



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DE UN MATERIAL A ALTA TEMPERATURA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

GABRIEL ALEJANDRO CONTRERAS DURÁN

PROFESOR GUÍA

ALI AKBARI FAKHRABADI

MIEMBROS DE LA COMISIÓN

VIVIANA MERUANE NARANJO

KARIM PICHARA CARTES

SANTIAGO DE CHILE

2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: GABRIEL ALEJANDRO CONTRERAS DURÁN
FECHA: 2018
PROFESOR GUÍA: ALI AKBARI FAKHRABADI

DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UN SISTEMA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE LAS PROPIEDADES ELÁSTICAS DE UN MATERIAL A ALTA TEMPERATURA

En este trabajo se realiza una implementación de la metodología IET (Técnica de excitación a un impulso) para una muestra dentro de un horno, con la finalidad de medir sus propiedades elásticas en un rango amplio temperaturas.

Determinar las propiedades elásticas de un material, como el módulo Young y el coeficiente de Poisson, es importante por muchos motivos. Es esencial para el diseño estructural, pero también permite establecer el desempeño de nuevos materiales, comprobar la calidad de un proceso de manufactura y puede servir en el monitoreo de salud estructural.

En este trabajo se comienza estableciendo los antecedentes necesarios para comprender la teoría detrás de esta propuesta, incluyendo otros métodos utilizados para medir propiedades elásticas.

Para la implementación del método se desarrolla una estructura para excitar la muestra mediante un golpe, de esta forma obtener mediante el uso de un micrófono tipo sonda de alta sensibilidad el registro del sonido el cual serán utilizadas para el cálculo del módulo de elasticidad.

Para la validación del diseño se realiza la medición de dos materiales con propiedades elásticas ya conocidas con el método IET, estos son cobre y acero inoxidable 316.

Finalmente se obtiene el resultado del módulo elástico del acero inoxidable 316 para un rango amplio de temperatura, obteniendo de esta forma la curva del módulo de elasticidad en función de la temperatura, de esta forma validando el sistema excitador.

A mi familia, pareja y amigos

Agradecimientos

En primer lugar, quisiera agradecer a mi familia, por estar siempre presentes, apoyarme en mis decisiones; especialmente a mis padres que día a día desde mi niñez quisieron un buen futuro, y para ello, me regalaron lo más importante para ellos, mi educación. Mis hermanos, que me presionaron mucho para terminar lo antes posible este proceso.

A mis profesores guía e integrantes, Ali, Viviana y Karim, que en gran parte gracias a ellos me encuentro cerrando este proceso, todos muy comprensivos y siempre apoyando y dándose el tiempo de explicar todo lo necesario. También quisiera agradecer al profesor Juan Carlos, del taller de ingeniería mecánica, que siempre apuré para la fabricación del sistema para mi memoria; las largas conversaciones que tuvimos mientras trabajaba en mis piezas.

A todos mis profesores que me ayudaron a formarme profesionalmente en esta universidad.

A mi Jefe Gabriela que me ha contactado siempre para ofrecerme trabajo desde que me conoció en mi práctica profesional en el año 2014, por darme toda la posibilidad de finalizar mi memoria en todos los intentos que tuve; me siento muy feliz de haberla conocido, su personalidad, su conocimiento y por la buena persona que es.

A mis amigos: Valeskita, Guillermo, Guido, Don and Jerry, Nico, Gaby y Ernesto, Gonzalo, Juan, Villa, etc. que me apoyaron mucho en este proceso, siempre preocupados por mi progreso y apoyándome; también por los agradables momentos que siempre pasamos cada vez que nos juntamos. A mis compañeros de carrera por las largas horas de estudio en conjunto.

A Armando, que por muchos problemas que existan, siempre me motiva y apoya para poder concretar mis objetivos y proyectos que se me ocurren. Por acompañarme en este proceso. Siempre estaré muy agradecido.

A mi Lunita, que hasta el día hoy sigo extrañándola mucho, siempre entregó mucho cariño, compañía y felicidad.

En fin, muchas gracias a todos los que han contribuido en lo va de mi vida.

¡¡Que continúe la fiesta!!

Tabla de contenido

1. Introducción y Objetivos	1
1.1. Introducción	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo General	2
1.2.2. Objetivos Específicos.....	2
2. Antecedentes.....	3
2.1. Vibraciones con uno o más grados de libertad	3
2.1.1. Un grado de libertad	3
2.1.2. Dos o más grados de libertad.....	7
2.1.3. Respuesta a un impulso.....	11
2.2. Métodos para la identificación de las propiedades elásticas en sólidos	13
2.3. IET.....	16
2.3.1. Ventajas de la técnica de excitación a un impulso	18
2.3.2. Propiedades elásticas por IET	19
2.4. Método Euler-Bernoulli.....	21
3. Metodología	26
3.1. Diseño del sistema	26
3.2. Medición de módulo de elasticidad.....	27
4. Diseño y fabricación del sistema.....	28
5. Resultados y análisis	30
5.1. Montaje.....	30

5.2. Resultado experimental a temperatura ambiente	33
5.3. Módulo de elasticidad a distintas temperaturas.....	36
6. Conclusión	45
Bibliografía.....	47
ANEXO A	49
ANEXO B	57
ANEXO C	63
ANEXO D	68

Índice de tablas

Tabla 1. Características físicas de las muestras.	34
Tabla 2. Resumen resultados experimentales	35
Tabla 3. Parámetros del software de adquisición de datos.....	43

Índice de figuras

Figura 1. Masa adherida a un resorte [3]	3
Figura 2. Amplitud, período y fase de un movimiento sinusoidal [3]	4
Figura 3. Respuesta forzada de un sistema masa-resorte sin roce, excitado en su frecuencia de resonancia [3].....	6
Figura 4. Rigidez de una viga asociada a vibración transversal de la punta de la viga [3]..	6
Figura 5. Gráfico logarítmico de la amplitud normalizada en función de la razón de frecuencias para distintos valores de amortiguamiento [3].....	7
Figura 6. Ejemplos de sistemas de dos grados de libertad (a) Dos masas que pueden oscilar independientes una de la otra. (b) Una masa con dos direcciones posibles para moverse. (c) Una masa que puede desplazarse y a la vez rotar sobre su eje [3]	8
Figura 7. Viga de Euler-Bernoulli sometida a una carga dinámica repartida. [4].....	9
Figura 8. Fuerza tipo impulso en el tiempo [3]	11
Figura 9. Respuesta de un sistema de un grado de libertad a un impulso en un tiempo t [3]	13
Figura 10. Representación esquemática que muestra cómo funciona la máquina para ensayos de tracción [5].....	14
<i>Figura 11. Gráfico de resultado de un ensayo de tracción para un material (acero)</i>	<i>15</i>
<i>Figura 12. Formación del cuello en probeta</i>	<i>16</i>
<i>Figura 13. Etapas de medición de IET.</i>	<i>17</i>
<i>Figura 14. Viga de largo L libre.</i>	<i>22</i>
<i>Figura 15. Gráfico de resultados de ecuación (5.12)</i>	<i>24</i>
<i>Figura 16. Sistema excitador, vista lateral.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 17. Sistema excitador, vista isométrica</i>	<i>29</i>
<i>Figura 18. Montaje experimental IET en horno tubular vertical.</i>	<i>30</i>

<i>Figura 19. Mesa de apoyo de excitador ajustable en altura.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 20. Ajuste de altura mesa de apoyo excitador.</i>	<i>31</i>
<i>Figura 21. Muestra dispuesta sobre fibra cerámica, simulando C.B. Libre-Libre para ambos extremos.</i>	<i>32</i>
<i>Figura 22. Barra anclada a mordaza inferior de máquina de tracción.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 23. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a Temperatura ambiente 18°C.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 24. Espectro de frecuencia Cobre a Temperatura ambiente 18°C</i>	<i>35</i>
<i>Figura 25. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 50°C</i>	<i>36</i>
<i>Figura 26. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 100°C</i>	<i>36</i>
<i>Figura 27. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 150°C</i>	<i>37</i>
<i>Figura 28. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 200°C</i>	<i>37</i>
<i>Figura 29. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 250°C.....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 30. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 300°C</i>	<i>38</i>
<i>Figura 31. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 350°C</i>	<i>39</i>
<i>Figura 32. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 400°C</i>	<i>39</i>
<i>Figura 33. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 450°C.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 34. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 500°C.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 35. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 550°C</i>	<i>41</i>
<i>Figura 36. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 600°C</i>	<i>41</i>
<i>Figura 37. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 700°C</i>	<i>42</i>
<i>Figura 38. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 800°C</i>	<i>42</i>
<i>Figura 39. Gráfico del módulo elástico en función de la temperatura para el acero inoxidable 316</i>	<i>44</i>

1. Introducción y Objetivos

Dentro de esta sección se presentan la introducción y los objetivos de este trabajo.

1.1. Introducción

Determinar las propiedades elásticas de un material, como el módulo Young y el coeficiente de Poisson, es importante por muchos motivos. Es esencial para el diseño estructural, pero también permite establecer el desempeño de nuevos materiales, comprobar la calidad de un proceso de manufactura y puede servir en el monitoreo de salud estructural. Dada la importancia que estas propiedades de un material, se han desarrollado varias técnicas experimentales para determinarlas, las que se pueden dividir en dos grupos: métodos estáticos y métodos dinámicos.

Los métodos dinámicos tienen varias ventajas por sobre los métodos estáticos, ya que son económicos, precisos, fáciles de implementar, no son destructivos y pueden ser utilizados en un rango amplio de temperaturas. La idea básica es que si se inducen vibraciones en una muestra, su respuesta caracterizada por las frecuencias de resonancia va a depender de la geometría, densidad, condiciones de borde y de las constantes elásticas. Por lo tanto, al medir las frecuencias de resonancia de una muestra, y si se conoce su densidad, geometría y condiciones de borde, es posible determinar de forma precisa las constantes elásticas en un solo ensayo no destructivo. Este método se conoce como técnica de excitación a un impulso (IET por sus siglas en inglés).

El presente trabajo propone implementar la metodología IET para una muestra dentro un horno, para así medir sus propiedades a distintas temperaturas. Para lograr lo anterior se debe diseñar y construir un mecanismo sencillo que permita dar una excitación tipo impulso a la muestra. Luego para un material cualquiera se debe medir la respuesta mediante un micrófono y determinar su frecuencia natural a distintas temperaturas, para finalmente identificar la curva de módulo de elasticidad en función de la temperatura.

1.2. Objetivos

A continuación se presentan los objetivos de este trabajo.

1.2.1. Objetivo General

Implementar la metodología IET (Técnica de excitación a un impulso) para una muestra dentro de un horno, con la finalidad de medir sus propiedades elásticas en un rango amplio temperaturas.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Diseñar y construir un mecanismo sencillo que permita dar una excitación tipo impulso a una muestra dentro de un horno a alta temperatura.
- Determinar la frecuencia natural de la muestra a distintas temperaturas mediante el uso del software MATLAB.
- Calcular el módulo de elasticidad utilizando la frecuencia natural fundamental, según lo indica el método IET.
- Determinar la curva de módulo de elasticidad en función de la temperatura para la muestra.

2. Antecedentes

La siguiente sección contiene los antecedentes necesarios para conocer el contexto dentro del cual se trabaja.

2.1. Vibraciones con uno o más grados de libertad

Una vibración se puede definir como un movimiento repetitivo alrededor de una posición de equilibrio.

2.1.1. Un grado de libertad

Para definir las vibraciones de un grado de libertad se define un modelo simple, un resorte con un extremo fijo y un objeto adherido en el otro extremo, como se muestra en la figura 1.

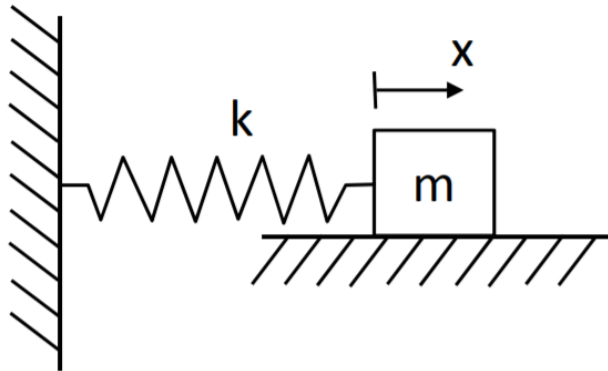


Figura 1. Masa adherida a un resorte [3]

La masa del objeto es m y la rigidez del resorte k , esta constante representa la dificultad de estirar o comprimir, por lo tanto, mientras mayor sea la constante, más fuerza será requerida para estirar el resorte. Se considera que la única fuerza que actúa sobre la masa es la fuerza del resorte.

Por suma de fuerzas se obtiene:

$$m\ddot{x}(t) = -kx(t) \quad (2.1)$$

Realizando una operación aritmética simple se obtiene la siguiente ecuación de movimiento en la dirección x :

$$m\ddot{x}(t) + kx(t) = 0 \quad (2.2)$$

En la ecuación (2.2) m es la masa del objeto, $\ddot{x}(t)$ representa la aceleración de la masa (es decir, la segunda derivada del desplazamiento), k es la constante de rigidez del resorte y $x(t)$ es la posición de la masa. La solución de esta ecuación se puede escribir como:

$$x(t) = A \sin(\omega_n t + \phi) \quad (2.3)$$

Esto describe un movimiento oscilatorio de frecuencia ω_n y amplitud A . La constante ω_n se denomina frecuencia natural y determina el intervalo de tiempo en el que la función se repite. ϕ , denominada fase, determina el valor inicial de la función sinusoidal. La fase se mide en radianes (rad), mientras que la frecuencia se mide en radianes por segundo (rad/s).

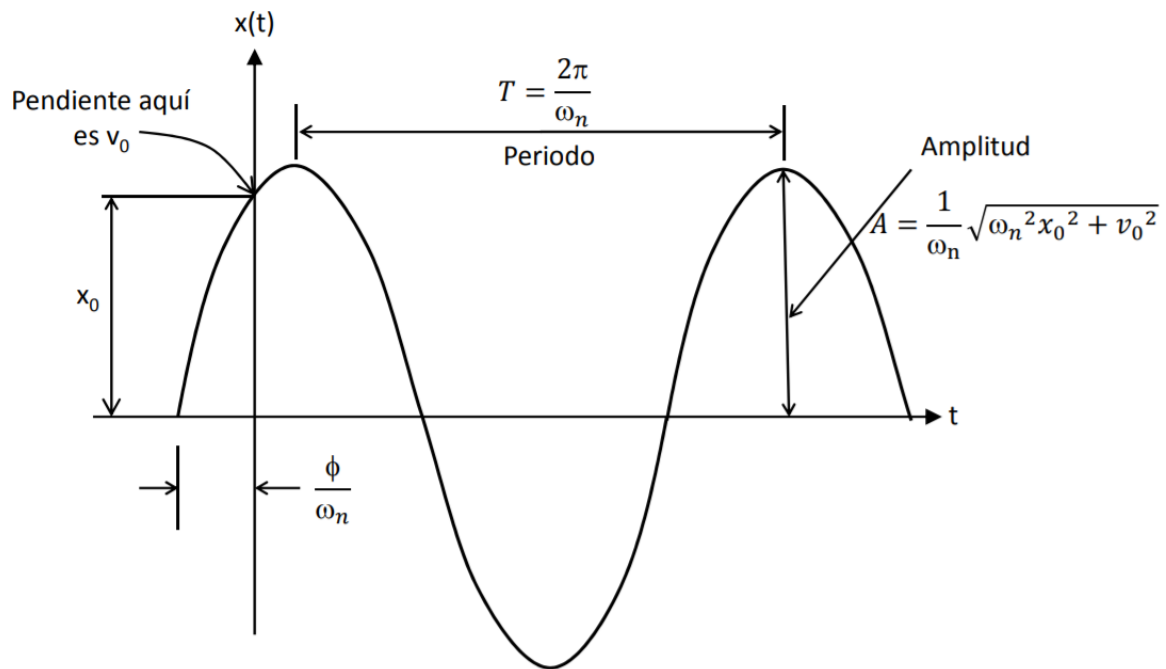


Figura 2. Amplitud, período y fase de un movimiento sinusoidal [3]

La frecuencia natural, ω_n , se mide en radianes por segundo y describe la repetibilidad de la oscilación. Como se indica en la figura 2 el tiempo que demora

el ciclo en repetirse es el período T , el que se relaciona con la frecuencia natural por:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} (s) \quad (2.4)$$

La frecuencia natural es medida en ciclos por segundo (Hertz). La frecuencia en Hertz se obtiene al dividir la frecuencia natural por 2π

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} (Hz) \quad (2.5)$$

La respuesta del sistema masa-resorte vista predice que el sistema va a oscilar indefinidamente. Sin embargo, la gran mayoría de los sistemas oscilatorios eventualmente decaen y dejan de moverse. Esto sugiere que el modelo visto debe modificar para incluir este decaimiento. Añadiendo un término $c\dot{x}(t)$ a la ecuación de movimiento, obteniendo una solución que decae en el tiempo. La constante c se denomina coeficiente de amortiguamiento y tiene unidades de fuerza por velocidad ($N \text{ s/m} = \text{kg/s}$). La masa al tener amortiguamiento cambia la frecuencia de oscilación (o frecuencia natural amortiguada), por lo tanto cambia la frecuencia de resonancia.

La resonancia es un fenómeno en el cual el cuerpo oscila gracias a la acción de una o más fuerzas externas que hace que la amplitud del sistema se haga muy grande. Si la frecuencia de este estímulo produce resonancia, se le denomina frecuencia de resonancia. En la figura 3 se observa un movimiento en resonancia, se observa que su amplitud va creciendo a medida que el tiempo avanza.

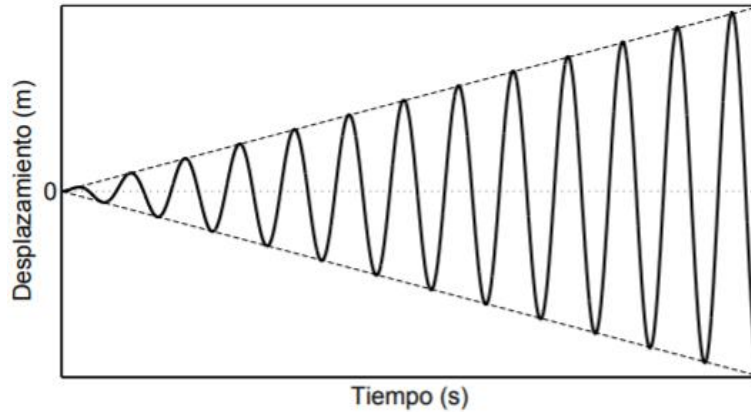


Figura 3. Respuesta forzada de un sistema masa-resorte sin roce, excitado en su frecuencia de resonancia [3]

Un ejemplo de movimiento transversal son las vibraciones de una viga con una masa en su extremo, como se observa en la figura 4, l es el largo de la viga, E es el módulo de Young e I es el momento de inercia de la sección. La rigidez de la viga viene dada por:

$$k = \frac{3EI}{l^3} \quad (2.6)$$

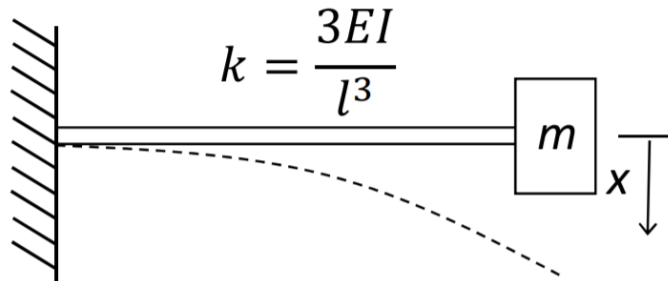


Figura 4. Rigidez de una viga asociada a vibración transversal de la punta de la viga [3]

Para sistemas de un grado de libertad la frecuencia de resonancia es única y la amplitud máxima que el sistema alcanza depende directamente del roce al cual está sometido éste. Si el roce es despreciable, la frecuencia de resonancia será igual a la frecuencia natural, pero cuando el roce es mayor que cero, estas frecuencias son distintas entre sí.

