

## Desarrollo de un sistema acústico de medida del Módulo de Elasticidad en árbol, troza y tabla

**TRABAJO DE FIN DE GRADO - RESUMEN EJECUTIVO**

**PREMIOS INGENIO JUNIOR - CONVOCATORIA 2022**

30 de noviembre de 2022

**AUTOR:**

**Juan Del Pino Mena**

Graduado en Ingeniería de Tecnologías de Telecomunicación con mención en Sistemas Electrónicos por la Universidad de Granada.

**TUTOR:**

**Andrés M. Roldán Aranda**

Profesor titular en el Departamento de Electrónica y Tecnologías de Computadores de la Universidad de Granada.

TFG presentado y defendido en septiembre de 2022 en la Escuela Técnica Superior de Ingenierías Informática y de Telecomunicación (ETSIIT) de la Universidad de Granada.



**UNIVERSIDAD  
DE GRANADA**

## 1. Explicación de la idea del proyecto

El presente Trabajo de Fin de Grado consiste en el desarrollo de un dispositivo electrónico innovador, portátil y fácil de usar para el diagnóstico y la clasificación no destructiva de la madera de árboles en pie, trozas y tablas mediante el análisis de ondas acústicas. Como marcador de calidad de la madera usamos la rigidez, muy apreciada en aplicaciones estructurales. Como testigo de la rigidez se usa el Módulo de Elasticidad (MOE), que es la resistencia de un material a deformarse elásticamente al aplicar un esfuerzo.

Este TFG se ha elaborado en el marco del proyecto *LIFE Wood For Future* (LWFF) (código LIFE20 CCM/ES/001656). LWFF tiene como objetivo recuperar el cultivo del chopo (*Populus sp.*) en la Vega de Granada demostrando el valor de su madera a través de bio-productos estructurales innovadores. LWFF forma parte del programa LIFE, un plan de financiación de la Unión Europea con objetivos medioambientales, climáticos y energéticos. A su vez, este TFG es fruto de la colaboración del grupo de investigación de Acústica y Diagnóstico de Materiales y Estructuras (ADIME) de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Edificación (ETSIE) y el grupo de electrónica aeroespacial GranaSat de la Universidad de Granada (UGR).

El Área Metropolitana de Granada tiene uno de los peores grados de contaminación del país. De manera contradictoria, estos últimos 20 años la silvicultura del chopo en Granada ha sufrido un revés significativo. Esto se debe a una baja rentabilidad frente a otros cultivos, a la falta de asociación en el sector y al menosprecio de las ventajas medioambientales de las choperas. Entre los mencionados beneficios medioambientales, destacan su capacidad de absorción de CO<sub>2</sub>, de conservación del suelo y de regulación del ciclo del agua.

Con la aparición de materiales compuestos de madera y procesos de fabricación innovadores desarrollados por grupos de investigación de la UGR, sumado a la legislación europea, que fomenta una construcción más sostenible y edificios más eficientes; surge una oportunidad inigualable para que la Vega de Granada desarrolle una industria local con una huella ecológica casi nula a la vez que se le proporciona un anillo de absorción de contaminación. Para ello, es necesario que su madera sea de calidad. Por tanto, conocer sus propiedades y clasificar la madera lo antes posible es de gran valor.

Con todo lo anterior, es indiscutible la necesidad de contar con herramientas de caracterización adecuadas. Es en este punto donde surge el propósito de este proyecto: el desarrollo de un instrumento para medir el MOE en árboles, troncos y tablas. Este dispositivo se bautiza como *Tree Inspection Kit* (TIK).

El MOE puede derivarse de la velocidad de propagación de ondas acústicas que viajan por la madera, previo conocimiento de su densidad. Para hallar la velocidad se ha usado el método del tiempo de tránsito (*Time-of-Flight*, ToF). Este consiste en clavar en la madera dos sondas piezoelectricas separadas longitudinalmente una distancia conocida, golpear una de ellas y registrar las ondas captadas por ambas (véase [Figura 1a](#)). El ToF será el tiempo diferencia entre el instante de comienzo de la señal del emisor y del receptor. Por la naturaleza de las

señales y la sensibilidad requerida, identificar el punto de inicio de las señales no es trivial. Para esta tarea se emplea *Akaike Information Criterion* (AIC), un algoritmo de post-procesado digital de señal que es usado en otros campos como en sismografía.

Desde la perspectiva de la Ingeniería de Telecomunicaciones y Electrónica, un proyecto de este alcance supone desarrollar todos los aspectos de un producto electrónico de principio a fin; desde las etapas de investigación, planificación y especificación, conocimientos de transductores y adquisición y procesado de señal, selección de arquitecturas y topologías, diseño y fabricación de circuitos impresos, consideraciones mecánicas del producto, y el desarrollo de firmware para un sistema embebido.

