



Universidad
del Valle

ESTIMACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN FERROELECTRETOS PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN TRANSDUCTORES FLEXURALES

JUAN DAVID CORTÁZAR AGUÍAR

Universidad del Valle

Facultad de Ingeniería

Escuela de Ingeniería Mecánica, Centro de Investigación e Innovación
en Bio-informática y Fotónica - CIBioFi

Cali, 2024

ESTIMACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS EN FERROELECTRETOS PARA SU POTENCIAL APLICACIÓN EN TRANSDUCTORES FLEXURALES

JUAN DAVID CORTÁZAR AGUÍAR

Tesis presentada como requisito para optar al título de:
Ingeniero Mecánico

Director: Prof. Jhon Fernando Pazos Ospina MSc.

Co-director: Prof. Joao Luís Ealo Cuello PhD.



Universidad del Valle
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica, Centro de Investigación e Innovación en
Bio-informática y Fotónica - CIBioFi
Cali, 2024

Índice general

List of Figures	2
List of Tables	11
1. Introducción	15
1.1. Árbol del problema	17
1.2. Objetivos	17
1.2.1. General	17
1.2.2. Objetivos Específicos	17
1.3. Justificación	18
1.4. Marco Conceptual	19
1.5. Marco Teórico	20
1.5.1. Impedancia Acústica y Transmisión	20
1.5.2. Transmisión en tres medios	20
1.5.3. Ecuación de movimiento	21
1.5.4. Ecuación de Onda	23
1.5.5. Dispersión en una película como guía de onda	27
1.5.6. Curvas de dispersión	30
1.5.7. Ecuación de resonancia para placas circulares fijadas en el perímetro	32
2. Metodología	33
2.1. Espectroscopia ultrasónica acoplada en aire	34
2.1.1. Captura de Señal de Referencia	36
2.1.2. Captura de Señal Transmitida	36
2.1.3. Cálculo de la Función de Transferencia Acústica Experimental	37
2.1.4. Determinación del Módulo de Elasticidad A Partir de La Función de transferencia Acústica Experimental	38
2.2. Determinación del Módulo de Elasticidad a partir de las Curvas de Dispersión	41
2.2.1. Emisión	41
2.2.2. Recepción	44
2.2.3. Procesamiento	46
2.2.4. Extracción de propiedades mecánicas	50

2.3. Análisis Modal	55
2.3.1. Simulación De Modos flexurales de Vibración en Una Placa	55
2.3.2. Análisis Modal Experimental	59
3. Resultados	65
3.1. Resultados Espectroscopia Ultrasónica Acoplada en Aire	65
3.1.1. Ferroelectreto Con Aluminio En Una de Sus Superficies	66
3.1.2. Ferroelectreto Con Oro en Ambas Superficies	71
3.1.3. Ferroelectreto Con Oro en Una de Sus Superficies	75
3.1.4. Ferroelectreto Sin Electrodo Conductor	78
3.2. Resultados de Caracterización Por Medio de Las Curvas de Dispersión	80
3.2.1. Resultados Para Una Placa de Latón	80
3.2.2. Resultados Para Una Placa de Aluminio	82
3.2.3. Resultados Para Una Película de Ferroelectreto Con Sus Dos Superficies Recubiertas Con Aluminio	84
3.2.4. Resultados Para Una Película de Ferroelectreto Con Sus Dos Superficies Recubiertas Con Oro	86
3.3. Resultados de Respuesta Modal de Películas de Ferroelectreto A Través de Expe- rimentación y Simulación	90
3.3.1. Resultados de Respuesta Modal de Una Película de Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Aluminio	91
3.3.2. Resultados de Respuesta Modal de Una Película de Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Oro	99
4. Conclusiones Y Trabajos Futuros	109
4.1. Conclusiones	109
4.2. Trabajos Futuros	110
Bibliography	111

Índice de figuras

1.1.	Arbol del problema	17
1.2.	Modos de vibración de una película piezoeléctrica. Fuente:[1].	20
1.3.	Campos incidente, reflejado y transmitido para transmisión acústica en tres medios. Fuente: [2]	21
1.4.	Volumen material. Fuente: [3].	22
1.5.	Cuerda tensa deformada en un instante de tiempo fijo. Fuente: [4].	24
1.6.	Primeros cuatro modos de vibración de una cuerda tensa. Fuente: [4].	27
1.7.	Geometría de una película, guía de onda. Fuente: [5].	28
2.1.	Montaje experimental espectroscopia ultrasónica acoplada en aire. A: Esquemático captura de señal de referencia. B: Esquemático captura de señal transmitida por muestra. C: Set de transductores Rx y Tx enfrentados, en el medio de los transductores se observa el porta muestras. En rojo verde y azul se encuentran rotulados los transductores T1, T2 y T3 (de la tabla 2.2) de 250, 400 y 750 kHz respectivamente.	35
2.2.	Obtención de la función de transferencia experimental para una muestra de ferroelectreto con electrodos de oro en su superficie, excitada con transductores de 250 kHz. A: Dominio temporal de las señales de referencia y de transmisión. B: Dominio de la frecuencia para las señales de referencia, de transmisión y TF. C: Espectro de la fase de TF.	38
2.3.	Diagrama de flujo de proceso de optimización para caracterizar el módulo de elasticidad por medio de la técnica de espectroscopía ultrasónica acoplada en aire.	39
2.4.	Espesor de una muestra de ferroelectreto con electrodos de oro en sus superficies. Fotografía tomada con microscopio óptico del laboratorio de caracterización de materiales de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad del Valle. A: Espesor medido (<i>tk</i> s) de 107.8 μ m. B: Longitud medida para calibrar el software de medición del microscopio.	40

2.5.	Sistema opto-acústico por incidencia directa, considerando la generación y medición sin contacto de ondas ultrasónicas en películas de ferroelectretos. Emisión: láser pulsado, longitud de onda a 532 nm, BE: expansor de haz, BS: divisor de haz, BT: trampa óptica, M: espejo. Recepción: vibrómetro láser de efecto Doppler (LDV), longitud de onda a 633 nm, GM: espejos galvanométricos. Tomado y modificado de [6].	42
2.6.	Medición de energía láser pulsado en función al retardo aplicado por el parámetro Q_{sdelay} . Para esta medición no se usó ningún divisor de haz ni algún otro tipo de óptica en recorrido del haz láser. Medición y datos para construir la gráfica otorgados y autorizados por Castaño. José.	43
2.7.	Diagrama de tiempo, Q_{sdelay} respecto a disparo de diodo interno de láser. Fuente: [7].	43
2.8.	Disposición espacial de la posición del punto de excitación y las posiciones de medida para el levantamiento de la curva de dispersión experimental. Tomado y modificado de [8].	45
2.9.	Diagrama de flujo de metodología para capturar señales experimentales de barrido lineal con vibrómetro láser LDV. Tomado de [8]	46
2.10.	Evolución espacio-temporal de la onda a lo largo de una trayectoria recta en una lámina de latón. Los pasos con el vibrómetro se establecieron en 0.1 mm y el valor de retardo Q_{sdelay} a 250 us. En el cuadrado punteado en negro, se observa un aumento en el cual se puede observar la evolución temporal de un grupo pequeño de señales en el epicentro de la muestra.	47
2.11.	Frente de fase de set de señales de la muestra en un barrido lineal con el vibrómetro láser con una distancia de observación de 36 mm en una lámina de latón.	47
2.12.	Curva de dispersión en término de de número de onda (k) contra frecuencia (f) para placa de latón. A: Resultado gráfico de la transformada bidimensional de Fourier. B: Versión ampliada de A, con énfasis en un segmento particular del dominio de frecuencia y número de onda. En asteriscos rojos los puntos identificados con algoritmo de búsqueda dentro de la curva de dispersión.	49
2.13.	Extracción de parejas de número de onda (k) y frecuencia (f) de la curva de dispersión a través de método manual.	49
2.14.	Gráfica velocidad de fase contra frecuencia obtenida a partir de las parejas (K, f). A: Representación de la curva de dispersión sin ningún ajuste, mostrando los puntos extraídos automáticamente (cían) y con el método manual (negro). B: Representación de la curva de dispersión después de aplicar un ajuste polinómico de tercer orden (negro) y la aplicación de un filtro Savitzky-Golay (rojo).	50
2.15.	Diagrama de flujo del proceso empleado para extraer las propiedades elásticas de las muestras a partir de las curvas de dispersión. Fuente: [9].	51

2.16.	Ajuste a la curva de dispersión experimental por medio de algoritmo de optimización.	54
2.17.	Evolución de los parámetros dentro del ciclo iterativo del algoritmo de optimización. A: espesor (h), B: velocidad de propagación del sonido en dirección longitudinal ($C_L(magenta)$) y transversal ($C_T(cian)$) y C: error acumulativo.	55
2.18.	Curva de frecuencias contra radio del primer modo flexural de vibración de una placa con propiedades mecánicas y espesor caracterizado por medio de las curvas de dispersión.	56
2.19.	A: Geometría de película de ferroelectreto con electrodos de aluminio en Comsol Multiphysics®. B: Diseño CAD de sistema de sujeción de una película de ferroelectreto en su perímetro.	57
2.20.	Representación Cuantitativa de los desplazamientos simulados de la superficie de una placa de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies. A: Primer modo flexural de vibración a 20.8 kHz. B: Segundo modo flexural de vibración a 43.6 kHz. C: Tercer modo flexural a 68.5 kHz. D: Cuarto modo flexural a 74 kHz.	58
2.21.	Esquemático del montaje experimental utilizado para realizar análisis modal a muestras de ferroelectreto. En rectángulo punteado negro se observa el plano de la película de ferroelectreto y los puntos en rojo representan los puntos de medición del vibrómetro láser.	59
2.22.	Estructura fabricada para sostener una película de ferroelectreto de forma que quede fija en su perímetro y libre en el área. A: Representación del ensamble película-estructura. B: Proceso de calibración del vibrómetro láser para medir las vibraciones en una matriz cuadrada de puntos de observación.	60
2.23.	Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de oro en sus dos superficies, A: Se muestra el plano M_{xy} para una frecuencia específica, representada por el círculo rojo en la sub-figura E. B: Superficie del plano representado en la Figura A. C: Plano de fases F_{xy} en el que se observan los valores de fase de los puntos de observación en la película. D: Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. E: espectro en frecuencia de la información del punto de observación central resaltado en F. resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al primer modo flexural de vibración a una frecuencia de 16.3 kHz. F: Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación del vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la sub-figura E. El círculo amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película.	63

3.1.	Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con aluminio en una de sus superficies (HS03) usando transductores de 250 kHz y 400 kHz.	67
3.2.	Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con aluminio en una de sus superficies (HS03) usando transductores de 750 kHz.	70
3.3.	Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro usando transductores de 250 kHz.	72
3.4.	Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro usando transductores de 400 kHz.	73
3.5.	Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro usando transductores de 750 kHz.	74
3.6.	Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con una superficie recubierta con oro usando transductores de 400 kHz.	76
3.7.	Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con una superficie recubierta con oro usando transductores de 750 kHz.	77
3.8.	Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto sin electrodo conductor usando transductores de 250 kHz, 400 kHz y 750 kHz.	79
3.9.	Curvas producto del proceso de optimización para caracterizar una muestra de latón de 260 μm de espesor, a partir de las curvas de dispersión.	81
3.10.	Curvas producto del proceso de optimización para caracterizar una muestra de aluminio de 410 μm de espesor, a partir de las curvas de dispersión.	83
3.11.	Grupo de señales en el dominio del tiempo y el espacio para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con capa de aluminio.	84
3.12.	Curvas de dispersión en el dominio número de onda-frecuencia y frecuencia-velocidad de fase para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies con electrodo conductor de aluminio.	85
3.13.	Curvas producto del proceso de optimización para caracterizar una muestra de de ferroelectreto con abas superficies recubiertas con aluminio de $\approx 100 \mu m$ de espesor, a partir de las curvas de dispersión.	86
3.14.	Grupo de señales en el dominio del tiempo y el espacio para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con una capa de oro.	87

3.15.	Curvas de dispersión en el dominio número de onda-frecuencia y frecuencia-velocidad de fase para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies con electrodo conductor de oro.	88
3.16.	Curvas producto del proceso de optimización para caracterizar una muestra de ferroelectreto con abas superficies recubiertas con oro de $\approx 100 \mu m$ de espesor, a partir de las curvas de dispersión.	89
3.17.	Resultados de las cuatro primeras frecuencias propias simuladas de una película circular de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con aluminio. . . .	92
3.18.	Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies, (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación central resaltado en (F). resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al primer modo flexural de vibración a una frecuencia de 20.7 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en gris representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Primer modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.17)	94
3.19.	Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies, (A): Se muestra el plano en mapa de color de las velocidades para una frecuencia específica, representada por el círculo rojo en la subfigura (E). (B): Superficie del plano representado en la Figura (A). (C): Plano de fases de los puntos de observación en la película. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación central señalado en (F), resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 42.7 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación del vibrómetro láser, se resalta el punto a una distancia de 0.25 veces el diámetro desde el centro del círculo con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo gris representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Segundo modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.17)	96

- 3.20. Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies, (A): Plano en mapa de color de las velocidades de desplazamiento para una frecuencia específica, resaltada por el círculo rojo en la subfigura (E). (B): Superficie del plano representado en la Figura (A). (C): Plano de fase. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25D en dirección radial desde el centro, señalado en (F), resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al tercer modo flexural de vibración a una frecuencia de 66.6 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto a una distancia de 0.25 veces el diámetro desde el centro del círculo con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo gris representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Tercer modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.17) 97
- 3.21. Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies, (A): Plano en mapa de color de las velocidades de desplazamiento para una frecuencia específica, resaltada por el círculo rojo en la subfigura (E). (B): Superficie del plano representado en la Figura (A). (C): Plano de fase. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25D en dirección radial desde el centro, señalado en (F), resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al tercer modo flexural de vibración a una frecuencia de 75 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto a una distancia de 0.25 veces el diámetro desde el centro del círculo con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo gris representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Cuarto modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.17) 98
- 3.22. Resultados de las seis primeras frecuencias propias simuladas de una película circular de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro. 100

- 3.23. Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación central resaltado en (F). resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al primer modo flexural de vibración a una frecuencia de 11.2 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Primer modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22) 101
- 3.24. Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25 veces el diámetro en dirección radial desde el centro, resaltado en (F). Resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 18.6 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Segundo modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22) 102

- 3.25. Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25 veces el diámetro en dirección radial desde el centro, resaltado en (F). Resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 29.8 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Tercer modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22) 103

- 3.26. Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25 veces el diámetro en dirección radial desde el centro, resaltado en (F). Resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 31.7 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Cuarto modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22) 104

- 3.27. Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto central de la película circular, resaltado en (F). Resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 35.2 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Quinto modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22) 105
- 3.28. Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25 veces el diámetro en dirección radial desde el centro, resaltado en (F). Resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 41.5 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Sexto modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22) 106

Índice de cuadros

1.1.	valor del parámetro λ_{ij} según el modo de vibración de la placa circular fija en el perímetro. fuente: [10].	32
2.1.	Muestras de ferroelectreto. En todas las fotos excepto las de ferroelectreto con electrodo de aluminio en sus dos superficies se incluye un trozo de papel milimétrico (verde-blanco) con una longitud de $3cm$	34
2.2.	Transductores ultrasónicos	35
2.3.	Parámetros del modelo usados en Comsol Multiphysics® para correr la simulación.	57
3.1.	Resultados de parámetros reportados por T. Gómez en [11].	66
3.2.	Resumen resultados de parámetros optimizados por algoritmo, ferroelectreto HS03 con un solo electrodo de aluminio cuando se aplico experimento con transductores de 750 kHz.	71
3.3.	Resumen resultados de parámetros optimizados para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas de oro cuando se aplico experimento con transductores de 250 kHz.	72
3.4.	Resumen resultados de parámetros optimizados para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas de oro cuando se aplico experimento con transductores de 750 kHz.	75
3.5.	Resumen resultados de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas de oro.	75
3.6.	Resumen resultados de parámetros optimizados para una muestra de ferroelectreto con solo una superficie recubierta de oro cuando se aplico experimento con transductores de 400 kHz.	76
3.7.	Resumen resultados de parámetros optimizados para una muestra de ferroelectreto con solo una superficie recubierta de oro cuando se aplico experimento con transductores de 750 kHz.	78
3.8.	Resumen resultados de parámetros optimizados mediante las curvas de dispersión para una placa de latón.	82
3.9.	Resumen resultados de parámetros optimizados mediante las curvas de dispersión para una placa de aluminio.	83

3.10.	Resumen resultados de parámetros optimizados mediante las curvas de dispersión para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con aluminio.	86
3.11.	Resumen resultados de parámetros optimizados mediante las curvas de dispersión para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro.	89
3.12.	Resumen resultados Propiedades caracterizadas por medio de técnicas de espectroscopía ultrasónica acoplada en aire y curvas de dispersión.	90
3.13.	Parámetros del modelo usados en Comsol Multiphysics® para la simulación de una placa de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con aluminio.	91
3.14.	Resumen de resultados de simulación y experimentación de análisis modal a ferroelectreto con electrodos de aluminio.	99
3.15.	Parámetros del modelo usados en Comsol Multiphysics® para la simulación de una placa de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro.	99
3.16.	Resumen resultados análisis modal a ferroelectreto con electrodos de oro.	107

Capítulo 1

Introducción

LA tecnología de los transductores electroacústicos se ha desarrollado enormemente en los últimos años, lo que permite su aplicación en una gran variedad de campos, como la medicina, la industria, la automoción, la seguridad, la comunicación, entre otros [12][13][14]. Los transductores acústicos son dispositivos que convierten una señal eléctrica en presión sonora, así como realizar la conversión inversa de presión sonora a señal eléctrica. En la actualidad, aquellos que emplean cerámicas piezoeléctricas destacan como la forma más avanzada de esta innovadora tecnología. [15]. Su estabilidad, su respuesta resonante y por tanto su amplia sensibilidad son algunas de sus ventajas más notorias. Sin embargo, su alta impedancia acústica en comparación con la del aire, junto con su limitado ancho de banda, implica la necesidad de acoplamientos y adaptaciones que pueden restringir su versatilidad [16].

En términos generales, existe la necesidad recurrente de contar con tecnologías de transductores diseñadas para operar en aire que posean características particulares. Entre estas, se incluyen un amplio ancho de banda, alta sensibilidad, una óptima adaptación de impedancias al medio de propagación, un costo reducido y versatilidad.

Recientemente, los ferroelectretos celulares han sido objeto de gran interés para la fabricación de transductores ultrasónicos debido a que este material presenta características acústicas, ferroeléctricas y mecánicas interesantes como: baja impedancia acústica, alta sensibilidad piezoeléctrica y gran flexibilidad. A esto se le suma que son de bajo costo y que su fabricación puede ser desarrollada a partir de manufactura aditiva por medio de impresión 3D [17].

Siendo el ferroelectreto un tipo de material cuyas propiedades y rutas de manufactura aún están siendo investigadas, los métodos y técnicas para averiguar sus propiedades elásticas juegan un importante rol dentro de la investigación y desarrollo de transductores acústicos basados en este material. Al determinar experimentalmente las constantes elásticas efectivas de los ferroelectretos mediante técnicas ultrasónicas, ópticas y/o mecánicas, se obtiene importante información para comprender su comportamiento y explotar su capacidad de respuesta en diferentes configuraciones. Ampliar el conocimiento sobre los ferroelectretos y mejorar el diseño de transductores a base de este novedoso material permitirá su uso en una amplia gama de aplicaciones que requieren transductores electroacústicos con características especiales, para operar acoplados en aire.

En el modo espesor de vibración o modo d_{33} la película de material se expande y se contrae en su grosor de manera alternativa, generando una onda de presión acústica en el medio circundante, como el aire. Con el objetivo de optimizar la presión sonora en el aire emitida por los transductores fabricados a partir de ferroelectretos, aprovechando su buen acoplamiento acústico con este medio, se plantea proponer dispositivos cuyo principio de operación esté basado en aprovechar los modos flexurales de vibración de una película de este material. Entendiéndose como modos flexurales de vibración a las diferentes formas en las que una película de ferroelectreto puede vibrar cuando se le aplica una excitación. La película en lugar de vibrar en su grosor, se deforma y vibra principalmente en su plano, generando patrones de movimiento complejos. De esta manera, se espera, para un mismo valor de voltaje aplicado en sus electrodos, lograr una respuesta vibratoria de mayor amplitud que la obtenida al operar en modo espesor (o modo d_{33}). Este último ha sido ampliamente reportado en la literatura para generación de ultrasonidos en aire [18] [19]. Si bien la película de ferroelectreto puede funcionar en modo espesor en un rango amplio de trabajo, funcionar de manera resonante, en modo flexural, podría proporcionar niveles más altos de sensibilidad. Lo anterior exige **el dimensionamiento adecuado del área radiante y el conocimiento de las propiedades elásticas efectivas**.

En este trabajo se plantean diferentes etapas que van desde la estimación de las propiedades elásticas efectivas de dos tipos de diferentes películas de ferroelectreto, hasta la simulación por medio de software de elementos finitos de los modos flexurales de una geometría circular de este material y su validación por medio de análisis modal experimental. Para la caracterización del material se aplicarán dos técnicas diferentes; espectroscopia ultrasónica acoplada en aire y la solución del problema inverso de ondas guiadas de Lamb, utilizando el método propuesto por D. A. Collazos-Burbano en [9].

Palabras clave: optoacústica, transductores, caracterización, ferroelectretos, vibración, película, modo, flexural, elasticidad, onda, espectroscopia, ultrasonido, electroacústica, acústica.

1.1. Árbol del problema

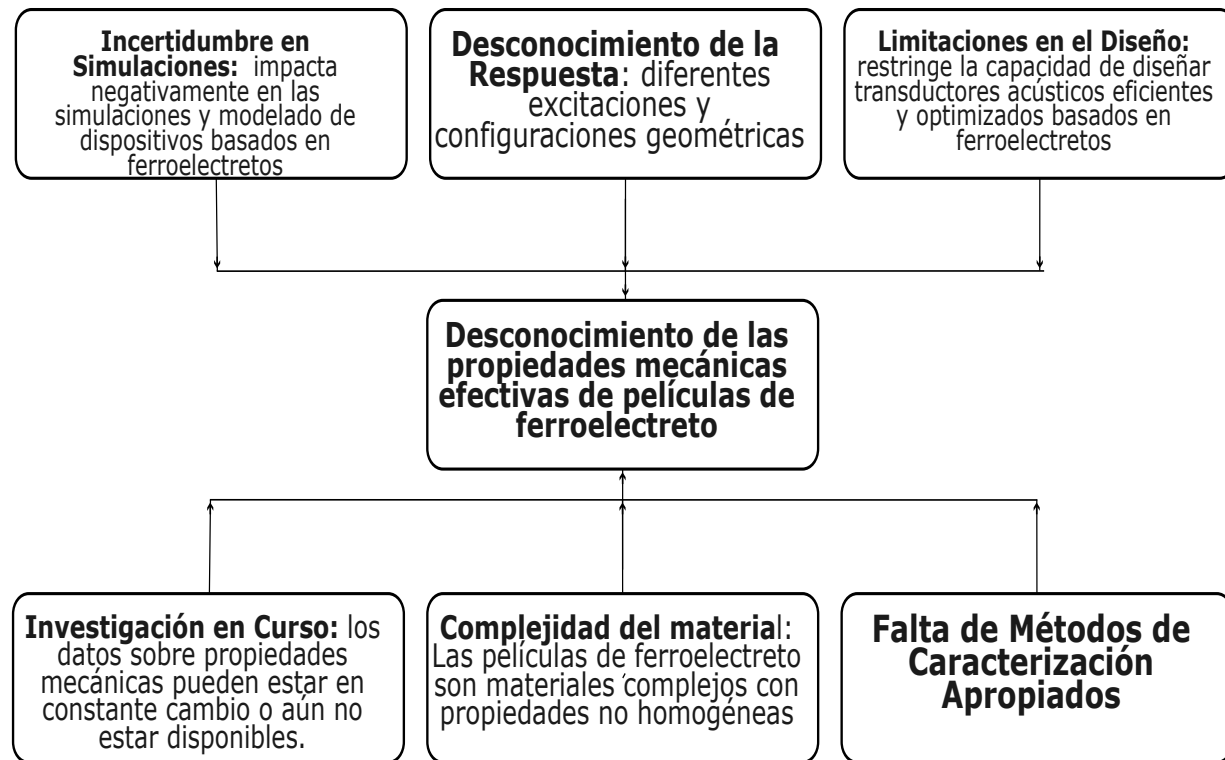


Figura 1.1: Arbol del problema

1.2. Objetivos

1.2.1. General

Estimar experimentalmente las propiedades mecánicas efectivas de dos películas de ferroelectreto por medio de técnicas ultrasónicas.

1.2.2. Objetivos Específicos

- O1. Estimar el modulo de elasticidad efectivo de dos tipos de ferroelectretos, a saber ferroelectretos con electrodos de aluminio y oro, mediante espectroscopia ultrasónica acoplada en aire.
- O2. Estimar el modulo de elasticidad y relación de Poisson efectivas para dos muestras de ferroelectretos, utilizando el método propuesto por D. A. Collazos-Burbano en [20], a partir de las curvas de dispersión del medio.
- O3. Evaluar la respuesta modal de una película de ferroelectreto a través de experimentación y/o simulación.

1.3. Justificación

En los últimos años, los ferroelectretos celulares han sido objeto de gran interés para la fabricación de transductores debido a que este material presenta características acústicas, ferroeléctricas y mecánicas interesantes como: baja impedancia acústica, alta sensibilidad piezoeléctrica y gran flexibilidad. Siendo un tipo de material cuyas propiedades y rutas de manufactura están bajo investigación aún, los métodos y técnicas para caracterizar dichas propiedades elásticas juegan un rol importante, por ejemplo, en la fabricación de sensores y actuadores. Una técnica no destructiva para la caracterización de las propiedades de ferroelectretos celulares puede mejorar la calidad de estos productos y reducir los costos de producción.

La falta de conocimiento acerca de las propiedades mecánicas efectivas de las películas de ferroelectreto representa un desafío sustancial en la búsqueda de la optimización de transductores electroacústicos basados en este material. Este vacío de información se traduce en la incapacidad para llevar a cabo simulaciones precisas de la respuesta de los ferroelectretos en situaciones de excitación y condiciones de contorno variables o obstaculizando la determinación de las frecuencias naturales para configuraciones específicas de modelos de transductores a través de métodos analíticos convencionales. La razón subyacente radica en la ausencia de datos concernientes a las constantes mecánicas, las cuales son parámetros críticos requeridos por los programas de simulación o los modelos analíticos existentes.

Como resultado, el diseño y desarrollo de transductores basados en ferroelectretos se ve limitado, ya que no se pueden realizar predicciones precisas ni optimizar su rendimiento sin un conocimiento adecuado de las propiedades mecánicas de estos materiales.

Con los dos primeros objetivos de este trabajo se determinan las propiedades mecánicas de diferentes películas de ferroelectretos. Con lo anterior surge entonces la posibilidad de explorar nuevas formas de utilizar el ferroelectreto aprovechando las prestaciones que este material ofrece para producir ultrasonidos en aire, dando lugar al tercer objetivo específico de este trabajo, en el cual se busca simular la respuesta vibracional de una película de ferroelectreto cuyas propiedades se determinaron con los dos primeros objetivos y validar esta simulación por medio de experimentación.

El estudio de nuevos modos de vibración, como los modos flexurales de vibración del ferroelectreto, es importante para producir ultrasonido en aire debido a varias razones:

En primer lugar, el uso de los modos flexurales de vibración del ferroelectreto podría mejorar la eficiencia de la conversión de energía eléctrica en energía acústica. Esto se debe a que los modos flexurales podrían presentar una mayor eficiencia de conversión que los modos longitudinales, lo que significa que se necesitaría menos energía eléctrica para generar un mismo nivel de presión sonora en comparación con los modos de vibración usualmente utilizados reportados en la literatura.

En segundo lugar, la utilización de estos modos de vibración permite la generación de ondas

ultrasónicas de alta frecuencia, lo que es importante en aplicaciones médicas y de ensayos no destructivos como se reportó anteriormente.

En tercer lugar, el estudio de nuevos modos de vibración podría llevar a la identificación de este material como uno de los principales candidatos para fabricar transductores ultrasónicos más asequibles que los actuales en el mercado.

1.4. Marco Conceptual

- **Definición de Película :** En el contexto de este documento, se emplea el término "*película*" para hacer referencia a una capa delgada de ferroelectreto con un espesor que varía entre $60\mu m$ y $130\mu m$. Estas películas pueden o no incluir electrodos conductores, que típicamente están hechos de oro o aluminio, y se encuentran en los dos planos más extensos de la capa de ferroelectreto. Esta estructura se utiliza en diversas aplicaciones, como transductores electroacústicos.
- **Vibraciones flexurales:** En el ámbito de la ingeniería mecánica, el estudio de las vibraciones es fundamental para comprender el comportamiento dinámico de las estructuras y los sistemas mecánicos. Dentro del amplio campo de las vibraciones mecánicas, las vibraciones flexurales se refieren a los movimientos de flexión o curvatura que experimentan las estructuras delgadas cuando se someten a una excitación dinámica. Estas vibraciones son especialmente relevantes en elementos como placas, laminas y vigas delgadas. Las vibraciones flexurales podrían tener efectos importantes sobre un campo de presiones radiado por una superficie oscilante en un medio como el aire.
- **Modos de Vibración en películas:** Se denomina modos de vibración a las diferentes formas en las que puede vibrar una película. Cada modo de vibración está asociado con una frecuencia natural específica y un patrón característico de movimiento. Cuando una película vibra en uno de sus modos de vibración, diferentes partes de ella se mueven de manera sincronizada y armónica, mientras que otras partes permanecen relativamente estables. Estos modos de vibración están determinados por las propiedades geométricas, mecánicas, excitación y las condiciones de borde de la película.

La polarización de la película se refiere a la dirección en la cual se alinean los dipolos eléctricos en el material. Dependiendo de la frecuencia a la que se polarice la película, diferentes modos de vibración pueden ser favorecidos.

La orientación de la película también juega un papel importante en los modos de vibración. La forma en que se ubique la película piezoeléctrica en relación con el sistema de excitación en el que se encuentra afectará los modos de vibración que pueden ocurrir.

Además, la frecuencia de excitación influye en los modos de vibración. Cada material pie-

zoeléctrico tiene frecuencias naturales en las que es más propenso a vibrar. Estas frecuencias naturales están determinadas por las propiedades físicas y mecánicas del material y su geometría. Al aplicar una excitación a una frecuencia específica, se pueden excitar ciertos modos de vibración y suprimir otros.

En películas piezoeléctricas, los modos de vibración d_{33} y d_{31} son términos comúnmente utilizados para describir los patrones de vibración resultantes de la excitación eléctrica en el material. La denominación de estos modos de vibración está asociada con las direcciones en las que se produce la expansión o contracción del material piezoeléctrico, así como la dirección en las cuales se excita eléctricamente el material.

El modo de vibración d_{33} se refiere a la dirección en la cual el material se expande o se contrae en respuesta a una excitación eléctrica aplicada en la misma dirección. En este modo, el cambio de longitud del material se produce a lo largo del eje z (la figura 1.2), que es normal a la superficie de la película. Por otro lado, el modo de vibración d_{31} se refiere a la dirección en la cual el material se expande o se contrae cuando se aplica una excitación eléctrica en dirección normal a la superficie de la película, en el plano $(x-y)$ (figura 1.2). En este modo, la expansión y contracción del material ocurre en el plano de la película.

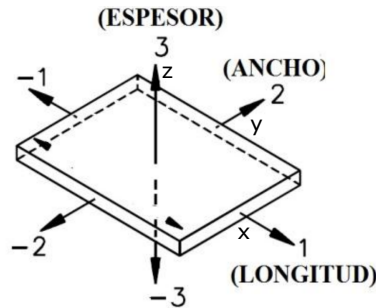


Figura 1.2: Modos de vibración de una película piezoeléctrica. Fuente:[1].

1.5. Marco Teórico

1.5.1. Impedancia Acústica y Transmisión

La impedancia acústica (Z) de un material se define como:

$$Z = \rho \times c \quad (1.1)$$

Donde ρ representa la densidad y c la velocidad de propagación.

1.5.2. Transmisión en tres medios

Para deducir la expresión de la función de transferencia acústica en tres medios se utiliza el principio de continuidad de la presión y la velocidad de partícula en las interfaces entre los

medios. Esto implica que la presión y la velocidad de partícula deben ser iguales en ambos lados de una interfaz.

Si se considera la figura 1.3 y se supone que una onda armónica entra en el medio I. Poniendo como origen del eje x la primer interfaz. El campo de presiones en el medio I y II es:

$$P_I = A_1 e^{-ik_1 x} + B_1 e^{ik_1 x} \quad (1.2)$$

$$P_{II} = A_2 e^{-ik_2 x} + B_2 e^{ik_2 x} \quad (1.3)$$

Donde k es el número de onda. Para el medio III es conveniente tomar $x = t$ como el origen para la onda transmitida.

$$P_{III} = A_3' e^{-ik_3 x} = A_3 e^{i-k_3(x-t)} \quad (1.4)$$

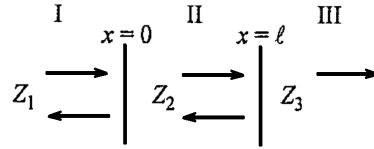


Figura 1.3: Campos incidente, reflejado y transmitido para transmisión acústica en tres medios. Fuente: [2]

Aplicando continuidad en la primer interfaz:

$$A_1 + B_1 = A_2 + B_2 \quad (1.5)$$

$$A_1 - B_1 = \frac{Z_1}{Z_2} (A_2 - B_2) \quad (1.6)$$

Aplicando un procedimiento similar en la interfaz II ($x=l$):

$$A_2 e^{-ik_2 l} - B_2 e^{-ik_2 l} = \frac{Z_2}{Z_3} A_3 \quad (1.7)$$

Tratando las ecuaciones anteriores para obtener el cociente $A_3/A_1 = T$, se haya la expresión para el coeficiente de transmisión (T):

$$T = \frac{4}{(1 + Z_2/Z_3 + Z_1/Z_2 + Z_1/Z_3)e^{ik_2 l} + (1 - Z_2/Z_3 - Z_1/Z_2 + Z_1/Z_3)e^{-ik_2 l}} \quad (1.8)$$

1.5.3. Ecuación de movimiento

Para la obtención de la ecuación de onda que modela los desplazamientos en una película se parte de la segunda ley de Newton aplicada al sistema de la figura 1.4, la cual dice que la taza

de cambio del momento lineal total de un sistema debe de ser igual al sumatorio de las fuerzas individuales que actúan sobre el sistema, como lo indica la ecuación 1.9:

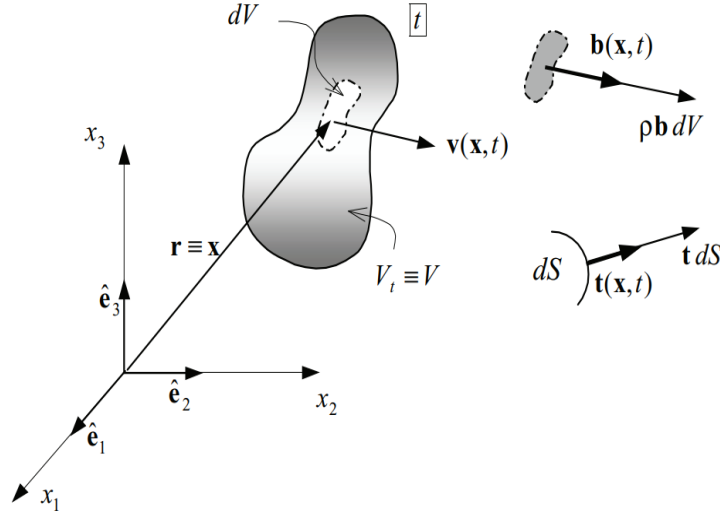


Figura 1.4: Volumen material. Fuente: [3].

$$\int_V \rho \mathbf{b} dV + \int_S \mathbf{t} dS = \frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV \quad (1.9)$$

Los términos en **negrita** indican cantidades vectoriales, así entonces $\mathbf{b}$, $\mathbf{t}$ y $\mathbf{v}$ indican las fuerzas de cuerpo, tracciones de superficie y la velocidad, respectivamente.

Si se reemplaza $\mathbf{t}$ en términos del vector de tracciones de Cauchy como: $\mathbf{t} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}$ (1.10), y además se aplica el teorema de la divergencia de Gauss (1.11), la ecuación 1.9 se puede reescribir como se muestra en 1.12

$$\int_S \mathbf{t} dS = \int_S \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} dS \rightarrow \text{Tensor de Cauchy} \quad (1.10)$$

$$\int_S \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} dS = \int_V \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma} dV \rightarrow \text{Teorema de la divergencia de Gauss} \quad (1.11)$$

$$\int_V (\rho \mathbf{b} + \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma}) dV = \frac{d}{dt} \int_V \rho \mathbf{v} dV \quad (1.12)$$

Si se supone que la densidad no cambia con el tiempo y se tiene en cuenta que la ecuación 1.12 es válida para cualquier volumen arbitrario, se puede reescribir como 1.13 en términos del desplazamiento de partícula $\mathbf{u}$:

$$\begin{aligned} \rho \mathbf{b} + \boldsymbol{\nabla} \cdot \boldsymbol{\sigma} &= \rho \ddot{\mathbf{u}} \rightarrow \text{Notación simbólica} \\ \rho b_q + \sigma_{qj,j} &= \rho u_{q,tt} \rightarrow \text{Notación indicial (3 ecuaciones independientes)} \end{aligned} \quad (1.13)$$

De la teoría de elasticidad (se utiliza notación indicial):

$$\epsilon_{qj} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i}) \quad (1.14)$$

$$\sigma_{qj} = \lambda \epsilon_{kk} \Delta_{qj} + 2\mu \epsilon_{qj} \quad (1.15)$$

Las ecuaciones 1.13 y 1.14 son validas para cualquier medio continuo. Por otro lado, la ecuación 1.15 (ley de Hooke) es definida de esta forma asumiendo un material isotrópico, homogéneo y linealmente elástico. A las constantes μ y λ se les conoce como constantes de Lamé, las cuales tienen relación con las constantes de ingeniería (modulo de Young [E] y relación de Poisson [ν]), como lo indican las expresiones en 1.17.

Si se reescribe la ecuación de movimiento (1.13) con ayuda de 1.14, 1.15 y las suposiciones mencionadas, resultan las ecuaciones de movimiento, que contienen los desplazamientos de partícula como si se tratase de un medio infinito.

$$\mu u_{q,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,jq} + \rho b_q = \rho \ddot{u}_q \quad (1.16)$$

$$\lambda = \frac{Ev}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1.17)$$

De la anterior expresión:

$$\nu = \frac{0,5 \lambda_L}{\mu + \lambda} \quad (1.18)$$

$$E = \frac{\mu (3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad (1.19)$$

1.5.4. Ecuación de Onda

En este apartado se deducirá la expresión que modela los desplazamientos verticales de una cuerda tensa como la de un violín (figura 1.5), este procedimiento conducirá a la ecuación de onda unidimensional.