En la figura 5 se puede apreciar el efecto del roce sobre la amplitud que se alcanza para los distintos casos. Se define r como la razón de frecuencias, dado por $r = \frac{\omega}{\omega_n}$, donde ω es la frecuencia de excitación y ω_n es la frecuencia natural. $\zeta = \frac{c}{c_c}$, en donde c es el coeficiente de amortiguamiento y $c_c = 2m\omega_n$ se define como amortiguamiento crítico, que hace que el discriminante sea cero.

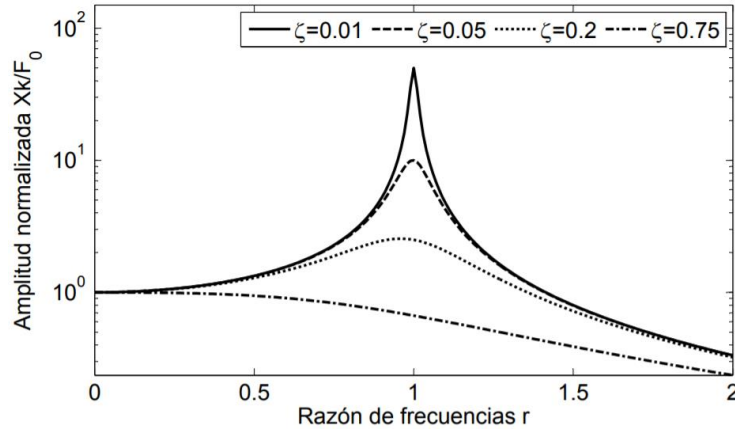


Figura 5. Gráfico logarítmico de la amplitud normalizada en función de la razón de frecuencias para distintos valores de amortiguamiento [3]

2.1.2. Dos o más grados de libertad

Al cambiar de sistemas de un grado de libertad a sistemas con dos o más grados de libertad, aparecen conceptos importantes. El primero, es que un sistema de dos grados de libertad tiene dos frecuencias naturales. El segundo concepto es el modo de vibración, que no está presente en sistemas con un grado de libertad. En la figura 6 se muestran 3 ejemplos de sistemas de dos grados de libertad.

De estos sistemas se deben mencionar dos puntos importantes:

- Un sistema de dos grados de libertad posee dos frecuencias naturales, lo cual se puede extrapolar para los sistemas con más grados de libertad.
- Existen vectores llamados modos normales, los cuales representan la forma en la cual ocurre la vibración.

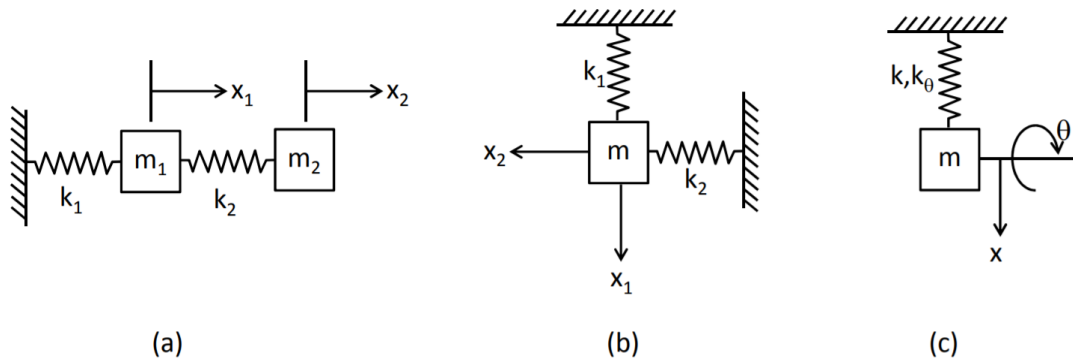


Figura 6. Ejemplos de sistemas de dos grados de libertad (a) Dos masas que pueden oscilar independientes una de la otra. (b) Una masa con dos direcciones posibles para moverse. (c) Una masa que puede desplazarse y a la vez rotar sobre su eje [3]

Existen sistemas denominados sistemas continuos, los cuales consisten en un conjunto de masas infinitesimales que definen un elemento (cuerda, barra, vigas, etc.). Al poseer una cantidad infinita de masas, poseen infinitos grados de libertad y, por tanto, infinitas frecuencias naturales. En la figura 7 se observa una viga sometida a una carga dinámica repartida $p(x, t)$, para describir el movimiento transversal de forma analítica, se utiliza el modelo de Euler-Bernoulli, el cual considera los siguientes supuestos para la viga:

- Uniforme a su largo.
- Está compuesta de un material lineal, isotrópico y elástico sin cargas axiales.
- Las secciones planas inicialmente perpendiculares al eje de la viga, siguen siendo perpendiculares al eje de la viga una vez curvado.
- El plano de simetría de la viga es también el plano de vibración, de manera que la rotación y traslación están desacopladas.
- La inercia rotacional y la deformación por esfuerzo de corte se pueden despreciar.

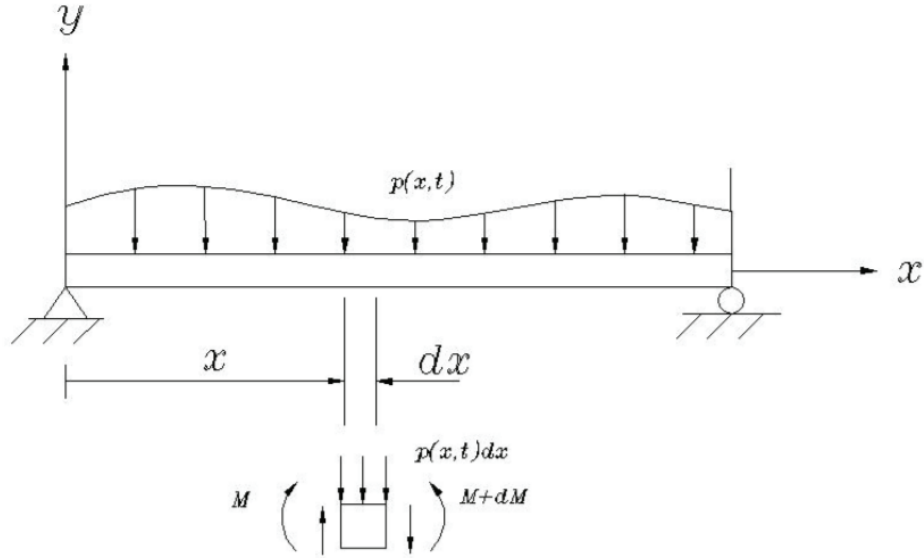


Figura 7. Viga de Euler-Bernoulli sometida a una carga dinámica repartida. [4]

Al realizar sumatoria de fuerzas en la dirección y y para una de las masas infinitesimales se tiene:

$$\left(V(x, t) + \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} dx \right) - V(x, t) + p(x, t) dx = \rho A(x) dx \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.7)$$

Donde $V(x, t)$ es la fuerza de corte a la izquierda del elemento y $V(x, t) + dV(x, t)$ es la fuerza a la derecha del elemento, $p(x, t)$ es la fuerza externa total aplicada al elemento por unidad de largo.

Equilibrando los momentos sobre el elemento, se tiene que:

$$\begin{aligned} \left(M(x, t) + \frac{\partial M(x, t)}{\partial x} dx \right) - M(x, t) - \left(V(x, t) + \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} dx \right) dx \\ + [p(x, t) dx] \frac{dx}{2} = 0 \end{aligned} \quad (2.8)$$

Simplificando la expresión anterior, y sabiendo que dx es casi cero, tiene que: $V(x, t) = \frac{\partial M(x, t)}{\partial x}$ y juntando ambas ecuaciones se tiene:

$$-\frac{\partial^2 M(x, t)}{\partial x^2} dx + p(x, t) dx = \rho A(x) dx \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

Utilizando la ecuación de la elástica:

$$M(x, t) = -EI(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \quad (2.10)$$

Se tiene:

$$\rho A(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left[EI(x) \frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial x^2} \right] = p(x, t) \quad (2.11)$$

Si no se aplican fuerzas externas y se asume una sección constante, la ecuación anterior se simplifica a:

$$\frac{\partial^2 w(x, t)}{\partial t^2} + c^2 \frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} = 0 \quad (2.12)$$

Donde $w(x, t)$ representa la deflexión vertical de la viga y la constante $c = \sqrt{\frac{EI}{\rho A}}$

La ecuación (2.12) se resuelve utilizando el método de separación de variables. La deflexión se puede separar en una parte espacial $X(x)$ y una parte temporal $T(t)$, quedando como sigue: $w(x, t) = X(x)T(t)$. La solución espacial viene dada por:

$$X(x) = a_1 \sin \beta x + a_2 \cos \beta x + a_3 \sinh \beta x + a_4 \cosh \beta x \quad (2.13)$$

Donde $\beta^4 = \frac{\omega^2}{c^2} = \frac{\rho A \omega^2}{EI}$. El valor de β y tres de las cuatro constantes se pueden determinar mediante cuatro condiciones de borde. La cuarta constante se combina con las constantes de la ecuación temporal, las cuales se determinan de las condiciones iniciales.

2.1.3. Respuesta a un impulso

Una excitación de tipo impulso es una fuerza aplicada por un periodo muy breve, o infinitesimal, de tiempo y representa un ejemplo de una carga de impacto. Un impulso corresponde a una fuerza no periódica. La respuesta de un sistema a un impulso, es idéntica a la respuesta libre del sistema a una cierta condición inicial.

Se considera una representación matemática de un impulso. Esta se puede escribir de acuerdo a la siguiente relación:

$$F(t) = \begin{cases} 0 & t \leq \tau - \epsilon \\ \frac{\hat{F}}{2\epsilon} & \tau - \epsilon \leq t \leq \tau + \epsilon \\ 0 & t \geq \tau + \epsilon \end{cases} \quad (2.14)$$

Donde ϵ es un número pequeño y τ corresponde al tiempo en que se aplica la fuerza. Esta fuerza se ilustra gráficamente en la figura 8.

Integrando la fuerza en el tiempo se obtiene la definición de impulso:

$$I(\epsilon) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t)dt = \frac{\hat{F}}{2\epsilon} 2\epsilon = \hat{F} \quad (2.15)$$

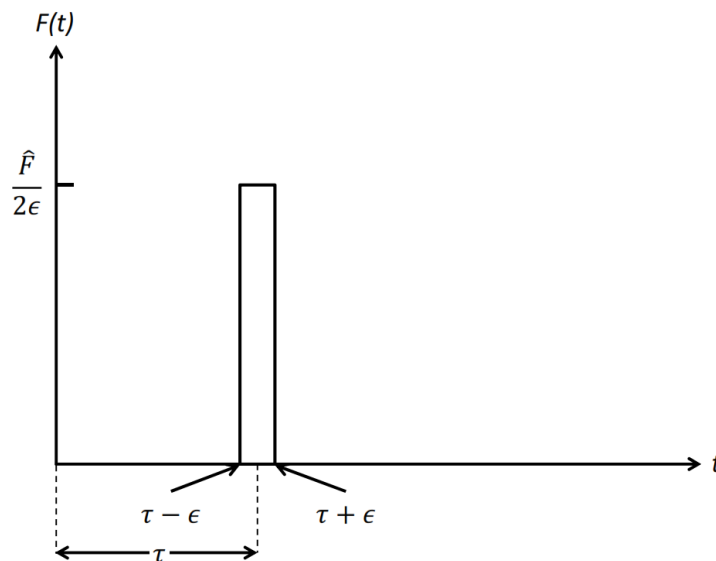


Figura 8. Fuerza tipo impulso en el tiempo [3]

La respuesta a un impulso para un sistema de un grado de libertad inicialmente en reposo, se puede determinar aprovechando el hecho que un impulso produce un cambio de momentum al cuerpo.

Para un sistema con amortiguamiento débil ($0 < \zeta < 1$), la respuesta a la condiciones iniciales $x_0 = 0$, $v_0 = \frac{\hat{F}}{m}$ es de la forma

$$x(t) = \frac{\hat{F} e^{-\zeta \omega_n t}}{m \omega_d} \sin \omega_d t \quad (2.16)$$

Es conveniente escribir la ecuación anterior como:

$$x(t) = \hat{F} h(t) \quad (2.17)$$

Donde $h(t)$ es la respuesta a un impulso unitario en $t = 0$, viene dada por:

$$h(t) = \frac{1}{m \omega_d} e^{-\zeta \omega_n t} \sin \omega_d t \quad (2.18)$$

Si se aplica en $t = \tau$, con $\tau \neq 0$, se tiene:

$$h(t - \tau) = \frac{1}{m \omega_d} e^{-\zeta \omega_n (t - \tau)} \sin \omega_d (t - \tau) \quad (2.19)$$

Las funciones $h(t)$ y $h(t - \tau)$ se denominan función de respuesta a un impulso. En la figura 9 se ilustra una respuesta a un impulso típica para un sistema de un grado de libertad.

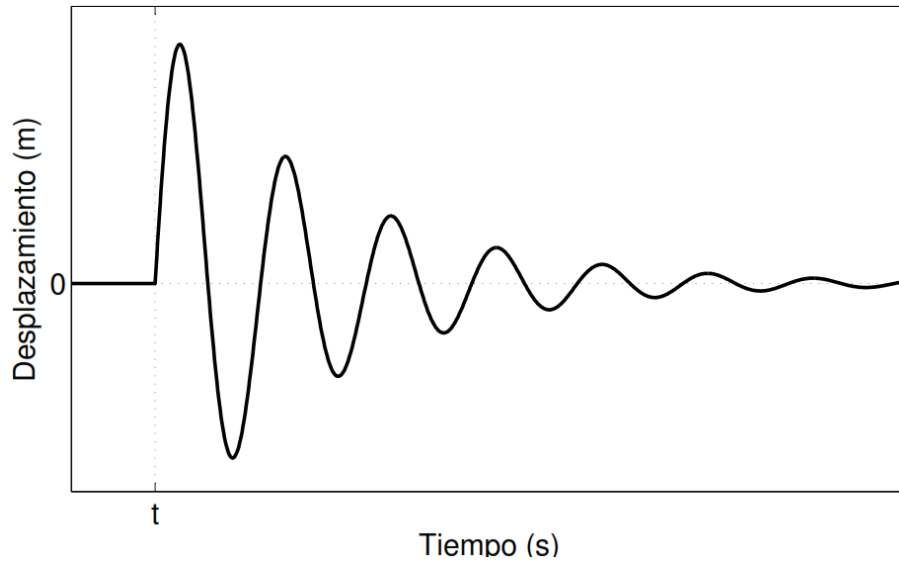


Figura 9. Respuesta de un sistema de un grado de libertad a un impulso en un tiempo t [3]

Finalmente para N grados de libertad la ecuación (2.12) se escribe como sigue:

$$h(t - \tau) = \frac{1}{m\omega_d} \sum_{i=1}^N \delta_i(t) e^{-\zeta\omega_{n_i}(t-\tau)} \sin \omega_{d_i}(t - \tau) \quad (2.20)$$

2.2. Métodos para la identificación de las propiedades elásticas en sólidos

Las propiedades mecánicas de los materiales son aquellas que expresan el comportamiento de éstos frente a los esfuerzos o cargas tendientes a alterar su forma.

Una de las propiedades mecánicas de mucha importancia es la elasticidad, la cual se define como la capacidad de un material de deformarse reversiblemente gracias a la acción de una o varias cargas externas. Al eliminar dichas cargas el material recupera su forma original.

Uno de los ensayos más utilizados para determinar el módulo de Young (o de elasticidad) es el ensayo de tracción, este es muy utilizado debido a que

son simples, relativamente barato y totalmente estandarizados. Un esquema de una máquina de ensayo de tracción se muestra en la figura 10.

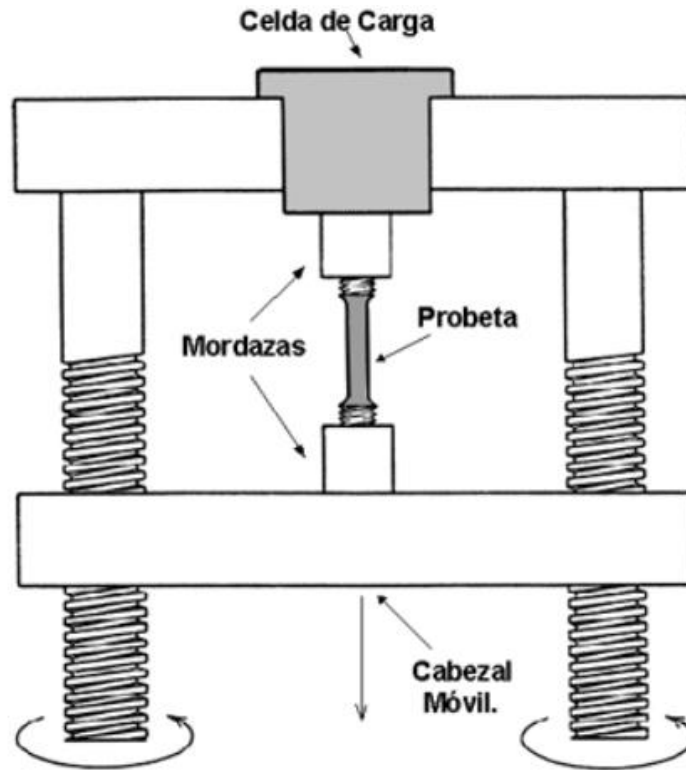


Figura 10. Representación esquemática que muestra cómo funciona la máquina para ensayos de tracción [5]

La máquina de ensayo impone la deformación desplazando el cabezal móvil a una velocidad seleccionable. La celda de carga conectada a la mordaza fija entrega una señal que representa la carga aplicada, las máquinas poseen un plotter que grafica en un eje el desplazamiento y en el otro la carga leída. La figura 11 muestra el grafico obtenido en una máquina de ensayo de tracción.

