

Detección de imperfecciones en piezas de fabricación aditiva mediante técnicas ultrasónicas

Asignatura: Evaluación No Destructiva y Calidad de Estructuras



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

Presentado por:

José Luis Ocón Manzaneque

Profesores:

Prof. Dr. Guillermo Rus Carlborg

Prof. Dr. Antonio Manuel Callejas Zafra

Universidad de Granada

Master Estructuras

Curso 2025-2026

Índice

Índice de Ilustraciones y Tablas.....	4
1.Introducción.....	5
1.1.El IFMIF-DONES.....	5
1.2 Objetivos	7
2.Bases del método Experimental.....	7
2.1. Fabricación aditiva	7
2.1.1. Diseño y modelado.....	8
2.1.2. Conversión a STL	8
2.1. 3. Slicing (Laminado).....	8
2.1.4. Preparación, Impresión y Post-procesamiento.....	9
2.1.5. Desafíos actuales.....	9
2.2. Ensayos no Destructivos (END) y técnica UT para materiales de fabricación aditiva	10
2.2.1. Ensayos No Destructivos (END)	10
2.2.2. Tecnología UT para componentes metálicos de AM.	11
2.3. Marco teórico.	13
2.3.1. Bases Físicas: Elasticidad y Propagación de Ondas	13
2.3.2. La END Clásica: Configuración y Operativa	15
2.3.3. Fundamentos de la Propagación de Ondas.....	15
2.3.3.1. Velocidades de Propagación (C_p y C_s)	15
2.3.3.2. Atenuación Acústica (α).....	15
2.3.3.3. El campo cercano (o zona de Fresnel) y refracción.	16
2.3.3.4. Impedancia acústica (Z).	17
2.3.3.5. Tiempo de vuelo	18
3.Campaña de ensayos.....	18
3.1. Descripción de probetas	18
3.2. Descripción de equipo ultrasónico.....	19
3.2.1. Generador de señal	19
3.2.2. Osciloscopio Digital (Agilent MSO6054A)	20
3.2.3. Hidrófono Onda HNR-O500	21
3.2.4. Transductor ultrasónico 10MHz	22

3.2.5. Software de Control (MATLAB)	22
3.2.6. Amplificador de Potencia RF	23
3.2.7. Sistema de Tanque de Inmersión y Posicionador (CNC)	23
4.Resultados y discusión.....	24
4.1. Sin hendidura /grieta superficial	24
4.2. Con hendidura superficial con una profundidad de 1,42 [mm]	25
5.Estudio logístico y económico del proyecto escalado industrialmente.	26
5.1. Estudio Logístico: De la Celda de Ensayos a la Planta de Producción	27
5.1.1. Automatización y Flujo de Materiales.....	27
5.1.2. Gestión de Datos y Conectividad.....	27
5.2. Estudio Económico Detallado	27
5.2.1. Inversión Inicial.....	27
5.2.2. Costes Operativos.....	28
5.Bibliografía.....	29

Índice de Ilustraciones y Tablas.

Ilustración 1.Configuración de plantas de IFMIF-DONES.....	6
Ilustración 2.Flujo de trabajo general del proceso de fabricación aditiva.....	7
Ilustración 3.Crane Wasp.....	10
Ilustración 4.Radiografía utilizada como END	10
Ilustración 5.Corriente de Foucault utilizada como END	11
Ilustración 6.Termografía utilizada como END	11
Ilustración 7.Defectos de un material AM de diferentes direcciones por UT.....	12
Ilustración 8.Experimento con L-UT.....	13
Ilustración 9.Experimento Stratoudaki	13
Ilustración 10.Generador de señal.	20
Ilustración 11.Osciloscopio Digital (Agilent MSO6054A).....	21
Ilustración 12.Hidrófono	21
Ilustración 13.Transductor.....	22
Ilustración 14.Software Matlab.....	23
Ilustración 15.Amplificador de potencia	23
Ilustración 16.Sistema de Inmersión y Posicionador (CNC).....	24
Ilustración 17.Ensayo 1 probeta sin hendidura.....	24
Ilustración 18.Ensayo 2 probeta sin hendidura.....	25
Ilustración 19.Ensayo 1 probeta con hendidura.....	25
Ilustración 20.Ensayo 2 probeta con hendidura.....	26
Tabla 1.Descripción dimensional sobre las probetas de ensayos.....	19
Tabla 2.Inversión inicial del proyecto a gran escala	28

1.Introducción

Este trabajo final de asignatura se desprende de una sección específica de mi Trabajo de Fin de Máster (TFM), centrada en el análisis de ensayos por ultrasonidos mediante ondas longitudinales (ondas P). En las secciones siguientes, se expondrá el origen de la propuesta de investigación, así como los objetivos finales que se pretenden alcanzar.

1.1.El IFMIF-DONES

La energía de la fusión nuclear promete ser una fuente de energía con tres grandes características:

- **Limpia:** Sin emisiones de CO₂.
- **Virtualmente inagotable:** Usa combustibles como el deuterio (del agua del mar).
- **Segura:** Sin riesgos de fusiones de núcleo o residuos de larga duración como la fisión actual.

En este contexto, el proyecto **IFMIF-DONES** (International Fusion Materials Irradiation Facility - Demo Oriented NEutron Source) es uno de los pilares científicos más ambiciosos de la actualidad, especialmente para el futuro de la energía limpia.

Es una infraestructura científica de vanguardia diseñada para **probar y validar los materiales** que se utilizarán en las futuras plantas de energía de **fusión nuclear** (como tokamak DEMO), donde se caracteriza por el intenso campo de radiación de neutrones de 14 [MeV] en la región de la primera pared. El objetivo último es comprender la degradación de las propiedades de los materiales, como la presencia de daños estructurales inducidos por la radiación en los materiales del reactor, junto con gases He y H producidos durante la irradiación.

Para la comprensión de dichos daños estructurales, es necesaria una base de datos consolidada mediante pruebas de irradiación (en condiciones lo más parecido a un entorno de fusión). Por este motivo, la comunidad científica destacó la necesidad de instalaciones dedicadas a los neutrones de fusión.

Los requisitos principales para esta fuente de neutrones son:

- Producir un espectro de neutrones característico de la fusión con suficiente intensidad para permitir pruebas aceleradas, hasta un nivel superior a la vida útil operativa esperada, en condiciones bien definidas de temperatura estable y controlada, y calentamiento nuclear gamma.
- Irradiar un volumen lo suficientemente grande como para permitir la caracterización de las propiedades macroscópicas de los materiales de interés requeridos para el diseño de ingeniería de DEMO y la planta de energía de fusión.

El diseño que cumpliera dichas exigencias técnicas, empezó a desarrollarse desde el 1990 a 2006, donde se acordó que el IFMIF (Instalación Internacional de Irradiación de Materiales de Fusión) fuera dicha instalación dedicada, debido al diseño conceptual logrando dos aceleradores lineales de deuterones de 40 [MeV] (entregando una corriente de haz de 125 mA con un ciclo de trabajo del 100%).

Como se cita anteriormente la planta constituye un **haz de deuterones de 125[mA], acelerado hasta 40 [MeV]**, donde incidirá en una cortina de litio liquido de 25 [mm] de espesor. Cuyo resultado consistirá en una gran cantidad de neutrones que incidirán en las muestras/probetas de materiales en estudio.