Se asume que la cuerda esta fija en las posiciones $x = 0$ y $x = L$, además de las siguientes importantes suposiciones físicas:

- 1. La cuerda es homogénea, por lo tanto la masa por unidad de longitud es constante.
- 2. La cuerda es perfectamente elástica y no ofrece ninguna oposición a la flexión.
- 3. Los efectos de la tensión a lo largo de la cuerda son mucho más grandes que los efectos de la gravedad, por lo tanto se pueden despreciar estos últimos.

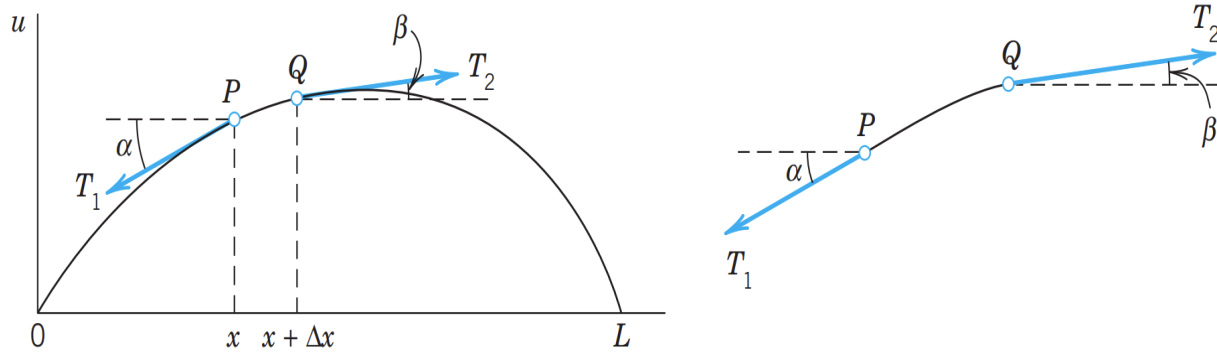


Figura 1.5: Cuerda tensa deformada en un instante de tiempo fijo. Fuente: [4].

- 4. La cuerda realiza pequeños movimientos transversales en un plano vertical; es decir, cada partícula de la cuerda se mueve estrictamente verticalmente de manera que la deflexión y la pendiente en cada punto de la cuerda siempre permanezcan pequeñas en valor absoluto.

Bajo las anteriores suposiciones se espera que una función $u(x, t)$ que describe la realidad física de los desplazamientos verticales de la cuerda funcione suficientemente bien. Esta función describe la amplitud de la perturbación en función del tiempo y la posición. La variable x representa la posición a lo largo de la cuerda, y t es el tiempo.

Considerando una pequeña porción entre dos puntos cercanos en equilibrio, representados como P y Q en la figura 1.5 y bajo la suposición de que la cuerda no ofrece oposición a la flexión, (se asume que la tensión en cada punto de la cuerda es tangencial). Entonces las componentes en la dirección horizontal de T_1 y T_2 en los puntos P y Q son opuestas e iguales en magnitud, ya que los puntos no se mueven en la dirección del eje x .

$$T_1 \cos(\alpha) = T_2 \cos(\beta) = T = \text{constante} \quad (1.20)$$

de forma similar aplicando segunda ley de Newton, realizando suma de las fuerzas en la dirección vertical de la cuerda se tiene que:

$$T_2 \sin(\beta) - T_1 \sin(\alpha) = \rho \Delta x \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.21)$$

Usando 1.20 podemos dividir el primer termino de 1.21 por $T_2 \cos(\beta)$, el segundo termino por $T_1 \cos(\alpha)$ y el termino que esta al otro lado de la igual por T , así:

$$\frac{T_2 \sin(\beta)}{T_2 \cos(\beta)} - \frac{T_1 \sin(\alpha)}{T_1 \cos(\alpha)} = \tan(\beta) - \tan(\alpha) = \frac{\rho \Delta x}{T} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.22)$$

Como $\tan(\beta)$ y $\tan(\alpha)$ son las pendientes en los puntos P y Q , entonces:

$$\tan(\beta) = \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x+\Delta x} \quad \text{y} \quad \tan(\alpha) = \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_x \quad (1.23)$$

Se escriben las derivadas anteriores en su versión parcial porque u no solo depende de x sino también del tiempo. Si dividimos 1.22 por Δx :

$$\frac{1}{\Delta x} \left[\left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_{x+\Delta x} - \left. \frac{\partial u}{\partial x} \right|_x \right] = \frac{\rho}{T} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1.24)$$

Si se aproxima Δx a cero:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, \quad \text{donde} \quad c^2 = \frac{T}{\rho} \quad (1.25)$$

La ecuación de movimiento, 1.21, o sus formas especiales 1.22 y 1.24, es una ecuación diferencial parcial de segundo orden. Dado que el orden de la derivada más alta de u con respecto a x y t en esta ecuación es dos, se deben especificar dos condiciones límite y dos condiciones iniciales para determinar la solución $u(x, t)$. Si la cuerda tiene una deflexión conocida $u_0(x)$ y velocidad $u'_0(x)$ en el instante $t = 0$, las condiciones iniciales se especifican como:

$$u(x, t = 0) = u_0(x) \quad \text{y} \quad \frac{\partial u}{\partial t}(x, t = 0) = u'_0(x) \quad (1.26)$$

Si la cuerda está fija por un extremo, es decir, $x = 0$, el desplazamiento u siempre debe ser cero, y así la condición límite es:

$$w(x = 0, t) = 0, \quad t > 0 \quad (1.27)$$

La ecuación de onda 1.25, se puede resolver por el método de separación de variables, según el cual la solución se escribe como el producto de una función $W(x)$ (que depende solo de x) y una función $T(t)$ (que depende solo de t):

$$u(x, t) = W(x)T(t) \quad (1.28)$$

La sustitución de la ecuación 1.28 en la ecuación 1.25 conduce a:

$$\frac{c^2}{W} \frac{d^2 W}{dx^2} = \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} \quad (1.29)$$

Como el lado izquierdo de esta ecuación depende sólo de x y el lado derecho depende sólo de t , su valor común debe ser constante, por ejemplo a , de modo que:

$$\frac{c^2}{W} \frac{d^2 W}{dx^2} = \frac{1}{T} \frac{d^2 T}{dt^2} = a \quad (1.30)$$

Las ecuaciones implicadas en la ecuación 1.30 se escriben como:

$$\frac{d^2 W}{dx^2} - \frac{a}{c^2} W = 0 \quad (1.31)$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} - aT = 0 \quad (1.32)$$

Se asume que $a = -\omega^2$, con lo que las ecuaciones 1.32 y 1.31 quedan:

$$\frac{d^2 W}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} W = 0 \quad (1.33)$$

$$\frac{d^2 T}{dt^2} + \omega T = 0 \quad (1.34)$$

Las soluciones de estas ecuaciones resultan de

$$W(x) = A \cos\left(\frac{\omega x}{c}\right) + B \sin\left(\frac{\omega x}{c}\right) \quad (1.35)$$

$$T(t) = C \cos(\omega t) + D \sin(\omega t) \quad (1.36)$$

donde ω es la frecuencia de vibración y las constantes A, B, C y D se pueden evaluar a partir de las condiciones límite e iniciales. Si la cuerda está fija por ambos extremos, las condiciones límite son $u(0, t) = u(L, t) = 0$ en todos los instantes $t \geq 0$. De ahí que, con la ecuación 1.31, se obtiene:

$$W(0) = 0 \quad (1.37)$$

$$W(L) = 0 \quad (1.38)$$

Para satisfacer la ecuación 1.37 se debe cumplir en la ecuación 1.35 que A sea cero. La ecuación 1.36 requiere que:

$$B \sin\left(\frac{\omega L}{c}\right) = 0 \quad (1.39)$$

Como B no puede ser cero para la solución no trivial se tiene:

$$\sin\left(\frac{\omega L}{c}\right) = 0 \quad (1.40)$$

La ecuación 1.40 se conoce como ecuación de frecuencia o característica y la satisfacen varios valores de ω . Los valores de ω se llaman valores *eigen* o bien **frecuencias naturales** o valores característicos del problema. La frecuencia natural enésima está dada por:

$$\frac{\omega n}{c} = n\pi, \quad n = 1, 2, \dots \quad (1.41)$$

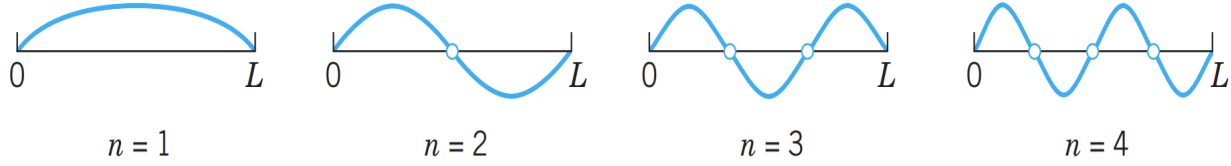


Figura 1.6: Primeros cuatro modos de vibración de una cuerda tensa. Fuente: [4].

o

$$\omega_n = \frac{nc\pi}{L}, \quad n = 1, 2, \dots \quad (1.42)$$

La solución $u_n(x, t)$ correspondiente a ω_n se puede expresar como:

$$u_n(x, t) = W_n(x)T_n(t) = \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \left[(C_n \cos\left(\frac{nc\pi t}{L}\right) + D_n \sin\left(\frac{nc\pi t}{L}\right)) \right] \quad (1.43)$$

donde C_n y D_n son constantes arbitrarias. La solución $u_n(x, t)$ se conoce como el modo n -ésimo de vibración; modo n -ésimo armónico, o modo n -ésimo normal de la cuerda. En este modo, cada punto de la cuerda vibra con una amplitud proporcional al valor de W_n en ese punto, con la frecuencia angular $\omega_n = \frac{nc\pi}{L}$. La función $W_n(x)$ se llama modo normal n -ésimo, o función característica. En la figura 1.6 se muestran los cuatro primeros modos de vibración. El modo correspondiente a $n = 1$ se llama modo fundamental, y ω_1 se denomina frecuencia fundamental. El periodo fundamental es:

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{2L}{c} \quad (1.44)$$

La solución general de la ecuación 1.25, que satisface las condiciones límite de las ecuaciones 1.37 y 1.37, se obtiene mediante la superposición de todas las $u_n(x, t)$:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n(x, t) \quad (1.45)$$

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) C_n \cos\left(\frac{nc\pi t}{L}\right) + D_n \sin\left(\frac{nc\pi t}{L}\right) \right] \quad (1.46)$$

1.5.5. Dispersión en una película como guía de onda

Debido a que una película se considera "delgada" se deben de cumplir algunas restricciones de contorno para la solución a las ecuaciones de 1.16, dichas restricciones son:

$$u(x, t) = u_0(x, 0) \quad \text{Desplazamiento en la superficie.} \quad (1.47)$$

$$t_q = \sigma_{qj}n_j \quad \text{Tracción en la superficie.} \quad (1.48)$$

Teniendo en cuenta las anteriores restricciones impuestas al considerar un medio con una forma geométrica como se muestra en la figura 1.7. Se asume que las superficies horizontales en las coordenadas $x_3 = \pm h$ están libres de esfuerzos de tracción.

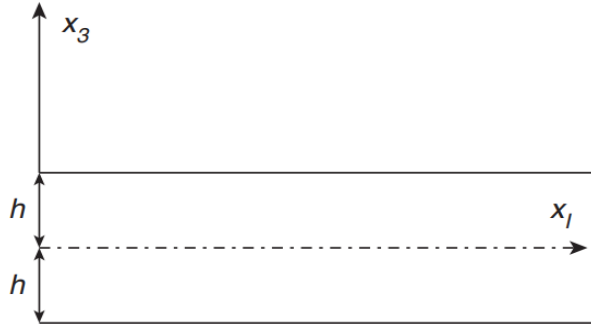


Figura 1.7: Geometría de una película, guía de onda. Fuente: [5].

Si se aplica el teorema de descomposición de Helmholtz de campos vectoriales al campo de desplazamientos, es decir:

$$\mathbf{u} = \nabla \phi + \nabla \times \mathbf{H}, \quad \nabla \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1.49)$$

y se aplican algunas identidades se obtiene finalmente la ecuación de movimiento ajustada para satisfacer condiciones de borde de una película delgada:

$$\nabla \left[(2\mu + \lambda) \nabla^2 \phi - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \phi \right] + \nabla \times \left[\mu \nabla^2 \mathbf{H} - \rho \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{H} \right] = 0 \quad (1.50)$$

La anterior ecuación se satisface si los dos términos se anulan, lo cual conduce a las siguientes ecuaciones de onda simplificadas:

$$\nabla^2 \phi = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \phi + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \phi = \frac{1}{C_L^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \phi \quad (1.51)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} \mathbf{H} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2} \mathbf{H} = \frac{1}{C_T^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{H} \quad (1.52)$$

Donde la velocidad longitudinal (c_L) y la velocidad transversal (c_T) están determinadas por las constantes de Lamé y la densidad:

$$C_L^2 = \frac{\lambda + 2\mu}{\rho}, \quad C_T^2 = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.53)$$

Si se supone deformación plana los desplazamientos y las tensiones pueden expresarse en términos de los potenciales como:

$$u_1 = u = \frac{\partial}{\partial x_1} \phi - \frac{\partial}{\partial x_3} H \quad (1.54)$$

$$u_2 = v = 0 \quad (1.55)$$

$$u_3 = w = \frac{\partial}{\partial x_3} \phi - \frac{\partial}{\partial x_1} H \quad (1.56)$$

$$\sigma_{31} = \mu \left(\frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \right) = \mu \left(\frac{2\partial^2 \phi}{\partial x_1 \partial x_3} - \frac{\partial^2 H}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} \right) \quad (1.57)$$

$$\sigma_{33} = \lambda \left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \right) + 2\mu \frac{\partial u_3}{\partial x_3} = \lambda \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} \right) + 2\mu \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x_3^2} - \frac{\partial^2 H}{\partial x_1 \partial x_3} \right) \quad (1.58)$$

Se supone solución a las ecuaciones de onda (1.51 y 1.52) de forma armónica de la forma:

$$\phi = \Phi(x_3) e^{[i(kx_1 - \omega t)]} \quad (1.59)$$

$$H = H(x_3) e^{[i(kx_1 - \omega t)]} \quad (1.60)$$

Estas soluciones representan ondas que se desplazan a lo largo de la película y que tienen distribuciones fijas (aún desconocidas) en las direcciones transversales.

Al sustituir las expresiones 1.59 y 1.60 en las ecuaciones 1.51 y 1.52 se encuentra entonces las ecuaciones de gobierno que rigen las funciones desconocidas ϕ y H . Las soluciones a estas ecuaciones son de la forma:

$$\phi = \phi(x_3) = A_1 \sin(px_3) + A_2 \cos(px_3), \quad (1.61)$$

$$H = H(x_3) = B_1 \sin(qx_3) + B_2 \cos(qx_3), \quad (1.62)$$

Donde:

$$p^2 = \frac{\omega^2}{c_L^2} - k^2 \quad \text{And} \quad q^2 = \frac{\omega^2}{c_T^2} - k^2 \quad (1.63)$$

Con estos resultados, los desplazamientos y los esfuerzos se obtienen directamente a partir de las ecuaciones 1.54 - 1.58. Omitiendo los términos $e^{[i(kx_1 - \omega t)]}$ para simplificar todas las expresiones, los resultados son los siguientes:

$$u_1 = \left[ik\phi + \frac{dH}{dx_3} \right] \quad (1.64)$$

$$u_3 = \left[\frac{d\phi}{dx_3} + ikH \right] \quad (1.65)$$

$$\sigma_{31} = \mu \left(2ik \frac{d\phi}{dx_3} + k^2 H + \frac{d^2 H}{dx_3^2} \right) \quad (1.66)$$

$$\sigma_{33} = \left[\lambda \left(\frac{d^2 \phi}{dx_3^2} - k^2 \phi \right) + 2\mu \left(\frac{d^2 \phi}{dx_3^2} - ik \frac{dH}{dx_3} \right) \right] \quad (1.67)$$

Debido a la naturaleza de las funciones trigonométricas implícitas en el conjunto de ecuaciones del campo de desplazamientos, se puede dividir las soluciones en dos configuraciones de modos; los modos simétricos y antisimétricos. Si u_1 contiene cosenos el movimiento será simétrico respecto al plano medio $x_3 = 0$, por otra parte si la solución contiene funciones seno entonces el movimiento será antisimétrico.

Las constantes A_1 , A_2 , B_1 y B_2 son desconocidas, así como las ecuaciones de dispersión 1.69, 1.68, éstas pueden determinarse aplicando la condición de borde de 1.48 lo cual hace que se anulen los esfuerzos $\sigma_{31} = \sigma_{33} = 0$ en $x_3 = \pm h$.

Los campos resultantes de desplazamiento, tensión y deformación dependen del tipo de modo (es decir, simétrico o antisimétrico). Sin embargo, la aplicación de las condiciones de contorno dará como resultado un sistema homogéneo de dos ecuaciones para las dos constantes apropiadas A_2 , B_1 (para el caso simétrico) y A_1 , B_2 (caso antisimétrico), con lo cual se obtienen las expresiones para los modos simétrico y antisimétrico:

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{4k^2 pq}{(q^2 - k^2)^2} \rightarrow \text{Para modos simétricos} \quad (1.68)$$

$$\frac{\tan(qh)}{\tan(ph)} = -\frac{(q^2 - k^2)^2}{4k^2 pq} \rightarrow \text{Para modos antisimétricos} \quad (1.69)$$

Las ecuaciones 1.68 y 1.69 son conocidas como las relaciones o ecuaciones de Rayleigh-Lamb o ecuaciones de dispersión. La solución a estas ecuaciones solo es posible mediante métodos numéricos.

1.5.6. Curvas de dispersión

Para obtener las curvas de dispersión, es necesario resolver las ecuaciones de Rayleigh-Lamb, las cuales dependen de ω y k , donde el número de onda puede tener valores complejos. En lo siguiente, solo tendrán en cuenta los valores reales de k , donde pueden ocurrir modos y propagación de ondas en el medio.

Para graficar las curvas se inicia con la redefinición de las variables en la ecuación 1.63, así:

$$p = k \sqrt{\frac{c_p^2}{c_L^2} - 1} = kp^* = \frac{\omega}{c_p} p^*, \quad p^* = \sqrt{\frac{c_p^2}{c_L^2} - 1} \quad (1.70)$$

$$q = k\sqrt{\frac{c_p^2}{c_T^2} - 1} = kq^* = \frac{\omega}{c_p}q^*, \quad q^* = \sqrt{\frac{c_p^2}{c_T^2} - 1} \quad (1.71)$$

Si definimos el espesor como t , entonces la altura h que se muestra en la figura 1.7 es $h = \frac{t}{2}$. Además se hacen las siguientes definiciones:

$$p' = \sqrt{\left|\frac{c_p^2}{c_L^2} - 1\right|}, \quad q' = \sqrt{\left|\frac{c_p^2}{c_T^2} - 1\right|} \quad (1.72)$$

Se puede apreciar que los valores de p^* y q^* pueden tener valores reales como complejos, dependiendo de la posición relativa de c_p en relación con c_L y c_T . Por lo tanto, la solución numérica de las curvas de dispersión se divide en tres regiones distintas, tal como se muestra a continuación:

- $c_L < c_T < c_p$

En este caso p^* y q^* son reales. Por lo tanto: $p^* = p'$ y $q^* = q'$. De esta manera las ecuaciones de dispersión se pueden escribir como:

$$\frac{\tan\left(\frac{\pi f d}{c_p} q'\right)}{\tan\left(\frac{\pi f d}{c_p} p'\right)} + \left(\frac{4p'q'}{[(q')^2 - 1]^2}\right)^\pm = 0 \quad (1.73)$$

El signo (+) indica el modo simétrico y el signo (−) el antisimétrico.

- $c_T < c_p < c_L$

En este caso p^* es complejo y q^* es real. Por lo tanto: $p^* = ip'$ y $q^* = q'$, $i = \sqrt{-1}$. De esta manera las ecuaciones de dispersión se pueden escribir como:

$$\frac{\tan\left(\frac{\pi f d}{c_p} q'\right)}{\tan\left(i\frac{\pi f d}{c_p} p'\right)} + \left(i\frac{4p'q'}{[(q')^2 - 1]^2}\right)^\pm = 0 \quad (1.74)$$

- $c_p < c_T < c_L$

En este caso tanto p^* como q^* son valores complejos. Por lo tanto: $p^* = ip'$ y $q^* = iq'$, $i = \sqrt{-1}$. De esta manera las ecuaciones de dispersión se pueden escribir como: 1

$$\frac{\tan\left(i\frac{\pi f d}{c_p} q'\right)}{\tan\left(i\frac{\pi f d}{c_p} p'\right)} + \left(-\frac{4p'q'}{[-(q')^2 - 1]^2}\right)^\pm = 0 \quad (1.75)$$

Una vez se definen estos rangos, se seleccionan bandas de interés tanto en la frecuencia, f , como en la velocidad de fase, c_p , y a partir de un algoritmo de optimización no lineal basado en

mínimos cuadrados, se exploran las parejas de coordenadas (f, c_p) que satisfacen las ecuaciones de dispersión 1.73 a la 1.75. De antemano se necesita conocer las características del material tales como el espesor (t) , las velocidades longitudinal y cortante $(c_L$ y $c_T)$, paso, con el cual se desean recorrer los intervalos f y c_p (definidos como Δf y Δc_p) con el objetivo de encontrar todas las parejas (f, c_p) .

1.5.7. Ecuación de resonancia para placas circulares fijadas en el perímetro

En el marco teórico de este trabajo, se emplea una ecuación fundamental para calcular la frecuencia de resonancia (f) correspondiente al modo propio de vibración de una placa circular que esta fija en su perímetro. Esta ecuación, derivada de las formulaciones presentadas en [10], describe la relación entre la frecuencia de resonancia y los parámetros físicos de la placa:

$$f_{ij} = \frac{\lambda_{ij}^2}{2\pi a^2} \left[\frac{Eh^3}{12\gamma(1-\nu^2)} \right]^{\frac{1}{2}} ; \quad i = 1, 2, 3, \dots \quad \text{and} \quad j = 1, 2, 3, \dots \quad (1.76)$$

donde λ_{ij} es un parámetro adimensional que depende del modo, representado en la tabla 1.1, en donde los subíndices ij están asociados a los modos de vibración de la placa. Así entonces para el modo fundamental de vibración de una placa circular los valores de i y j son cero por lo tanto λ adquiere un valor de 10.22. a es el radio de la placa, γ es la masa por unidad de área, ν es la relación de Poisson, E el modulo de elasticidad y h el espesor de la placa.

Tabla 1.1: valor del parámetro λ_{ij} según el modo de vibración de la placa circular fija en el perímetro. fuente: [10].

j	i			
	0	1	2	3
0	10.22	21.26	34.88	51.04
1	39.77	60.82	84.58	111.0
2	89.10	120.1	153.8	190.3
3	158.2	199.1	242.7	287.2

Capítulo 2

Metodología

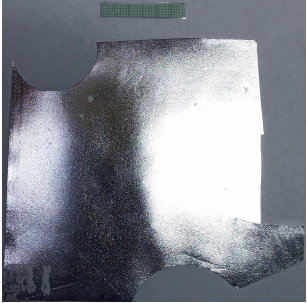
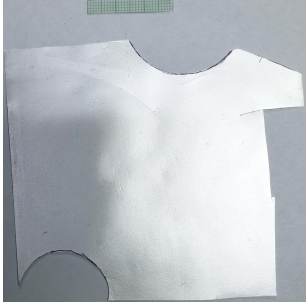
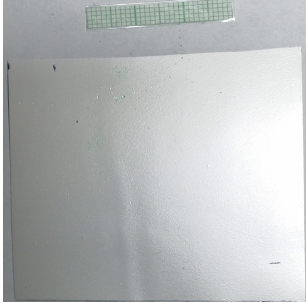
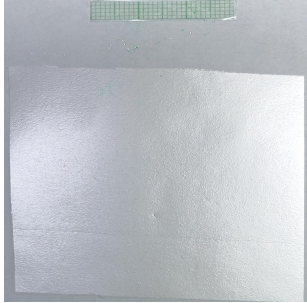
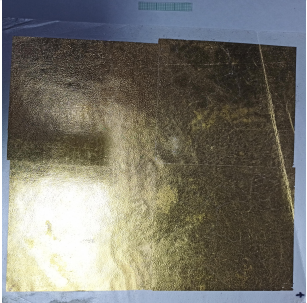
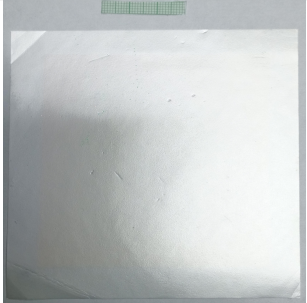
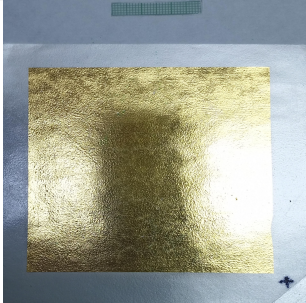
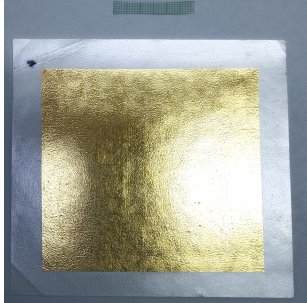
ESTE capítulo presenta la metodología propuesta para adquirir y procesar datos destinados a la determinación del módulo de elasticidad en muestras de ferroelectretos. Asimismo, se aborda el análisis de los modos flexurales de vibración en algunas de estas muestras cuando se someten a excitaciones eléctricas y se establecen condiciones de frontera específicas.

En la tabla 2.1 se presentan las distintas muestras de ferroelectretos que fueron objeto de experimentación. Es importante destacar que estas muestras varían en cuanto a los electrodos que recubren su superficie, pudiendo ser de aluminio u oro. Además, algunas muestras presentan electrodos en ambas superficies, mientras que otras tienen un solo electrodo en una de sus superficies.

Por otra parte se aclara que las muestras que se observan en la tabla 2.1 presentan formas heterogéneas debido a que se han extraído trozos para otros experimentos y que estas formas heterogéneas no afectan los resultados de los experimentos realizados en ellas (ni los de espectroscopia ni los de dispersión). Cabe mencionar que estas muestras son difíciles de conseguir y un poco costosas, por ello no se recortaron piezas con la misma geometría para someterlas a los experimentos presentados en este trabajo.

En el caso de las muestras con electrodos de aluminio en ambas superficies, no es posible aplicar la técnica de espectroscopia ultrasónica acoplada en aire. Esto se debe a que el área de la muestra de ferroelectreto es más pequeña que el área radiante de los transductores ultrasónicos utilizados en esta técnica para llevar a cabo el experimento.(tabla 2.1).

Tabla 2.1: Muestras de ferroelectreto. En todas las fotos excepto las de ferroelectreto con electrodo de aluminio en sus dos superficies se incluye un trozo de papel milimétrico (verde-blanco) con una longitud de 3cm

Frente	Atras	Frente	Atras
Aluminio una de sus superficies		Sin electrodo	
			
Oro en una de sus superficies		Oro en ambas superficies	
			
Aluminio ambas superficies			
			

Este capítulo se organizará en tres secciones fundamentales, cada una abordando la metodología de un experimento distinto para alcanzar los tres objetivos específicos establecidos.

2.1. Espectroscopia ultrasónica acoplada en aire

El objetivo de este experimento es encontrar la función de transferencia de transmisión acústica experimental de las muestras de ferroelectretos en la dirección del espesor. Para esto se utilizó el montaje experimental que se muestra en la figura 2.1. Los transductores que se usaron para realizar las mediciones se resumen en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Transductores ultrasónicos

Parejas de Transductores	Frecuencia (kHz)	Diámetro (mm)
1	250	27
2	400	27
3	750	22

Es necesario garantizar que las superficies activas de los transductores de transmisión (Tx) y recepción (Rx) que se muestra en la figura 2.1 y la superficie (plana) de la muestra se alineen en planos paralelos. Para asegurar esto, se fabricaron por medio de impresión 3D soportes para cada uno de los transductores ultrasónicos, así como para el porta muestra que se observa en figura 2.1 C.

Para determinar la función de transferencia experimental de la muestra en estudio, se procede a excitarla mediante una señal acústica, buscando que esta resuene y transmita la mayor cantidad de energía acústica cuando las ondas inciden de manera perpendicular a su superficie. Asimismo, es esencial registrar tanto la señal de excitación de la muestra como la señal de referencia (sin la muestra). La metodología para la captura de estas dos señales se detalla a continuación, comenzando con la captura de la señal de referencia.

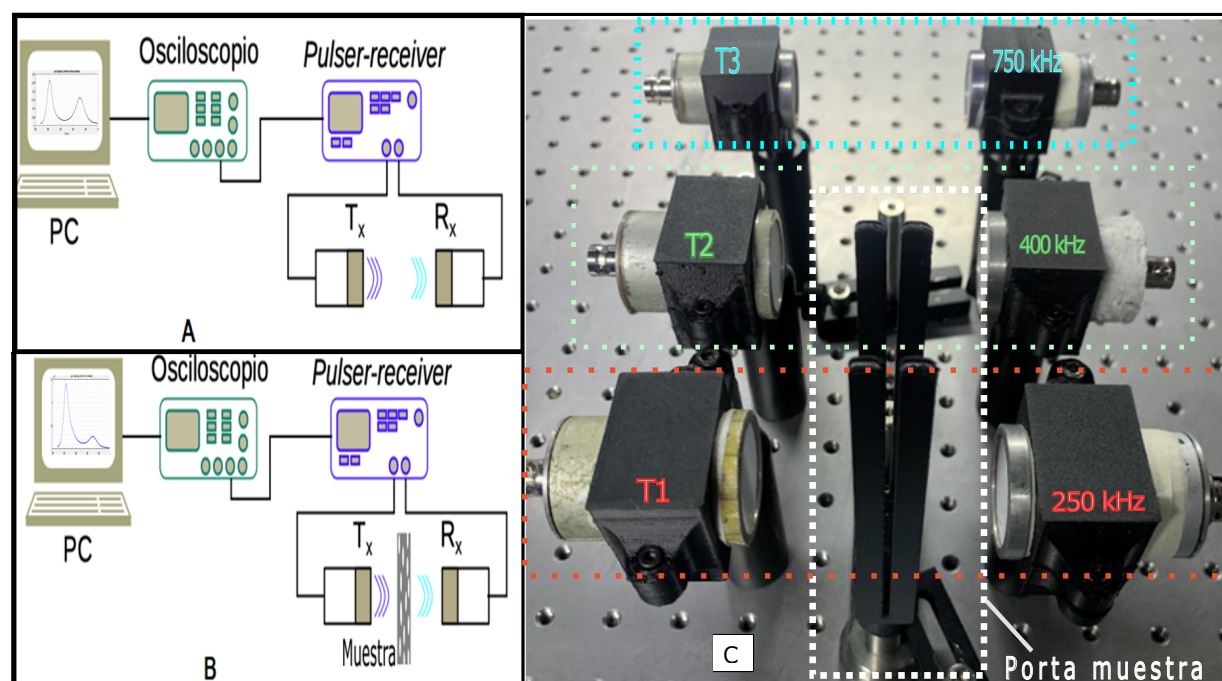


Figura 2.1: Montaje experimental espectroscopia ultrasónica acoplada en aire. A: Esquemático captura de señal de referencia. B: Esquemático captura de señal transmitida por muestra. C: Set de transductores Rx y Tx enfrentados, en el medio de los transductores se observa el porta muestras. En rojo verde y azul se encuentran rotulados los transductores T1, T2 y T3 (de la tabla 2.2) de 250, 400 y 750 kHz respectivamente.

2.1.1. Captura de Señal de Referencia

Para capturar la señal de referencia se utiliza un montaje experimental como el que se observa en la figura 2.1 A. En este montaje se enfrentan los dos transductores Tx y Rx de forma de que solo quede espacio vacío entre ellos, luego, se excita el transductor Tx con un pulser-receiver (Olympus NDT 5072 PR), el cual envía un pulso de 400 V con frecuencias centradas en 100 kHz, 250 kHz, 500 kHz y 1000 kHz. Para cada experimento, se seleccionó la frecuencia más cercana a la frecuencia de operación de los transductores de la tabla 2.2.

La señal de excitación aplicada al transductor Tx se envía, con el pulser receiver, a una frecuencia de repetición de pulso (PRF) por sus siglas en inglés *Pulse Repetition Frequency* de 200 Hz.

El transductor Tx genera una onda acústica en el aire que se desplaza hacia el área activa del transductor Rx. Este último está conectado al pulser-receiver en el canal de recepción, como se muestra en la figura 2.1 A. En algunos casos, la señal capturada por Rx se amplificó antes de ser enviada al osciloscopio para su digitalización y promediado. El autor seleccionó un valor de promediado entre 32 y 128 muestras para reducir el ruido. Después de este proceso, la señal se transfiere al computador y se almacena como señal de referencia.

2.1.2. Captura de Señal Transmitida

Se realiza el mismo procedimiento que se hace para capturar la señal de referencia explicado anteriormente pero esta vez con la muestra bajo estudio en el medio de los transductores Tx y receptor Rx como se observa en la figura 2.1 B.

La determinación de la distancia óptima entre los transductores se basó en la observación de las señales en el osciloscopio. Cabe aclarar que la distancia entre los transductores se mantiene constante tanto para la captura de la señal de referencia como para la señal transmitida. Para determinar esta distancia se posicionaron los transductores lo más próximos posible entre sí, garantizando que la señal transmitida a través de la muestra estuviera libre de ecos no deseados. Este proceso consistió en ubicar los transductores a una distancia que permitiera la observación clara de ecos en las señales en el osciloscopio. Luego, se procedió a acercarlos lentamente, observando cuidadosamente los cambios en el osciloscopio, hasta que los ecos quedaron fuera del rango de captura temporal. Para lograr esto, un transductor se mantuvo en una posición fija sobre la mesa de experimentación, mientras que el otro se colocó en una unidad de movimiento axial que permitía su desplazamiento manual en la dirección hacia el transductor opuesto.

Una vez capturadas las señales de referencia y transmitida por la muestra bajo estudio, se procede a procesar dichas señales para calcular la función de transferencia experimental y ajustar el modelo teórico para estimar las propiedades mecánicas.

Es relevante destacar que se aplicó una ganancia específica a las señales transmitidas por las muestras a través del pulser-receiver antes de ser enviadas al osciloscopio. Esto es debido a que la atenuación acústica y la disparidad de impedancias entre el aire y las muestras resultaron en una disminución en la amplitud de la señal detectada por el transductor Rx, en comparación con

la señal capturada en la condición de referencia. La ganancia aplicada se determinó a criterio del autor.

2.1.3. Cálculo de la Función de Transferencia Acústica Experimental

El cálculo de la función de transferencia experimental se realiza a través de un código implementado en Matlab®, el cual también se utiliza para determinar los parámetros relacionados con la velocidad del sonido, el espesor de la muestra, la densidad de área y la atenuación acústica. A partir de algunos de estos parámetros se calcula el módulo de elasticidad del material.

El proceso de estimación de la función de transferencia experimental comienza con la carga de los vectores temporales y de amplitud correspondientes a las señales transmitida y de referencia. Luego, se procede a aplicar una corrección de amplitud en estas señales, implicando la eliminación de la ganancia aplicada previamente durante la adquisición mediante el pulser-receiver. A continuación, se lleva a cabo la eliminación de la componente continua (valor CC) de las señales. En la figura 2.2 A, se presentan ambas señales después de estas correcciones; la señal de referencia se muestra en azul y la señal transmitida por la muestra en naranja. Es importante destacar que el eje de la señal transmitida presenta unidades con una diferencia de tres órdenes de magnitud en comparación con la señal de referencia, esto debido a atenuación.

El siguiente paso es realizar la transformada rápida de Fourier de las señales de referencia y transmitida, lo que permite analizarlas en el dominio de la frecuencia. En este dominio, se calcula el cociente entre la señal transmitida y la señal de referencia (representadas en naranja y azul, respectivamente, en la figura 2.2 B). Este cociente se denomina función de transferencia (TF), por sus siglas en inglés, *Transfer Function* y es la representación experimental de la ecuación 1.8. La TF describe la relación entre ambas señales y representa la función de transferencia acústica de la muestra bajo estudio. En la figura 2.2 C, observamos la TF en color azul y naranja, que muestra tanto el espectro de frecuencia como de fase.

Finalmente, se lleva a cabo un recorte en la frecuencia en la TF. Este paso tiene como objetivo conservar únicamente el intervalo de frecuencia en el cual la muestra transmite energía de manera significativa. La decisión sobre el recorte se toma a discreción del autor, buscando maximizar la amplitud de este intervalo sin considerar ruido no deseado en regiones donde la muestra no transmite energía de interés.

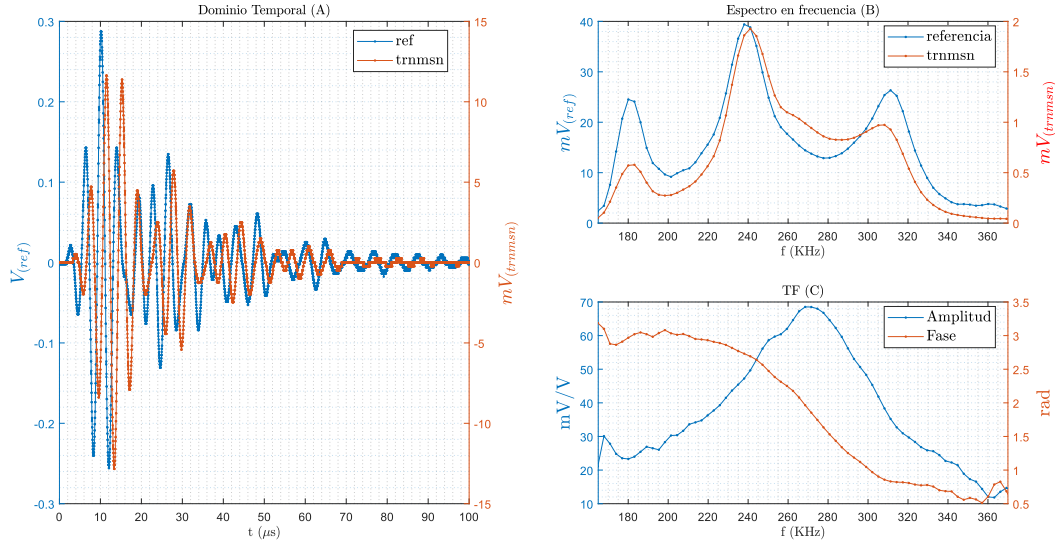


Figura 2.2: Obtención de la función de transferencia experimental para una muestra de ferroelectreto con electrodos de oro en su superficie, excitada con transductores de 250 kHz. A: Dominio temporal de las señales de referencia y de transmisión. B: Dominio de la frecuencia para las señales de referencia, de transmisión y TF. C: Espectro de la fase de TF.