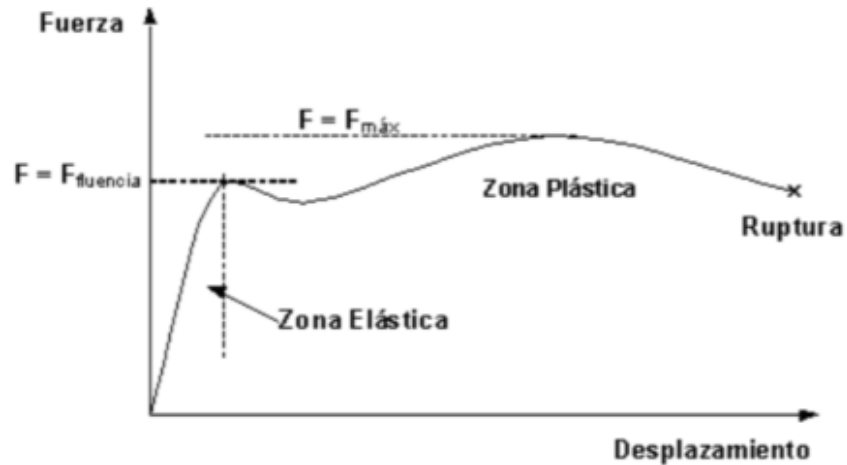


Figura 11. Gráfico de resultado de un ensayo de tracción para un material (acero)

Las curvas tienen una primera parte lineal llamada zona elástica, en donde la probeta se comporta como un resorte: si se quita la carga en esa zona, la probeta regresa a su longitud inicial. Cuando la curva se desvía de la recta inicial, el material alcanza el punto de fluencia, desde ese punto el material comienza a adquirir una deformación permanente, iniciando la zona de deformación plástica del ensayo de tracción. El valor límite entre la zona elástica y la zona plástica se denomina punto de fluencia y la fuerza que la produjo se define como límite de fluencia.

Luego de la fluencia sigue una parte inestable, para posteriormente llegar a un máximo en F_{max} , aquí la probeta muestra su punto más débil, concentrando la deformación en una zona en la cual se forma un cuello. Finalmente la deformación se concentra en la zona del cuello (menor área), provocando la ruptura.

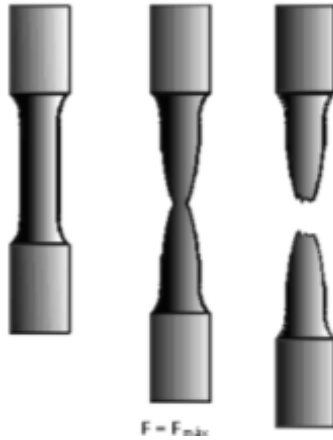


Figura 12. Formación del cuello en probeta

Cabe destacar que existen innumerables métodos estáticos para calcular las propiedades elásticas en sólidos.

2.3. IET

La técnica de excitación a un impulso (IET) es una técnica de caracterización de un material no destructiva, para determinar las propiedades elásticas y la fricción interna de interés. Mide las frecuencias de resonancia para calcular el módulo de Young, el módulo de corte, el coeficiente de Poisson y fricción interna de formas predefinidas como barras rectangulares, barras cilíndricas y muestras en forma de discos.

El principio de medición se basa en golpear la muestra con un pequeño proyectil y registrar la señal de vibración inducida con un micrófono (ver figura 13). Después la señal de vibración adquirida en el dominio del tiempo se convierte en el dominio de la frecuencia mediante el uso de la transformada de Fourier. El software dedicado determinará la frecuencia de resonancia con alta precisión para calcular las propiedades elásticas.

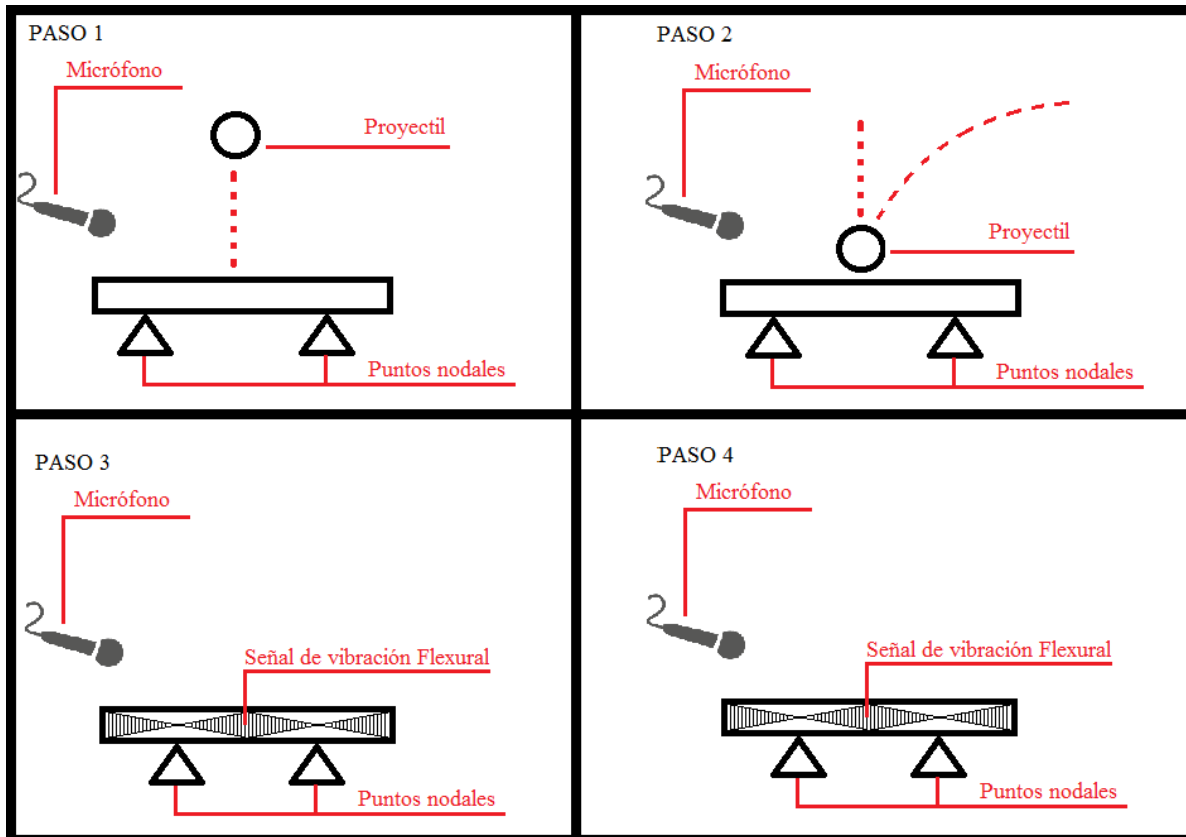


Figura 13. Etapas de medición de IET.

El mecanismo debe contar con un sistema de elementos necesarios para realizar la excitación de la muestra, por lo tanto debe contar con los siguientes elementos:

Impulsor: La excitación por impulso es generada por un ligero golpe a la muestra con un implemento apropiado. Este elemento tiene la mayor masa concentrada en el punto de impacto y tiene masa suficiente para inducir una vibración mecánica medible, pero no demasiada como para desplazar o dañar la muestra. En la práctica el tamaño y la geometría del impulsor dependen del tamaño y peso de la muestra y la fuerza necesaria para producir vibración. El impulsor puede ser una esfera de acero de 0.5 cm de diámetro, una esfera de cerámica o polímero (0.1 a 1 cm de diámetro) soltada en la muestra a través de un tubo guía para asegurar la posición del impulso.

Receptor de señal: La detección de señal puede ser por medio de transductores en contacto directo con la muestra o por transductores sin contacto. Los transductores de contacto son comúnmente acelerómetros que usan piezoeléctricos o métodos extensométricos para medir la vibración. Los

transductores sin contacto son generalmente micrófonos, pero también pueden usar métodos láser, magnéticos o de capacitancia para medir la vibración. El rango de frecuencia del transductor debe ser suficiente para medir las frecuencias esperadas para la muestra de interés.

Sistema electrónico: El sistema electrónico consiste de una señal acondicionador/amplificador, analizador de señal y un dispositivo de lectura de salida. El sistema debe tener exactitud y precisión suficiente para medir las frecuencias de interés a una exactitud del 0.1%. La señal del acondicionador/amplificador debe ser ajustable al poder del transductor y proveer una señal amplificada apropiada al analizador de señal. El sistema de análisis de señal consiste de un dispositivo de conteo de frecuencia y un dispositivo de lectura de salida. Los dispositivos apropiados son: los sistemas de conteo de frecuencia con capacidad de almacenaje u osciloscopio de almacenaje digital con un módulo de conteo de frecuencia. Con el osciloscopio de almacenaje digital, un sistema de análisis de señal con una transformada rápida de Fourier puede ser útil para analizar ondas complejas e identificar la frecuencia de resonancia fundamental.

Sistema de Soporte: El sistema sirve para aislar la muestra de vibraciones externas sin restringir el modo deseado de la vibración de la muestra. Los materiales apropiados deben ser estables a la temperatura del ensayo. Los materiales de soporte pueden ser tantos suaves como rígidos para las condiciones ambientales. Ejemplos de materiales suaves, serían elastomérico adaptable, como tiras de espuma de poliuretano. Estas tiras de espuma tendrían superficies planas simples para que la muestra descansa en él. Los materiales rígidos, como metal o cerámica, deberán tener borde afilado como navaja o superficie cilíndrica las cuales la muestra descansa sobre ellas. Los soportes rígidos deberán descansar en una superficie aislada para prevenir que las vibraciones ambientales sean captadas por el transductor. El cable de suspensión puede también ser usado.

2.3.1. Ventajas de la técnica de excitación a un impulso

- Medición no destructiva de propiedades elásticas.
- Gran rango de temperatura: -50°C – 1700°C
- Técnica de medición rápida y confiable.
- Restricciones limitadas en la geometría y las dimensiones de la muestra.
- Es aplicable a materiales porosos y quebradizos debido a pequeñas deformaciones.

- Información sobre la estructura interna, comportamiento global, daños, etc.

2.3.2. Propiedades elásticas por IET

Diferentes frecuencias de resonancias pueden ser excitadas dependiendo la posición del soporte, el impulso mecánico y el micrófono. Las dos frecuencias más importantes son la flexión que está controlada por el módulo de Young de la muestra y la torsión que está controlada por el módulo de corte para materiales isotrópicos.

Para formas predefinidas como barras rectangulares, discos, barras, el software calcula las propiedades elásticas usando las dimensiones, masa y la frecuencia de flexión (ASTM E1876-15)

Módulo de Young

Para determinar el módulo de Young en una barra en apoyos simples ubicados a $0.224L$ de cada extremo, se debe medir la frecuencia de vibración y calcular el módulo de Young usando la masa y dimensiones de la muestra de acuerdo a los diferentes estándares (ASTM E176-15, ISO 12680-1. EN 843-2).

$$E = 0.9465 \left(\frac{m f_f^2}{w} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T_1 \quad (2.21)$$

En donde:

E : Módulo de Young

f_f : Frecuencia de flexural

m : Masa

L : Largo

w : Ancho

t : Espesor

T_1 : Factor de corrección para una barra de espesor finito y para el modo fundamental con su módulo de Poisson, se calcula como sigue:

$$T_1 = 1 + 6.585(1 + 0.0752\mu + 0.8109\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2 - 0.868 \left(\frac{t}{L}\right)^4 - \left[\frac{8.340(1 + 0.2023\mu + 2.173\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^4}{1 + 6.338(1 + 0.1408\mu + 1.536\mu^2) \left(\frac{t}{L}\right)^2} \right] \quad (2.22)$$

Donde μ es el módulo de Poisson

Si $\frac{L}{t} \geq 20$, T_1 puede ser simplificada a:

$$T_1 = 1 + 6.585 \left(\frac{t}{L}\right)^2 \quad (2.23)$$

Si $\frac{L}{t} < 20$, con el módulo de Poisson conocido, T_1 puede calcularse directamente de la ecuación (2.22) y luego para ser usado para calcular el módulo de Young con la ecuación (2.21).

Módulo de Corte

Para determinar el módulo de corte en una barra con dos apoyos simples perpendiculares entre sí partiendo en el punto medio de cada lado de la barra, se debe medir la frecuencia de vibración torsional y calcular el módulo de corte usando la masa y dimensiones de la muestra de acuerdo a los diferentes estándares (ASTM E1876-15, ISO 12680-1, EN 843-2).

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{wt} R \quad (2.24)$$

En donde:

G : Módulo de corte

f_t : Frecuencia torsional

m : Masa

L : Largo

w : Ancho

t : Espesor

R : Factor de corrección

Coefficiente de Poisson

El coeficiente de Poisson es una medida en donde el material tiende a expandirse en una dirección perpendicular a la dirección de compresión. Después de medir el módulo de Young y el módulo de Corte, el software dedicado determinará el coeficiente de Poisson usando la ley de Hooke, donde solo puede ser aplicado a materiales isotrópicos de acuerdo a los distintos estándares (ASTM E1876-15, ISO 12680-1, EN 843-2)

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (2.25)$$

En donde,

ν : Coeficiente de Poisson

E : Módulo de Young

G : Módulo de corte

2.4. Método Euler-Bernoulli

Una de las formas de obtener la frecuencia de resonancia fundamental es de forma analítica para esto se utiliza el método de Euler-Bernoulli, en la figura 14 se observa el caso general de una viga de largo L .

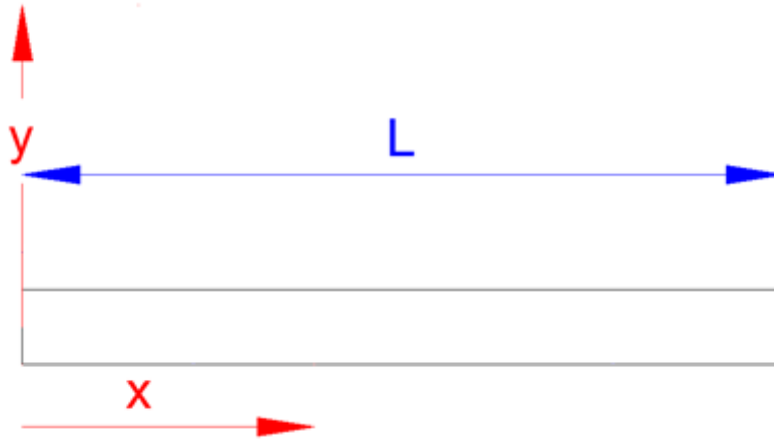


Figura 14. Viga de largo L libre.

Utilizando las condiciones de borde para la viga en que se encuentra libre en ambos extremos, se tiene que la deflexión y pendiente en los extremos no tienen restricciones, pero el momento y la fuerza de corte son cero. Por lo tanto se tiene para el momento y la fuerza de corte, la ecuación (2.26) y (2.27) respectivamente como condiciones de borde:

$$EI \frac{\partial^2 \omega(0,t)}{\partial x^2} = 0 \text{ y } EI \frac{\partial^2 \omega(L,t)}{\partial x^2} = 0 \quad (2.26)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[EI \frac{\partial^2 \omega(0,t)}{\partial x^2} \right] = 0 \text{ y } \frac{\partial}{\partial x} \left[EI \frac{\partial^2 \omega(L,t)}{\partial x^2} \right] = 0 \quad (2.27)$$

Al derivar dos veces la ecuación (2.13) se obtiene el momento, al reemplazar las condiciones de borde definidas en la ecuación (2.26) se tiene lo siguiente:

$$EIX''(0) = \beta^2[-a_1 \sin(0) - a_2 \cos(0) + a_3 \sinh(0) + a_4 \cosh(0)] = 0 \quad (2.28)$$

$$-a_2 + a_4 = 0 \quad (2.29)$$

$$EIX''(L) = \beta^2[-a_1 \sin(\beta L) - a_2 \cos(\beta L) + a_3 \sinh(\beta L) + a_4 \cosh(\beta L)] = 0 \quad (2.30)$$

$$-a_1 \sin(\beta L) - a_2 \cos(\beta L) + a_3 \sinh(\beta L) + a_4 \cosh(\beta L) = 0 \quad (2.31)$$

Ahora derivamos tres veces la ecuación (2.13) para obtener la fuerza de corte y utilizando las condiciones de borde de la ecuación (2.27), se tiene:

$$EIX'''(0) = \beta^3[-a_1 \cos(0) + a_2 \sin(0) + a_3 \cosh(0) + a_4 \sinh(0)] = 0 \quad (2.32)$$

$$-a_1 + a_3 = 0 \quad (2.33)$$

$$EIX'''(L) = \beta^3[-a_1 \cos(\beta L) + a_2 \sin(\beta L) + a_3 \cosh(\beta L) + a_4 \sinh(\beta L)] = 0 \quad (2.34)$$

$$-a_1 \cos(\beta L) + a_2 \sin(\beta L) + a_3 \cosh(\beta L) + a_4 \sinh(\beta L) = 0 \quad (2.35)$$

Resumiendo nuestro sistema de ecuaciones tenemos la siguiente matriz a resolver:

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta L) & -\cos(\beta L) & \sinh(\beta L) & \cosh(\beta L) \\ -\cos(\beta L) & -\sin(\beta L) & \cosh(\beta L) & \sinh(\beta L) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Este sistema de ecuaciones puede tener una solución distinta de cero para el vector $a = [a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4]^T$ solo si el determinante de la matriz de coeficientes es cero, esto es debido que al ser cero significa que no es invertible.

Definiendo el determinante de la matriz de coeficientes igual a cero se obtiene la siguiente ecuación:

$$\cos(\beta L) \cosh(\beta L) = 1 \quad (2.37)$$

La que satisface un número infinito de valores de β , denotado por β_n . La solución se puede visualizar al graficar ambos $\cos(\beta L) \cosh(\beta L)$ y 1 en función de

βL en el mismo gráfico y encontrar la intersección de ambas funciones, esto se puede observar en la figura 15.