Para poder realizar dicho procedimiento se necesita un sistema sofisticado de plantas, en el que se organizará la infraestructura IFMIF-DONES:

- **Sistema de Acelerador (AS):** Produce, acelera y transporta el haz de 40 [MeV].
- **Sistema de Litio (LS):** Material el cual incidirá dicho haz de deuterones
- **Sistema de Prueba (TS):** Proceso de irradiación.
- **Edificios y sistemas de planta:** Suministran energía, ventilación, refrigeración y tratamiento de residuos.
- **Sistemas de Control e Instrumentación Central (CICS):** Asegurar el funcionamiento de la infraestructura en general.

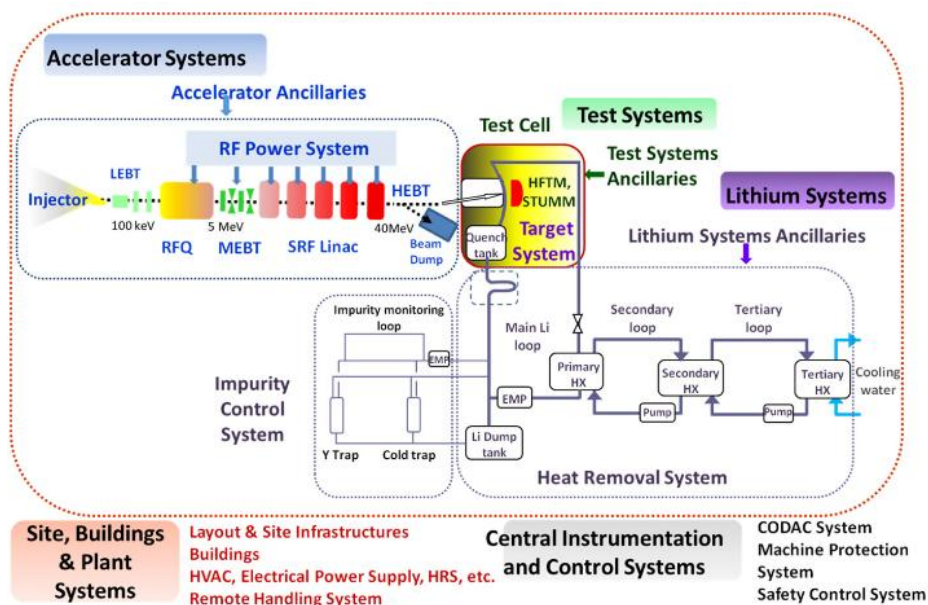


Ilustración 1. Configuración de plantas de IFMIF-DONES

Este proyecto que se está construyendo en **Escúzar (Granada)**, destaca por:

- Es la **mayor infraestructura científica** que se va a construir en España.
- Ha situado a Granada y a España en el epicentro del mapa mundial de la energía de fusión.
- Se espera que atraiga a científicos de todo el mundo y genere un ecosistema de innovación tecnológica masivo en la región.

Sin los datos que proporcionará IFMIF-DONES, no se podrían construir reactores de fusión comerciales seguros y duraderos.

1.2 Objetivos

Con el fin de probar y validar los materiales que se utilizarán en las futuras plantas de energía de fusión nuclear es necesaria técnicas de END para poder garantizar la funcionalidad de dicho material. Para ello ensayaremos diferentes probetas con distinta calidad de acero, para así poder evaluar dos conceptos fundamentales:

- **Distinción de distinto material:** Se obtendría resultados, utilizando la definición de Atenuación
- **Localización de grietas (endaduras):** Para poder detectar, se obtendrá con la definición de TOF (Time of Flight)

2.Bases del método Experimental

2.1. Fabricación aditiva

La **fabricación aditiva** comúnmente conocida como impresión 3D, ha revolucionado la forma en que se fabrican los objetos, desde modelos simples hasta estructuras complejas utilizadas en diversas industrias. El proceso consiste en añadir material capa por capa para crear objetos a partir de datos de modelos 3D, a diferencia de los métodos tradicionales de fabricación sustractiva.

El flujo de trabajo general de la AM abarca varios pasos críticos, cada uno de los cuales contribuye a la precisión, calidad y funcionalidad del producto final. Cada etapa es vital para garantizar que el resultado cumpla con las especificaciones y estándares de calidad deseados. Los avances en software, materiales y tecnologías de impresión continúan expandiendo las posibilidades de lo que se puede lograr, convirtiéndola en una parte integral de los procesos de fabricación modernos. Ver figura 2.

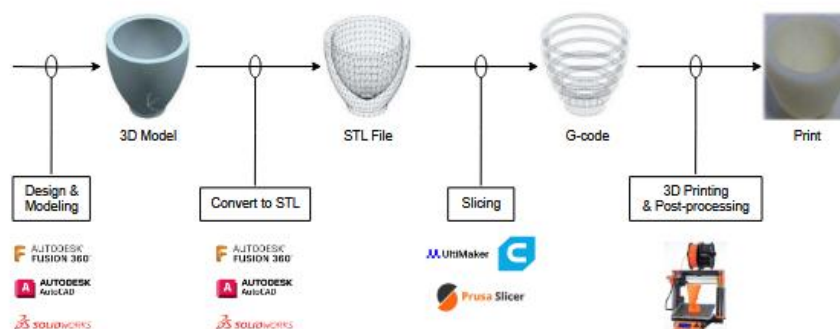


Ilustración 2. Flujo de trabajo general del proceso de fabricación aditiva

2.1.1. Diseño y modelado

La fase de diseño marca el inicio del proceso, donde la creación de un modelo 3D es fundamental. Utilizando herramientas de Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés). Esta etapa se caracteriza por una planificación meticulosa de cada aspecto, asegurando que cada curva, borde y dimensión cumpla perfectamente con los requisitos del producto.

Varios factores críticos influyen en el diseño:

- **Complejidad del diseño y consideraciones del material:** El software CAD facilita la creación de diseños complejos que a menudo son imposibles de lograr mediante métodos tradicionales (torneado, fresado tradicional). La elección del material es crucial, ya que sus propiedades (durabilidad, flexibilidad, resistencia térmica) deben tenerse en cuenta con la aplicación prevista.
- **Limitaciones tecnológicas y orientación del objeto:** Tecnologías como el modelado por deposición fundida (FDM), la estereolitografía (SLA) o la sinterización selectiva por láser (SLS) tienen especificaciones únicas de resolución y precisión. Además, la orientación del modelo es clave para optimizar la calidad, la resistencia y la necesidad de estructuras de soporte.
- **Estrategias de optimización:** Se emplean técnicas como la optimización topológica (para eficiencia de material) y el vaciado (hollowing) para reducir el tiempo y el costo sin comprometer la integridad estructural.

2.1.2. Conversión a STL

Una vez finalizado el modelo 3D, se exporta como un **archivo STL**. Este formato actúa como puente entre el diseño digital y la realización física, simplificando el modelo al descomponer su superficie en una serie de triángulos (**teselación**).

- **Características:** La resolución depende del tamaño de los triángulos; triángulos más pequeños ofrecen mayor detalle, pero aumentan el tamaño del archivo.
- **Integridad:** El modelo debe ser "estanco" (watertight), sin huecos ni errores en las normales (vectores que indican la dirección de la superficie), ya que los modelos no-múltiples (non-manifold) provocan errores de impresión.