Este TFG concluye con la obtención de un prototipo de ingeniería del TIK que sirve de base para un desarrollo posterior. Para ilustrar de los subsistemas del prototipo, en la [Figura 1b](#) se incluye un esquema de su estructura. Por otra parte, en la [Figura 2](#) se presentan las cotas principales del dispositivo y algunos *renders* del diseño propuesto. La [Figura 3](#) muestra fotografías del prototipo fabricado.

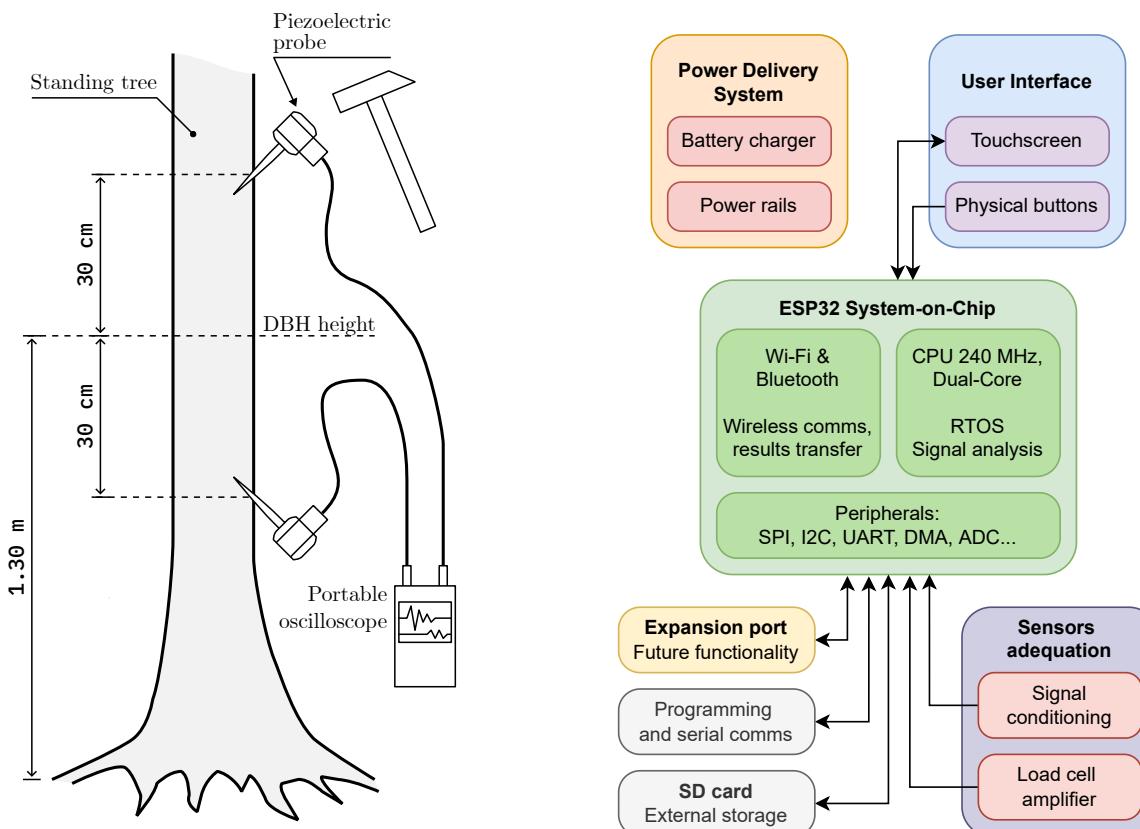
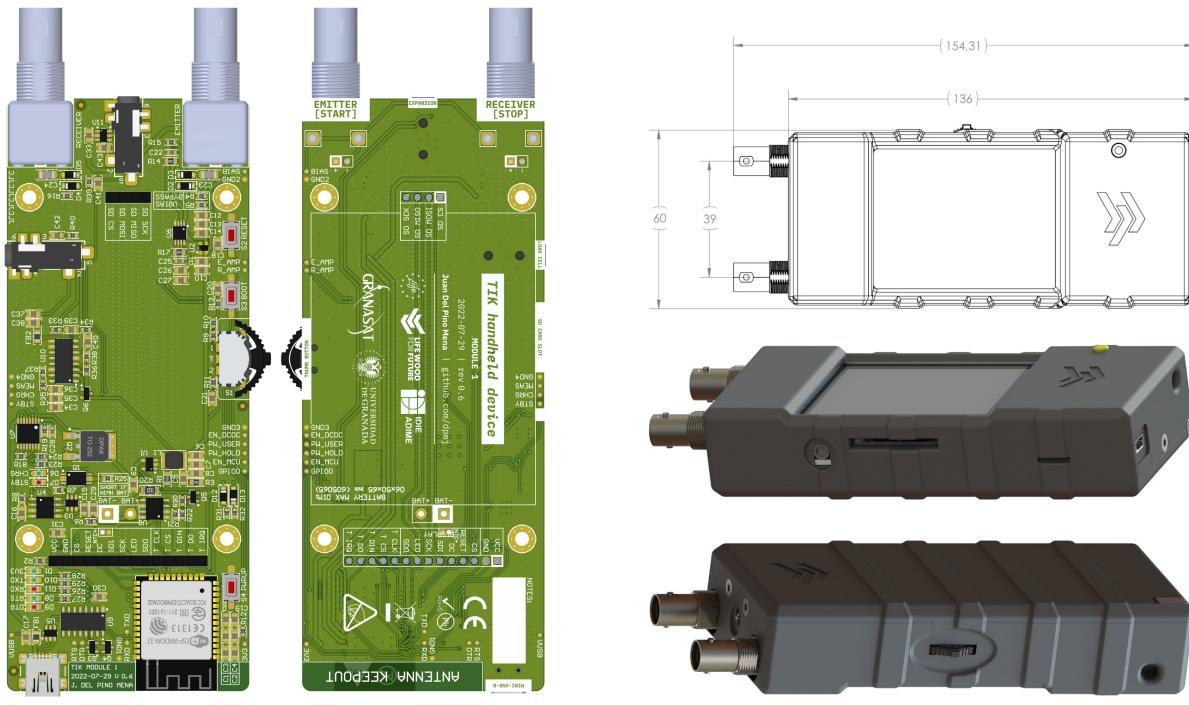