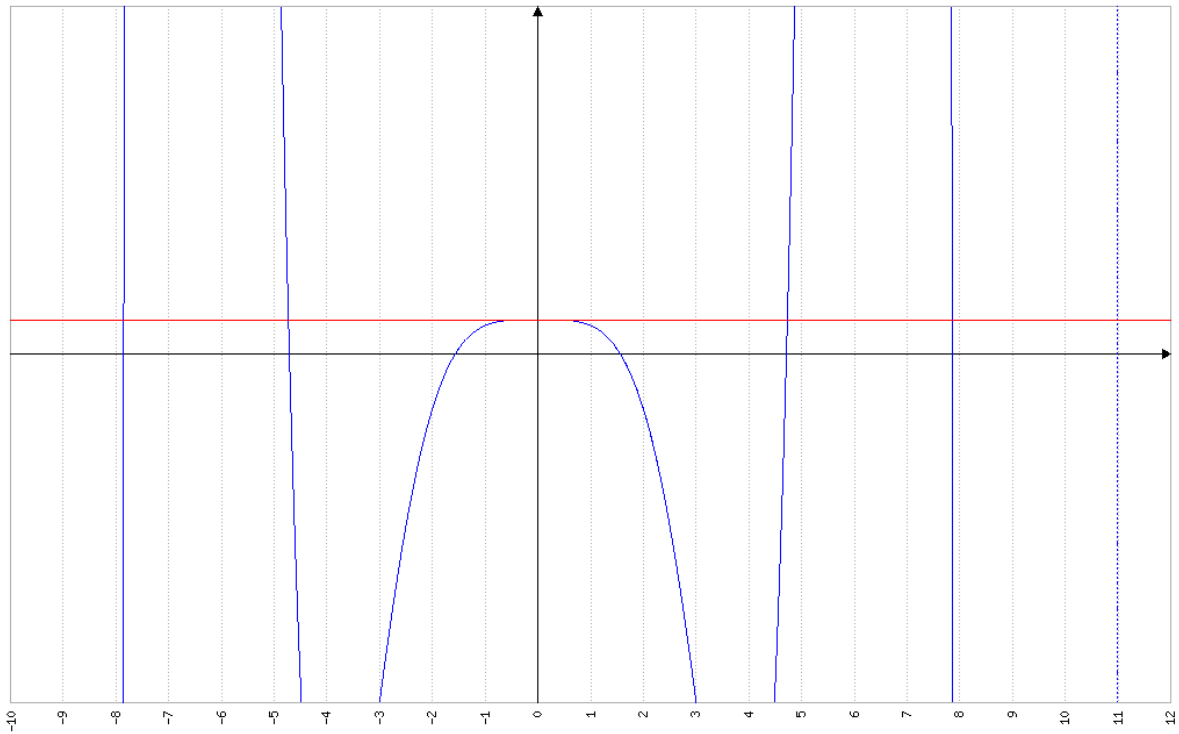


Figura 15. Gráfico de resultados de ecuación (5.12)

Las primeras cinco soluciones vienen dadas por:

$$\begin{aligned}
 \beta_1 L &= 4.73 \\
 \beta_2 L &= 7.8532 \\
 \beta_3 L &= 10.9956 \\
 \beta_4 L &= 14.1372 \\
 \beta_5 L &= 17.2787
 \end{aligned}
 \tag{2.38}$$

Para el resto de los modos, es decir, para valores del índice $n > 5$, las soluciones de la ecuación característica (2.39) se pueden aproximar por:

$$\beta_n L = \frac{(2n + 1)\pi}{2} \quad (2.39)$$

Finalmente la frecuencia natural de la viga dependiente de la constante β_n , viene dada por [3]:

$$\omega_n = \beta_n^2 \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \quad (2.40)$$

Con:

E : Módulo elástico

I : Inercia viga

ρ : Densidad viga

A : Área de la viga

Despejando el módulo elástico en la ecuación (2.40) se tiene:

$$E = \frac{\omega_n^2 \rho A}{I \beta_n^4} \quad (2.41)$$

3. Metodología

A continuación se presenta la metodología de este trabajo, que se divide en el diseño de un sistema para excitar a la muestra y en la medición a distintas temperaturas del módulo de elasticidad de nuestra muestra.

3.1. Diseño del sistema

Para el diseño y posterior construcción del sistema excitador, se usará la siguiente metodología de diseño:

1. Definición del sistema e identificación de las soluciones existentes. En primer lugar se define el problema, el cual consiste en la necesidad de excitar una barra de material seleccionada al interior de un horno a elevada temperatura, sin la interacción humana directa con la muestra horno.
2. Definición de las especificaciones del sistema. El objetivo de esta etapa es definir las necesidades no técnicas del sistema y especificar cuáles son las necesidades funcionales del diseño.
3. Creación conceptual del diseño. En esta etapa se crean diferentes modelos que cumplan con la definición de las especificaciones del sistema. Es en esta etapa donde se realizan prototipos preliminares de las posibles soluciones de diseño, junto con las respectivas pruebas.
4. Evaluación del modelo. La principal meta de esta etapa es la de hacer una evaluación correcta del comportamiento técnico del sistema diseñado.
5. Diseño de detalle. El objetivo es detallar los materiales y componentes del diseño de acuerdo a las necesidades, además de especificar cuáles serán los procesos de manufactura involucrados en su construcción.
6. Construcción y pruebas del sistema. El paso final, su objetivo es obtener el prototipo del diseño definitivo y probar si el sistema cumple las especificaciones de diseño, es posible que requiera ajustes finales de operación.

3.2. Medición de módulo de elasticidad

Para la medición del módulo de elasticidad de la muestra, se utilizará la siguiente metodología:

1. Activar todos los equipos eléctricos, y darle el tiempo necesario para que se estabilicen de acuerdo a las recomendaciones del fabricante.
2. Utilizar una muestra de prueba establecida como un estándar de verificación/calibración para verificar la precisión y respuesta del equipo.
3. Colocar la muestra en el horno.
4. Determinar la dirección de máxima sensibilidad para el transductor. Orientando el transductor para que detecte la vibración deseada.
5. Colocar el transductor sin contacto sobre un punto antinodo y lo suficientemente cerca de la muestra de prueba para registrar la vibración deseada, pero no tan cerca como para interferir con la vibración libre.
6. Establecer temperatura de medición en horno y esperar hasta que termóstato indique que alcanzo la temperatura deseada.
7. Golpear la muestra de forma ligera y elástica, ya sea en el centro de la muestra o en el extremo opuesto de donde se encuentra localizado el transductor para capturar el sonido.
8. Grabar la lectura resultante, y repetir la prueba hasta cinco lecturas consecutivas que tengan un error de un 1% entre sí. Utilizar el promedio de estas cinco lecturas para determinar la frecuencia de resonancia fundamental en flexión.
9. Luego de tener las mediciones con la ayuda de la tarjeta de adquisición y el programa del desarrollador, exportar los datos a formato MATLAB para poder determinar las frecuencias de resonancia de sus distintos modos de vibración.
10. Finalmente se calcula el módulo de Young con la formula (2.21) utilizando la frecuencia de resonancia fundamental.
11. Para nuevas temperaturas utilizando la misma muestra repetir desde el paso 6
12. Finalmente apagar y desconectar todos los dispositivos eléctricos.

4. Diseño y fabricación del sistema

La idea de diseñar un sistema nace de la necesidad de excitar una barra de material seleccionada al interior de un horno a elevada temperatura, sin la necesidad de la interacción humana directa con la muestra-horno.

El objetivo de excitar la barra es para medir con la ayuda de un micrófono su frecuencia para posteriormente obtener su frecuencia natural fundamental.

El material a utilizar para la construcción del sistema es acero inoxidable austenítico calidad 316. Este contiene Cromo, Níquel y molibdeno para aumentar la resistencia a la corrosión, además su bajo contenido en Carbono otorga una mejor resistencia a la corrosión en estructuras soldadas. Sus principales características son:

- Excelente resistencia a la corrosión en entorno ácido o con presencia de cloruros.
- Excelente resistencia a la corrosión por picaduras y a la corrosión cavernosa.
- Excelente resistencia a la corrosión intergranular, incluido después de soldar.
- Excelente aptitud a la soldadura.
- Alta ductilidad.
- Buena aptitud a la embutición.
- Excelente aptitud al pulido.

El diseño del excitador (ver figura 16 y 17) considera un motor de 12 V con una velocidad de giro de 3000 rpm, con un reductor que las reduce a 70 rpm o menos. El cual hace girar una manivela (1) conectada a una biela (2) para realizar movimientos oscilatorios constantes a una palanca (3), en la cual se encuentra conectado un brazo extensible (4) para poder ajustar la longitud, el cual se encuentra soldada en la base del excitador (5). Para ver la forma en que se realizó el cálculo del sistema excitador consultar el anexo D.

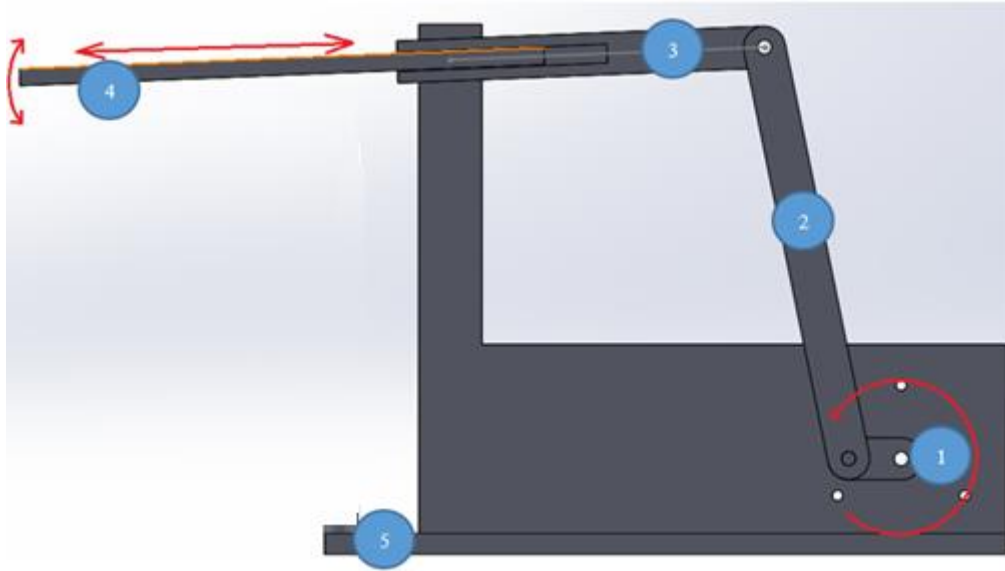


Figura 16. Sistema excitador, vista lateral

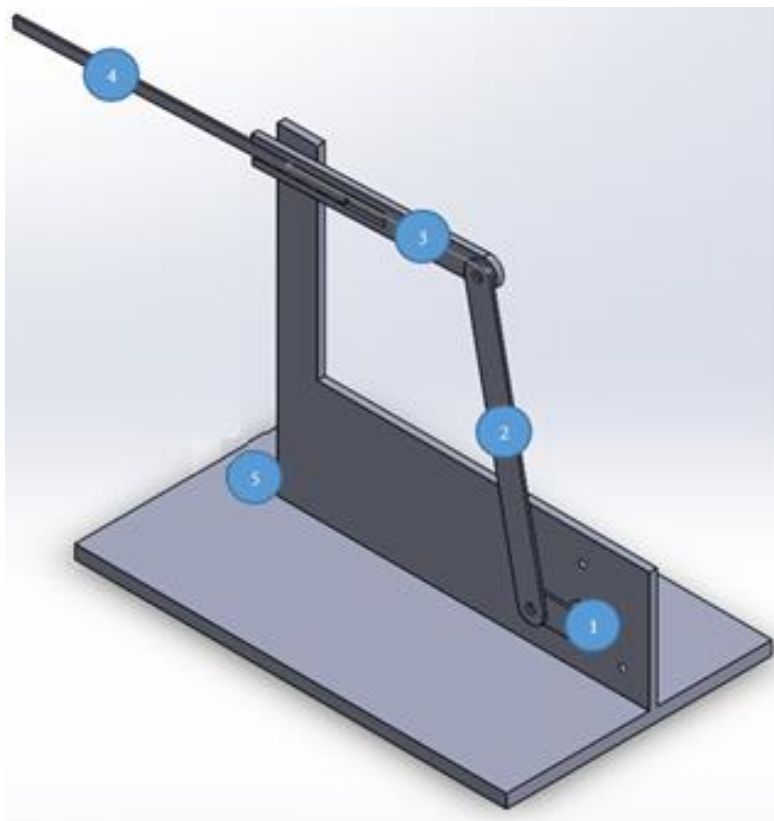


Figura 17. Sistema excitador, vista isométrica

5. Resultados y análisis

En este capítulo se mostrarán los resultados experimentales de las frecuencias de resonancia a distintas temperaturas, partiendo por la descripción del montaje experimental realizado. Finalmente se mostrará el módulo elástico a distintas temperaturas.

5.1. Montaje

El montaje experimental consiste en ubicar el excitador sobre una mesa ajustable en altura y el micrófono junto al horno, tal como se observa en la figura 18.



Figura 18. Montaje experimental IET en horno tubular vertical.

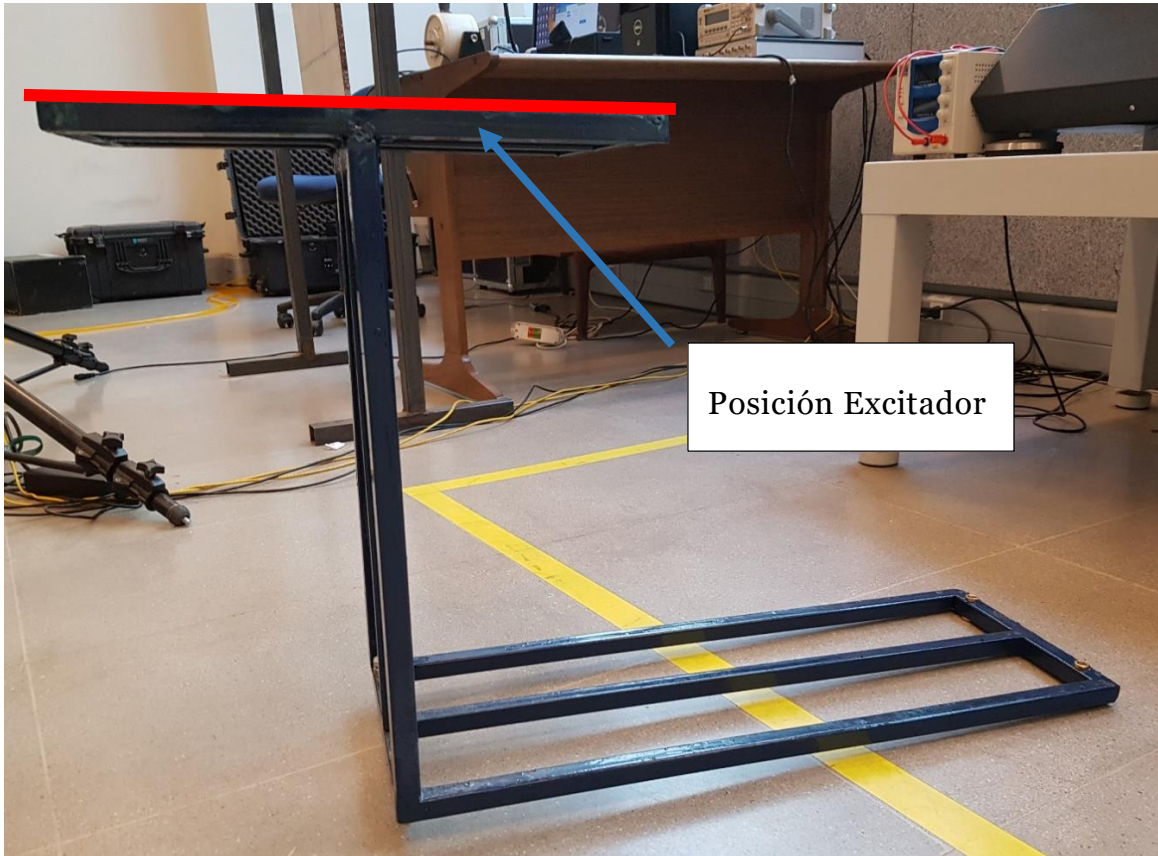


Figura 19. Mesa de apoyo de excitador ajustable en altura.



Figura 20. Ajuste de altura mesa de apoyo excitador.

Para asegurar que el excitador permanezca fijo, se utilizan prensas para fijar la base del excitador a la mesa ajustable en altura.

El micrófono se conecta a un sistema de adquisición de datos, que a su vez se conecta a un computador y con la ayuda de un software computacional dedicado se registra la vibración de la muestra a excitar.

La muestra es localizada en el horno tubular sobre fibra cerámica para simular las condiciones de borde libre para ambos extremos (ver figura 21), esta fibra cerámica se encuentra sobre una barra dispuesta de forma vertical, la cual es anclada a la mordaza inferior de la máquina de tracción, tal como se observa en la figura 22.

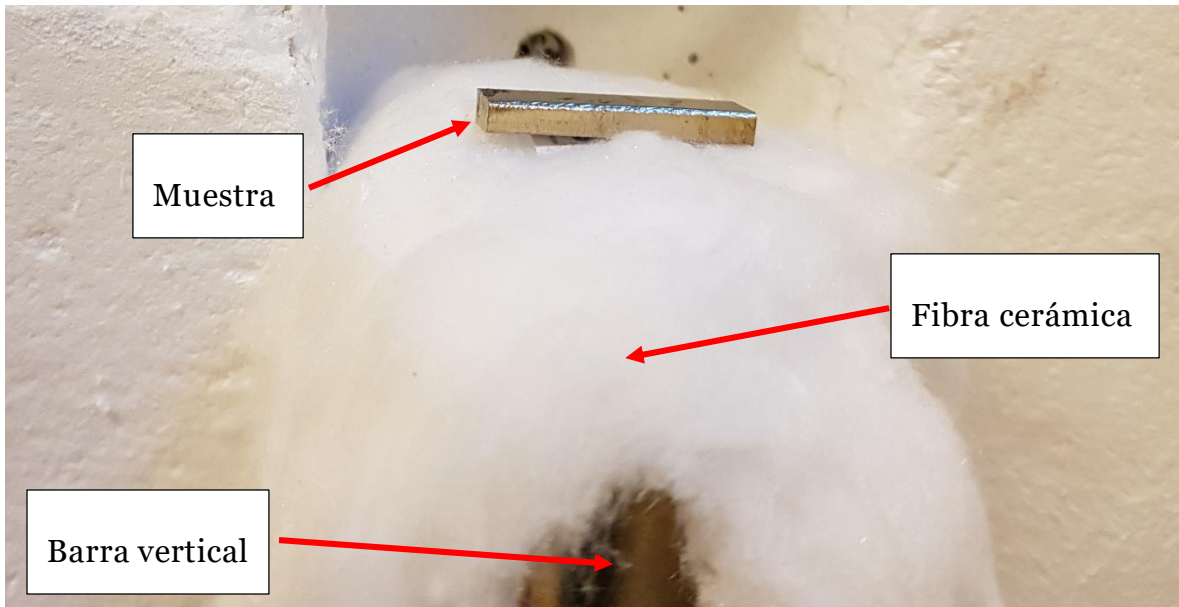


Figura 21. Muestra dispuesta sobre fibra cerámica, simulando C.B. Libre-Libre para ambos extremos.

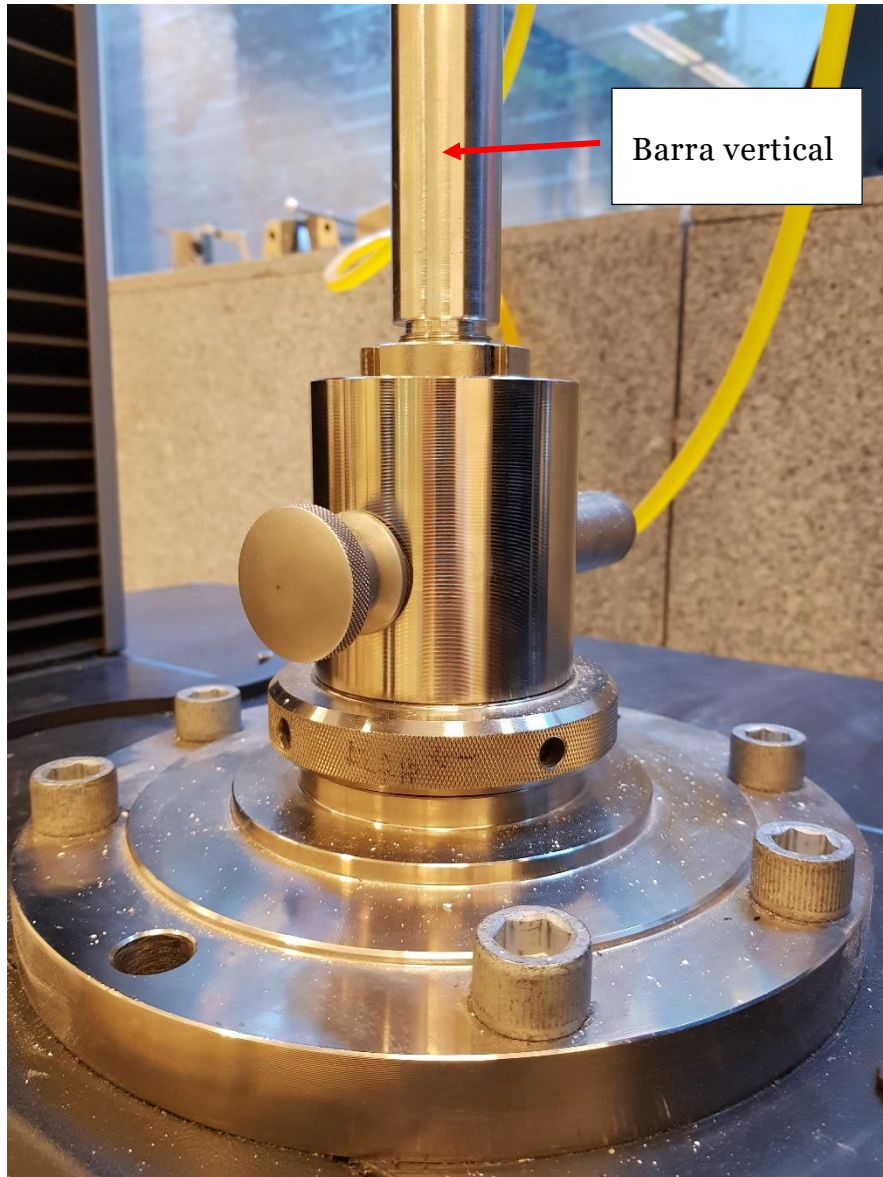


Figura 22. Barra anclada a mordaza inferior de máquina de tracción.

