÓNICO EN CORTOCIRCUITO (COUPLED FIELD HARMONIC-SHORT)

Finalmente, se realizó el análisis **Coupled Field Harmonic-Short**, propuesto a representar la condición de **cortocircuito eléctrico entre electrodos**, con el objetivo de determinar la **densidad de carga superficial inducida (C/m^2)** bajo las mismas condiciones dinámicas.

En esta etapa también se utilizó el elemento **SOLID226**, manteniendo la excitación mecánica de **1 g en dirección +Z**, pero estableciendo potencial cero entre electrodos (*condición short-circuit*). Esta configuración es empleada en la literatura para estimar la respuesta eléctrica de materiales piezoeléctricos sometidos a vibraciones y validar su comportamiento de acoplamiento directo [49], [81]. El **solver** se ejecutó bajo los mismos parámetros de discretización y convergencia utilizados en los

análisis anteriores, asegurando la consistencia numérica entre los distintos materiales simulados (BaTiO_3 , KNN, ZnO y AlN).

Los parámetros de **Analysis Setting**, **Physics Region**, **Acceleration**, **Voltage (Ground)**, **Fixes Support** tienen los mismos utilizados en Coupled Field Harmonic. Se detalla a continuación la configuración utilizada en el proceso **Coupled Field Harmonic (short circuit)**.

Details of “Voltage”

Scope

- Scoping Method: Named Selection
- Named Selection: Face_Z_Plus

Definition

- Type: Voltage
- Magnitude: 0V
- Phase Angle: 0°
- Suppressed: No

Details of “Commands (APDL)”

Line of commands:

```
! Short-circuit: set 0 V on Face_Z_Plus  
CMSEL,S,Face_Z_Plus  
D,ALL,VOLT,0  
ALLSEL,ALL
```

```
! Ground bottom electrode  
CMSEL,S,Bot_Z_Minus  
*GET,NREF,NODE,0,NUM,MAX  
D,NREF,VOLT,0  
ALLSEL,ALL
```

4.7 PROCEDIMIENTO METODOLÓGICO.

El procedimiento del análisis en cada uno de los materiales se detalla en el siguiente esquema o flujo de trabajo, figura 18.

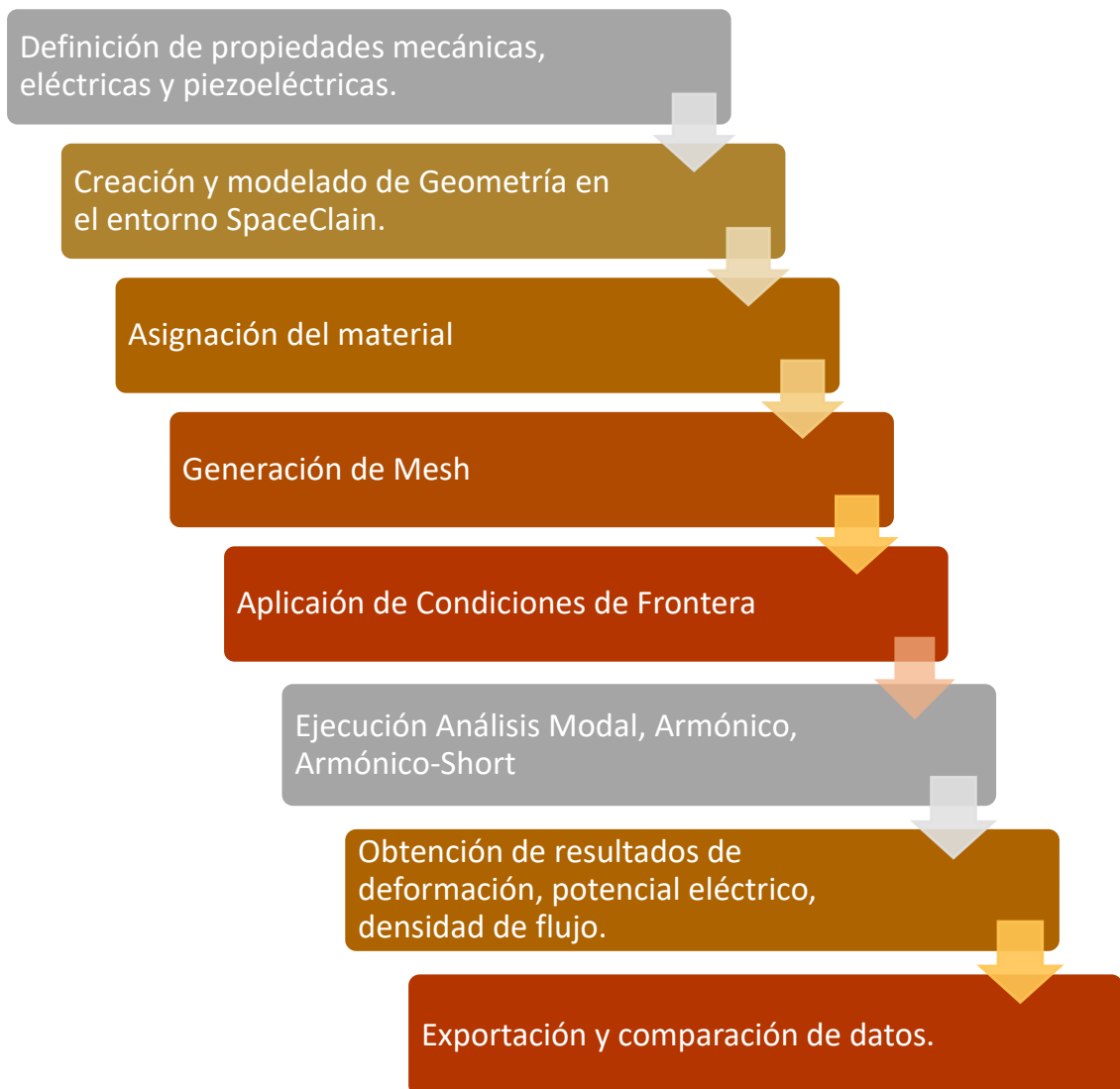


Figura 18 Flujo de trabajo realizado en el análisis de los materiales y sus resultados obtenidos

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este último capítulo se expone y analiza los resultados obtenidos en las diferentes simulaciones por el método de elementos finitos FEM, realizadas sobre los materiales piezoeléctricos seleccionados: Titanato de Bario [BaTiO₃], Nitruro de Aluminio [AlN], Niobato de Sodio y Potasio [KNN] y Oxido de Zinc [ZnO].

El propósito de este capítulo es presentar y evaluar comparativamente el comportamiento dinámico y electrostático de dichos materiales cuando son sometidos a vibraciones mecánicas controladas, elemento esencial para la recolección de energía – *energy harvesting*. Para lograr este objetivo, se desarrollaron tres tipos de análisis en el entorno **ANSYS Workbench 2025 R2**, que permitieron estudiar el comportamiento de los materiales bajo distintas condiciones de carga y frontera:

1. **Análisis modal**, con el objetivo de identificar las **frecuencias naturales y modos de vibración** más representativos de cada material.
2. **Análisis acoplado armónico (Coupled Field Harmonic)**, aplicado para evaluar la **respuesta eléctrica inducida** bajo una excitación mecánica armónica de **1 g (9,81 m/s²)** en dirección normal al espesor del material (**+Z**), con las superficies superior e inferior definidas como electrodos.
3. **Análisis acoplado armónico corto (Coupled Field Harmonic Short)**, que simula la **condición de cortocircuito eléctrico**, permitiendo determinar la **densidad de flujo eléctrico (D)** y el **comportamiento de carga inducida** en función de la frecuencia excitada.

Los resultados finales de cada análisis fueron procesados y se presentan en imágenes, tablas y gráficas que permiten visualizar la distribución de deformaciones, modos de frecuencia y potenciales eléctricos de cada material cerámico usado. A

partir de esos resultados se realiza un cuadro comparativo en base a las propiedades mecánicas, dieléctricas y piezoeléctricas reportada en la literatura científica existente, con la finalidad de establecer una correlación entre las características intrínsecas de cada material y su desarrollo como recolectores de energía.

Como paso final, se presentará que material desarrolla mejores propiedades piezoeléctricas, contribuyendo con información útil para el diseño de dispositivos piezoeléctricos funcionales mediante la optimización de materiales nanoestructurados destinados a la recolección de energía mediante vibraciones mecánicas.

5.1 RESULTADOS ANÁLISIS MODAL

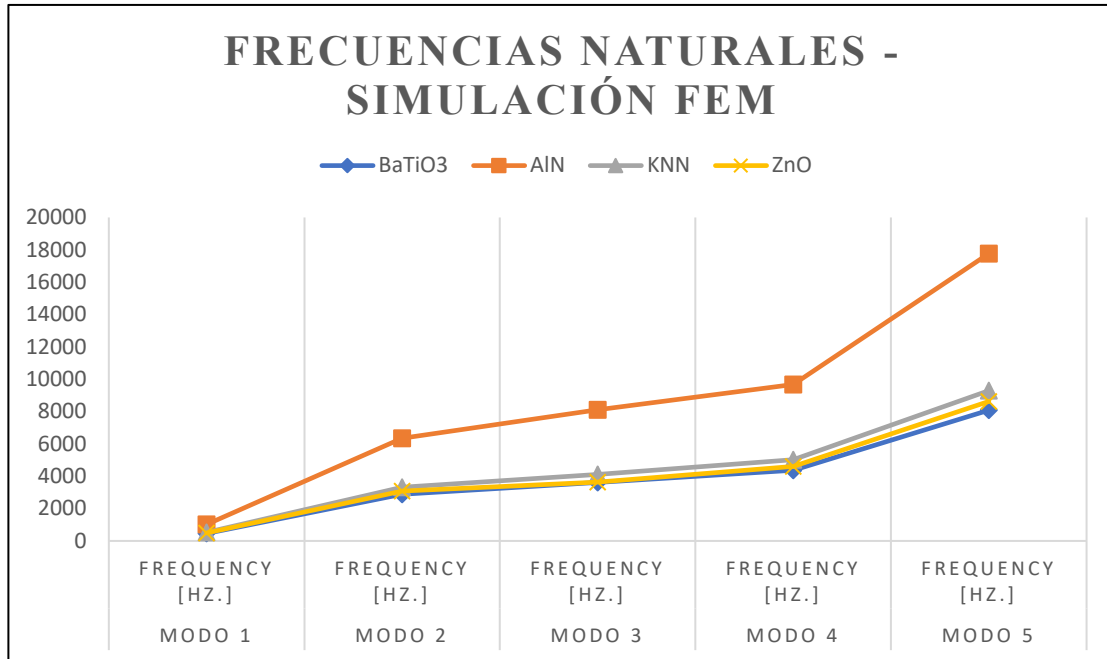
En el Análisis Modal se obtuvieron las **Frecuencias Naturales** y los **Modos De Vibración Predominantes** con cada uno de los materiales usados en las simulaciones, recordemos que los materiales fueron: BaTiO₃, AlN, KNN y el ZnO. Este tipo de análisis es importante, ya que las frecuencias propias de la estructura determinan las condiciones en las que puede producirse **resonancia mecánica** y, por tanto, una **máxima conversión de energía mecánica en energía eléctrica**.

Además, se recalca que el modelo geométrico, en sus dimensiones, es el mismo en todos los análisis y materiales usados, de manera que las diferencias observadas en la tabla 9, en los resultados modales se atribuyen directamente a las propiedades mecánicas y físicas intrínsecas de cada material (densidad, módulo elástico, coeficiente piezoeléctrico).

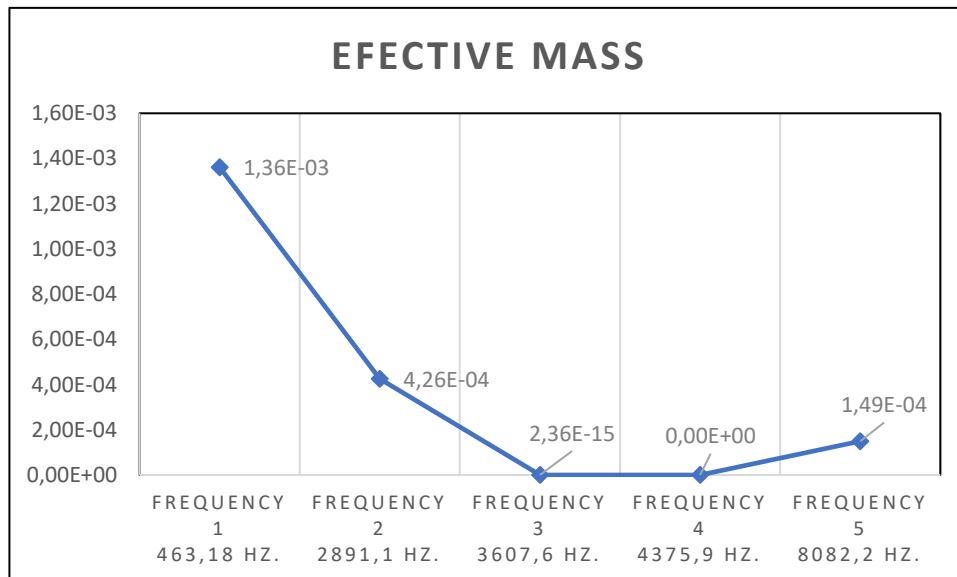
MATERIAL CERÁMICO	MODO 1 FREQUENCY [HZ.]	MODO 2 FREQUENCY [HZ.]	MODO 3 FREQUENCY [HZ.]	MODO 4 FREQUENCY [HZ.]	MODO 5 FREQUENCY [HZ.]
BATIO ₃	463,18	2891,1	3607,6	4375,9	8082,2
ALN	1018	6357,4	8119,2	9664,4	17763
KNN	532,29	3321,7	4102,4	5015,4	9290,1

ZNO		494,34	3080,2	3632,5	4597	8623,9
------------	--	--------	--------	--------	------	--------

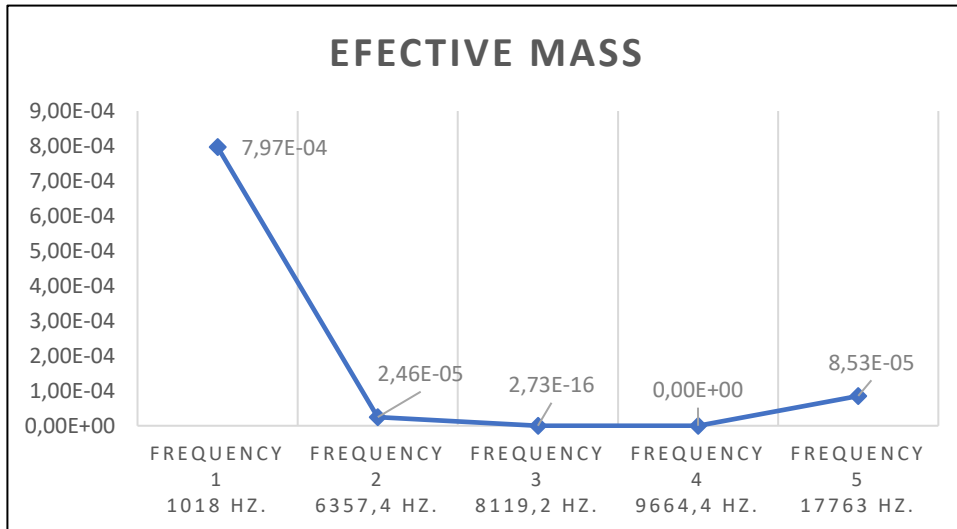
Tabla 9 Se observan los 5 valores de frecuencias naturales identificadas en el análisis Modal. Simulación FEM, realizado en ANSYS Workbench 2025 R2.



