




# Desarrollo de un sistema mecatrónico de espectroscopia de frecuencias acústicas para clasificar aceros de medio carbono con diferentes condiciones internas.

*Mechatronic acoustic frequency spectroscopy system development to classify medium carbon steels with different internal conditions.*

-  **Jose Alejandro Muñoz-Cisneros** estudiante de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica del Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Celaya (México) (m2303004@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0009-0008-1397-5401>), Ingeniero.
-  **Israel Aguilera-Navarrete** es Investigador por México de la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación asignado a ICIATEC (México) (iaguilerana@secihtl.mx) (<https://orcid.org/0000-0002-8860-4938>), Doctor.
-  **Luis Alejandro Alcaraz-Caracheo** es Profesor del Departamento de Ingeniería Mecánica del del Tecnológico Nacional de México – Instituto Tecnológico de Celaya (México) (alejandro.alcaraz@itcelaya.edu.mx) (<https://orcid.org/0000-0003-1319-0299>), Doctor.

**Resumen:** Se muestra el diseño de un sistema mecatrónico, basado en la metodología de la técnica no destructiva de excitación por impulso, para diferenciar aceros con diferentes fases microestructurales. El trabajo se desarrolla como un método no destructivo y que como todos presentan en su generalidad atributos como los costos bajos y menores tiempos de ejecución, así como sistemas de menor complejidad. El proceso propuesto se soporta en el estudio del espectro de frecuencias acústicas de los materiales metálicos, en otras palabras, la relación entre las condiciones de la microestructura del material y su emisión acústica. Este caso de estudio comparó probetas de aceros de medio carbono con diferentes condiciones internas basadas en los estándares geométricos de la norma American Society for Testing and Materials E1876-01. Las probetas ensayadas son de acero de medio carbono en tres condiciones: en condición de llegada; condición de homogeneidad y en condición de fases duales. El objetivo principal aborda la comparación acústica del mismo material, pero con diferentes fases estructurales bajo el principio del análisis y procesamiento de la señal acústica, la cual permite obtener espectros en el dominio de la frecuencia para identificar los diferentes módulos vibracionales y finalmente, evidenciar el cambio de la respuesta acústica de manera precisa, a los cambios internos que las probetas sufren al verse modificadas a nivel microestructural, constatando que el sistema mecatrónico basado en la técnica de excitación por impulso cuenta con la sensibilidad idónea para identificar el mismo tipo de metal aún con diferentes cambios internos.

**Palabras clave:** Mecatrónico, Espectros, Acústica, Aceros, Microestructura.

**Cómo citar:** Muñoz-Cisneros, J.A., Aguilera-Navarrete, I. y Alcaraz-Caracheo, A.C. (2024). Desarrollo de un sistema mecatrónico de espectroscopia de frecuencias acústicas para clasificar aceros de medio carbono con diferentes condiciones internas. *Tecnología, Ciencia y Estudios Organizacionales*, 6(12), pp. 215–226. <https://doi.org/10.56913/teceo.6.12.215-226>

Recepción: 30-09-24  
Aprobación: 23-10-24

**Abstract:** The design of a mechatronic system, based on the non-destructive methodology impulse excitation technique, is shown to differentiate steels with different microstructural phases. Developed as a non-destructive method, this approach offers practical benefits such as cost-effectiveness, shorter execution times, and less complex systems. The proposed process uses the acoustic frequency spectrum of metallic materials, in other words, the relationship between the conditions of the microstructure of the material and its acoustic emission. This case study was conducted to compare medium carbon steel test pieces with different internal conditions, based on the geometric standards of the American Society for Testing and Materials E1876-01. The test pieces tested are medium carbon steel in three conditions: arrival condition, homogeneity condition, and dual phase condition. The main objective is the acoustic comparison of the same material but with different structural phases under the principle of analysis and processing of the acoustic signal, which allows to obtain spectra in the frequency domain to identify the different vibrational modules and, finally, to demonstrate the change of the acoustic response in a precise way to the internal changes that the specimens suffer when they are modified at the microstructural level, proving that the mechatronic system based on the impulse excitation technique has the ideal sensitivity to identify the same type of metal even with different internal changes.