2.1.4. Determinación del Módulo de Elasticidad A Partir de La Función de transferencia Acústica Experimental

Hasta este punto, se ha descrito el proceso de obtención de la función de transferencia experimental. A continuación, se explicará cómo estos datos experimentales se utilizan para determinar el módulo de elasticidad mediante el uso de un algoritmo de optimización implementado en Matlab®. Este algoritmo tiene como objetivo minimizar una función escalar de error. Dicha función de error depende de la diferencia entre los datos experimentales de la función de transferencia en el espectro de amplitud y fase, y la función de transferencia analítica 1.8.

Para lograr esto, se utilizaron funciones de minimización de Matlab®, como `fminsearch` y `fmincon`, que ajustan los parámetros de velocidad del sonido, espesor, atenuación acústica y densidad en la ecuación analítica de la función de transferencia (expresión 1.8) para generar curvas en el espectro de frecuencia y fase. El objetivo es que las curvas de la función de transferencia analítica coincidan lo más posible con los datos de la TF experimentales, minimizando así el error y en este proceso encontrando los parámetros simulados que mejor se ajusten a las propiedades reales de cada muestra en cada experimento de espectroscopía realizado. La figura 2.3 ilustra el diagrama de flujo del proceso de optimización de dichos parámetros.

El proceso comienza con:

1. **Cargar los datos la curva de TF experimental:** Se cargan los datos experimentales de la función de transferencia experimental en el espectro de magnitud y fase, como los que se observan pintados en la figura 2.2 C.

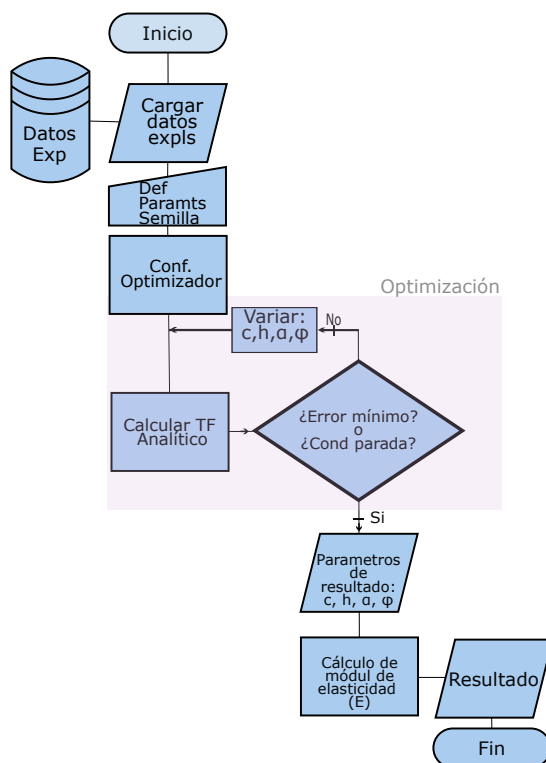


Figura 2.3: Diagrama de flujo de proceso de optimización para caracterizar el módulo de elasticidad por medio de la técnica de espectroscopía ultrasónica acoplada en aire.

2. **Definición de parámetros iniciales:** Se definen los parámetros iniciales, conocidos como parámetros semilla. Estos parámetros incluyen la velocidad del sonido (c), el espesor de la muestra (h), la atenuación acústica (α) y la densidad (ρ). Se utilizan como punto de partida para calcular una función de transferencia analítica y dar inicio al proceso iterativo de minimización de la función de error.

Para el caso de la velocidad del sonido en el valor semilla de las muestras de ferroelectreto de un electrodo de aluminio se selecciono la misma velocidad del sonido reportada en [11]. Mientras que para el caso del valor semilla del espesor se usaron datos de espesores medidos experimentalmente de las muestras de ferroelectreto a los que se les aplicó la técnica como el que se muestra en la figura 2.4 A.

Para medir el espesor de las muestras de ferroelectreto, se utilizó el microscopio óptico ubicado en el laboratorio de caracterización de materiales de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle. Inicialmente, se llevó a cabo la calibración del sistema de medición con la ayuda de una muestra patrón, como la que se muestra en la Figura figura 2.4 B.

El proceso de calibración consistió en medir una longitud conocida y establecer la relación entre esta longitud y la cantidad de píxeles en el campo de visión del software de captura del microscopio. Una vez que esta relación estuvo establecida de manera precisa, se volvió

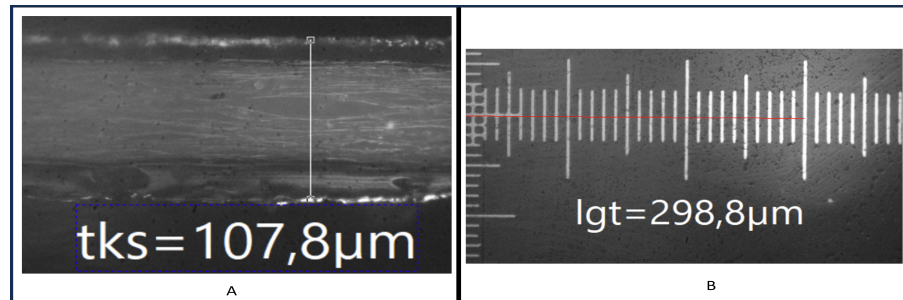


Figura 2.4: Espesor de una muestra de ferroelectreto con electrodos de oro en sus superficies. Fotografía tomada con microscopio óptico del laboratorio de caracterización de materiales de la escuela de ingeniería mecánica de la Universidad del Valle. A: Espesor medido (tks) de 107.8 μm . B: Longitud medida para calibrar el software de medición del microscopio.

posible estimar cualquier longitud dentro del campo visible de la cámara del microscopio. De esta manera, se logró obtener mediciones precisas del espesor de las muestras en estudio.

3. **Configuración del optimizador:** recordando que el objetivo de este proceso es buscar dentro de un dominio de parámetros, los valores que hagan que las curvas de la función de transferencia simulada (tanto en el espectro de magnitud como en el de fase) se asemejen lo más posible a las curvas de la función de transferencia experimental. Este dominio de parámetros puede ser no restringido si se utiliza la función `fminsearch`, o restringido a un rango específico si se emplea la función `fmincon`. La elección de la función de optimización depende de si se requieren restricciones en los parámetros durante el proceso de optimización o no y hace parte del paso de configuración del optimizador.

En primer lugar, se consideró la función `fminsearch`, que ofrece la ventaja de no imponer restricciones en el dominio de los parámetros (c, h, α, ρ). Cuando se utilizó esta función inicialmente, se obtuvieron resultados satisfactorios en términos de reducción del error y concordancia entre las curvas de las funciones de transferencia analíticas y experimentales en los espectros de magnitud y fase. Sin embargo, los resultados generados no eran coherentes desde una perspectiva física, ya que se obtenían espesores negativos o valores muy alejados de los medidos experimentalmente.

Dada esta situación, se tomó la decisión de emplear la función `fmincon` para todos los datos analizados en este trabajo. Esta función permite la definición de restricciones en el dominio de los parámetros, lo que garantiza que los resultados obtenidos sean físicamente plausibles y tiendan a los valores medidos experimentalmente. En otras palabras se forzó al optimizador a que solo tome valores posibles dentro de un rango definido por el autor, en ese sentido por ejemplo para el caso del espesor de las muestras se decidió otorgar un intervalo de $\pm 10\%$ del espesor medido experimentalmente en cada muestra.

También se realizaron algunas configuraciones de condiciones de parada del optimizador

como por ejemplo establecer el número de iteraciones máximo definido en 1000 o la diferencia mínima del error entre iteración e iteración definido en $1e^{-9}$

4. **Cálculo de TF analítica:** Para calcular la función de transferencia analítica, se utiliza la ecuación 1.8. Esta ecuación se evalúa con los mismos valores de frecuencia que se encuentran en las de la función de transferencia experimental. Esto permite obtener resultados simulados que son coherentes con los datos experimentales en términos de tamaño de los vectores de las curvas, lo que permite el cálculo de las diferencias entre los puntos correspondientes de ambas curvas.

En este punto, ingresamos al proceso iterativo de optimización, pintado en tono morado claro en el diagrama de flujo (figura 2.3). En cada cálculo de la función de transferencia analítica, los valores de c , h , α , y ρ se ajustan automáticamente por el algoritmo con el objetivo de minimizar el error. Esta iteración se repite, variando constantemente los parámetros, hasta que se cumple alguna de las condiciones de parada predefinidas.

5. **Cálculo del Módulo de Elasticidad:** Una vez se cumple alguna de las condiciones de parada el algoritmo de optimización entrega los parámetros que provocaron que se detuviera la búsqueda.

Según [21], el módulo de elasticidad se puede calcular como: $E = \rho c^2$, donde ρ es la densidad y c es la velocidad de propagación, (ambos valores determinados por el algoritmo de optimización).

2.2. Determinación del Módulo de Elasticidad a partir de las Curvas de Dispersión

Se emplearon técnicas ópticas para la generación y detección de vibraciones mecánicas en las muestras bajo estudio. Con dichas señales se construyeron las curvas de dispersión con las cuales se estimaron las propiedades de módulo de elasticidad y relación de Poisson. Tanto la generación de señales acústicas en los ferroelectretos como la medición de las mismas se llevaron a cabo utilizando láser. En la figura 2.5 se observa la representación esquemática del montaje experimental utilizado para este experimento. En esta sección, la metodología se divide en tres partes: la primera aborda la emisión del láser pulsado (LP) o excitación de la muestra, la segunda se centra en el censado de la respuesta vibracional de la muestra, es decir, la recepción, y la tercera se dedica al procesamiento de datos.

2.2.1. Emisión

Para la excitación de las muestras se utilizó el láser pulsado (LP) (VRN20-50-G, Quantel, Francia), el cual emite pulsos láser a una frecuencia máxima de 20 Hz. Este láser permite generar ondas acústicas con anchos de banda del orden de los MHz.

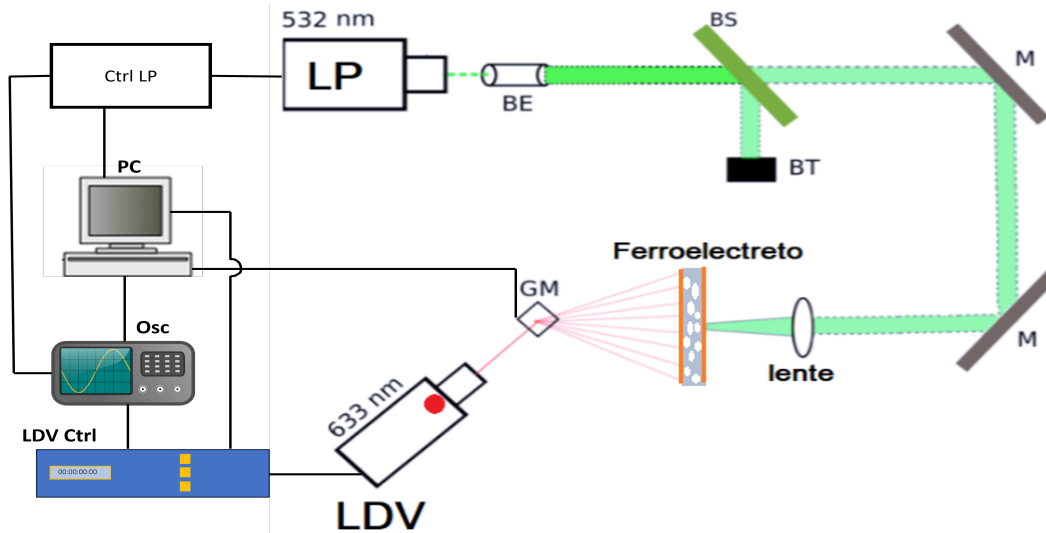


Figura 2.5: Sistema opto-acústico por incidencia directa, considerando la generación y medición sin contacto de ondas ultrasónicas en películas de ferroelectretos. Emisión: láser pulsado, longitud de onda a 532 nm, BE: expansor de haz, BS: divisor de haz, BT: trampa óptica, M: espejo. Recepción: vibrómetro láser de efecto Doppler (LDV), longitud de onda a 633 nm, GM: espejos galvanométricos. Tomado y modificado de [6].

El haz verde emitido a una longitud de onda de 532 nm pasa por un expansor de haz (BE) que expande el haz inicial a un diámetro de haz de 10 mm. Luego, se divide el haz con un divisor de haz (BS) con una relación de energía de 1/10 en la dirección de la muestra. La división del haz es conveniente para jugar con los valores de energía emitida por el láser pulsado y así los cambios de energía realizados sean menos sensibles a la muestra para evitar daños. El 90 % de la energía restante se refleja en dirección perpendicular y se introduce en una trampa óptica (BT). Luego, con un lente convergente (lente), se ajusta la distancia focal para concentrar el haz (que contiene el 10 % de energía) de acuerdo a las preferencias del operador. Este enfoque es importante para aplicar la cantidad de densidad de energía (energía por unidad de área) adecuada a la muestra y obtener aceptable relación señal a ruido en las señales visualizadas en el osciloscopio sin causar daños en la muestra. El punto en el que se enfoca el haz es conocido como epicentro, y de aquí en adelante hará referencia al punto de impacto del haz del LP en el plano de la muestra. Los espejos (M) se usan para desviar el haz a conveniencia.

La configuración del láser pulsado se realiza a través de parámetros que se envían por comunicación LAN desde el computador con una interfaz realizada en Python al controlador del láser pulsado (Ctrl LP). Uno de los parámetros más importantes es el valor del tiempo de retardo (con respecto al disparo del diodo del láser (Qs_{delay})) de la apertura del Q-Switch, como se observa en la figura 2.7. Q-Switch es un componente clave que controla el proceso de generación de pulsos láser mediante la regulación de la energía almacenada en el medio activo del mismo. En la figura 2.6 se observa la energía del pulso láser en función del tiempo de retardo Qs_{delay} .

En la fase inicial de experimentación con esta técnica se utilizaron materiales mucho más

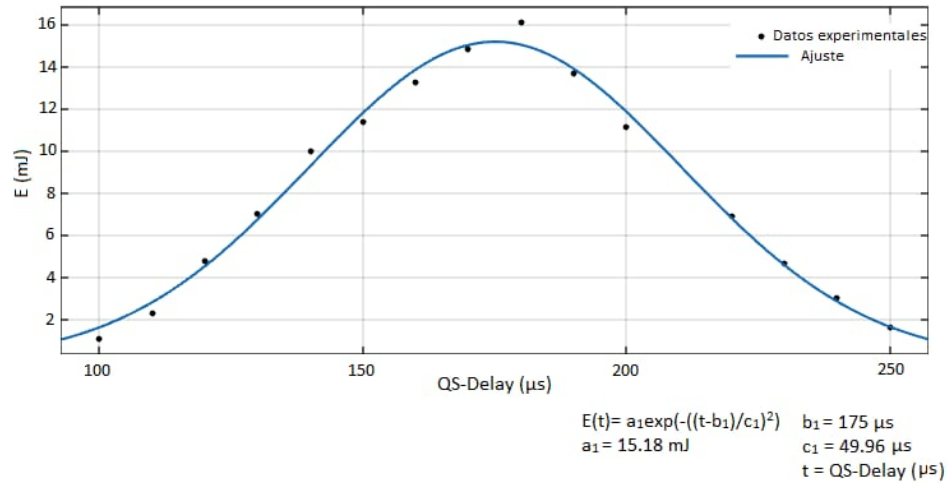


Figura 2.6: Medición de energía láser pulsado en función al retardo aplicado por el parámetro Qsdelay. Para esta medición no se usó ningún divisor de haz ni algún otro tipo de óptica en recorrido del haz láser. Medición y datos para construir la gráfica otorgados y autorizados por Castaño. José.

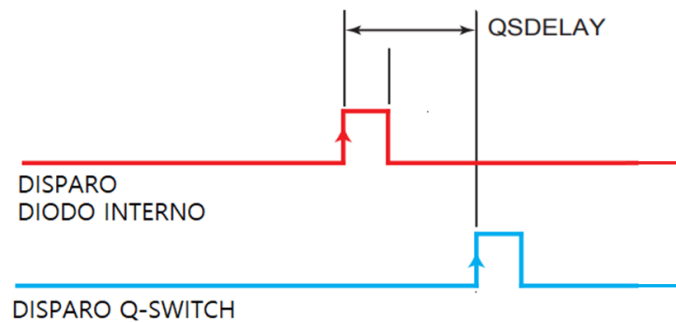


Figura 2.7: Diagrama de tiempo, Qsdelay respecto a disparo de diodo interno de láser. Fuente: [7].

resistentes (en comparación a las muestras de ferroelectreto) al impacto del haz láser para evitar daños irreversibles en las muestras limitadas de ferroelectretos disponibles. El objetivo principal fue establecer conocimiento de la respuesta de algunos materiales al láser pulsado y ganar experiencia con el manejo de este equipo, además, obtener curvas de dispersión experimentales para materiales cuyas propiedades son bien conocidas para evaluar si esta técnica determina dichas propiedades con un valor cercano a las reportadas. Para los experimentos iniciales se usaron placas de latón y aluminio.

La energía con la que se impactó cada muestra se estableció cuidadosamente a través de experimentación. El objetivo fue garantizar que se proporcionara suficiente energía para generar una señal acústica de calidad sin dañar la muestra por ablación. El daño por ablación se presenta cuando la energía del láser es concentra en un área pequeña, generando una alta densidad de energía en ese punto, lo que puede calentar y vaporizar instantáneamente el material en esa región.

Primero se estableció un valor mínimo de energía del láser pulsado con el cual se puede crear una onda acústica, la cual el vibrómetro LDV en la etapa de recepción sea capaz de captar cuando este apunta al epicentro (del otro lado de la muestra) en el punto donde se impacta con el láser pulsado. Luego se estableció un valor máximo de energía del láser pulsado con el cual al cabo de 10 minutos de recibir pulsos a dicha intensidad y una frecuencia de 20 Hz se registrara alguna marca o daño en la superficie de la muestra.

Una vez establecidos estos dos valores se mueve el punto focal de censado del vibrómetro a una distancia de 10 mm, desde el epicentro. Luego se aumenta gradualmente la energía del láser pulsado hasta obtener registro de la señal acústica en el osciloscopio o estar por debajo de la energía máxima registrada sin causar daños después de 10 minutos. En algunos casos la distancia del punto de medición al epicentro fue tan grande que la atenuación de la señal acústica en el medio provocaba que se desvaneciera y el vibrómetro no fuera capaz de captar la vibración, por lo tanto si ya se estaba cerca al valor de energía máximo del láser pulsado registrado en el proceso de calibración y aún no había señal de respuesta vibracional del material en el osciloscopio se procedía a acercar el punto de censado del vibrómetro al epicentro e iniciar con el incremento de energía del láser pulsado desde el valor mínimo de nuevo.

2.2.2. Recepción

En recepción se utilizó un vibrómetro láser de efecto Doppler, LDV (OFV 505, Polytec, Alemania) con longitud de onda de 633 nm (rojo). el cual emite un haz que luego se refleja en un set de espejos galvanométricos (GM) controlados desde computador para poder desviar el haz y medir las vibraciones en los diferentes puntos deseados. La señal capturada por el vibrómetro se envía a través del controlador (LDV Ctrl) al osciloscopio (Ds 6104, Rigol, China) el cual la digitaliza y envía al computador para ser almacena.

Los espejos galvanométricos se comunican con el computador por medio de comunicación USB y usan la misma interfaz en Python que la usada para controlar el láser pulsado.

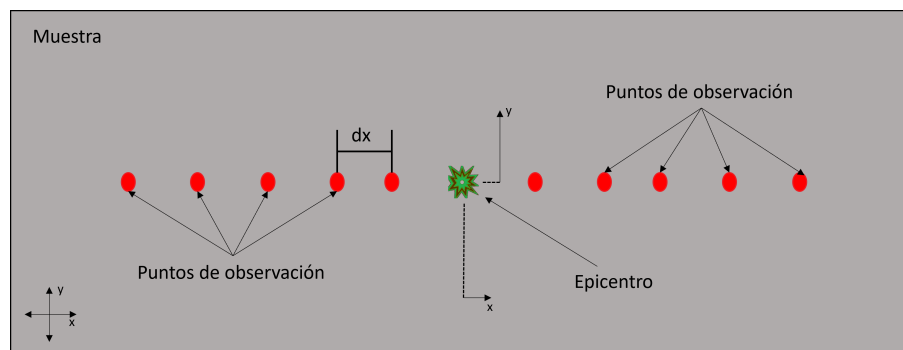


Figura 2.8: Disposición espacial de la posición del punto de excitación y las posiciones de medida para el levantamiento de la curva de dispersión experimental. Tomado y modificado de [8].

Para conocer la ubicación en el plano de la muestra de cada punto de observación con el vibrómetro láser (LDV) es necesario realizar una calibración de los espejos galvanométricos. El proceso de calibración se hace en base a la suposición de que la distancia en cada uno de los ejes en el plano de la muestra (figura 2.8) al punto de censado del LDV es linealmente proporcional al voltaje aplicado a su sistema de control para cada eje. Por lo tanto, el proceso de calibración para un eje consiste en ubicar dos puntos a una distancia conocida en mm del origen del eje (epicentro) y encontrar el valor de voltaje aplicado necesario para que el haz apunte a cada uno de los puntos. Luego, se pueden estimar los valores de la pendiente y el corte en el eje vertical de la función de transferencia del sistema de control de los espejos galvanométricos. Dicha función de transferencia es de la forma $y = mx + b$ donde la pendiente m tiene unidades de $[V/mm]$ y b de $[V]$, así cuando ingresemos un valor de distancia (desde el epicentro) deseado x encontraremos el valor de voltaje necesario para aplicarle al controlador de los GM y ubicar el haz en x (mm).

El anterior proceso se realiza para el eje x y y y para cada experimento realizado con el vibrómetro láser. Una vez calibrado el haz del vibrómetro y el láser pulsado se pueden realizar barridos lineales de observación en puntos sobre el mismo eje como se muestra en la figura 2.8 para obtener información necesaria para levantar las curvas de dispersión experimental de cada muestra.

Se siguió una metodología similar a la propuesta en [8]. La figura 2.9 muestra el diagrama de flujo del procedimiento, en donde el primer paso es excitar la muestra con el láser pulsado para generar ondas acústicas en el material mientras se mide la vibración de un punto de observación (figura 2.8) durante un tiempo suficiente para solo capturar la respuesta de ese punto y no hayan efectos de la señal del punto anterior debido a efectos de promediado aplicado con el osciloscopio, capturar la señal con el osciloscopio, almacenar dicha señal en un arreglo ordenado de señales en el computador y por último evaluar si la señal capturada actual es la última o no, para detener el experimento o pasar al siguiente punto de observación a una distancia dx (figura 2.8) del punto actual de observación.

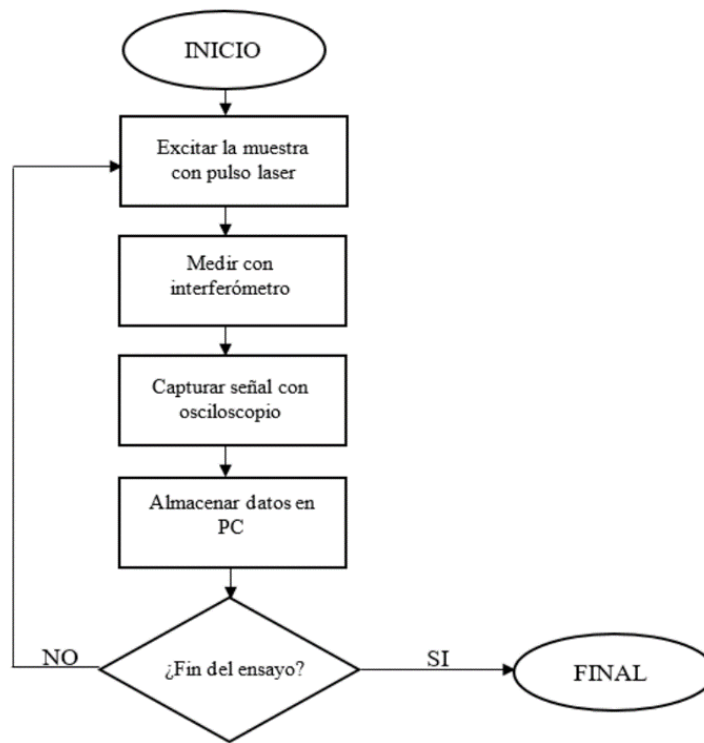


Figura 2.9: Diagrama de flujo de metodología para capturar señales experimentales de barrido lineal con vibrómetro láser LDV. Tomado de [8]

2.2.3. Procesamiento

El procesamiento inicia con la verificación del patrón de corrimiento en las señales acústica a medida que los puntos de observación se alejan del epicentro. Este patrón se evidencia claramente en el conjunto de señales presentado en la figura 2.10. La observación de este desplazamiento es indicativa de la existencia de una señal acústica que viaja a través de la muestra. Cuando se confirma la presencia de este patrón, se procede a la siguiente etapa: la representación gráfica del patrón de fases del conjunto de señales.

Para lograr una visualización efectiva del patrón de fases en un conjunto de señales obtenidas durante el experimento (las mismas que se muestran en la figura 2.10), se empleó la transformada de Hilbert, aplicada en python. Esta transformada se aplica al conjunto completo de señales con el fin de derivar la señal analítica correspondiente a cada una de ellas. De esta manera, se puede separar la información de amplitud y fase contenida en dichas señales. La figura 2.11 representa visualmente el patrón de fases en color de cada señal en el grupo completo, adquiridas a través de un escaneo lineal de puntos en una muestra de aluminio. Este escaneo se realizó con un espaciado (dx) de 0.1 mm entre puntos de observación con una distancia de observación total de 36 mm, es decir ± 18 mm desde el epicentro ubicado en el centro del eje x.

Una vez que se han identificado relaciones señal a ruido favorables en las señales representadas en la figura 2.10, y se han verificado patrones de fase en la figura 2.11 que carecen de

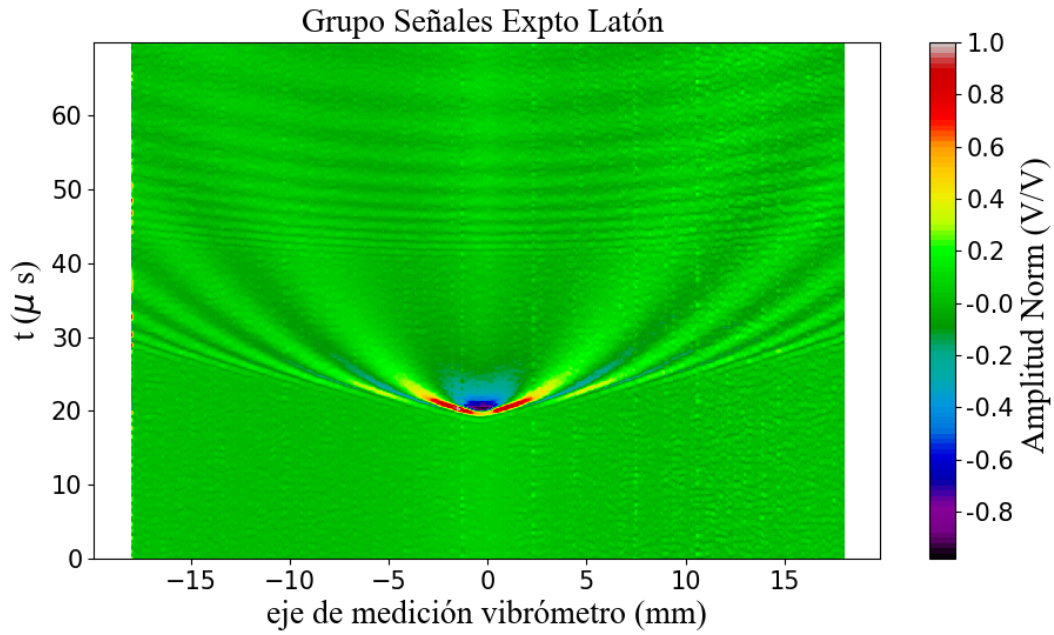


Figura 2.10: Evolución espacio-temporal de la onda a lo largo de una trayectoria recta en una lámina de latón. Los pasos con el vibrómetro se establecieron en 0.1 mm y el valor de retardo Qs_{delay} a 250 μs . En el cuadrado punteado en negro, se observa un aumento en el cual se puede observar la evolución temporal de un grupo pequeño de señales en el epicentro de la muestra.

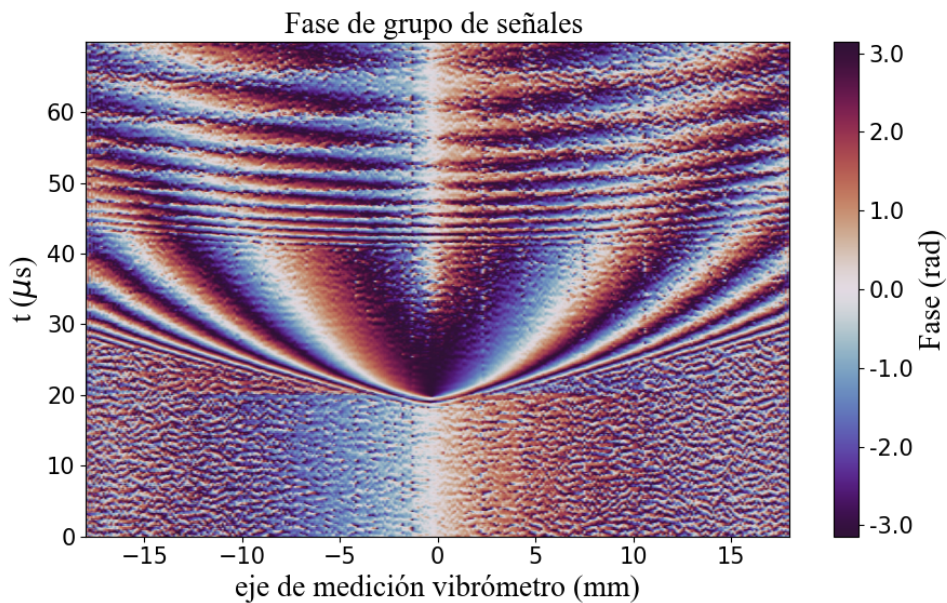


Figura 2.11: Frente de fase de set de señales de la muestra en un barrido lineal con el vibrómetro láser con una distancia de observación de 36 mm en una lámina de latón.

desviaciones inusuales, es decir, no se observan irregularidades ni áreas de colores aleatorios, sino patrones bien definidos con transiciones suaves, se concluye que, a simple vista, no se han manifestado fallos experimentales. Por lo tanto, se procede a la extracción de los vectores de velocidad de fase y frecuencia necesarios para construir las curvas de dispersión experimentales. Para lograr este propósito, se emplea la transformada de Fourier bidimensional, que brinda la capacidad de extraer información sobre la frecuencia tanto en el dominio temporal como en el espacial de la onda que viaja a través del material bajo estudio. En este proceso, se obtienen representaciones en el dominio de la frecuencia que corresponden a la frecuencia angular y el número de onda. Estos resultados proporcionan la base para la generación de diversos diagramas de dispersión, como el diagrama $k - f$ o $f - C_p$, donde ω se relaciona con la frecuencia angular, $\omega = 2\pi f$ y k representa el número de onda.

En la figura 2.12 A, se presenta un gráfico de dispersión que se ha obtenido mediante la aplicación de una transformada bidimensional de Fourier a los datos experimentales previamente ilustrados en las figuras figura 2.10 y figura 2.11. La calidad de esta representación dispersa está intrínsecamente vinculada a la precisión con la que se puede reconstruir el plano espacio-tiempo, y esta precisión se ve influenciada por la resolución tanto en términos espaciales como temporales de los datos capturados.

Cabe resaltar la relación entre la resolución espacial, que concierne a la capacidad de discernir detalles en el espacio, y la resolución temporal, que se enfoca en la habilidad de detectar cambios en el tiempo. En este contexto, cuando los datos capturados muestran una alta resolución, tanto en términos de su resolución espacial (es decir, un pequeño paso (dx) o distancia entre los puntos de observación registrados por el vibrómetro láser, lo que es equivalente a la frecuencia de muestreo espacial) como en términos de su resolución temporal (es decir, la frecuencia de muestreo temporal definida por el osciloscopio), el resultado en el gráfico de dispersión tiende a adquirir una forma más nítida y precisa. Es decir las manchas de color que definen la curva de dispersión son más pequeñas por lo tanto la curva queda bien definida.

Una vez obtenida la curva de dispersión $k - f$ (figura 2.12 subfigura A) se procede a recortar la matriz de datos que la contiene para facilitarle al algoritmo implementado encontrar las parejas ordenadas (K, f) . El recorte se hace a criterio del autor intentando conservar la mayor cantidad de información en cada uno de los ejes. El resultado del recorte y búsqueda automática con algoritmo implementado de las parejas (K, f) se observan en la figura 2.12 B en donde se observan asteriscos rojos sobre la curva de dispersión que corresponden a las parejas (K, f) encontradas por el algoritmo.

También se implementó un algoritmo con un método de extracción de parejas (K, f) de forma manual (a través de ratón) el cual permite seleccionar manualmente los puntos que se desee dentro de la curva de dispersión para extraer dichas parejas. El resultado de este método manual se observa en la figura 2.13. Para la mayoría de los datos extraídos experimentalmente se usó el algoritmo automático ya que este es más uniforme que la selección manual de parejas k, f .

Una vez se obtienen los vectores experimentales de una de las diferentes formas de la curva

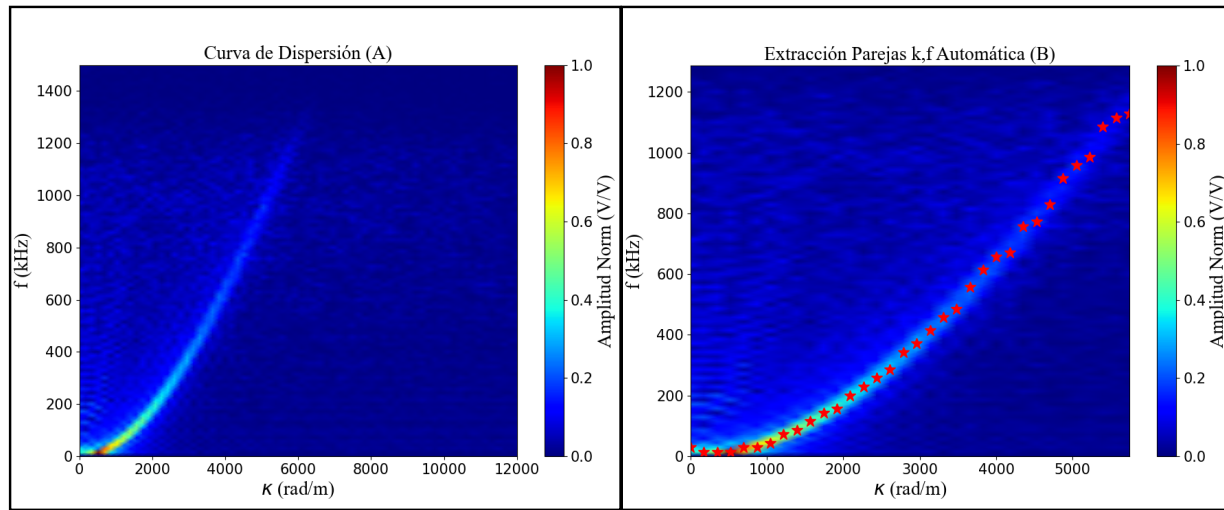


Figura 2.12: Curva de dispersión en término de de número de onda (k) contra frecuencia (f) para placa de latón. A: Resultado gráfico de la transformada bidimensional de Fourier. B: Versión ampliada de A, con énfasis en un segmento particular del dominio de frecuencia y número de onda. En asteriscos rojos los puntos identificados con algoritmo de búsqueda dentro de la curva de dispersión.

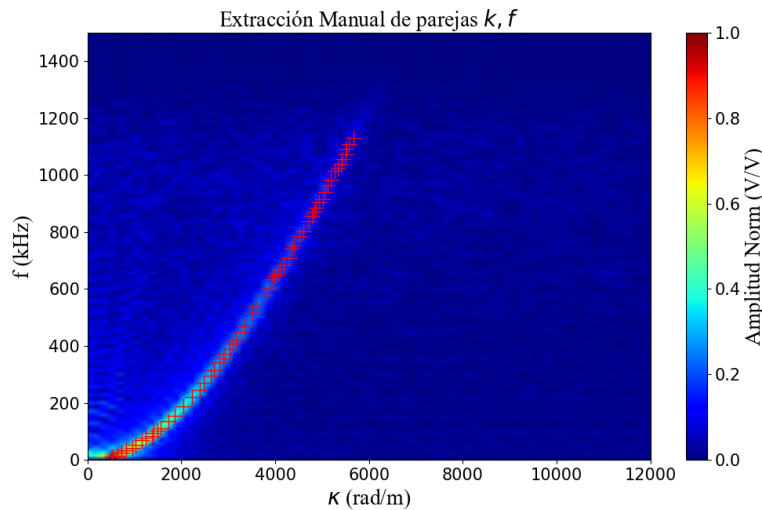


Figura 2.13: Extracción de parejas de número de onda (k) y frecuencia (f) de la curva de dispersión a través de método manual.

de dispersión se procede a deducir la velocidad de fase (C_p) de estos datos. Con esta información es mucho más intuitivo entender que si la gráfica de velocidad de fase contra la frecuencia presenta curvatura, entonces la onda acústica observada se está propagando en un medio dispersivo. C_p es la relación entre la frecuencia (f) y el número de onda (K), lo que se expresa mediante $C_p = \frac{\omega}{K}$, donde ω es igual a 2π veces la frecuencia ($\omega = 2\pi f$).

Como último paso para la extracción de las curvas de dispersión se almacenan los vectores de velocidad de fase C_p y f . Estos vectores se observan en la figura 2.14 A. En rojo se observa la curva producto del método de extracción automático y en negro el método de extracción manual.