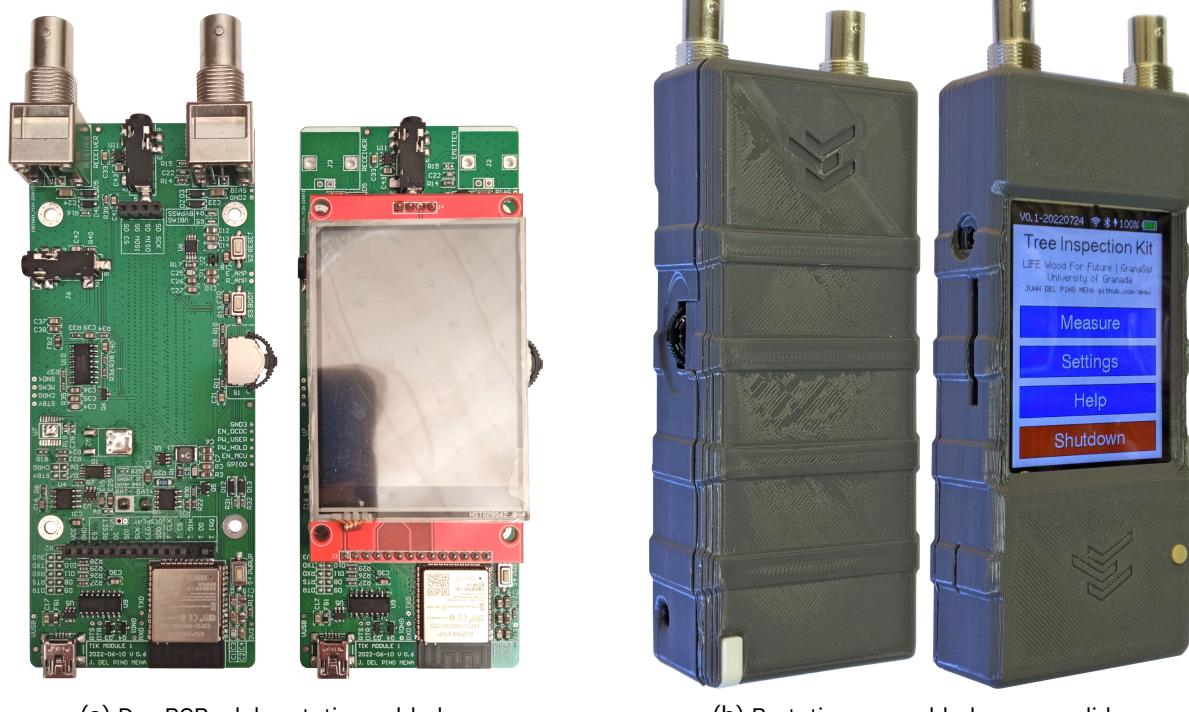
Figura 1



(a) Renders de la PCB en Altium Designer.