5.2. Resultado experimental a temperatura ambiente

A continuación se muestran los resultados experimentales a temperatura ambiente para el acero inoxidable 316 y el cobre utilizando la IET, para esto se utilizó la metodología explicada en el punto 3.2 de este informe. Las características físicas de estos materiales se resumen en la tabla 2:

Tabla 1. Características físicas de las muestras.

Material	L	b	t	m
	Largo [mm]	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Masa [g]
Acero Inoxidable 316	20,3	5,2	2,6	1,96
Cobre	20,0	5,0	3,8	3,26

Para mostrar los resultados obtenidos a temperatura ambiente se muestra el valor de la frecuencia de resonancia fundamental obtenida en un gráfico de densidad espectral, que nos muestra cómo está distribuida la potencia de dicha señal sobre las distintas frecuencias de las que está formada.

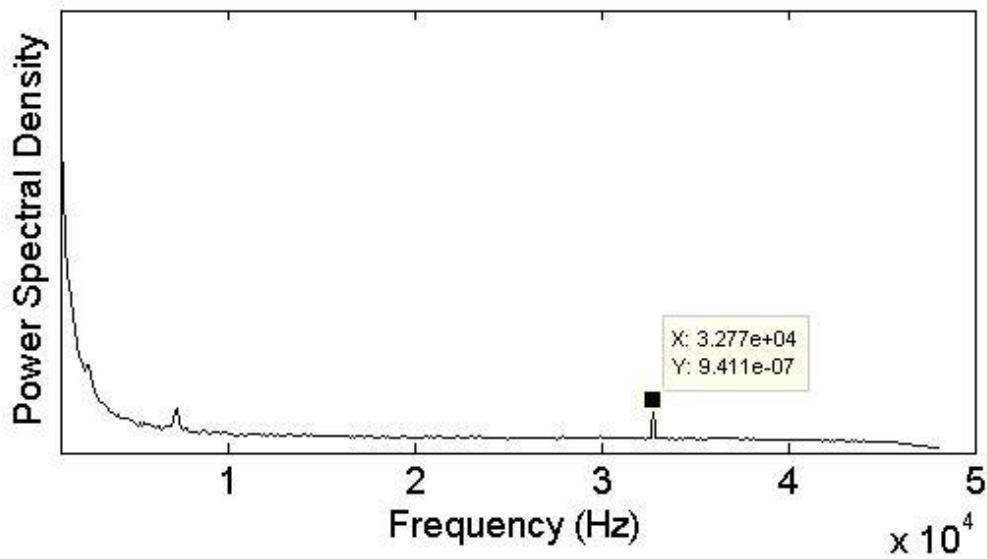


Figura 23. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a Temperatura ambiente 18°C

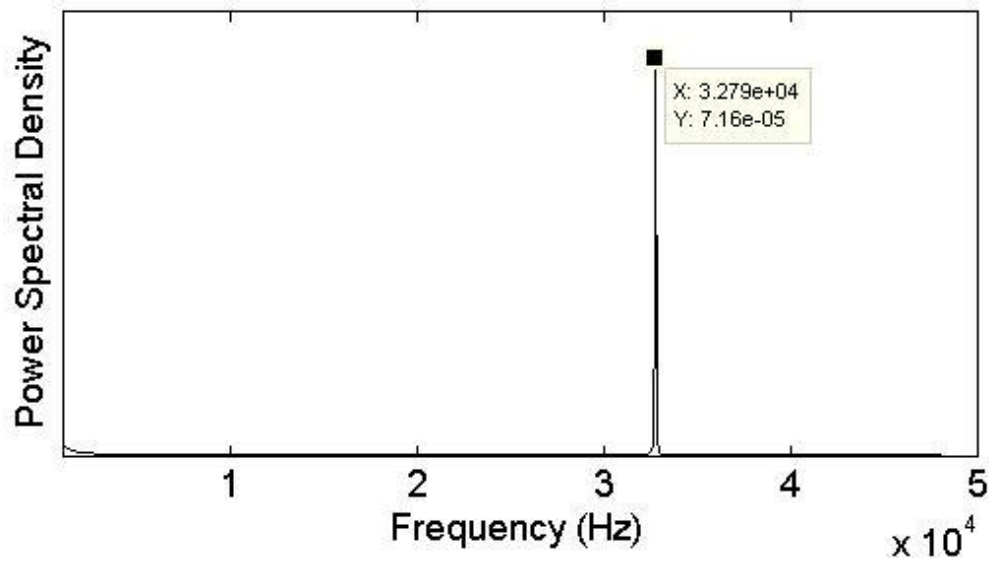


Figura 24. Espectro de frecuencia Cobre a Temperatura ambiente 18°C

La tabla 3 muestra el resumen de su frecuencia de resonancia fundamental junto al módulo elástico obtenido con la IET para el acero inoxidable 316 y cobre a temperatura ambiente.

Tabla 2. Resumen resultados experimentales

Material	f_e	$\omega_{n_{e1}} = f_e 2\pi$	E
	Frecuencia Experimental [Hz]	Frecuencia Natural Experimental [rad/s]	Módulo Elástico Experimental [GPa]
Acero Inoxidable 316	32770	205899,98	203,23
Cobre	32790	206025,65	101,02

El valor obtenido para el módulo elástico está dentro del rango esperado para ambos materiales, para el acero inoxidable 316 varía entre 190 y 210 GPa [16]; y para el cobre varía entre 82 y 127 GPa [17].

5.3. Módulo de elasticidad a distintas temperaturas

A continuación se muestran los resultados obtenidos para el acero inoxidable 316 para distintas temperaturas, variando entre la temperatura ambiente (18°C) y 800 °C.