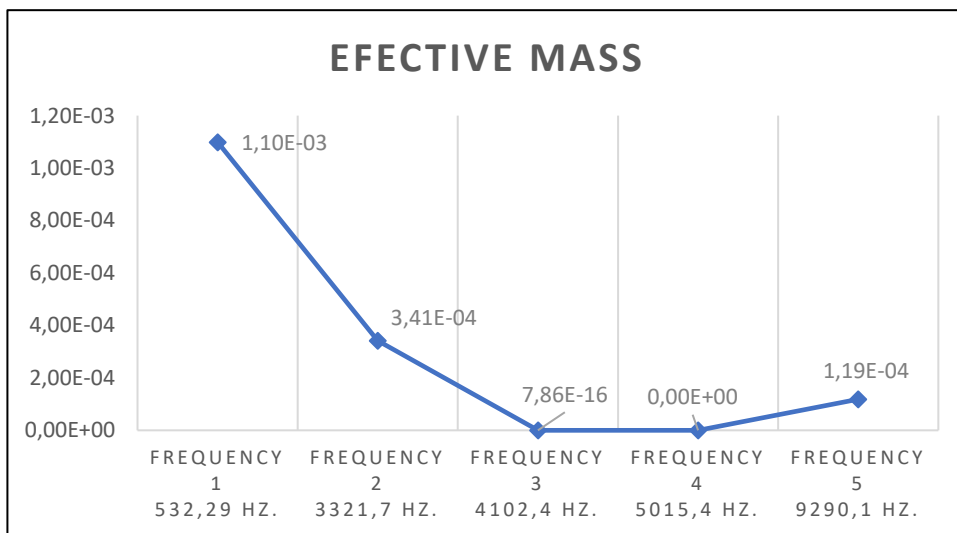
Gráfica 1 Gráfica comparativa entre materiales y sus frecuencias naturales identificadas



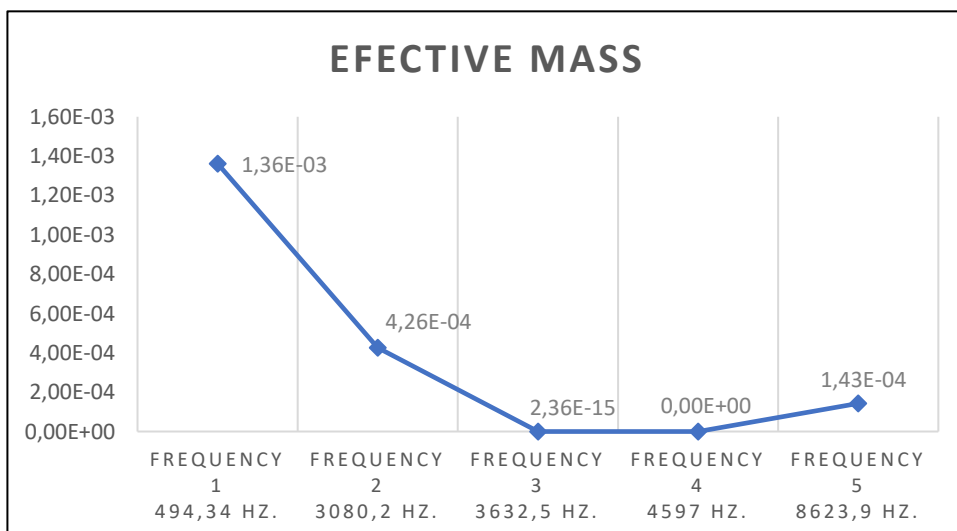
Gráfica 2 Cantidad de masa efectiva con carga orientada a +Z. Datos obtenidos en simulación Modal - BaTiO3 - ANSYS Workbench 2025 R2



Gráfica 3 Cantidad de masa efectiva con carga orientada a +Z. Datos obtenidos en simulación Modal - AIN - ANSYS Workbench 2025 R2



Gráfica 4 Cantidad de masa efectiva con carga orientada a +Z. Datos obtenidos en simulación Modal - KNN - ANSYS Workbench 2025 R2



Gráfica 5 Cantidad de masa efectiva con carga orientada a +Z. Datos obtenidos en simulación Modal - ZnO - ANSYS Workbench 2025 R2

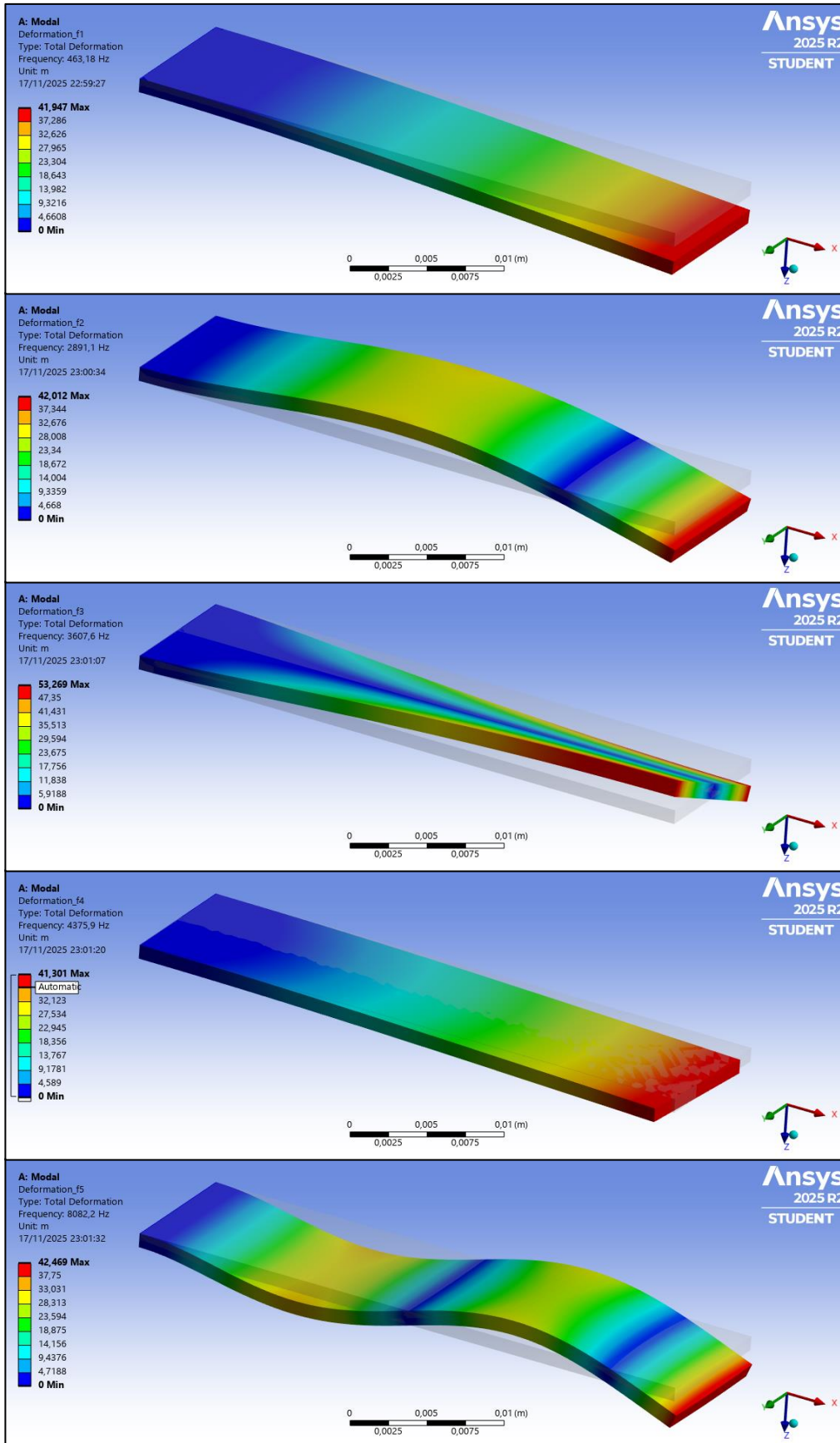


Figura 19 Deformación del BaTiO3 en sus principales frecuencias naturales reconocidas. Frecuencia de mayor masa efectiva f1: 463.18Hz.

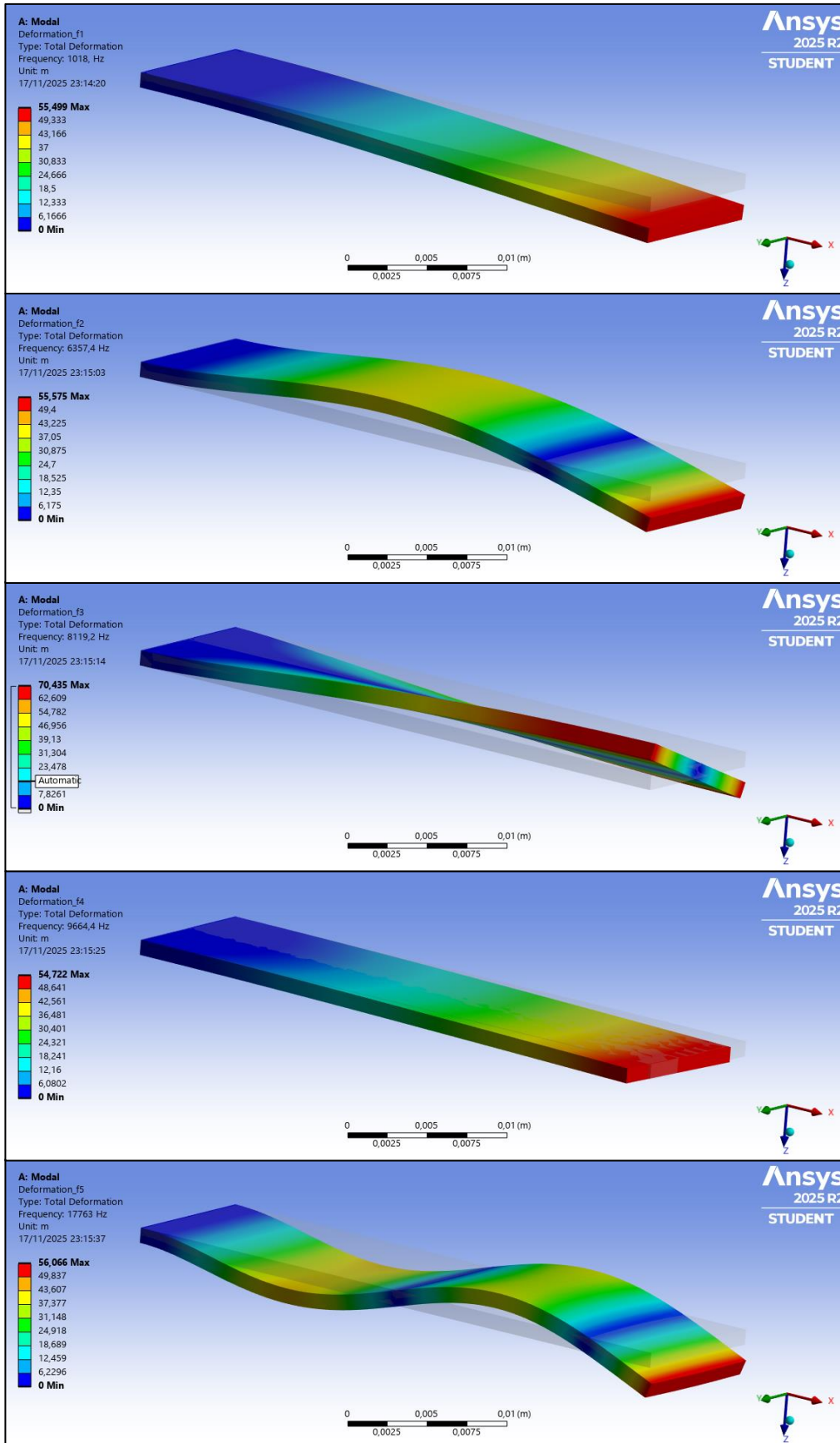


Figura 20 Deformación del AIN en sus principales frecuencias naturales reconocidas. Frecuencia de mayor masa efectiva f1: 1018Hz.

