



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**Introducción a un Novedoso Método para Detectar Grietas en base a Materiales
Piezoeléctricos y Piezorresistivos**

POR

Vicente Tomás Araya Morales

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Aeroespacial

Profesor Guía:
PhD. Carlos Andrés Medina Muñoz

Marzo 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Vicente Tomás Araya Morales

© 2025 Vicente Tomás Araya Morales

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o
procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

Quiero empezar agradeciendo al Dr. Carlos Medina por confiarme el desarrollo de este proyecto, darle los recursos necesarios para su ejecución, su iniciativa y diligencia para destrabar problemas y su apoyo moral en aquellos momentos en que parecía que no se estaba llegando a buen puerto. También quiero dedicarle unas palabras al Dr. Pablo Aqueveque, Don Francisco Pastene y a todo el personal del laboratorio Pañol por su invaluable asesoramiento respecto a la parte electrónica del proyecto y al acceso a los equipos de la carrera de Ingeniería Civil Biomédica. De la misma forma, quiero agradecer al Departamento de Ingeniería Eléctrica por poner a disposición a sus equipos y herramientas. Finalmente, me gustaría darle un afectuoso saludo al personal del taller mecánico por acompañarme y ayudarme durante todos estos meses de trabajo.

Esta memoria está dedicada a mi familia, por apoyarme incondicionalmente en todo este ciclo universitario, en las buenas y en las malas. A mis compañeras y compañeros, por los recuerdos inmemorables que dejaron, y seguirán dejando, y el impacto que cada uno tuvo en mi formación, ya sea estudiando juntos o arruinando nuestros hígados. Y finalmente, le quiero dedicar este trabajo a la patria, que me ha visto y dado la oportunidad de crecer, y como tal, me comprometeré a devolverle la mano, ya como un profesional.

Resumen

El campo del monitoreo de salud estructural ha estado en apogeo desde principios del nuevo milenio, dentro de este tema, la detección de grietas es primordial para saber el estado de una estructura determinada y proyectar su tiempo de vida. Por otro lado, los materiales piezoeléctricos se han ocupado con gran fiabilidad en otros aspectos, como lo son sonares, micrófonos, parlantes, equipos médicos, circuitos, defensa, entre otros, desde el principio del siglo XX. Para lo que son grietas, han demostrado tener varias aplicaciones, como lo son los sensores de acústicos, vibracionales y transductores. Mientras que, por otro lado, los materiales piezorresistentes, como el Velostat, se han ido expandiendo hace pocos años en el ámbito de sensores, por ejemplo, las mediciones de masa o empuje. En efecto, este proyecto aborda si es posible detectar grietas estructurales usando materiales piezoeléctricos y piezorresistentes, donde se fabricó un sensor con 70% de su peso total en material piezoeléctrico y 30% en matriz de epoxi, el cual al ser sometido a pruebas de impacto entregó un voltaje de respuesta de hasta $7.2 [\mu V]$. Mientras que, al ser expuesto a vibraciones, demostró dar una respuesta con una frecuencia igual a la de excitación y a una amplitud dependiente a la aceleración que está sometida. De la misma forma, se validó el sensor piezoeléctrico para la detección de grietas realizando diversos ensayos de fatiga, donde se obtuvieron señales de hasta $66 [\mu V]$ para cuando este se terminaba de romper. Con respecto a los sensores piezorresistentes, se demostró que su incremento en resistencia eléctrica es directamente proporcional a la propagación de la grieta, y se puede asociar la aparición de una grieta cuando hay un 60% de aumento en su resistencia eléctrica con respecto a su valor inicial. Como conclusión, se puede validar nuevas formas de detección de grietas mediante el uso de materiales piezoeléctricos y piezorresistivos. En base a la innovación sobre los métodos actuales, el desarrollo y aplicación de una metodología sólida, y la caracterización de estas nuevas formas de detección mediante ensayos de impacto, fatiga y vibración.

Abstract

The field of structural health monitoring has been increasingly growing since the turn of the millennium. Among the topics that involve this field, the detection of cracks has been primordial to diagnose the state of a given structure and estimate its remaining life. Among other things, piezoelectric materials have been used widely and with good reliability in other topics, like sonar, microphones, speakers, medical instruments, circuits, defense, among others, since the start of the XX century. For crack detection, piezoelectric has been used as acoustic sensors, vibration sensors and transducers. While piezoresistive materials, such as Velostat, have been having a surge on different sensing applications these last couple of years, for example, mass and force measurement. In effect, this project reviews if it is possible to detect cracks through the usage of piezoelectric and piezoresistive materials, where a sensor made up of 70% of total weight as piezoelectric material and 30% epoxy, demonstrated signals up to $7.2 [\mu V]$ under impact testing. While, when exposed to vibrations, its signal displayed a response with frequency equal to the source of the excitation and an amplitude closely related to the acceleration of said vibration. Likewise, the piezoelectric sensor was validated as a crack detector through a series of fatigue tests that showed signals up to $66 [\mu V]$ at moments when the sensor itself cracked. Meanwhile, for piezoresistive based sensors, it was demonstrated that its electric resistance was directly proportional to the crack growth, and it was possible to associate the appearance of the crack when the sensor registered a 60% increase over its initial reads. As a conclusion, it has been possible to validate the new ways of crack detection for piezoelectric and piezoresistive materials. This was based on innovative solutions over already existing ones, the development and implementation of a solid methodology, and the characterization of these new forms of detections using impact, fatigue and vibration tests.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos.....	iii
Lista de Tablas	iv
Lista de Figuras	v
Glosario	vii
1 CAPÍTULO 1: Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Consideraciones de diseño.....	4
2 CAPÍTULO 2: Marco Teórico	5
2.1 Conceptos Clave: Piezoeléctrico	5
2.2 Conceptos Clave: Piezorresistivos.....	7
3 CAPÍTULO 3: Estado del Arte	8
3.1 Investigaciones y literatura relevante: Piezoeléctrico	8
3.2 Investigaciones y literatura relevante: Piezorresistivo	16
4 CAPÍTULO 4: Metodología.....	19
4.1 Selección de materiales	19
4.2 Fabricación de sensores piezoeléctricos	20
4.3 Ensayos mecánicos: Material piezoeléctrico	25
4.4 Ensayos mecánicos: Material piezorresistivo.....	30
5 CAPÍTULO 5: Resultados y discusión	33
5.1 Resultados de sensores piezoeléctricos	33
5.2 Resultados de sensores piezorresistivos	50
5.3 Costo económico del proyecto	53
5.4 ¿Sensor piezoeléctrico o piezorresistivo?.....	54
6 CAPÍTULO 6: Conclusiones	55
6.1 Trabajos futuros.....	55
Referencias	57

Lista de Tablas

Tabla 3.1. Parámetros y métodos de medición de fallas.	9
Tabla 3.2. Materiales piezoeléctricos.	10
Tabla 4.1. Características del Zirconato de titanato de plomo y el Titanato de Bario.	20
Tabla 4.2. Medidas de sensores utilizados.	22
Tabla 5.1. Amplitud de la respuesta al impacto.	34
Tabla 5.2. Costos asociados a cada tema.	53

Lista de Figuras

Figura 1.1. Valor y segmentación por sector del mercado SHM. (Fuente: [2]).....	1
Figura 1.2. Resultado de una de las pruebas hechas a las aeronaves. (Fuente: [3]).....	2
Figura 1.3. Degradación de un aspa de aerogenerador. (Fuente: [4]).....	2
Figura 1.4. Tobera luego de un ensayo de quemado. (Fuente: [5]).....	3
Figura 2.1. Dirección de las sollicitaciones sobre un material piezoeléctrico. (Fuente: [7])	5
Figura 3.1. Esquema de simbiosis entre distintos métodos. (Fuente: [12])	8
Figura 3.2. Estructura de prueba utilizado por Song. (Fuente: [25])	11
Figura 3.3. Distribución de sensores en la estructura de prueba. (Fuente: [25]).....	11
Figura 3.4. Diagrama del sistema. (Fuente: [26])	12
Figura 3.5. Mediciones del sensor pintura vs strain gauge. (Fuente: [26]).....	12
Figura 3.6. Descripción del proceso de manufactura de pintura piezoeléctrica. (Fuente: [27])	13
Figura 3.7. Probetas usadas para analizar el efecto del espesor. (Fuente: [28]).....	13
Figura 3.8. Probetas usadas para analizar el efecto del área del electrodo. (Fuente: [28])	14
Figura 3.9. Sensibilidad en función del tiempo de polarizado y diferentes espesores:.....	14
Figura 3.10. Diagrama del sistema descrito. (Fuente: [29]).....	15
Figura 3.11. Sistema táctil digital.....	16
Figura 3.12. Sensor de fuerza flexible 3D.....	17
Figura 3.13. Sensor propuesto por Kciuk.....	17
Figura 3.14. Esquema del sensor en base a Velostat.....	18
Figura 3.15. Configuración del sensor dentro del sistema propuesto.	18
Figura 4.1. Probeta con su pintura y molde lista.....	21
Figura 4.2. Perspectiva de la cámara FLIR.	23
Figura 4.3. Sistema de polarizado.	23
Figura 4.4. Cableado del sistema.	24
Figura 4.5. MP35 de Biopac Systems.	24
Figura 4.6. Pieza de PLA utilizada.....	25
Figura 4.7. Tubo de PVC con agujeros a las alturas señaladas.....	26
Figura 4.8. Sensores sobre la barra de acero.	26
Figura 4.9. Sistema vibratorio.	27
Figura 4.10. Sistema montado en la máquina de tracción.....	28
Figura 4.11. Sensor angosto propuesto.	29
Figura 4.12. Nuevas conexiones del sensor.	30
Figura 4.13. Sistema montado en la máquina.	31
Figura 4.14. Sistema de medición (Fuente: [43]).....	31
Figura 4.15. Sistema implementado.....	32
Figura 5.1. Respuesta de impactos del sensor de 30x10x0.2 [mm].	33
Figura 5.2. Respuesta a impactos del sensor de 50x30x0.2 [mm].	34
Figura 5.3. Respuesta a impacto del sensor de 30x10x1 [mm], para 0.5 [m] altura.....	34
Figura 5.4. Respuesta a impacto del sensor de 30x10x1 [mm], para 1.0 [m] altura.....	35