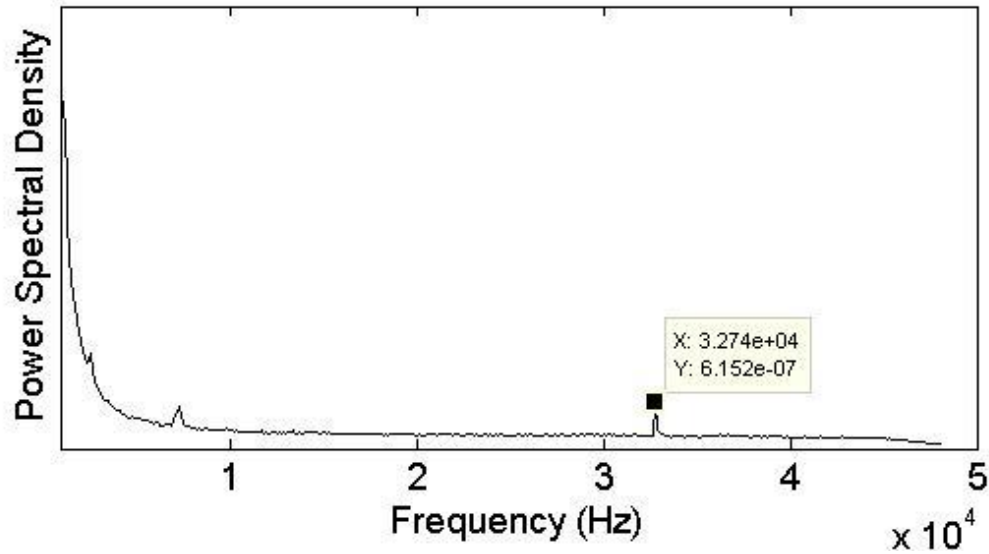


Figura 25. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 50°C

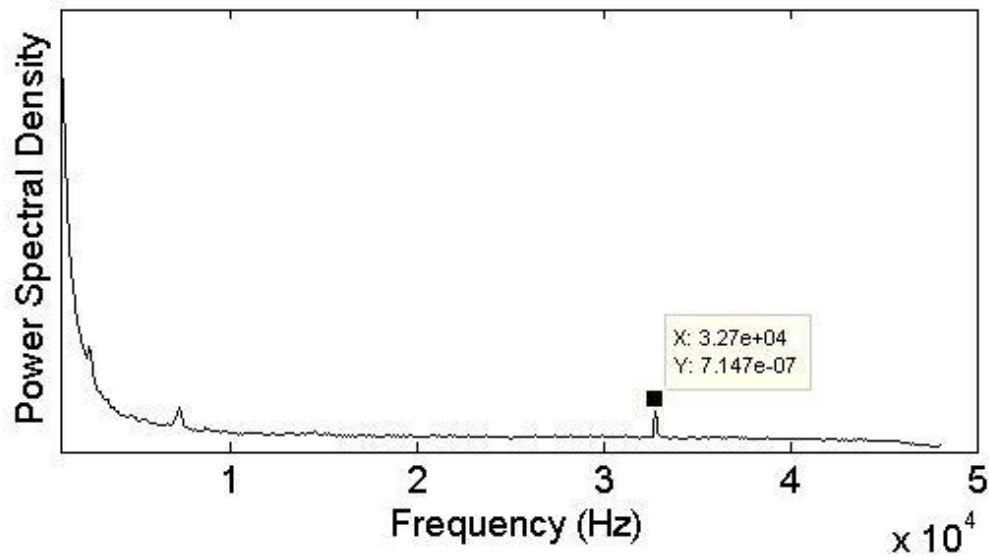


Figura 26. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 100°C

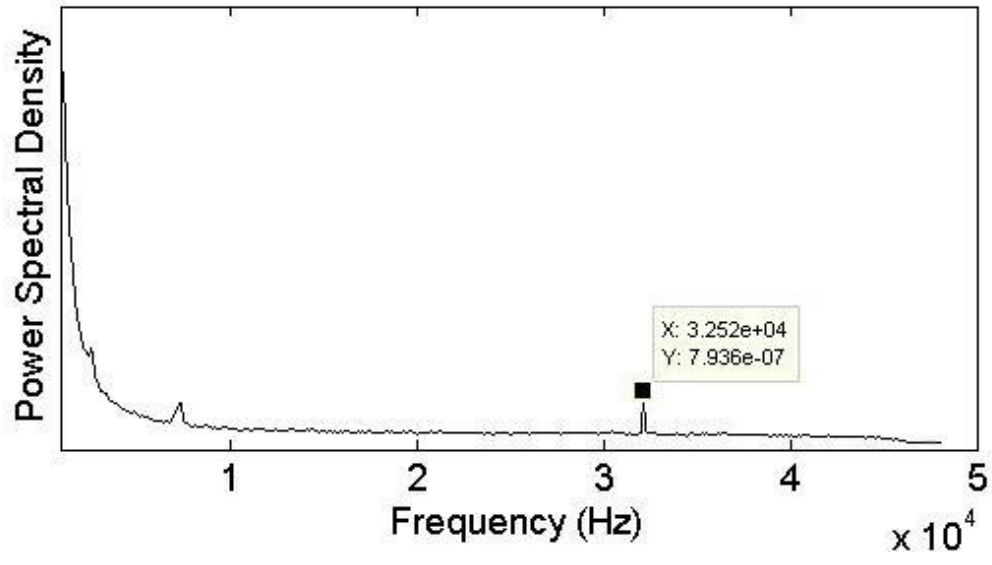


Figura 27. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 150°C

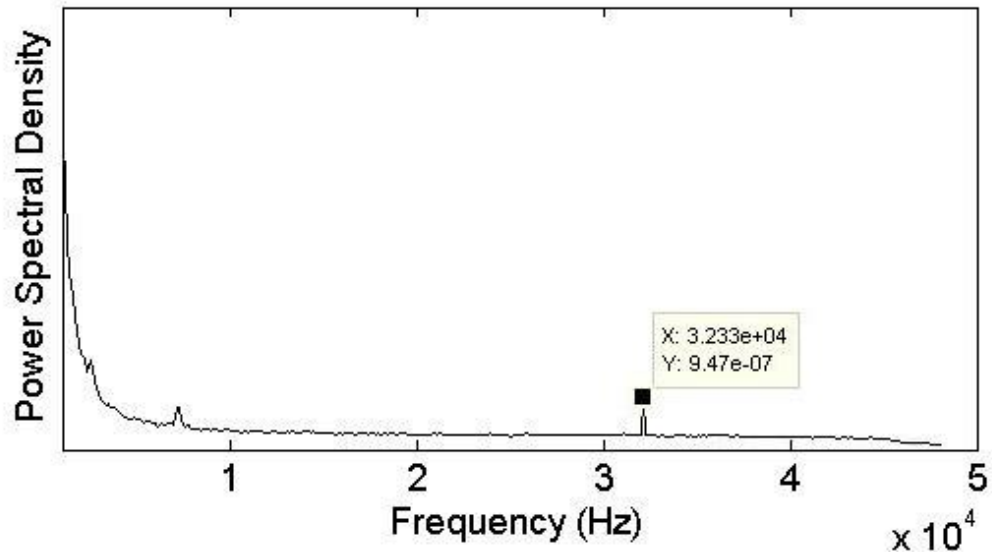


Figura 28. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 200°C

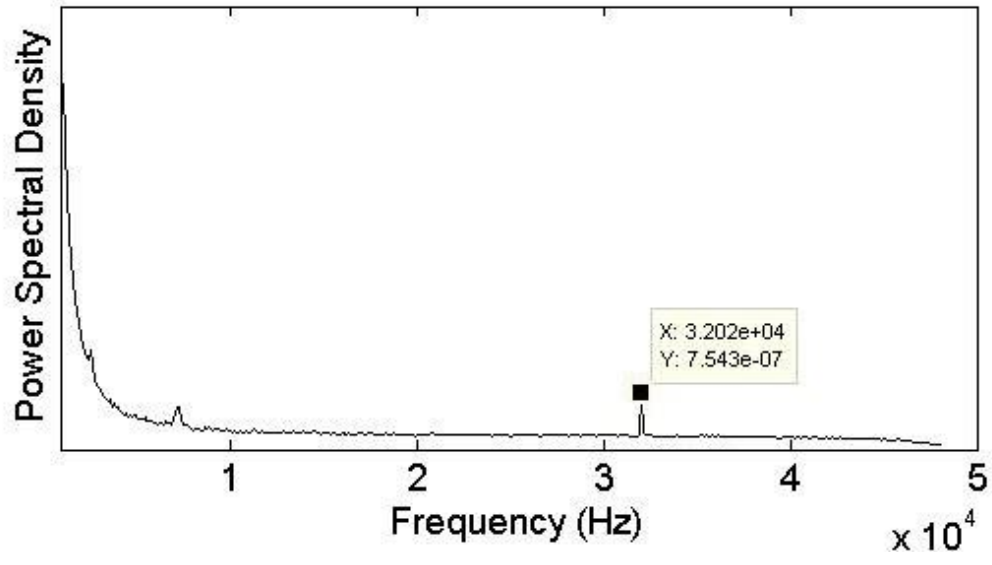


Figura 29. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 250°C

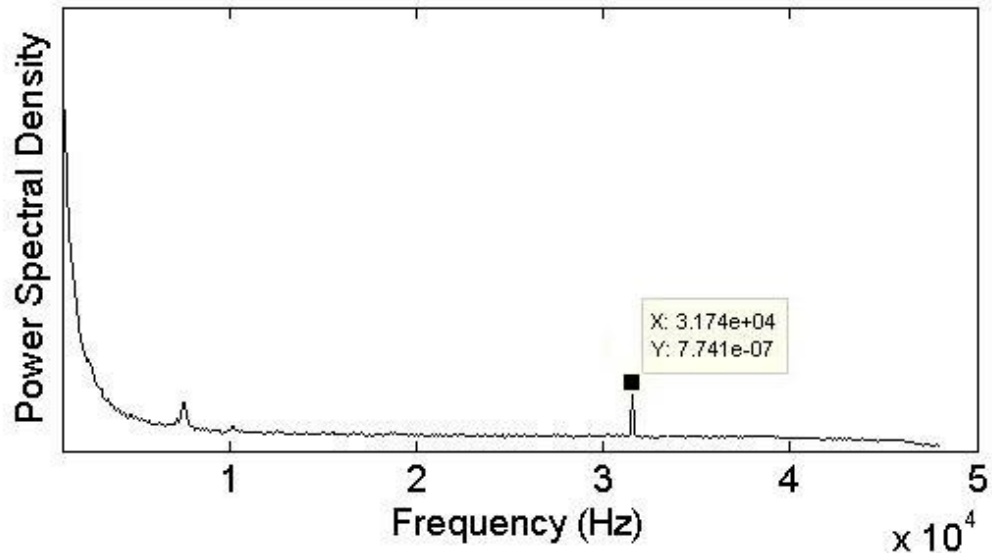


Figura 30. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 300°C

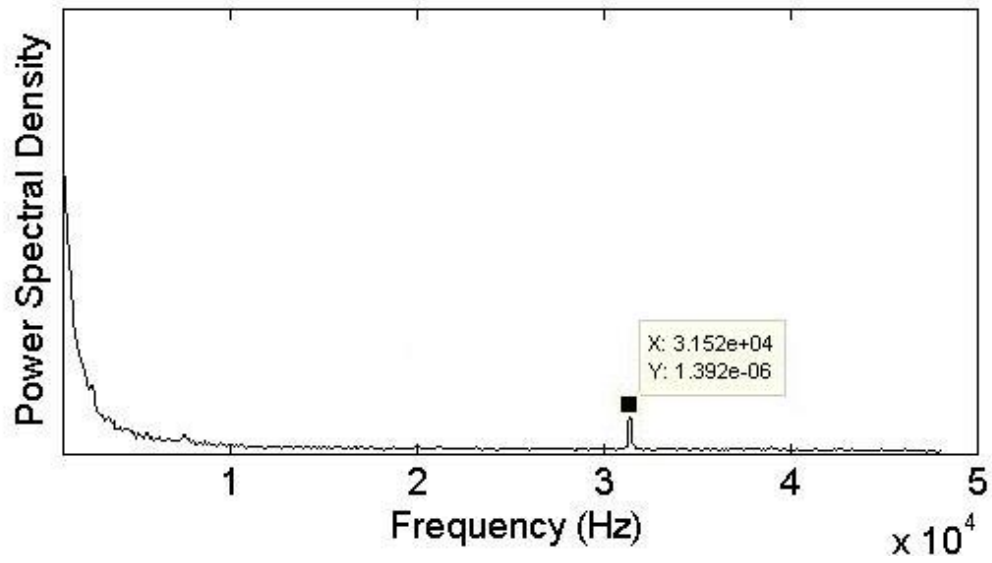


Figura 31. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 350°C

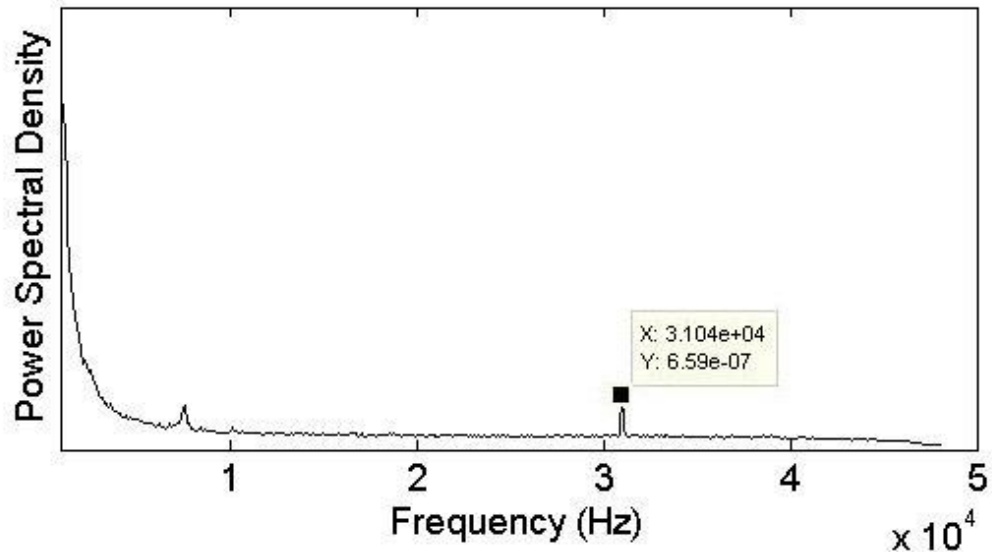


Figura 32. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 400°C

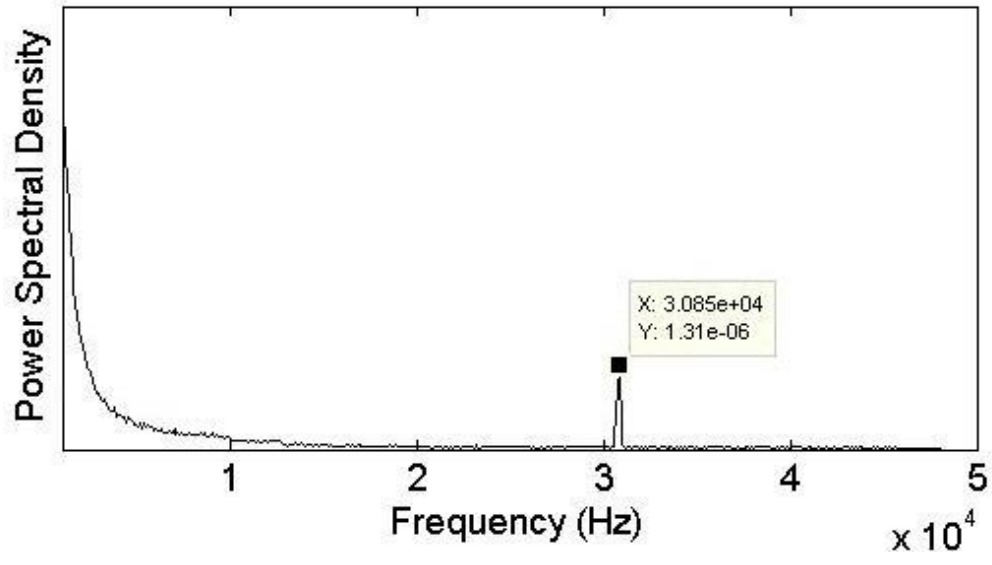


Figura 33. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 450°C

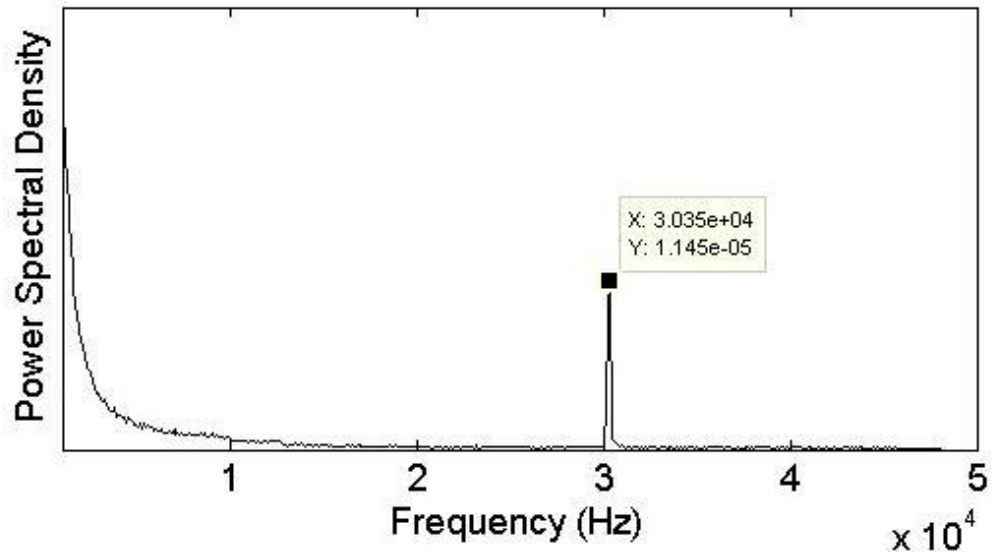


Figura 34. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 500°C

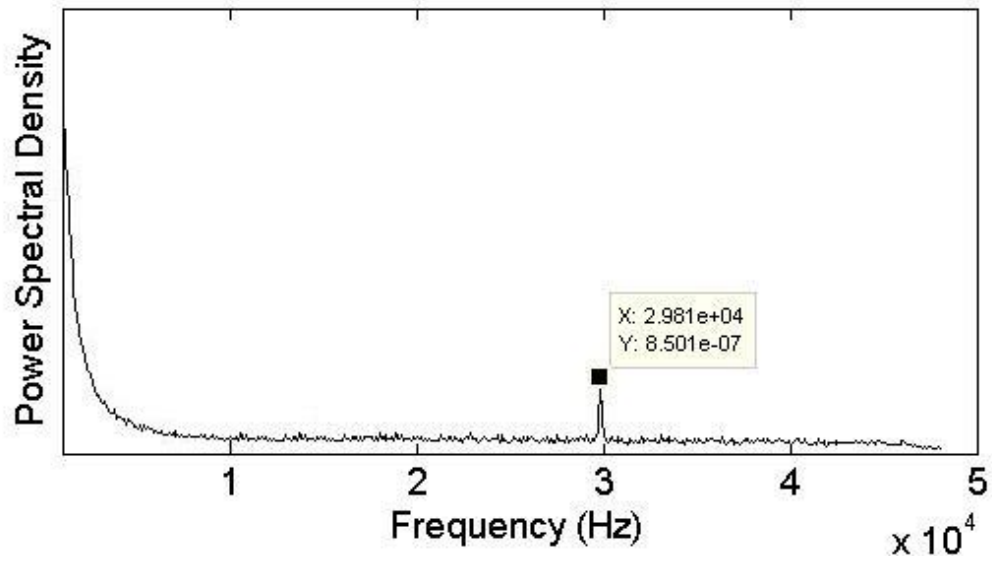


Figura 35. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 550°C

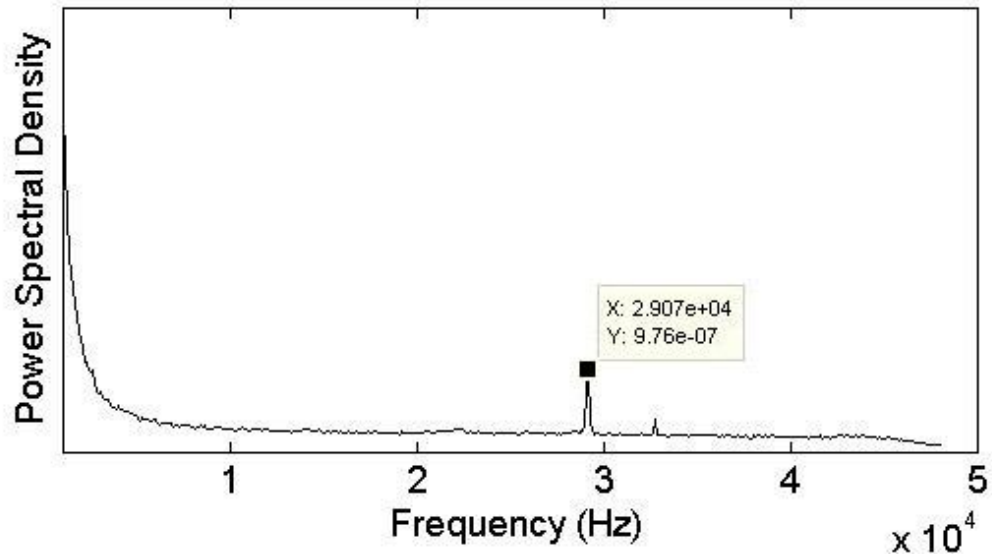


Figura 36. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 600°C

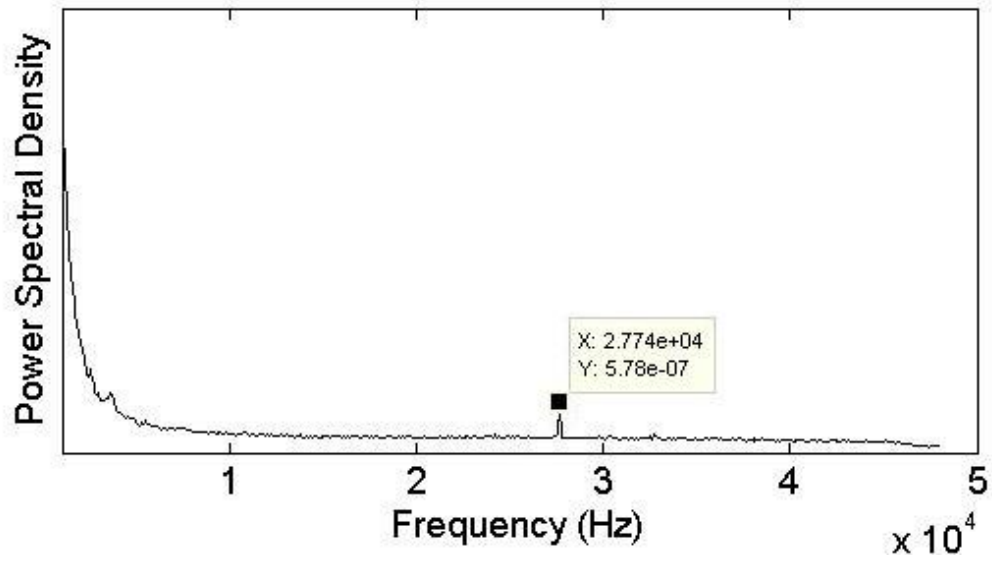


Figura 37. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 700°C

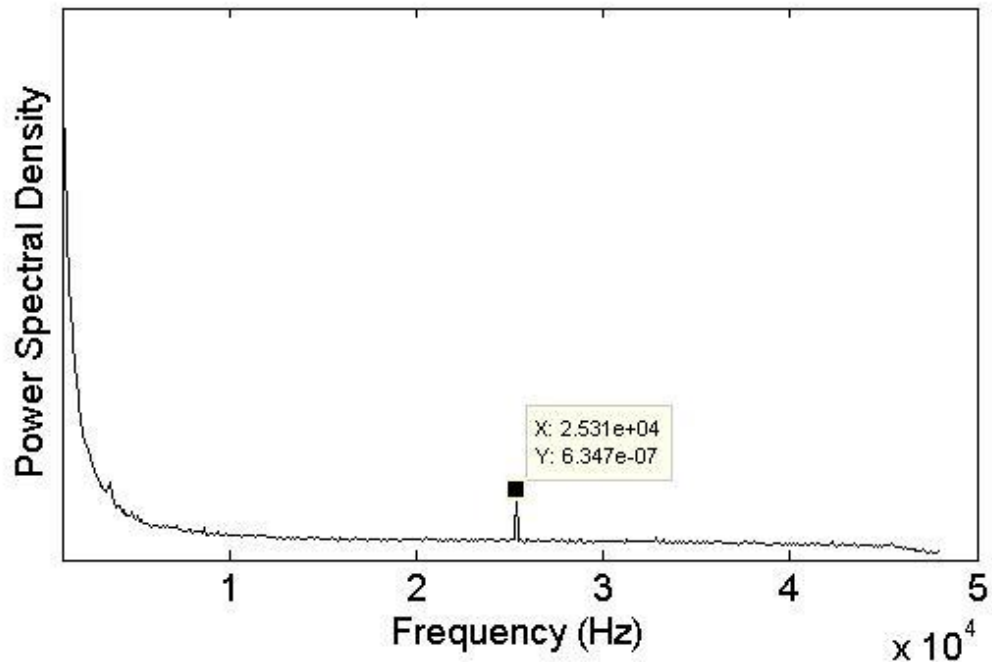


Figura 38. Espectro de frecuencia Acero Inoxidable a 800°C

En la tabla 5 se resumen la frecuencia de resonancia fundamental junto con valor del módulo elástico asociado a la frecuencia obtenida para cada temperatura.

Tabla 3. Parámetros del software de adquisición de datos

Temperatura [°C]	Frecuencia Experimental [Hz]	Módulo elástico [GPa]
18	32770	203,23
50	32740	202,86
100	32700	202,36
150	32520	200,14
200	32330	197,81
250	32020	194,03
300	31740	190,65
350	31520	188,02
400	31040	182,34
450	30850	180,11
500	30350	174,32
550	29810	168,17
600	29070	159,93
700	27740	145,63
800	25310	121,23

Se observa que a medida que aumenta la temperatura disminuye la frecuencia de resonancia, por ende, también el modulo elástico que depende directamente del valor de la frecuencia de resonancia fundamental al cuadrado. Que el valor del módulo elástico vaya disminuyendo para el acero inoxidable 316 nos indica que a mayor temperatura se requerirá un menor esfuerzo para deformar una unidad de largo. Esto principalmente debido a que como el módulo de elasticidad está relacionado con la fuerza del enlace entre los átomos y, al aumentar la temperatura hará variar la distancia interatómica, dilatándola.

A continuación se puede apreciar el gráfico 37 en donde se puede observar como disminuye el módulo elástico a medida que aumenta la temperatura; mientras mayor es la temperatura más rápido cae el módulo de elasticidad.

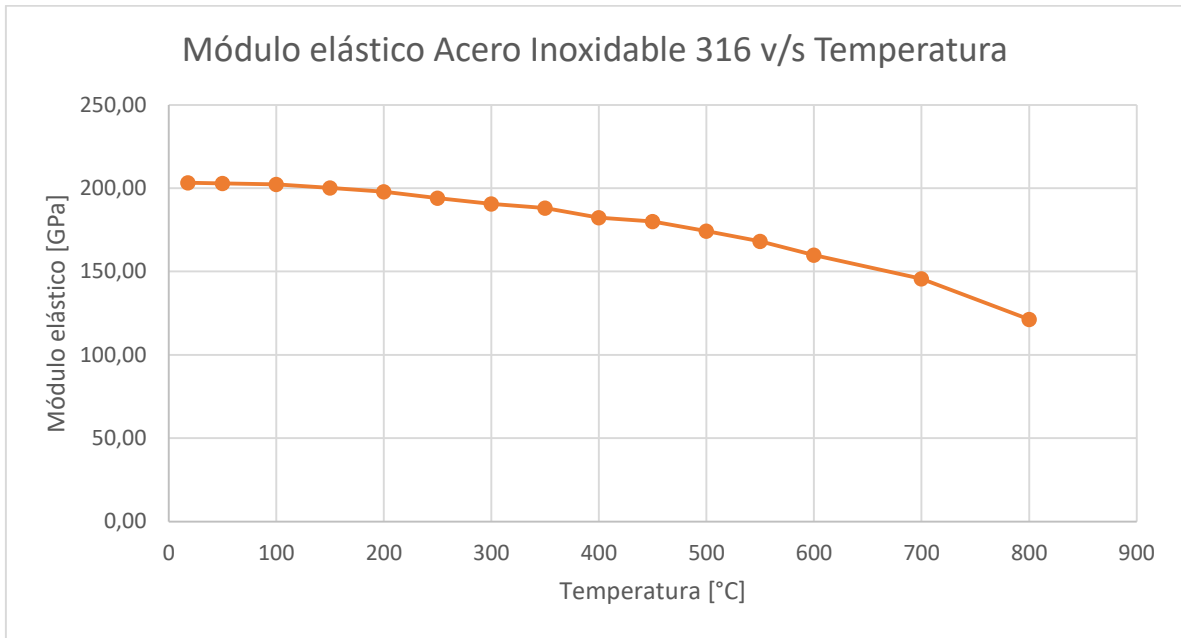


Figura 39. Gráfico del módulo elástico en función de la temperatura para el acero inoxidable 316

6. Conclusión

La necesidad de conocer el comportamiento mecánico de los materiales es de suma importancia para que de esta forma se utilice el material más apropiado para la aplicación deseada.

La técnica de excitación a un impulso es un método no destructivo muy preciso y fácil para calcular las propiedades elásticas de los materiales, que puede operar en un rango amplio de temperatura.

La teoría de la viga de Euler-Bernoulli posee una excelente aproximación a la realidad, y es de fácil uso conociendo las condiciones de borde de la viga.

El diseño y construcción son de un diseño basado en el funcionamiento de un limpiaparabrisas que cumple los objetivos establecidos. Su uso es muy sencillo y funcional. Puede ser operable en un rango amplio de temperaturas debido a los materiales usados en su manufactura, principalmente acero inoxidable 316 que posee un buen comportamiento, resistencia a la corrosión, buenas condiciones de soldabilidad. El sistema es capaz de adaptarse a distintas condiciones, pudiendo variar la velocidad de rotación del motor gracias a una fuente de alimentación ajustable, aumentar altura gracias a la mesa ajustable en altura, también posee un brazo ajustable para poder alcanzar a una distancia mayor la muestra a excitar, lo cual hace que este sea muy versátil, permitiendo medir la vibraciones de la muestra excitada con la ayuda del micrófono tipo sonda.