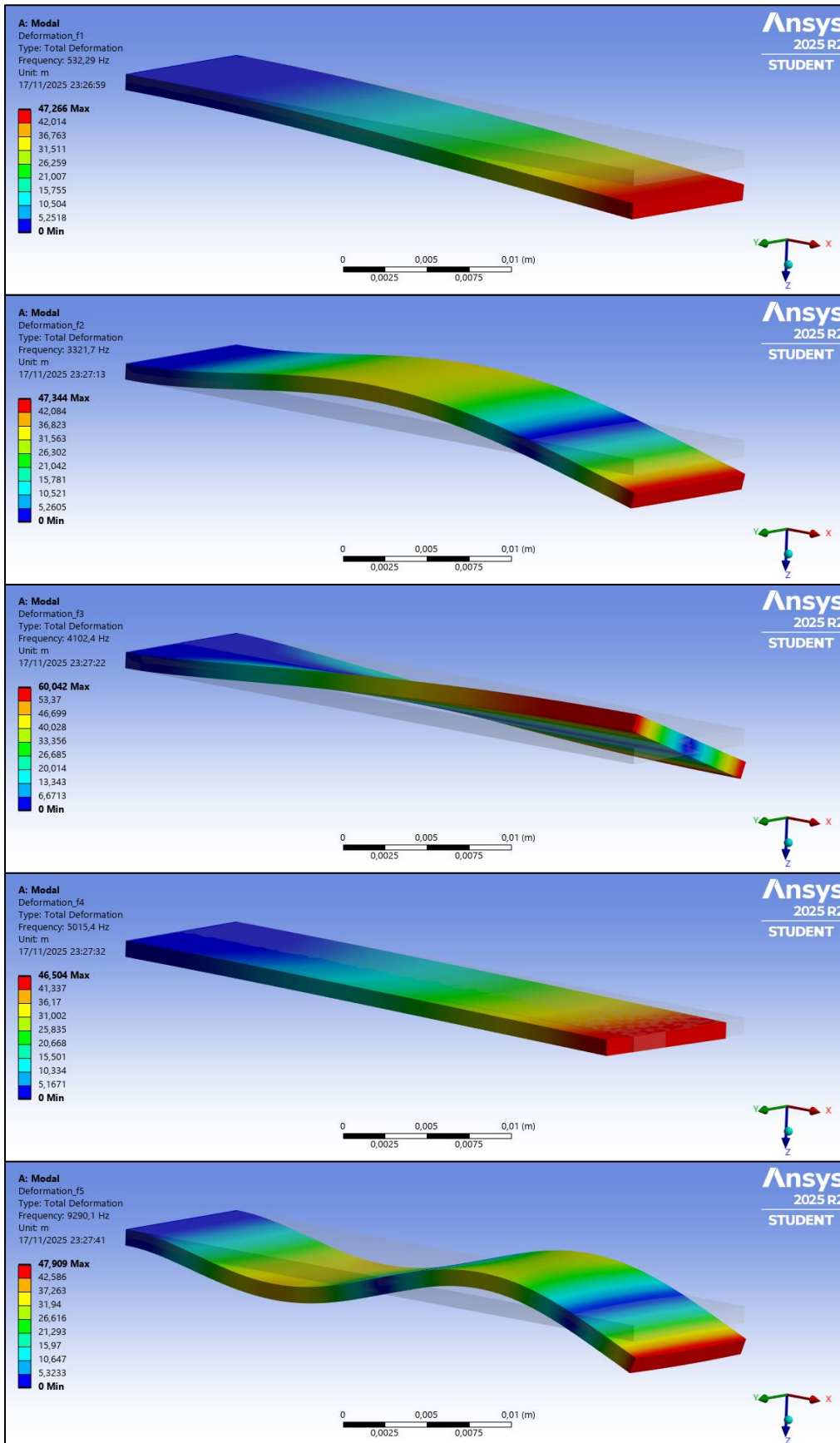


Figura 21 Deformación del KNN en sus principales frecuencias naturales reconocidas. Frecuencia de mayor masa efectiva f_1 : 532,29Hz.

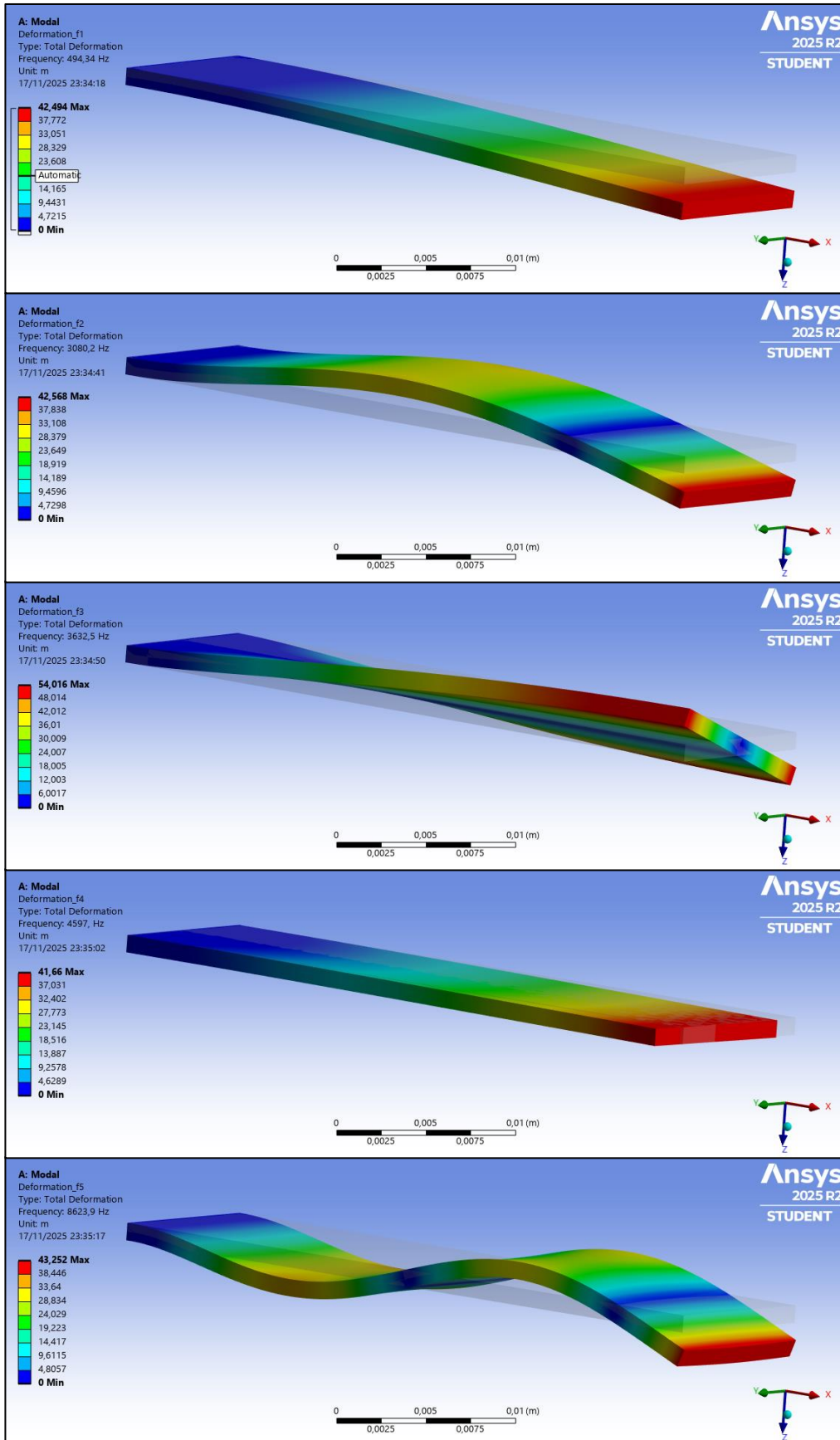
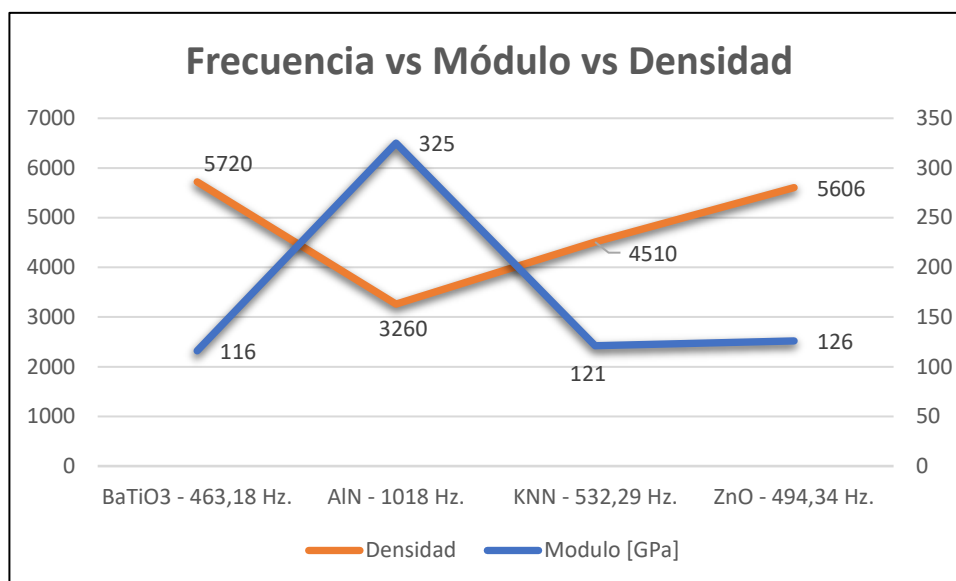


Figura 22 Deformación del ZnO en sus principales frecuencias naturales reconocidas. Frecuencia de mayor masa efectiva f1: 494,34Hz.



Gráfica 6 En esta gráfica se observa la relación de a menor frecuencia natural menor módulo, pero una mayor densidad.

5.1.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Se observa en la gráfica 6 que las frecuencias naturales cuyo módulo elástico del material es elevado su densidad va disminuyendo. En este sentido, el Nitruro de Aluminio [AlN] presenta los valores más altos de frecuencia modal debido a su alta rigidez ($E \approx 325$ GPa) y baja densidad (≈ 3260 kg/m³), lo que implica una estructura más resistente a la deformación bajo carga dinámica.

En contraste, el Titanato de Bario [BaTiO₃], con una menor rigidez ($E \approx 116.8$ GPa) y mayor densidad (≈ 5720 kg/m³), muestra las frecuencias naturales más bajas, reflejando una mayor flexibilidad estructural. Este comportamiento ha sido reportado en estudios experimentales y numéricos donde materiales con módulo de Young reducido presentan modos de vibración más lentos y una respuesta más pronunciada en resonancia [82].

El material Niobato de Sodio y Potasio [KNN] muestra frecuencias ligeramente superiores al BaTiO₃, coherentes con su menor densidad (≈ 4510 kg/m³) y mayor módulo elástico efectivo ($E \approx 121$ GPa). Por su parte, el Óxido de Zinc [ZnO] se ubica en un rango intermedio, con un equilibrio entre rigidez y masa que lo posiciona como un material estable para aplicaciones en dispositivos de recolección de

energía donde se requiera un acoplamiento eficiente entre las vibraciones y la polarización eléctrica.

5.1.2 CORRELACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS.

Los resultados obtenidos guardan relación con investigaciones en las que se han evaluado los modos de vibración de estructuras piezoeléctricas mediante simulaciones FEM y validaciones experimentales. En un estudio demostraron que las propiedades de los materiales (rigidez, densidad, inercia) afectan las frecuencias resonantes, sobre todo la relación entre los módulos de elasticidad (Young's modulus) del "passive layer" de un cantiléver piezoeléctrico y su frecuencia de resonancia más potencia de salida [83]. También existen resultados y evidencias que el alto valor del módulo de Young y densidad un material piezoeléctrico tiene una frecuencia de resonancia muy alta y no responde a vibraciones de muy baja frecuencia [75], debido a estas investigaciones en donde ponen en relación propiedades mecánicas, densidad, modulo y frecuencias los materiales como BaTiO₃ versus KNN versus AlN pueden conducir a diferentes frecuencias modales.

Estos hallazgos confirman que la identificación de las **frecuencias naturales más efectivas** constituye un paso esencial para definir el rango de excitación del análisis acoplado armónico, que se desarrolla en el análisis siguiente. La selección de la frecuencia con **mayor masa efectiva** asegura una respuesta eléctrica significativa, permitiendo establecer las condiciones óptimas de operación de cada material como recolector de energía.

5.2. RESULTADOS DE ANÁLISIS COUPLED FIELD HARMONIC – (OPEN CIRCUIT)

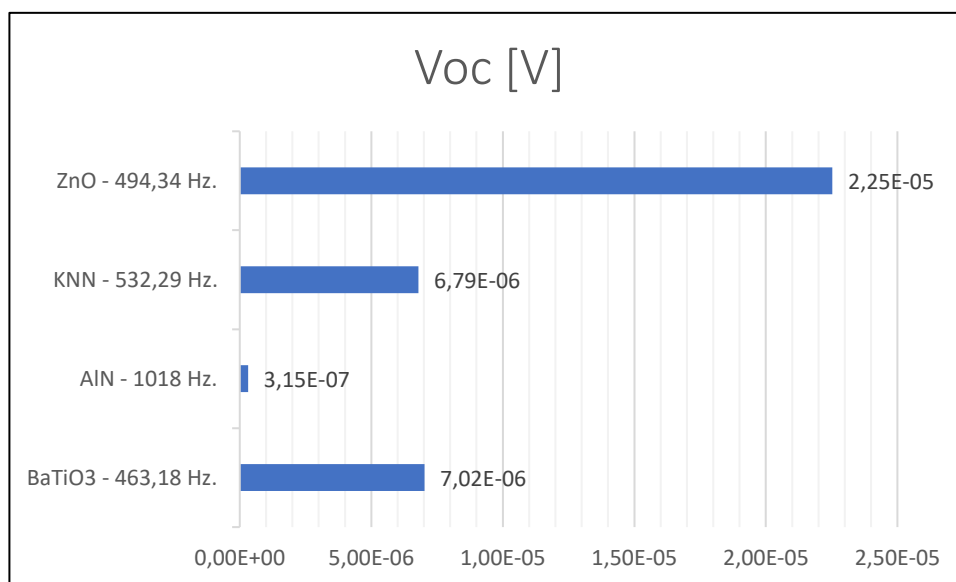
El análisis Coupled Field Harmonic con condición de circuito abierto (CFH-open circuit) se llevó a cabo para cada uno de los cerámicos piezoeléctricos seleccionados [BaTiO₃, KNN, ZnO y AlN] bajo una excitación mecánica armónica equivalente a 1 g (9.81 m/s²) en dirección normal al espesor (+Z). Las superficies superior e inferior

se definieron como electrodos, pero sin conexión eléctrica entre ellas (open-circuit). El objetivo de este análisis fue determinar la tensión de circuito abierto (**Voc**) inducida y el desplazamiento estructural máximo en el punto central del dispositivo bajo cada frecuencia de resonancia identificada previamente en el análisis modal.

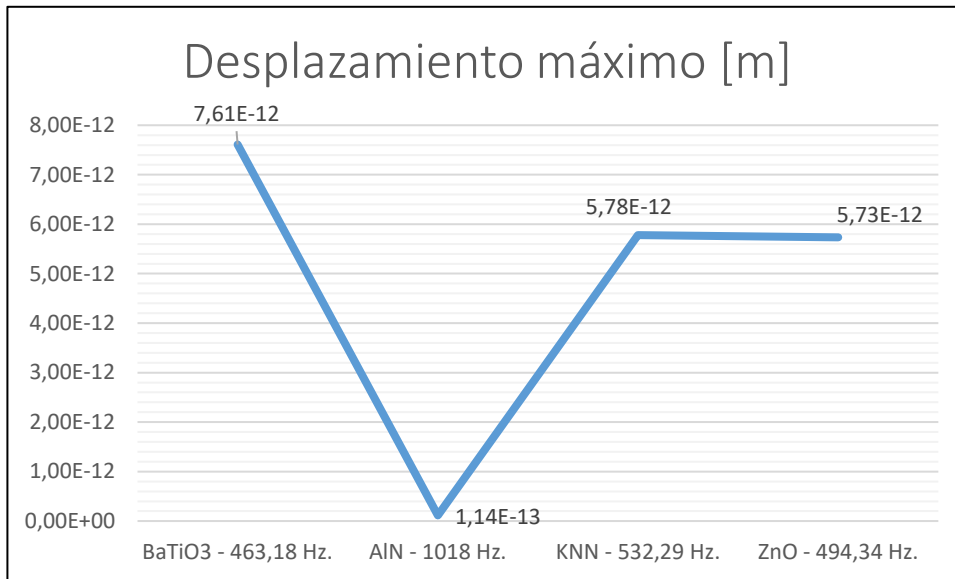
Para poder visualizar el comportamiento de los materiales frente sus frecuencias de mayor eficiencia en masa y con una excitación de 1 g se presenta las siguientes tablas comparativas y graficas que ayudan a la comprensión de estos. Se resume los valores máximos obtenidos para cada material en su frecuencia de excitación correspondiente al modo de mayor masa efectiva. En esta condición de circuito abierto **no se reporta la densidad de flujo eléctrico (D)**, dado que no hay transferencia de carga entre los electrodos.