Figura 5.5. Respuesta a impacto del sensor de 30x10x1 [mm], para 1.5 [m] altura.....	35
Figura 5.6. Respuesta del sensor de 30x10x0.2 [mm] a 18 [Hz].....	36
Figura 5.7. Respuesta del sensor de 50x30x0.2 [mm] a 18 [Hz].....	36
Figura 5.8. Respuesta del sensor de 30x10x0.2 [mm] a 20 [Hz].....	37
Figura 5.9. Respuesta del sensor de 50x30x0.2 [mm] a 20 [Hz].....	37
Figura 5.10. Señal del sensor durante todo el experimento.	38
Figura 5.11. Señal del sensor antes de comenzar la prueba.	39
Figura 5.12. Señal al comienzo de la ruptura del sensor.....	39
Figura 5.13. Señal al término de la ruptura del sensor.	40
Figura 5.14. Señal al momento de la ruptura de la probeta.....	40
Figura 5.15. Probetas ensayadas, de arriba hacia abajo, probetas 1, 2 y 3.....	41
Figura 5.16. Ensayo completo.....	42
Figura 5.17. Señal al comienzo de la ruptura del sensor.....	42
Figura 5.18. Señal al término de la ruptura del sensor.....	43
Figura 5.19. Señal al momento de término de la ruptura del electrodo superior del sensor.	43
Figura 5.20. Señal de la ruptura de la probeta.....	44
Figura 5.21. Sensor luego de la ruptura, notar que aún no se separa totalmente el electrodo.	44
Figura 5.22. Señal completa del canal 1.....	45
Figura 5.23. Señal completa del canal 2.....	46
Figura 5.24. Señal del canal 1 con sistema estacionario.	46
Figura 5.25. Señal del canal 2 con sistema estacionario.	47
Figura 5.26. Señal al inicio de la ruptura del sensor, canal 1.....	47
Figura 5.27. Señal al inicio de la ruptura del sensor, canal 2.....	48
Figura 5.28. Señal al término de la ruptura del sensor, canal 1.	48
Figura 5.29. Señal al término de la ruptura del sensor, canal 2.	49
Figura 5.30. Señal al momento de la ruptura de la probeta, canal 1.	49
Figura 5.31. Señal al momento de la ruptura de la probeta, canal 2.	50
Figura 5.32. Respuesta de la probeta 1.....	51
Figura 5.33. Respuesta de la probeta 2.....	51
Figura 5.34. Respuesta de la probeta 3.....	52

Glosario

SHM	:	Structural Health Monitoring
GVR	:	Grand View Research
USD	:	United States Dollar
CLP	:	Chilean Peso
NDE	:	Non Destructive Evaluation
PVDF	:	Polyvinylidene Diflouride
PZT	:	Lead Zirconate Titanate
BZT	:	Barium Zirconate Titanate
BT	:	Barium Titanate
PLA	:	Polylactic Acid
PCB	:	Printed Circuit Board
DI	:	Damage Index
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
CT	:	Compact Tension Specimen
TBD	:	To Be Determined
UdeC	:	Universidad de Concepción
DAQ	:	Data Acquisition

Símbolos

D_i	:	Desplazamiento Dieléctrico
ε_k	:	Deformación
e_{ij}^σ	:	Permitividad Dieléctrica
σ_m	:	Esfuerzo
E_j	:	Campo Eléctrico
d_{jk}^c	:	Coefficiente Piezoeléctrico
S_{km}^E	:	Elasticidad de Cumplimiento
q	:	Carga Eléctrica
C_p	:	Capacitancia
V_c	:	Voltaje
Y_c	:	Módulo de Young
l_c	:	Longitud
b_c	:	Ancho
t_c	:	Espesor
ρ	:	Densidad resistiva
R	:	Resistencia eléctrica
π	:	Coefficiente piezoresistivo
j	:	Densidad de la corriente

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Contexto

En la gran mayoría de los procesos productivos, infraestructuras, medios de transporte, entre otros, es de interés mantener sus capacidades en el tiempo, con tal que sus operaciones sean seguras y rentables durante todo su ciclo de vida. Tomando en cuenta esto, la industria del mantenimiento ha desarrollada distintas metodologías y servicios dependiendo el contexto operacional del sistema de interés. En el área estructural, se ha desarrollado en el último tiempo el concepto de SHM (Monitoreo de la salud estructural, siglas en ingles), el cual consiste en el monitoreo continuo, o periódico, de estructuras como puentes, represas, edificios, transportes, entre otros, con tal de revisar su integridad y detectar posibles daños o deterioro, tal como lo explica Xu [1]. Esta metodología ha estado en constante desarrollo, y hasta el 2022 tenía un valor de neto de 2.7 [MMUSD], con un potencial de crecimiento de hasta 10.48 [MMUSD], según la compañía analista GVR [2]. A continuación, se puede observar en la Figura 1.1 un desglose de las distintas estructuras y su participación en el mercado.

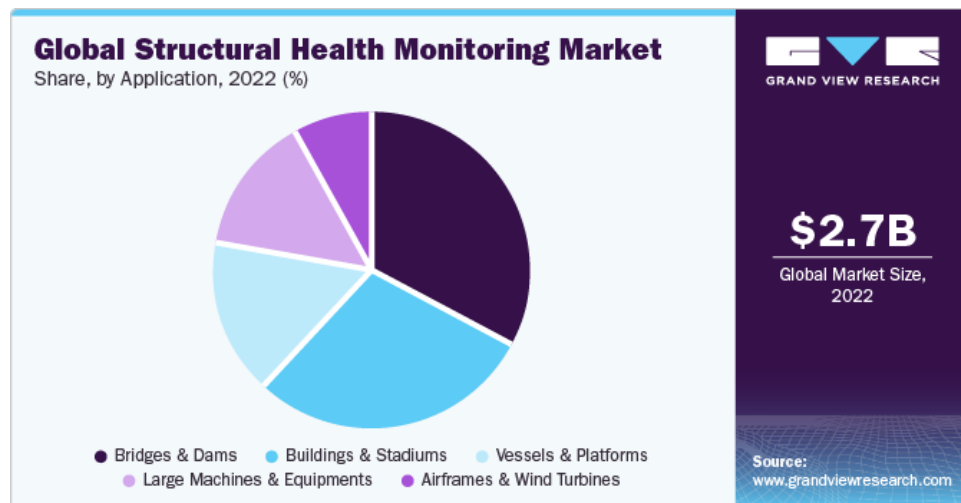


Figura 1.1. Valor y segmentación por sector del mercado SHM. (Fuente: [2])

Dentro del SHM, es importante obtener información certera y oportuna de emisiones acústicas, deformaciones, vibraciones, corrosión, grietas, entre otras, en las estructuras a monitorear. De lo contrario podría sucederse calamidades con daños a la salud, patrimonio o vida de los usuarios. Lamentablemente, el camino a una metodología y reglamentación de robusto para SHM está marcado por distintos accidentes que le han dado impulso hasta llegar a lo que es hoy. Como, por ejemplo, el accidentado De Haviland Comet I, quien fue el primer avión comercial a reacción, el cual fue víctima de despresurización explosiva de cabina a raíz de fracturas producidas por un diseño inadecuado de ventanas del fuselaje, tal como lo indica Withey [3]. Su efecto se puede ver en la Figura 1.2.

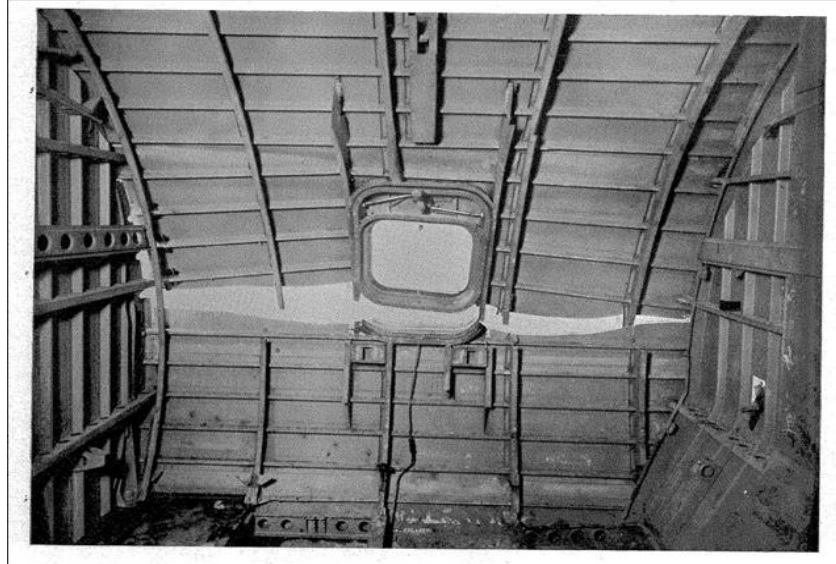


Figura 1.2. Resultado de una de las pruebas hechas a las aeronaves. (Fuente: [3])

Por otro lado, Nijssen [4] reporta una que una de las principales fallas en las aspas de turbinas generadoras eléctricas es producto del surgimiento de grietas los bordes de ataques de estas, esto debido al efecto de erosión que tiene el ambiente sobre las estructuras, el pitting que genera y la expansión de este efecto a crack, si es que no se monitorea y resuelve a tiempo. Tal como se ve en la Figura 1.3.