2.1.3. Slicing (Laminado)

El *slicing* es el proceso donde un software especializado (laminador) transforma el archivo STL en una serie de capas horizontales delgadas.

- **Generación de G-code:** El resultado principal es el **G-code**, un lenguaje de programación para maquinaria CNC que contiene instrucciones precisas sobre los movimientos del cabezal, la velocidad de extrusión y las rutas a seguir.
- **Personalización de parámetros:** Aquí se definen la altura de capa, la densidad de relleno (*infill*), las estructuras de soporte y la velocidad de impresión.
- **Simulación:** La mayoría de los programas permiten previsualizar la impresión para detectar problemas potenciales (como paredes demasiado delgadas o falta de soportes) antes de gastar material.

2.1.4. Preparación, Impresión y Post-procesamiento

Con el G-code listo, se prepara la impresora: se instala el material (filamento en FDM o resina líquida en SLA), se nivela la base y se precalientan los componentes.

- **Impresión:** La boquilla o el láser sigue las rutas del G-code, depositando o curando material en capas sucesivas hasta formar el objeto.
- **Post-procesamiento:** Es la etapa final para mejorar las propiedades físicas y la estética. Incluye:
 - Eliminación de soportes.
 - Acabado superficial (lijado, pulido o baños químicos).
 - Curado adicional bajo luz UV (para resinas).
 - Tratamientos térmicos o mecanizado de precisión (especialmente en metales).

2.1.5. Desafíos actuales

A pesar de su potencial, persisten varios retos:

- **Propiedades mecánicas:** Es necesario mejorar las propiedades físicas de los materiales impresos.
- **Escalabilidad:** Lograr aumentar el tamaño de los procesos de impresión sin comprometer la precisión ni las propiedades del material.
- **Integración:** Incorporar la impresión 3D a gran escala en los ecosistemas de manufactura y construcción ya existentes.
- **Logística y Medio Ambiente:** Retos en el transporte y operación de impresoras gigantes en el sitio de obra, así como preocupaciones sobre el consumo energético y la sostenibilidad de los materiales.

La investigación y el desarrollo actuales buscan resolver estos problemas mediante la mejora de las fórmulas de los materiales, las tecnologías de impresión y la eficiencia de los procesos, allanando el camino para una adopción más amplia. Un ejemplo notable es la impresora **Crane Wasp**, diseñada para construir viviendas utilizando materiales locales (Figura.3).



Ilustración 3. Crane Wasp

2.2. Ensayos no Destructivos (END) y técnica UT para materiales de fabricación aditiva

2.2.1. Ensayos No Destructivos (END)

Los ensayos no destructivos (END) se han convertido en un paso necesario en el aseguramiento de la calidad de los componentes metálicos fabricados mediante AM. Para realizar una evaluación de calidad exhaustiva de estos componentes, muchos académicos e instituciones de investigación han dedicado esfuerzos considerables a investigar la aplicabilidad y eficacia de diversas tecnologías NDT en el campo de la fabricación aditiva.

La radiografía (RT) se ha utilizado ampliamente en la inspección de componentes de fabricación aditiva (AM). Como se muestra en la Fig.4, los defectos internos de un componente pueden revelarse claramente con imágenes de RT. Además, la RT puede utilizarse tanto para ensayos no destructivos en línea como fuera de línea, y en la mayoría de los materiales, con una excelente sensibilidad de detección para grietas grandes, poros y otros defectos en componentes de AM.

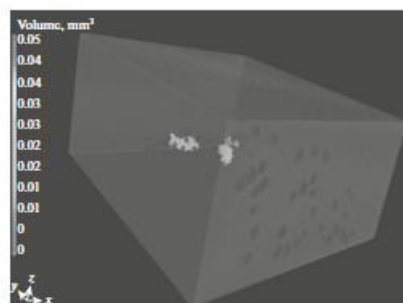


Ilustración 4. Radiografía utilizada como END

Los defectos superficiales o subsuperficiales en componentes de AM pueden detectarse con **ensayos de corrientes de Foucault (ET)**. La presencia de defectos perturba la uniformidad de la distribución espacial de la conductividad eléctrica en las proximidades

y, por tanto, altera la trayectoria de las corrientes de Foucault y la impedancia de la bobina que genera el campo magnético alterno. Al medir la impedancia de la bobina, se pueden detectar los defectos. Por ejemplo, defectos con una profundidad de 1,2 mm y un ancho tan pequeño como 0,2 mm son detectados mediante ET, como se muestra en la Fig.5 En diferentes artículos científicos, se ha combinado la ET con pruebas visuales para mejorar la sensibilidad de inspección. Sin embargo, las características electromagnéticas y la microestructura del material de AM pueden afectar la sensibilidad y precisión de la detección por ET, lo que dificulta la detección de defectos en componentes de AM complejos y, por tanto, limita la aplicabilidad de la ET en dichos componentes.

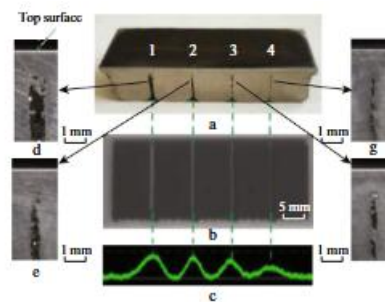


Ilustración 5. Corriente de Foucault utilizada como END

La termografía infrarroja puede utilizarse para la detección de defectos superficiales y la inspección en línea de componentes de AM sobre un área de inspección grande, como se muestra en la Fig.6, pero la capacidad de detección se ve afectada por las condiciones de fusión, el movimiento del baño de fusión y el campo de temperatura inestable en los procesos de AM. Desafortunadamente, este método tiene una profundidad de penetración limitada y requiere una calibración de temperatura antes de cada prueba. Esto complica el proceso de prueba y la precisión de detección, así como la resolución de imagen para diversos defectos.

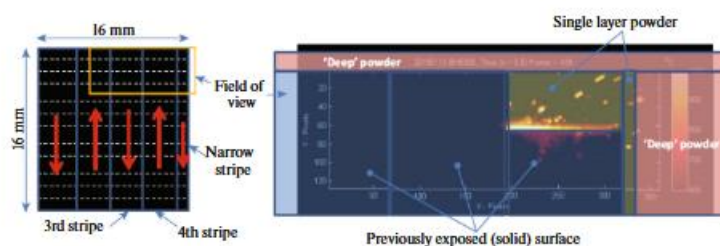


Ilustración 6. Termografía utilizada como END

2.2.2. Tecnología UT para componentes metálicos de AM.

Como se ha comentado, las propiedades estructurales de los componentes de AM presentan características estratificadas (por capas).

En general, la capacidad de detección de un ensayo no destructivo por ultrasonido se ve muy afectada por el material, lo que se refleja principalmente en las características del grano y la estructura del mismo. Las características estratificadas de los componentes de AM provocarán una grave desviación y dispersión de la onda. Estos factores influirán directamente en la precisión, la resolución de la imagen y la capacidad de identificación de defectos de los END por ultrasonido en componentes de AM.

La Figura 7 muestra imágenes de C-scan ultrasónico de defectos artificiales escaneados desde diferentes direcciones en un componente de AM. Dado que las imágenes de los defectos se generaron basándose en la suposición de que el material base es homogéneo e isotrópico, las imágenes ultrasónicas de los defectos son considerablemente diferentes de los defectos reales en cuanto a tamaño, forma y dirección de propagación de grietas. Por lo tanto, los parámetros de detección y los modelos de detección ultrasónica para materiales isotrópicos no funcionan bien para la detección de defectos en componentes de AM.

