



UNIVERSIDAD
DE GRANADA

Facultad de Ciencias

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA E INDUSTRIAL

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Evaluación Experimental de la No Linealidad en Tejidos Blandos

Presentado por:
Juan Miguel Sáez Morilla

Curso académico 2024-2025



Resumen

La caracterización mecánica de los tejidos blandos es crucial para el diagnóstico médico, pero las propiedades no lineales de estos tejidos a menudo se simplifican o ignoran. Este Trabajo de Fin de Grado se enfoca en la evaluación experimental de biomarcadores de no linealidad en tejidos blandos, utilizando *phantoms* tisulares y muestras biológicas *ex vivo*. El objetivo principal fue diseñar e implementar un sistema experimental para investigar cómo la precompresión, la deformación y la estructura tisular afectan la propagación de ondas de cizalla y la generación de armónicos, con el fin de identificar indicadores robustos de comportamiento no lineal.

Se desarrolló un sistema experimental versátil integrando un generador de funciones, un *shaker* mecánico, un sistema de ultrasonidos Verasonics Vantage 256 con transductor lineal L11-5V, y una plataforma Arduino para control y sincronización. Se fabricaron *phantoms* de gelatina y PVA, y se utilizaron muestras de hígado porcino, músculo de pollo y tendón porcino. Se realizaron cuatro tipos principales de experimentos: (1) evaluación de la velocidad de la onda de cizalla (SWS) en función de la precompresión aplicada (efecto acoustoelástico), (2) análisis de la relación tensión-deformación bajo compresión uniaxial, (3) estudio de la anisotropía mecánica en músculo de pollo, y (4) investigación de la generación de armónicos en tendón mediante excitación por Fuerza de Radiación Acústica de Impulso (ARFI). Los datos se procesaron utilizando MATLAB y la herramienta MultiGuide.

Los resultados del experimento presión-SWS mostraron un comportamiento cuasi-lineal para el *phantom* de gelatina al 10 % (coeficiente de Landau $A \approx 0.495$) y una marcada no linealidad para el tejido hepático *ex vivo* ($A \approx 8.43$), indicando un aumento significativo de la rigidez con la precompresión en este último. El experimento presión-deformación confirmó la mayor compresibilidad y no linealidad del tejido hepático frente al *phantom*. El músculo de pollo exhibió una clara anisotropía, con velocidades de onda un 40 % mayores en dirección paralela a las fibras. El análisis del tendón, aunque limitado por una ventana de adquisición (T_{acq}) subóptima, más corta que el periodo de la vibración fundamental, sugirió preliminarmente la generación de armónicos (H_3 y H_5), indicativo de su naturaleza no lineal.

Este trabajo concluye que la dependencia de la rigidez con la precompresión es un biomarcador prometedor de la no linealidad tisular. La correcta caracterización instrumental y el procesamiento de señales son fundamentales para estos estudios. Se identificaron limitaciones, como la T_{acq} subóptima en el análisis de armónicos del tendón, y se proponen mejoras en los protocolos de adquisición y análisis para avanzar en la caracterización robusta de la no linealidad en tejidos blandos.