Figura 1.3. Degradación de un aspa de aerogenerador. (Fuente: [4])

Mientras que Nigar [5], expone e investiga sobre lo importante que es detectar y medir la aparición de fisuras en las cámaras de combustión y toberas de los cohetes. Esta última estructura hecha de grafito, el cual es resistente a las altas temperaturas, y a su vez, bastante frágil. Considerando la naturaleza reactiva del propelente, las dinámicas entre la presión interior y exterior, y las grandes temperaturas que puede alcanzar la combustión presentan un grave peligro para las toberas. Con eso en mente, describe lo riesgoso que podría ser la explosión repentina de una de estas naves o trayectorias imprevistas producto de lo anteriormente mencionado, provocando un grave peligro para la tripulación, la lanzadera y sus equipos, como también, la carga útil que podría estar transportando, como se puede apreciar en la Figura 1.4.



Figura 1.4. Tobera luego de un ensayo de quemado. (Fuente: [5])

Es importante resaltar también que todos los accidentes entregados también tuvieron impactos negativos en su entorno, como, por ejemplo, la contaminación y combustión de cientos de litros de aceites, combustibles y fluidos hidrodinámicos de aviación o el incremento de contaminación auditiva por el mal estado de un aspa de aerogeneradores.

Considerando lo expuesto anteriormente, resultara interesante desarrollar un sistema que detecte y avise oportunamente de la aparición de grietas en estructuras críticas. Esto podría, por lo menos, prevenir o mitigar la pérdida de recursos económicos y materiales. Y lo más importante de todo, resguardar la seguridad y vida de las personas usuarias de estos implementos.

1.2 Objetivos

En base a la misión del proyecto, y considerando su envergadura, es razonable segmentarlo en una serie de objetivos más específicos. En efecto, se tendrá lo siguiente:

Objetivo general:

- ▶ Determinar si es posible detectar grietas, utilizando materiales piezoeléctricos y piezorresistivos, de forma innovadora.

Objetivos específicos:

- ▶ Estudiar el funcionamiento de los sensores piezoeléctricos y piezorresistivos a partir del análisis del estado del arte.
- ▶ Diseñar una metodología clara y sencilla para la fabricación e implementación de los sensores propuestos.
- ▶ Caracterizar los sensores fabricados en concordancia a ensayos mecánicos definidos en la metodología.

1.3 Consideraciones de diseño

El sistema por concebir deberá tener distintas consideraciones con respecto a capacidades, costo, funciones y ergonomía. Considerando la etapa inicial en la que se encuentra este proyecto, se definirán como consideraciones relevantes las siguientes:

- ▶ El sensor deberá ser capaz de instalarse en cualquier superficie lisa.
- ▶ El sensor deberá poder ser transportado con facilidad.
- ▶ El sensor deberá poder ser conectado a un receptor de señales.

CAPÍTULO 2: Marco Teórico

2.1 Conceptos Clave: Piezoeléctrico

Antes de explorar las aplicaciones en sensores en materiales piezoeléctricos, se expondrá en que consiste este efecto. Según Riquelme [6] y De la Rosa [7], el efecto piezoeléctrico es la capacidad de un material de transformar energía mecánica en eléctrica cuando esté sometido a cierta cantidad de esfuerzos. Esta propiedad puede manifestarse inversamente, aplicando un campo eléctrico en el material el cual producirá deformaciones. Esta habilidad ha hecho que el material sea bastante cotizado en la academia e industria para aplicaciones aeronáuticas, defensa, generación de energía, obras civiles, medicas, entre otras.

El letrado Meitzler [8] resumió las ecuaciones constitutivas que describen la relación entre energía mecánica y eléctrica. En las ecuaciones (2.1) y (2.2) se representan las fórmulas del desplazamiento dieléctrico y la deformación del material, respectivamente.

$$D_i = e_{ij}^{\sigma} E_j + d_{im}^d \sigma_m \quad \left[\frac{C}{m^{-2}} \right] \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_k = d_{jk}^c E_j + S_{km}^E \sigma_m \quad [-] \quad (2.2)$$

Donde $i, j = 1, 2$ y 3 y $k, m = 1, 2, \dots, 6$. Mientras que σ , e_{ij}^{σ} , d_{jk}^c y S_{km}^E corresponden al esfuerzo, permitividad dieléctrica, coeficiente piezoeléctrico y elasticidad de cumplimiento, respectivamente. d_{im}^d define la deformación por unidad de campo eléctrico bajo un esfuerzo constante, mientras que d_{jk}^c es el desplazamiento eléctrico por unidad de esfuerzo bajo un campo eléctrico constante. Los superíndices c y d son para diferenciar los efectos piezoeléctricos directos e indirectos, aunque según Sirohi [9], prácticamente los valores de estos son iguales. En la Figura 2.1 se puede observar las direcciones asociada a cada componente de las ecuaciones.

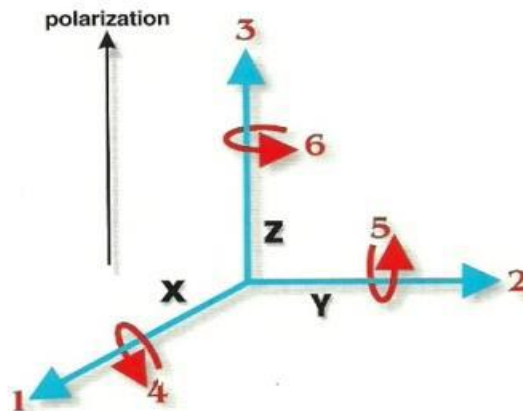


Figura 2.1. Dirección de las solicitaciones sobre un material piezoeléctrico. (Fuente: [7])

La ecuación (2.1) está supeditada al efecto piezoeléctrico directo, el cual consiste en que el material piezoeléctrico dará un voltaje en respuesta a un esfuerzo aplicado en dirección perpendicular a la polarización, y el material tratará de volver a sus dimensiones originales durante la ocurrencia de este efecto. La ecuación mencionada anteriormente se puede expresar como la ecuación (2.3).

$$\begin{Bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & d_{15} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d_{24} & 0 & 0 \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad \sigma_4 \quad \sigma_5 \quad \sigma_6]^T \quad \left[\frac{C}{m^{-2}} \right] \quad (2.3)$$

Donde: $[\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3 \quad \sigma_4 \quad \sigma_5 \quad \sigma_6]^T = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{33} \quad \sigma_{23} \quad \sigma_{31} \quad \sigma_{12}]^T$

Por otro lado, el desplazamiento dieléctrico está relacionado a la carga eléctrica generada bajo la ecuación (2.5).

$$q = \iint D_3 dA_3 = C_p V_c \quad [C] \quad (2.4)$$

Donde dA_3 es el área de un electrodo situado en los ejes 1-2, paralelo al material piezoeléctrico. Un material piezoeléctrico junto a sus electrodos, en condiciones típicas, se puede tomar como un capacitor de placas paralelas, donde su capacitancia está definida por la ecuación (2.5).

$$C_p = \frac{e_{ij}^\sigma l_c b_c}{t_c} \quad \left[\frac{C}{V} \right] \quad (2.5)$$

Las variables l , b y t corresponden a la longitud, ancho y espesor del material piezoeléctrico, respectivamente. Considerando las ecuaciones anteriores, el voltaje producido por el piezoeléctrico se puede expresar como la ecuación (2.6).

$$V_c = \frac{d_{31} Y_c l_c b_c}{C_p} \varepsilon_1 \quad [V] \quad (2.6)$$

Mientras que las variables ε_1 e Y_c corresponden a la deformación promedio sobre el área del electrodo del material piezoeléctrico y el módulo de Young del piezoeléctrico, respectivamente.

De la ecuación (2.6) se puede desprender que el material genera un voltaje proporcional al nivel de deformación que sufra, lo cual resulta útil para aplicaciones en sensores. Pero, existen dos limitantes características de estos materiales que se deben tener presente: (i) Los materiales piezoeléctricos solo responden a estímulos dinámicos, y no generaran voltaje frente a una carga estática. (ii) Un sensor en base a materiales piezoeléctricos no puede distinguir entre cargas aplicadas en distintos ejes (1 o 2).

2.2 Conceptos Clave: Piezorresistivos

El autor McNamara [10], describe el efecto piezorresistente como el cambio de resistencia eléctrica debido a un esfuerzo aplicado. Donde la resistencia se define en la ecuación (2.7).

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad [\Omega] \quad (2.7)$$

Donde ρ es la resistividad del material, l es la longitud del material y A es el área de la sección transversal. Al estirar o comprimir el material, las dimensiones de este cambian, y en efecto, cambia su resistencia eléctrica. Cuando se compara respecto a un strain gauge, el primero se trata como isotrópico, mientras que, para el piezorresistente, el efecto es anisótropo. El tensor piezorresistivo se expresa en la ecuación (2.8).

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_6 & \rho_5 \\ \rho_6 & \rho_2 & \rho_4 \\ \rho_5 & \rho_4 & \rho_3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} j_1 \\ j_2 \\ j_3 \end{Bmatrix} \quad \left[\frac{V}{m} \right] \quad (2.8)$$

Donde ε son las componentes del campo eléctrico, j son las componentes de la densidad de la corriente y ρ son las componentes del tensor de resistividad. Por otro lado, el tensor de resistividad está relacionado al esfuerzo mediante la ecuación (2.9).

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \\ \rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \\ \rho \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{12} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{12} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_1 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} \quad [\Omega m] \quad (2.9)$$

Donde π son los coeficientes piezorresistivos, σ son las componentes de esfuerzo normal y τ son las componentes de esfuerzo cortante.

CAPÍTULO 3: Estado del Arte

3.1 Investigaciones y literatura relevante: Piezoeléctrico

Empezando de lo macro, el monitoreo y evaluación de la integridad estructural de variados sistemas, especialmente infraestructura, ha ido cobrando interés en los últimos años. Este campo se le conoce como SHM (Monitoreo de salud estructural, por sus siglas en inglés) cuyo objetivo es identificar y medir alteraciones o daños que puedan surgir en las estructuras a lo largo del tiempo, tal como lo indica Farrar [11].