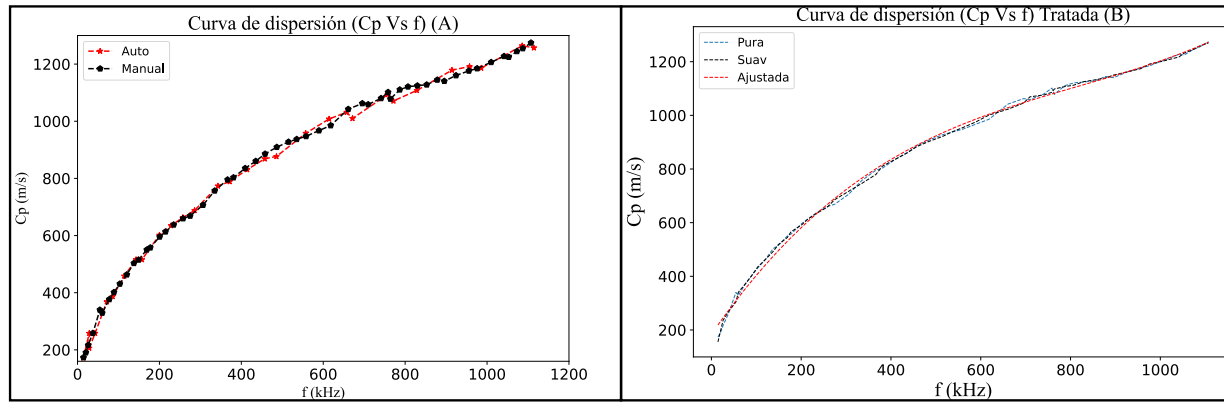


Figura 2.14: Gráfica velocidad de fase contra frecuencia obtenida a partir de las parejas (K, f). A: Representación de la curva de dispersión sin ningún ajuste, mostrando los puntos extraídos automáticamente (cían) y con el método manual (negro). B: Representación de la curva de dispersión después de aplicar un ajuste polinómico de tercer orden (negro) y la aplicación de un filtro Savitzky-Golay (rojo).

2.2.4. Extracción de propiedades mecánicas

La figura 2.15 muestra un diagrama de flujo que describe el proceso utilizado para obtener información sobre las propiedades de las muestras bajo estudio. Una vez que se adquieren los datos experimentales, que representan el viaje de las ondas acústicas a través del material, comienza la etapa de ajuste del modelo analítico. Este ajuste tiene como objetivo encontrar las propiedades mecánicas que mejor simulen un material en condiciones similares a las del experimento, produciendo una curva de dispersión que se asemeje a la obtenida experimentalmente.

En esencia, lo que se hace es iterar un modelo, optimizando ciertos parámetros para que la curva de dispersión del modelo teórico se asemeje lo más posible a la curva de dispersión experimental. Los parámetros que el optimizador ajusta, como la velocidad de propagación de la onda acústica en las direcciones longitudinal y transversal, así como el espesor de la muestra, proporcionan información para deducir las propiedades mecánicas efectivas de las muestras en estudio.

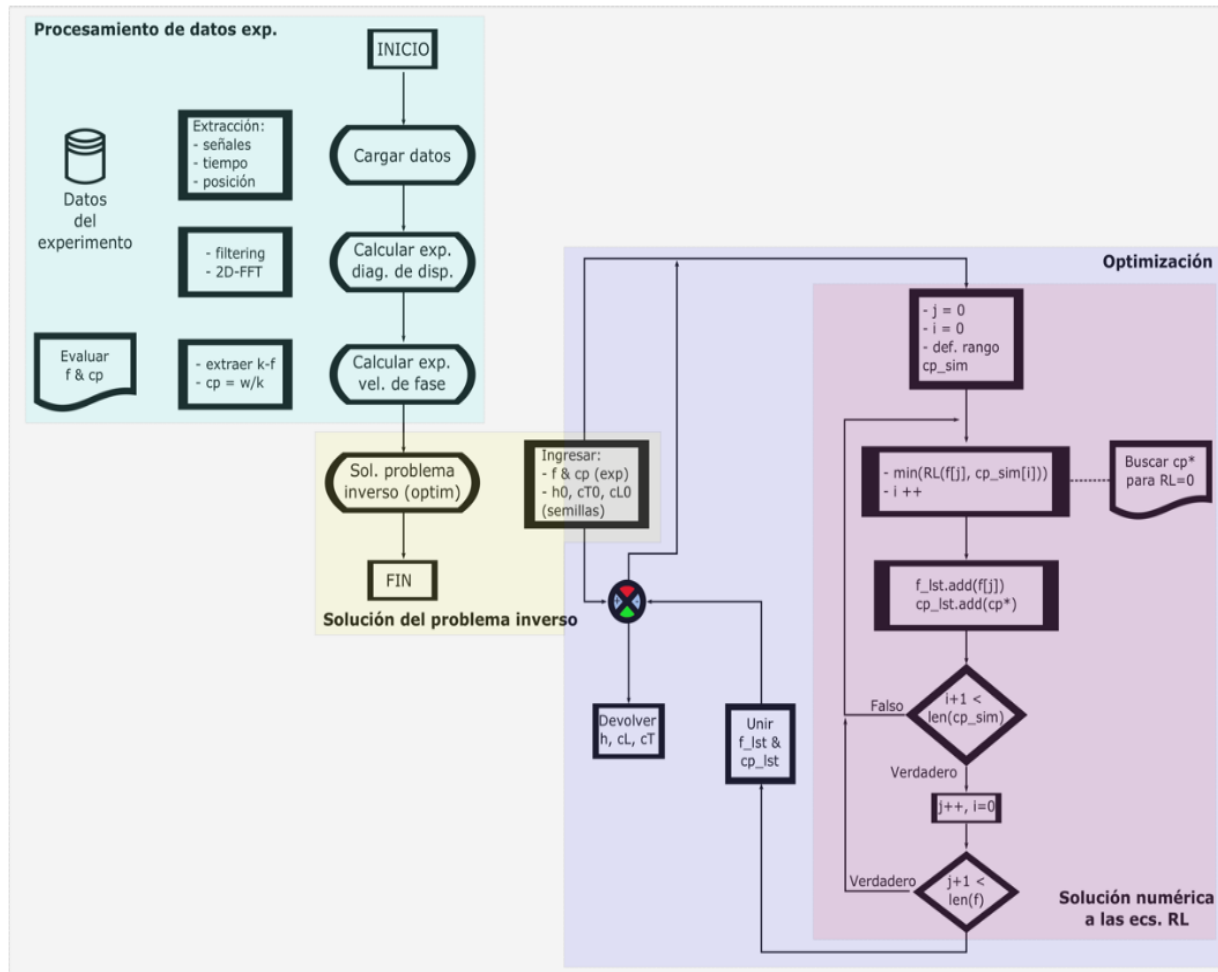


Figura 2.15: Diagrama de flujo del proceso empleado para extraer las propiedades elásticas de las muestras a partir de las curvas de dispersión. Fuente: [9].

El primer paso para ejecutar el algoritmo de optimización es representar gráficamente los datos obtenidos en el proceso de extracción de las curvas de dispersión. En algunos casos, se aplicaron ajustes a estos datos, como un ajuste polinómico o la aplicación de un filtro Savitzky-Golay con el propósito de suavizar la curva. La decisión de aplicar un ajuste específico se tomó en cada proceso a discreción del autor. Es fundamental destacar que cualquier ajuste aplicado debe preservar la integridad de los datos experimentales, evitando modificar significativamente la información extraída en los experimentos representada en el gráfico de dispersión y asegurando que este refleje con precisión la información obtenida en lugar de introducir ruido significativo en el procesamiento de los datos. La figura 2.14 B muestra la curva f, C_p pura, es decir, sin la aplicación de ningún artificio para suavizarla, y cuando a esta curva se le aplica un ajuste polinómico de orden 3 (en rojo) o un filtro Savitzky-Golay (en negro). Para este punto ya se ha cubierto el apartado del procesamiento de datos experimentales pintado en tono de verde azulado muy claro en la figura 2.15.

Es importante destacar que, debido a la naturaleza de los datos experimentales utilizados

para explicar en esta metodología, la representación de las señales filtradas y suavizadas en la figura 2.14 no tiene un propósito fundamental de mejorar la caracterización de las propiedades mecánicas. Como se puede observar en la figura, la señal pura proporciona una representación adecuada de la curva de dispersión. La inclusión de estas tres señales tiene el objetivo de informar al lector sobre la aplicación de la corrección de la curva de dispersión en algunos casos en los que fue necesario.

El siguiente paso corresponde a la optimización, Este paso tiene como objetivo minimizar una función de error (e), la cual se define como el promedio ponderado de las diferencias entre las velocidades de fase teóricas y las velocidades de fase experimentales en función de la frecuencia. El objetivo es reducir esta función de error al máximo, y esto se logra ajustando los parámetros que describen las velocidades de propagación en las direcciones longitudinal y transversal, así como el espesor teórico de la película.

Cabe aclarar que de aquí en adelante se explicará un poco el proceso de optimización sin entrar en detalle, ya que no hace parte de los objetivos de este trabajo de grado la elaboración de esta técnica para determinar las propiedades mecánicas de los ferroelectretos, sino más bien, usar la técnica propuesta por D. A. Collazos-Burbano en [20] como herramienta para completar un fin, el cual es caracterizar las propiedades efectivas de estas muestras. Además las matemáticas y los acercamientos teóricos que se utilizan en esta técnica se salen de los conocimientos adquiridos durante el estudio de pregrado en ingeniería mecánica de la Universal del Valle.

El primer paso en la optimización es definir los valores de los parámetros a optimizar, esto es, definir valores semilla de velocidad de propagación de las direcciones longitudinal y transversal, C_l y C_t respectivamente y espesor de la muestra, así como definir el rango de velocidad de fase en el cual el algoritmo buscará las parejas (f, C_p) para poder calcular la diferencia entre los resultados experimentales y teóricos. El vector de frecuencia teórico de la curva de dispersión se hace igual al vector de frecuencia experimental, esto con el fin de poder hacer la diferencia entre las dos curvas de dispersión (teórica y experimental) coherentemente.

En el proceso de optimización, el primer paso es establecer los parámetros semilla. Esto implica definir valores iniciales para las velocidades de propagación en las direcciones longitudinal (C_l) y transversal (C_t), así como el espesor de la muestra. Además, es necesario especificar el rango de velocidades de fase en el cual el algoritmo realizará la búsqueda de las combinaciones (f, C_p) . Esto permite calcular las diferencias entre los resultados experimentales y teóricos.

El algoritmo inicia iterando uno a uno los valores de frecuencia dentro del vector de frecuencias, este ciclo se denominado $(C_{iclo}F_{req})$, en el que explora cada valor de frecuencia dentro del vector de frecuencias (que es el mismo que el vector de frecuencias experimental). Dentro de cada iteración de $(C_{iclo}F_{req})$, se inicia otro ciclo llamado $(C_{iclo}C_p)$. Este último ciclo, $(C_{iclo}C_p)$, se encarga de generar un vector sintético de velocidades de fase. Este vector se construye tomando valores equidistantes en incrementos de ΔC_p , los cuales son definidos por el usuario. Estos valores de velocidad de fase inicial y final se establecen según el rango de velocidades de fase observadas en los datos de la curva experimental.

Dentro de $(C_{iclo}C_p)$, se busca iterativamente en el vector de velocidades de fase sintéticas para encontrar el valor de C_p que, a la frecuencia dada en $(C_{iclo}F_{req})$, hace que la función RL (Ecuación de Rayleigh-Lamb) sea igual a cero. En otras palabras, se determina el valor de C_p que satisface las ecuaciones de Rayleigh-Lamb para una frecuencia específica.

Una vez que se han obtenido todos los valores teóricos de velocidad de fase y frecuencia, se calcula un error comparando las predicciones teóricas con las curvas experimentales. Si el error no cumple con los criterios de optimización, el algoritmo ajusta los parámetros C_l , C_t y espesor h (valores semilla) con el objetivo de minimizar dicho error. Estos ajustes se realizan de manera iterativa.

El algoritmo continúa ejecutándose hasta que se cumplan los criterios de parada, que son: un máximo de 500 iteraciones del optimizador o una variación en el error menor a 0,01. Una vez que se cumplen estos requisitos de parada, se procede a estimar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson, que son las propiedades mecánicas efectivas del material, ecuaciones 1.18 y 1.18.

A continuación se presenta en una serie de pasos ordenados la descripción del anterior proceso:

1. **Selección de Frecuencia Inicial:** A partir del vector de frecuencias f , se elige una frecuencia inicial $f[0]$. Es importante notar que $f = f_{sim} = f_{exp}$, lo que significa que los datos experimentales y simulados comparten las mismas frecuencias.
2. **Inicialización de la Velocidad de Fase:** En este punto, se toma un valor inicial para la velocidad de fase C_p . En muchos casos, se puede utilizar $C_p = C_{p_{exp}}$, es decir, el valor inicial se toma del vector de velocidades de fase obtenidas experimentalmente.
3. **Búsqueda del Valor Óptimo de C_p :** Con la frecuencia $f[0]$ fija, se inicia la búsqueda del valor óptimo de C_p que satisface las ecuaciones de Rayleigh-Lamb. Durante este proceso, c_p^* se utiliza como una variable ficticia que almacena temporalmente el valor al que C_p converge.
4. **Almacenamiento de la Pareja $f[0], c_p^*$:** Cuando se encuentra un valor de c_p^* que cumple con las ecuaciones de Rayleigh-Lamb, se almacena la pareja $(f[0], c_p^*)$ como un punto solución de las ecuaciones de Rayleigh-Lamb.
5. **Recorrido de los Valores de C_p :** Se repiten los pasos del 2 al 4, seleccionando cada vez un nuevo valor de $C_p[i]$, donde i es un contador que recorre todos los elementos del vector C_p . Este proceso se repite hasta que se hayan explorado todos los valores de C_p .
6. **Selección de Nueva Frecuencia:** Se elige una nueva frecuencia $f[j]$ y se repiten los pasos desde el numeral 1. El índice j se interpreta de la misma manera que el índice i en el paso 5. Este ciclo se repite hasta que se hayan recorrido todas las frecuencias disponibles en el vector f .

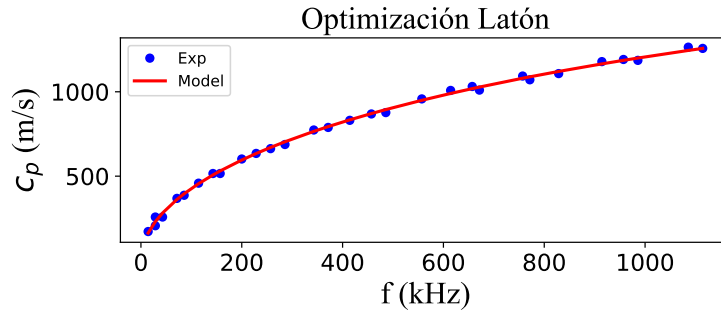


Figura 2.16: Ajuste a la curva de dispersión experimental por medio de algoritmo de optimización.

7. **Eliminación de Parejas Repetidas:** Después de haber explorado todas las frecuencias y valores de C_p , se procede a descartar las parejas $(f[0], C_p)$ repetidas en el conjunto de soluciones. Solo se conservan las parejas únicas que conforman las curvas de dispersión, y que son solución a las ecuaciones de Rayleigh-Lamb.

La figura 2.16 muestra el resultado del proceso de optimización aplicados a los datos experimentales que se han tratado y mostrado en este apartado, más precisamente a los datos de la figura 2.14 A, con los vectores de velocidad de fase y frecuencia seleccionados por el algoritmo automático. La curva en rojo corresponde al resultado de optimización y en puntos azules las parejas (C_p, f) estimadas experimentalmente.

Por otro lado, en la figura 2.17 se ilustran las curvas de los diferentes valores que el algoritmo asigna a los parámetros de h C_L y C_T figura 2.17 (A y B) así como la curva de error de la función de costo que el algoritmo minimiza figura 2.17 (C) en función de cada iteración que el algoritmo hace. Se evidencia la convergencia de los parámetros hacia valores estables. En particular, en cuanto al espesor de la lámina, se destaca su convergencia notoria hacia $(260 \mu m)$. Este fenómeno se atribuye al hecho de que, en el código, el algoritmo busca optimizar dicho espesor; sin embargo, se encuentra restringido a $(260 \mu m)$ debido a que este valor representa la medición experimental obtenida con un micrómetro digital.

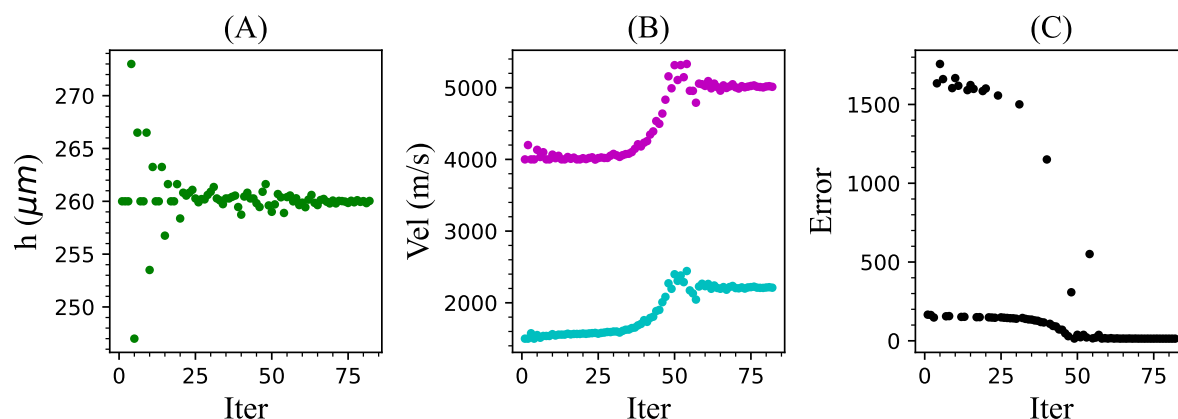


Figura 2.17: Evolución de los parámetros dentro del ciclo iterativo del algoritmo de optimización. A: espesor (h), B: velocidad de propagación del sonido en dirección longitudinal (C_L (magenta)) y transversal (C_T (cian)) y C: error acumulativo.

2.3. Análisis Modal

En esta sección, se abordan dos subtemas relacionados. El primero se centra en la simulación del análisis modal de una placa con propiedades coincidentes a las obtenidas a través de las curvas de dispersión y espectroscopia. El segundo subtema se enfoca en el análisis modal experimental del comportamiento de dos películas de ferroelectreto bajo condiciones específicas, similares a las utilizadas en el proceso de simulación modal, para validar los resultados.

2.3.1. Simulación De Modos flexurales de Vibración en Una Placa

En este apartado se tratará la metodología utilizada para obtener los resultados de la simulación de una placa de material cuyas propiedades se determinaron a partir de las curvas de dispersión (sección sección 2.2). Para este objetivo se usó el software Comsol Multiphysics®.

Una de las ideas preliminares discutidas entre el grupo de asesores y el autor implicaba la posibilidad de excitar modos de vibración flexural en una película circular de ferroelectreto al fijarla en su perímetro. La hipótesis subyacente era que estos modos flexurales podrían generar ondas acústicas con una amplitud considerablemente mayor en comparación con las ondas acústicas generadas por los modos de vibración en la dirección del espesor de una película del mismo material. Esto se consideró con miras en la posibilidad de crear un transductor acústico ultrasónico para aplicaciones en aire.

Para determinar la viabilidad de generar modos de vibración flexural en una película de ferroelectreto, se optó por emplear la física de mecánica de sólidos disponible en el programa Comsol Multiphysics®, implementando un estudio en el dominio de la frecuencia. A continuación, se desglosa la metodología de simulación en pasos definidos, siguiendo el proceso de creación de un modelo de simulación en el software para simular los modos flexurales de vibración de

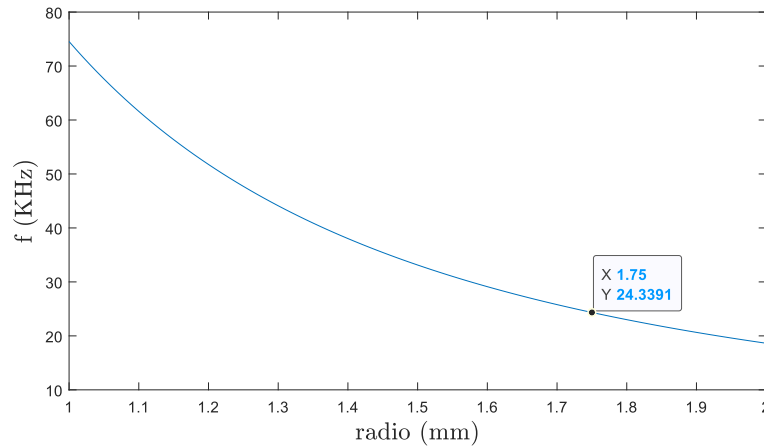


Figura 2.18: Curva de frecuencias contra radio del primer modo flexural de vibración de una placa con propiedades mecánicas y espesor caracterizado por medio de las curvas de dispersión.

una película circular de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con aluminio.

1. **Definición de Geometría:** El programa Comsol Multiphysics® facilita la definición de la geometría del modelo de manera intuitiva. A través de su interfaz gráfica, se crearon formas para este análisis particular, se consideraron sólidos circulares con espesores iguales a los de las muestras reales de ferroelectreto. En la figura 2.19 A se muestra la geometría de la muestra de ferroelectreto simulada.

Inicialmente, se busco que la frecuencia del primer modo flexural de vibración se presentara por encima de la frecuencia audible (20 kHz), esto con miras en la posible fabricación de futuros transductores acústicos ultrasónicos. Según la ecuación (1.76), solo es posible modificar el radio de la placa para lograr que el primer modo de vibración este por encima de la frecuencia audible dado un material con espesor definido. La figura 2.18 muestra la evolución de esta frecuencia respecto a los cambios en el radio (según la ecuación (1.76)) del primer modo flexural de vibración para una placa circular con propiedades similares a las caracterizadas para una muestra de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies.

El objetivo al seleccionar el radio para simular fue buscar el radio más grande posible (para que sea viable su imitación en la vida real) que produzca que la placa presente su primer modo flexural a una frecuencia igual o apenas por encima de 20 kHz. Con esto se establecería el radio de la película de ferroelectreto para simular y posteriormente evaluar experimentalmente a un valor de 1,75 mm.

2. **Definición de Propiedades Mecánicas:** En la construcción de la simulación, se incorporaron las propiedades mecánicas y las dimensiones geométricas como parámetros. Esto se realiza con el propósito de investigar de manera eficiente los impactos de dichos parámetros en los modos y frecuencias simuladas. Esto evita la necesidad de realizar ajustes

Tabla 2.3: Parámetros del modelo usados en Comsol Multiphysics® para correr la simulación.

Nombre	Valor	Descripción
radio	1.75[mm]	Radio de la película
h	95[μm]	Espesor de la película
ν	0.38	Relación de Poisson
E	1.76[GPa]	Módulo de elasticidad
ρ	580[kg/m ³]	Densidad

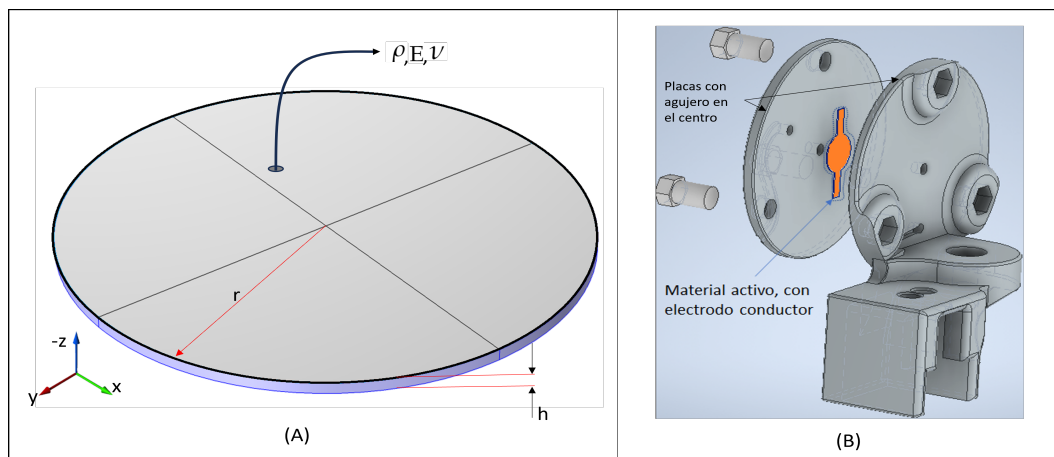


Figura 2.19: A: Geometría de película de ferroelectreto con electrodos de aluminio en Comsol Multiphysics®. B: Diseño CAD de sistema de sujeción de una película de ferroelectreto en su perímetro.

manuales en cada etapa del proceso de modelado. La tabla 2.3 muestra los parámetros usados.

Las propiedades necesarias para correr esta simulación son: el módulo de elasticidad, relación de Poisson y densidad, estas se tomaron de los resultados de caracterización (secciones anteriores sección 2.1, sección 2.2). Estas propiedades se asignaron al sólido generado en el ítem anterior.

3. **Definición de Condiciones de Borde:** Se han establecido las condiciones de borde que mejor reproducen las condiciones de una película de ferroelectreto que se encuentra confinada entre dos placas de algún material rígido con un agujero (ambas placas) presionadas entre ellas. En este escenario, se espera que el ferroelectreto, situado entre las dos placas, actúe como una placa que está sujeta en su perímetro y libre en el resto del área circular de los agujeros de las placas. La figura 2.19 B ilustra el diseño CAD del sistema de sujeción creado para realizar análisis modal experimental. Esta figura muestra en naranja la película de ferroelectreto y como este está en el medio de las placas (con los agujeros en el centro) que lo presionan cuando los tornillos se aprietan y en el agujero de las placas, en medio, quedará la película de ferroelectreto expuesta.

Para simular unas condiciones similares a las que se presenta la película en el estado descrito anteriormente, se restringieron los desplazamientos en los ejes x y y en la superficie perimetral de la placa, (resaltada en azul claro en figura 2.19 A). Luego para garantizar condición de cuerpo rígido es necesario restringir un punto del sólido en la dirección z . Para garantizar simetría en el modelo se optó por restringir los desplazamientos del borde superior de la película, (resaltado en negro en figura 2.19 A). La decisión de restringir este borde se basa en la necesidad de que la simulación cumpla con la condición de "cuerpo rígido".

4. **Resultados:** Las frecuencias que se obtuvieron con este análisis provienen de la solución de la ecuación (1.76), con la cual se obtienen los diferentes frecuencias a las cuales ocurren los diferentes modos flexurales de vibración.

La figura 2.20 ilustra los cuatro primeros modos de vibración flexural para la placa que simula una película de ferroelectreto con electrodos de aluminio. Cabe resaltar que la representación de la placa circular deformada es una ilustración cualitativa ya que para el estudio aplicado no es posible determinar la magnitud de los desplazamientos.

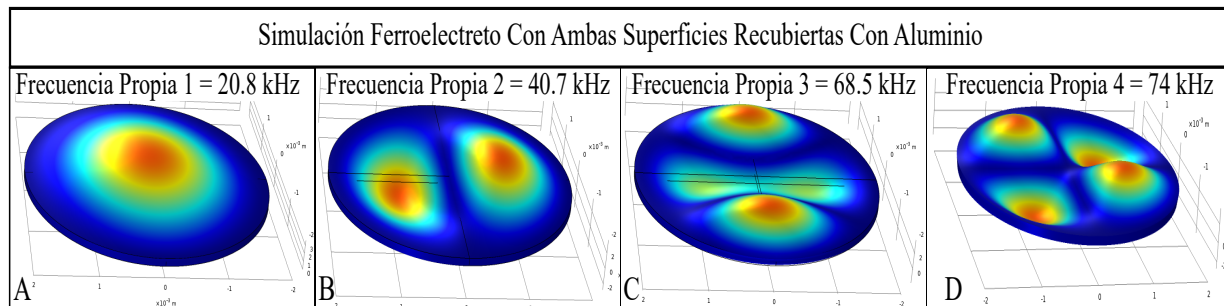


Figura 2.20: Representación Cuantitativa de los desplazamientos simulados de la superficie de una placa de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies. A: Primer modo flexural de vibración a 20.8 kHz. B: Segundo modo flexural de vibración a 40.7 kHz. C: Tercer modo flexural a 68.5 kHz. D: Cuarto modo flexural a 74 kHz.

Los resultados obtenidos son de gran utilidad para luego compararlos con los resultados experimentales y validar si el comportamiento de la película de ferroelectreto simulada se comporta como en la realidad. En caso de obtener coherencia se da lugar a la posibilidad de construir simulaciones más complejas de un transductor que opere en modos flexurales fabricado con ferroelectretos. Algunas de estas simulaciones podrían ser la evaluación del campo acústico emitido por un arreglo de placas oscilantes de forma flexural. Lo anterior es consistente con una de las principales motivaciones de esta investigación, la cual es contribuir en el proceso de desarrollar un transductor ultrasónico que opere en modos flexurales de vibración fabricado a partir de películas de ferroelectreto para aplicaciones en aire.

2.3.2. Análisis Modal Experimental

Con el objetivo de validar los resultados obtenidos en el apartado de simulación se aplicó análisis modal a dos películas de ferroelectreto con electrodos en ambas superficies de aluminio y oro. Para realizar los experimentos de análisis modal se utilizó un montaje experimental como el que se observa en la figura 2.21.

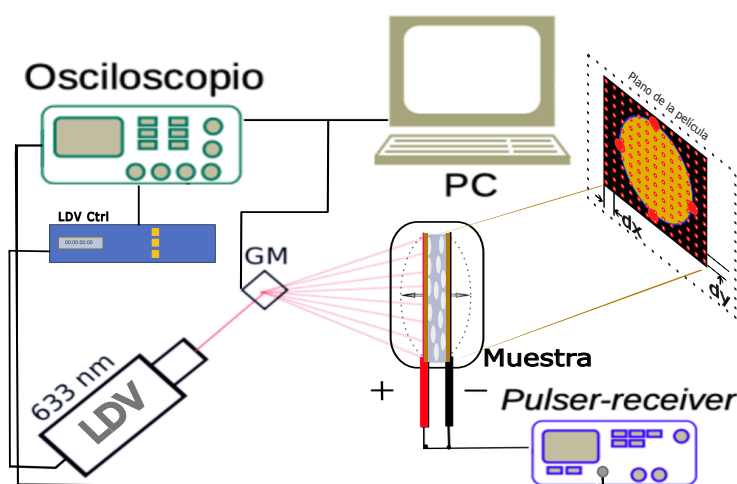


Figura 2.21: Esquemático del montaje experimental utilizado para realizar análisis modal a muestras de ferroelectreto. En rectángulo punteado negro se observa el plano de la película de ferroelectreto y los puntos en rojo representan los puntos de medición del vibrómetro láser.

En este experimento se utilizó el mismo pulser-receiver que se describió en el apartado de espectroscopia ultrasónica acoplada en aire (sección 2.1), el cual se usa para excitar una muestra de ferroelectreto similarmente a como se excita el transductor Tx en ese apartado, enviando pulsos cortos cuyas representaciones equivalentes en el dominio de la frecuencia centran su energía a una frecuencia de 100 kHz. La amplitud de estos pulsos se configuró a 400 Voltios y a una frecuencia de repetición de pulso (*prf*) de 200 Hz.

Una vez el pulser-receiver envía un pulso a la muestra, también se envía en paralelo una señal de disparo para indicar al osciloscopio que abra la ventana temporal de medición a partir de ese instante. Todas las muestras se excitaron con el mismo pulso descrito anteriormente. La discrepancia entre las frecuencias de excitación de las películas con el pulser-receiver y la frecuencia objetivo del primer modo de vibración en la simulación (20 kHz) se debe a que la frecuencia mínima a la que se puede configurar el pulser-receiver es de 100 kHz.

Para sujetar una muestra de ferroelectreto como se describe en el ítem 3 del apartado anterior se utilizó una estructura impresa en 3D (figura 2.19 B y 2.22 subfigura A). El objetivo fue lograr una película de ferroelectreto circular cuyo borde permanezca fijo y a su vez garantizar que el área de la circunferencia permanezca libre sin ninguna restricción, para que se produzcan los patrones flexurales en esta región de la película. En la figura 2.22 A se observa la estructura construida, en donde se observan también los electrodos de cobre provenientes del conector

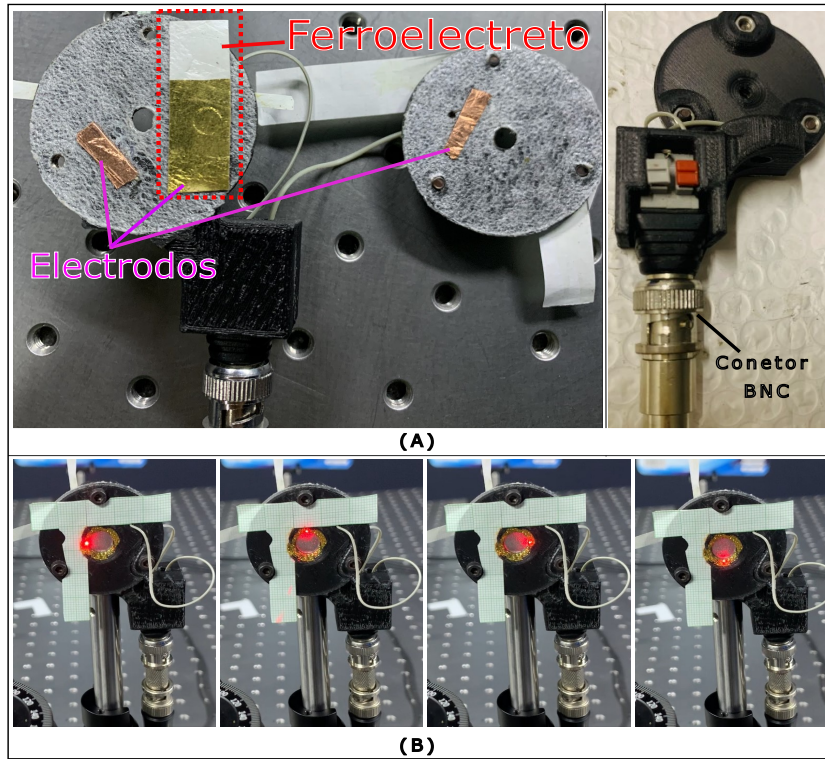


Figura 2.22: Estructura fabricada para sostener una película de ferroelectreto de forma que quede fija en su perímetro y libre en el área. A: Representación del ensamble película-estructura. B: Proceso de calibración del vibrómetro láser para medir las vibraciones en una matriz cuadrada de puntos de observación.

BNC que se conecta al pulser-receiver y la película de ferroelectreto con uno de sus electrodos de oro expuesto. La idea de esta estructura es que cuando se junten las dos placas circulares con el la película de ferroelectreto en medio los electrodos de cobre (diametralmente opuestos) toquen la superficie del ferroelectreto que posee recubrimiento de oro.

Por otro lado, para la medición de las deformaciones de la película se utilizó el vibrómetro láser para medir una maya cuadrada de puntos de observación en el plano de la muestra como se ilustra en el rectángulo punteado en negro en la figura 2.21, en este rectángulo se dibujaron cuatro puntos rojos diametralmente opuestos más grandes que los demás para indicar que estos puntos son los que se observan en la figura 2.22 B. El patrón cuadrado de la maya de puntos de observación es permitido gracias al control de la desviación del haz del vibrómetro (LDV) con el uso de los espejos galvanométricos (GM) que están conectados al computador. las vibraciones capturadas por el vibrómetro se envían al osciloscopio a través del controlador (LDV Ctrl). La mayoría de señales capturadas en este experimento se promediaron con el osciloscopio a 32 muestras antes de ser enviadas al computador para almacenarlas.

Procesamiento

Para procesar los datos y obtener los patrones que se forman en la superficie de la película de ferroelectreto se usó Matlab®. Las señales capturadas provenientes del vibrómetro son similares a las que se capturan en el apartado de caracterización por medio de las curvas de dispersión en la sección 2.2, solo que en este caso se hacen varios barridos lineales en el eje x (dirección horizontal en el plano de la muestra) a pasos x -distantes de valor dy , como se observa en el recuadro punteado de negro en la figura 2.21, generando una matriz cuadrada de puntos de observación por lo que las señales capturadas son un set de Y -conjuntos de señales similares a las que se observan en la figura 2.10, donde $Y = (\text{longitud de observación en el eje } y \div dy)$. De lo anterior se intuye que los datos obtenidos por el vibrómetro durante el experimento representan un cubo que se llamará cubo temporal (C_{xyt}) cuyos índices x, y representan la ubicación espacial del punto de observación y el índice t representa el valor temporal de la señal cuya amplitud esta almacenada en cada una de las posiciones de ese cubo de datos.

El primer paso en el procesamiento de los datos fue eliminar la tendencia (CC), luego se le aplico la transformada rápida de Fourier al cubo entero de datos para obtener la representación de cada una de las señales en el dominio de la frecuencia. Del ultimo paso se obtienen dos cubos de datos en el dominio de la frecuencia, uno correspondiente a la amplitud (espectro de amplitud) que se denotará M_{xyf} y el otro en la fase (espectro de fase) F_{xyf} . Estos dos cubos de datos son de tamaño similar al cubo de datos temporal en el plano del cubo C_{xy} pero de diferente profundidad ya que el índice t corresponde al tiempo en C_{xyt} y en el dominio transformado la profundidad del cubo corresponde al índice f el cual es la frecuencia, en donde en cada uno de los valores en el cubo M_{xyf} corresponde a la amplitud capturada por el vibrómetro en la posición x, y a una frecuencia f . Similarmente cada uno de los valores en el cubo F_{xyf} corresponde a la fase de la señal del punto x, y a la frecuencia f .

Para encontrar rápidamente el primer modo flexural de vibración de cada película se decidió tomar el punto central de la matriz de puntos de observación para representar su espectro de magnitud (figura 2.23 E), ya que como lo sugiere la teoría este punto es el que mayor amplitud debería tener en dicho modo. Este punto se representa con un punto en rojo grande, en la figura esquemática del plano de la muestra, figura 2.23.

Se construyeron los modos de vibración que se producen en la película para cada frecuencia con las matrices M_{xyf} y F_{xyf} , para esto solo es necesario graficar en mapa de color el plano M_{xy} para el valor de frecuencia que se desea observar como se muestra en la figura 2.23 A, en donde el valor de la frecuencia corresponde al círculo en rojo señalado en figura 2.23 E. A color se observan las magnitudes de las velocidades de las deformaciones presentes en el área de la película.

Recordando que el objetivo de este análisis es validar los resultados de simulación (sección 2.3.1) en los cuales no es posible obtener la magnitud de los desplazamientos, cabe aclarar que el la barra de color precisamente no esta en escala de velocidad (así como las demás barras de color de esta figura), esto es porque a criterio del autor no es relevante transformar la cantidad

de voltios entregados por el controlador del vibrómetro láser a una escala de velocidad como (mm/s) usando la función de transferencia del vibrómetro, ya que no es relevante para el objetivo del presente análisis. La figura 2.23 B muestra una superficie del plano pintado en figura 2.23 A. Ya que el dominio de medición esta dividido en puntos finitos, para obtener gráficas en colores más suavizados se aplicó interpolación entre los los puntos de observación.