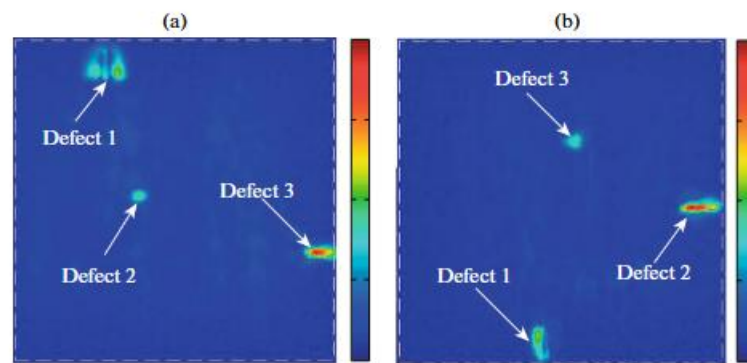


Ilustración 7. Defectos de un material AM de diferentes direcciones por UT.

el L-UT (ultrasonic – laser) se utilizó para detectar la presencia de un defecto artificial (agujero) y para generar imágenes de los defectos en la probeta de AM. El principio de la inspección mediante L-UT se muestra en la Fig. a; las interacciones de las ondas con los defectos inducen desplazamientos superficiales que pueden detectarse mediante interferometría. Esta técnica permite la inspección de cada capa individual de los materiales de AM. Por tanto, la monitorización en línea y el control de bucle cerrado del proceso de AM pueden lograrse utilizando L-UT. Como se muestra en la Fig.8, se detectó un defecto superficial con un diámetro de aproximadamente 0.1 mm mediante L-UT en línea.

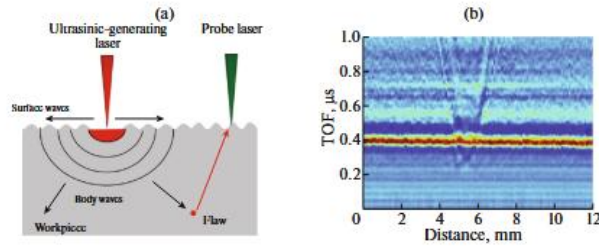


Ilustración 8. Experimento con L-UT

Stratoudaki utilizaron L-PAUT y el método de enfoque total (TFM) para la obtención de imágenes ultrasónicas remotas y sin acoplamiento de componentes de AM. Como se muestra en la Fig.9, se detectaron con éxito defectos con un diámetro de 0.5 mm y una profundidad de 26 mm por debajo de la superficie. La investigación mencionada demuestra que el L-PAUT ha heredado las características complementarias del no-acoplamiento del L-UT y el enfoque de haz controlable y post-procesamiento de datos del PAUT. En comparación con el L-UT, el L-PAUT mejora significativamente la calidad de imagen y puede soportar entornos extremos, lo que demuestra que la tecnología L-PAUT tiene un potencial enorme en la inspección en línea para la AM.

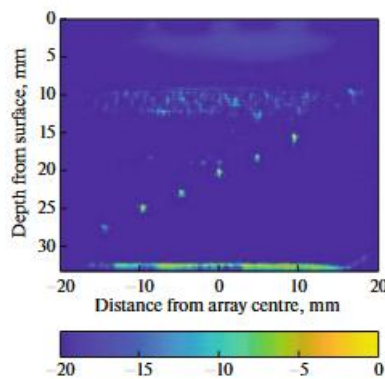


Ilustración 9. Experimento Stratoudaki

2.3. Marco teórico.

2.3.1. Bases Físicas: Elasticidad y Propagación de Ondas

El estudio de la propagación ultrasónica requiere un análisis riguroso de la mecánica de medios continuos.

- **Variables y Ecuaciones Básicas**

El comportamiento de un cuerpo bajo deformación se describe mediante el vector de desplazamiento $u = x - x^0$. Para estudiar la deformación, recurrimos al tensor de Lagrange, simplificado bajo la hipótesis de pequeños desplazamientos $\epsilon_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i})$.

La relación entre tensiones σ_{ij} y deformaciones ϵ_{kl} se establece mediante la ley constitutiva de Hooke:

$$\sigma_{ij} = c_{ijkl} \epsilon_{kl}$$

donde c_{ijkl} es el tensor elástico de cuarto orden. En materiales isótropos, al comportarse igual en todas las direcciones, el tensor elástico sólo tiene dos coeficientes independientes conocidos como los coeficientes de Lamé (λ y μ):

En materiales isótropos, al comportarse igual en todas las direcciones, esta relación se simplifica utilizando los coeficientes de Lamé (λ y μ):

$$\sigma_{ij} = 2\mu \epsilon_{ij} + \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk}$$

Donde:

μ : Módulo de cizalladura

λ : Relaciona la resistencia con cambios de volumen

δ_{ij} : Delta de Kronecker (i = j vale 1, i ≠ j vale 0)

- **Ecuación de Ondas**

A partir de la segunda ley de Newton (equilibrio dinámico), se obtiene la ecuación del movimiento:

$$\sigma_{ij,j} + b_i = \rho \ddot{u}_i$$

Donde:

$\sigma_{ij,j}$: Representa como varían las fuerzas internas dentro del cuerpo

b_i : Fuerzas externas al cuerpo

$\rho \ddot{u}_i$: Es la similitud a la masa * aceleración

2.3.2. La END Clásica: Configuración y Operativa

La técnica clásica de pulso-eco destaca por ser sensible a discontinuidades superficiales y subsuperficiales, ofreciendo alta precisión en la determinación de posición y tamaño de reflectores.

- **Ventajas:** Alta capacidad de penetración, resultados instantáneos y mínima preparación de muestra.
- **Limitaciones:** Dependencia de la calidad superficial (requiere acceso y acoplante), necesidad de entrenamiento especializado y posible atenuación elevada en materiales granulares.

2.3.3. Fundamentos de la Propagación de Ondas.

La caracterización de un material mediante ultrasonidos se basa en el comportamiento de las ondas elásticas. En medios sólidos, la energía se propaga a través de ondas longitudinales (compresión) y transversales (corte).

2.3.3.1. Velocidades de Propagación (C_p y C_s)

Las velocidades de fase dependen de las propiedades elásticas intrínsecas del material (Módulo de Young E , Módulo de Corte G , Coeficiente de Poisson ν) y su densidad (ρ):

- **Velocidad de onda longitudinal (C_p):**

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1 - \nu)}{\rho(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$$

Estas ondas viajan por la compresión y expansión del material en la dirección de propagación.

- **Velocidad de onda transversal (C_s):**

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

Estas ondas, también llamadas de corte, provocan un desplazamiento perpendicular a la trayectoria, fundamentales para detectar grietas transversales.

2.3.3.2. Atenuación Acústica (α)

La atenuación representa la pérdida de amplitud de la señal debido a la absorción (conversión en calor) y, principalmente en materiales heterogéneos, a la **dispersión** (*scattering*) en los límites de grano. Se modela mediante un decaimiento exponencial:

$$A(x) = A_0 e^{-\alpha x}$$

Donde α (coeficiente de atenuación) es altamente dependiente de la frecuencia (f) y el tamaño de grano (D). En la región de Rayleigh (donde la longitud de onda es mucho mayor que el tamaño de grano), la atenuación crece según:

$$\alpha \propto f^4$$

2.3.3.3. El campo cercano (o zona de Fresnel) y refracción.

El campo cercano es esa región inmediatamente frente al transductor donde la presión acústica fluctúa violentamente debido a la interferencia constructiva y destructiva. Ensayar dentro de esta zona es arriesgado porque un defecto pequeño podría dar una señal mayor que uno grande, o simplemente pasar desapercibido.