Enrico [12] menciona que este método de mantenimiento busca cuantificar un daño (interno o externo), lo cual busca responder: ¿Hay daño? ¿Dónde está ubicado? ¿Cuál es su severidad? En efecto, hay varios tipos señales que una estructura dará para saber lo anterior. Estas señales pueden ser; vibraciones, calor, sonido, esfuerzos, deformaciones, entre otros.

El autor propone el termino NDE (Evaluación No Destructiva) con tal de resolver lo anterior, el cual se compone de métodos Visuales, Convencionales, Tradicionales y Modernos para ejecutar la cuantificación de daños, tal como se puede observar en la Figura 3.1.

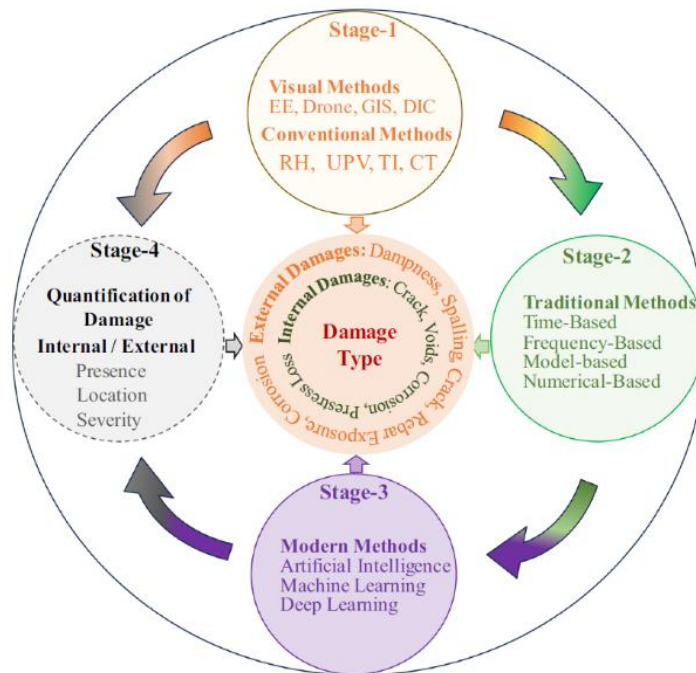


Figura 3.1. Esquema de simbiosis entre distintos métodos. (Fuente: [12])

Enfocándose ahora en tipos de daño sobre las estructuras, el investigador Chen [13] indica que se busca medir los siguientes parámetros físicos: Emisiones acústicas, deformaciones y desplazamientos, variaciones de frecuencia, cambios en el modo de vibrar, flexibilidad dinámica, integridad física, corrosión y grietas.

Este último parámetro será crucial entender para poder entregar una solución satisfactoria al problema de este proyecto. Belloni [14] postula la importancia de detectar, posicionar y dimensionar las fracturas estructurales (como lo son las grietas). Los equipos bajo grandes exigencias o tiempos de operación serán propensos a sufrir este fenómeno. La despreocupación en alguno de esos conceptos puede desembocar a sendos costos ambientales, económicos, productivos, salud o vidas, tal como los casos señalados en la primera parte de este informe. En efecto, resulta elemental el monitoreo, evaluación y mantenimiento recurrente de estos sistemas.

Ahora, existen una gran cantidad de métodos de detección y medición de fallas, estas pueden ser aplicaciones constantes o periódicas. Por ejemplo, Swit [15] hace una separación entre métodos manuales sin registro de datos y dispositivos digitales con grabado de datos. Por otro lado, varios autores [16], [17], [18] proponen diferentes métodos, y sensores utilizados, para detectar grietas. Algunas de estas metodologías, y sus respectivos sensores, son mencionados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Parámetros y métodos de medición de fallas.

Parámetro de medición	Descripción	Método/Sensor
Deformaciones	Se busca detectar y/o medir la expansión o contracción de las estructuras.	Inspección visual
		Tintas reveladoras
		Partículas magnéticas
		Crack gauges
		Strain gauges
		PVDF sensor
Sonido	Comparación de la propagación de las ondas al interior/superficie de las estructuras, estructura sana vs actual, bajo un impacto de prueba.	Wafers piezoeléctricos
		Buzzer piezoeléctricos
Radiación	Las grietas serán concentradoras de calor.	Cámaras infrarrojas
	Se buscan espacios vacíos al interior de las estructuras.	Escáner rayos X
Vibraciones	Modelamiento de los modos de vibrar y análisis a la respuesta de excitación.	Acelerómetros

Se puede observar que varios sensores, para distintos parámetros de medición, son piezoeléctricos. La flexibilidad que presenta este material para distintas aplicaciones ha sido objeto de constantes estudios en las últimas décadas.

Sekhar [19] menciona que los materiales que exhiben este efecto se pueden clasificar como cristales, cerámicos y nanomateriales, siendo más utilizados los materiales de los primeros dos grupos. A continuación, se pueden observar alguno de estos en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Materiales piezoeléctricos.

Cristales	Lithium niobate
	Lithium tantalate
	Quarz
	Rochelle Salts
Cerámicos	Lead Zirconate Titanate (PZT)
	Potassium niobate
	Barium titanate
	Bismuth ferrite

Respecto a las grietas, es interesante explorar en como los sensores en base a piezoeléctricos detectan y miden la aparición de estas fallas. Empezando con lo que cuenta Ju [20], quien habla de sensores piezoeléctricos basados en la impedancia electro-mecánica, la cual consiste en un piezoeléctrico activo y otro pasivo, el activo se le hará pasar una carga eléctrica con el fin de que genere solicitaciones mecánicas sobre la estructura donde esta adherido, mientras que el pasivo, recibirá las vibraciones que generara esa acción y las transformara en señales eléctricas, las que posteriormente se traducirán a través de algoritmos con tal de verificar la existencia de fallas estructurales.

Huh [21] propone el uso de sensores en base a Polyvinylidene Difluoride (PVDF), el cual es un termoplástico que muestra notables propiedades piezoeléctricas, estos sensores son empleados para medir los esfuerzos superficiales de un aspa de aerogenerador. Esta aspa es sometida a compresión y tracción, logrando obtener señales claras del sensor cada vez que una sección de la estructura se deformaba. Li [22] también reportos buenos resultado al momento de ocupar sensores PVDF con el fin de detectar fracturas durante simulaciones de terremoto en un edificio probeta compuesto de barras de acero estructural. También, Sirohi [23] compara la performance de los sensores PVDF, PZT y strain gauges para medir deformaciones sobre una barra en voladizo bajo flexión axial, destacando la resistencia al ruido de los piezoeléctricos y su alta frecuencia de muestreo.

Por otro lado, Giurgiutiu [24] experimento con el uso de sensores piezoeléctricos activos y pasivos para generar ondas de alta frecuencia llamadas “Lamb Waves”, esto con el fin de detectar imperfecciones estructurales, y teniendo los sensores a gran distancia de las zonas de falla, siendo como objeto de estudio un ala bajo los efectos de la fatiga. El concluyo que es factible detectar y localizar grietas (internas o externas) siempre y cuando se tenga caracterizada la propagación de ondas en la estructura a priori de la falla, combinado con robustos algoritmos de procesamiento de datos ultrasónicos.

Es destacable el método que utilizo Song [25] para detectar daños en puentes. Para esto, ocupo un sistema compuesto de transductores piezoeléctricos (PZT) dispersos en áreas claves de la estructura, estos eran parte de esta. Uno de estos sensores vibraba a una frecuencia determinada, mientras que los demás servían para detectar las ondas que producidas por la vibración. Su sistema tomaba estos datos y los transformaba en vectores de energía. Luego, a través de un criterio de daño, determinaba si la

estructura de prueba sufría de grietas cuando esta se sometía a grandes flexiones. Se puede ver la configuración de su sistema en las Figura 3.2 y Figura 3.3.

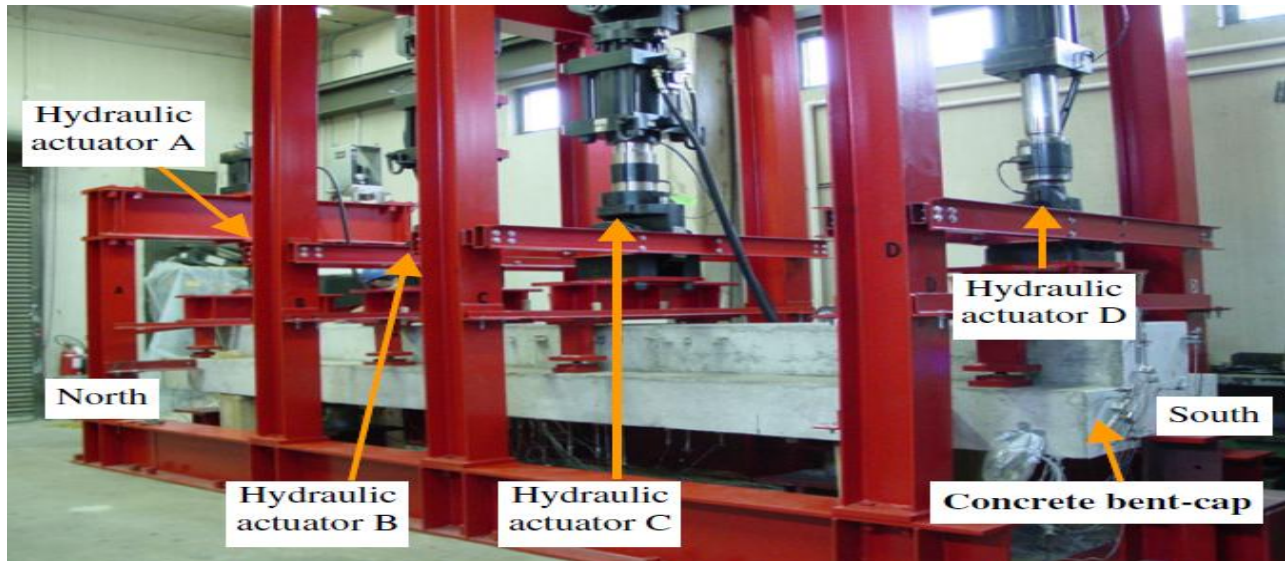


Figura 3.2. Estructura de prueba utilizado por Song. (Fuente: [25])