Similarmente a como se gráfico el plano de magnitud se hizo con el plano de fases, como se ilustra en la figura 2.23 C, en donde a color se observan los valores de la fases de cada uno de los puntos de observación en el área de la película de ferroelectreto.

Ya que el cubo de magnitud solo contiene valores absolutos de las velocidades de desplazamiento en cada punto de observación, en la figura 2.23 B, siempre se representarán puntos en la superficie con valores positivos en el eje Z. Para una mejor visualización de los patrones de movimiento generados en la película de ferroelectreto se implementó una forma de representar las velocidades de desplazamiento de cada punto en el plano XY de acuerdo con su fase. Se decidió multiplicar punto a punto el plano de magnitud por el plano de fase, (que contiene valores negativos), de manera que en los casos en que algún punto o región de observación esté en contra-fase con otro, se pueda visualizar en una superficie. El resultado gráfico de esta operación se ilustra en la figura 2.23 D. En el primer modo flexural de vibración la anterior operación no tiene mucho sentido porque los puntos de toda el área de la lamina están en la misma fase, como se puede observar en la figura figura 2.23 C, pero para los siguientes modos de vibración en donde hay regiones en contra-fase con otras es de utilidad para reconocer de forma natural los patrones formados en la película.

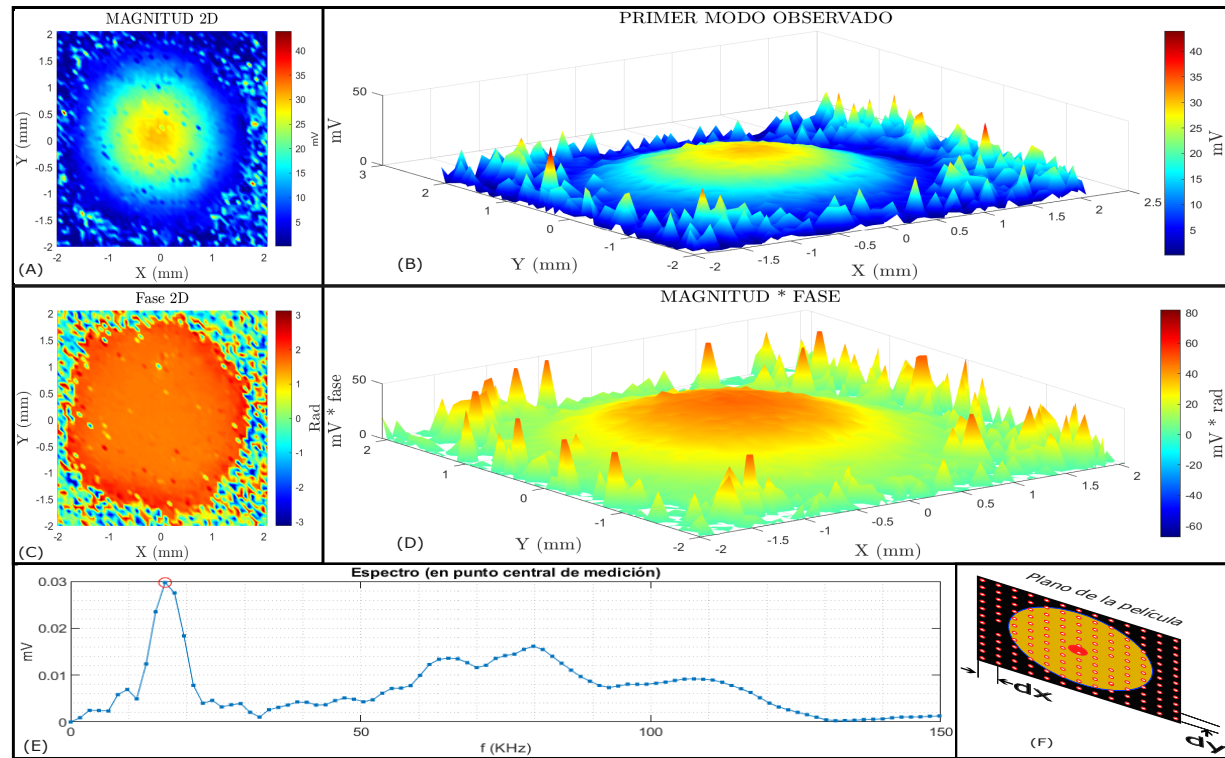


Figura 2.23: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de oro en sus dos superficies, A: Se muestra el plano M_{xy} para una frecuencia específica, representada por el círculo rojo en la sub-figura E. B: Superficie del plano representado en la Figura A. C: Plano de fases F_{xy} en el que se observan los valores de fase de los puntos de observación en la película. D: Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. E: espectro en frecuencia de la información del punto de observación central resaltado en F. resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al primer modo flexural de vibración a una frecuencia de 16.3 kHz. F: Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación del vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la sub-figura E. El círculo amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película.

Capítulo 3

Resultados

EN este capítulo, se expondrán los resultados obtenidos a través de la metodología diseñada para adquirir y procesar datos destinados a la determinación de las propiedades mecánicas de muestras de ferroelectreto. Además, se abordará el análisis de los modos flexurales de vibración en algunas de estas muestras cuando son sometidas a excitaciones eléctricas bajo condiciones de frontera específicas así como los resultados de análisis modal simulado.

El capítulo se estructura en tres secciones, cada una dedicada a la presentación de los resultados de un experimento específico que cumple con uno de los tres objetivos específicos planteados. En primera instancia, se expondrán los resultados de los experimentos de espectroscopia ultrasónica acoplada en aire, abordando así el cumplimiento del primer objetivo específico. Posteriormente, se detallarán los resultados de los experimentos de dispersión acústica, correspondientes al logro del segundo objetivo específico. Finalmente, se presentarán los resultados de simulación y análisis modal, concluyendo con el cumplimiento del tercer objetivo específico.

3.1. Resultados Espectroscopia Ultrasónica Acoplada en Aire

Se llevaron a cabo experimentos a todas las muestras de ferroelectretos disponibles en el laboratorio de vibraciones y acústica a los que fue posible aplicarle el experimento siguiendo la metodología planteada en [2].

En una primera fase de investigación, se exploró la literatura con el objetivo de abordar la pregunta emergente: *¿existen resultados previamente documentados sobre las propiedades que se intentan caracterizar en este trabajo mediante una técnica similar?* Se identificó que T. Gómez, presentó algunos resultados relevantes [11] para los parámetros objeto de caracterización en esta sección.

Gómez, aplicando una técnica similar en cuanto al experimento pero ajustando un modelo que difiere al presentado en este trabajo reporto valores de módulo de elasticidad y velocidad de propagación del sonido en el espesor de la muestra, así como valores de densidad, espesor y frecuencias de resonancia caracterizados experimentalmente, los resultados más relevantes reportado por Gómez se resumen en la tabla 3.1. Cabe resaltar que la única muestra de ferroelectreto con la que se comparten los resultados de Gómez y los reportados aquí son los de

ferroelectreto con un solo electrodo de aluminio en su superficie, con nombre designado por el fabricante como HS03.

Tabla 3.1: Resultados de parámetros reportados por T. Gómez en [11].

Característica	Valor	Descripción
c_1	78[m/s]	Velocidad del sonido en la primer frecuencia de resonancia
c_2	72[m/s]	Velocidad del sonido en la segunda frecuencia de resonancia
c	83 ± 6 [m/s]	Promedio de la velocidad del sonido
t_{ks}	59[μm]	Espesor de la película
ρ	560[kg/m ³]	Densidad
E	4.67[MPa]	Módulo de elasticidad
f_1 / f_2	(645 / 1190)[kHz]	primer frecuencia de resonancia / segunda frecuencia de resonancia

Aunque el logro del primer objetivo de este trabajo se ha limitado la caracterización del módulo de elasticidad a muestras de ferroelectreto con electrodos de aluminio y oro, al final de esta sección se presentarán de manera resumida los resultados obtenidos para una muestra de ferroelectreto sin electrodo conductor en su superficie. Así entonces, se iniciará la presentación de los resultados de espectroscopia ultrasónica acoplada en aire con los obtenidos para una muestra con un solo electrodo de aluminio en una de sus superficies, luego para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies (dos electrodos) recubiertas con oro y seguidamente, de forma más resumida, los resultados para muestras con un solo electrodo de oro y por último los obtenido para una muestra de ferroelectreto sin electrodo conductor en sus superficies.

3.1.1. Ferroelectreto Con Aluminio En Una de Sus Superficies

Se inició con la muestra HS03 debido a que se podían contrastar los resultados obtenidos con los reportados por Gómez. Esta elección cobra lógica considerando que, al tratarse de resultados experimentales, existe cierta incertidumbre en cuanto a la coherencia física de los datos y su utilidad práctica. La comparación con resultados previos ayuda a validar y contextualizar los hallazgos, contribuyendo así a una evaluación más robusta de la información obtenida.

La elección de iniciar los experimentos con los transductores de 750 kHz era lo más lógico según el reporte de Gómez, quien indicó que la primera frecuencia de resonancia para la muestra HS03 estaba alrededor de 645 kHz 3.1. Esto justificaba el uso de transductores disponibles con la frecuencia de resonancia más cercana a la reportada (ver tabla 2.2). Sin embargo, con el objetivo de confirmar y obtener una comprensión más completa de la respuesta de la muestra a diferentes frecuencias, se optó por iniciar los experimentos excitando la muestra con transductores de 250 kHz y posteriormente con los de 400 kHz. Esto permitiría verificar si la muestra realmente no presentaba resonancia a frecuencias más bajas de las indicadas por Gómez, contribuyendo así a una evaluación más completa de los resultados experimentales.

Resultados con transductores de 250 kHz y 400 kHz

Los resultados de los experimentos realizados con los transductores de 250 kHz y 400 kHz se resumen en la figura 3.1 en donde se presentan los espectros en frecuencia subfigura A y B respectivamente y en las subfiguras C y D se representa el espectro de frecuencia y de fase de la función de transferencia para los transductores de 250 kHz y 400 kHz respectivamente.

Se omitirán las representaciones temporales de datos obtenidos experimentalmente debido a que las señales en el tiempo no presentan ninguna información relevante.

En la figura 3.1 subfigura A se observa el espectro en frecuencia de las señales de referencia y señal captada con la muestra en medio de los transductores emisor y receptor pintadas en color azul y naranja respectivamente cuando se usan los transductores de 250 kHz. Se puede observar como la señal naranja emula casi perfectamente en forma a la señal azul, lo que quiere decir que cuando se puso la muestra en medio de los transductores transmisor y receptor (Tx y Rx), la señal capturada es casi la misma a la de referencia excepto en magnitud, esto se traduce en que la muestra no afecto significativamente ó más bien en casi nada (excepto en magnitud) a la onda acústica que la atravesó, es decir, que la muestra no interactuó con la señal acústica en otra cosa diferente a atenuar la energía acústica de la onda enviada con el transductor emisor.

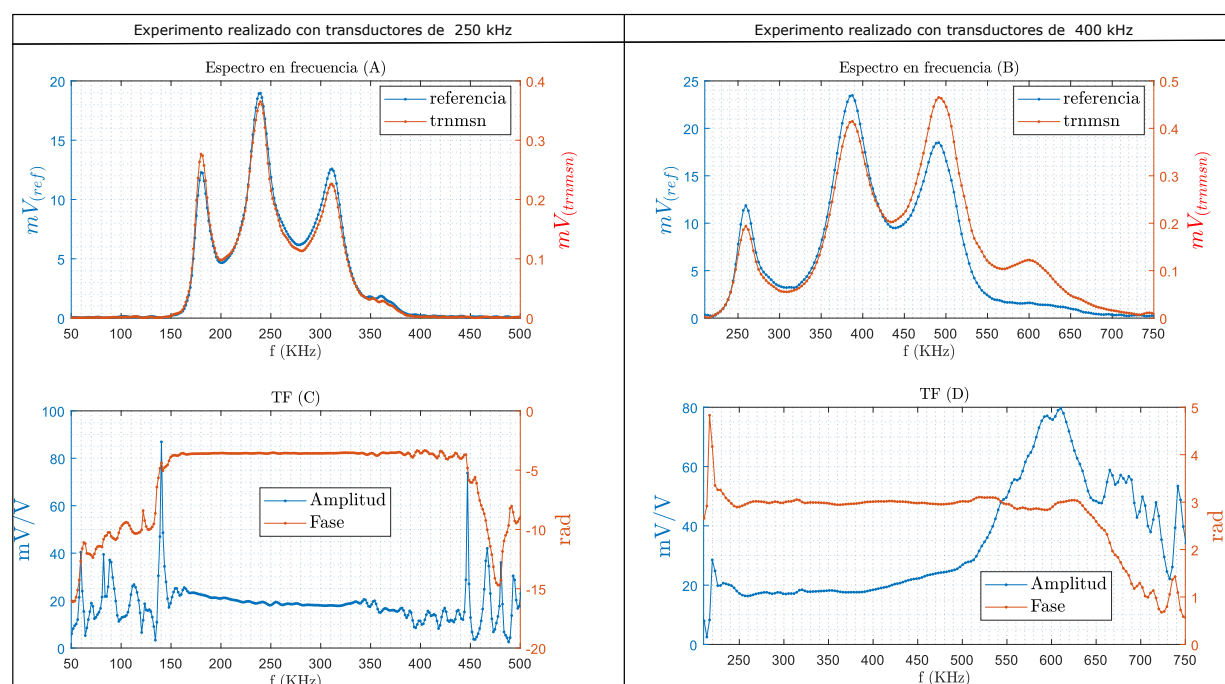


Figura 3.1: Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferro-electreto con aluminio en una de sus superficies (HS03) usando transductores de 250 kHz y 400 kHz.

Por otra parte en la figura 3.1 subfigura C se observa como en el espectro de frecuencias que el transductor Tx es capaz de emitir energía acústica (al rededor de 160 kHz a 340 kHz con pico central en 250 kHz) el cociente entre la señal transmitida y la señal de referencia que no es otra cosa que la función de transferencia presenta una curva muy plana en este intervalo de

frecuencias, lo cual es muestra de que en este espectro de frecuencia no se presenta ninguna resonancia por parte de la muestra puesta en medio. Con el espectro de fase en la misma subfigura se comprueba lo anterior ya que se observa como la función de transferencia mantiene una fase "constante" en el intervalo de frecuencia mencionado, lo cual es contrario a lo que se espera cuando se presenta alguna resonancia ya que en el caso de la resonancia acústica, la coincidencia de la frecuencia de la onda incidente con las propiedades de la muestra puede provocar que la onda transmitida tenga una amplitud significativa (como se observa en la figura 3.2, sub figura C) y un cambio de fase aproximadamente de π . Este cambio en la fase se debe a la inversión de la onda al transmitirse en la interfaz.

Por otra parte en la figura 3.1 subfiguras B y D se presentan los resultados del espectro en frecuencia de la señal transmitida y de referencia y la función de transferencia en magnitud y fase, respectivamente. Se observa en la subfigura B que el transductor Tx emite energía acústica en el intervalo ($\approx 250 \text{ kHz}$ a $\approx 540 \text{ kHz}$) con un pico máximo en 400 kHz. A diferencia de los resultados obtenidos con los transductores de 250 kHz se observa como difiere un poco en forma la señal transmitida (pintada en naranja) respecto a la señal de referencia a partir de $\approx 550 \text{ kHz}$. Lo anterior sugiere que la señal enviada por Tx interactuó con la muestra, se vio favorecida por la muestra y transmitió energía acústica de manera más eficiente en proporción al resto de frecuencias dentro del intervalo en el cual los transductores utilizados en este experimento emiten/reciben energía acústica. Este cambio en la energía emitida sugiere una respuesta resonante por parte de la muestra, pero debido a que como se observa en la señal de referencia (pintada en azul), este cambio de forma en la señal transmitida aparece en un intervalo en el cual la energía acústica es muy baja ya que esta lejana al pico máximo de energía emitida/recibida por los transductores el cual es 400 kHz.

La figura 3.1 D confirma que en el espectro de frecuencia de la función de transferencia es constante hasta el punto en el cual se cree que la muestra empieza a interactuar con la señal emitida por Tx, a partir de ese punto se observa un aumento en la amplitud de la función de transferencia en el espectro. Mientras que en el espectro en fase se observa como apenas se presenta un pequeño cambio después de los $\approx 550 \text{ kHz}$.

Debido a que la energía de la señal es muy pobre en el rango de frecuencias en el cual se observa un máximo en la función de transferencia y a que el cambio en la fase no es cercano a π se concluyó que no se observó resonancia por parte de la muestra cuando se excitó con los transductores de 400 kHz, pero debido al cambio notable en la señal transmitida a partir de los 600 kHz se esperó que si se usan los transductores de 750 kHz se pueda obtener una respuesta resonante de la muestra y por lo tanto contar con los datos experimentales suficientes para ajustar el modelo teórico a los dichos datos y caracterizar las propiedades de la muestra.

Hasta el momento se comprobó lo esperado de acuerdo a los resultados presentados por T. Gómez en cuanto a que la muestra de ferroelectreto HS03 presentaría su primera frecuencia de resonancia al rededor de 645 kHz y que era razonable realizar el experimento de espectroscopia ultrasónica con los transductores cuya frecuencia de resonancia sea lo más cercana a las frecuen-

cia de resonancia reportada por Gómez para el material en cuestión, estos transductores según la tabla 2.2 son los transductores de 750 kHz.

Resultados Con Transductores de 750 kHz

La sección anterior proporciona una visión general de los resultados obtenidos con los transductores de 250 kHz y 400 kHz con los cuales no se observa resonancia clara en el espectro en el cual este par de parejas de transductores fue capaz de emitir-recibir energía acústica. Ahora, nos centraremos en los resultados específicos obtenidos con los transductores de 750 kHz, donde se esperaba la posibilidad de obtener resonancia y ajustar el modelo teórico a los datos experimentales.

En la figura 3.2 subfigura A se observa en azul y naranja el espectro en frecuencia de las señales de referencia y transmisión respectivamente. De acuerdo a la señal de referencia se puede apreciar como el intervalo en el que el par de transductores de 750 kHz emiten-reciben significativamente energía acústica es desde los ≈ 420 kHz hasta los ≈ 980 kHz con un pico central en 750 kHz.

A diferencia de lo observado en los resultados obtenidos con los transductores de 250 kHz se puede observar como claramente la señal de transmisión difiere tanto en amplitud como en la forma de la señal de referencia, es decir, la señal pintada en naranja de la figura 3.2 subfigura A no emula a la señal pintada en azul, especialmente en el intervalo de ≈ 500 kHz a ≈ 800 kHz. Lo anterior quiere decir que la muestra puesta en medio del transductor emisor (Tx) y receptor (Rx) interactuó con la señal emitida por Tx de tal forma que la altero en el intervalo de frecuencias señalado.

Por otra parte el la figura 3.2 C, se observa pintada en el espectro de la frecuencia la función de transferencia tanto en magnitud como en fase, en azul y naranja, respectivamente. Se puede observar como en el espectro de magnitud se genera una curva con forma de montaña cuyo pico se presenta en los ≈ 653 kHz (remarcado por linea azul, discontinua y vertical), lo cual es un fuerte indicio de resonancia y lo verifica el cambio de $\approx 2,6$ rad (diferencia de altura entre las lineas naranjas, horizontales y discontinuas) en el espectro de fase (curva naranja) en donde se observa claramente que el cambio de concavidad ocurre justo en la frecuencia señalada. Con todo lo anteriormente se puede concluir que la primer frecuencia de resonancia experimental observada para la muestra de ferroelectreto HS03 se presentó a los 653 kHz a un valor muy cercano al reportado por T. Gómez [11] quien reporto esta primer frecuencia a los 645 kHz.

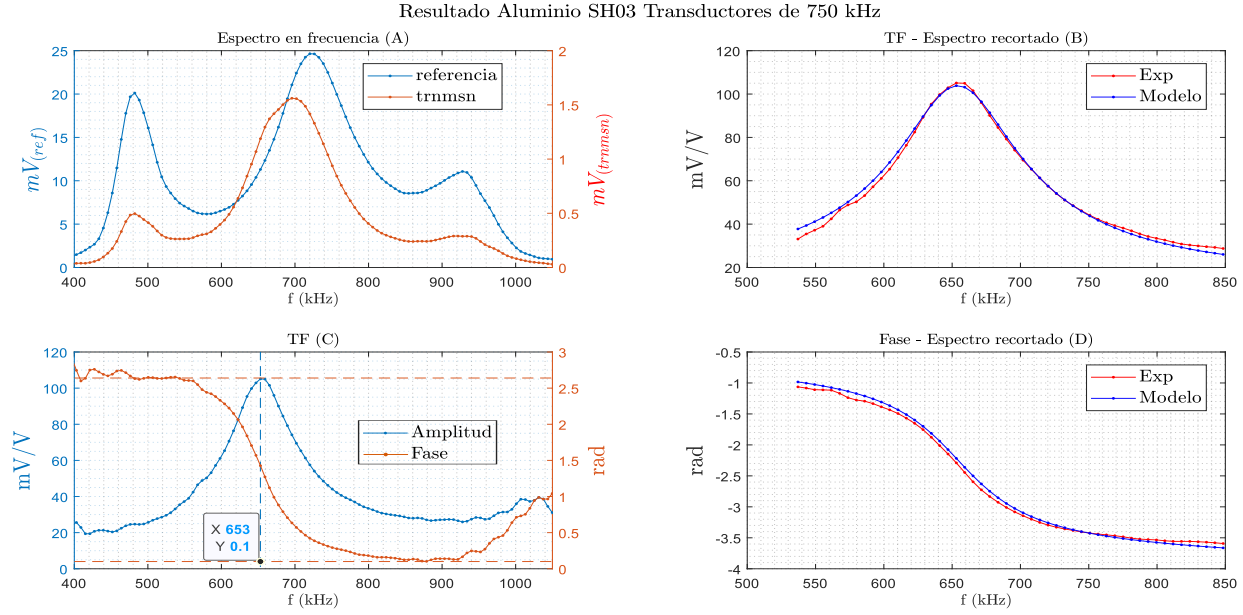


Figura 3.2: Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con aluminio en una de sus superficies (HS03) usando transductores de 750 kHz.

En la figura 3.2 subfiguras B presenta la función de transferencia en el espectro de magnitud de los datos experimentales (curva roja), que corresponde a un intervalo recortado de la misma curva en azul de la subfigura C, además se presenta la curva de la función de transferencia analítica (ecuación 1.8) en donde los parámetros de velocidad del sonido, densidad, atenuación acústica y espesor para producir dicha curva fueron optimizados por el algoritmo implementado. Se recorto el intervalo de frecuencias de los resultados experimentales de 535 kHz a 850 kHz debido a que en este intervalo es que se puede observar resonancia y para que se pueda ajustar el modelo a los datos experimentales es necesario que la condición de resonancia se cumpla, por lo que en otros rangos de frecuencia en los que no se aprecia resonancia son de poco interés para el objetivo de esta tarea. Se observa como después de optimizar estos parámetros la curva analítica describe con razonable precisión los datos experimentales en el espectro en magnitud de la función de transferencia.

Por otra parte en la figura 3.2 subfigura D se presenta el espectro en fase de la función de transferencia tanto de los datos experimentales como del modelo analítico en el espectro de frecuencias recortado y también se puede observar como con buena precisión el algoritmo ajustó el modelo analítico a los datos experimentales.

Los valores finales de los parámetros de velocidad del sonido, espesor, atenuación acústica y densidad con los cuales se produjeron las curvas analíticas se resumen en la tabla 3.2, donde se agrega además el valor de módulo de elasticidad calculado indirectamente a partir de la velocidad del sonido y la densidad como lo sugiere [21].

Tabla 3.2: Resumen resultados de parámetros optimizados por algoritmo, ferroelectreto HS03 con un solo electrodo de aluminio cuando se aplico experimento con transductores de 750 kHz.

Parámetro	Valor	Descripción
c	93[m/s]	Velocidad del sonido
tk _s	70[μm]	Espesor de la película
ρ	540 [kg/m ³]	Densidad
E	4.67[MPa]	Módulo de elasticidad

Al comparar los resultados reportados por T. Gómez (tabla 3.1) y los obtenidos en este trabajo (tabla 3.2), se observa que no existe una diferencia significativa entre los valores de las propiedades caracterizadas. Lo anterior muestra cierta confiabilidad en la aplicación de la técnica y el tratamiento de los datos ya que dos personas diferentes obtuvieron resultados similares aplicando el mismo experimento con una expresión analítica un tanto diferente y muy probablemente con algoritmos de optimización diferentes.

3.1.2. Ferroelectreto Con Oro en Ambas Superficies

Resultados con transductores de 250 kHz

Debido a que con este material no se cuenta con información reportada de valores de frecuencias en las cuales resuena se decidió iniciar con el proceso de experimentación utilizando las parejas de transductores acústicos en orden ascendente empezando con los transductores de 250 kHz.

En la figura 3.3 subfiguras A y B se se presenta en el espectro de la frecuencia las señales de referencia-transmisión y la función de transferencia, respectivamente. Se puede observar como con este par de transductores la señal de transmisión difiere en forma y aplitud de la señal de referencia (subfigura A). Por otra parte se observa resonancia en la función de transferencia (subfigura C) a 271 kHz, en donde también ocurre un cambio de fase de $\approx 2,5$ rad como se observa en la curva naranja.

En las subfiguras B y D de la figura 3.3 se presenta las curvas de la función de transferencia en el espectro de magnitud y de fase, respectivamente. En este caso se observa como la función analítica (curva en rojo) de la función de transferencia tanto en magnitud como en fase emula con razonable precisión los datos experimentales en un intervalo recortado de frecuencias con el fin de tomar solo el tramo en la frecuencia donde se observa resonancia.

3.1.2 Ferroelectreto Con Oro en Ambas Superficies

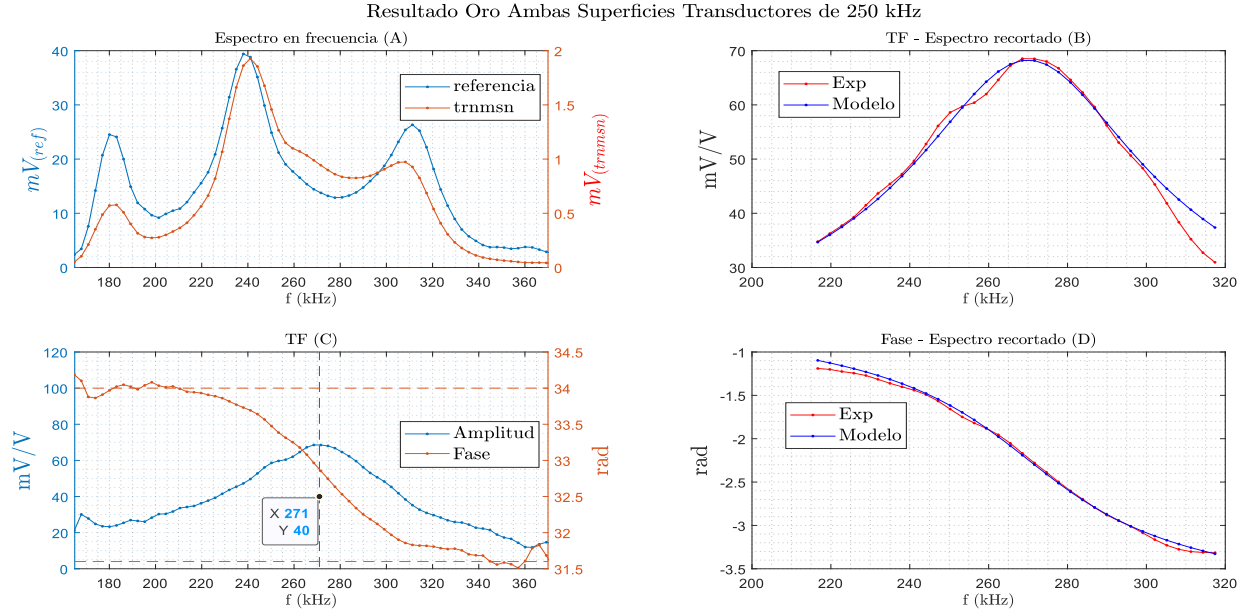


Figura 3.3: Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro usando transductores de 250 kHz.

Los valores finales de los parámetros que se optimizaron en el algoritmo para producir las curvas en rojo de las subfiguras B y D de la figura 3.3 se resumen en la tabla 3.3. Cabe resaltar que para esta muestra de ferroelectreto se produjo resonancia utilizando los transductores de 250 kHz a diferencia de la muestra HS03. Debido a los transductores disponibles era muy probable observar una segunda frecuencia de resonancia en esta muestra cuando se usen los otros pares de transductores y así optimizar la función analítica para un mismo material pero a dos valores de frecuencias de resonancia diferentes y así contrastar los valores caracterizados. Por lo anterior se decidió realizarle a la muestra con electrodo de oro en ambas superficies los experimentos con las dos parejas de transductores disponibles restantes (400 kHz y 750 kHz).

Tabla 3.3: Resumen resultados de parámetros optimizados para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas de oro cuando se aplico experimento con transductores de 250 kHz.

Parámetro	Valor	Descripción
c	56[m/s]	Velocidad del sonido
tk	103[μ m]	Espesor de la película
ρ	518 [kg/m ³]	Densidad
E	1.63[MPa]	Módulo de elasticidad

Resultados con transductores de 400 kHz

Se decidió probar este par de transductores en busca de la segunda frecuencia de resonancia para la muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas en oro.

Como se puede observar en la figura ... subfigura A se aprecia como la señal de transmisión difiere de la señal de referencia solo en el intervalo de ≈ 230 kHz a ≈ 350 kHz, dicho intervalo

de frecuencia se ve traslapado con las señales obtenidas con el par de transductores de 250 kHz (3.3) por lo que se concluye que con los transductores de 400 kHz no se produce resonancia, ni diferente ni con mejor calidad a la obtenida con los transductores de 250 kHz, ya que la resonancia observada ocurre muy cercana al centro del intervalo en el cual los transductores de 250 kHz emiten energía acústica.

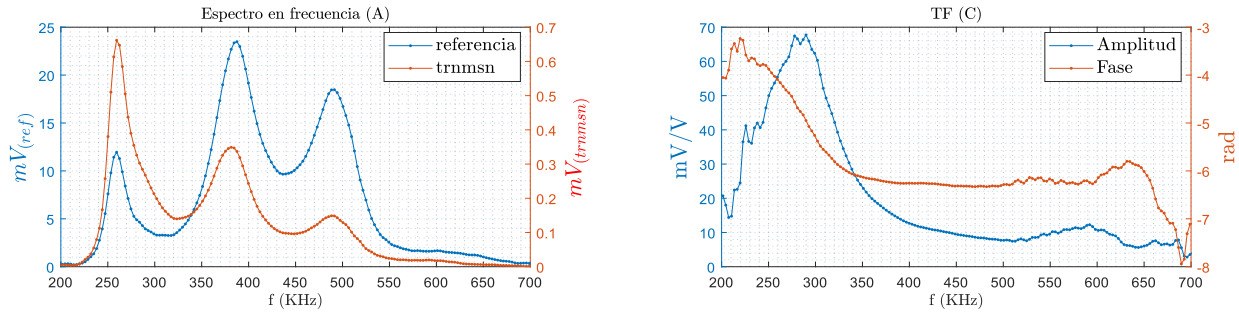


Figura 3.4: Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro usando transductores de 400 kHz.

La subfigura B de 3.4 confirma que no se observa ninguna resonancia diferente a la ocurrida a 271 kHz como lo muestran los datos obtenidos con los transductores de 250 kHz, ya que el cambio en la fase (curva naranja) ocurre justo a ese valor de frecuencia y en el resto del espectro en el cual la pareja de transductores emite energía acústica el ángulo se mantiene casi constante. Por otra parte el espectro de amplitud (curva azul) muestra solo un pico en donde la función de transferencia es máxima y ocurre justo en el valor de frecuencia en el cual se presenta el cambio de fase y se presenta resonancia (271 kHz).

Resultados con transductores de 750 kHz

Ya que con los transductores de 400 kHz no se obtuvieron resultados relevantes, se procedió a realizar el experimento utilizando los transductores de 750 kHz.

En la figura 3.5 sub figuras A se observa el espectro de frecuencias en los cuales se emitió-recibió energía acústica por parte de los transductores de 750 kHz cuando se utilizaron en el experimento aplicado a una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro. Se puede apreciar que dicho intervalo de energía esta entre los ≈ 440 kHz y ≈ 1020 kHz.

Se observa como la señal naranja parece emular la señal de transmisión pero cabe resaltar que le pico central naranja (a 708 kHz) es mucho más grande en proporción a los demás picos en relación a la señal de transmisión, lo cual sugiere resonancia. Por otra parte la subfigura C de la figura a3.5 presenta el espectro de amplitud de la función de transferencia (curva en azul) en la cual se observa como solo hay un pico máximo en el intervalo en el cual los transductores son capaces de emitir energía acústica significativamente. En la misma subfigura se observa como en el espectro de fase de la función de transferencia (curva naranja) hay un cambio de fase de $\approx 2,5$ rad con el cambio de concavidad en el valor de frecuencia en el cual se concluye resonancia.

Con lo anterior se concluye que se obtuvo la segunda frecuencia de resonancia para la muestra de ferroelectreto con amabas superficies recubiertas con oro utilizando los transductores de 750 kHz.

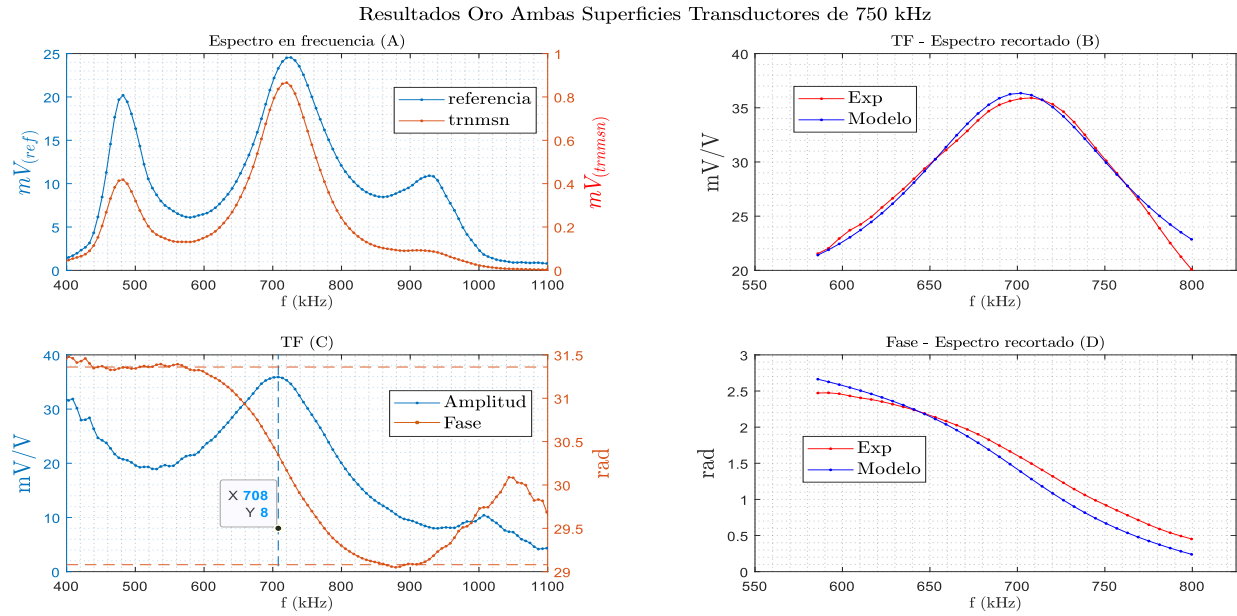


Figura 3.5: Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro usando transductores de 750 kHz.

Una vez obtenidas y verificadas las curvas para averiguar si se obtiene resonancia se procedió a iterar el algoritmo de optimización con los datos experimentales recortados en el espectro de frecuencia en el intervalo en el cual se observa dicha resonancia. El intervalo seleccionado va desde 585 kHz hasta 800 kHz.

En las subfiguras B y D de la figura 3.5 se presentan los resultados del ajuste del modelo a los datos experimentales de la función de transferencia en el espectro de amplitud y de fas, respectivamente. Se puede observar como en el espectro de magnitud la curva generada sintéticamente (curva azul) optimizando las propiedades a caracterizar se ajusta con razonable precisión a los datos experimentales. Mientras que para el caso del espectro en fase de la función de transferencia del modelo teórico (subfigura D) se observa un ajuste más pobre en comparación al de magnitud (subfigura B).

Los valores de los parámetros optimizados en el algoritmo que generaron las curvas azules de las subfiguras B y D de la figura 3.5 se resumen en la tabla

Tabla 3.4: Resumen resultados de parámetros optimizados para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas de oro cuando se aplico experimento con transductores de 750 kHz.

Parámetro	Valor	Descripción
c	60[m/s]	Velocidad del sonido
tk _s	85[μm]	Espesor de la película
ρ	618 [kg/m ³]	Densidad
E	2.22[MPa]	Módulo de elasticidad

Los valores de las propiedades caracterizadas por medio de esta técnica reportados en las conclusiones para esta muestra corresponden al promedio entre los encontrados con los transductores de 250 kHz y 750 kHz. En la tabla 3.5 se resumen estos valores.

Tabla 3.5: Resumen resultados de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas de oro.

Parámetro	Valor	Descripción
c	58[m/s]	Velocidad del sonido
tk _s	94[μm]	Espesor de la película
ρ	568 [kg/m ³]	Densidad
E	1.93[MPa]	Módulo de elasticidad

3.1.3. Ferroelectreto Con Oro en Una de Sus Superficies

Se realizaron experimentos con las tres parejas de transductores y se encontró que para el caso del set de transductores de 250 kHz no se observo resonancia clara, mientras que para el caso de los transductores de 400 kHz si, por lo que se omitirán los resultados obtenidos con los de 250 kHz.

Resultados con transductores de 400 kHz

En la figura 3.6 subfigura A se observa la representación de las señales de transmisión y de referencia en el espectro de la frecuencia, en donde se observa claramente como la señal de transmisión presenta un pico máximo a una frecuencia de 373 kHz. También se observa que este pico ocurre muy cercano a la frecuencia en la cual la pareja de transductores utilizada para capturar estos datos emite-recibe energía con mayor eficiencia ≈ 400 kHz. Cabe señalar que en la señal de referencia se observan tres picos así como en la señal de transmisión pero solo en el pico máximo de la señal de transmisión se observa una mayor amplitud en proporción a la señal de referencia con respecto a los otros dos picos restantes, por lo que esto es una posible señal de resonancia. En la subfigura C de la figura 3.6 se comprueba la resonancia sugerida por las curvas de la subfigura A, en donde se aprecia un pico máximo en la función de transferencia en el espectro de amplitud (curva azul) y un cambio de fase de $\approx 2,7$ rad (curva naranja).