(b) Dimensiones (en mm) del ensamblaje completo en SolidWorks y algunos renders.

Figura 2: Algunos renders de TIK.



(a) Dos PCBs del prototipo soldadas.

(b) Prototipo ensamblado y encendido.

Figura 3: Algunas fotografías del prototipo fabricado.

## 2. Objetivos

El objetivo principal del proyecto es la especificación, diseño, fabricación y verificación de un dispositivo capaz de medir el MOE de la madera.

Con este proyecto se quiere demostrar la capacidad del autor de organizar y ejecutar un proyecto de ingeniería, documentando todo el proceso; a la vez que se adquiere destreza con software profesional para el diseño electrónico y mecánico, con la fabricación de electrónica, y con el manejo de instrumentación.

Por último, se desea contribuir a la recuperación de las choperas de Granada y su explotación de calidad, lo que trae beneficios en términos medioambientales y económicos.

## 3. Tecnología a utilizar

TIK tiene un microcontrolador ESP32, un SoC dual-core con Wi-Fi y Bluetooth y que ejecuta un RTOS. TIK cuenta con una pantalla táctil, una ranura para tarjetas SD y un Mini-USB para carga y programación. El prototipo tiene entre 4 y 11 horas de autonomía.

Las señales de los sensores piezoeléctricos son captadas mediante un conversor analógico-digital. Se realiza un procesado digital de señal para hallar el ToF. Se puede conectar una célula de carga para pesar tablas y trozas y estimar su densidad.

Todo se integra en una PCB creada en Altium Designer y ensamblada en el laboratorio de GranaSat. La carcasa se diseñó en SolidWorks y fue impresa en 3D.

## 4. Mercados a los que se dirige

El 76 % de las 800 000 ha de choperas europeas sirven como recurso maderero industrial. Los principales productores son Francia, España e Italia ([Figura 4a](#)).

En España la industria del chopo da empleo a 11 000 trabajadores y en 2017 superó los 350 M€. La gran mayoría del producto nacional procede de las cuencas del Duero y Ebro ([Figura 4b](#)). Andalucía sólo aporta el 7 % del total, pero Granada supuso el 85 % de la producción andaluza.

Al existir una industria relevante en España y en países de nuestro entorno, TIK puede introducirse en mercados a nivel local, nacional y europeo.

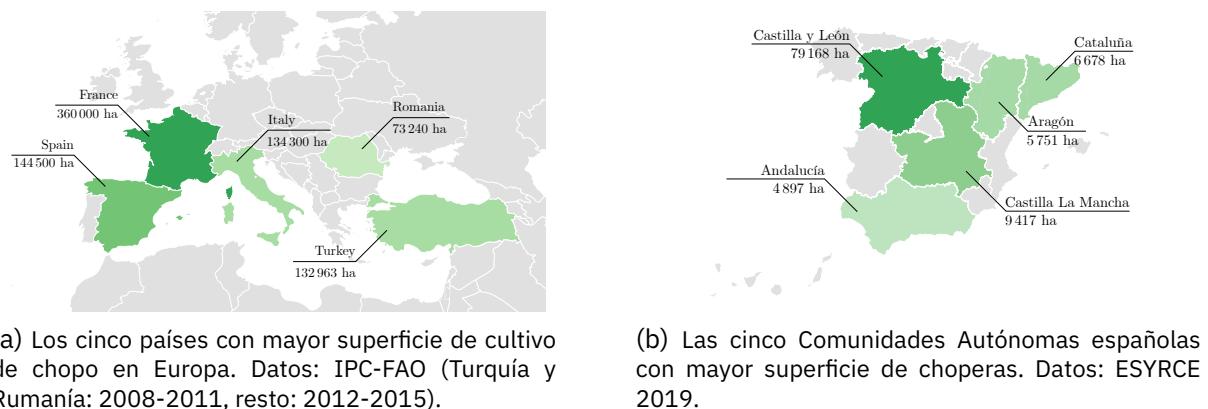


Figura 4: Cultivo del chopo en Europa y en España.

## 5. Potenciales clientes

TIK puede ser usado en todos los eslabones de la producción en la industria maderera: desde la evaluación de los árboles adecuados para ser talados, pasando por la clasificación de las tablas durante su aserrado, al estudio y mantenimiento de estructuras.

Por tanto, el rango de clientes incluye tanto a silvicultores, como a empresas madereras, equipos y centros de investigación, consultoras y organizaciones tanto públicas como privadas encargadas de la evaluación del estado de estructuras.

Y recordando que la demanda abarca desde el ámbito local al europeo, el número de clientes potenciales es muy alto.