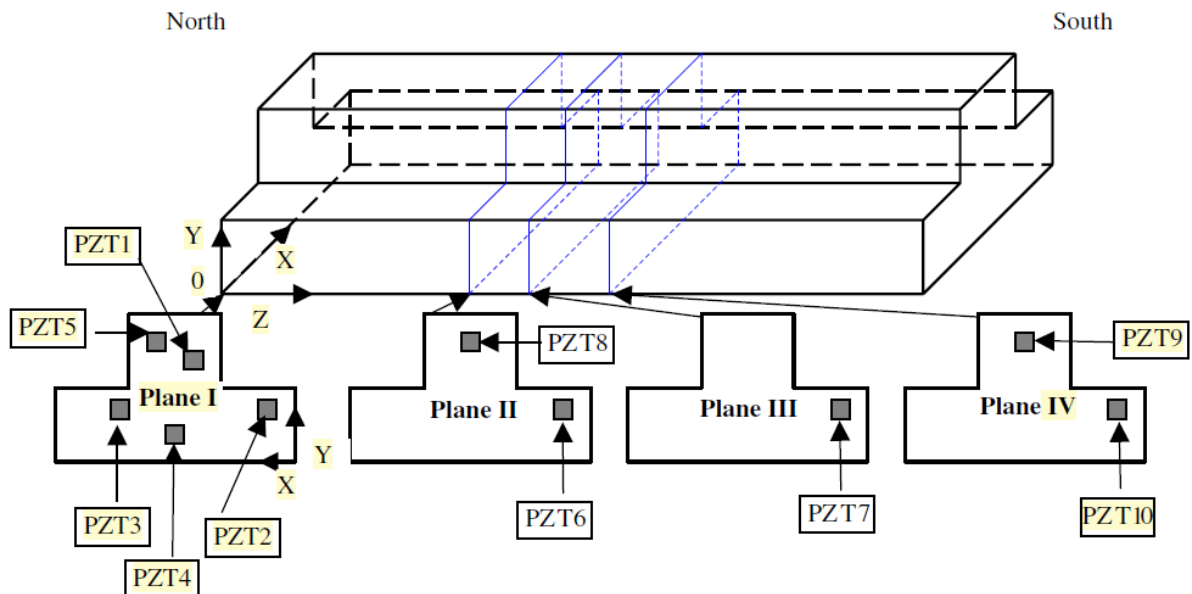


Figura 3.3. Distribución de sensores en la estructura de prueba. (Fuente: [25])

Una de las aproximaciones más novedosas a los sensores para SHM en base a piezoeléctricos es a través de la manufactura de pinturas que tengan como base estos materiales. La ventaja de este método sobre los demás es el hecho en que la pintura puede adaptarse a la geometría de la superficie a la que se está aplicando, tienen un espesor menor que las láminas, lo que lo hace una alternativa más barata que estas últimas. Por ejemplo, Iwasawa [26] propone medir vibraciones y detectar daños en estructuras mediante la utilización de una pintura con base de cerámica PZT y epoxy. Esta fue puesta sobre varias probetas de aluminio con tal de probar su utilidad y sensibilidad para la medición de emisiones acústicas y vibraciones. Estas probetas fueron montadas en voladizo, y fueron sometidas a

excitaciones periódicas, donde se comprobó y comparo las mediciones obtenidas por el sensor con respecto a un strain gauge, resultado en valores bastante cercanos entre ambos sistemas. Hay que resaltar que estudio la influencia del espesor de la pintura y la polarización de esta, en la sensibilidad del producto. El sistema y su resultado se pueden observar en la Figura 3.4 y Figura 3.5, respectivamente.

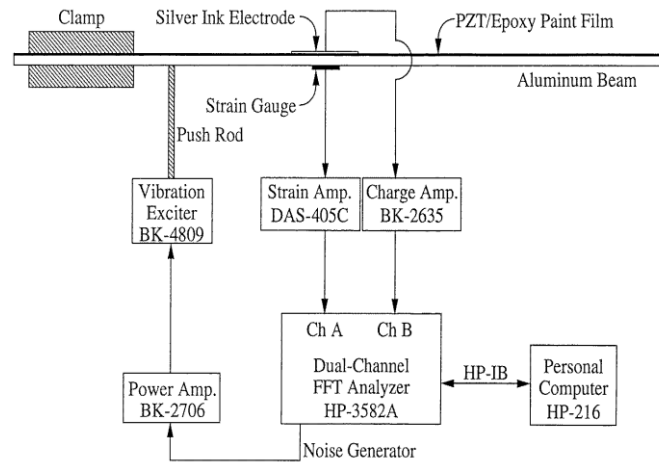


Figura 3.4. Diagrama del sistema. (Fuente: [26])

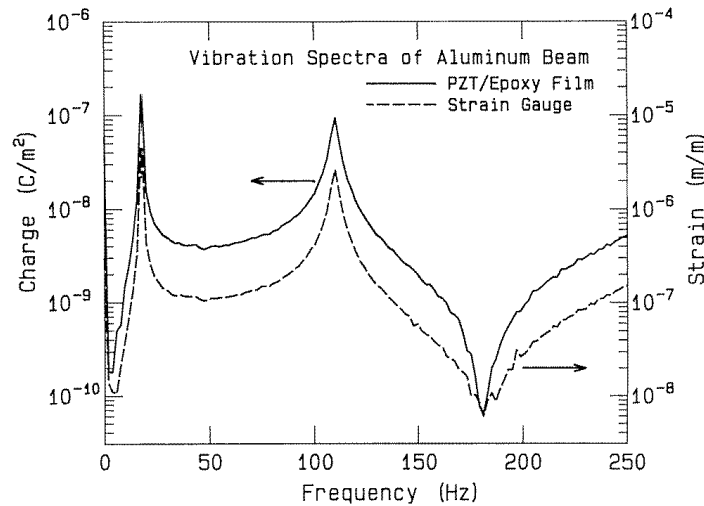


Figura 3.5. Mediciones del sensor pintura vs strain gauge. (Fuente: [26])

Siguiendo la misma línea, Han [27] estudia la performance de este tipo de sensores comparando distintos tipos de cerámicos piezoeléctricos de base (Varios tipos de PZT), donde es interesante rescatar el proceso de fabricación de pintura que utilizo, tal como se ve en la Figura 3.6.

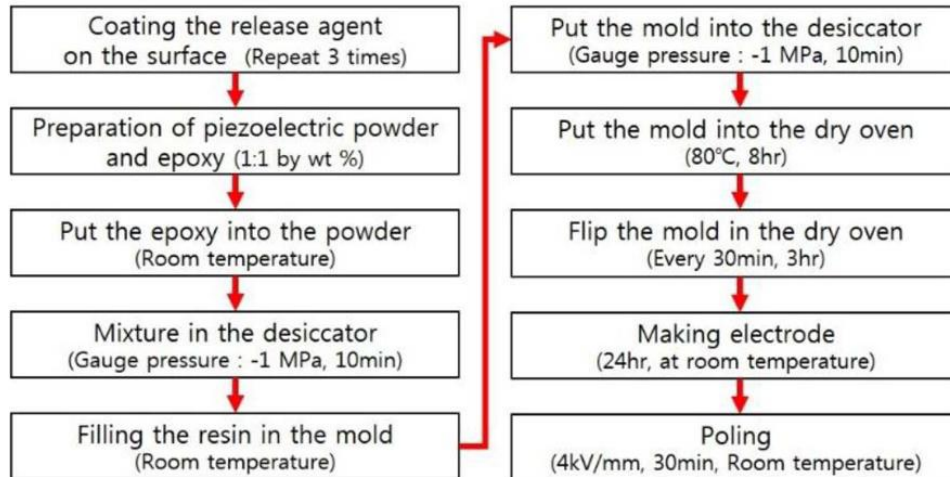


Figura 3.6. Descripción del proceso de manufactura de pintura piezoeléctrica. (Fuente: [27])

Otra arista importante para el desempeño de la pintura es la polarización de esta, este proceso consiste en someter el sensor a grandes corrientes eléctricas con tal de ordenar la distribución de carga eléctrica de los átomos que componen este. Payo [28] caracterizó y comparo la sensibilidad de varias pinturas según su espesor, voltaje y tiempo de polarizado, tal como se ve en las Figura 3.7, Figura 3.8 y Figura 3.9. El autor concluyó que la sensibilidad aumenta rápidamente en los primeros 10 [s] de polarizado, y luego de esto, aumenta poco a poco linealmente hasta que se produce el fenómeno de rompimiento dieléctrico, el cual genera que el cerámico se vuelva conductivo espontáneamente, esto puede producir arcos eléctricos y quemar el sensor.