MATERIAL CERÁMICO	FREQUENCY [HZ]	VOC [V]	DESPLAZAMIENTO MÁXIMO [M]	DENSIDAD [KG/M ³]
BATIO ₃	463,18	7,02E-06	7,61E-12	5720
ALN	1018	3,15E-07	1,14E-13	3260
KNN	532,29	6,79E-06	5,78E-12	4510
ZNO	494,34	2,25E-05	5,73E-12	5606

Tabla 10 Se puede observar la relación de frecuencias, Voltaje y deformación entre los distintos materiales piezoeléctricos analizados.



Gráfica 7 Se muestra la cantidad de potencia producida por cada material en su frecuencia de mayor eficiencia de masa.



Gráfica 8 Deformación del cantiléver de cada material en su frecuencia natural de mayor eficiencia de masa

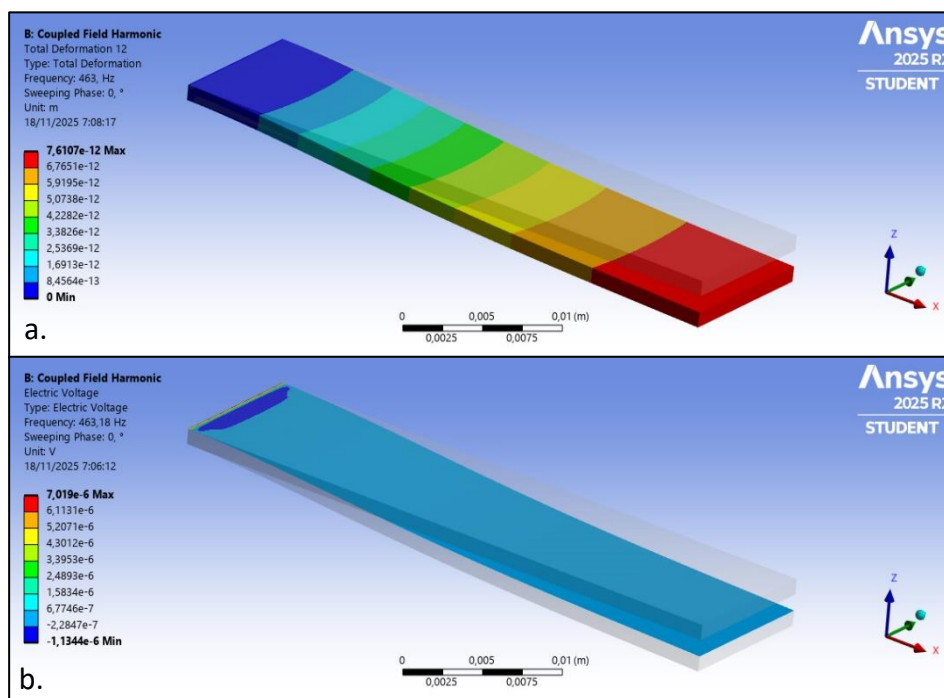


Figura 23 Se observa el material BaTiO3. En la figura a. la deformación en estado Armónico Acoplado. En la figura b. el Voc evaluado en la frecuencia de mayor eficiencia de masa 463,18 Hz.

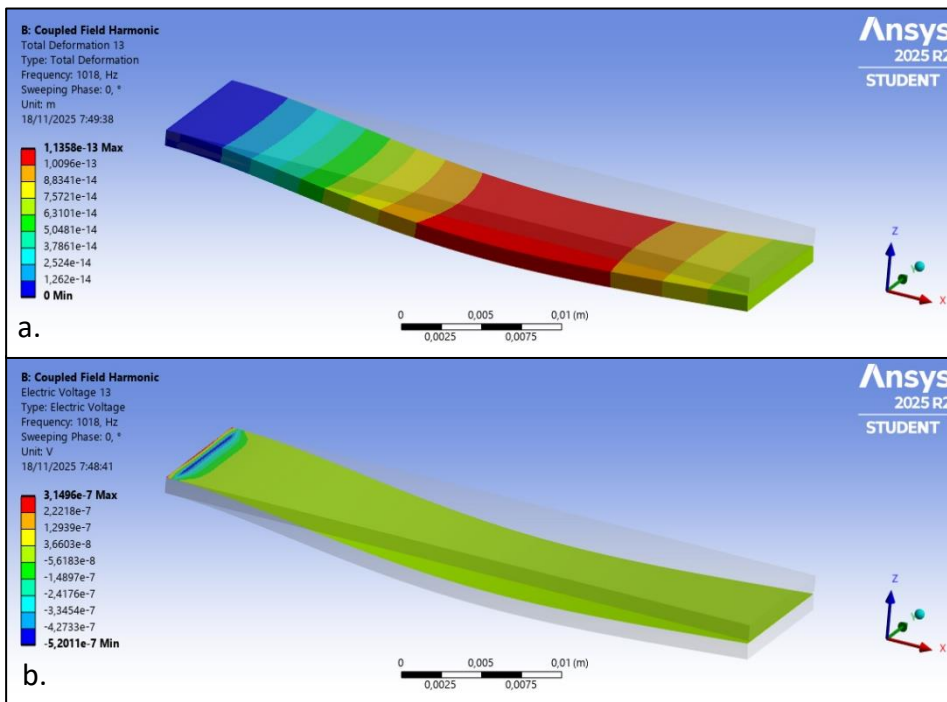


Figura 24 Se observa el material AlN. En la figura a. la deformación en estado Armónico Acoplado. En la figura b. el Voc evaluado en la frecuencia de mayor eficiencia de masa 1018 Hz

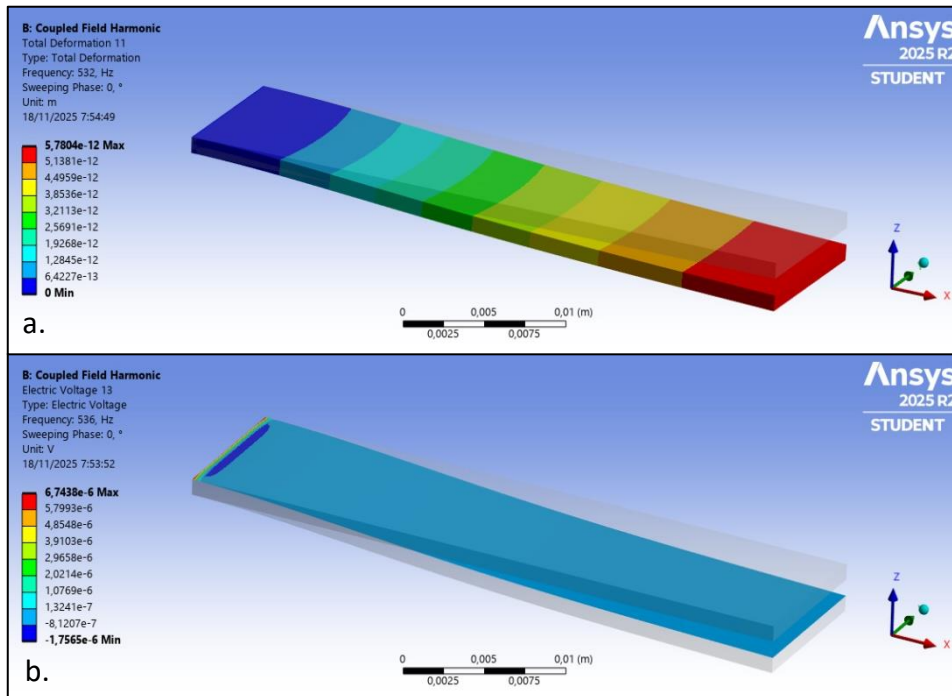


Figura 25 Se observa el material KNN. En la figura a. la deformación en estado Armónico Acoplado. En la figura b. el Voc evaluado en la frecuencia de mayor eficiencia de masa 532,29 Hz

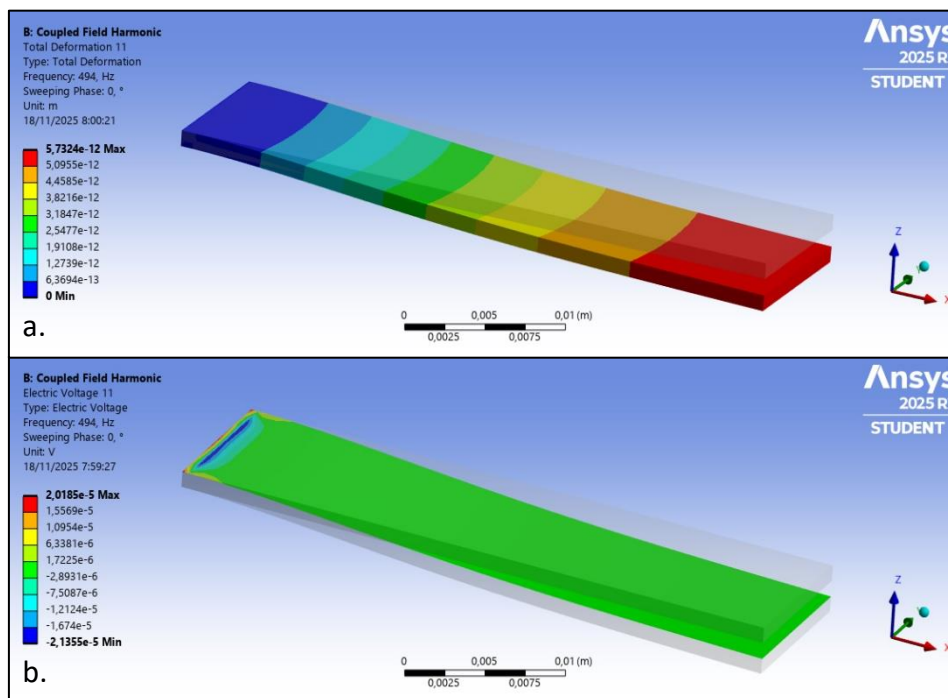


Figura 26 Se observa el material ZnO. En la figura a. la deformación en estado Armónico Acoplado. En la figura b. el Voc evaluado en la frecuencia de mayor eficiencia de masa 494,34 Hz

5.2.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos en el análisis acoplado armónico bajo condición de circuito abierto (Tabla 10) evidencian una relación directa entre las propiedades mecánicas de los materiales piezoeléctricos y su comportamiento dinámico y eléctrico, demostrando una pequeña relación entre los materiales con mayor rigidez (módulo E) y menor densidad (ρ) al presentan las frecuencias resonantes más elevadas, mientras que los materiales más densos y menos rígidos tienden a vibrar a frecuencias inferiores.

En este sentido, el **AIN** ($E = 325$ GPa; $\rho = 3260$ kg/m³) registró la frecuencia más alta (≈ 1018 Hz), seguida de **KNN** (532 Hz), **ZnO** (494 Hz) y **BaTiO₃** (463 Hz). Este comportamiento concuerda con la expresión modal $f_n \propto \sqrt{E/\rho}$, ampliamente utilizada para describir la dependencia de la frecuencia natural respecto a la rigidez y densidad del material [84]. Así, **AIN**, por su alta rigidez específica, exhibe un desplazamiento armónico mínimo (1.14×10^{-13} m), mientras que **BaTiO₃** y **KNN**, de menor módulo elástico y mayor densidad, presentan desplazamientos más amplios

($\approx 10^{-12}$ m), evidenciando una mayor flexibilidad estructural ante la excitación armónica.

En términos eléctricos, la tensión de circuito abierto (V_{oc}) presenta un orden distinto: **ZnO** alcanzó el valor máximo (2.25×10^{-5} V), seguido de **BaTiO₃** (7.02×10^{-6} V), **KNN** (6.79×10^{-6} V) y finalmente **AlN** (3.15×10^{-7} V). Esto indica que el **voltaje inducido no depende exclusivamente de la rigidez**, sino del **acoplamiento piezoeléctrico efectivo**, definido por la interacción del coeficiente piezoeléctrico e_{ij} , entre la deformación mecánica y la densidad de flujo eléctrico generada.

El **BaTiO₃**, con un valor $e_{33} = 18.6 \text{C/m}^2$, mostró una tensión de circuito abierto (V_{oc}) de 7.02×10^{-6} V, a pesar de presentar la frecuencia más baja (463 Hz) y un módulo elástico moderado ($E \approx 116 \text{GPa}$). Este comportamiento refleja su **alto acoplamiento piezoeléctrico intrínseco**, que permite una conversión eficiente de la deformación mecánica en potencial eléctrico aun con desplazamientos más amplios.

El **ZnO**, con un $e_{33} \approx 1.22 \text{C/m}^2$ y una frecuencia de 494 Hz, alcanzó el V_{oc} más elevado (2.25×10^{-5} V). Este resultado se explica por la combinación equilibrada entre su **rigidez intermedia** ($E \approx 126 \text{GPa}$) y su **densidad relativamente baja**, lo que le permite mantener una deformación efectiva y un acoplamiento tensión-carga favorable en la dirección de polarización.

En contraste, el **KNN**, cuyo $e_{33} = -0.48 \text{C/m}^2$ (indica un acoplamiento piezoeléctrico débil y de fase opuesta), genera un V_{oc} moderado (6.79×10^{-6} V) a 532 Hz, pese a su densidad menor que la del BaTiO₃. Su signo negativo evidencia que la dirección de polarización inducida se opone al eje de deformación, reduciendo la tensión neta generada.

Finalmente, el **AlN**, con $e_{33} = 0.48 \text{C/m}^2$ (con la frecuencia de resonancia más alta), presentó el menor V_{oc} (3.15×10^{-7} V). Este resultado concuerda con su elevada rigidez ($E \approx 325 \text{GPa}$), que limita la amplitud de deformación, y con su acoplamiento eléctrico reducido. A pesar de ello, su alta estabilidad mecánica y baja densidad lo

hacen atractivo para aplicaciones de alta frecuencia donde se prioriza la durabilidad estructural sobre la magnitud del voltaje [46].