**Keywords:** Mechatronics, Spectrums, Acoustics, Steels, Microstructure.

### Introducción

En la ingeniería, es de extrema importancia conocer las propiedades mecánicas de los materiales, estas describen el comportamiento interno de estos, cuando se ven sometidos a diferentes combinaciones de cargas. Propiedades como: la rigidez, la dureza, la tenacidad, ductilidad y la conductividad entre otras, son solo algunas de las más mencionadas dentro de este campo. La tabulación de estos valores permite a los ingenieros y diseñadores, llevar a cabo el análisis pertinente para la elección más adecuada del material o los materiales que pueden satisfacer alguna aplicación en específico. Podemos encontrar estas variables y catalogarlas tanto como parámetros de diagnóstico, como parámetros de identificación; esto claramente está atribuido a la necesidad o especificación del diseño; investigación; experimentación o clasificación. El Módulo de Young conocido también como el Módulo Elástico se presenta como una de las propiedades mecánicas más importantes del material. Dentro de los procesos de diseño en las áreas industriales como la automotriz y la aeronáutica es importante tener los valores confiables del Módulo Elástico  $E$ . Este parámetro, como muchos otros, ya se encuentran registrados en la literatura. El desarrollo de nuevos materiales ha sido el motivo de los científicos a buscar información específica. En la curva esfuerzo-deformación se encuentra la pendiente del Módulo Elástico. Para la medición de esta región se requieren montajes experimentales muy costosos; que adicional a esto también son inadecuados para materiales que se catalogan como frágiles.

Actualmente se usan equipos alternos basados en ensayos de vibración no invasivos para el estudio de compuestos basados en polímeros. Lamentablemente estos equipos se encuentran en precios excesivos lo que los convierte en una opción poco viable (Tognana et al., 2010). Conocer los parámetros mecánicos es crucial para aplicaciones dirigidas a la aeronáutica, automotriz o dispositivos médicos con la finalidad de ayudar a prevenir fallas y accidentes. Dentro de los inconvenientes principales con las pruebas estándar de propiedades elásticas. Es el requerimiento de máquinas especializadas que conllevan una configuración experimental costosa, lenta y un personal calificado, para la preparación de las muestras. Por lo que, típicamente estas condiciones solo se logran en un espacio controlado como lo es un laboratorio.

La técnica de excitación por impulso *I.E.T*, es una técnica sencilla de menor costo, muy rápida y sobre todo precisa en obtener parámetros como el Módulo Elástico y el Módulo de Corte. Esta técnica se puede usar para asegurarse de la calidad e identificar si el material recibido es el

solicitado. Como utilidad extra se puede aplicar para evaluar productos del área médica como tabletas. Los resultados son preliminares pero la técnica de excitación por impulso podrá ser una metodología interesante para el análisis de la anisotropía de las propiedades elásticas de los comprimidos (Mazel & Tchoreloff, 2020; Scislo, 2023). Los parámetros mecánicos no se obtienen con precisión utilizando métodos teóricos. Existe poca investigación para identificar el Módulo de Young y el Módulo de Corte de compuestos de laminado. A través de simulaciones numéricas e investigaciones experimentales, se demuestra que las fórmulas basadas en *I.E.T*, son aplicables para identificar parámetros mecánicos. Por lo que a través de este método se construyen modelos numéricos utilizando la herramienta computacional FEM ANSYS (Song et al., 2017).