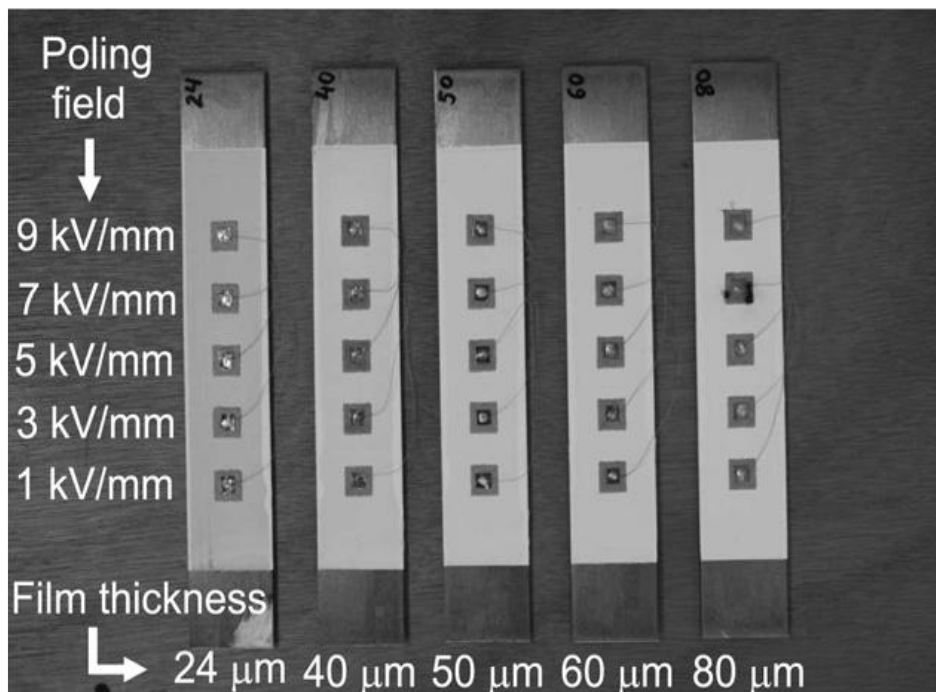


Figura 3.7. Probetas usadas para analizar el efecto del espesor. (Fuente: [28])

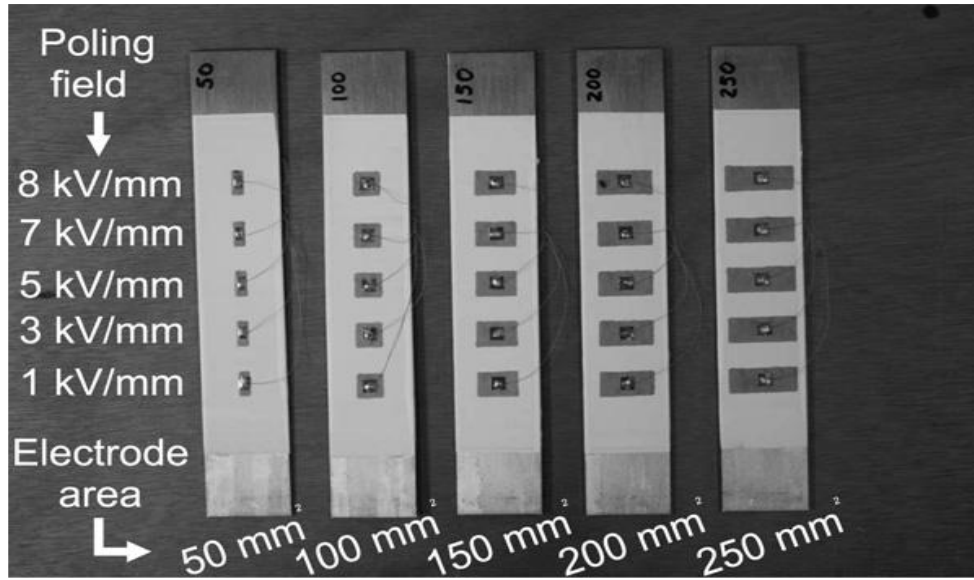


Figura 3.8. Probetas usadas para analizar el efecto del área del electrodo. (Fuente: [28])

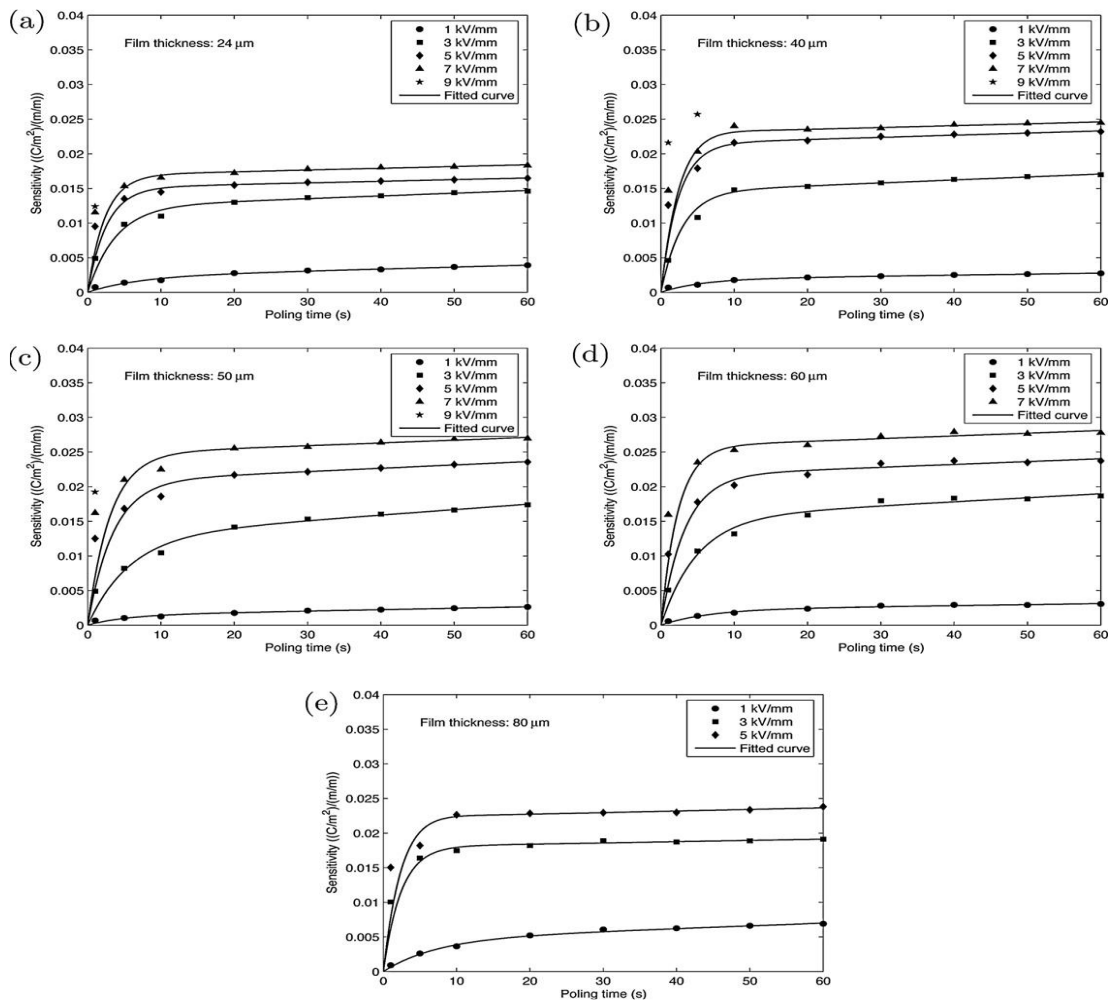


Figura 3.9. Sensibilidad en función del tiempo de polarizado y diferentes espesores: (a) 24 μm , (b) 40 μm , (c) 50 μm , (d) 60 μm , (e) 80 μm , a 65% de PZT del peso total. (Fuente: [28])

Revisando aplicaciones de pintura piezoeléctrica directamente para detección de grietas, Zhang [29] propone un sistema bastante novedoso y simple con tal fin. Este consiste en dos electrodos con una capa de pintura entre estos, tal como se puede ver en la Figura 3.10.

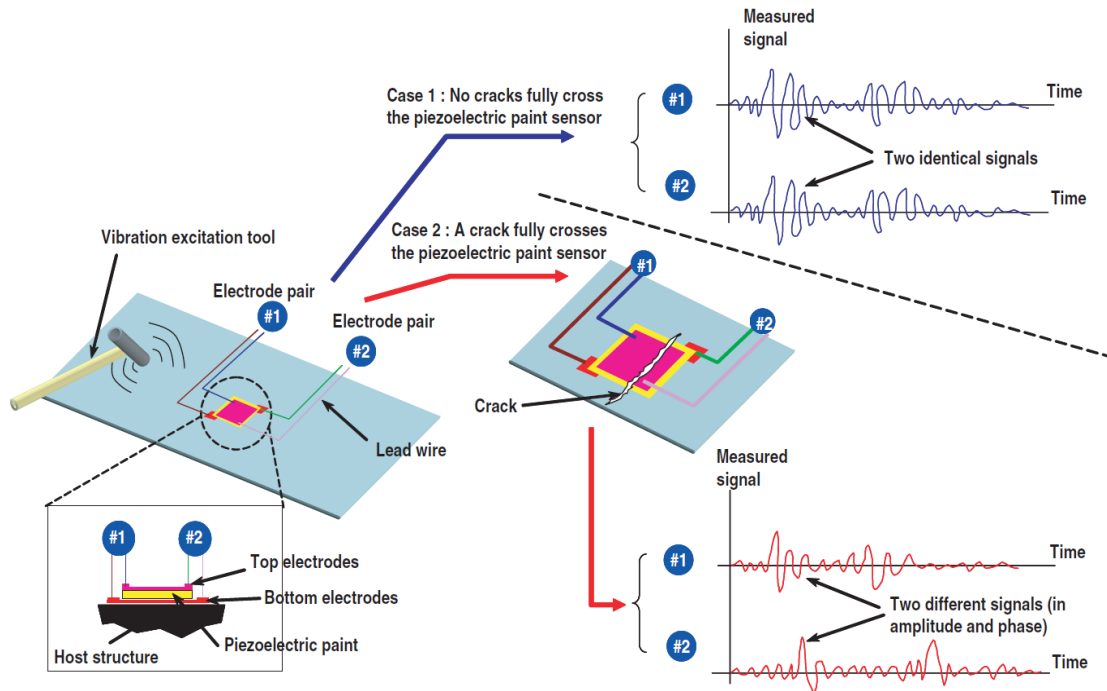


Figura 3.10. Diagrama del sistema descrito. (Fuente: [29])

Desde cada extremo de este sistema sale un par de cables hacia un osciloscopio, con tal de obtener dos mediciones del sensor. La idea es que mientras no haya una grieta a lo largo del piezoeléctrico, ambas mediciones deberían ser iguales. Por el contrario, si una fractura se propagara por el sensor, cada extremo debería reportar valores distintos con respecto a entre ellos, y a la vez, esto daría evidencia de la existencia de la grieta sobre la estructura donde este montado el sistema.

