



1. DATOS BÁSICOS DEL TFG:

Título: Más Allá de la Rigidez: Microestructura Fractal, Armónicos de Onda y No Linealidad como Nuevos Biomarcadores de Ablación Térmica

Descripción general (resumen y metodología):

La elastografía clínica mide una sola cosa: la velocidad de la onda de corte, proporcional a la rigidez del tejido. Pero la rigidez no distingue entre dos materiales con la misma dureza y microestructuras completamente distintas, ni detecta si una ablación térmica ha sido completa. Este TFG explora dos descriptores mecánicos que la elastografía convencional ignora: la no linealidad acustoelástica A (cómo cambia la rigidez bajo compresión) y el contenido armónico de la onda de corte (cómo la no linealidad del material distorsiona una onda inicialmente pura generando frecuencias nuevas). Ambos se estudian en phantoms con microestructura fractal de complejidad controlada, el tipo de arquitectura que tienen los tumores sólidos vascularizados.

El trabajo es continuación directa del TFG de Víctor Robles (UGR, 2025), que demostró en este laboratorio que A cambia en un orden de magnitud tras la ablación térmica y que el exponente de dispersión fractal κ distingue phantoms de distinta microestructura. Este TFG extiende ese resultado en dos direcciones: (1) varía sistemáticamente el índice de Hurst H de la microestructura fractal ($H = 0.2, 0.3, 0.38, 0.5, 0.6$) para establecer las curvas $A(H)$ y $\kappa(H)$ con estadística formal, y (2) añade la medida del contenido armónico de la onda de corte (distorsión armónica total THD) a partir de los datos del Verasonics, siguiendo el marco teórico de Alarcón, Galaz y Espíndola (Ultrasonics, 2025), que demostraron que los sólidos blandos generan predominantemente armónicos impares cuya amplitud es una medida directa de la no linealidad cúbica del material. La combinación de los tres descriptores (A , κ , THD) en un espacio diagnóstico tridimensional es la aportación original del trabajo.

Tipología: Trabajos experimentales, de toma de datos de campo o de laboratorio.

Objetivos planteados:

Objetivos planteados:

- Fabricar y caracterizar por box-counting la librería de phantoms fractales ($H = 0.2, 0.3, 0.38, 0.5, 0.6$, $n = 3$ réplicas por H) verificando $D_f = 2 - H$ con error $< 5\%$.
- Medir A y κ en todos los phantoms (nativo y ablacionado) con el protocolo de compresión incremental del Verasonics y establecer las curvas $A(H)$ y $\kappa(H)$ con estadística formal (ANOVA, $p < 0.05$).
- Implementar en MATLAB la extracción del espectro de armónicos de la onda de corte a partir de los datos del Verasonics y calcular THD y A_3f_0/Af_0 en función del nivel de compresión y de H .
- Inducir ablación térmica controlada (aguja RF, termopar, 90°C , $n = 3$ réplicas por H) y repetir el protocolo completo post-ablación para obtener las curvas $A(H)$ y THD(H) ablacionadas.
- Construir el espacio descriptor tridimensional (A , THD, κ) para los diez grupos experimentales y evaluar su separabilidad diagnóstica mediante PCA y clasificador lineal discriminante.
- Comparar G_0 y α del modelo springpot obtenidos por el Verasonics con los del reómetro del laboratorio si está disponible.

Bibliografía básica:

Alarcón, H., Galaz, B. y Espíndola, D. Cubic nonlinearity and surface shock waves in soft tissue-like materials. *Ultrasonics*, 145:107469, 2025. DOI: 10.1016/j.ultras.2024.107469

Annio, G. et al. Making sense of scattering: seeing microstructure through shear waves. *Science Advances*, 10:eadp3363, 2024. DOI: 10.1126/sciadv.adp3363

Chintada, B.R., Rau, R. y Goksel, O. Nonlinear characterization of tissue viscoelasticity with acoustoelastic attenuation of shear waves. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 41(7):1895–1905, 2022. DOI: 10.1109/TMI.2021.3104037

Gennisson, J.L. et al. Acoustoelasticity in soft solids. *Journal of the Acoustical Society of America*, 122(6):3211–3219, 2007. DOI: 10.1121/1.2793605

Almashakbeh, A. et al. Springpot model fitting to shear wave elastography data in tumor spheroids. *Scientific Reports*, 14:16208, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-66621-w

Bernal, M. et al. In vivo quantification of the nonlinear shear modulus in breast lesions. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 63(1):101–109, 2016. DOI: 10.1109/TUFFC.2015.2503601

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

Invitamos a estudiantes de último año del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial a participar en este proyecto de investigación experimental, continuación directa de un TFG defendido en este laboratorio en 2025 con proyección de publicación en revista científica internacional. Son valorables conocimientos de MATLAB o Python y física de ondas, aunque no son imprescindibles. Se recomienda contactar con la tutora antes de formalizar la solicitud.