3.1.3 Ferroelectreto Con Oro en Una de Sus Superficies

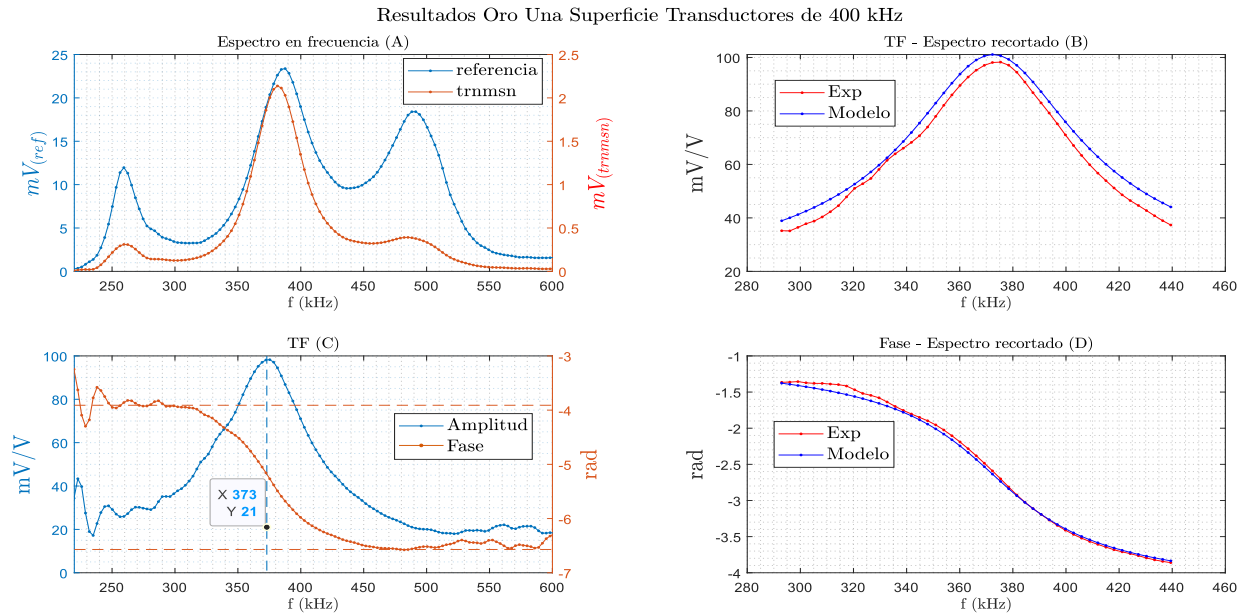


Figura 3.6: Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto con una superficie recubierta con oro usando transductores de 400 kHz.

Se decidió recortar los datos de la función de transferencia en el espectro de la frecuencia en el intervalo en el que se observó resonancia desde los 290 kHz hasta los 440 kHz. Con los datos en el espectro de la frecuencia de la función de transferencia experimental en magnitud y fase se corrió el algoritmo de optimización para obtener los parámetros que se resumen en la tabla 3.6. Se observa como con razonable precisión el algoritmo implementado ajusto la curva de la función de transferencia analítica tanto en el espectro de magnitud como de fase, subfiguras B y D de la figura 3.6, respectivamente.

Tabla 3.6: Resumen resultados de parámetros optimizados para una muestra de ferroelectreto con solo una superficie recubierta de oro cuando se aplico experimento con transductores de 400 kHz.

Parámetro	Valor	Descripción
c	52[m/s]	Velocidad del sonido
tk _s	70[μ m]	Espesor de la película
ρ	550 [kg/m ³]	Densidad
E	1.49[MPa]	Módulo de elasticidad

Resultados con transductores de 750 kHz

Se decidió realizar los experimentos con los transductores de 750 kHz en busca de la segunda frecuencia de resonancia.

La figura 3.7 se presentan las curvas de los datos experimentales obtenidos, así como los resultados del ajuste del modelo teórico de la función de transferencia en el espectro de magnitud y fase a la función de transferencia experimental.

En la figura 3.7 subfigura A se observan en el espectro de la frecuencia las señales de transmisión y de referencia. Se nota como la señal de transmisión difiere en forma de la señal de referencia principalmente en el intervalo de frecuencia de ≈ 740 kHz a ≈ 950 kHz. Además se observa que también en la zona del rededor de 475 kHz la señal de transmisión difiere en amplitud de la señal de referencia, en dicha zona se concluye que la diferencia radica en que se alcanza a excitar la primer frecuencia de resonancia expuesta con los resultados obtenidos con los transductores de 400 kHz, mientras que la diferencia de las señales de transmisión y de referencia en el intervalo de ≈ 740 kHz a ≈ 950 kHz se concluye que es muestra de la posible segunda frecuencia de resonancia.

En la función de transferencia (figura 3.7 subfigura C) se observa como la sugerencia de la segunda frecuencia de resonancia expuesta por la subfigura A se comprueba al observar un pico en la amplitud de la TF y un cambio de concavidad en la fase justo en el mismo valor de frecuencia. Con lo cual es suficiente para iterar el algoritmo de optimización para caracterizar los parámetros objetivo. Se decidió recortar el espectro de los datos experimentales a un intervalo de 760 kHz a 960 kHz en donde se observa el cambio de fase y el pico de la segunda frecuencia de resonancia en la función de transferencia experimental, en donde el algoritmo intentara ajustar la función analítica.

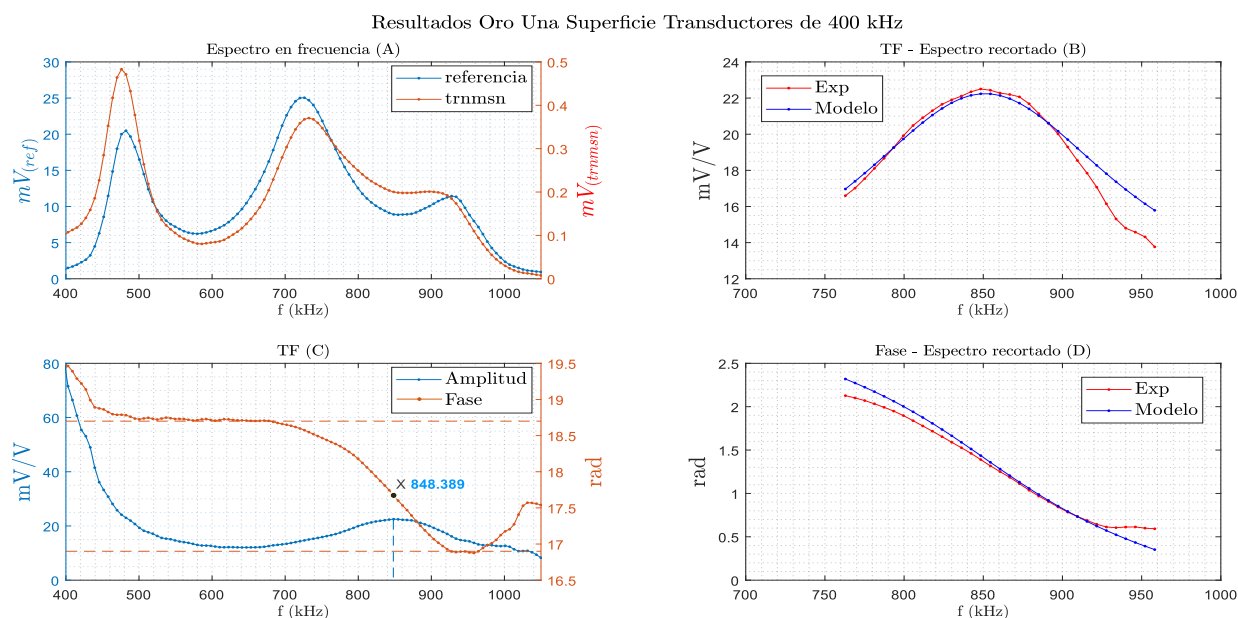


Figura 3.7: Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferro-electreto con una superficie recubierta con oro usando transductores de 750 kHz.

En las subfiguras B y D de la figura 3.7 se observa en las curvas pintadas en azul el resultado del ajuste realizado por el algoritmo en el espectro de magnitud y fase. Se aprecia como en el intervalo desde los 760 kHz hasta los ≈ 900 el modelo se ajusta con razonable precisión mientras que para el resto del espectro de la función de transferencia se observa un ajuste un poco más pobre. Se cree que la diferencia entre las curvas de la función de transferencia en magnitud y fase

a partir de los 900 kHz radica en que los transductores utilizados para capturar los datos con los que se generaron las curvas experimentales no son capaces de emitir-recibir energía acústica con buena calidad a partir de los 900 kHz.

Los resultados de los parámetros optimizados por el algoritmo se encuentran detallados en la tabla 3.7. En esta situación, la resonancia ocurre en una región donde los transductores no emiten ni reciben energía de manera óptima. Por lo tanto, el autor sugiere que los valores de las propiedades caracterizadas no deben promediarse y solo se deben considerar aquellos obtenidos con los transductores de 400 kHz.

Tabla 3.7: Resumen resultados de parámetros optimizados para una muestra de ferroelectreto con solo una superficie recubierta de oro cuando se aplico experimento con transductores de 750 kHz.

Parámetro	Valor	Descripción
c	60[m/s]	Velocidad del sonido
tk _s	73[μm]	Espesor de la película
ρ	644 [kg/m ³]	Densidad
E	2.31[MPa]	Módulo de elasticidad

3.1.4. Ferroelectreto Sin Electrodo Conductor

Aunque la caracterización de este material no es un requisito específico para alcanzar los objetivos de este trabajo, se tomó la decisión de emplear la técnica de caracterización en un intento de recopilar información adicional. El propósito es obtener datos potencialmente valiosos que podrían contribuir a futuras publicaciones o informes derivados de esta investigación.

A este material se le aplicaron los experimentos con los transductores de 250 kHz y de 400 kHz en donde no se observo ninguna resonancia, solo se observo la sugerencia de una posible resonancia cuando se le aplico el experimento con los transductores de 750 kHz.

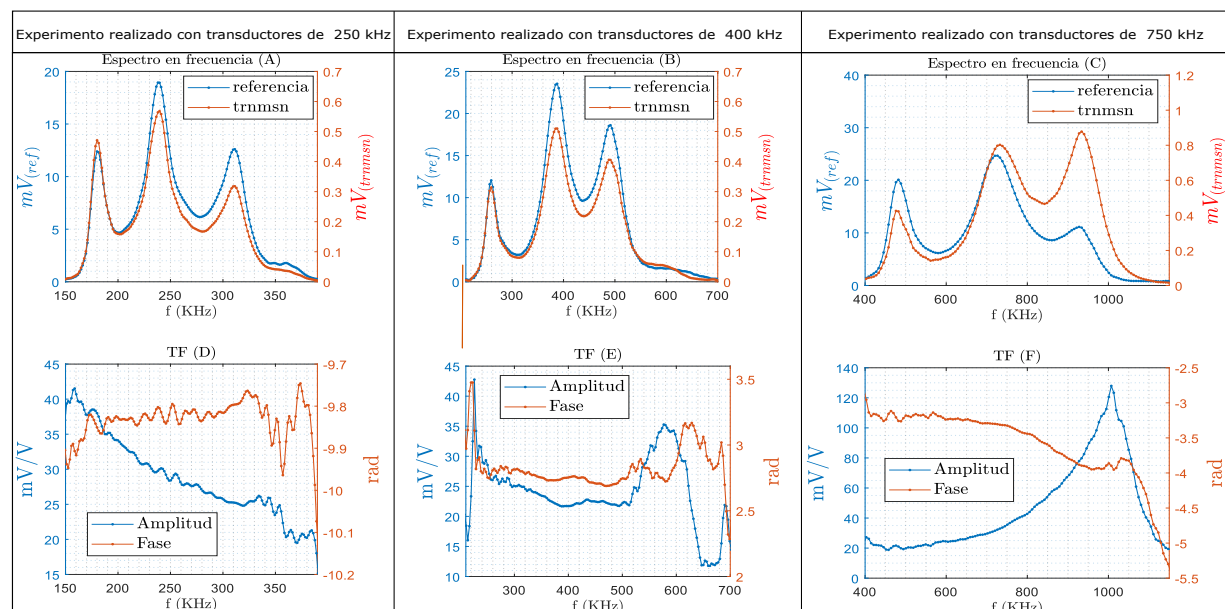


Figura 3.8: Resultados espectroscopia ultrasónica acoplada en aire cundo se le aplico a muestra de ferroelectreto sin electrodo conductor usando transductores de 250 kHz, 400 kHz y 750 kHz.

En la figura 3.8 muerta las curvas de los datos obtenidos de los experimentos realizados a la muestra de ferroelectreto sin material conductor en su superficie. Como en el conjunto de subfiguras A y D muestra las curvas de las señales de transmisión y de referencia y la función de transferencia, respectivamente cuando se utilizaron los transductores de 250 kHz. Con esta pareja de transductores no se observa resonancia, como lo justifica el seguimiento de la señal de transmisión a la señal de referencia en la subfigura A. Además se observa que la función de transferencia en el espectro de magnitud no presenta ningún pico máximo ni tampoco en el espectro de la fase se observa un cambio de concavidad en donde la fase cambie con un valor cercano a π en la subfigura D.

Por otra parte en el conjunto de subfiguras B y E de la figura 3.8 correspondientes a los experimentos realizados con los transductores de 400 kHz se observa de forma similar los mismos resultados expuestos cuando se realizo el experimento con los transductores de 250 kHz. En conclusión la muestra no resuena en ninguna frecuencia dentro del intervalo superpuesto entre las dos parejas de transductores de 250 kHz y 400 kHz.

Por último, cuando se analizan las curvas producidas con los datos obtenidos cuando se condujo el experimento con los transductores de 750 kHz, subfiguras C y F, se observa como la señal de transmisión difiere de la señal de referencia en magnitud en el intervalo de los ≈ 850 kHz a los ≈ 1100 kHz en la subfigura C. También, en la subfigura F se aprecia como la función de transferencia en el espectro de amplitud (curva azul) tiene una forma creciente en el intervalo de frecuencia anteriormente mencionado, así como se observa un pequeño cambio en la fase. Se concluye que los cambios y detalles mencionados anteriormente podrían estar relacionados con la primer frecuencia de resonancia de la muestra bajo estudio, pero, debido a

que los transductores no emiten-reciben energía de forma significativa mas allá de los 1000 kHz no se alcanza a excitar esta primer frecuencia de resonancia de esta muestra por lo que al parecer solo se observan los primeros indicios de resonancia.

Debido a que no se obtuvo resonancia con ninguna pareja de transductores, la muestra de ferroelectreto sin material conductor en su superficie no se pudo caracterizar por medio de la técnica utilizada en este trabajo, pero por lo menos se puede concluir que este material no resuena en el rango de los 170 kHz a los 1000 kHz.

3.2. Resultados de Caracterización Por Medio de Las Curvas de Dispersión

Para familiarizarnos con los equipos empleados en la captura de datos experimentales y validar adecuadamente el código implementado, inicialmente se realizaron experimentos con muestras de materiales cuyas propiedades son ampliamente conocidas, como el latón y el aluminio. Esto permitió contrastar los valores caracterizados por la técnica utilizada.

Aunque la presentación de los resultados de la caracterización de estos dos materiales no sea un objetivo específico, se incluyen en este trabajo con la finalidad de respaldar y validar los resultados de las muestras de ferroelectretos. Esto es particularmente relevante ya que para este último material no existen datos previos sobre sus propiedades mecánicas, (relación de Poisson y módulo de elasticidad reportados en el mismo artículo, según consulta de bibliografía por parte del autor), a diferencia del aluminio y el latón, para los cuales se pueden contrastar los resultados obtenidos mediante el método implementado en este trabajo con los valores de propiedades mecánicas (módulo de elasticidad y relación de Poisson) ya reportados.

3.2.1. Resultados Para Una Placa de Latón

En la figura 2.10 se presenta el grupo de señales en el dominio espacio-tiempo. Se observa en color la representación de la amplitud normalizada al valor máximo de todo el grupo de señales. En la figura 2.11 se observa la fase del mismo grupo de señales. Se aprecia como en la representación de la amplitud de las señales hay una clara distribución suave de colores y como en el epicentro de medición es donde se observan los máximos en la amplitud de la señal, además también se resalta que incluso hasta en los límites de medición (± 18 mm se alcanza a apreciar señal de la onda acústica excitada en la muestra. Lo anterior sugiere que se presentó una buena relación señal a ruido durante el experimento y que los datos son óptimos para la extracción de las curvas de dispersión. Por otro lado en la figura 2.11 se observa como en la representación de la fase de las señales existe coherencia en los datos experimentales, es decir, no se observan manchas ni cambios abruptos de color, lo que sugiere que no hubo problemas durante la experimentación.

Se empleó el algoritmo automático de extracción de parejas k, f como se muestra en la subfigura B de la figura 2.12 para derivar la curva de dispersión $C_p V_s f$ que se muestra en la figura

2.14, subfigura A. Con los datos de $C_p V_s f$ se procedió a iterar el algoritmo de optimización para caracterizar el material. Algunas de las curvas más relevantes se presentan en la figura 3.9.

En la subfigura A de la figura 3.9 se representa las curvas de dispersión $C_p V_s f$, en una línea continua azul se expone la curva de dispersión analítica y en puntos rojos las parejas C_p, f extraídas de los datos experimentales. Se aprecia como el modelo se ajusta con precisión a los datos experimentales. Para producir estas dos representaciones dibujadas en la subfigura A se eliminaron las dos primeras parejas C_p, f de los datos experimentales con el objetivo de producir una curva un poco más suave ya que se considero que estos dos puntos no aportaban información para la optimización sino que más bien añadían ruido innecesario al tratarse de puntos en los cuales la velocidad de fase es cercana a cero (lo que indica nula propagación).

Por otro lado, en las subfiguras B-D de la misma figura se ilustra la progresión de algunos parámetros y del error a lo largo de las iteraciones realizadas por el algoritmo de optimización. En la subfigura B, se evidencia cómo la función de error converge gradualmente hacia su valor mínimo a medida que avanzan las iteraciones. En la subfigura C, se destaca la estabilización de los valores de C_L y C_T , los cuales conducen a un ajuste del modelo a los datos experimentales. Finalmente, en la subfigura D se presenta el parámetro del espesor de la muestra, medido con un micrómetro, revelando un valor de $260 \mu m$. Dentro del algoritmo, este parámetro se restringió a $260 \mu m \pm 1 \mu m$, y cualquier desviación resultó en la asignación manual de un valor extremadamente grande a la función de error. Como resultado, se observa claramente que el algoritmo tiende a asignar el valor de $260 \mu m$ a este parámetro.

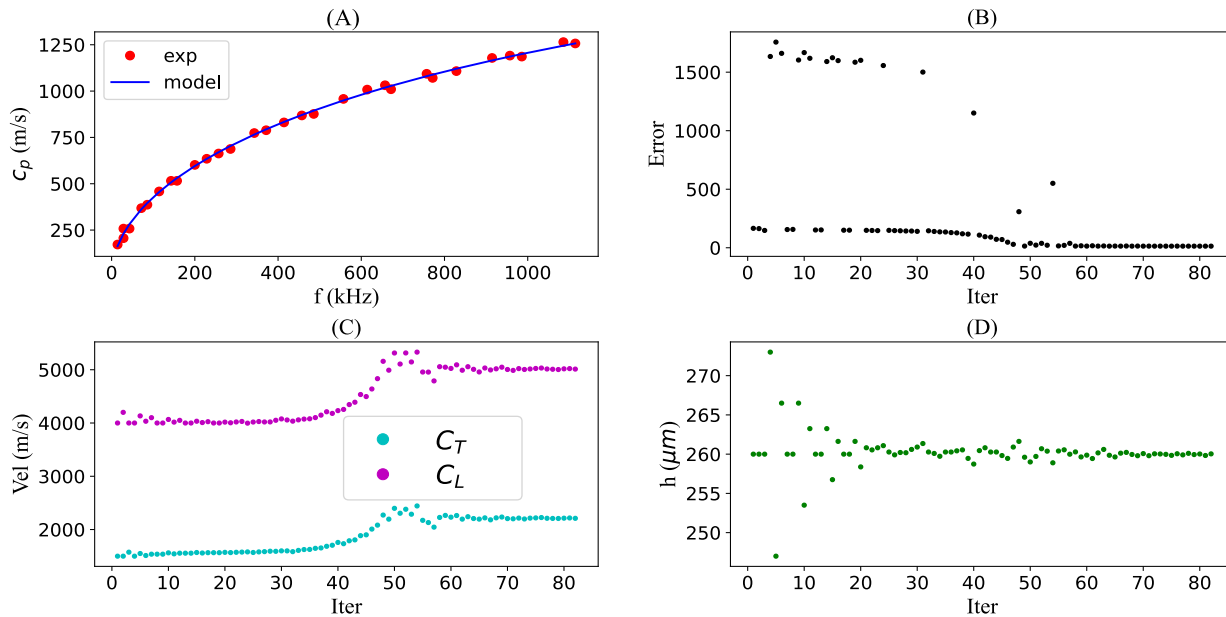


Figura 3.9: Curvas producto del proceso de optimización para caracterizar una muestra de latón de $260 \mu m$ de espesor, a partir de las curvas de dispersión.

En la tabla 3.8 se resumen los resultados obtenidos para esta muestra patrón de latón. De los valores reportados en dicha tabla resaltan los valores del módulo de elasticidad y relación de

Poisson con valores de 113 GPa y 0,37 respectivamente. Para el mismo material las propiedades anteriormente mencionadas reportadas en [22] corresponden a 115 GPa y 0,32 para el módulo de elasticidad y relación de Poisson, respectivamente. El error relativo correspondiente es del 2 % para el módulo de elasticidad y del 16 % para la relación de Poisson.

Tabla 3.8: Resumen resultados de parámetros optimizados mediante las curvas de dispersión para una placa de latón.

Característica	Valor	Descripción
C_L	5007[m/s]	Velocidad longitudinal
C_T	2207 [m/s]	Velocidad transversal
tk	259[μ m]	Espesor de la placa
E	113[GPa]	Módulo de elasticidad
ν	0.37	Relación de Poisson

3.2.2. Resultados Para Una Placa de Aluminio

Con el objetivo de redundar en la aplicación de la técnica de caracterización a partir de las curvas de dispersión se realizaron también experimentos para una placa de aluminio similarmente a como se hizo con la placa de latón expuesta anteriormente. Ya que la caracterización de estos materiales no corresponden al cumplimiento de ningún objetivo específico de este trabajo solo se presentarán los valores del resultado de la caracterización y las curvas relativas al proceso de optimización.

En la figura 3.10, la subfigura A sintetiza los resultados del proceso de optimización al exhibir tanto la curva de dispersión analítica como la experimental (C_p V_s f), mientras que las subfiguras B-D detallan la evolución de los parámetros en cada iteración del algoritmo implementado.

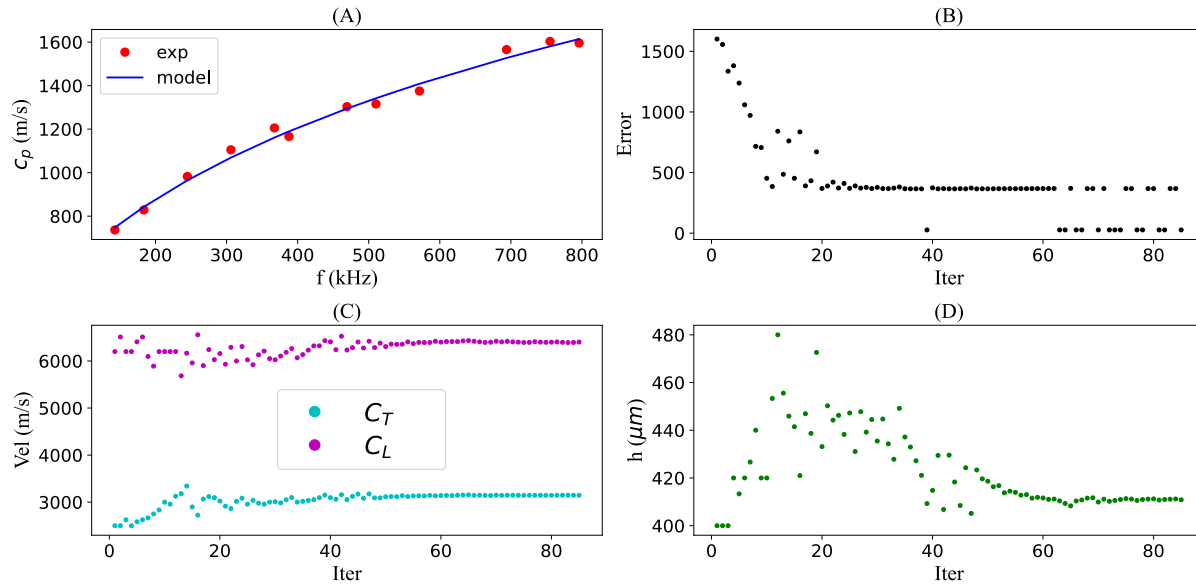


Figura 3.10: Curvas producto del proceso de optimización para caracterizar una muestra de aluminio de $410 \mu\text{m}$ de espesor, a partir de las curvas de dispersión.

En la tabla 3.9 se resumen los valores encontrados de modulo de elasticidad y relación de Poisson entre otros. Para el aluminio se encontró que la técnica implementada de caracterización presento un error relativo de 4 % para el valor del módulo de elasticidad y de 6 % para la relación de Poisson en relación a los reportados en [23]

Tabla 3.9: Resumen resultados de parámetros optimizados mediante las curvas de dispersión para una placa de aluminio.

Característica	Valor	Descripción
C_L	6396[m/s]	Velocidad longitudinal
C_T	3146 [m/s]	Velocidad transversal
tk	410[μm]	Espesor de la placa
E	71[GPa]	Módulo de elasticidad
ν	0.34	Relación de Poisson

Ya con el método experimental bien conocido y manejado se procedió a realizar los experimentos a las muestras de ferroelectretos para caracterizar sus propiedades.

teniendo en cuenta que las miras del proceso de caracterización son enfocadas en la alimentación del posible proceso de fabricación de transductores acústicos con las propiedades de módulo de elasticidad y relación de Poisson del material activo (ferroelectreto), los resultados y experimentos conducidos se limitaron a dos muestras de ferroelectretos con electrodos conductores en sus dos superficies, ya que estas muestras son las únicas que se pueden excitar de la forma propuesta en la metodología (sección 2.3).

3.2.3. Resultados Para Una Película de Ferroelectreto Con Sus Dos Superficies Recubiertas Con Aluminio

Ya verificada la técnica de caracterización para materiales bien conocidos como el aluminio y el latón, se procedió a caracterizar muestras de ferroelectreto.

Se inicio con muestras de ferroelectreto recubiertos en ambas superficies con aluminio como las que se observan en la tabla 2.1. Los resultados de la distribución espacio-temporal de las señales capturadas en un rango de medición de ± 10 mm se muestran en la figura 3.11.

Se presenta en la subfigura A la amplitud normalizada del conjunto de 400 señales, cada una tomada a una distancia de 0,05 mm una de otra. En esta subfigura se observa que a una distancia de ± 10 del epicentro apenas se alcanza a obtener algo de señal producto de las vibraciones inducidas en la muestra, esto se debe a que la intensidad con la que se golpearon las muestras de ferroelectreto con el láser pulsado fueron mucho menores comparadas a las utilizadas en las muestras de latón y aluminio para evitar dañar la muestra de ferroelectreto, ya que este material es mucho más delicado al ser un polímero y su cubierta de aluminio es del orden nanométrico.

Por otra parte también cabe resaltar la diferencia en la velocidad de propagación de las vibraciones captadas con el vibrómetro en la muestra de ferroelectreto y las del aluminio y latón. Se observa como los frentes de onda (patrones pintados con el mismo color) que se observan en la subfigura B de la figura 3.11 tienen una forma un poco más vertical comparada con la subfigura B de la figura 3.11, esto quiere decir que la señal necesita más tiempo para recorrer una misma distancia por lo que se concluye a primera impresión que la velocidad de propagación de las vibraciones en el ferroelectreto es mucho menor comparada con la del latón.

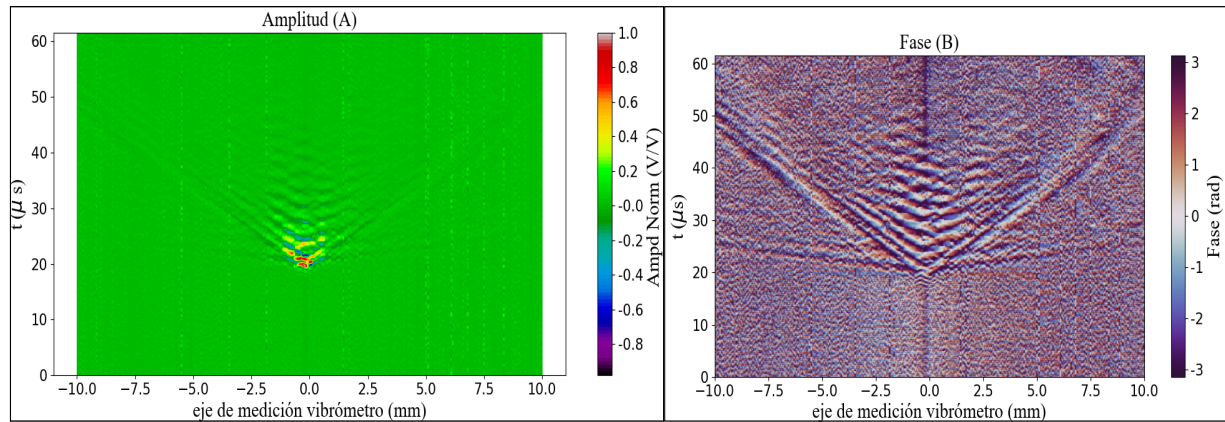


Figura 3.11: Grupo de señales en el dominio del tiempo y el espacio para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con capa de aluminio.

Ya con una aceptable distribución de datos en las que se aprecia el fenómeno de propagación de vibraciones en la muestra bajo estudio se decidió obtener las curvas de dispersión para esta muestra.

La subfigura A de la figura 3.12 muestra en el dominio del numero de onda y la frecuencia una linea con puntos negros correspondiente a la curva de dispersión del modo A0 o primer

modo antisimétrico, con el cual se extraen las parejas $k - f$ para construir la curva de dispersión en el dominio de la frecuencia-velocidad de fase ($f - C_p$) que se observa en la subfigura B de la misma figura y con la cual se itera el algoritmo para caracterizar la muestra.

Para este caso la extracción de las parejas ($k - f$) se realizó por medio del uso de ratón (método manual) y no se usó el algoritmo automático de extracción, ya que este algoritmo extrae las parejas ($k - f$) dentro de la matriz de datos sin discriminar entre los modos observados, por lo que al utilizar este algoritmo se extraía la curva de dispersión correspondiente a lo que se cree es el modo A1 o segundo modo antisimétrico que se observa en la subfigura A de la figura 3.12 (mancha de mayor intensidad por encima de la línea con puntos negros).

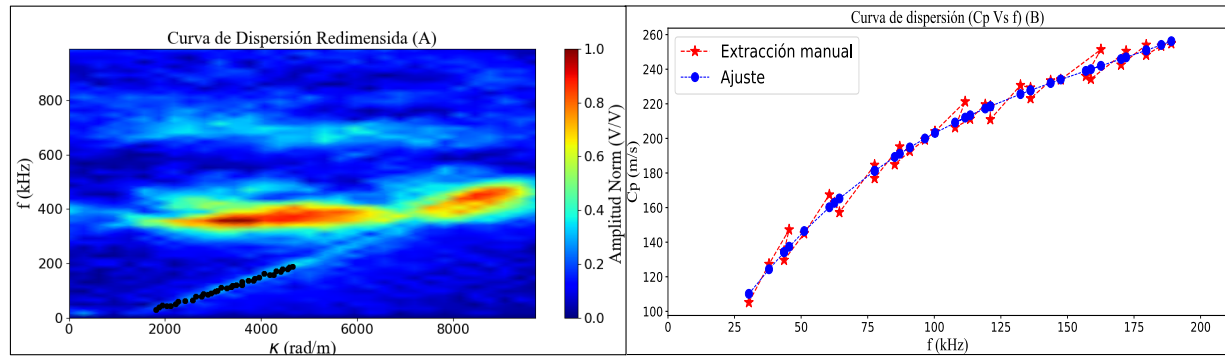


Figura 3.12: Curvas de dispersión en el dominio número de onda-frecuencia y frecuencia-velocidad de fase para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies con electrodo conductor de aluminio.

Debido a que las parejas ($k-f$) extraídas manualmente son un poco irregulares la curva de dispersión $f - C_p$ refleja la misma no-homogeneidad en la distribución de los puntos que la construyen, como se aprecia en la curva en rojo de la subfigura B de la figura 3.12. Debido a lo anterior se decidió aplicar un ajuste polinómico de orden 3 a la curva $f - C_p$ para homogeneizarla y facilitar al algoritmo de optimización la convergencia. En la aplicación del ajuste a los datos de velocidad de fase y frecuencia se tuvo en cuenta no modificar la tendencia de la curva original para no alterar los resultados experimentales.

En la figura 3.13 subfigura A se observan en puntos rojos las parejas ($f - C_p$) que constituyen la curva de dispersión experimental después de aplicarle el filtro mencionado anteriormente. En la misma subfigura se aprecia la curva analítica representada en línea azul sólida en la cual se puede observar como esta se ajusta con razonable precisión a los datos experimentales.

Por otra parte en la subfigura B se representa el error ponderado de la función que se intenta optimizar en cada iteración, se aprecia como después de casi 90 ciclos el algoritmo se detiene ya que la variación en los parámetros como se muestra en las subfiguras C y D convergieron a un valor y se determinó un mínimo en dicha función.

El espesor de la muestra se restringió a $100\mu m \pm 5$, valor medido experimentalmente con el microscopio, por lo que se observa como la evolución de este parámetro tiende a este valor en la subfigura D.

3.2.4 Resultados Para Una Película de Ferroelectreto Con Sus Dos Superficies Recubiertas Con Oro

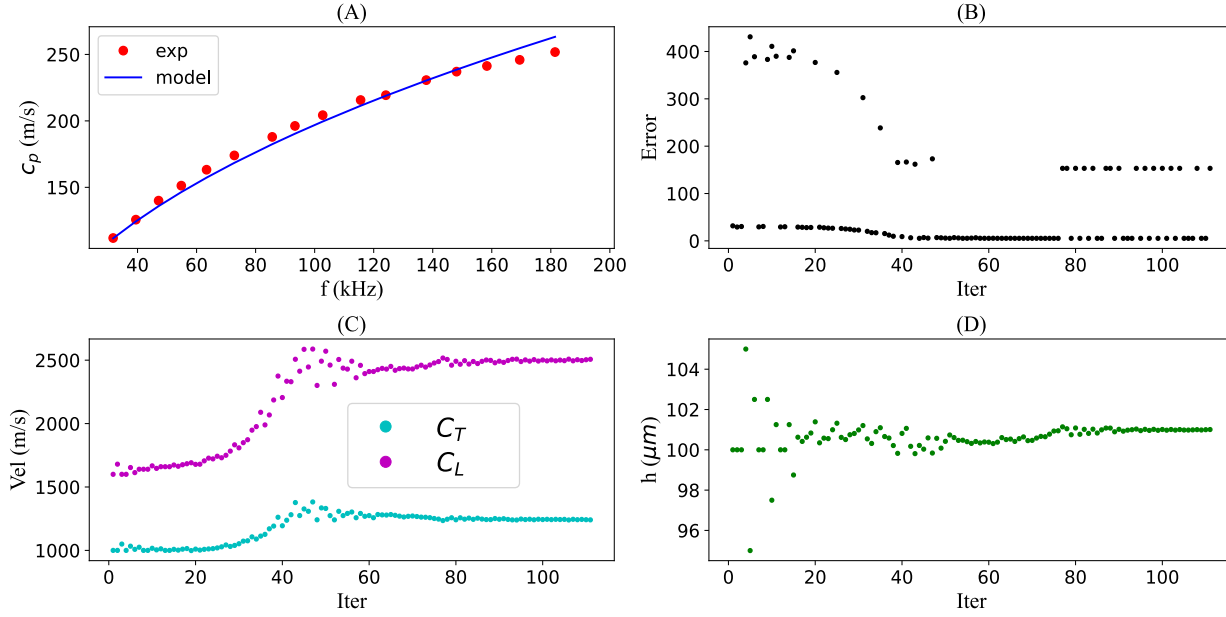


Figura 3.13: Curvas producto del proceso de optimización para caracterizar una muestra de ferroelectreto con abas superficies recubiertas con aluminio de $\approx 100 \mu\text{m}$ de espesor, a partir de las curvas de dispersión.

Los resultados de la caracterización de este material se resumen en la tabla 3.10.

Tabla 3.10: Resumen resultados de parámetros optimizados mediante las curvas de dispersión para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con aluminio.

Característica	Valor	Descripción
C_L	2503[m/s]	Velocidad longitudinal
C_T	1242 [m/s]	Velocidad transversal
tk	102[μm]	Espesor de la muestra
E	2.54[GPa]	Módulo de elasticidad
ν	0.33	Relación de Poisson

3.2.4. Resultados Para Una Película de Ferroelectreto Con Sus Dos Superficies Recubiertas Con Oro

Similarmente a como se realizaron los experimentos para la muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con aluminio se realizaron los experimentos para la muestra con electrodos de oro.

Ya que las muestras de ferroelectreto con electrodos de oro eran más grandes en área comparadas con las de electrodos de aluminio se decidió ampliar el rango de medición a $\pm 15 \text{ mm}$ desde el epicentro.

Se pudo observar una mejora significativa en la relación señal a ruido al utilizar el vibrometro láser en comparación a los experimentos con ferroelectretos recubiertos con aluminio. Esto se debe a que la superficie recubierta con oro no refleja la luz de manera tan directa como la

superficie recubierta con aluminio. En el caso de las muestras de aluminio, la alta reflectividad concentraba el reflejo del haz del vibrometró, lo cual podía causar problemas en la recepción. Si el reflejo del haz no coincidía perfectamente con la trayectoria de regreso al vibrometró, la capacidad de medir con una buena relación señal a ruido se veía comprometida.

En cambio, al utilizar la superficie recubierta con oro, se obtuvo un reflejo ligeramente más difuso. Esto resulta beneficioso, ya que el ángulo de impacto del haz del vibrometró ya no es crítico. Incluso si el reflejo no coincide exactamente con la trayectoria de regreso al sensor del vibrometró, al menos parte de él lo hará. Esto garantiza una buena relación señal a ruido incluso en los puntos más distantes del epicentro, evitando los problemas asociados con la reflectividad excesiva de la superficie de aluminio.