Es de notar que el autor ideó una ecuación para cuantificar y visualizar fácilmente la diferencia de voltajes medida mencionada en el párrafo anterior, esta lo llamo Índice de Daño (ID) y su ecuación esta expresada como:

$$ID = \frac{[x1(t) - x2(t)]}{[RMS(x1(t)) + RMS(x2(t))]/2} \quad [-] \quad (3.1)$$

Donde $x1(t)$ y $x2(t)$ son los voltajes medidos a lo largo del tiempo en cada extremo del sensor, y RMS se refiere a la raíz cuadrada media de estos valores.

En base a la experiencia de los autores mencionados con anterioridad, y considerando que el objetivo de este proyecto se limita a detectar, y no a medir. Se propone explorar la factibilidad de diseñar un sensor piezoeléctrico que, al momento de sufrir las más pequeñas deformaciones o ruptura en el sensor producto de la aparición de una fractura en el material al que esta adosado, dé una señal de alerta. A diferencia de los sensores mencionados, como por ejemplo los PVDF de deformación, lo novedoso sobre esta propuesta será la caracterización del comportamiento piezoeléctrico del sensor cuando este

mismo sufra deformaciones plásticas y eventual fractura. También será objeto de investigación desarrollar un ensayo mecánico que permita probar el sensor en una estructura sometida a cargas cíclicas.

3.2 Investigaciones y literatura relevante: Piezorresistivo

El material Velostat ha tenido un impacto cada vez mayor en el campo de los sensores, este va desde experimentos caseros para hacer una balanza digital, hasta aplicaciones avanzadas en biomedicina. Este piezorresistente ha llamado la atención principalmente por su accesibilidad en estantes, bajo precio, flexibilidad y relativa sensibilidad a las deformaciones.

En esta sección se explorarán algunas investigaciones vinculadas a esta novedosa estructura. Empezando con el sensor de fuerza en 3D de Zhang [30], donde busca reconocer la forma de objetos a través del tacto usando un guante electrónico. Este guante este compuesto por una PCB con forma de mano como base, y tiene montada en cada dedo un par de sensores de fuerza flexible 3D. El sistema guante se puede apreciar en la Figura 3.11, mientras que el diagrama del sensor de fuerza se puede observar en la Figura 3.12.

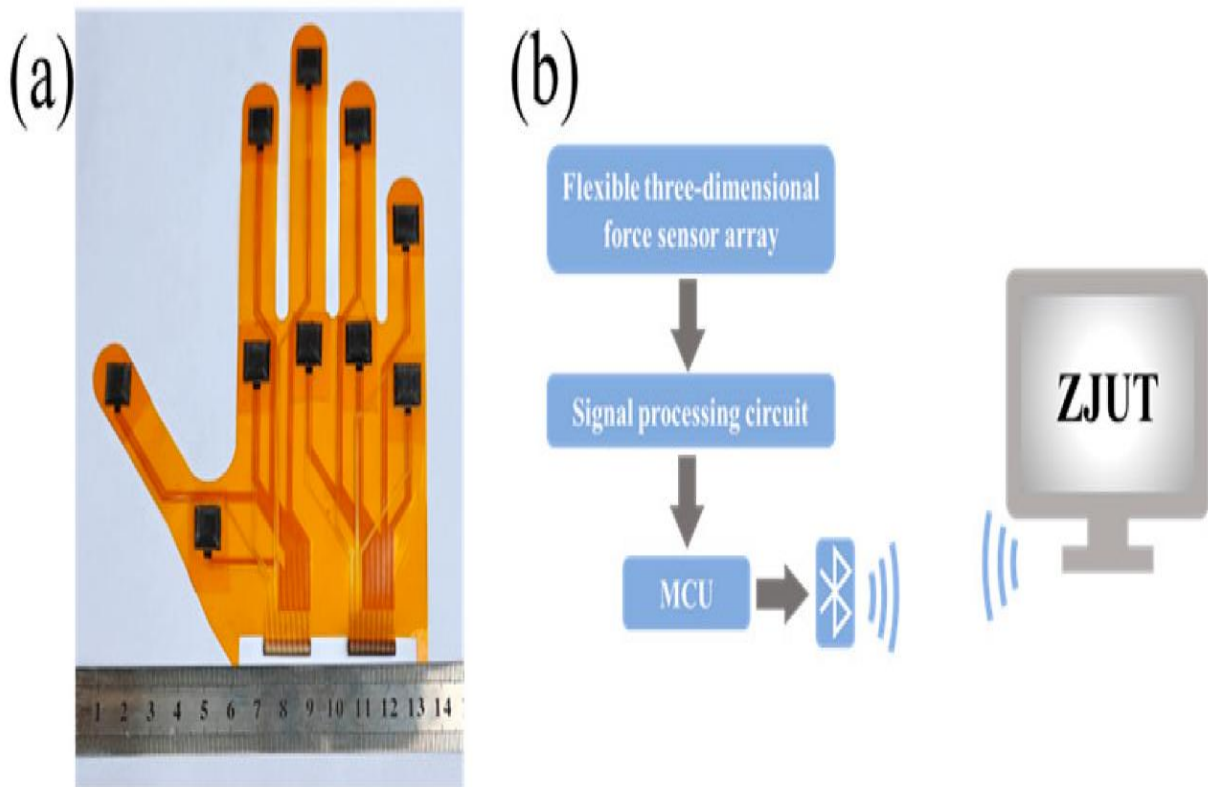


Figura 3.11. Sistema táctil digital.

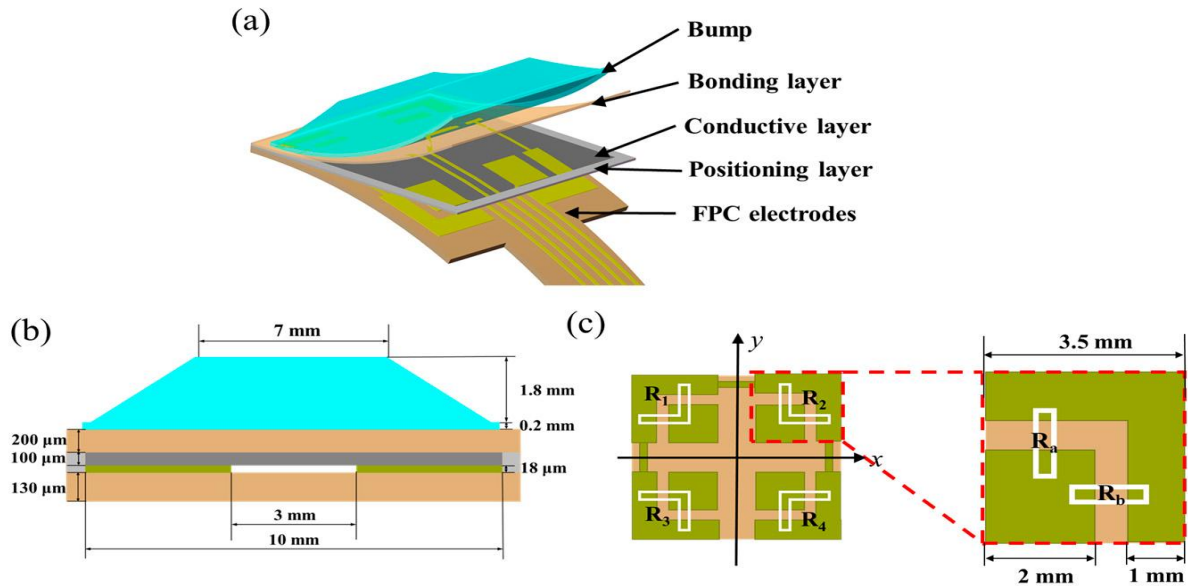


Figura 3.12. Sensor de fuerza flexible 3D.

Por otro lado, Kciuk [31] propone un sensor de fuerza a base de Velostat para aplicarlo en el sistema de control de una cama médica, con tal de que, si detectase algún movimiento o fuerza fuera de parámetro, accionara un sistema de detención de la cama. El sensor que propone también puede detectar en que zonas de este se está ejerciendo la fuerza, su configuración se puede observar en la Figura 3.13.

- 1 Velostat foil
- 2 Copper wires
- 3 Isolated wires
- 4 Transparent film

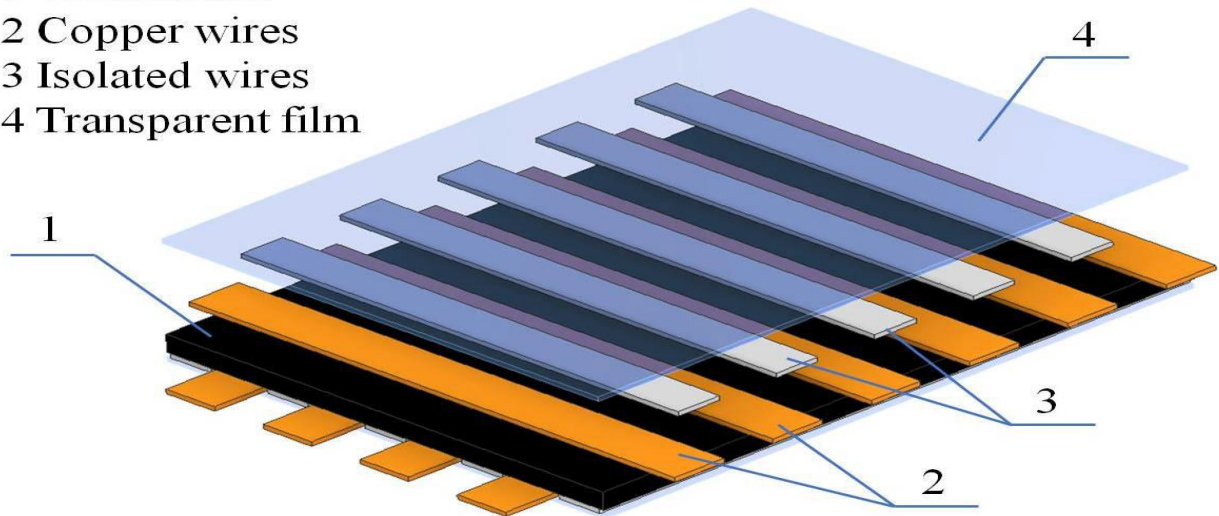


Figura 3.13. Sensor propuesto por Kciuk.