Para un transductor circular de cristal plano, la longitud del campo cercano (N) en un medio homogéneo se define como:

$$N = \frac{D^2 * f}{4 * v}$$

Donde:

- D : Diámetro del transductor.
- f : Frecuencia de transductor (depende del cristal piezoeléctrico).
- v : Velocidad de propagación del sonido en el medio, en nuestro caso, es el agua como medio de trabajo (cuba de inversión).
- λ : Longitud de onda ($\lambda = v/f$).

Si el campo cercano (N) termina dentro del agua, cuando el sonido llega a la probeta de acero, el haz ya es **homogéneo y predecible**. Esto tiene tres ventajas críticas para tus ensayos:

- **Cuantificación real:** En el campo lejano, si un defecto es el doble de grande, la señal será (generalmente) el doble de alta. En el campo cercano, un defecto grande podría dar una señal pequeña debido a las interferencias negativas.
- **Además, se evita** que las fluctuaciones de presión del propio haz se confundan con variaciones en el material o defectos.

Además, también se debe tener en cuenta, como va a incidir el frente de onda en la entrada de la probeta ya que habría que considerar la **refracción**:

1. **Longitud de onda efectiva:** Cuando el haz pasa del agua al acero, la longitud de onda cambia drásticamente:

$$\lambda_{acero} = \frac{v_{acero}}{f}$$

Como la velocidad en el acero ($v_{acero} \sim 5900$ m/s) es casi 4 veces la del agua ($v_{agua} \sim 1480$ m/s), la longitud de onda se cuatriplica y el haz se vuelve menos "direccional" dentro del metal.

2. **La refracción** ocurre cuando el haz de ultrasonido cruza la frontera entre el agua y el acero. Al cambiar de medio, cambian dos cosas: la velocidad y la frente de onda.

La Ley de Snell es la regla matemática que gobierna este cambio. Si el haz entra con un ángulo (inspección angular), se desvía. Si entra recto (incidencia normal), no se desvía, pero sufre un cambio en el frente de onda:

$$\frac{\sin(\theta_{agua})}{v_{agua}} = \frac{\sin(\theta_{acero})}{v_{acero}}$$

En tu cuba (Incidencia Normal): El ángulo es 0, así que el haz sigue recto, pero la longitud de onda (λ) se alarga, debido al cambio de velocidades (ya que se cuatriplica)

Además, es muy importante la colocación del hidrófono, es decir, si está detrás de la probeta, estás midiendo la **transmisión total**. Las fluctuaciones que veas pueden deberse a ondas estacionarias dentro de la probeta o a que la probeta está situada justo en una zona de interferencia del campo cercano del emisor.

El uso del **hidrófono** al otro lado de la probeta:

1. **El haz se ensancha:** Debido a la mayor velocidad en el acero, el haz tiende a divergir (abrirse) más rápido una vez que entra en campo lejano.
2. **Pérdidas por transmisión:** En la interfaz (donde ocurre la refracción), no toda la energía pasa. Gran parte se refleja de vuelta al transductor. Solo una fracción (aprox. el 12% de la presión en una interfaz agua-acero perfecta) entra realmente en la probeta para ser recogida por tu hidrófono.

2.3.3.4. Impedancia acústica (Z).

La **impedancia acústica (Z)** es, en términos sencillos, la **resistencia** que un material opone al paso de las ondas sonoras. Es el concepto más importante para entender por qué el sonido se refleja o se transmite al pasar del agua al acero en tu cuba.

Se define matemáticamente como el producto de la densidad del material por la velocidad del sonido en el mismo:

$$Z = \rho * v$$

Donde:

- ρ : Densidad del material (kg/m^3).
- v : Velocidad del sonido en ese material (m/s).

2.3.3.5. Tiempo de vuelo

El equipo de ultrasonido (palpador) envía una onda acústica de alta frecuencia al material. Esta onda viaja hasta que encuentra una "interfase" (el final de la pieza o un defecto) y rebota. El tiempo que tarda en ir y volver es el **tiempo de vuelo**.

Para calcular la profundidad de un defecto o el espesor de una placa, usamos la relación entre velocidad, tiempo y distancia. Dado que el sonido tiene que ir y volver, la distancia recorrida es el doble de la profundidad (d):

$$d = v * t$$

Donde:

d : Profundidad o espesor del material.

v : Velocidad del sonido en ese material específico (por ejemplo, en el acero es aproximadamente 5900 [m/s] para ondas p).

t : Tiempo de vuelo medido por el equipo.

Para ver la onda reflejada en el osciloscopio en modo transmisión directa te fijas principalmente en un solo pico de llegada:

- **Si la pieza está sana:** Verás un pico de señal muy claro y alto en la pantalla. El tiempo de vuelo (ToF) representará el trayecto de una sola dirección (el espesor de la pieza).
- **Si hay un defecto (grieta, poro o delaminación):** El defecto bloquea o dispersa la onda. En la pantalla verás que el pico **disminuye de altura (amplitud)** o desaparece por completo.

3. Campaña de ensayos

A continuación, en este capítulo, se va a describir que tipo de probetas se va a ensayar y el equipo utilizado.

3.1. Descripción de probetas

En este ensayo se va a ensayar 3 tipos de probetas:

- Sin hendidura /grieta superficial
- Con hendidura superficial con una profundidad de 1,42 [mm]

Las hendiduras se realizaron con una sierra de mano, por tanto, la profundidad no se pudo obtener exacta, es decir, se hizo una grieta con una profundidad aproximada.

Por otro lado, se realiza la obtención de dimensiones de los dos tipos de calidad del acero:

- **Material 1:** Sección rectangular con tres taladros pasantes no roscados con dimensiones de la tabla, el cual, en uno de ellos se introduce a presión con el otro tipo de material.
- **Material 2:** Sección circular con dimensiones detalladas en la tabla.

En las siguientes se detalla los valores de dichos materiales

Material 1	Longitud [mm]	Altura[mm]	Anchura[mm]
Acero	90	150	20
Acero	150	Ø6	Ø6

Tabla 1.Descripción dimensional sobre las probetas de ensayos

3.2. Descripción de equipo ultrasónico.

Para detallar todo el equipo, se exponen un par de fotos con el equipo utilizado:

3.2.1. Generador de señal

Es el encargado de "crear" la señal eléctrica que luego se convertirá en sonido. Permite definir la frecuencia exacta (caso práctico de 10 MHz) y el tipo de pulso que se enviará al transductor ultrasónico. El generador produce una diferencia de potencial (voltaje) que oscila a una frecuencia determinada. En ultrasonidos, suele trabajar en modo "**Burst**" (ráfaga):

- No envía una señal infinita, sino un pequeño paquete de ciclos (en nuestro caso sobre 20-50 ciclos de onda).
- Esto es necesario para que el sonido viaje como un pulso definido y el hidrófono pueda identificar claramente el inicio y el fin de la señal.