Se cree que debido a la buena relación señal a ruido se pudo obtener señales más limpias como las que se muestran en la figura 3.14, en comparación a las que se muestran en la figura 3.11.

En la subfigura A de la figura 3.14, se observa la representación a color de la amplitud del grupo de señales correspondientes al experimento conducido para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con una capa de oro. El paso entre punto de sensado del vibrómetro se asigno a $0,1 \text{ mm}$, por lo que en la longitud de medición de 30 mm se tomaron 300 señales.

Por otra parte en la subfigura B de la figura 3.14 se observa la distribución de los frentes de onda del grupo de señales. Se resalta la capacidad que tiene esta muestra para propagar las vibraciones en comparación con el ferroelectreto recubierto con aluminio, ya que las señales se mantienen durante mayor cantidad de tiempo.

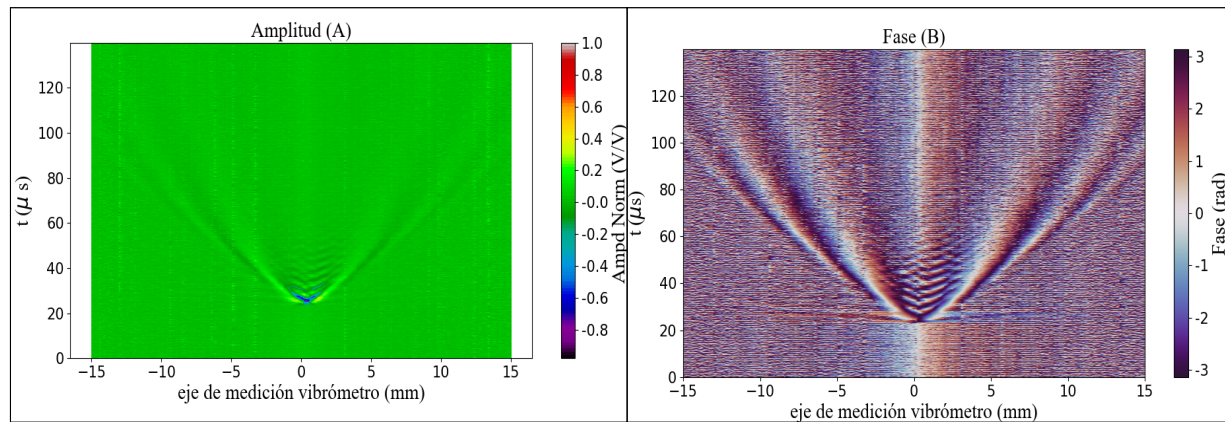


Figura 3.14: Grupo de señales en el dominio del tiempo y el espacio para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con una capa de oro.

Dado que se obtuvo buena calidad en las señales se produjo también una buena representación de la curva de dispersión en el dominio $k - f$ como se observa en la figura 3.15 subfigura A. Con esta calidad en la curva se pudo implementar el algoritmo de extracción de parejas $k - f$ de la curva de dispersión para construir la otra forma de la curva de dispersión en el dominio

$f - C_p$, que se representa en la subfigura B de la figura 3.15, eliminando los primeros 6 puntos. Las parejas seleccionadas automáticamente por el algoritmo se representan con una estrella en negro dentro de la subfigura A.

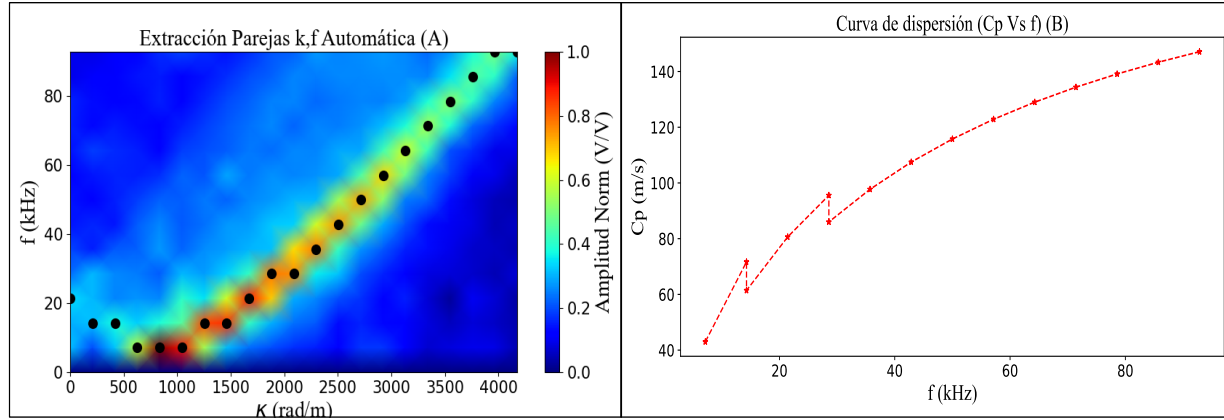


Figura 3.15: Curvas de dispersión en el dominio número de onda-frecuencia y frecuencia-velocidad de fase para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies con electrodo conductor de oro.

El espesor medido con el microscopio de esta muestra fue desde los $94 \mu m$ a los $107 \mu m$ como se muestra en la figura 2.4, por lo que en el algoritmo de optimización se decidió restringir este parámetro a $100 \mu m$, como se muestra en la subfigura D de la figura 3.16.

Los valores semilla para la velocidad longitudinal y transversal se seleccionaron con valores de 2200 m/s y 1600 m/s , respectivamente y se estabilizaron ajustando la curva de dispersión analítica a los valores de 1497 m/s para la velocidad longitudinal y 949 m/s para la velocidad transversal, como se observa en la subfigura C.

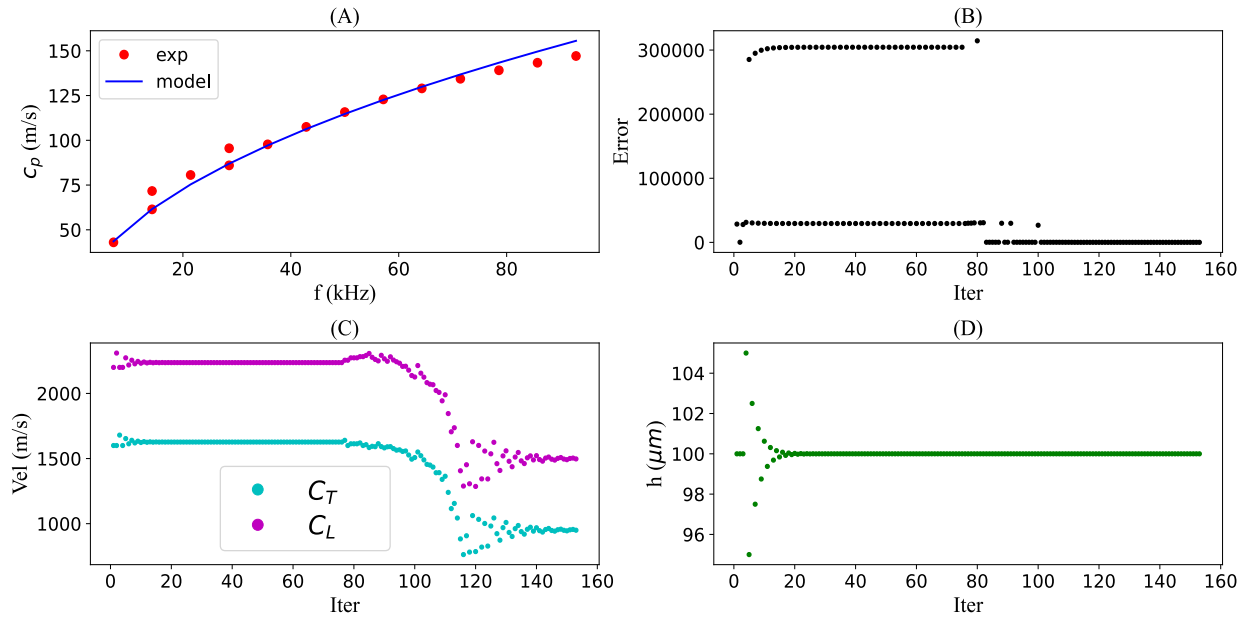


Figura 3.16: Curvas producto del proceso de optimización para caracterizar una muestra de de ferroelectreto con abas superficies recubiertas con oro de $\approx 100 \mu\text{m}$ de espesor, a partir de las curvas de dispersión.

Con los valores de los parámetros del espesor de la película, y las velocidades longitudinal y transversal de propagación en el material se produjo la curva analítica que se presenta en la subfigura A. Se aprecia un buen ajuste a los datos experimentales, los resultados de la caracterización se resume en la tabla 3.11

Tabla 3.11: Resumen resultados de parámetros optimizados mediante las curvas de dispersión para una muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro.

Característica	Valor	Descripción
C_L	1497[m/s]	Velocidad longitudinal
C_T	949 [m/s]	Velocidad transversal
tk	100[μ m]	Espesor de la muestra
E	1.29[GPa]	Módulo de elasticidad
ν	0.27	Relación de Poisson

En este trabajo la única muestra de ferroelectreto con la cual se comparte resultados de módulo de elasticidad obtenidos por medio de las técnicas de espectroscopia y curvas de dispersión es la de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro. En la tabla 3.12 se resumen los resultados de caracterización de ambas técnicas. Es notable la diferencia de tres ordenes de magnitud entre los valores del módulo de elasticidad. Usando espectroscopia en la muestra de ferroelectreto HS03 los resultados son similares a los reportados por Gómez en [11] lo cual sugiere repetibilidad del método. Mientras que cuando se simula una placa con constantes elásticas iguales a las encontrados a partir de las curvas de dispersión los modos y frecuencias coinciden con los modos y frecuencias observados experimentalmente como se observa más adelante en este documento.

Es claro que el valor de modulo de elasticidad para cada una de las técnicas no coincidió, lo que condujo a suponer que la dirección en la cual la onda acústica viaja en el material en los experimentos de espectroscopia como en dispersión afecta las constantes caracterizadas en cada una de las técnicas. Esto es, en espectroscopia la onda acústica viaja en dirección del espesor del material lo que implica que esta onda atraviesa tanto las diferentes capas de polímero y electrodos que lo componen como los espacios que hay entre ellas (ver figura 2.4) lo que podría sugerir que el módulo de elasticidad efectivo de este medio (composición de capas de polímero-electrodo(s) y espacios entre capas) podría ser muy diferente al módulo de elasticidad caracterizado a partir de las curvas de dispersión, técnica que considera el medio como una placa y en donde la onda acústica que se estudia viaja en el material en la dirección del plano de la muestra en donde se supone los materiales de los electrodos y de las capas contribuyen mayormente a la esa propagación. Por lo anterior resulta lógico suponer que las simulaciones de los modos flexurales de vibración de una placa de ferroelectreto construidas con constantes caracterizadas por medio de las curvas de dispersión (que consideran el material como tipo placa) sean validadas y se ajusten con razonable precisión a las observaciones experimentales como se mostrará en el siguiente apartado.

Tabla 3.12: Resumen resultados Propiedades caracterizadas por medio de técnicas de espectroscopia ultrasónica acoplada en aire y curvas de dispersión.

Muestra	Espectroscopia				Dispersión		
	E [MPa]	ρ [kg/m ³]	c [m/s]	tk _s [μm]	E [GPa]	ν	tk _s [μm]
Oro ambas superficies	1.93	568	58	94	1.29	0.27	100
Aluminio ambas superficies	-	-	-	-	2.54	0.33	102
Oro una superficie	1.49	550	52	70	-	-	-
Alum una superficie	4.67	540	93	70	-	-	-

3.3. Resultados de Respuesta Modal de Películas de Ferroelectreto A Través de Experimentación y Simulación

Ya con las propiedades necesarias para correr simulaciones de la respuesta vibracional de las películas de ferroelectreto se decidió implementar la física de mecánica de sólidos del software Comsol Multiphysics® para evaluar la respuesta en el dominio de la frecuencia de algunos modelos de placa circular los cuales se pudieran replicar en la realidad para verificar si es posible inducir modos flexurales de vibración en películas de ferroelectreto para producir ultrasonidos.

Se pensó en algún modelo de simulación con el cual además de simularlo se pudiera validar a través de análisis modal experimental, por lo que la decisión de implementar el modelo

Tabla 3.13: *Parámetros del modelo usados en Comsol Multiphysics® para la simulación de una placa de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con aluminio.*

Nombre	Valor	Descripción
radio	2[mm]	Radio de la película
tk	95[μm]	Espesor de la película
ν	0.38	Relación de Poisson
E	1.76[GPa]	Módulo de elasticidad
ρ	560[kg/m ³]	Densidad

de una placa circular cuyas frecuencias de vibración flexurales se presentaran a partir del régimen ultrasónico fue una decisión transversal entre la capacidad de simulación y validación experimental.

3.3.1. Resultados de Respuesta Modal de Una Película de Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Aluminio

El rango de operación de los modos flexurales de vibración de la película de ferroelectreto con electrodos de aluminio fue pensado inicialmente en el rango de los ultrasonidos. Según la figura 2.18 el radio de la muestra utilizado en una geometría circular con parámetros de módulo de elasticidad, relación de Poisson y espesor de acuerdo a los valores caracterizados a partir de las curvas de dispersión de una muestra de ferroelectreto con ambos electrodos de aluminio en la que se fije el perímetro de la placa debería de ser aproximadamente 2 mm.

Simulación

Siguiendo la metodología que se expuso en el apartado [2.3.1] se simuló una placa de igual diámetro al de la película de ferroelectreto con electrodos de aluminio que se le aplicó análisis modal experimental. Las propiedades de módulo de elasticidad y relación de Poisson corresponden a las encontradas mediante los experimentos de dispersión acústica. Mientras que la propiedad de densidad corresponde a la reportada en [11].

En la tabla 3.13 se observan los parámetros asignados a la placa. Cabe aclarar que la velocidad de propagación del sonido no es un parámetro de importancia para esta simulación y que este valor corresponde a los obtenidos durante los experimentos de espectroscopia ultrasónica acoplada en aire para las muestras de ferroelectreto con un solo electrodo de aluminio, sección 3.1.

Se obtuvieron las primeras cuatro frecuencias propias a 20.8 kHz, 40.7 kHz, 68.5 kHz y 74 kHz. Los patrones de deformación de la superficie se presentan en la figura 3.17.

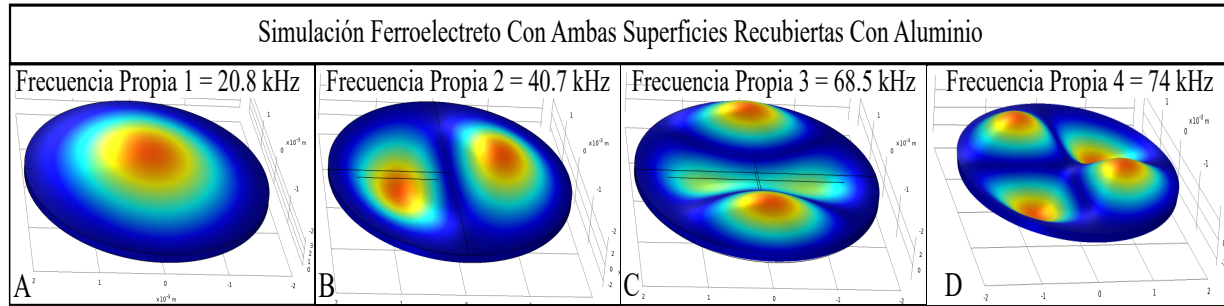


Figura 3.17: Resultados de las cuatro primeras frecuencias propias simuladas de una película circular de de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con aluminio.

Análisis Modal Experimental

Cabe iniciar recordando que el vibrómetro láser utilizado en los experimentos registra la velocidad de desplazamiento de la superficie a la que incide con el haz y no registra los desplazamientos, pero recordando que si se supone que los desplazamientos de la superficie están descritos por una función armónica de la forma $D(x) = A \sin(\omega x + \phi)$, entonces su velocidad será de la forma $\dot{D}(x) = \frac{d}{dt}(A \sin(\omega x + \phi))$ lo que es: $\dot{D}(x) = S(x) = \omega A \cos(\omega x + \phi)$ por lo que los desplazamientos están relacionados con la velocidad.

Además dado que el objetivo de esta sección no es evaluar cuantitativamente los desplazamientos de la superficie radiante de la película de ferroelectreto, sino más bien evaluar la existencia de modos flexurales de vibración, los resultados gráficos presentados se expondrán en términos de voltaje ya que esta es la salida que otorga el vibrómetro láser, y si se quisiera transformar la salida, de voltios a velocidad, solo hace falta multiplicar la salida del vibrómetro láser por la función de transferencia utilizada para capturar las señales que es de la forma $\left[\frac{mm}{V}\right]$ y como se expuso anteriormente ya se sabe que los desplazamientos están directamente relacionados con la velocidad de cada punto medido con el vibrómetro, por lo que se concluye que las representaciones en términos de voltaje de las velocidades de desplazamiento de los puntos sensados para construir las representaciones y resultados de análisis modal experimental son suficientes para cumplir con el objetivo de la sección.

Primer Modo Fundamental

Para presentar los resultados de los experimentos de análisis modal se seguirá la misma distribución de figuras. En la subfigura A se presentarán los mapas de color en el plano del área medida por el vibrómetro, en los cuales se colorea la superficie representando las áreas en las cuales se registró más velocidad de desplazamiento (por lo tanto también mayores desplazamientos) por parte del vibrómetro láser como se observa en la figura 3.18.

En la subfigura B se representara en 3D con escala a color el valor absoluto de las velocidades registradas en la superficie cuadrada en la que se realizaron las mediciones, siendo los colores más cálidos las velocidades mayores (por tanto desplazamientos mayores también). En estas

subfiguras se presenta el valor absoluto de los valores de velocidad en términos de voltaje ya que al aplicarle la transformada de Fourier a los datos esta transformada nos entrega dos tipos de datos en el dominio de la frecuencia, la amplitud (que siempre será positiva) y la fase.

En las subfiguras C, se exhiben mapas de calor que representan la fase de oscilación de la superficie, tal como se muestra en la figura 3.18. Estas subfiguras son cruciales porque proporcionan detalles sobre las porciones de área de la película activa que oscilan en fase y las porciones que no lo hacen. Lo que revela la subfigura C de la figura 3.18, es que el área dentro del círculo, con un diámetro aproximado de 2 mm, está mayormente coloreada en un mismo tono de azul. Esto indica que las regiones pintadas de este color oscilan sincrónicamente, es decir, se mueven al mismo tiempo en la misma dirección. En contraste con la subfigura C de la figura 3.19, se observan principalmente dos regiones pintadas con tonos de naranja y azul dentro del círculo, lo que quiere decir que estas dos regiones vibran en contra fase una de otra, es decir, se mueven en direcciones opuestas y esto lo respalda las representaciones de las subfiguras D.

Dado a la naturaleza del resultado de la transformada de Fourier aplicada en Matlab® (amplitud siempre positiva) se ingenio la forma de representar la superficie deformada en amplitudes por encima y debajo del plano de la película, esto se hizo aprovechando la información de la fase, por lo que se decidió multiplicar la amplitud de la velocidad de las deformaciones (siempre positiva) por los valores de la fase (positiva o negativa) de cada punto, resolviendo la necesidad de representar de una forma más natural como se deforma en realidad la superficie de la película de feroelectreto. Estas representaciones se dibujan en las subfiguras D, como se observa en la figura 3.18. Dado que la fase del área medida era casi toda azul (aproximadamente -2.5 rad) al multiplicarla por la amplitud (valores positivos de voltaje) el resultado es negativo en las áreas azules por lo que la forma de la superficie dibujada en la subfigura D tiene forma parabólica hacia arriba.

Por último en las subfigura E se representa el espectro de amplitud de un punto de la superficie de la película de feroelectreto en el cual se esperaría obtener mayor amplitud según el modo estudiado, dicho punto se representa en el esquema de la subfigura F, así entonces si se está estudiando el primer modo fundamental lo esperado es que el punto central de la película sea el que presente mayor velocidad (y amplitud) por lo que en el espectro de frecuencia debería de observarse un pico cercano al valor de la frecuencia de este primer modo, como se observa en la subfigura E de la figura 3.18.

Primer Modo Fundamental. Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Aluminio
Frecuencia = 20.7 kHz

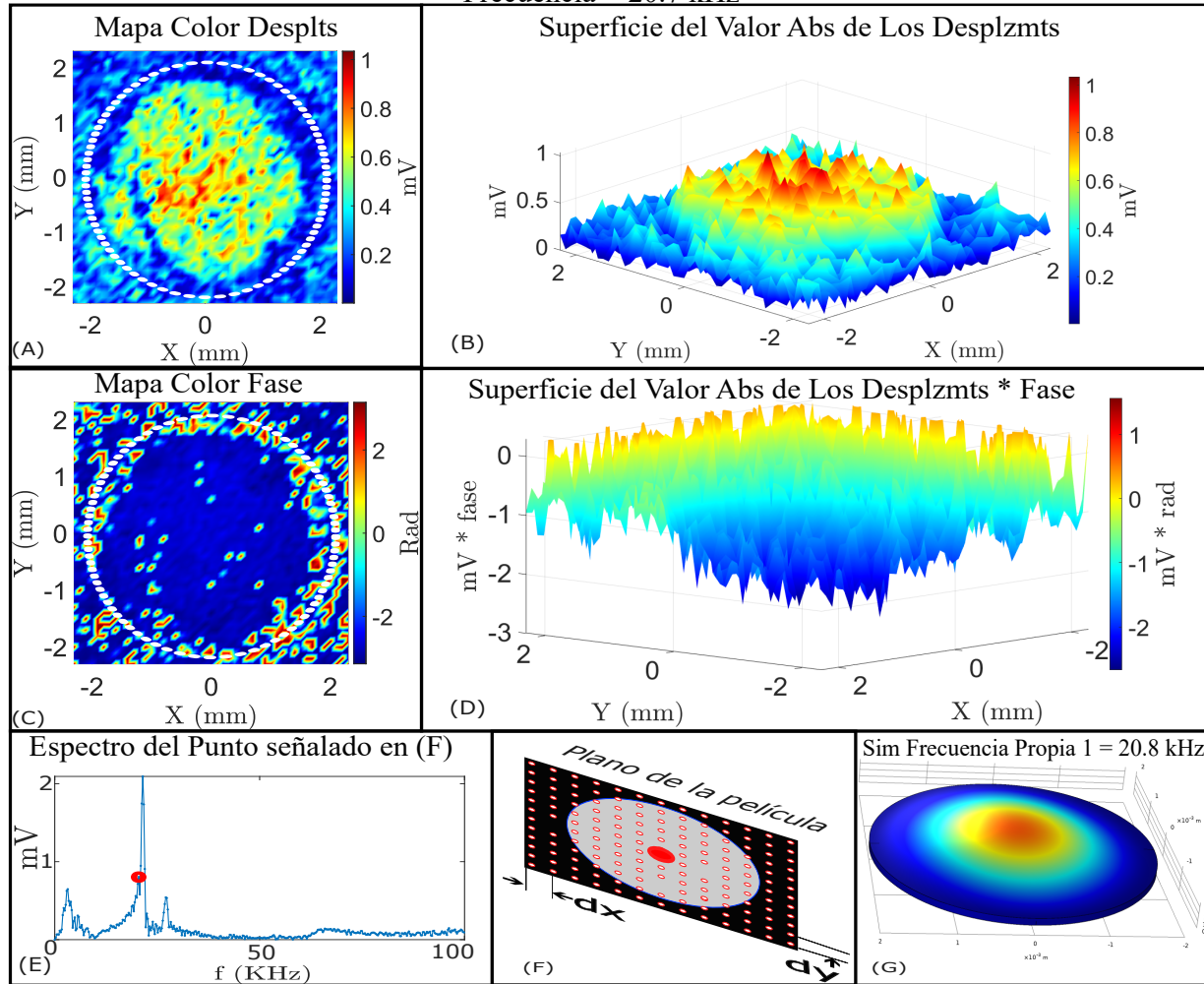


Figura 3.18: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies, (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación central resaltado en (F). resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al primer modo flexural de vibración a una frecuencia de 20.7 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en gris representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Primer modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.17)

Segundo Modo Fundamental

En la figura 3.19 se representan los resultados experimentales del segundo modo fundamental de vibración para la misma película de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con aluminio, usando la misma distribución explicada en el apartado anterior (primer modo funda-

mental [3.3.1)].

En contraste al primer modo, se observa como hay dos áreas con amplitudes de velocidades mucho mayor al resto del área de la película activa, como se observa en la subfigura A de la figura 3.19. Estas dos áreas con mayor amplitud de velocidad de oscilación presentan picos máximos similares como lo muestra la subfigura B. En la subfigura C se aprecia como la aproximadamente la mitad del área activa de la placa circular presenta una misma fase y como la otra mitad restante posee otra fase distinta (contra fase). Cuando se multiplican las matrices de datos de los resultados de fase y de amplitud del área medida se produce la representación ingenieril para visualizar de forma más cercana a la realidad las deformaciones de la película. Dicha representación se aprecia en la subfigura D de la figura 3.19. Por último cuando se le aplica la transformada de Fourier a un punto a una distancia de $D/4$ en la dirección radial desde el centro de la película (punto resaltado en la subfigura F), se produce el espectro representado en la subfigura E. Se resalta en el espectro con un círculo en rojo el valor de la frecuencia en el cual se observa el segundo modo fundamental de vibración.

3.3.1 Resultados de Respuesta Modal de Una Película de Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Aluminio

Segundo Modo Fundamental. Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Aluminio
Frecuencia = 39.4 kHz

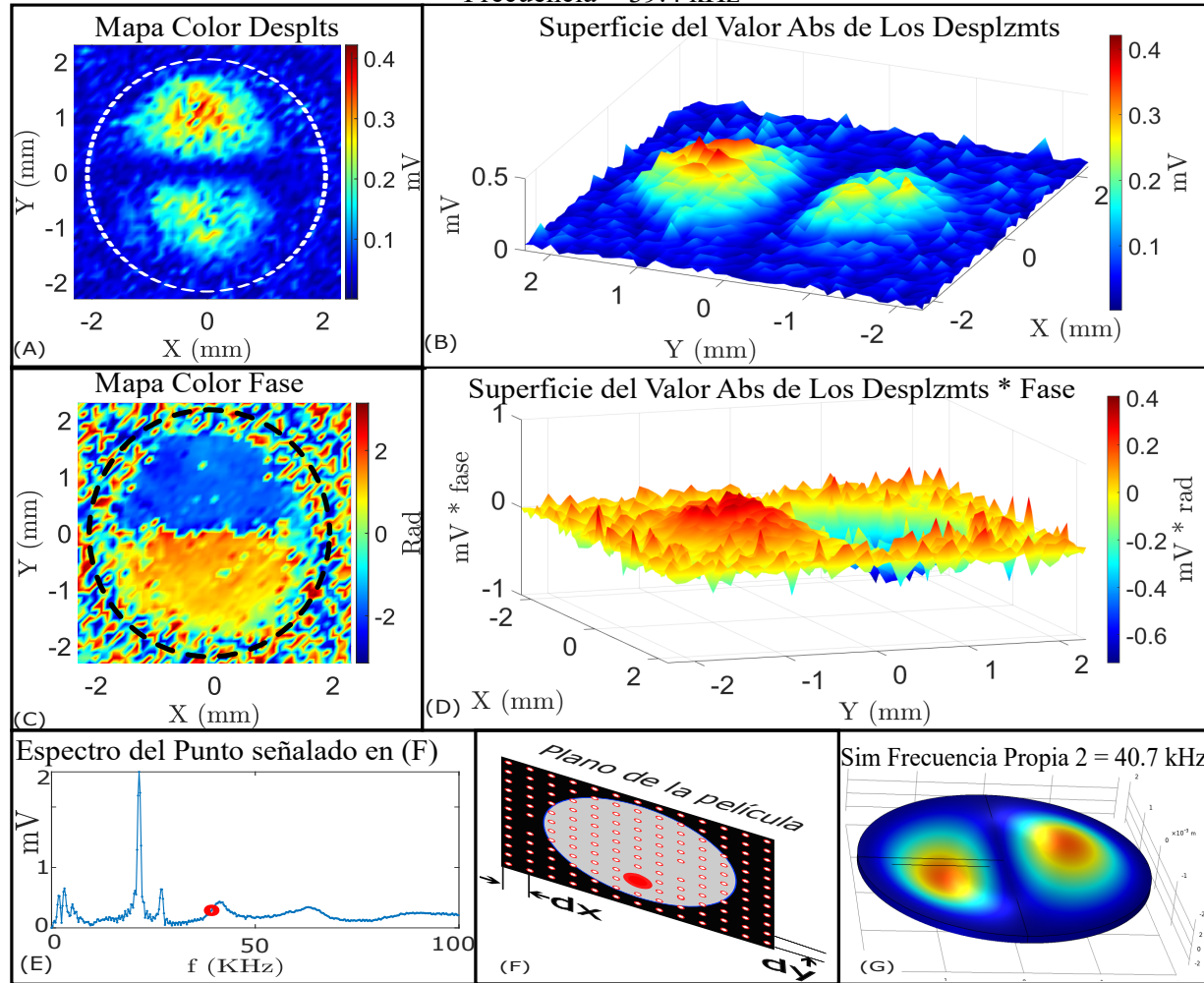


Figura 3.19: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies, (A): Se muestra el plano en mapa de color de las velocidades para una frecuencia específica, representada por el círculo rojo en la subfigura (E). (B): Superficie del plano representado en la Figura (A). (C): Plano de fases de los puntos de observación en la película. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación central señalado en (F), resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 42.7 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación del vibrómetro láser, se resalta el punto a una distancia de 0.25 veces el diámetro desde el centro del círculo con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo gris representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (G): Segundo modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.17)

Tercer Modo Fundamental

Tercer Modo Fundamental. Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Aluminio
Frecuencia = 66.6 kHz

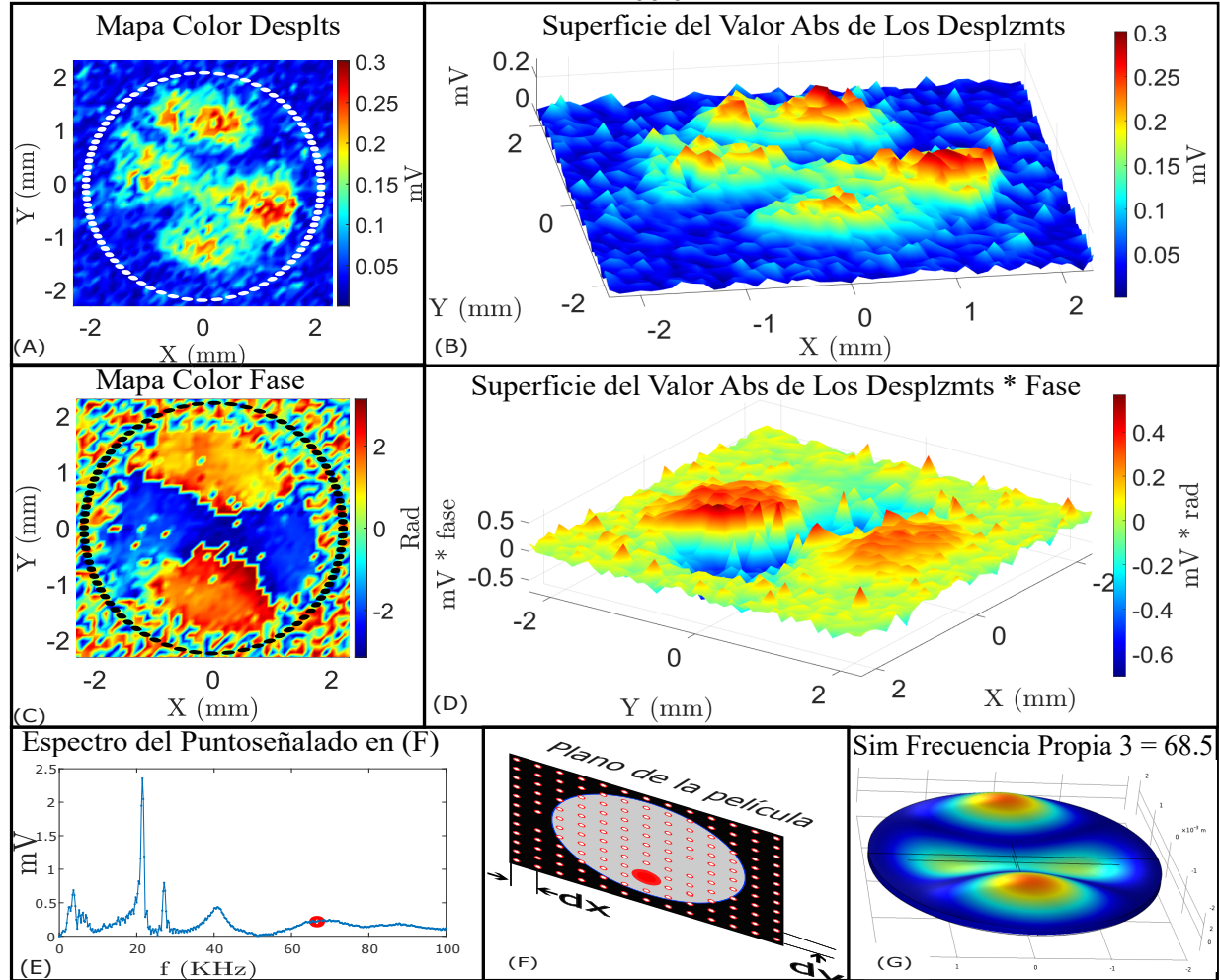


Figura 3.20: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies, (A): Plano en mapa de color de las velocidades de desplazamiento para una frecuencia específica, resaltada por el círculo rojo en la subfigura (E). (B): Superficie del plano representado en la Figura (A). (C): Plano de fase. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25D en dirección radial desde el centro, señalado en (F), resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al tercer modo flexural de vibración a una frecuencia de 66.6 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto a una distancia de 0.25 veces el diámetro desde el centro del círculo con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo gris representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (G): Tercer modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.17)

Cuarto Modo Fundamental

Cuarto Modo Fundamental. Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Aluminio
Frecuencia = 75 kHz

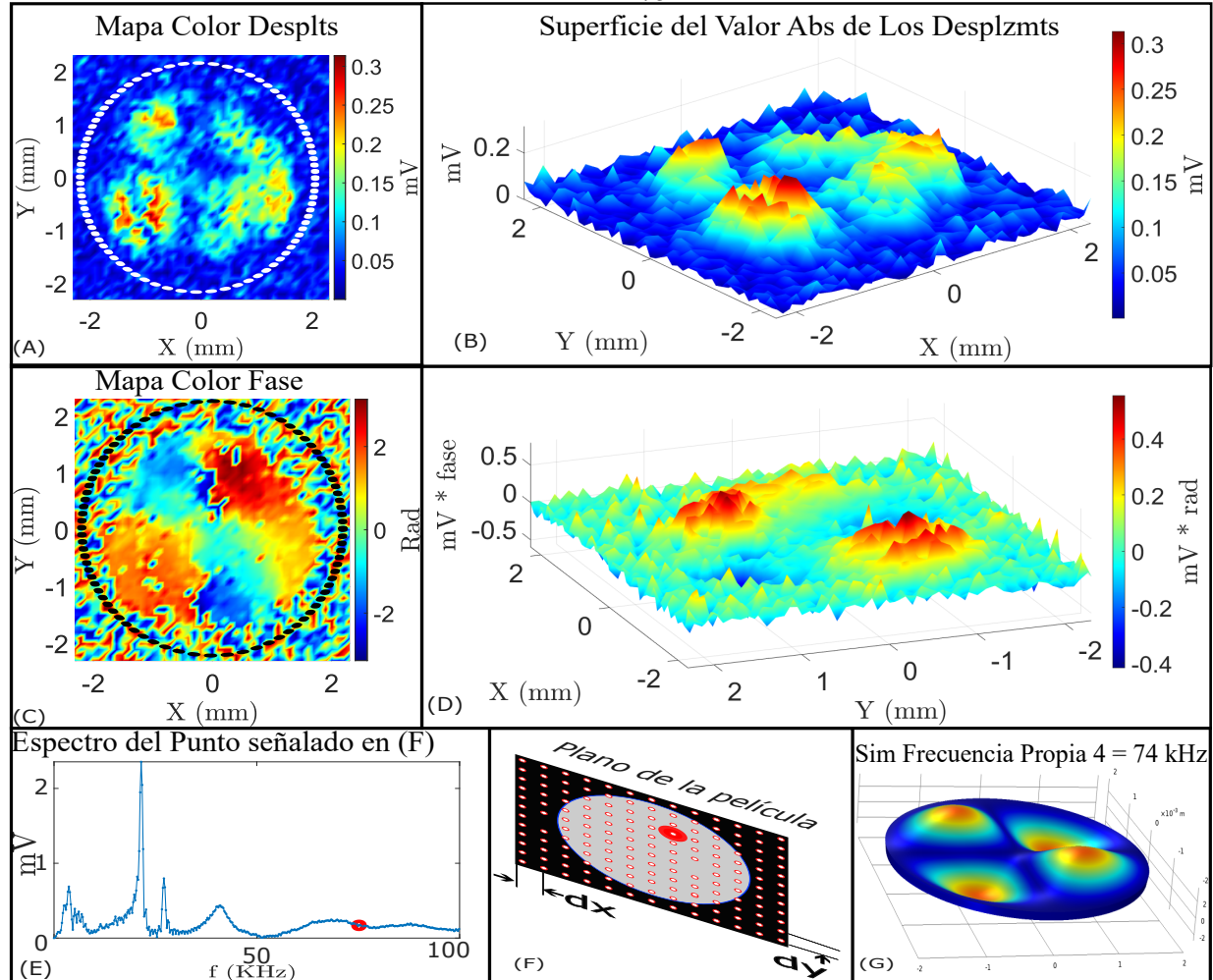


Figura 3.21: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de aluminio en sus dos superficies, (A): Plano en mapa de color de las velocidades de desplazamiento para una frecuencia específica, resaltada por el círculo rojo en la subfigura (E). (B): Superficie del plano representado en la Figura (A). (C): Plano de fase. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25D en dirección radial desde el centro, señalado en (F), resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al tercer modo flexural de vibración a una frecuencia de 75 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto a una distancia de 0.25 veces el diámetro desde el centro del círculo con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo gris representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (G): Cuarto modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.17)

El error entre los valores de las frecuencias fundamentales observadas experimentalmente y obtenidas mediante la simulación se resumen en la tabla 3.14

Tabla 3.14: Resumen de resultados de simulación y experimentación de análisis modal a ferroelectreto con electrodos de aluminio.