Plazas: 1

2. DATOS DEL TUTOR/A:

Nombre y apellidos: INAS FARIS FADHIL

Ámbito de conocimiento/Departamento: MECÁNICA DE LOS MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS

Correo electrónico: inas@ugr.es

3. COTUTOR/A DE LA UGR (en su caso):

Nombre y apellidos: JOSE MANUEL CORTES CORTES

Ámbito de conocimiento/Departamento: MECÁNICA DE LOS MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE ESTRUCTURAS

Correo electrónico: jmcortes@ugr.es

4. COTUTOR/A EXTERNO/A (en su caso):

Nombre y apellidos:

Correo electrónico:

Nombre de la empresa o institución:

Dirección postal:

Puesto del tutor en la empresa o institución:

Centro de convenio Externo:

5. DATOS DEL ESTUDIANTE:

Nombre y apellidos:

Correo electrónico:

Más Allá de la Rigidez: Microestructura Fractal, Armónicos de Onda y No Linealidad como Nuevos Biomarcadores de Ablación Térmica

Tutores: Inas Faris Fadhil y José Manuel Cortes

Descripción general (resumen y metodología):

La elastografía clínica mide una sola cosa: la velocidad de la onda de corte, proporcional a la rigidez del tejido. Pero la rigidez no distingue entre dos materiales con la misma dureza y microestructuras completamente distintas, ni detecta si una ablación térmica ha sido completa. Este TFG explora dos descriptores mecánicos que la elastografía convencional ignora: la no linealidad acustoelástica A (cómo cambia la rigidez bajo compresión) y el contenido armónico de la onda de corte (cómo la no linealidad del material distorsiona una onda inicialmente pura generando frecuencias nuevas). Ambos se estudian en phantoms con microestructura fractal de complejidad controlada, el tipo de arquitectura que tienen los tumores sólidos vascularizados.

El trabajo es continuación directa del TFG de Víctor Robles (UGR, 2025), que demostró en este laboratorio que A cambia en un orden de magnitud tras la ablación térmica y que el exponente de dispersión fractal κ distingue phantoms de distinta microestructura. Este TFG extiende ese resultado en dos direcciones: (1) varía sistemáticamente el índice de Hurst H de la microestructura fractal ($H = 0.2, 0.3, 0.38, 0.5, 0.6$) para establecer las curvas $A(H)$ y $\kappa(H)$ con estadística formal, y (2) añade la medida del contenido armónico de la onda de corte (distorsión armónica total THD) a partir de los datos del Verasonics, siguiendo el marco teórico de Alarcón, Galaz y Espíndola (Ultrasonics, 2025), que demostraron que los sólidos blandos generan predominantemente armónicos impares cuya amplitud es una medida directa de la no linealidad cúbica del material. La combinación de los tres descriptores (A , κ , THD) en un espacio diagnóstico tridimensional es la aportación original del trabajo.

Objetivos planteados:

- Fabricar y caracterizar por box-counting la librería de phantoms fractales ($H = 0.2, 0.3, 0.38, 0.5, 0.6$, $n = 3$ réplicas por H) verificando $D_f = 2 - H$ con error $< 5\%$.
- Medir A y κ en todos los phantoms (nativo y ablacionado) con el protocolo de compresión incremental del Verasonics y establecer las curvas $A(H)$ y $\kappa(H)$ con estadística formal (ANOVA, $p < 0.05$).
- Implementar en MATLAB la extracción del espectro de armónicos de la onda de corte a partir de los datos del Verasonics y calcular THD y A_3f_0/Af_0 en función del nivel de compresión y de H .
- Inducir ablación térmica controlada (aguja RF, termopar, 90°C , $n = 3$ réplicas por H) y repetir el protocolo completo post-ablación para obtener las curvas $A(H)$ y THD(H) ablacionadas.
- Construir el espacio descriptor tridimensional (A , THD, κ) para los diez grupos experimentales y evaluar su separabilidad diagnóstica mediante PCA y clasificador lineal discriminante.
- Comparar G_0 y α del modelo springpot obtenidos por el Verasonics con los del reómetro del laboratorio si está disponible.

Bibliografía básica:

- Alarcón, H., Galaz, B. y Espíndola, D. Cubic nonlinearity and surface shock waves in soft tissue-like materials. Ultrasonics, 145:107469, 2025. DOI: 10.1016/j.ultras.2024.107469
- Annio, G. et al. Making sense of scattering: seeing microstructure through shear waves. Science Advances, 10:eadp3363, 2024. DOI: 10.1126/sciadv.adp3363
- Chintada, B.R., Rau, R. y Goksel, O. Nonlinear characterization of tissue viscoelasticity with acoustoelastic attenuation of shear waves. IEEE Transactions on Medical Imaging, 41(7):1895–1905, 2022. DOI: 10.1109/TMI.2021.3104037
- Gennisson, J.L. et al. Acoustoelasticity in soft solids. Journal of the Acoustical Society of America, 122(6):3211–3219, 2007. DOI: 10.1121/1.2793605

- Almashakbeh, A. et al. Springpot model fitting to shear wave elastography data in tumor spheroids. Scientific Reports, 14:16208, 2024. DOI: 10.1038/s41598-024-66621-w
- Bernal, M. et al. In vivo quantification of the nonlinear shear modulus in breast lesions. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 63(1):101–109, 2016. DOI: 10.1109/TUFFC.2015.2503601

Recomendaciones y orientaciones para el estudiante:

Invitamos a estudiantes de último año del Grado en Ingeniería Electrónica Industrial a participar en este proyecto de investigación experimental, continuación directa de un TFG defendido en este laboratorio en 2025 con proyección de publicación en revista científica internacional. Son valorables conocimientos de MATLAB o Python y física de ondas, aunque no son imprescindibles. Se recomienda contactar con la tutora antes de formalizar la solicitud.