El valor del módulo de elasticidad obtenido a temperatura ambiente para el acero inoxidable 316 utilizado es de 203,23 GPa, valor que se encuentra dentro de los valores esperados. En el caso del cobre utilizado se obtuvo módulo de elasticidad de 101,02 GPa. En ambos casos se obtuvieron valores dentro de los rangos entregados por los proveedores. De esta forma validando el diseño y el funcionamiento del sistema.

El módulo elástico a distintas temperaturas para el acero inoxidable disminuye a medida que aumenta la temperatura; y mientras mayor es la temperatura el módulo elástico disminuye de forma más rápida. Esto significa que a mayor temperatura se requiere un menor esfuerzo para deformar elásticamente el material una unidad de largo. Esto es debido principalmente al efecto de la temperatura sobre la fuerza de los enlaces atómicos.

Finalmente a modo de resumen se puede decir que:

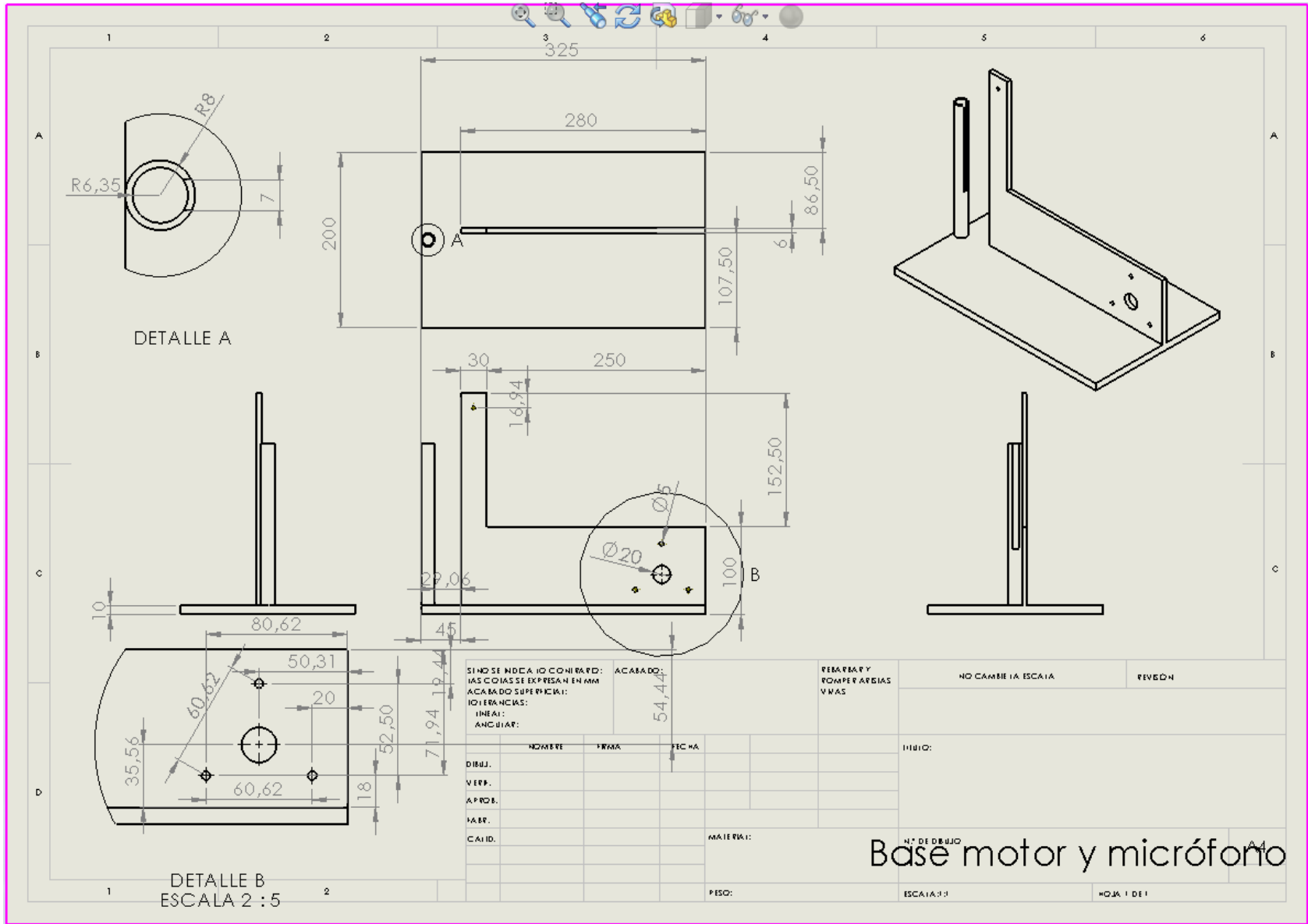
- Se diseñó y construyó un sistema excitador que es capaz de realizar excitación del tipo impulso a una muestra.
- El sistema es capaz de operar en un rango amplio de temperatura y fue posible obtener la frecuencia de resonancia fundamental para calcular el módulo de elasticidad.
- Los resultados en general son satisfactorios, obteniendo valores dentro del rango esperado entregado por los fabricantes.

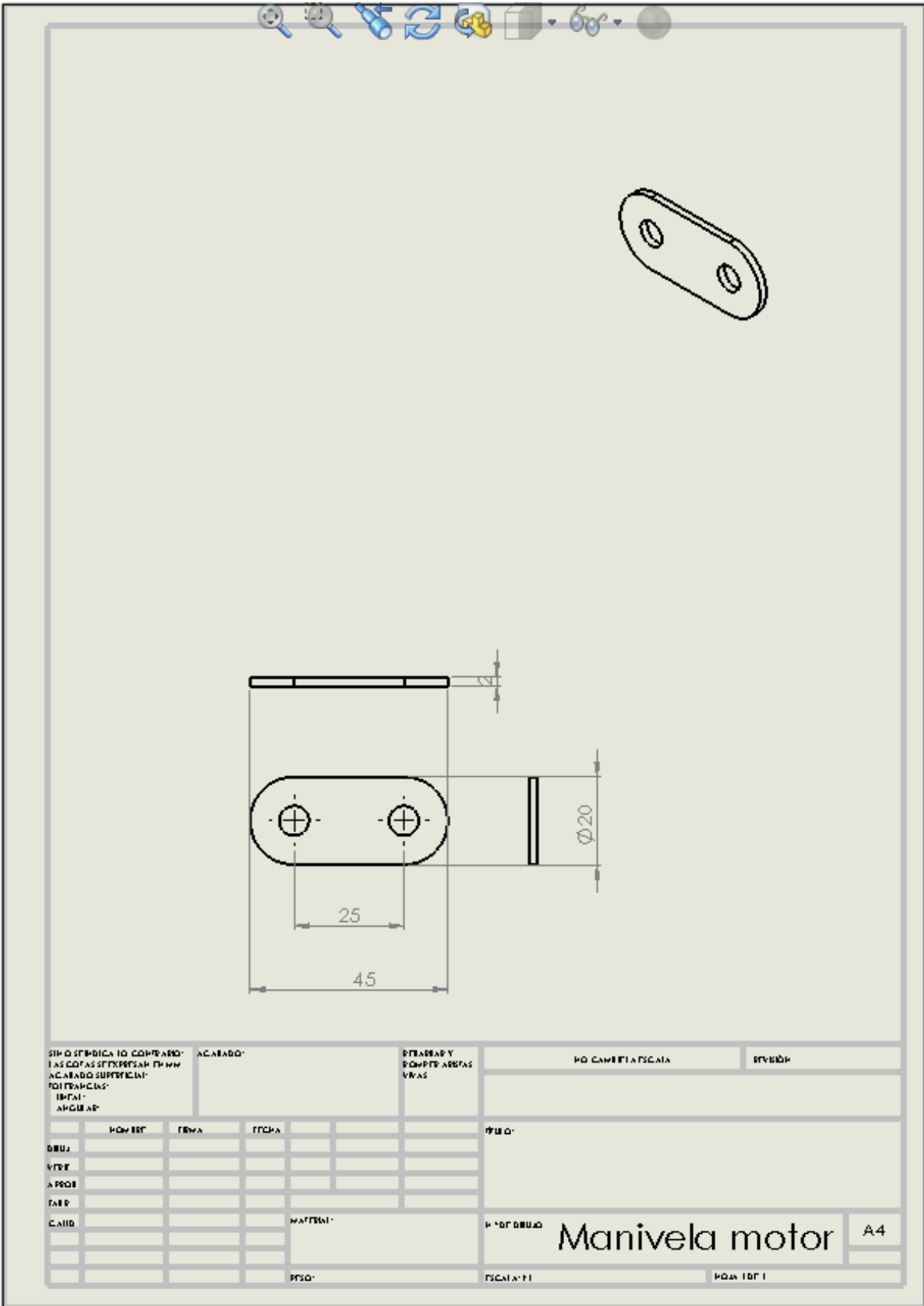
Bibliografía

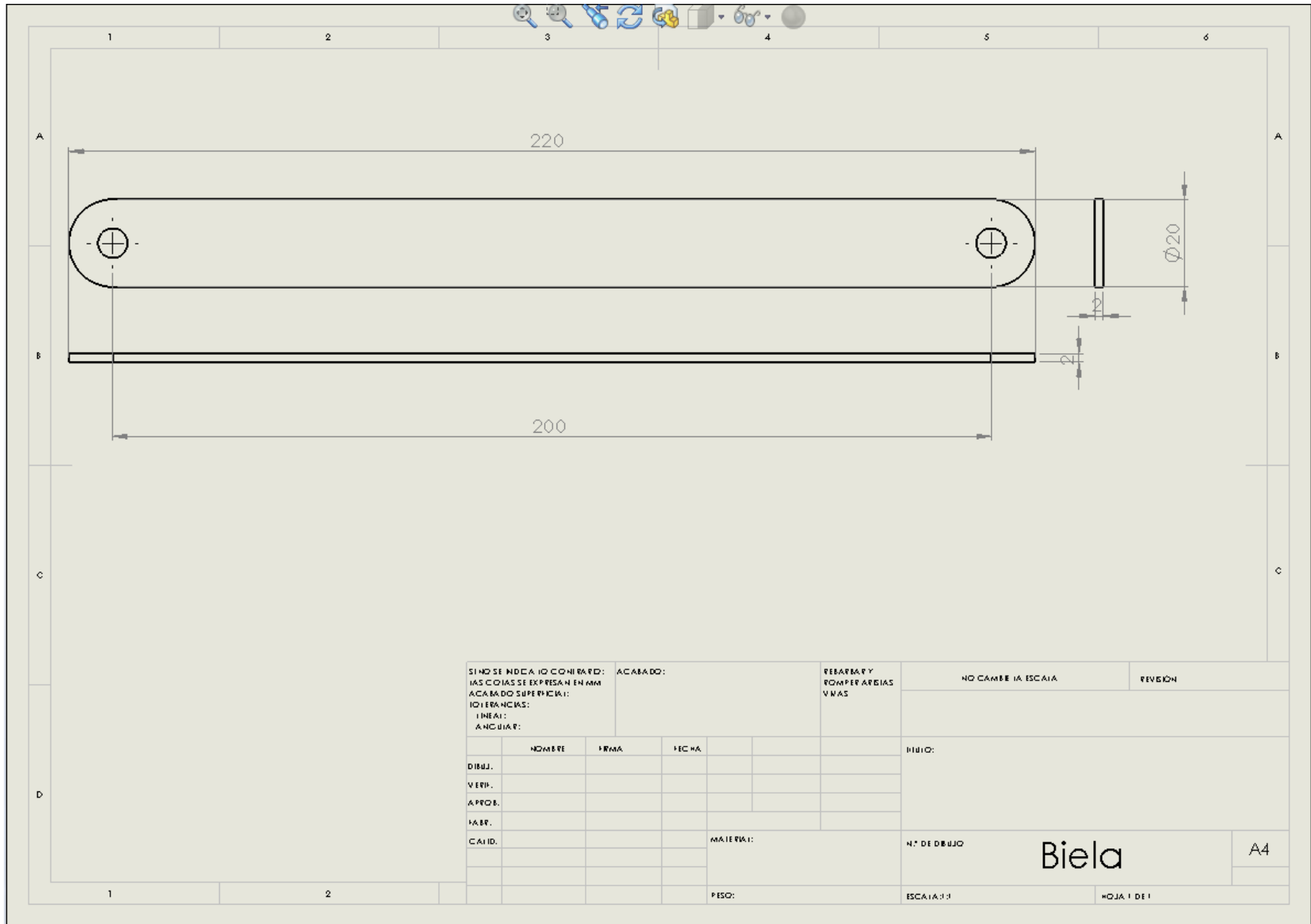
- [1] Daniel.J. Inman, 2008, “Engineering vibration”. Pearson Prentice Hall, Chapter 4 Multiple-degree-of-freedom system. pp.269 – 336.
- [2] Singeresu S. Rao, 2012, “Vibraciones Mecánicas”. Pearson, Ch. 2 (pp.118 – 167), Ch. 5 (pp.430 – 474).
- [3] Viviana Meruane, “Vibraciones Mecánicas. Apuntes para el curso ME4701”.
- [4] Viviana Meruane, Capítulo 4: Vibraciones en sistemas continuos. Disponible en: https://www.ucursos.cl/ingenieria/2011/1/ME4701/1/material_docente/bajar?id_material=361024
- [5] William F. Smith, 2006, “Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales”. McGraw Hill. Cuarta Edición. Pp.213 – 229. Pp. 271 – 281
- [6] IMCE, “Theory: Impulse excitation technique”. Consulta en línea: <http://www.imce.net/theory>
- [7] ASTM E 1876 – 99. “Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excitation of Vibration”. Pp.1075 – 1089
- [8] G. Roebben, B. Bollen, A. Brebels, J. Van Humbeeck, and O. Van der Biest, 1997, “ Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. Pp 4511 – 4515.
- [9] <http://www.aperam.com/uploads/stainlesseurope/TechnicalDataSheet/FT%20aust%C3%A9nitiques/Espagnol/316L-1811ML-Aperam.pdf>
- [10] Propiedades acero SAE1020. Consulta en línea: <http://www.acerosbravo.cl/imgmodulo/Imagen/108.pdf>
- [11] Adquisición de datos Sinocera YE6231. Consulta en línea: <http://www.sinopiezo.com/instruments/voltage-or-iepe-input-data-acquisitions.html>
- [12] Micrófono ICP sonda, modelo 377B26. Manual de instalación y operación. Consulta en línea: http://www.pcb.com/contentstore/docs/PCB_Corporate/Vibration/Products/Manuals/377B26.pdf

- [13] V. Meruane. Capítulo 4 Vibración de sistemas continuos. Disponible en: https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2011/1/ME4701/1/material_docente/bajar?id_material=361024
- [14] Propiedades de la fibra cerámica. Disponible en: <http://cym-sanpascual.cl/wp-content/uploads/2014/05/Ficha-tecnica-Fibra-Ceramica.pdf>
- [15] Características del variador de Voltaje/corriente: <http://www.mcpsh.com/pd.jsp?id=55>
- [16] Propiedades mecánicas del acero inoxidable 316. Disponible en: <http://www.goodfellow.com/S/Acero-Inoxidable-AISI-316.html>
- [17] Propiedades mecánicas del cobre. Disponible en: http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/solido/din_rotacion/alargamiento/alargamiento.htm