Cuando ajustas el generador al **30%**, estás controlando el voltaje de salida (la "fuerza" del golpe eléctrico al cristal). Se suele dejar en valores bajos/medios por tres razones técnicas:

- **Evitar la Cavitación:** En el agua de la cuba, si aplicas demasiada potencia a 10 [MHz], puedes crear microburbujas en la cara del transductor (cavitación). Estas burbujas bloquean el sonido y pueden dañar la superficie del transductor.
- **Linealidad del Transductor:** Los cristales piezoeléctricos tienen un límite. Si los excitas al 100% de la potencia del generador, pueden empezar a vibrar de forma no lineal, distorsionando la señal y generando armónicos que ensucian tus datos.
- **Protección del Hidrófono:** Los hidrófonos son instrumentos de precisión muy sensibles. Un chorro de energía ultrasónica al 100% a corta distancia podría saturar el preamplificador del hidrófono o incluso dañar su delicada membrana cerámica.



Ilustración 10. Generador de señal.

3.2.2. Osciloscopio Digital (Agilent MSO6054A)

Es el equipo central de visualización.

Captura y muestra las señales eléctricas de los ultrasonidos en tiempo real. Permite medir la amplitud, la frecuencia y, lo más importante en UT, el **tiempo de vuelo** (el tiempo que tarda la onda en ir y volver).

- **Muestreo (Sampling):** El osciloscopio captura la señal del voltaje que llega del hidrófono a una velocidad de hasta **4 GSa/s** (4 mil millones de muestras por segundo). A 10 MHz, esto significa que dibuja cada onda con 400 puntos, lo que te da una curva perfecta y no una línea quebrada.
- **Conversión Analógico-Digital (ADC):** Transforma la presión mecánica que el hidrófono convirtió en voltios en datos binarios que el procesador del Agilent puede manipular (para hacer cálculos de amplitud o FFT).
- **Triggering (Sincronización):** Es lo más importante. Sin el *trigger*, verías una mancha verde borrosa. El osciloscopio espera a que la señal del generador alcance un voltaje específico para empezar a dibujar, logrando que el pulso de ultrasonido parezca "estático" en la pantalla.
- **Ancho de Banda:** Para ver una señal de 10 MHz con total nitidez, necesitas un osciloscopio que soporte al menos 5 veces esa frecuencia (50 MHz). Al tener **500 MHz**, el Agilent asegura que no perderás los **armónicos** (frecuencias secundarias) que se generan cuando el sonido atraviesa el acero. Si usaras un osciloscopio barato de 20 MHz, verías la señal deformada y con menor amplitud de la real.
- **Resolución Temporal (Precisión de nanosegundos):** Si se pretende medir el espesor de la probeta o detectar una micro-grieta, necesitas medir tiempos con una precisión extrema. Este Agilent permite usar los **Cursores** para medir la diferencia de tiempo entre el pulso que sale y el que llega al hidrófono con una resolución de picosegundos.
- **Integridad de la Señal (Bajo ruido):** El osciloscopio tiene una circuitería de entrada de muy alta calidad que no añade "ruido de fondo". Esto es vital cuando

tienes el generador al **30%**, por tanto, es imprescindible para distinguir la señal real de la interferencia eléctrica del laboratorio.

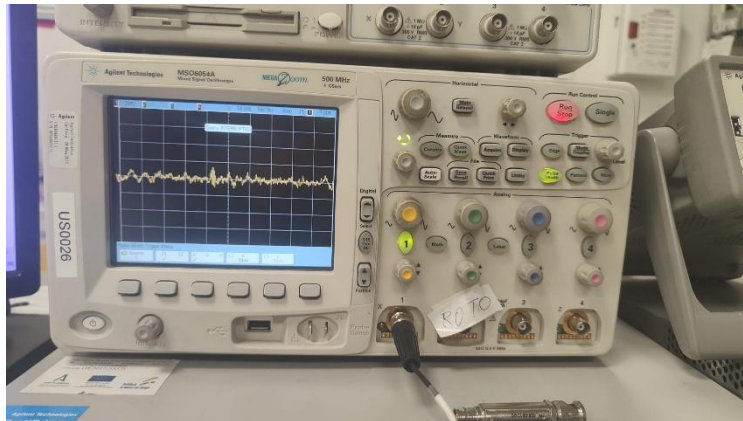


Ilustración 11. Osciloscopio Digital (Agilent MSO6054A)

3.2.3. Hidrófono Onda HNR-O500

Es un sensor diseñado específicamente para medir ondas de presión ultrasónicas dentro de líquidos (como el agua). Tiene varias funciones principales como para calibrar los transductores o para "mapear" el haz acústico en un tanque de inmersión.

A diferencia del transductor(emisor), que tiene un cristal grande para proyectar energía, el HNR-0500 tiene un elemento piezoeléctrico.

- **Efecto Piezoeléctrico Inverso:** Cuando las ondas de 10 MHz que atraviesan la probeta de acero golpean la punta del hidrófono, la presión mecánica deforma el cristal, generando una tensión eléctrica (milivoltios) proporcional a esa presión.
- **Diseño de Aguja:** Su estructura está optimizada para no distorsionar el campo acústico que intenta medir.



Ilustración 12. Hidrófono

3.2.4. Transductor ultrasónico 10MHz

Es un dispositivo **piezoeléctrico** que actúa como la interfaz entre el sistema electrónico y el material físico. Su función es doble: **convertir** energía eléctrica en vibraciones mecánicas (sonido) y viceversa.

Funcionamiento en el montaje:

Modo Transmisión: El transductor envía un pulso ultrasónico y es recibido, a través del hidrófono. Gracias al código implementado por Matlab, cada frente de onda recibido por el hidrófono, genera una imagen que nos permite estudiar como se ha producido la atenuación y tiempo de vuelo.

Acoplamiento por Inmersión: Al estar sumergido, el agua garantiza que el 100% de la cara del transductor esté en contacto acústico con el medio, evitando burbujas de aire que bloquearían la señal.

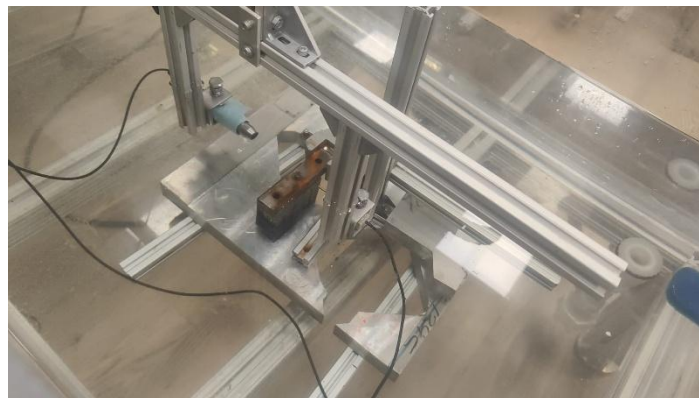


Ilustración 13. Transductor

3.2.5. Software de Control (MATLAB)

Es el "cerebro" que coordina todo. En la pantalla se ve código diseñado para configurar los ejes del motor (Configuración de ejes), definir parámetros como frecuencia (freq_MHz), voltaje y número de ciclos. Automatiza el movimiento del transductor y procesa los datos capturados para generar las imágenes de los defectos.