Frecuencia Fundamental	Simulación [kHz]	Experimentación [kHz]	Error Relativo [%]
1	20.8	20.7	0.5
2	40.7	39.4	3.1
3	68.5	66.6	2.7
4	74	75	1.3

3.3.2. Resultados de Respuesta Modal de Una Película de Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Oro

Simulación

El proceso de simulación y experimentación modal se realizó paralelamente. Siguiendo la misma lógica que se expuso en la metodología (sección 2.3.1), se simuló una placa de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro con las propiedades de módulo de elasticidad y relación de Poisson caracterizadas por medio de los experimentos de dispersión acústica y densidad por medio de espectroscopia. Esta vez el diámetro de la placa es de 5.6 mm. Debido a que el proceso de construcción de las estructuras para sujetar las muestras circulares de ferroelectreto es un poco difícil de controlar para precisiones en el orden de las décimas de milímetro. La estructura para sujetar la muestra de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro quedó con un diámetro un poco más grande que la fabricada para sujetar las muestras de ferroelectreto con electrodos de aluminio.

La figura 3.15 muestran los valores de los parámetros asignados en Comsol Multiphysics® para correr la simulación de una placa circular de ferroelectreto con ambos electrodos de oro.

Tabla 3.15: Parámetros del modelo usados en Comsol Multiphysics® para la simulación de una placa de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro.

Nombre	Valor	Descripción
radio	2,8[mm]	Radio de la película
tk	100[μ m]	Espesor de la película
ν	0.4	Relación de Poisson
E	1.3[GPa]	Módulo de elasticidad
ρ	618[kg/m ³]	Densidad

Al igual que con la simulación para ferroelectreos con electrodos de aluminio se siguió la metodología expuesta en la sección [2.3.1].

Ya que experimentalmente se observan los primero seis modos flexurales se presentaran así mismo los primeros seis modos simulados. En la figura 3.22 se presentan los resultados de las

simulaciones, en donde se observan los patrones de deformación de la geometría circular que simula una película de ferroelectreto con electrodos de oro.

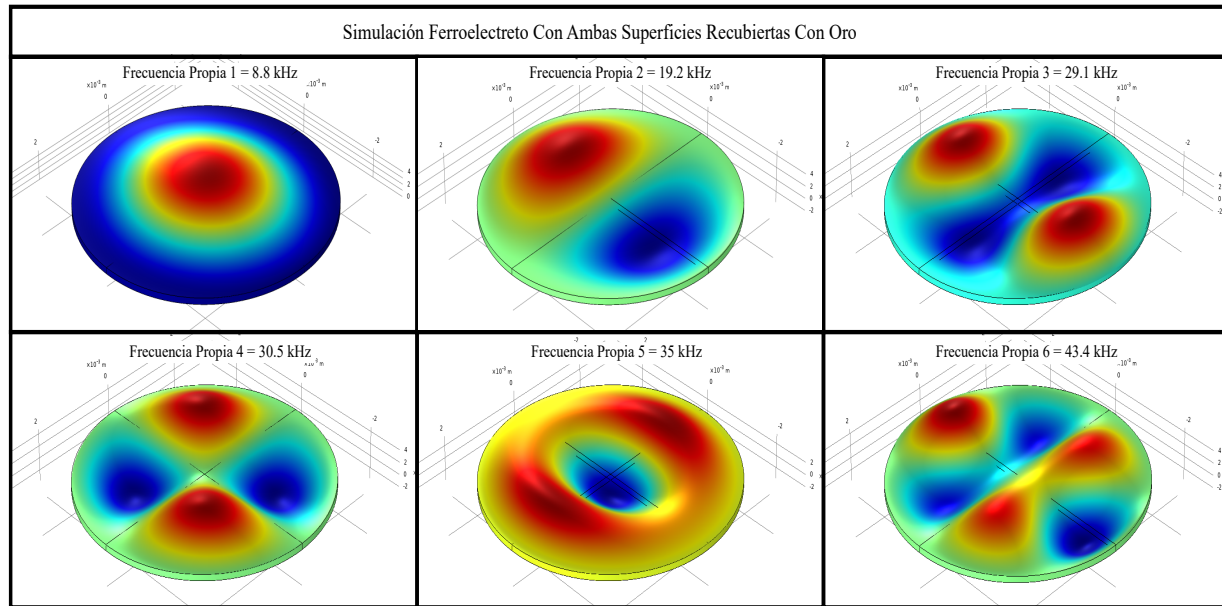


Figura 3.22: Resultados de las seis primeras frecuencias propias simuladas de una película circular de ferroelectreto con ambas superficies recubiertas con oro.

Análisis Modal Experimental

Con el fin de mejorar la comprensión de los resultados del análisis modal experimental, se mantuvo la disposición de las subfiguras dentro de cada figura que resume los modos flexurales observados experimentalmente. Esto asegura que la presentación de los resultados conserve la coherencia y facilite la interpretación de los distintos modos flexurales identificados.

Primer Modo Fundamental

Más allá de que las propiedades de módulo de elasticidad, relación de Poisson y densidad sean diferentes a las del ferroelectreto con electrodos de aluminio la frecuencia correspondiente al primer modo flexural observado en la muestra con electrodos de oro varía en mayor proporción debido a la diferencia en el diámetro de la circunferencia de la película bajo estudio. Como lo se pudo observar en la figura 2.18, un pequeño cambio en el diámetro (incluso del orden de las décimas de milímetro) produce una gran diferencia en la frecuencia a la cual se produciría el primer modo fundamental de vibración.

Por lo anterior es de esperarse que el primer modo fundamental de vibración para la película de ferroelectreto con electrodos de oro con diámetro de 5.6 mm se presente a una frecuencia menor a la observada en la muestra de aluminio en el mismo modo, como se muestra en la figura 3.23.

Primer Modo Fundamental. Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Oro
Frecuencia = 11.2 kHz

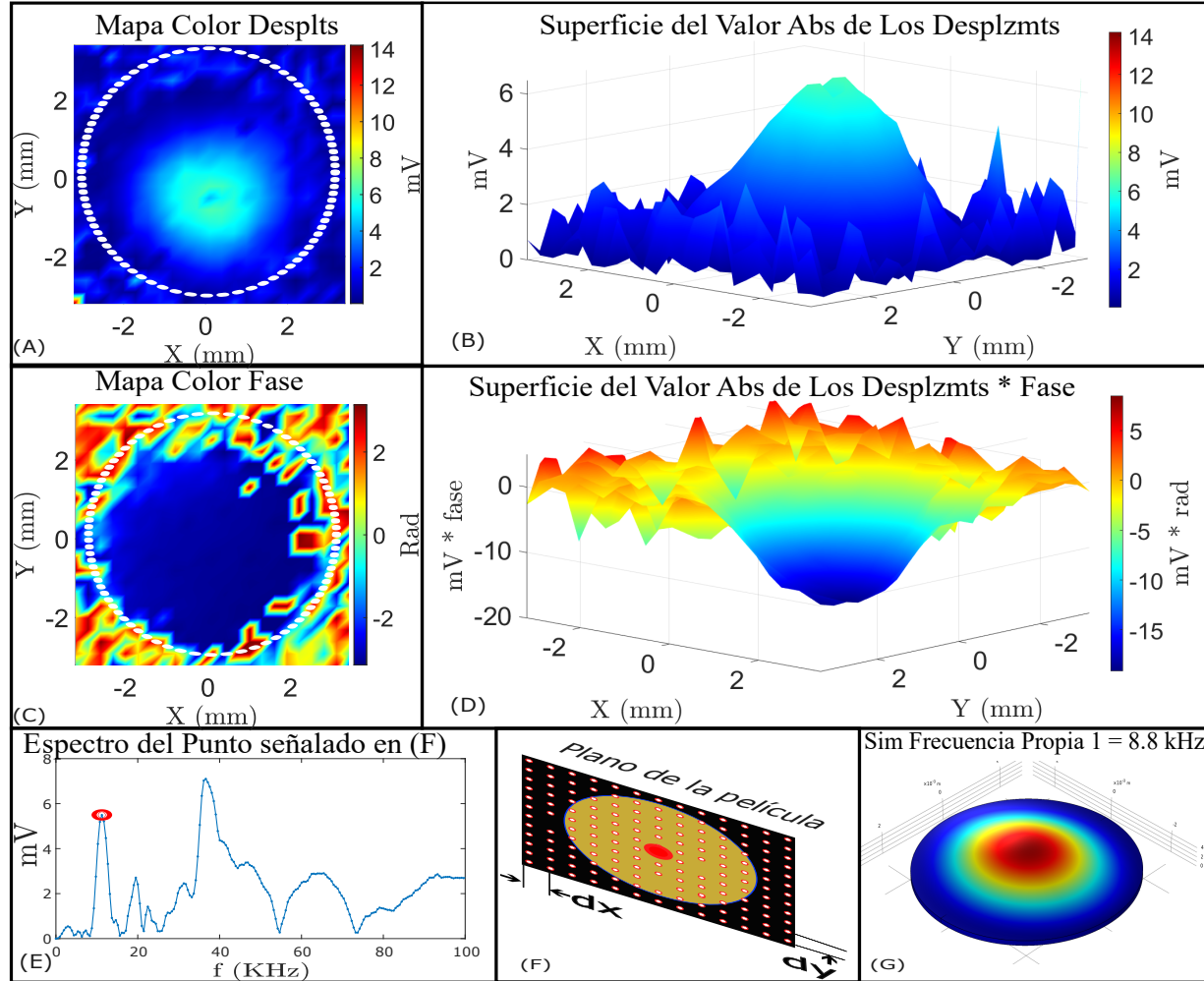


Figura 3.23: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación central resaltado en (F). resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al primer modo flexural de vibración a una frecuencia de 11.2 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (G): Primer modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22)

Segundo Modo Fundamental

Segundo Modo Fundamental. Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Oro
Frecuencia = 18.6 kHz

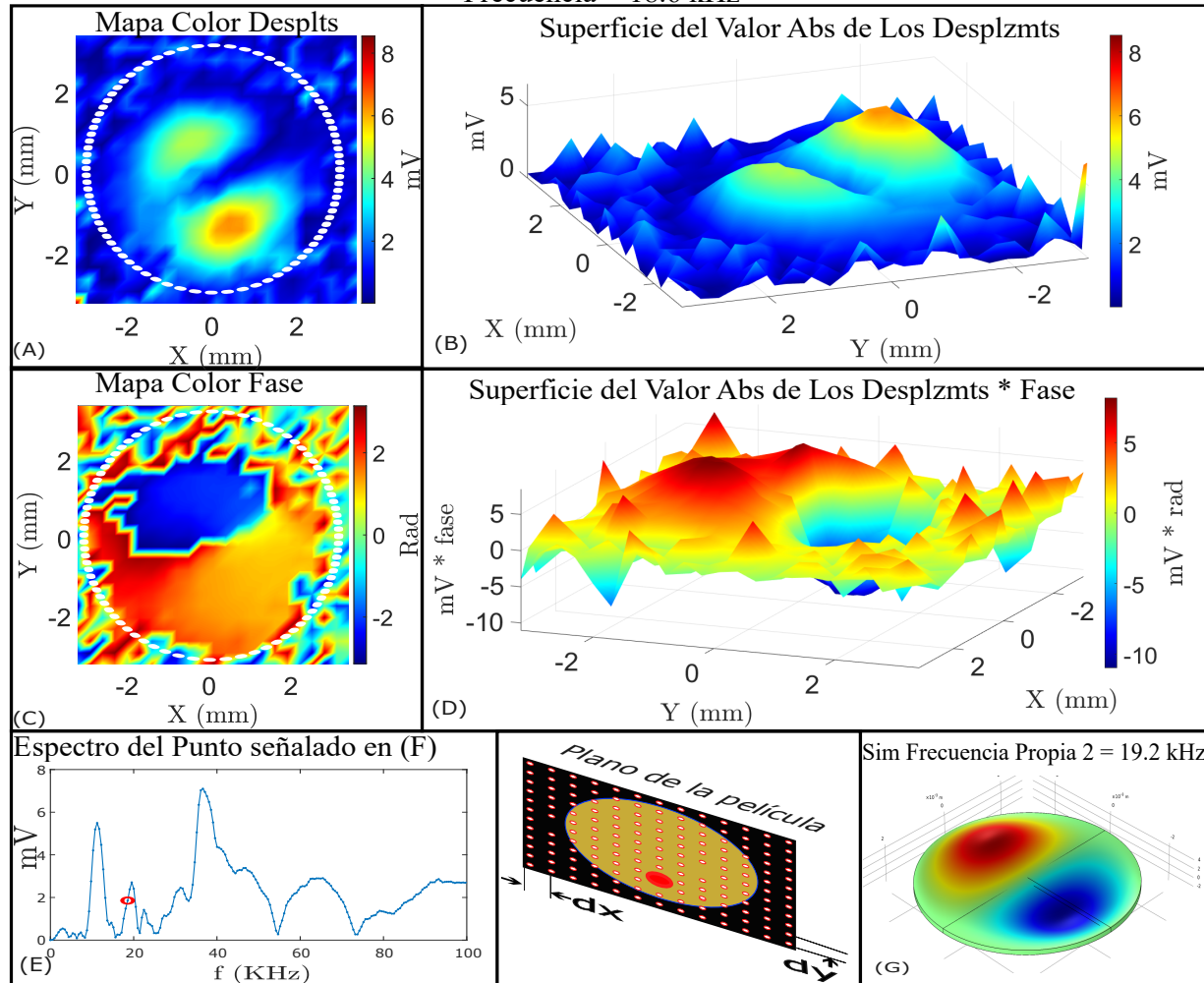


Figura 3.24: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25 veces el diámetro en dirección radial desde el centro, resaltado en (F). Resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 18.6 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (G): Segundo modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22)

Tercer Modo Fundamental

Tercer Modo Fundamental. Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Oro
Frecuencia = 29.8 kHz

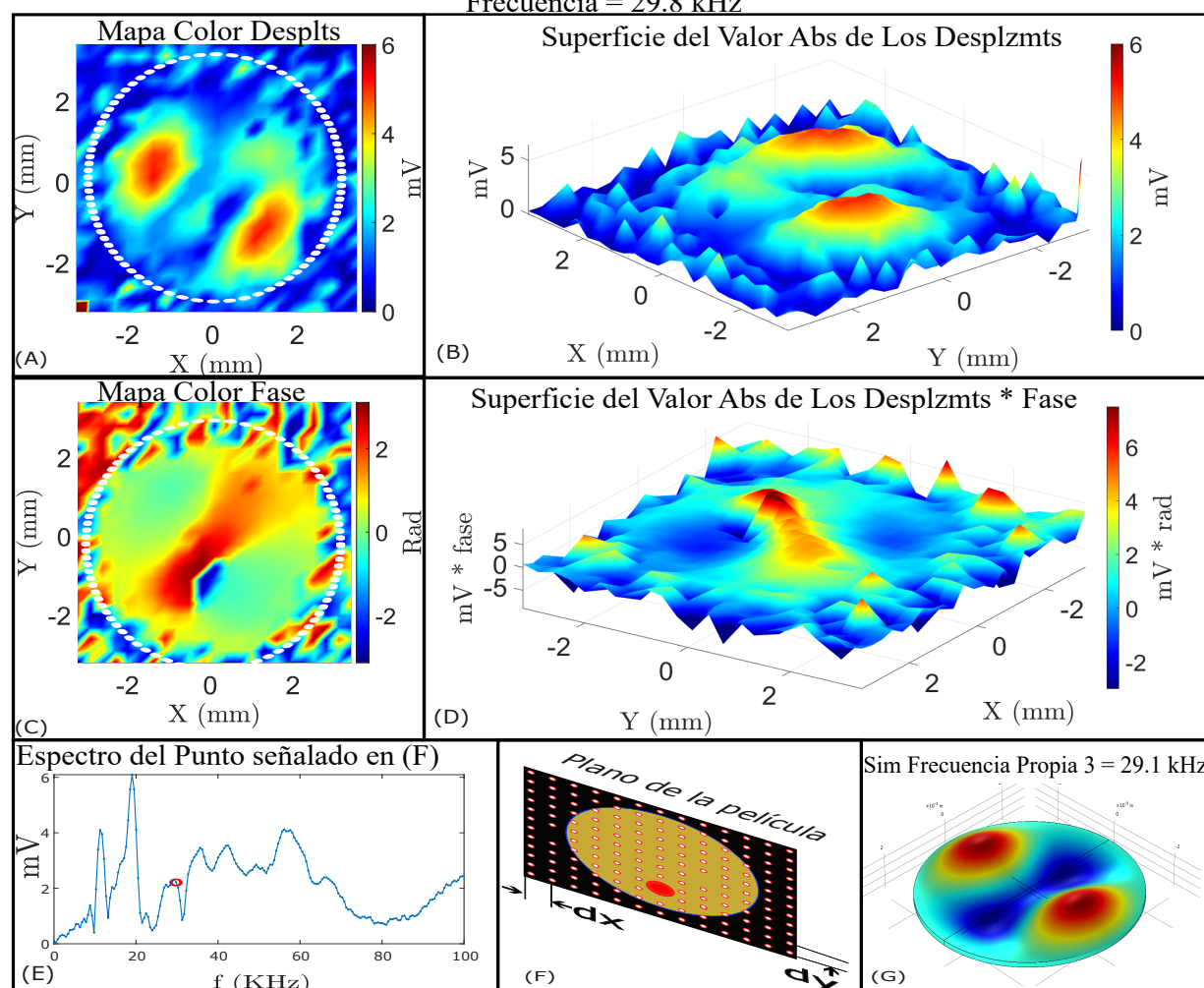


Figura 3.25: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25 veces el diámetro en dirección radial desde el centro, resaltado en (F). Resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 29.8 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Tercer modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22)

Cuarto Modo Fundamental

Cuarto Modo Fundamental. Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Oro
Frecuencia = 31.7 kHz

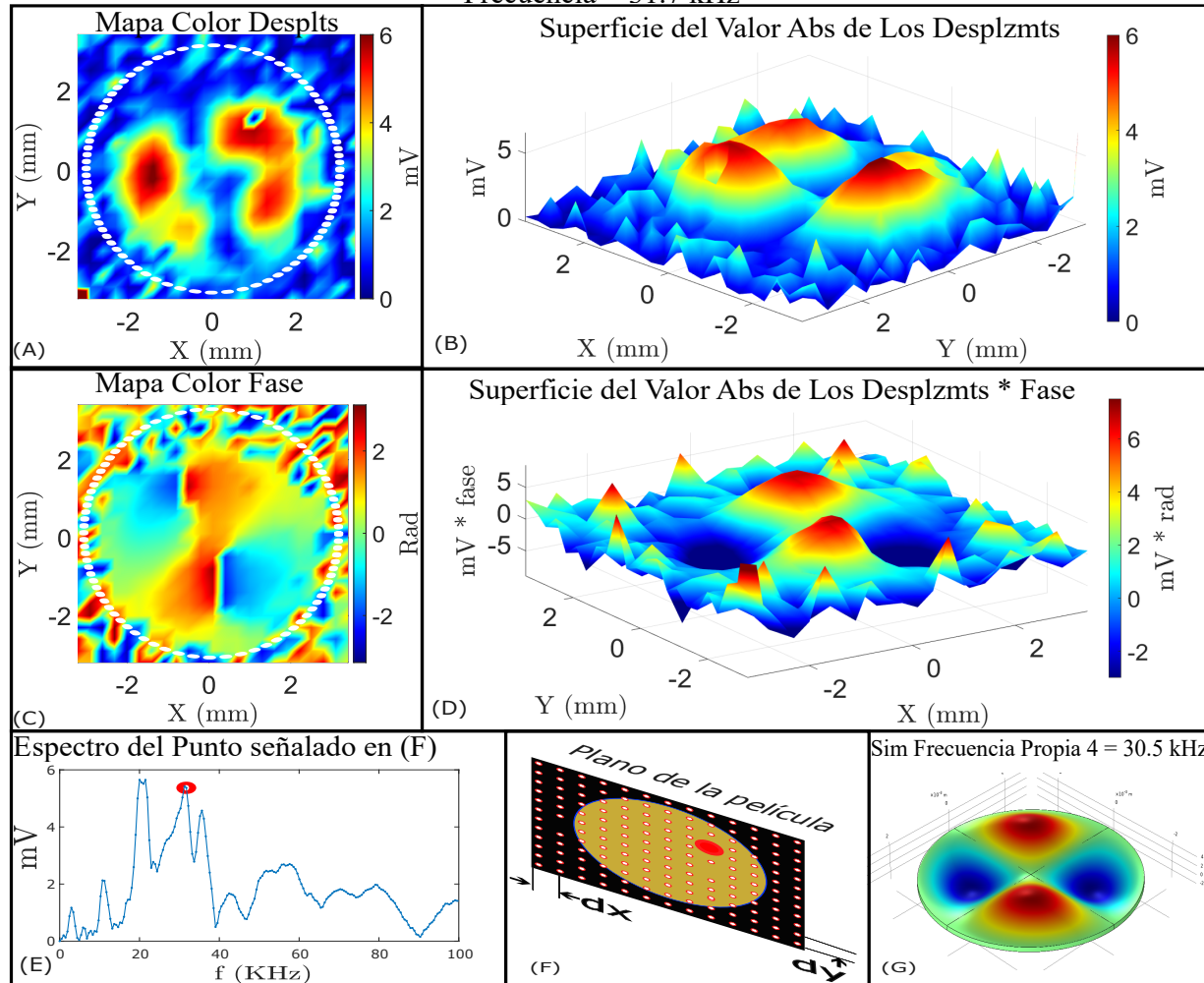


Figura 3.26: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25 veces el diámetro en dirección radial desde el centro, resaltado en (F). Resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 31.7 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Cuarto modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22)

Quinto Modo Fundamental

Quinto Modo Fundamental. Ferroelectreto Con Ambas Superficies Recubiertas Con Oro
Frecuencia = 35.2 kHz

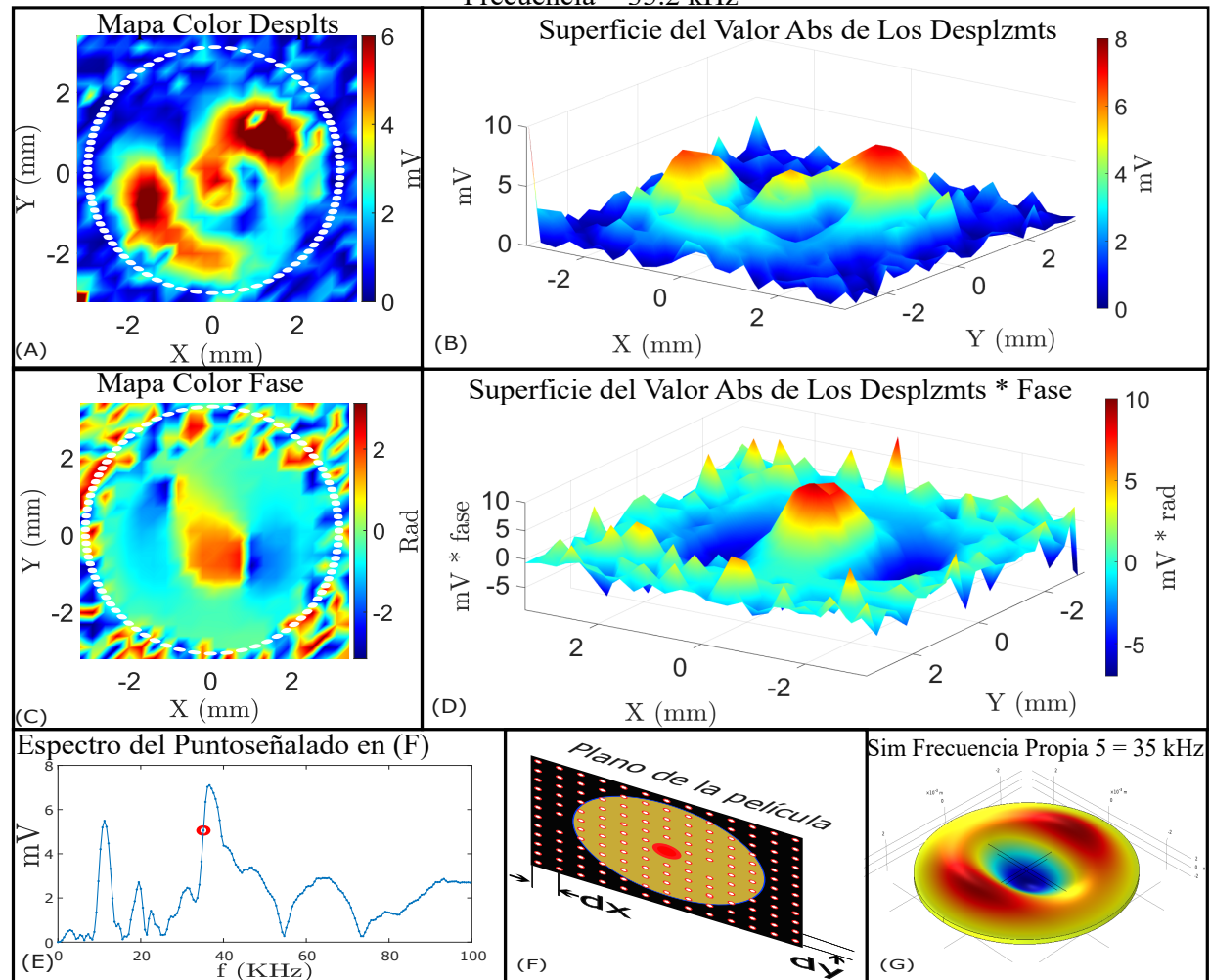


Figura 3.27: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto central de la película circular, resaltado en (F). Resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 35.2 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Quinto modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22)

Sexto Modo Fundamental

SextoModo Fundamental. Ferroelectreto Con Ambas Superdicias Recubiertas Con Oro
Frecuencia = 41.5 kHz

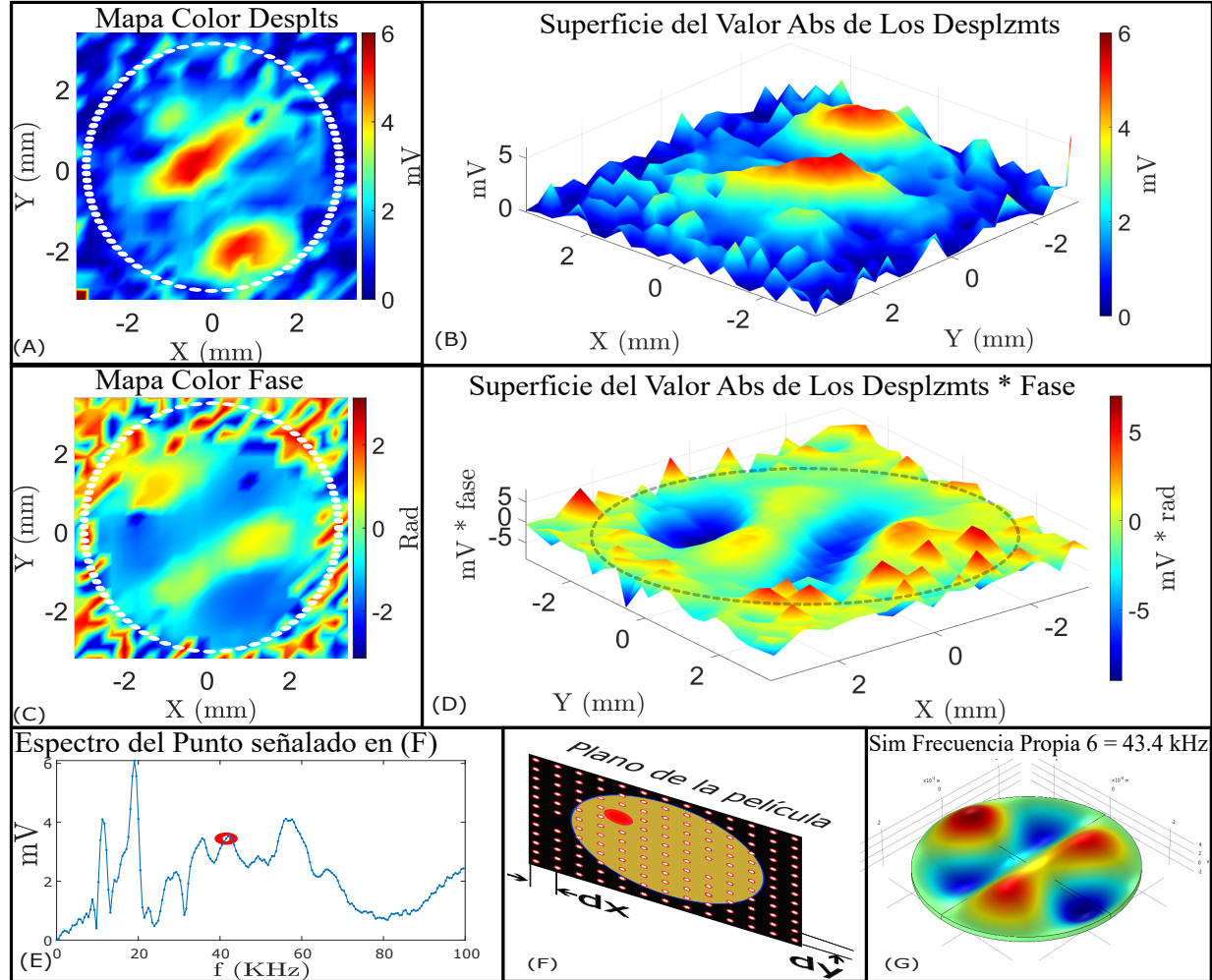


Figura 3.28: Resultados de análisis modal aplicado a una película de ferroelectreto con electrodos de Oro en sus dos superficies. (A): Mapa de color de las velocidades de la superficie de la película (B): Superficie del mapa representado en la subfigura (A). (C): Plano de fases. (D): Multiplicación punto a punto del plano de magnitud por el plano de fase. (E): espectro en frecuencia de la información del punto de observación a 0.25 veces el diámetro en dirección radial desde el centro, resaltado en (F). Resaltado con un círculo en rojo el punto en el espectro correspondiente al segundo modo flexural de vibración a una frecuencia de 41.5 kHz. (F): Representación esquemática del plano de la película de ferroelectreto, los puntos rojos representan los puntos de observación medidos con el vibrómetro láser, se resalta el punto central con el cual se produce la información de la subfigura (E). El círculo en amarillo representa el ferroelectreto mientras que el área en negro que se observa corresponde a la estructura de sujeción de la película. (F): Sexto modo fundamental simulado, (el mismo que se muestra en la figura 3.22)

El error entre los valores de las frecuencias fundamentales observadas experimentalmente y obtenidas mediante la simulación se resumen en la tabla 3.16

Tabla 3.16: *Resumen resultados análisis modal a ferroelectreto con electrodos de oro.*

Frecuencia Propia	Simulación [kHz]	Experimentación [kHz]	Error Relativo [%]
1	8.8	11.2	21.4
2	19.2	18.6	3.1
3	29.8	29.1	2.3
4	31.7	30.5	3.9
5	35	35.2	0.6
6	43.4	41.5	4.4

Conclusiones Y Trabajos Futuros

4.1. Conclusiones

1. Utilizando espectroscopia ultrasónica acoplada en aire se estimó el módulo de elasticidad de muestras de ferroelectreto con electrodos de aluminio y oro. Para el caso de ferroelectreto con electrodos de aluminio se obtuvo un módulo de elasticidad de $4,67 \text{ MPa}$. Este método también permitió estimar la densidad de este material, obteniendo un valor de $540 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Los resultados obtenidos muestran coherencia con los reportados por Gómez en [11], lo que sugiere que la técnica implementada es robusta y ofrece un nivel significativo de repetibilidad. Por otra parte, se encontró que para la muestra de ferroelectreto con electrodos de oro en ambas superficies, el módulo de elasticidad fue de $1,9 \text{ MPa}$ y densidad de $568 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$. Mientras que para ferroelectreto con una sola superficie recubierta con oro el módulo de elasticidad encontrado fue de $1,49 \text{ MPa}$ y una densidad de $550 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$.

2. Por medio de las curvas de dispersión se obtuvo el módulo de elasticidad y relación de Poisson para ferroelectreto con electrodos de aluminio y oro en sus dos superficies. En el caso de los ferroelectretos con electrodos de aluminio se obtuvo un módulo de elasticidad de $2,54 \text{ GPa}$ y relación de Poisson de $0,33$. Para ferroelectreto con electrodos de oro el módulo de elasticidad encontrado es de $1,29 \text{ GPa}$ y relación de Poisson de $0,27$. La validación previa de la caracterización a través de las curvas de dispersión utilizando materiales con propiedades conocidas, como el latón y el aluminio, demostró la capacidad de este enfoque para determinar el módulo de elasticidad y la relación de Poisson para muestras tipo placa de materiales cuyas dos propiedades son ampliamente conocidas. La consistencia entre los valores obtenidos y los esperados aumenta la confianza de este método de caracterización.

Por otra parte las simulaciones de los modos y frecuencias propias de una placa de ferroelectreto se asemejan con razonable precisión a lo observado experimentalmente cuando a estas simulaciones se le atribuyen los valores de las constantes elásticas caracterizadas experimentalmente a través de las curvas de dispersión.

3. Experimentalmente fue posible encontrar que se pueden inducir modos flexurales de vibración en películas de ferroelectreto. Adicionalmente a través de la construcción de un

modelo de elementos finitos, que usa como insumo las propiedades elásticas fueron caracterizadas experimentalmente, fue posible estimar las frecuencias naturales en las cuales se producen los modos flexurales. La validación modal experimental da indicio de que las constantes elásticas encontradas a partir de la curva de dispersión (y densidad a partir de espectroscopia) tienen cierta confianza dado que las frecuencias y modos propios encontrados coinciden con los simulados usando dichas constantes.

4.2. Trabajos Futuros

Basándose en la caracterización de propiedades mecánicas de películas de ferroelectreto, así como en la simulación y validación experimental de modos flexurales de vibración, se abren diversas oportunidades para futuros trabajos e investigaciones. A continuación se proponen algunos de los posibles trabajos futuros.

1. Caracterizar por medio de simulación y/o experimentación la respuesta acústica de una placa de ferroelectreto que opere en modos flexurales de vibración.
2. Caracterizar las propiedades elásticas de las muestras de ferroelectreto que se estudiaron en este trabajo por medio de técnicas estandarizadas y comparar con los resultados obtenidos mediante métodos acústicos.
3. Revisar con mayor detalle la formulación en el modelo de espectroscopia ultrasónica acoplada en aire para entender la discrepancia de los valores del módulo de elasticidad en relación a la técnica que emplea curvas de dispersión.
4. Desarrollar arreglos de películas de ferroelectreto vibrantes en modos flexurales para generar patrones de radiación acústicas.

Bibliografía

- [1] D. Collazos, C. Burbano, and J. Ealo, "Design, construction and modeling of an ultrasonic transducer, operating in length mode (d31), based on a low cost piezoelectric polymer," in *First International Conference on Advanced Mechatronics, Design, and Manufacturing Technology, AMDM*, 09 2012.
- [2] D. T. Blackstock, "Fundamentals of physical acoustics," 2001.
- [3] X. O. Olivella and C. A. de Saracibar, *Mecánica de medios continuos para ingenieros*, vol. 92. Univ. Politèc. de Catalunya, 2002.
- [4] E. Kreyszig, *Matemáticas avanzadas para ingeniería*. Columbus, Ohio: JOHN WILEY and SONS, INC, then ed., 2001. Cap 12.
- [5] J. L. Rose, "Ultrasonic waves in solid media," 2000.
- [6] J. Ealo, J. Valdes, M. Villagrán, and D. Collazos, "Sistema opto-acústico para la estimación en línea de contenido de agua en plantas: Una herramienta novedosa para el control de riego en cultivos inteligentes," *Propuesta de convocatoria interna de investigación*, 2022.
- [7] Quantel, *User Manual Viron*. Quantel, Les Ulis, France, 2017.
- [8] A. Orrego, "Exploración del ultrasonido basado en láser como alternativa para medir el contenido de humedad en tejido vegetal," Master's thesis, Universidad del Valle, Cali, Colombia, 2019.
- [9] D. Collazos, "Técnicas opto-acústicas para determinar propiedades elásticas y contenido de agua en tejidos vegetales y su potencial de aplicación en agricultura inteligente," doctorado, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2022.
- [10] R. D. Blevins and R. Plunkett, "Formulas for natural frequency and mode shape," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 47, no. 2, p. 461, 1980.
- [11] T. Gómez Álvarez-Arenas, H. Calás, J. E. Cuello, A. R. Fernández, and M. Muñoz, "Noncontact ultrasonic spectroscopy applied to the study of polypropylene ferroelectrets," *Journal of Applied Physics*, vol. 108, no. 7, 2010.
- [12] W. Hillger, L. Bühling, and D. Ilse, "Industrial applications of air-coupled ultrasonic technique," in *7th International Symposium on NDT in Aerospace*, pp. 16–18, 2015.

-
- [13] Y. Fang, L. Lin, H. Feng, Z. Lu, and G. W. Emms, "Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products," *Computers and electronics in agriculture*, vol. 137, pp. 79–87, 2017.
- [14] G. Allevato, J. Hinrichs, M. Rutsch, J. P. Adler, A. Jäger, M. Pesavento, and M. Kupnik, "Real-time 3-d imaging using an air-coupled ultrasonic phased-array," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 68, no. 3, pp. 796–806, 2020.
- [15] J. L. E. Cuello, "Transductores basados en ferroelectretos para aplicaciones ultrasonicas en aire," doctorado, Escuela técnica superior de ingenieros industriales, 2009.
- [16] T. G. Álvarez-Arenas and F. Montero, "Materiales y técnicas para el acoplamiento mecánico óptimo de piezocerámicas en aire," *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 41, no. 1, p. 17, 2002.
- [17] O. B. Dali, S. Zhukov, M. Rutsch, C. Hartmann, H. Von Seggern, G. M. Sessler, and M. Kupnik, "Biodegradable 3d-printed ferroelectret ultrasonic transducer with large output pressure," in *2021 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)*, pp. 1–4, IEEE, 2021.
- [18] L. Capineri, A. S. Fiorillo, L. Masotti, and S. Rocchi, "Piezo-polymer transducers for ultrasonic imaging in air," *IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control*, vol. 44, no. 1, pp. 36–43, 1997.
- [19] J. Döring, J. Bartusch, U. Beck, A. Erhard, *et al.*, "Emfit ferroelectret film transducers for non-contact ultrasonic testing," in *European Conf. NDT*, 2006.
- [20] D. Collazos, "Detección de daños en materiales compuestos usando ondas de lamb.," master, Escuela de Ingeniería Mecánica, 2017.
- [21] L. Jaouen, E. Gourdon, and P. Glé, "Estimation of all six parameters of johnson-champoux-allard-lafarge model for acoustical porous materials from impedance tube measurements," *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 148, no. 4, pp. 1998–2005, 2020.
- [22] M.-H. Henry R. Clauser, "Industrial and engineering materials," *ASM Specialty Handbook - Copper and Copper Alloys*, 2001.
- [23] A. I. M. Handbook, "The metals databook," *Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, *ASM International*, vol. 10th Ed, 1990.