En un sistema ingenieril con daños estructurales se ve reflejado en la modificación de sus modos de vibración. Estas modificaciones se presentan como cambios de parámetros modales (frecuencia natural, frecuencia modal y frecuencia de resonancia); esto es, cambios en las frecuencias naturales de la estructura (Salawu, 1997). Las frecuencias de resonancia se relacionan directamente con las dimensiones, la masa y las propiedades elásticas de un objeto sólido. A partir de estas frecuencias de resonancia, para una geometría simple, un material isotrópico y homogéneo, se pueden calcular los Módulos Elásticos (Roebben et al., 2000).

A través de ensayos mecánicos se puede predecir el comportamiento de los materiales de construcción bajo cargas extremas. La heterogeneidad de los compuestos del hormigón hace que su deformación sea no linealmente proporcional a la tensión aplicada en la región de deformación elástica (Thomaz et al., 2021). Un método no destructivo como lo es la técnica de excitación por impulso, debido a la naturalidad, ya previamente mencionada, permite caracterizar e identificar tanto materiales comerciales; como, el desarrollo e implementación de nuevos compuestos a estos. Una técnica con este tipo de configuración y su capacidad de medición acústica la vuelve ideal para equiparse desde el campo médico, hasta el campo ingenieril.

### Método

En esta sección se describe el diseño de un sistema mecatrónico en base a la técnica de excitación por impulso. Los autores, Buenrostro et al., (2022) presentan un modelo que relaciona el Módulo de Rigidez de un material y su frecuencia natural. Se sabe que la frecuencia natural es proporcional a la raíz cuadrada de la relación entre el Módulo de Rigidez y la masa, como se muestra en la ecuación (1).

$$W_o = \sqrt{(K/m)} \quad (1)$$

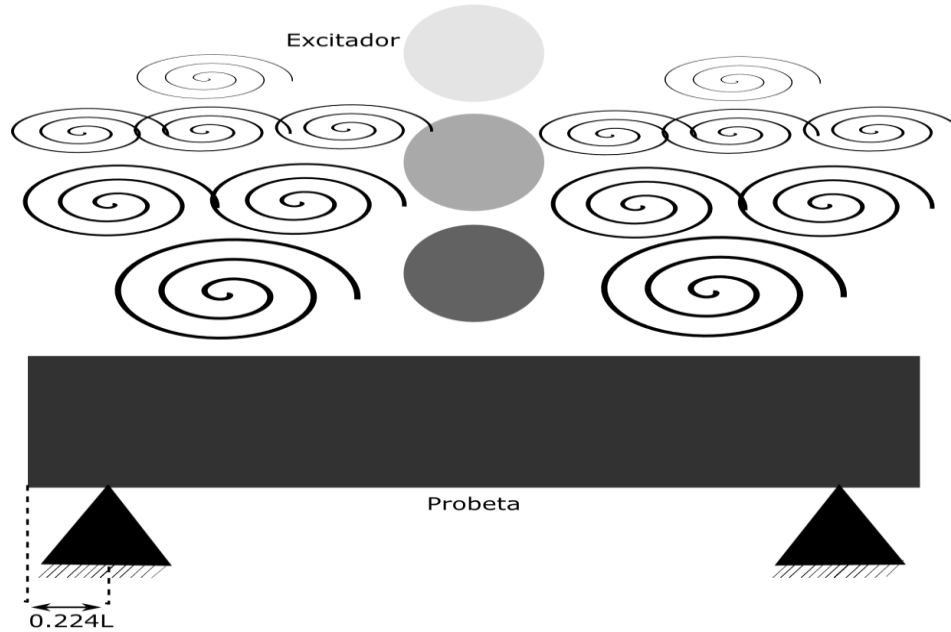
La ecuación (2) presenta que el Módulo de Rigidez es igual al producto del Módulo Elástico por el área y esto en relación entre su longitud. Ahora en esta ecuación se aprecia una analogía entre el Módulo de Young y el Módulo de Rigidez, por lo tanto, existe una relación entre el Módulo de Elástico y la frecuencia natural del material. De forma resumida la frecuencia natural del material contiene información del estado interno de este.