En conjunto, estos resultados evidencian que la magnitud del V_{oc} bajo excitación armónica en circuito abierto **no depende linealmente de la rigidez**, sino del **producto efectivo entre deformación y acoplamiento piezoeléctrico (e_{33})**. Así, los materiales con altos valores de e_{33} (como el BaTiO₃) o una relación favorable entre rigidez y masa (como el ZnO) presentan las respuestas eléctricas más significativas. Esta observación confirma la importancia de considerar simultáneamente las propiedades mecánicas y piezoeléctricas en el diseño y selección de materiales para dispositivos de recolección de energía.

5.2.2 CORRELACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS.

Los valores obtenidos presentan una correlación directa con análisis registrados en investigaciones sobre acoplamiento electromecánico y resonancia en materiales piezoeléctricos. Algunos autores han demostrado que el voltaje inducido en condiciones de circuito abierto [**Voc**] depende simultáneamente de la rigidez estructural (E), la densidad (ρ) y, principalmente, del coeficiente piezoeléctrico de tensión (e_{33}), responsable de la transformación de la deformación en flujo eléctrico.

Un modelo analítico y experimental para vigas piezoeléctricas, demostró que la frecuencia natural de resonancia está regida por la relación $f_n \propto \sqrt{E/\rho}$ y que la salida eléctrica [**Voc**] alcanza su máximo en el modo de vibración fundamental [85]. Esta observación coincide con el comportamiento del **BaTiO₃** y del **ZnO** en el presente estudio, donde ambos materiales alcanzaron sus máximos valores de V_{oc} en frecuencias cercanas a su primer modo modal.

Adicional, se ha demostrado que al realizar simulaciones FEM en sistemas piezoeléctricos de recolección de energía, validando experimentalmente que el aumento del acoplamiento piezoeléctrico (e_{33}) y la disminución de la permitividad relativa (ϵ_r) incrementan la tensión de circuito abierto [86]. Este comportamiento

concuera con los resultados obtenidos para el BaTiO_3 ($e_{33} = 18.6 \text{ C/m}^2$) y el ZnO ($e_{33} = 1.22 \text{ C/m}^2$), que presentaron los mayores valores de V_{oc} en este análisis.

Mediante otro análisis sobre recolectores piezoeléctricos con un enfoque FEM iterativo, establecieron que materiales con mayor módulo elástico (**E**) presentan frecuencias resonantes elevadas, pero su voltaje inducido disminuye al reflejar menos deformación. Este fenómeno explica la respuesta del **AlN**, cuya frecuencia alta ($\approx 1018 \text{ Hz}$) y bajo acoplamiento ($e_{33} = 0.48 \text{ C/m}^2$) resultaron con el menor V_{oc} [87].

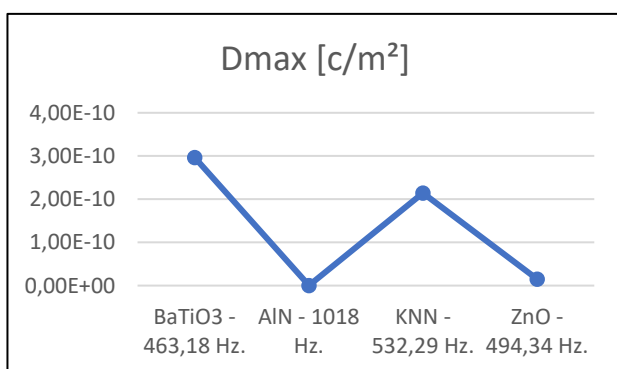
Finalmente, Covaci y Gontean realizaron una revisión integral de configuraciones de recolectores piezoeléctricos y concluyeron que la **eficiencia global de conversión energética** depende del equilibrio entre **rigidez, masa y coeficientes piezoeléctricos**. Materiales de alta rigidez (como AlN) son ideales para frecuencias altas y estabilidad estructural, mientras que materiales de alto acoplamiento (como BaTiO_3 o ZnO) presentan mejor desempeño eléctrico en rangos de baja frecuencia, validando plenamente los resultados de este trabajo [78].

5.3 RESULTADOS DE ANÁLISIS COUPLED FIELD HARMONIC – SHORT

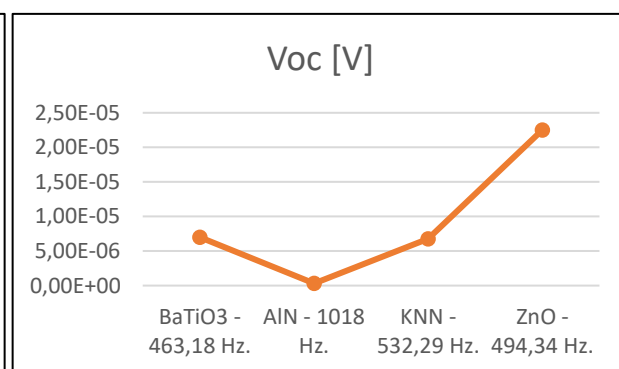
El análisis Coupled Field Harmonic Short (CFH-Short) se realizó con las mismas condiciones de excitación que el CFH-Open: una aceleración armónica de 1 g aplicada normal al espesor del elemento piezoeléctrico y electrodos en las caras superior e inferior. A diferencia del caso de circuito abierto, en esta configuración los electrodos se encuentran conectados eléctricamente, simulando una condición de cortocircuito, lo que permite la circulación de carga inducida y, por tanto, la evaluación de la densidad de flujo eléctrico máxima [\mathbf{D}_{max}]. El objetivo principal de este análisis fue cuantificar la capacidad de cada material para transferir carga eléctrica sometido a vibraciones resonantes.

MATERIAL CERÁMICO	FREQUENCY [HZ]	DMAX [C/M ²]	DESPLAZAMIENTO [M]	MODULO [GPA]	DENSIDAD [KG/M ³]
BATIO ₃ - 463,18 HZ.	463,18	2,97E-10	7,61E-12	116	5720
ALN - 1018 HZ.	1018	3,84E-13	1,14E-13	325	3260
KNN - 532,29 HZ.	532,29	2,14E-10	5,78E-12	121	4510
ZNO - 494,34 HZ.	494,34	1,51E-11	5,73E-12	126	5606

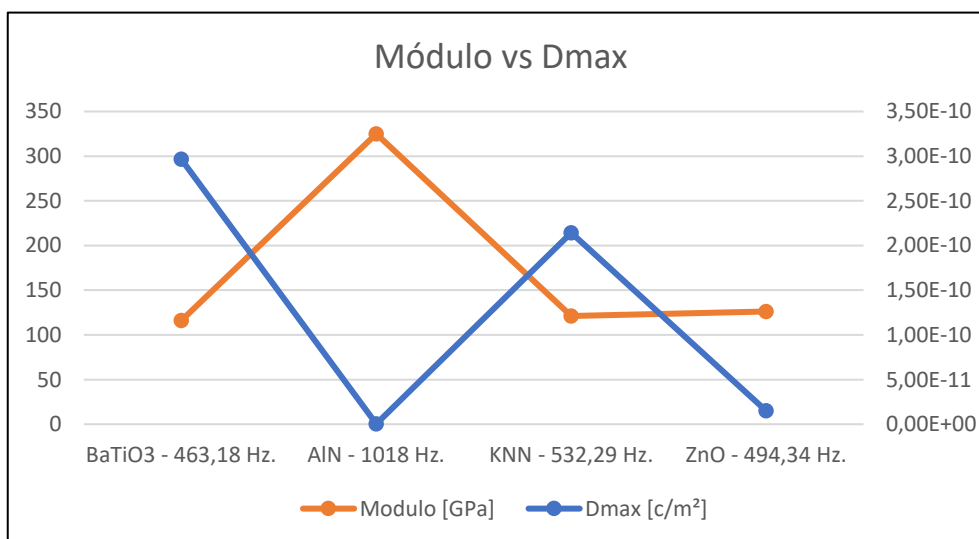
Tabla 11 Valores obtenidos en la simulación FEM en ANSYS Workbench 2025 R2



Gráfica 10 Valores obtenidos de flujo eléctrico máximo en el análisis CFH-S - ANSYS Workbench 2025 R2



Gráfica 9 Valores obtenidos del Voltaje en el análisis CFH-S - ANSYS Workbench 2025 R2



Gráfica 11 Se observa una relación indirecta entre el módulo de rigidez y el flujo eléctrico máximo observado en sus frecuencias naturales de mayor eficiencia de masa. Valores de ANSYS Workbench 2025 R2

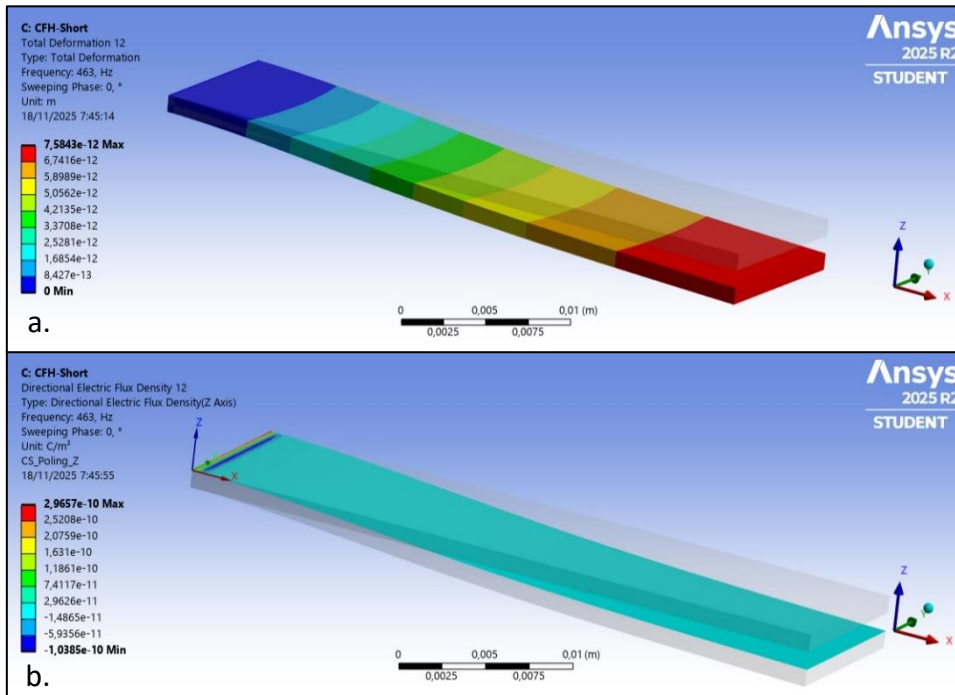


Figura 27 Se observa el material BaTiO3 en la figura a. la deformación en estado armónico en corto circuito. En la figura b. la densidad de flujo eléctrico. La frecuencia natural es de 468,13 Hz.

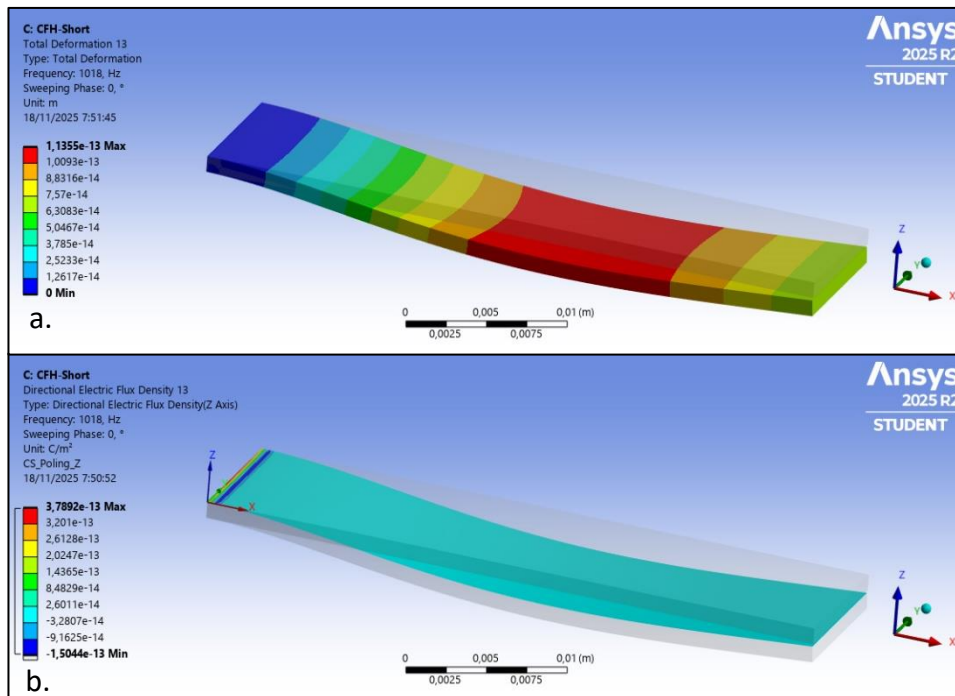


Figura 28 Se observa el material AlN en la figura a. la deformación en estado armónico en corto circuito. En la figura b. la densidad de flujo eléctrico. La frecuencia natural es de 1018 Hz.

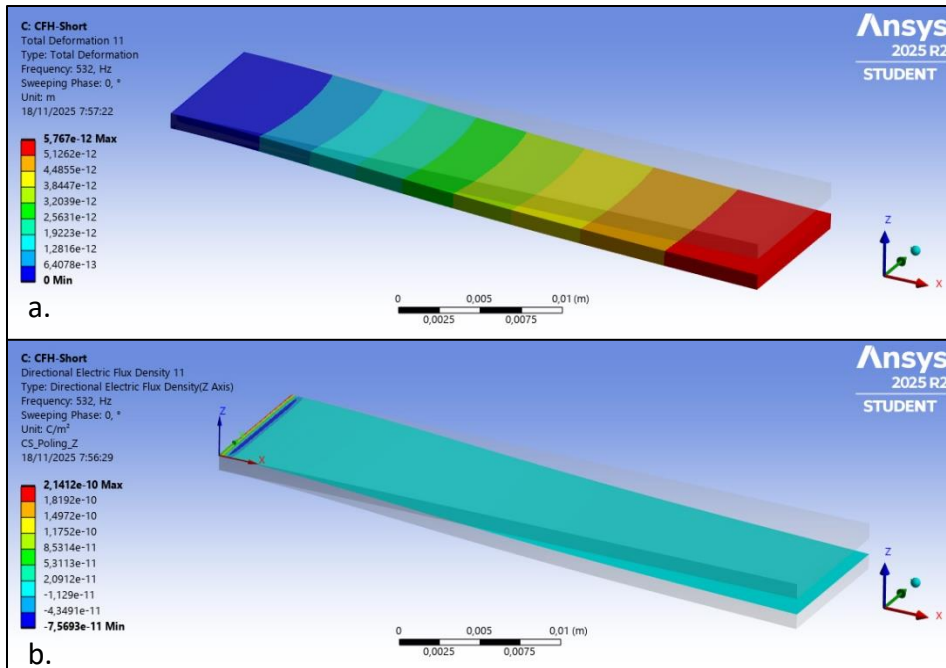


Figura 29 Se observa el material KNN en la figura a. la deformación en estado armónico en corto circuito. En la figura b. la densidad de flujo eléctrico. La frecuencia natural es de 532,29 Hz.