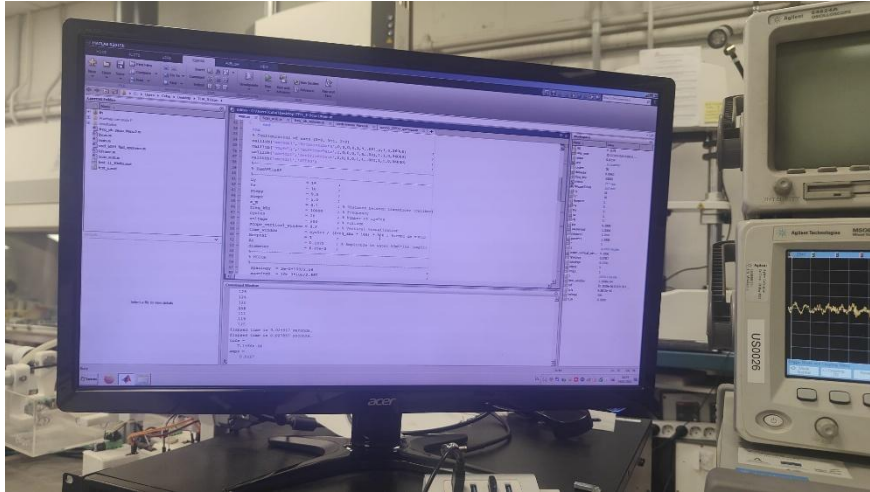


Ilustración 14. Software Matlab

3.2.6. Amplificador de Potencia RF

Toma la señal pequeña del generador de funciones y la aumenta a niveles de potencia mucho más altos para poder excitar transductores grandes o penetrar materiales muy densos. Al lado consta de un Botón de Parada de Emergencia (seta roja), esencial en equipos con partes móviles y alta potencia eléctrica.

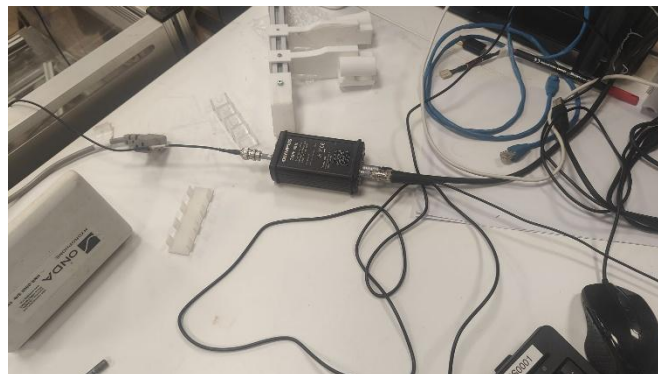


Ilustración 15. Amplificador de potencia

3.2.7. Sistema de Tanque de Inmersión y Posicionador (CNC)

Proporciona un entorno controlado para el ensayo. El agua actúa como medio de acoplamiento para que el ultrasonido pase del transductor a la pieza.

Es una estructura de perfiles de aluminio y un brazo motorizado que mueve el transductor con precisión sobre la pieza (escaneo C-scan).

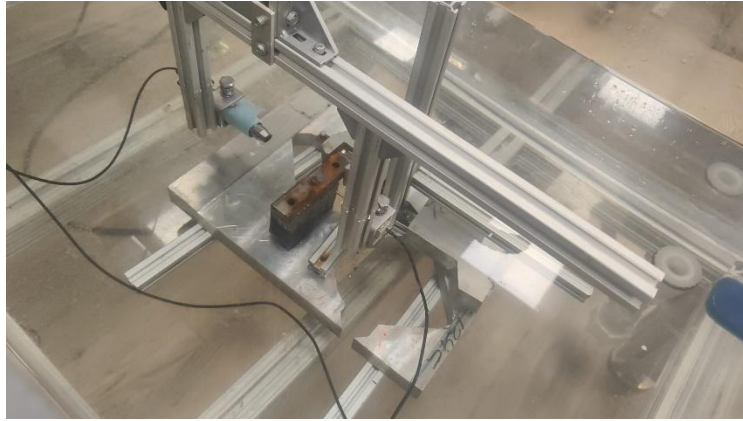


Ilustración 16. Sistema de Inmersión y Posicionador (CNC)

4. Resultados y discusión

A continuación, se detallan todos los resultados obtenidos tras la realización de estos 2 ensayos:

4.1. Sin hendidura / grieta superficial

En primer lugar, empezamos a realizar los ensayos con la probeta sin hendidura. En las siguientes figuras, se aprecian los resultados obtenidos de estos ensayos.

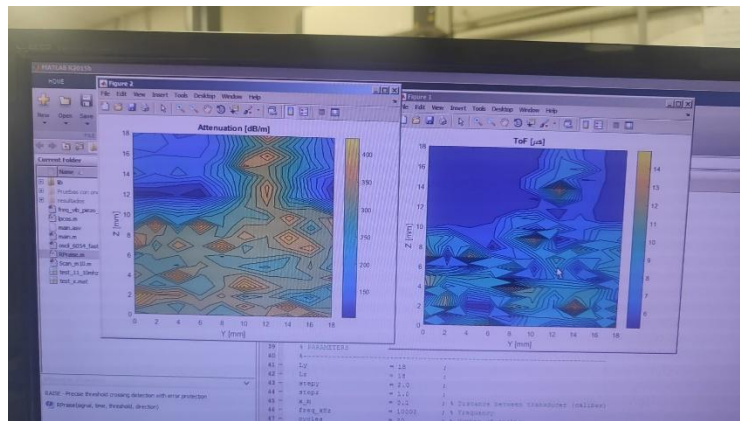


Ilustración 17. Ensayo 1 probeta sin hendidura

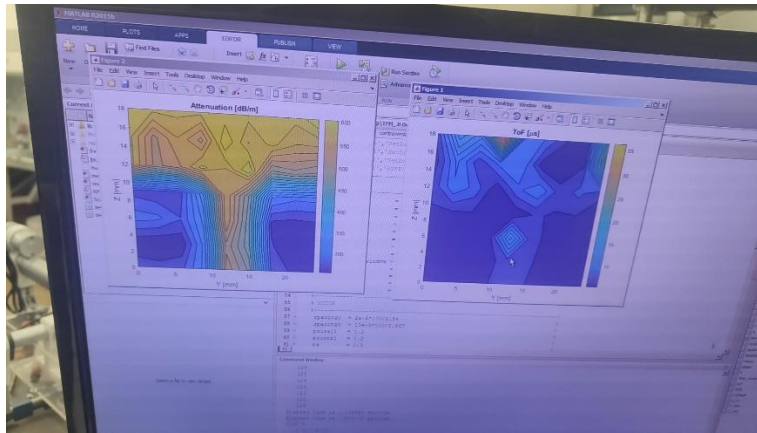


Ilustración 18. Ensayo 2 probeta sin hendidura

4.2. Con hendidura superficial con una profundidad de 1,42 [mm]

En segundo lugar, empezamos a realizar los ensayos con la probeta con hendidura. En las siguientes figuras, se aprecian los resultados obtenidos de estos ensayos.

Este ensayo es un poco diferente al otro debido a que se puso una esponja, material homogéneo, donde no va a atenuar el frente de onda. Para poder distinguir mejor el resultado cuando llegue el frente de onda a las probetas de ensayo.