$$K = ((E * A)/L) \quad (2)$$

### Dispositivo experimental: Técnica de Excitación por Impulso

Se presenta una técnica no destructiva, que se base en generar una respuesta acústica a través de un impacto unitario en la zona de flexión (Figura 1). La configuración de los puntos nodales se encuentra a  $0.224L$  de la longitud total de la muestra, mediante análisis y procesamiento de señales usando la transformada rápida de Fourier, se trasforma la respuesta acústica en el dominio del tiempo a un espectro en el dominio de la frecuencia, con la finalidad de obtener la frecuencia resonante fundamental designada por la norma *ASTM 1876 – 01*.

**Figura 1.** Diagrama típico de la técnica de excitación por impulso



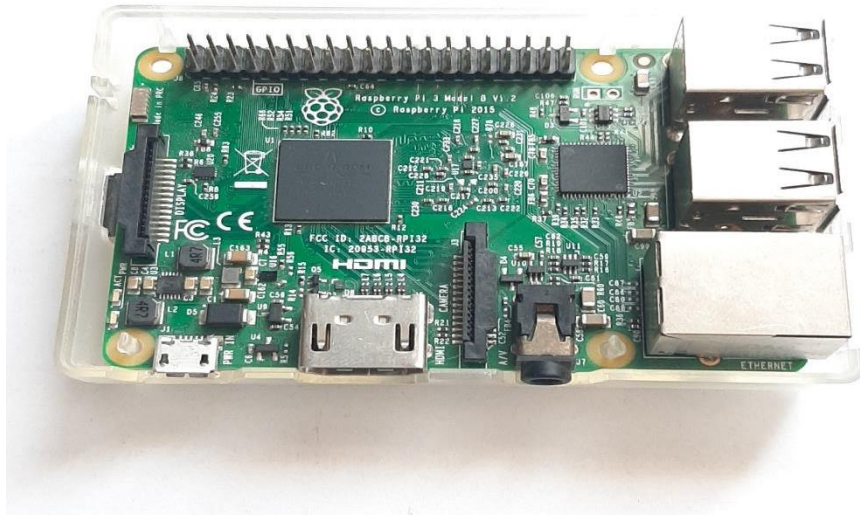
### Dispositivos

#### Tarjeta de desarrollo

Las tarjetas de desarrollo esta dirigidas principalmente al sector educativo, para implementar e investigar y así fomentar bases en el aprendizaje. El uso de una Raspberry Pi 3 Modelo B (Figura 2), forma parte de las tarjetas de desarrollo dentro del campo de las computadoras reducidas, conocidas como microcomputadoras. Para este modelo en particular, maneja las siguientes características técnicas.

- Quad Core 1.2GHz Broadcom BCM2837 64bit CPU
- 1GB RAM
- 40-pin GPIO
- 4 USB 2.0
- HDMI® tamaño completo.

**Figura 2.** Vista superior de una Raspberry Pi3 Modelo B de Raspberry Pi Foundation



### **Transductor**

En la atmósfera como medio, las ondas sonoras se vuelven audibles para los seres humanos si la frecuencia se encuentra en el rango de los 20 Hz  $\geq$  sonido audible  $\leq$  20 kHz. Las frecuencias superiores a los 20000 Hz se convierten en sonidos ultrasónicos; estos son inaudibles para las personas, en cambio existen algunos animales como los murciélagos que utilizan el ultrasonido como sonar con la finalidad de orientarse. También existe el siguiente extremo donde el sonido se vuelve inaudible cuando la frecuencia es menor a aproximadamente 20 Hz, a este tipo de frecuencias se le denomina infrasonido (Pichon et al., 2009). El transductor utilizado es un micrófono Lavalier del tipo condensador (Figura 3).