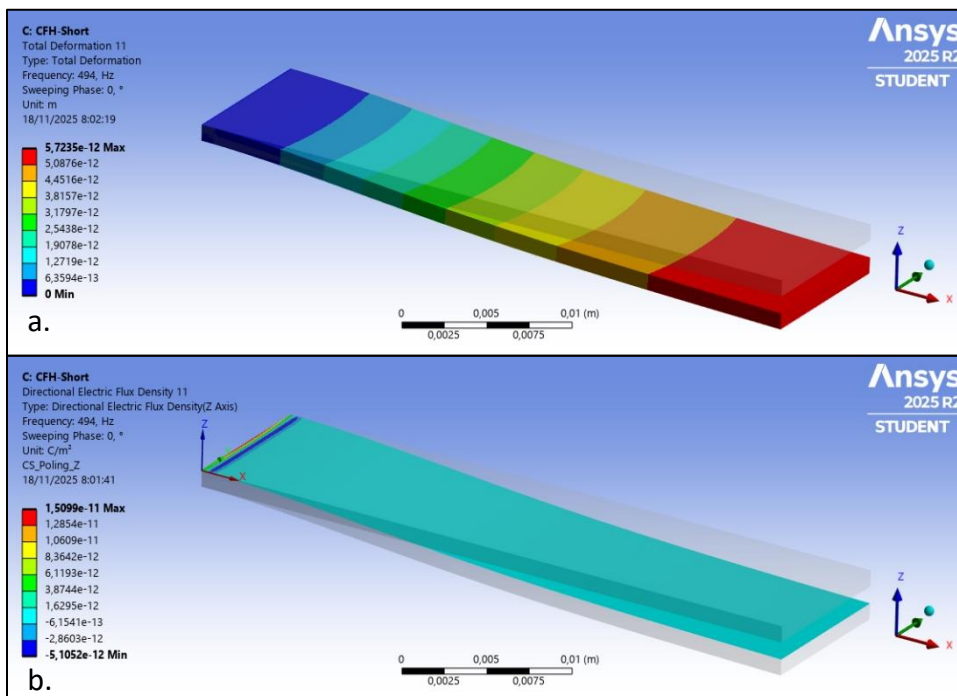


Figura 30 Se observa el material ZnO en la figura a. la deformación en estado armónico en corto circuito. En la figura b. la densidad de flujo eléctrico. La frecuencia natural es de 494,34 Hz.

5.3.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Los resultados del CFH-Short complementan los hallazgos obtenidos en el análisis CFH-Open, al reflejar la capacidad de transferencia de carga bajo condiciones de cortocircuito. En este caso, los valores de densidad de flujo eléctrico [D_{\max}] representan la cantidad de carga eléctrica generada por unidad de área como consecuencia directa del acoplamiento piezoeléctrico entre los campos mecánico y eléctrico.

El **BaTiO₃** presentó el valor de D_{\max} más alto (2.97×10^{-10} C/m²), lo cual concuerda con su elevado coeficiente de acoplamiento $e_{33}= 18.6$ C/m². Este resultado evidencia que la alta polarización espontánea del titanato de bario facilita una conversión de energía mecánica en carga eléctrica significativamente más eficiente, incluso a una frecuencia moderada (≈ 463 Hz).

El **KNN**, con $e_{33}= -0.48$ C/m², registró un valor intermedio de D_{\max} (2.14×10^{-10} C/m²). El signo negativo de su coeficiente refleja una orientación opuesta del eje de polarización respecto al campo aplicado, lo que limita parcialmente el flujo neto de carga. Aun así, su densidad de flujo eléctrico es muy similar a la del BaTiO₃, debido a su menor densidad ($\rho = 4510$ kg/m³) y mayor respuesta de deformación.

El **ZnO**, con $e_{33}=1.22$ C/m², generó una densidad de flujo eléctrica 1.51×10^{-11} C/m², inferior a los valores de **BaTiO₃** y **KNN**, pero coherente con su comportamiento en CFH-Open, donde mostró el mayor voltaje. Este resultado confirma que el **ZnO** mantiene alta eficiencia de voltaje, pero menor flujo de carga, típica de materiales con moderada permitividad y elevada impedancia interna.

Por último, el **AlN**, con $e_{33}=0.48$ C/m² y módulo elástico de 325 GPa, demostró la menor D_{\max} (3.84×10^{-13} C/m²). Su rigidez extrema limita la deformación, reduciendo la carga inducida pese a su baja densidad. Este comportamiento

concuerta con los resultados previos: materiales rígidos y con bajo acoplamiento generan menor corriente pero mayor estabilidad mecánica a frecuencias elevadas.

En general, se demuestra que la tendencia observada es consistente a la relación de la ecuación (11). Donde S_{max} es la deformación máxima inducida demostrando que el $BaTiO_3$ destaca como el material con mayor capacidad de generar carga, seguido de KNN, sin embargo, los materiales AlN y ZnO demuestran respuestas mas bajas bajo un análisis de circuito abierto.

$$D_{max} \propto e_{33} \times S_{max} \quad (11)$$

Estos resultados ratifican que el análisis Coupled Field Harmonic -Short representa apropiadamente el comportamiento real de transferencia de carga de los materiales piezoeléctricos, complementando la caracterización de voltaje obtenida en el Coupled Field Harmonic – Open Circuit.

5.3.2 CORRELACIÓN CON ESTUDIOS PREVIOS.

Los valores de densidad de flujo eléctrico máxima [D_{max}] obtenidos en Coupled Field Harmonic - Short ($BaTiO_3 > KNN \gg ZnO > AlN$) concuerdan con la literatura que modela y valida recolectores piezoeléctricos bajo condiciones de cortocircuito o carga conectada. En estos trabajos se muestra que, cerca de la resonancia mecánica, la carga transferida y, por ende, el flujo máximo de energía depende de la deformación alcanzada y del coeficiente piezoeléctrico en formulación de tensión (e_{ij}), así como del condicionamiento eléctrico del circuito (cortocircuito, carga resistiva, rectificación) [88].

Un modelo FEM acoplado a circuitos (*Simulink*) ha demostrado que, al conectar eléctricamente los electrodos, el flujo de carga calculado se maximiza en la resonancia teniendo en cuenta la magnitud de los coeficientes piezoeléctricos del material. Estos resultados tienden a demostrar el porqué de los datos obtenidos en los análisis de este estudio con valores de D_{max} altos en $BaTiO_3$ y KNN, y bajos en AlN [86].

Revisiones recientes subrayan que la eficiencia con carga conectada depende del equilibrio entre rigidez, densidad, acoplamiento (e_{33}) y la interfaz eléctrica. Aquí los valores han demostrado esta tendencia en donde la D_{max} es más alta en materiales como el BaTiO₃ y KNN en comparación con el AlN y el ZnO [8].

En general, las fuentes correlacionan estudios realizados con los resultados obtenidos en el análisis Coupled Field Harmonic – Short. Donde el flujo de energía máximo [D_{max}] es mayor en materiales con un alto acoplamiento piezoeléctrico [e_{33}] y/o mayor deformación en el caso del BaTiO₃ y el KNN. A diferencia de los valores bajos del flujo de energía cuando la rigidez limita la deformación o presentan un bajo acoplamiento piezoeléctrico en el caso del AlN y del ZnO. Estos valores son consistentes en el estado del arte en simulaciones FEM y medición de recolectores de energía bajo cortocircuito y carga.

5.4 DISCUSIÓN

El conjunto de análisis realizados —**Modal, Coupled Field Harmonic (Open Circuit) y Coupled Field Harmonic (Short Circuit)**— permitió evaluar integralmente el comportamiento dinámico y electromecánico de los materiales cerámicos piezoeléctricos BaTiO_3 , KNN , ZnO y AlN bajo excitación armónica. Los resultados evidencian que la respuesta integral de un material piezoeléctrico depende de la interacción acoplada entre sus propiedades mecánicas, eléctricas y piezoeléctricas, y no de un solo parámetro individual.

5.4.1 RELACIÓN ENTRE RIGIDEZ – DENSIDAD – FRECUENCIA MODAL

Las frecuencias obtenidas en el análisis modal —**AlN** ≈ 1018 Hz, **KNN** ≈ 532 Hz, **ZnO** ≈ 494 Hz y **BaTiO₃** ≈ 463 Hz— confirman la dependencia clásica entre densidad y rigidez de la fórmula $f_n \propto \sqrt{E/\rho}$. El **AlN**, con el mayor módulo elástico (≈ 325 GPa) y la menor densidad (≈ 3260 kg/m³), exhibió la frecuencia más alta, mientras que el **BaTiO₃**, más denso y menos rígido, presentó la frecuencia más baja.

Este comportamiento coincide con el modelo de vigas piezoeléctricas expuesto por Erturk e Inman [89], donde se demuestra que la rigidez específica condiciona directamente la posición de los modos de vibración. Asimismo, estudios FEM como el de Ravi y Mace [90] confirman la relación entre propiedades mecánicas y resonancia en dispositivos de recolección de energía.

5.4.2 COMPARACIÓN ENTRE COUPLED FIELD HARMONIC – OPEN CIRCUIT Y COUPLED FIELD HARMONIC – SHORT

Los resultados eléctricos muestran variaciones marcadas entre las condiciones de circuito abierto [**Voc**] y cortocircuito [**Dmax**]:

En los resultados de **Voc** los valores presentan el siguiente orden: ZnO ($2.25e-5$ V.) seguido de una pequeña diferencia entre el BaTiO₃ ($7.02e-6$ V.) – KNN ($6.79e-6$ V.) y al final al AlN ($3.15e-7$ V.).

En los resultados de **Dmax** los valores cambian de sentido: BaTiO₃ ($2.97e-10$ C/m².) mayor a KNN ($2.14e-10$ C/m².) seguidos de valores más bajos como del ZnO ($1.51e-11$ C/m².) y por el último el AlN ($3.84e-13$ C/m².). La relación inversa observada entre el voltaje y la densidad de carga demuestra que el desempeño piezoeléctrico depende del estado eléctrico del sistema. En circuito abierto, la estructura genera un campo eléctrico que maximiza la diferencia de potencial; mientras que en cortocircuito la carga circula libremente entre los electrodos y se maximiza la densidad de flujo eléctrico (**D**).

Esta dualidad está ampliamente documentada en modelos acoplados FEM–circuito, como los presentados por Gedeon y Rupitsch [86], quienes demostraron que la salida eléctrica varía significativamente entre **Voc** y flujo de carga según la impedancia del circuito.

El alto valor de **Dmax** en **BaTiO₃**, debido a su gran coeficiente $e_{33} = 18.6$ C/m², contrasta con su valor de voltaje moderado en CFH-Open, lo cual está alineado con los resultados numéricos de Akbar y Curiel-Sosa [88], quienes indican que la transferencia de carga depende del acoplamiento piezoeléctrico y de la deformación inducida. El **ZnO**, aunque presenta el mayor voltaje, posee un flujo de carga moderado, lo que concuerda con los análisis armónicos de He, Liu y Zhang [91] donde se demuestra que ciertos materiales optimizados para voltaje no necesariamente maximizan la densidad de flujo eléctrico.

5.4.3 ACOPLAMIENTO ELÉCTRICO-MECÁNICO Y EFICIENCIA ENERGÉTICA.

Los resultados globales indican que la eficiencia de conversión electromecánica depende de la interacción en la ecuación antes presentada (ecuación 11) recordando que **S_{max}** se relaciona con la deformación a frecuencia resonante.

En materiales como **BaTiO₃** y **KNN**, el acoplamiento piezoeléctrico elevado, especialmente el e_{33} del BaTiO₃, favorece la transferencia de carga en cortocircuito. En materiales como **AlN**, el alto módulo elástico limita la deformación y reduce tanto V_{oc} como D_{max} .

Los hallazgos son consistentes con las conclusiones de Covaci y Gontean [78], quienes sostienen que la eficiencia en **energy harvesting** deben de un equilibrio entre rigidez, masa y acoplamiento. La revisión realizada por Sezer y Koç [8] indica que la eficiencia energética no se basa únicamente en el coeficiente piezoeléctrico, sino también en la deformación estructural y en el modo de vibración dominante.

5.4.4 IMPLICACIONES PARA EL DISEÑO DE RECOLECTORES DE ENERGÍA PIEZOELÉCTRICOS

Los resultados sirven como base para proponer criterios de diseño sustentados en el comportamiento observado.

- I. **BaTiO₃** y **KNN**: Adecuados para bajas frecuencias donde se requiere alta densidad de carga.
- II. **ZnO**: Adecuado para aplicaciones donde se requiere alto voltaje y frecuencia media.
- III. **AlN**: Óptimo para frecuencias altas y estructuras donde predomina la estabilidad mecánica.

Los criterios propuestos guardan coherencia con los estudios dinámicos de Ravi y Mace [90] y He et al. [91], así como con las conclusiones expuestas en revisiones recientes publicadas en Nano Energy [8].

6. CONCLUSIONES

El presente estudio evaluó el comportamiento dinámico, estructural y electromecánico de los materiales piezoeléctricos **BaTiO₃**, **KNN**, **ZnO** y **AlN** mediante simulaciones por elementos finitos - **Modal**, **Coupled Field Harmonic (Open Circuit)** y **Coupled Field Harmonic - Short**. Los datos obtenidos facilitaron la caracterización completa del desempeño de cada material frente a excitaciones armónicas y su potencial para aplicaciones de energy harvesting.

A partir de los análisis realizados, se establecen las siguientes conclusiones:

6.1 SOBRE EL ANÁLISIS MODAL.

1. Las frecuencias naturales calculadas respetan la relación teórica $f_n \propto \sqrt{E/\rho}$. El **AlN**, con alto módulo elástico (≈ 325 GPa) y baja densidad (≈ 3260 kg/m³), presentó la frecuencia más elevada (≈ 1018 Hz), mientras que el **BaTiO₃**, con menor rigidez y mayor densidad, obtuvo la más baja (≈ 463 Hz).
2. La respuesta modal observada concuerda con modelos establecidos en literatura existente, donde se demuestran que la rigidez específica controla directamente la posición de los modos de vibración en estructuras piezoeléctricas.
3. Los resultados modales permitieron definir correctamente las frecuencias empleadas en los análisis CFH, asegurando una evaluación coherente de las respuestas eléctricas y mecánicas.

6.2 SOBRE EL ANÁLISIS COUPLED FIELD HARMONIC (OPEN CIRCUIT).

4. El material que generó el mayor **voltaje de circuito abierto [Voc]** fue el **ZnO** ($\approx 2.25 \times 10^{-5}$ V), seguido de **BaTiO₃** y **KNN**. Este comportamiento se asocia a su

combinación de rigidez intermedia y permitividad moderada, que favorecen la acumulación de potencial eléctrico cuando no existe flujo de carga.