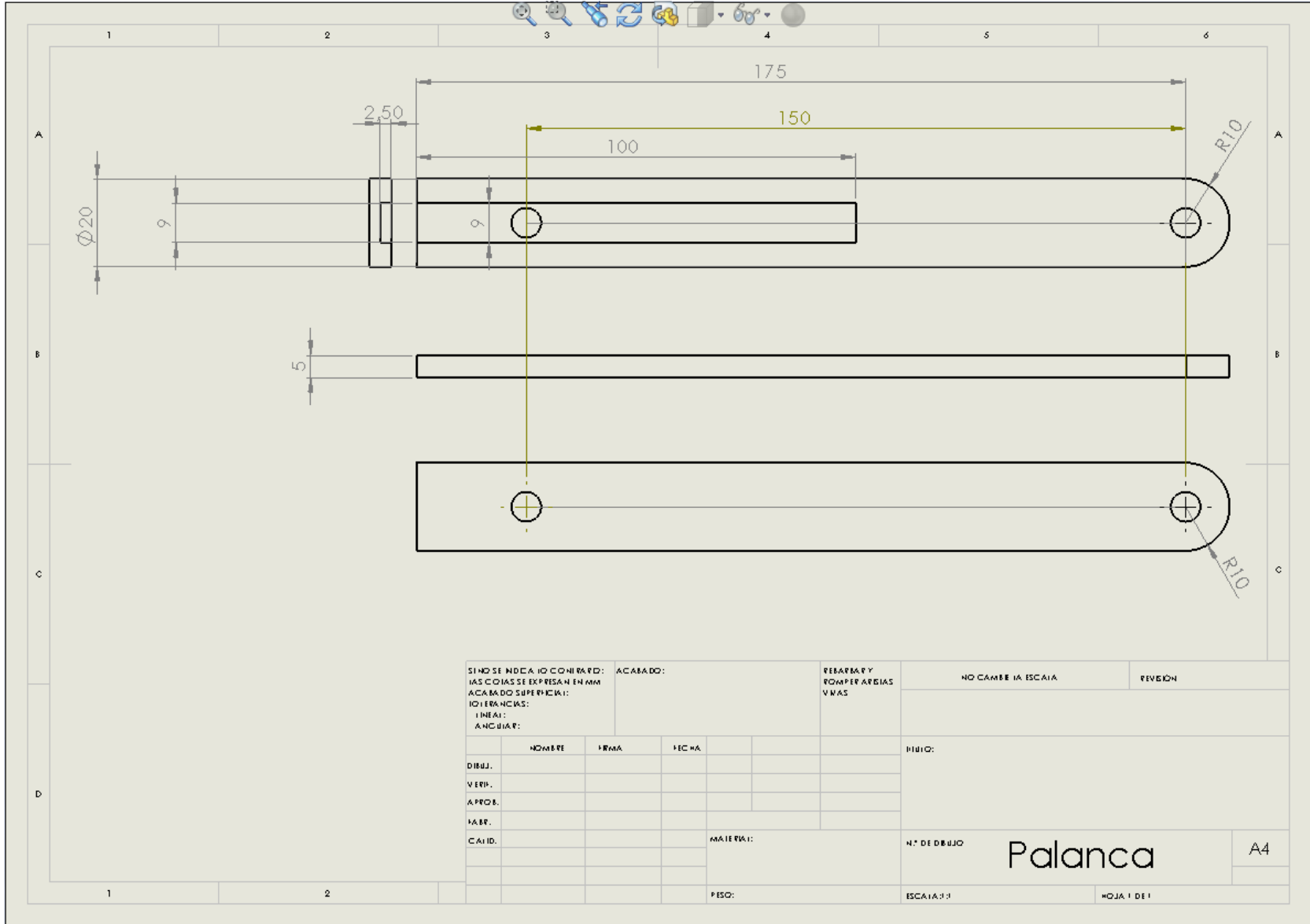
ANEXO A

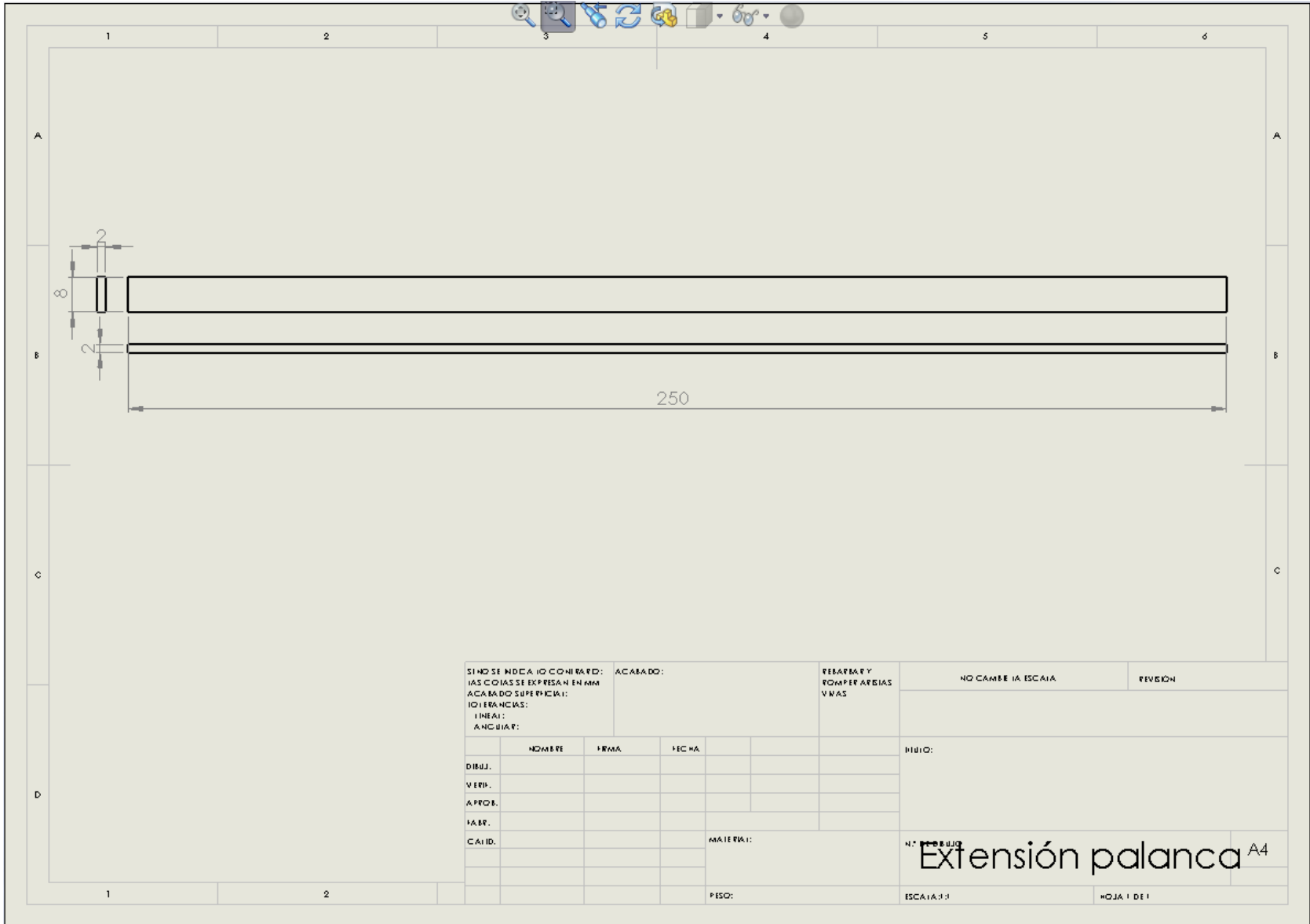






SI NO SE INDICA LO CONTRARIO: LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM ACABADO SUPERFICIAL: DIFERENCIAS: LINEAS: ANGULOS:				ACABADO:	FEERIAS Y COMPLETAR LAS VIRAS	NO CAMBIE LA ESCALA	REVISION
DIBUJ.				FECHA		FINIC:	
VERIF.							
APROB.							
FABR.							
CALID.					MATERIAL:	Nº DE DIBUJO	Biela
						ESCALA: 1:1	A4
					PESO:	HOJA 1 DE 1	





SIN SE INDICA LO CONTRARIO: ACABADO: REBARBAR Y
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM. ACABADO SUPERFICIAL: POMPPEAR PERSIAS
 IDENTIFICACIONES: V MAS
 LINEAL: NO CAMBIE LA ESCALA REVISION
 ANCLAJE:

	NOMBRE	FIRMA	FECHA		
DIBUJ.					
VERIF.					
A. PROJ.					
TA. EF.					
CAJ. ID.					

TITULO: **Ensamblaje Martillo^{A4}**
 ESCALA: 1:1 HOJA 1 DE 3
 PESO:

1 2 3 4 5 6

A A

B B

C C

D

1 2

SI NO SE INDICA LO CONTRARIO:
 LAS COTAS SE EXPRESAN EN MM
 ACABADO SUPERFICIAL:
 TOLERANCIAS:
 LINEAL:
 ANGULAR:

ACABADO:

REBARBAR Y
 ROMPER ARISTAS
 VMAS

NO CAMBIE LA ESCALA

REVISION

	NOMBRE	FRAMA	FECHA
DIBUJ.			
VERIF.			
APROB.			
ELAB.			
CALD.			

TÍTULO:

MATERIAL:

HOJA DE DIBUJO

Ensamblaje Martillo^{A4}

ESCALA: 1:1

HOJA 2 DE 2

PBO:

ANEXO B

INFORMACIÓN TÉCNICA DE COMPONENTES

B.1 ACERO INOXIDABLE 316

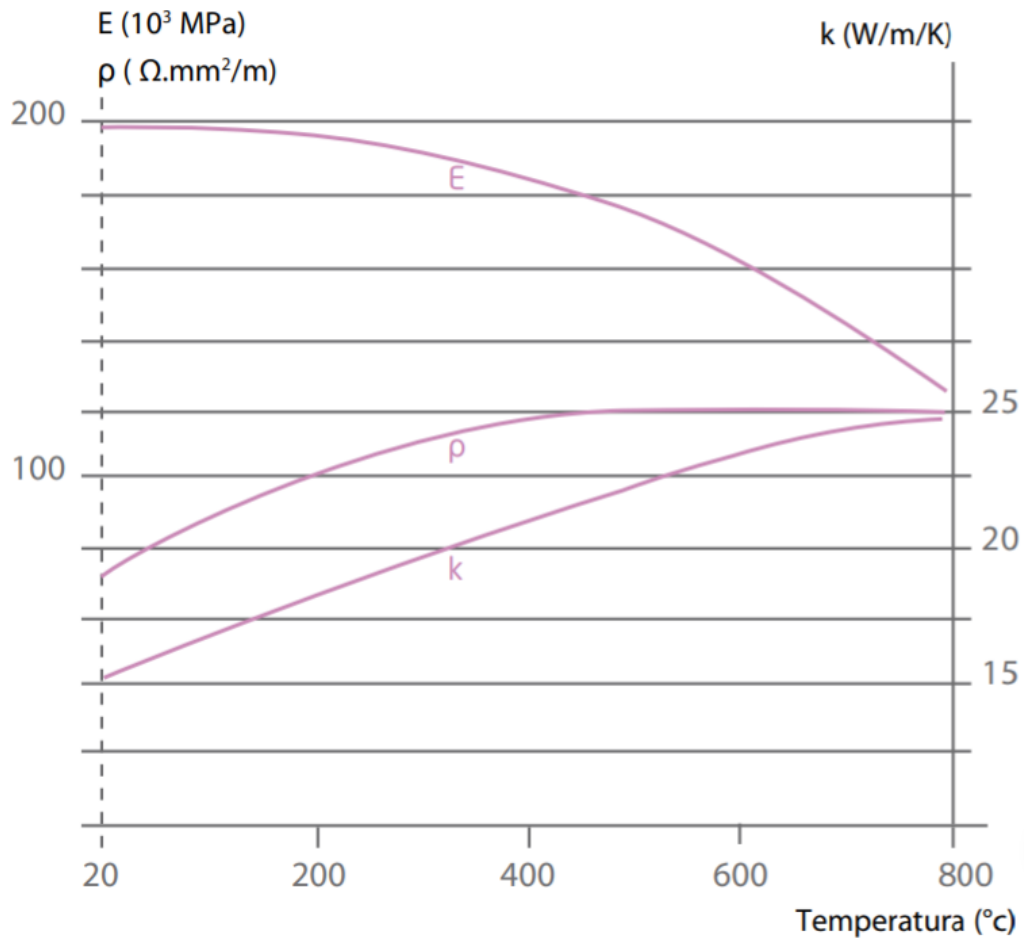
Propiedades mecánicas

Densidad	<i>kg/dm³</i>	20°C	7.9
Calor específico	<i>J/kg K</i>	20°C	500
Conductividad Térmica	<i>W/m K</i>	20°C	15
Módulo de Young	<i>GPa</i>	20°C	190-210
Coefficiente de Poisson			0.3

Composición química (valores promedio, %)

Calidad	C	Cr	Mo	Ni
316	≤ 0.07	16.5-18.5	2-2.5	10-13

A continuación se observa el módulo de Young en función de la temperatura



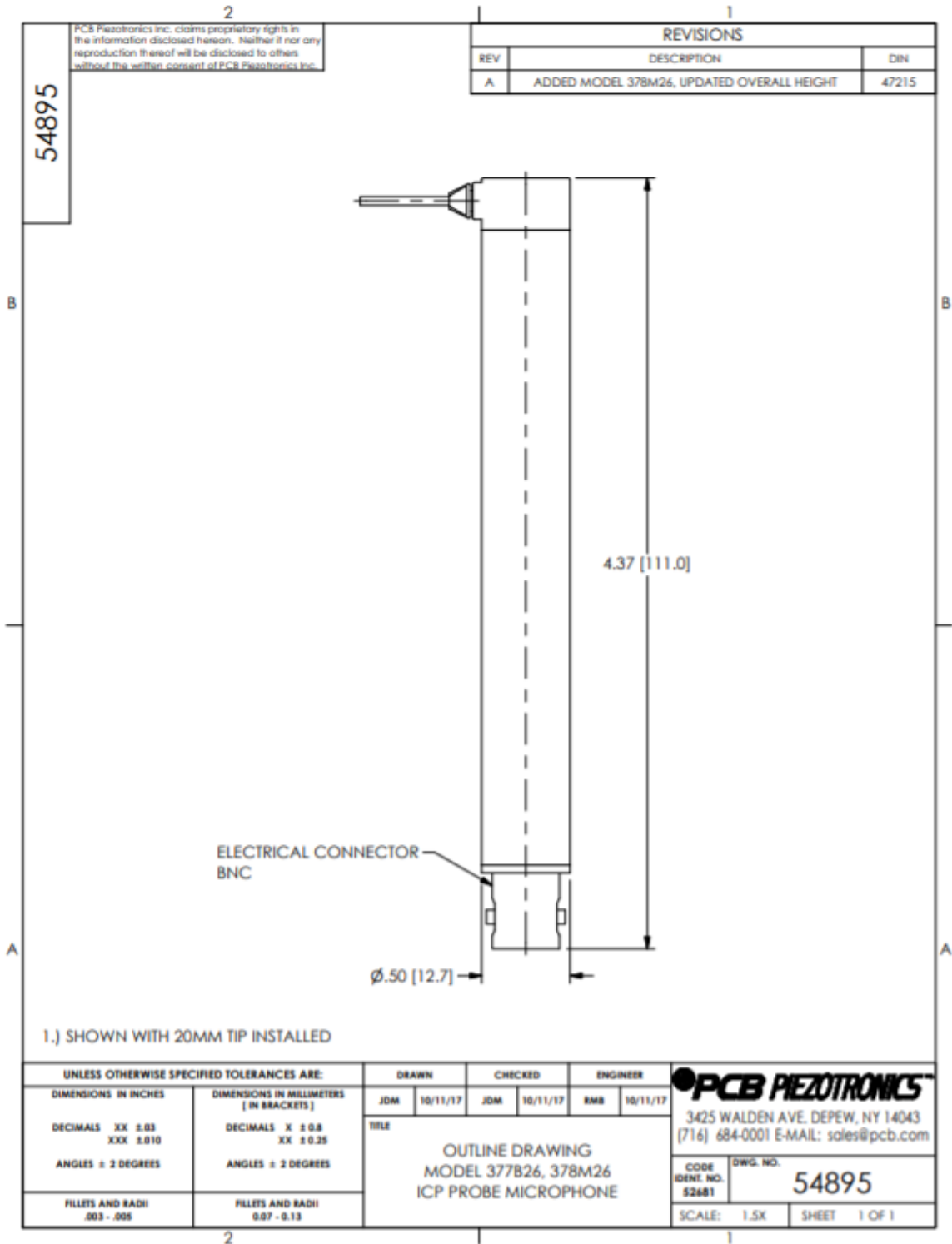
B.4 MICRÓFONO Y SISTEMA DE ADQUISICIÓN

Características del sistema de adquisición de datos

Fabricante	SINOCERA PIEZOTRONICS, INC
Modelo	YE6231
Canales de entrada	4
Canales de salida	4
Resolución dinámica	24 bits



Fabricante	PCB PIEZOTRONICS INC
Modelo	377B26
Rango de temperatura (operación)	-40 a 70 [°C]
Rango de temperatura (con sonda de 20mm)	-40 a 400 [°C]
Rango de temperatura (con sonda de 40 a 160mm)	-40 a 800 [°C]
Rango de frecuencias	2 a 20000 [Hz]
Voltaje de polarización	0 [V]
Impedancia de salida	<50 [Ohm]
Material capsula	Acero inoxidable
Material de sonda	Acero inoxidable
Conector eléctrico	BNC Jack
Diámetro	12.7 [mm]
Largo	111 [mm]
Peso	55 [gr]



B.5 FUENTE DE ALIMENTACIÓN AJUSTABLE

La fuente de alimentación ajustable lineal de **30V / 5A** CC es un equipo con alta estabilidad, alta confiabilidad, bajo ruido, su voltaje de salida o corriente se puede ajustar de manera continua, y su voltaje y corriente constantes se pueden convertir automáticamente.

Características:

- 16 horas de salida continua con carga completa
- baja ondulación y ruido
- Conmutación automática de CV / CC
- enfriador de aletas de aluminio
- Pantalla LED de 3 dígitos

Especificaciones técnicas:

Regulación de línea: CV $1 \times 10^{-4} + 3\text{mV}$ CC $2 \times 10^{-3} + 3\text{mA}$

Carga Regulación: CV $1 \times 10^{-4} + 4\text{mV}$ CC $2 \times 10^{-3} + 5\text{mA}$

Exactitud de visualización: $\pm (0.5\% \text{ Rdg} + 2 \text{ digitOs})$

Voltaje de entrada: 110 ~ 127VAC $\pm 10\%$, 220 ~ 240VAC $\pm 10\%$

Dimensiones (L x W x D): 130x165x230mm

Peso: 5kg

ANEXO C

C.1 CODIGO MATLAB DE APLICACIÓN DE TRANSFORMADA DE FOURIER

```
function [f,espectro]=fftt(x,t)
[n,c]=size(x);
if n<c
    x=x.'; %x es ahora una columna
end
[n2,c]=size(t);
if n2<c
    t=t.'; %t es ahora una columna
end

[n]=size(x);
[n2]=size(t);

if n~=n2
    sprintf('Vectores no tienen la misma dimensión')
    return;
end

N=length(x);

if mod(N,2)~=0
    x=x(1:N-1);
    t=t(1:N-1);
    N=length(x);
end

dt=t(2:2:N)-t(1:2:N-1);
if norm(dt-dt(1))>1e-4
    sprintf('Tiempo no esta equiespaciado')
    return;
end

T=dt(1);
F=1/T;
```

```

f = F*(0:N/2)/N;

espectro=fft(x,N); %FFT bruta
espectro=espectro/(N/2); %correccion de amplitud
espectro(1)=espectro(1)/2;%correccion de amplitud componente estatica
espectro=espectro(1:N/2+1);

[n,c]=size(espectro);
if n<c
    espectro=espectro.'; %espectro es ahora una columna
end
[n2,c]=size(f);
if n2<c
    f=f.'; %f es ahora una columna
end

```

C.2 CODIGO MATLAB PARA OBTENCION DE LAS FRECUENCIAS DE RESONANCIA EN GRÁFICO

```

clear all;
close all;
clc

load nombre_archivo; %Archivo debe tener extensión “.MAT”

Datos=detrend(Data(1:end));
DataCount=length(Datos);
t=0:Interval:(DataCount-1)*Interval;

figure
plot(t,Datos)

a=max(Datos);
ampl=.40;
[pks,locs] = findpeaks(abs(Datos),'minpeakheight',a*ampl);

```

```

i=1;
while length(pks)>1
i1=[locs(1)-50:locs(1)+1500];

Data1=Datos(i1,:);

%remover datos
Datos=Datos(setdiff(1:length(Datos),i1));

DataCount=length(Data1);
t=0:Interval:Interval*(DataCount-1);

%ventana
alpha=100;
exp_win=exp(-alpha*(t(1:DataCount-50)));
exp_win=[ones(1,50) exp_win];

[f,espectro(:,i)]=fft(Data1(:,1).*exp_win',t);

P(:,i)=abs(espectro(:,i).*conj(espectro(:,i))));

% figure
% set(gcf,'Position',[100 100 600 300])
% plot(t,Data1(:,1).*exp_win','k')
% ylabel('Respuesta (g)','FontSize',14)
% xlabel('Tiempo (s)','FontSize',14)
% title(['Golpe ' num2str(i)])
%
% figure
% set(gcf,'Position',[100 100 600 300])
% plot(f,abs(espectro(:,i)),'k')
% set(gca,'FontSize',14)
% xlabel('Frequency (Hz)','FontSize',14)
% ylabel('Power Spectral Density','FontSize',14)

i=i+1;
[pks,locs] = findpeaks(Datos,'minpeakheight',a*ampl);
end

```

```
% seleccionados=1:7;

E=mean(abs(P'));

figure
set(gcf,'Position',[100 100 600 300])
plot(f,abs(E),'k')
set(gca,'FontSize',14)
xlabel('Frequency (Hz)','FontSize',14)
ylabel('Power Spectral Density','FontSize',14)
xlim([1000 5e4])
set(gca,'YTick',[])
```

ANEXO D

D.1 CALCULO DE DIMENSIONES PARA SISTEMA A CONSTRUIR

Para definir las dimensiones se tomaron las dimensiones conocidas como por ejemplo el radio interior del horno tubular vertical (50mm), dimensión de la ventana del horno (100x80x10mm), como también se realizaron unos supuestos para definir las longitudes, por ejemplo que el movimiento del excitador dentro del horno será de 20° realizado de forma simétrica. En la figura se muestra que el excitador tendrá como lugar de palanca el punto (6), el cual se encuentra conectado a la biela (2) a 150 mm de distancia; la biela con una longitud de 200 mm se encuentra conectada con la palanca del motor (4), el cual fue calculada para obtener los 20° de movimiento para el martillo excitador (1). En color verde se observa los elementos del excitador cuando este se encuentra en la posición más alta con respecto a la muestra a excitar y con color azul cuando entra en contacto con la muestra. Las circunferencias de color rojo de 200 mm de largo muestra el largo de la biela en sus distintas posiciones de interés.

Finalmente al definir las dimensiones mencionadas, se procede a calcular el radio de giro de la palanca resultando un largo final de 25 mm.