- Patrón polar: omnidireccional
- Respuesta de frecuencia: 50Hz-18 KHz
- Sensibilidad: -35dB 3dB (0dB = 1V / Pa a 1KHz)
- Voltaje de funcionamiento: 1.5V - 4.5V

**Figura 3.** *Micrófono Lavalier tipo condensador de la marca Takstar*



### ***Adaptador de audio***

El adaptador de audio (Figura 4) presenta las siguientes características:

- Calidad de sonido: Hi-Fi
- Entrada: USB 2.0 Tipo A macho
- Salida: Puertos auriculares de 3.5mm
- Frecuencia de muestreo: 44.1 KHz y 48 KHz
- Resolución de bits: 16 bits
- Respuesta de frecuencia: 20 Hz – 20KHz
- Compatible: Windows, Mac OS X, Linux PS4, PS5 y Raspberry Pi.

**Figura 4.** *Adaptador de audio de la marca UGREEN*



### Espécimen de muestra

El material de estudio se basa en acero de medio carbono, como bien se sabe esto debido por ser uno de los metales más utilizados en la industria metal-metalúrgica gracias a sus buenas combinaciones de resistencia, ductilidad y tenacidad. Se mecanizaron tres probetas cilíndricas con las dimensiones mostradas en la Tabla 1, ver Figura 5.

**Tabla 1**

*Geometría de las probetas de muestra*

Espécimen	Largo en milímetros	Diámetro en milímetros	Masa en gramos
Acero en condiciones de llegada	101.8	12.8	102
Acero en condiciones de homogeneidad	101.8	12.8	102
Acero en condiciones de fases duales	101.8	12.8	102

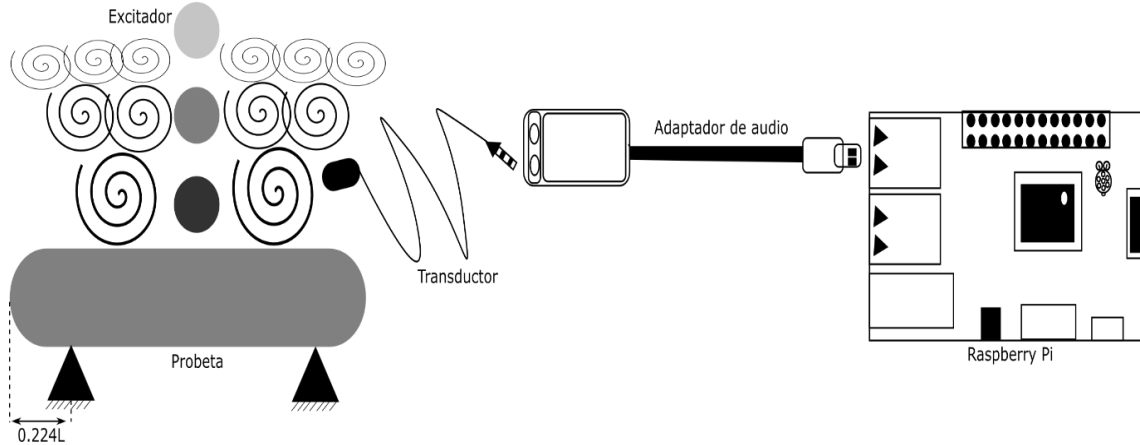
**Figura 5.** *Probetas de acero de medio carbono con diferente condición interna*



### Sistema Mecatrónico

El sistema mecatrónico diseñado en base al análisis de la naturalidad de la señal acústica, además de las principales características que abordan la técnica de excitación por impulso, las cuales son: bajos costos, rápida, eficiente y principalmente maneja una configuración simple y sencilla. El diagrama presente en la Figura 6, muestra la conexión entre los diferentes componentes del sistema mecatrónico.