5. El **AIN**, pese a su alta rigidez, presentó el menor voltaje ($\approx 3.15 \times 10^{-7}$ V), consecuencia de su baja deformación mecánica y su coeficiente piezoeléctrico reducido.
6. La generación de voltaje en circuito abierto depende principalmente del coeficiente piezoeléctrico e_{33} , la permitividad eléctrica y la deformación inducida a frecuencia resonante.

6.3 SOBRE EL ANÁLISIS COUPLED FIELD HARMONIC – SHORT.

7. En condiciones de cortocircuito, la magnitud de la **densidad de flujo eléctrico** [D_{max}] estuvo dominada por los materiales de mayor acoplamiento piezoeléctrico. El **BaTiO₃**, con $e_{33} = 18.6$ C/m², presentó el valor más alto ($\approx 2.97 \times 10^{-10}$ C/m²), seguido de **KNN**.
8. El **ZnO**, aunque generó el mayor voltaje en Coupled Field Harmonic (open circuit), mostró un flujo de carga más reducido, lo que confirma que la transferencia eléctrica en cortocircuito no depende del voltaje sino de la capacidad del material para desplazar carga durante la deformación.
9. El **AIN**, nuevamente, presentó el desempeño más bajo debido a su limitada deformación y bajo acoplamiento piezoeléctrico.

6.4 SOBRE EL ACOPLAMIENTO ELÉCTRICO-MECÁNICO.

10. La eficiencia de conversión energética de los materiales piezoeléctricos depende principalmente de la interacción entre el **acoplamiento piezoeléctrico** (e_{33}) y la **deformación máxima alcanzada** (S_{max}), donde S_{max} está influenciada por la rigidez, densidad y respuesta dinámica del material.

$$D_{max} \propto e_{33} \times S_{max} \quad (11)$$

11. El **BaTiO₃** se posiciona como el material con mejor desempeño integral para recolección de energía a baja frecuencia, debido a su alto acoplamiento piezoeléctrico y deformación moderada.
12. El **ZnO** destaca en aplicaciones donde se requiere voltaje elevado, debido a su comportamiento favorable en condición de circuito abierto.
13. El **KNN** constituye una alternativa eficiente, ambientalmente más amigable, con un rendimiento competitivo frente a BaTiO₃.
14. El **AlN**, aunque no maximiza la conversión energética, es ideal para aplicaciones que requieren alta estabilidad mecánica y operación en rangos de frecuencia elevados.

6.5 SOBRE LA METODOLOGÍA.

15. La metodología FEM utilizada (malla constante, análisis modal seguido de Coupled Field Harmonic (open circuit) y Coupled Field Harmonic - Short) permitió caracterizar con precisión el comportamiento eléctrico-mecánico de cada material y comparar su desempeño de forma homogénea.
16. La combinación de análisis en circuito abierto y cortocircuito permitió obtener una visión completa del comportamiento piezoeléctrico, ya que cada condición resalta mecanismos distintos de conversión energética.
17. La correlación obtenida con estudios reportados en ***Acta Mechanica, Composite Structures, Materials, Sensors y Nano Energy*** valida la coherencia física de los resultados y la robustez del enfoque numérico.

6.6 SOBRE EL ESTUDIO FINAL.

18. Se concluye que la combinación de **análisis modal** y **acoplados armónicos** representa una metodología confiable para predecir el desempeño electromecánico de materiales piezoeléctricos bajo vibración. Los resultados obtenidos permiten seleccionar materiales adecuados para aplicaciones específicas de recolección de energía y proporcionan una base sólida para futuras optimizaciones estructurales o de diseño.

19. Se establecieron las condiciones iniciales de cada material a partir de la recopilación y validación de sus propiedades mecánicas, eléctricas y piezoeléctricas, obtenidas de artículos científicos indexados. Los parámetros fundamentales de densidad, elasticidad ortotrópica, constantes piezoeléctricas y permitividad relativa fueron integrados correctamente en **ANSYS Workbench**, garantizando la construcción de modelos representativos y reproducibles. Este procedimiento confirma la viabilidad de definir las condiciones necesarias para evaluar el comportamiento dinámico y electromecánico de materiales piezoeléctricos sometidos a vibraciones mecánicas.
20. El análisis resultó plenamente viable. La ejecución secuencial de los análisis **Modal, Coupled Field Harmonic y Coupled Field Harmonic – Short**, permitió evaluar con precisión la influencia de las propiedades fundamentales en la respuesta estructural y eléctrica. Los resultados evidenciaron el impacto del módulo elástico, la densidad, las constantes piezoeléctricas y la permitividad dieléctrica sobre el desempeño bajo condiciones de vibración. Este procedimiento permitió un análisis comparativo, de manera técnica de las condiciones iniciales, orientado a su aplicación en componentes nanoestructurados destinados a la recolección de energía.
21. Con la comparación detallada de los voltajes generados, las deformaciones inducidas, las frecuencias modales y la estabilidad estructural permitió identificar el material con mejor desempeño piezoeléctrico para aplicaciones de recolección de energía. Los resultados evidenciaron diferencias significativas entre los materiales analizados, permitiendo seleccionar aquel con mayor eficiencia energética y comportamiento dinámico más favorable. El análisis numérico confirma la viabilidad de recomendar un material óptimo sustentado en evidencia científica y en los resultados FEM obtenidos.

22. El diseño geométrico y la simulación mediante el método de elementos finitos (FEM), confirma la viabilidad de desarrollar un componente piezoeléctrico funcional mediante software especializado como **ANSYS Workbench**. La correcta definición de la geometría, el mallado, las condiciones de frontera, la excitación mecánica de 1g y la carga armónica permitió analizar con precisión la respuesta estructural y eléctrica del dispositivo. Los resultados obtenidos validan que el diseño asistido por simulación no solo es posible, sino también eficaz para prever y optimizar el rendimiento de dispositivos piezoeléctricos destinados a la recolección de energía mediante vibraciones mecánicas antes de su fabricación.

REFERENCIAS

- [1] M. Habib, I. Lantgios, y K. Hornbostel, «A review of ceramic, polymer and composite piezoelectric materials», *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 55, n.º 42, 2022, doi: 10.1088/1361-6463/ac8687.
- [2] J. Wu, «Perovskite lead-free piezoelectric ceramics», *J. Appl. Phys.*, vol. 127, n.º 19, p. 190901, may 2020, doi: 10.1063/5.0006261.
- [3] H. D. Espinosa, R. A. Bernal, y M. Minary-Jolandan, «A Review of Mechanical and Electromechanical Properties of Piezoelectric Nanowires», *Adv. Mater.*, vol. 24, n.º 34, pp. 4656-4675, 2012, doi: 10.1002/adma.201104810.
- [4] J. M. Ramírez, «Desarrollo de dispositivos recolectores de energía de fuentes vibratorias».
- [5] Y. Zhai *et al.*, «Improved energy-harvesting performance of (K, Na)NbO₃-based ceramics through the synergistic effect of texture and defect engineering», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 45, n.º 3, p. 116984, mar. 2025, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2024.116984.
- [6] D. R. Askeland y W. J. Wright, *Ciencia e ingeniería de los materiales*, vol. 3. International Thomson Editores México, 1998. Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/download/88488497/Ciencia_e_ingenieria_de_materiales.pdf
- [7] H. Kim, Y. Tadesse, y S. Priya, «Piezoelectric Energy Harvesting», en *Energy Harvesting Technologies*, S. Priya y D. J. Inman, Eds., Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 3-39. doi: 10.1007/978-0-387-76464-1_1.
- [8] N. Sezer y M. Koç, «A comprehensive review on the state-of-the-art of piezoelectric energy harvesting», *Nano Energy*, vol. 80, p. 105567, feb. 2021, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.105567.
- [9] Z. L. Wang y J. Song, «Piezoelectric Nanogenerators Based on Zinc Oxide Nanowire Arrays», *Science*, abr. 2006, doi: 10.1126/science.1124005.
- [10] «Lead-free piezoelectric ceramics: Alternatives for PZT? | Journal of Electroceramics». Accedido: 16 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/S10832-007-9047-0>
- [11] F. Laumann, M. M. Sørensen, R. F. Jul Lindemann, T. M. Hansen, y T. Tambo, «Energy harvesting through piezoelectricity - technology foresight», *Energy Procedia*, vol. 142, pp. 3062-3068, dic. 2017, doi: 10.1016/j.egypro.2017.12.445.
- [12] «Lead-free piezoelectric ceramics: Alternatives for PZT? | Journal of Electroceramics». Accedido: 1 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/S10832-007-9047-0>
- [13] «Energy Harvesting Technologies | SpringerLink». Accedido: 1 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-387-76464-1>
- [14] Y. Qi, N. T. Jafferis, K. Jr. Lyons, C. M. Lee, H. Ahmad, y M. C. McAlpine, «Piezoelectric Ribbons Printed onto Rubber for Flexible Energy Conversion», *Nano Lett.*, vol. 10, n.º 2, pp. 524-528, feb. 2010, doi: 10.1021/nl903377u.
- [15] M. Boudouh, B. E. K. Hachi, M. Haboussi, y S. H. Habib, «Application of the Finite Element Method (FEM) to Analyze the Mechanical Behavior of Piezoelectric

- Materials When an Electric Field Is Applied to a Piezoelectric Structure (Inverse Piezoelectricity)», *Eng. Proc.*, vol. 67, n.º 1, Art. n.º 1, 2024, doi: 10.3390/engproc2024067013.
- [16] G. Gautschi, «Piezoelectric Sensors», en *Piezoelectric Sensorics*, Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2002, pp. 73-91. doi: 10.1007/978-3-662-04732-3_5.
- [17] J. Curie y P. Curie, «Développement par compression de l'électricité polaire dans les cristaux hémihédres à faces inclinées», 1880, doi: 10.3406/bulmi.1880.1564.
- [18] «Advances in development of Pb-free piezoelectric materials for transducer applications - IOPscience». Accedido: 1 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://iopscience.iop.org/article/10.35848/1347-4065/acc812/meta>
- [19] «Piezoelectric Ceramics - JAFFE - 1958 - Journal of the American Ceramic Society - Wiley Online Library». Accedido: 1 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://ceramics.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1151-2916.1958.tb12903.x>
- [20] M. D. Maeder, D. Damjanovic, y N. Setter, «Lead Free Piezoelectric Materials», *J. Electroceramics*, vol. 13, n.º 1, pp. 385-392, jul. 2004, doi: 10.1007/s10832-004-5130-y.
- [21] V. A. Isupov, «Ferroelectric and Antiferroelectric Perovskites PbB' 0.5 B'' 0.5 O 3», *Ferroelectrics*, vol. 289, n.º 1, pp. 131-195, ene. 2003, doi: 10.1080/00150190390221368.
- [22] J. Erhart, P. Půlpán, y M. Pustka, «Piezoelectricity and Piezoelectric Properties», en *Piezoelectric Ceramic Resonators*, J. Erhart, P. Půlpán, y M. Pustka, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 1-9. doi: 10.1007/978-3-319-42481-1_1.
- [23] A. Safari y E. K. Akdogan, *Piezoelectric and Acoustic Materials for Transducer Applications*. Springer, 2008.
- [24] K. Uchino, *Advanced Piezoelectric Materials: Science and Technology*. Woodhead Publishing, 2017.
- [25] P. G. de Enterría, H. Amorín, P. Ramos, M. Algueró, y C. Pascual-González, «Impresión 3d de polímeros polares con patrones piezoeléctricos para el desarrollo de dispositivos de recolección de energía».
- [26] G. de Marzo *et al.*, «Sobre la medición del coeficiente piezoeléctrico d33 de películas delgadas blandas bajo cargas mecánicas débiles: un método rápido y asequible», *Mater. Des.*, vol. 247, p. 113399, nov. 2024, doi: 10.1016/j.matdes.2024.113399.
- [27] «A Review of the Recent Advances in Piezoelectric Materials, Energy Harvester Structures, and Their Applications in Analytical Chemistry». Accedido: 20 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/3/1300>
- [28] R. Ghosh, «Recent progress in piezotronic sensors based on one-dimensional zinc oxide nanostructures and its regularly ordered arrays: From design to application», *Nano Energy*, vol. 113, p. 108606, ago. 2023, doi: 10.1016/j.nanoen.2023.108606.
- [29] M. Schlögl, M. Schneider, y U. Schmid, «Piezoelectricidad en películas delgadas», *Mater. Sci. Eng. B*, vol. 276, p. 115543, feb. 2022, doi: 10.1016/j.mseb.2021.115543.

- [30] R. Sekhar Muddam, J. Sinclair, y L. Krishnan Jagadamma, «Piezoelectric Charge Coefficient of Halide Perovskites», *Materials*, vol. 17, n.º 13, p. 3083, jun. 2024, doi: 10.3390/ma17133083.
- [31] J. Wang *et al.*, «El mecanismo para las propiedades mecánicas y piezoeléctricas mejoradas de los recubrimientos cerámicos BaTiO₃ dopados con La₂O₃ preparados por pulverización de plasma», *J. Alloys Compd.*, vol. 897, p. 162944, mar. 2022, doi: 10.1016/j.jallcom.2021.162944.
- [32] M. Marzencki, Y. Ammar, y S. Basrou, «Integrated power harvesting system including a MEMS generator and a power management circuit», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 145-146, pp. 363-370, jul. 2008, doi: 10.1016/j.sna.2007.10.073.
- [33] Y. Qi, T. D. Nguyen, P. K. Purohit, y M. C. McAlpine, «Stretchable Piezoelectric Nanoribbons for Biocompatible Energy Harvesting», en *Stretchable Electronics*, 2012, pp. 111-139. doi: 10.1002/9783527646982.ch5.
- [34] J. F. Scott, «Applications of Modern Ferroelectrics», *Science*, vol. 315, n.º 5814, pp. 954-959, feb. 2007, doi: 10.1126/science.1129564.
- [35] A. Ali, S. Iqbal, y X. Chen, «Recent advances in piezoelectric wearable energy harvesting based on human motion: Materials, design, and applications», *Energy Strategy Rev.*, vol. 53, p. 101422, may 2024, doi: 10.1016/j.esr.2024.101422.
- [36] J. Tang, Y. Li, Y. Yu, Q. Hu, W. Du, y D. Lin, «Recent Progress in Flexible Piezoelectric Tactile Sensors: Materials, Structures, Fabrication, and Application», *Sensors*, vol. 25, n.º 3, Art. n.º 3, ene. 2025, doi: 10.3390/s25030964.
- [37] «(PDF) FINITE ELEMENT SIMULATION OF MEMS PIEZOELECTRIC ENERGY SCAVENGER BASED ON PZT THIN FILM», *ResearchGate*, dic. 2024, doi: 10.31436/iiumej.v20i1.991.
- [38] M. S. Vijaya, *Piezoelectric Materials and Devices: Applications in Engineering and Medical Sciences*. CRC Press, 2012.
- [39] S. Bauer, R. Gerhard-Multhaupt, y G. M. Sessler, «Ferroelectrets: Soft Electroactive Foams for Transducers», *Phys. Today*, vol. 57, n.º 2, pp. 37-43, feb. 2004, doi: 10.1063/1.1688068.
- [40] A. Kumar, K. Das, y A. Roy, «Improving the energy density and flexibility of PMN-0.3PT based piezoelectric generator by composite designing», *Sens. Actuators Phys.*, vol. 376, p. 115609, oct. 2024, doi: 10.1016/j.sna.2024.115609.
- [41] «(PDF) Published: A Finite Element Study of Interphase Properties and Reinforcement Size Effect on the Electro-elastic Properties of PMN-0.3PT/PDMS Nanocomposite», *ResearchGate*. Accedido: 20 de mayo de 2025. [En línea]. Disponible en:
https://www.researchgate.net/publication/366983157_Published_A_Finite_Element_Study_of_Interphase_Properties_and_Reinforcement_Size_Effect_on_the_Electro-elastic_Properties_of_PMN-03PTPDMS_Nanocomposite
- [42] N. Bhadwal, R. Ben Mrad, y K. Behdian, «Review of Zinc Oxide Piezoelectric Nanogenerators: Piezoelectric Properties, Composite Structures and Power Output», *Sensors*, vol. 23, n.º 8, Art. n.º 8, ene. 2023, doi: 10.3390/s23083859.
- [43] N. Buatip *et al.*, «AlN Nanowire-Based Vertically Integrated Piezoelectric Nanogenerators», *ACS Appl. Nano Mater.*, vol. 7, n.º 13, pp. 15798-15807, jul. 2024, doi: 10.1021/acsnm.4c03075.