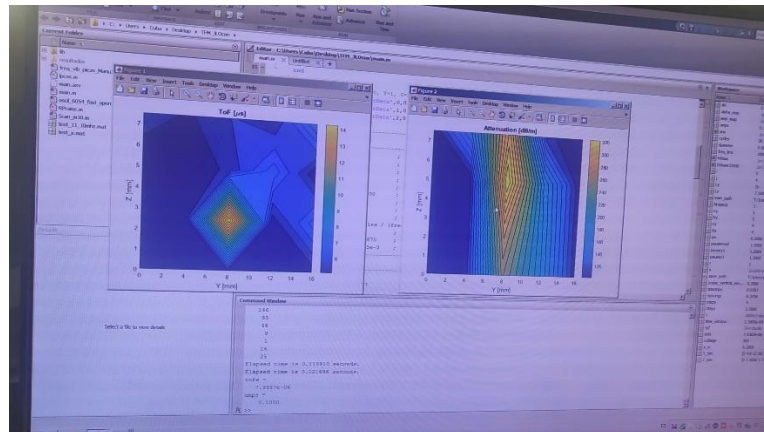


Ilustración 19. Ensayo 1 probeta con hendidura

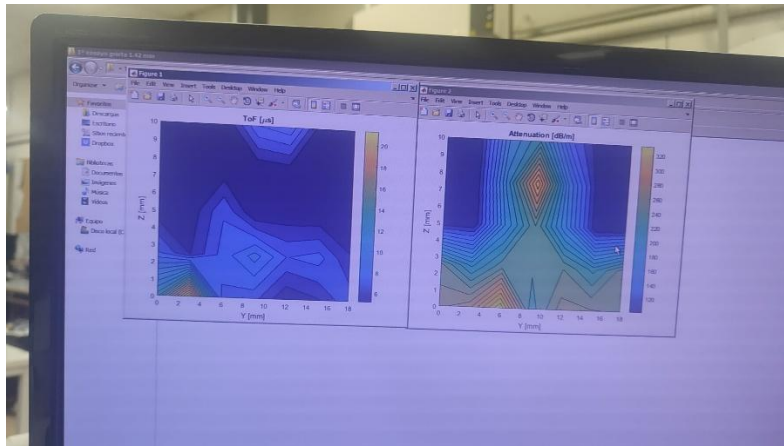


Ilustración 20. Ensayo 2 probeta con hendidura

Para finalizar este trabajo de la asignatura final. Se pueden hacer un par de comentarios sobre los resultados obtenidos de los ensayos:

1. Claramente en la imagen de la atenuación, deja ver, que se distinguen los dos tipos de acero de calidad diferente
2. Además, en el ensayo de probeta con grieta, en la imagen de atenuación se observa que aumenta la atenuación debido al tener una hendidura en el material 2
3. Por último, me gustaría dejar claro, que la imagen de ToF, es claramente errónea y difusa, ya que, no representa nada con claridad y no podemos obtener ninguna información del ensayo con esa imagen.

Como continuación de plan resolutivo, en cuanto, a la imagen de ToF, se revisará el código, ya que, se cree que no capta el máximo de la señal para obtener el ToF, sino que, capta en ruido electromagnético.

5. Estudio logístico y económico del proyecto escalado industrialmente.

Para realizar un estudio profundo de escalado logístico y económico, debemos mover el proyecto del entorno de **Laboratorio** hacia un entorno de **Prototipo Industrial**.

Se va a realizar un desglose detallado de los dos pilares para proyectar dicho trabajo a una escala industrial.

5.1. Estudio Logístico: De la Celda de Ensayos a la Planta de Producción

El objetivo logístico es la **integración no intrusiva**. En la industria de fabricación aditiva (especialmente en metales), el tiempo de ciclo es crítico.

5.1.1. Automatización y Flujo de Materiales

- **Inspección In-line vs. Off-line:** Debes proponer una transición desde la inspección en cuba de inmersión (lenta y requiere secado de la pieza) hacia el **Laser Ultrasonics (L-UT)**. Esto permite inspeccionar la pieza mientras se enfría o entre capas de deposición.
- **Sistemas de Posicionamiento:** Sustitución del sistema CNC de 3 ejes por un **brazo robótico de 6 ejes** sincronizado con el sistema de adquisición de datos. Esto elimina el cuello de botella logístico que supone el posicionar manualmente piezas de geometría compleja.

5.1.2. Gestión de Datos y Conectividad

- **Tratamiento de datos:** El volumen de datos de una inspección ultrasónica de alta resolución es masivo. Se requiere una unidad de procesamiento local para ejecutar los algoritmos de detección de imperfecciones en tiempo real.
- **Trazabilidad Digital:** Integración del reporte de defectos en el **Gemelo Digital** de la pieza, vinculando cada imperfección detectada con las coordenadas específicas de fabricación.

5.2. Estudio Económico Detallado

Para este análisis, utilizaremos la estructura de **Inversión de capital** y **Costes operativos**.

5.2.1. Inversión Inicial

Estimación de costes para una estación de inspección industrial automatizada:

Componente	Descripción	Coste Estimado (€)
Hardware de Ultrasonidos	Emisor/Receptor de alta fidelidad y transductores phased array.	15.000-30.000
Robótica de Posicionamiento	Brazo robótico industrial con protección ambiental (10 [kg] y alcance de 1100 [mm])	20.000-40.000

Componente	Descripción	Coste Estimado (€)
Software y Licencias	Desarrollo de algoritmos IA y licencias de análisis de señal (Matlab-Labview-Algoritmo de Análisis -Software de Trayectorias)	5.000-25.000
Integración y Seguridad	Vallado perimetral, PLC de seguridad y montaje.	1.000-5.000
Total Estimado		46.000-100.000

Tabla 2. Inversión inicial del proyecto a gran escala

5.2.2. Costes Operativos

- **Mantenimiento:** Calibración anual de los equipos y sustitución de transductores por desgaste (estimado en un 5% de la inversión inicial anual).
- **Consumo Energético:** Despreciable frente al proceso de fabricación aditiva, pero debe contabilizarse el sistema de refrigeración del láser.
- **Mano de Obra:** Transición de un técnico nivel III de END (Ensayos No Destructivos) a un operario de planta que solo supervisa el sistema automatizado (ahorro a largo plazo).

5. Bibliografía

1. **Rus, Profesor D.Guillermo.** Prados-Universidad de Granada. [En línea] 2025-2026.
2. *Research Progress on Ultrasonic Nondestructive Testing Technology for Metallic Additive Manufacturing Components.* **Duo Lyu, Hongwei Hu, Xiaowei Shen, Xiongbing Li and Xianghong Wang.** China : s.n., 2022.
3. *Analysis of the Suitability of Ultrasonic Testing for Verification of Nonuniform Welded joint of Austenitic-Ferritic Sheets.* **Lukasz Rawicki, Ryszard Krawczyk, Jacek Slania, Grzegorz Perun, Grzegorz Golanski and Katarzyna Luczak.** Poland : s.n., 2024.
4. *The IFMIF-DONES fusión oriented neutron source: evolution of the design.* **International Atomic Energy Agency : s.n., 2021.**
5. *Additive Manufacturing: A comprehensive Review.* **Longfei Zhou, Jenna Miller, Jeremiah Vezza, Maksim Mayster, Muhammad Raffay, Quentin Justice, Zainab al Tamimi, Gavyn Hansotte, Lavanya Devi Sunkara and Jessica Bernat.** USA : s.n., 2024.