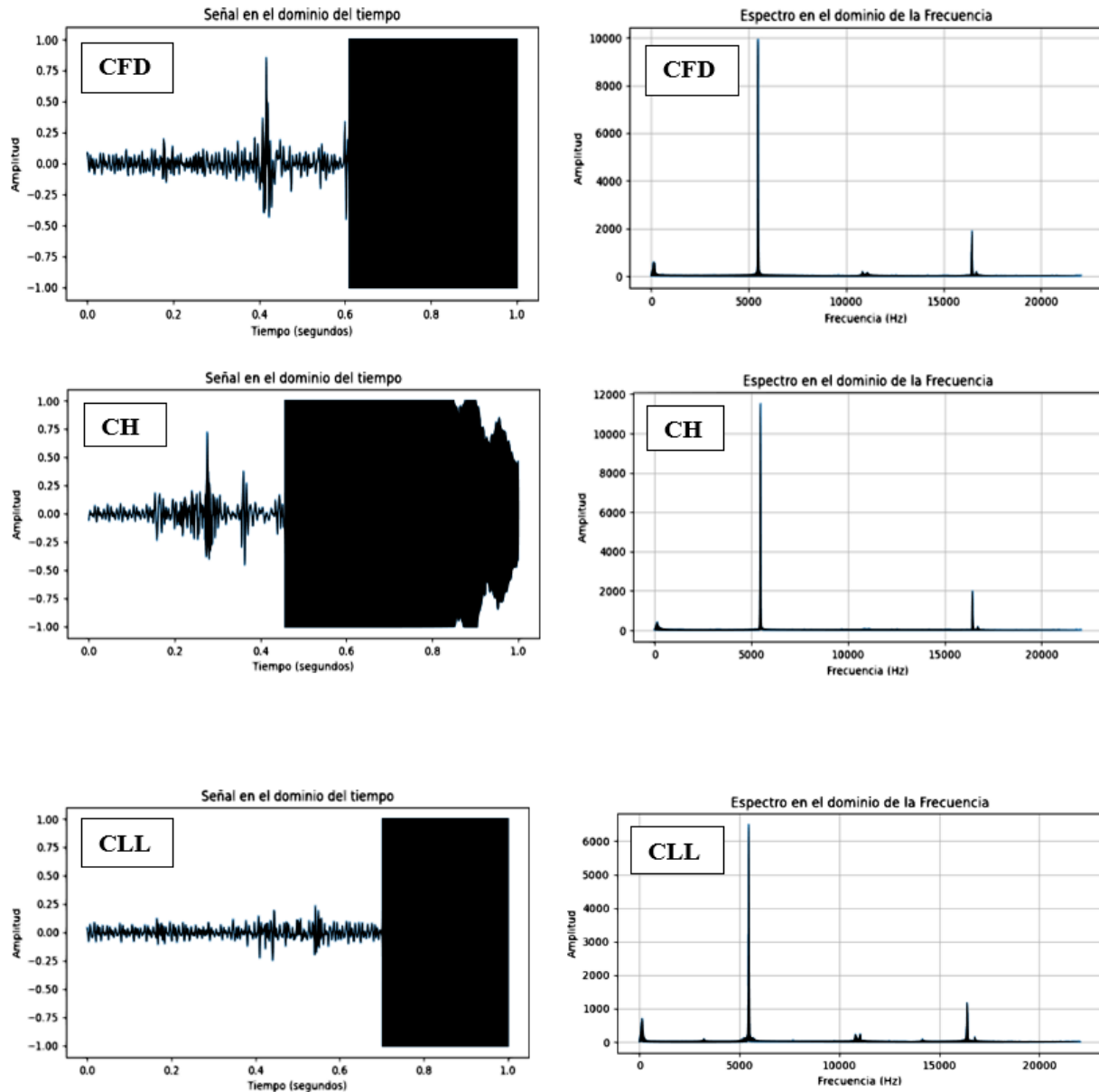
**Figura 6.** Diagrama del sistema mecatrónico basado en la técnica I.E.T



### Resultados

Se ensayaron tres probetas cilíndricas de acero de medio carbono con distintas condiciones internas. Una en condición de llegada, la segunda en condición de homogeneidad y la tercera en condición de fases duales. Se maneja la siguiente denominación: CLL = condición de llegada, CH = condición de homogeneidad y CFD = condición de fases duales. Las siguientes gráficas que se presentan en la Figura 7, representan una toma de las cinco replicas a las que se vieron sometidas durante la ejecución del ensayo, las tres probetas respetan las condiciones geométricas presentadas en la Tabla 1.