- [44] E. M. Dalin y S. M. R. Hasan, «A Novel Multifunctional AlN Piezoelectric Nanogenerator for Biomedical Pressure Sensing», *IEEE Sens. J.*, vol. 25, n.º 4, pp. 6433-6441, feb. 2025, doi: 10.1109/JSEN.2024.3521903.
- [45] J. Y. Gallardo-Durán *et al.*, «Lead-free piezoelectric ceramics with ultralow mechanical quality factor», *Mater. Res. Bull.*, vol. 191, p. 113560, nov. 2025, doi: 10.1016/j.materresbull.2025.113560.
- [46] S. Priya y D. J. Inman, Eds., *Energy Harvesting Technologies*. Boston, MA: Springer US, 2009. doi: 10.1007/978-0-387-76464-1.
- [47] E. L. Pradeesh, S. Udhayakumar, M. G. Vasundhara, y G. K. Kalavathi, «A review on piezoelectric energy harvesting», *Microsyst. Technol.*, vol. 28, n.º 8, pp. 1797-1830, ago. 2022, doi: 10.1007/s00542-022-05334-4.
- [48] «Stochastic analysis of a bistable piezoelectric energy harvester with a matched electrical load | Nonlinear Dynamics». Accedido: 3 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11071-023-08746-7>
- [49] H. S. Kim, J.-H. Kim, y J. Kim, «A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration», *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 12, n.º 6, pp. 1129-1141, dic. 2011, doi: 10.1007/s12541-011-0151-3.
- [50] «A review on piezoelectric energy harvesting | Microsystem Technologies». Accedido: 3 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00542-022-05334-4>
- [51] P. G. Rao, P. S. Rao, y A. G. Krishna, «Mechanical properties improvement of weldments using vibratory welding system», *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 229, n.º 5, pp. 776-784, may 2015, doi: 10.1177/0954405414531248.
- [52] E. N. El-Ganzoury, «Modeling and mathematical approach for mechanical natural frequencies of structural plates with free edges», *Ain Shams Eng. J.*, vol. 15, n.º 8, p. 102842, ago. 2024, doi: 10.1016/j.asej.2024.102842.
- [53] S. Grazioso, G. Di Gironimo, y B. Siciliano, «Modeling and vibration control of flexible mechanical systems for DEMO remote maintenance: Results from the FlexARM project», *Fusion Eng. Des.*, vol. 146, pp. 1423-1425, sep. 2019, doi: 10.1016/j.fusengdes.2019.02.096.
- [54] J. P. Noël, J. Schoukens, y G. Kerschen, «Grey-box nonlinear state-space modelling for mechanical vibrations identification», *IFAC-Pap.*, vol. 48, n.º 28, pp. 817-822, ene. 2015, doi: 10.1016/j.ifacol.2015.12.230.
- [55] Y.-H. Shin *et al.*, «Automatic resonance tuning mechanism for ultra-wide bandwidth mechanical energy harvesting», *Nano Energy*, vol. 77, p. 104986, nov. 2020, doi: 10.1016/j.nanoen.2020.104986.
- [56] M. Farhan, A. G. A. Muthalif, y M. S. M. Ali, «Innovative approaches to optimize vibration energy harvesting (VEH): A comprehensive review», *Energy Rep.*, vol. 12, pp. 5194-5219, dic. 2024, doi: 10.1016/j.egy.2024.11.006.
- [57] J. Rödel, W. Jo, K. T. P. Seifert, E.-M. Anton, T. Granzow, y D. Damjanovic, «Perspective on the Development of Lead-free Piezoceramics», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 92, n.º 6, pp. 1153-1177, 2009, doi: 10.1111/j.1551-2916.2009.03061.x.
- [58] A. C. Dent, C. R. Bowen, R. Stevens, M. G. Cain, y M. Stewart, «Effective elastic properties for unpoled barium titanate», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 27, n.º 13-15, pp. 3739-3743, 2007, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2007.02.031.
- [59] W. Pabst, E. Gregorová, P. Šimonová, y T. Uhlířová, «Monitoring the ferroelectric phase transition of barium titanate ceramics via impulse excitation»,

- Ferroelectrics*, vol. 611, n.º 1, pp. 171-187, jul. 2023, doi: 10.1080/00150193.2023.2201780.
- [60] T. Kim, J. Kim, R. Dalmau, R. Schlessler, E. Preble, y X. Jiang, «High-Temperature Electromechanical Characterization of AlN Single Crystals», *Ieee Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, vol. 62, n.º 10, pp. 1880-1887, oct. 2015, doi: 10.1109/TUFFC.2015.007252.
- [61] Y. Ohashi, M. Arakawa, J. Kushibiki, B. M. Epelbaum, y A. Winnacker, «Ultrasonic Microspectroscopy Characterization of AlN Single Crystals», *Appl. Phys. Express*, vol. 1, p. 077004, jul. 2008, doi: 10.1143/APEX.1.077004.
- [62] L. E. McNeil, M. Grimsditch, y R. H. French, «Vibrational Spectroscopy of Aluminum Nitride», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 76, n.º 5, pp. 1132-1136, 1993, doi: 10.1111/j.1151-2916.1993.tb03730.x.
- [63] H. Jiang, N. Ding, Z. Zou, X.-H. Wang, y W.-Z. Lu, «Flexural strength, thermal and dielectric properties of AlN ceramics with BN nanoplatelets addition», *Ceram. Int.*, vol. 48, abr. 2022, doi: 10.1016/j.ceramint.2022.03.217.
- [64] A. Iqbal y F. Mohd-Yasin, «Reactive Sputtering of Aluminum Nitride (002) Thin Films for Piezoelectric Applications: A Review», *Sensors*, vol. 18, n.º 6, p. 1797, jun. 2018, doi: 10.3390/s18061797.
- [65] G. Qin *et al.*, «Investigation of Piezoelectric Properties of Wurtzite AlN Films under In-Plane Strain: A First-Principles Study», *Coatings*, vol. 14, n.º 8, p. 984, ago. 2024, doi: 10.3390/coatings14080984.
- [66] M. Dore *et al.*, «Lead-Free (K0.5Na0.5)NbO3 Unmodified Piezoceramics: A Reduction in the Energetic Budget of Solid State Synthesis and Sintering», *Chemistry–Methods*, vol. n/a, n.º n/a, p. 202500038, doi: 10.1002/cmtd.202500038.
- [67] M. Mobin, O. V. Mishin, C. Abdurrahmanoglu, V. Esposito, y A. B. Haugen, «Textured K0.5Na0.5NbO3 piezoelectric ceramics produced by vat photopolymerization-based additive manufacturing», *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 46, n.º 1, p. 117776, ene. 2026, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2025.117776.
- [68] R. Pinho, A. Tkach, M. A. Carpenter, J. Noudem, M. E. Costa, y P. M. Vilarinho, «Elastic moduli of potassium sodium niobate ceramics: Impact of spark plasma texturing», *Scr. Mater.*, vol. 218, p. 114837, sep. 2022, doi: 10.1016/j.scriptamat.2022.114837.
- [69] B. Deng *et al.*, «Elevating electrical properties of (K, Na)NbO3 ceramics via cold sintering process and post-annealing», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 105, n.º 1, pp. 461-468, 2022, doi: 10.1111/jace.18103.
- [70] S. Sabir, M. Arshad, y S. K. Chaudhari, «Zinc Oxide Nanoparticles for Revolutionizing Agriculture: Synthesis and Applications», *Sci. World J.*, vol. 2014, p. 925494, 2014, doi: 10.1155/2014/925494.
- [71] T. Azuhata *et al.*, «Brillouin scattering study of ZnO», *J. Appl. Phys.*, vol. 94, n.º 2, pp. 968-972, jul. 2003, doi: 10.1063/1.1586466.
- [72] Ü. Özgür *et al.*, «A comprehensive review of ZnO materials and devices», *J. Appl. Phys.*, vol. 98, n.º 4, p. 041301, ago. 2005, doi: 10.1063/1.1992666.
- [73] U. Rössler, «ZnO: piezoelectric coefficients», en *New Data and Updates for several Semiconductors with Chalcopyrite Structure, for several II-VI Compounds and diluted magnetic IV-VI Compounds*, U. Rössler, Ed., Berlin, Heidelberg:

- Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp. 176-178. doi: 10.1007/978-3-642-28531-8_85.
- [74] Z. Yang, S. Zhou, J. Zu, y D. Inman, «High-Performance Piezoelectric Energy Harvesters and Their Applications», *Joule*, vol. 2, n.º 4, pp. 642-697, abr. 2018, doi: 10.1016/j.joule.2018.03.011.
- [75] E. Brusa, A. Carrera, y C. Delprete, «A Review of Piezoelectric Energy Harvesting: Materials, Design, and Readout Circuits», *Actuators*, vol. 12, n.º 12, p. 457, dic. 2023, doi: 10.3390/act12120457.
- [76] T. G. Degefa, A. Wróbel, y M. Płaczek, «Modelling and Study of the Effect of Geometrical Parameters of Piezoelectric Plate and Stack», *Appl. Sci.*, vol. 11, n.º 24, p. 11872, ene. 2021, doi: 10.3390/app112411872.
- [77] M. Rahimzadeh, H. Samadi, y N. S. Mohammadi, «Analysis of Energy Harvesting Enhancement in Piezoelectric Unimorph Cantilevers», *Sensors*, vol. 21, n.º 24, p. 8463, ene. 2021, doi: 10.3390/s21248463.
- [78] C. Covaci y A. Gontean, «Piezoelectric Energy Harvesting Solutions: A Review», *Sensors*, vol. 20, n.º 12, p. 3512, jun. 2020, doi: 10.3390/s20123512.
- [79] H. Shekhani, T. Scholehwar, E. Hennig, y K. Uchino, «High Power Characterization of Piezoelectric Ceramics Using the Burst/Transient Method with Resonance and Antiresonance Analysis», *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 100, may 2016, doi: 10.1111/jace.14580.
- [80] L. Gu *et al.*, «Enhancing the current density of a piezoelectric nanogenerator using a three-dimensional intercalation electrode», *Nat. Commun.*, vol. 11, n.º 1, p. 1030, feb. 2020, doi: 10.1038/s41467-020-14846-4.
- [81] D. G. Wakshume y M. Ł. Płaczek, «Mathematical Modeling and Finite Element Simulation of the M8514-P2 Composite Piezoelectric Transducer for Energy Harvesting», *Sensors*, vol. 25, n.º 10, p. 3071, ene. 2025, doi: 10.3390/s25103071.
- [82] M. Acosta *et al.*, «BaTiO₃-based piezoelectrics: Fundamentals, current status, and perspectives», *Appl. Phys. Rev.*, vol. 4, p. 041305, dic. 2017, doi: 10.1063/1.4990046.
- [83] M. Peddigari *et al.*, «Effect of elastic modulus of cantilever beam on the performance of unimorph type piezoelectric energy harvester», *APL Mater.*, vol. 6, p. 121107, dic. 2018, doi: 10.1063/1.5070087.
- [84] «Base Excitation Problem for Cantilevered Structures and Correction of the Lumped-Parameter Electromechanical Model», en *Piezoelectric Energy Harvesting*, John Wiley & Sons, Ltd, 2011, pp. 19-48. doi: 10.1002/9781119991151.ch2.
- [85] H. Kim, Y. Tadesse, y S. Priya, «Piezoelectric Energy Harvesting», en *Energy Harvesting Technologies*, S. Priya y D. J. Inman, Eds., Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 3-39. doi: 10.1007/978-0-387-76464-1_1.
- [86] D. Gedeon y S. J. Rupitsch, «Finite element based system simulation for piezoelectric vibration energy harvesting devices», *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 29, n.º 7, pp. 1333-1347, abr. 2018, doi: 10.1177/1045389X17733328.
- [87] M. M. Mirsayar y D. J. Hartl, «Damage detection via embedded sensory particles – Effect of particle/matrix interphase properties», *Compos. Struct.*, vol. 232, p. 111536, ene. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.111536.
- [88] M. Akbar y J. L. Curiel-Sosa, «An iterative finite element method for piezoelectric energy harvesting composite with implementation to lifting structures under Gust

- Load Conditions», *Compos. Struct.*, vol. 219, pp. 97-110, jul. 2019, doi: 10.1016/j.compstruct.2019.03.070.
- [89] A. Erturk y D. J. Inman, *Piezoelectric Energy Harvesting*. John Wiley & Sons, 2011.
- [90] S. Ravi y A. Zilian, «Monolithic modeling and finite element analysis of piezoelectric energy harvesters», *Acta Mech.*, vol. 228, n.º 6, pp. 2251-2267, jun. 2017, doi: 10.1007/s00707-017-1830-7.
- [91] M. He, M. He, X. Zhang, y L. Xia, «Topology Optimization of Piezoelectric Energy Harvesters for Enhanced Open-Circuit Voltage Subjected to Harmonic Excitations», *Materials*, vol. 15, n.º 13, p. 4423, ene. 2022, doi: 10.3390/ma15134423.