**Figura 7.** Espectros de frecuencia acústica, CFD = Condición de fases duales, CH = Condición de homogeneidad, CLL = Condición de llegada.



Las diferentes condiciones estructurales fueron sometidas a cinco repeticiones, donde el porcentaje del error relativo entre una medición y otra es  $\leq 0.01\%$ , de forma resumida el valor cuantitativo de la señal acústica es prácticamente el mismo para cada valor individual de la probeta por separado. En la Tabla 2, se muestra a detalle los datos de los distintos espectros de frecuencias acústicas, este valor describe que el comportamiento vibracional de cada una de las probetas es distinto entre estas.

**Tabla 2***Espectros de frecuencia del acero con diferente condición interna*

Espécimen	Replica 1	Replica 2	Replica 3	Replica 4	Replica 5	Moda	% error relativo
Condición de fases duales	5487.0 Hz	5486.0 Hz	5486.0 Hz	5486.0 Hz	5486.0 Hz	5486.0 Hz	0.01
Condición de homogeneidad	5479.0 Hz	5478.0 Hz	5478.0 Hz	5478.0 Hz	5478.0 Hz	5478.0 Hz	0.01
Condición de llegada	5464.0 Hz	5464.0 Hz	5464.0 Hz	5463.0 Hz	5464.0 Hz	5464.0 Hz	0.01


En base a la Tabla 2 se visualiza que las probetas de muestra en condición de llegada (CLL), tomando como referencia el valor de la moda, el cual es 5464 Hz, para la probeta en condición de homogeneidad (CH), el valor de la frecuencia es 5478 Hz y para la probeta en condición de fases duales (CFD), se tiene una frecuencia de resonancia de 5486 Hz. Las frecuencias anteriores nos indican una diferencia entre CLL y CH de 14 Hz, entre CLL y CFD de 22 Hz, por último, CH y CFD de 8 Hz. Estas diferencias en la frecuencia del acero abordan que a diferente cambio microestructural se genera una distinta respuesta acústica y por lo tanto se puede clasificar y distinguir aun tratándose del mismo acero con el mismo porcentaje de carbono.

### Discusión

Los metales se pueden encontrar en su forma pura, pero a través de aleaciones, distintos tratamientos y compuestos, se busca mejorar sus comportamientos mecánicos (Celada et al., 2019; Belcher et al., 2023; ZainElabdeen et al., 2024). Cabe mencionar que, en los diferentes sectores ingenieriles, se demuestra el fundamento y la consolidación de la técnica *I.E.T*, como una metodología de composición y caracterización de materiales compuestos (Nikonovich et al., 2023; Shvydyuk et al., 2023). Esta técnica no destructiva para ensayo de materiales se presenta como una herramienta para determinar la dependencia del Módulo Elástico con respecto al cambio de temperatura, donde se demuestra el potencial de adaptar la arquitectura y la estructura interna de la cerámica para fortalecer las tolerancias al daño en distintos rangos de temperatura (Schlacher et al., 2023). En este documento en la sección de resultados en la Tabla 2, muestra el cambio vibracional de las diferentes fases microestructurales del acero. El sistema mecatrónico presentado maneja la sensibilidad idónea para identificar las distintas firmas vibracionales que caracterizan a los materiales. La versatilidad del equipo es tan amplia, que permite su implementación en multi sectores dirigidos al diseño y desarrollo de nuevos materiales con propiedades mecánicas mejoradas, que buscan tratar las nuevas tendencias y combatir las demandas tecnológicas actuales.

## Referencias

- 1876-01, A. E. (2005). Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus, and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration. ASTM, 1876.
- Belcher, C. H., MacDonald, B. E., Apelian, D., & Lavernia., E. J. (2023). The role of interstitial constituents in refractory complex concentrated alloys. *Progress in Materials Science*, 137, 101140. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2023.101140>
- Buenrostro, B. F., Navarrete, I. A., Prado, J. M., Lázaro, H. J., & ., F. R. (2022). CLUSTERIZACIÓN EUCLIDIANA DE LA ESPECTROSCOPIA MECÁNICA COMPARATIVA EXCITADA POR IMPULSO EUCLIDEAN CLUSTERIZATION OF PULSE-EXCITED COMPARATIVE MECHANICAL SPECTROSCOPY. *DYNA New Technologies*, 9. <https://doi.org/10.6036/NT10594>
- Celada-Casero, C., B.M.Huang, Yang, J.-R., & D.San-Martin. (2019). Microstructural mechanisms controlling the mechanical behaviour of ultrafine grained martensite/austenite microstructures in a metastable stainless steel. *Materials and Design*, 181, 107922. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107922>
- Mazel, V., & Tchoreloff, P. (2020). Applicability of impulse excitation technique as a tool to characterize the elastic properties of pharmaceutical tablets: Experimental and numerical study. *International Journal of Pharmaceutics*, 590. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119892>
- Nikonovich, M., Costa, J. F., Fonseca, A. C., & Ramalho., A. (2023). Structural, thermal, and mechanical characterisation of PEEK-based composites in cryogenic temperature. *Polymer Testing*, 125, 108139. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108139>
- Pichon, A. L., Blanc, E., & Hauchecorne., A. (2009). *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5>
- Roebben, G., Basu, B., Vleugels, J., Humbeeck, J. V., & Biest., O. V. (2000). The innovative impulse excitation technique for high-temperature mechanical spectroscopy. *Journal of Alloys and Compounds*, 310, 284-287. [https://doi.org/10.1016/S0925-8388\(00\)00966-X](https://doi.org/10.1016/S0925-8388(00)00966-X)
- Salawu, O. S. (1997). Detection of structural damage through changes in frequency: a review. *Engineering Structures*, 19, 718-723. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(96\)00149-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(96)00149-6)
- Schlacher, J., Chlup, Z., Hofer, A.-K., & Bermejo., R. (2023). High-temperature fracture behaviour of layered alumina ceramics with textured microstructure. *Journal of the European Ceramic Society*, 43, 2917-2927. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2022.11.046>
- Scislo., L. (2023). Verification of Mechanical Properties Identification Based on Impulse Excitation Technique and Mobile Device Measurements. *Sensors*, 23, 5639. <https://doi.org/10.3390/s23125639>

- 
- Shvydyuk, K., Rodrigues, F., Nunes-Pereira, J., ascoa, J. P., Lanceros-Mendez, S., & Silva., A. (2023). Long-lasting ceramic composites for surface dielectric barrier discharge plasma actuators. *Journal of the European Ceramic Society*, 43, 6112–6121. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2023.05.040>
- Song, W., Zhong, Y., & Xiang., J. (2017). Mechanical parameters identification for laminated composites based on the impulse excitation technique. *Composite Structures*, 162, 255-260. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.005>
- Thomaz, W. d., Miyaji, D. Y., & Possan., E. (2021). Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00645>
- Tognana, S., Salgueiro, W., Somoza, A., & Marzocca., A. (2010). Measurement of the Young's modulus in particulate epoxy composites using the impulse excitation technique. *Materials Science and Engineering A*, 4619–4623. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2010.04.083>
- ZainElabdeen, I. H., Ismail, L., Mohamed, O. F., Khan, K. A., & Schiffer., A. (2024). Recent advancements in hybrid additive manufacturing of similar and dissimilar metals via laser powder bed fusion. *Materials Science & Engineering A*, 909, 146833. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2024.146833>