Mientras que Hopkins [32], crea un sistema de sensores de presión para miembros prostéticos, con tal de relacionar la presión con la forma del encaje de la prótesis y el miembro amputado con el objetivo de mejorar el confort de ellas para el usuario. El esquema de este sensor se puede ver en la Figura 3.14, mientras que el sistema completo está plasmado en la Figura 3.15.

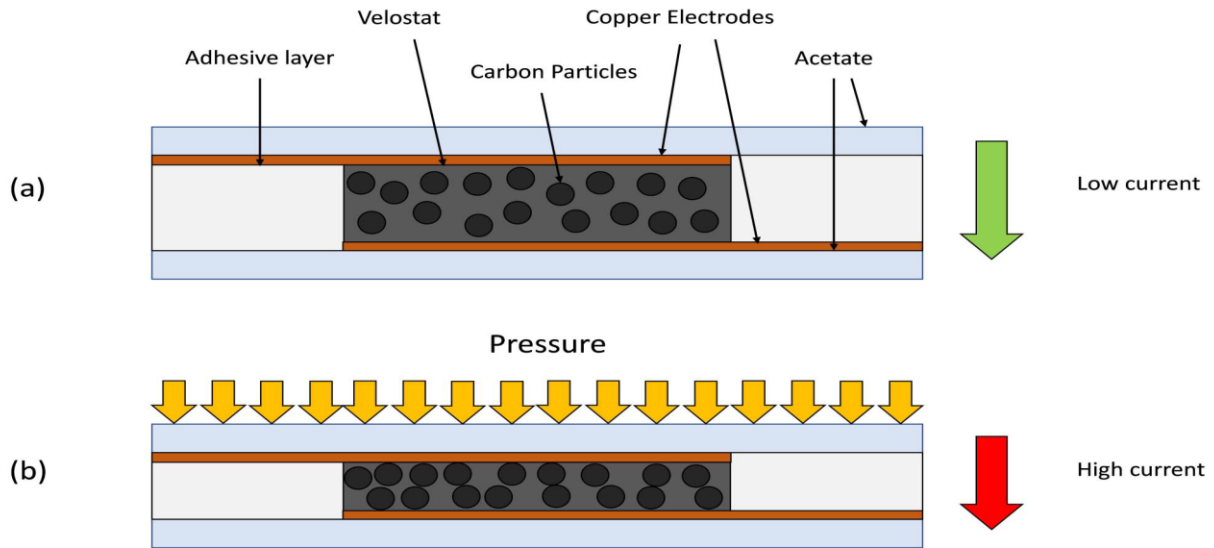


Figura 3.14. Esquema del sensor en base a Velostat.

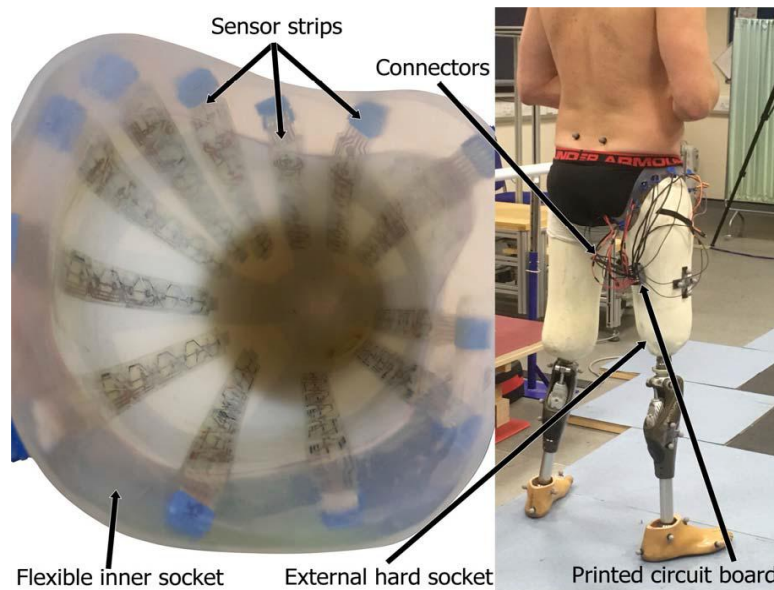


Figura 3.15. Configuración del sensor dentro del sistema propuesto.

Estos estudios sirvieron para comprobar la flexibilidad del Velostat para adaptarse a geometrías complejas, sus diferencias con los más tradicionales strain gauge, y lo más importante, su cambio de resistencia eléctrica para deformaciones, ya sean en tracción o compresión. Esto servirá como base para idear la metodología a seguir para este flanco del proyecto.

CAPÍTULO 4: Metodología



En este capítulo se decantará el análisis del estado del arte en un camino a seguir para satisfacer el objetivo general de este proyecto. Se expondrá el concepto del sistema a realizar, los materiales y procesos necesarios para el correcto desarrollo de la misión, además de ensayos para validar el sistema.

4.1 Selección de materiales

Considerando los sistemas de sensores en base a cerámicos piezoeléctricos presentados en el estado del arte, las pinturas y placas piezoeléctricas resultan modelos interesantes a seguir, esto debido a su capacidad de adaptación a geometrías complejas y reducido tamaño. El sistema presentado por Zhang [29] resulta ideal para implementar, debido a la sencillez en su diseño y el criterio que ocupa para determinar si es que hay fisura, tal como se puede ver en la Figura 3.10 y Ecuación (3.1).

En base a lo anterior, se realizó un catastro de los cerámicos piezoeléctricos más utilizados (y disponibles) en el mercado, los cuales se pueden observar en la Tabla 3.2. De los distintos estudios analizados, el material piezoeléctrico utilizado que más repetía era el PZT (Zirconato de Titanato de Plomo), el cual es un material ferroeléctrico utilizado ampliamente en actuadores, transductores, resonadores y en electrónica computacional. Es catalogado como uno de los mejores materiales piezoeléctricos, en términos de sensibilidad (efectividad en transformar energía mecánica a eléctrica, y viceversa) y resistencia a cambios de temperatura sin perder sus propiedades [33]. Lamentablemente, tal como lo indica su nombre, contiene plomo. El cual es dañino para las personas, el medioambiente, y también lo hace estar sujeto a varias normativas legales. Por otro lado, sus propiedades lo hacen bastante solicitado en el mercado, siendo uno de los materiales piezoeléctricos comercializados más caros, como se puede ver en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Características del Zirconato de titanato de plomo y el Titanato de Bario.

Cerámico	Coefficiente Piezoeléctrico (D_{33}) $\left[\frac{\rho C}{N}\right]$	Valor ¹² $\left[\frac{USD}{kg}\right]$	Imagen
PZT	374	2930	
BT	191	114.3	

Considerando lo anterior, se buscaron alternativas más económicas y amigables para el entorno. Por ende, se optó por el material BT (Titanato de Bario), el cual fue ampliamente utilizado en el pasado en la mayoría de las aplicaciones que hoy tiene el PZT [34]. Este cerámico ferroeléctrico es insoluble en agua, y presenta riesgo a la salud a las personas solo si es ingerido o aspirado en grandes cantidades [35], mientras que, para el medio ambiente, se ha podido observar que grandes concentraciones en cuerpos acuáticos pueden alterar la fotosíntesis en las microalgas [36].

Teniendo en consideración que el BT se comercializa en nanopartículas (polvo), se requiere mezclarlo con otros elementos para poder obtener una estructura relativamente robusta. Con eso en mente, dentro del estado del arte varios autores mezclaron PZT con epoxi para crear placas o pinturas con fines similares. En efecto, se propone utilizar un compuesto donde el material epoxi será la matriz y el cerámico BT será el refuerzo.

4.2 Fabricación de sensores piezoeléctricos

Esta parte del proyecto fue altamente iterativa, lo cual derivó al procedimiento que a continuación se describirá.

¹ Costo del producto sin considerar envío ni impuesto.

² Valores e imágenes obtenidas de [Stanford Advanced Materials](#) y [Habei Suoyi Material Technology Co.](#)

4.2.1 Preparando la base.

Para los experimentos realizados en este proyecto, se utilizaron dos estructuras como base donde se adicionó el sensor propuesto, estas consisten en probetas de acero tipo CT y una viga de acero delgada. Sus cualidades y propósito se describirán en la sección de experimentos de este informe, pero basta decir que requieren de un trabajo previo a la aplicación del sensor sobre ellas. Esto empieza con el lavado de sus superficies con alcohol etílico, y posterior a eso, la aplicación de dos capas de pintura de plata, se utilizó la pintura Silver Conductive 503 de Electron Microscopy Sciences. Luego, se esperó a lo menos 60 [min] entre pintadas, con tal de que este totalmente seca cada capa. Esta capa de pintura deberá ser lo suficientemente grande para que cubra todo el sensor, y a su vez, soporte el cableado asociado a este. Luego, se colocó y sujeto el molde donde se depositará la mezcla que compondrá el sensor, tal como se puede ver en la Figura 4.1.



Figura 4.1. Probeta con su pintura y molde lista.

4.2.2 Elaboración y aplicación de la mezcla

Para este proyecto se dispuso de 1 [Kg] de Titanato de Bario de Habei Suoyi New Material Technology. Este fue combinado con el sistema epoxico EPO200/813 de Plasticenter, en una proporción respecto a la masa total del conjunto cerámico, epoxi y endurecedor de: 70%, 20% y 10% respectivamente. Esta proporción se basó en los estudios de Zhang [29], y no se utilizó una mezcla con mayor cantidad de cerámico porque demostró ser demasiado espesa para ser trabajable y libre de espacios con aire.

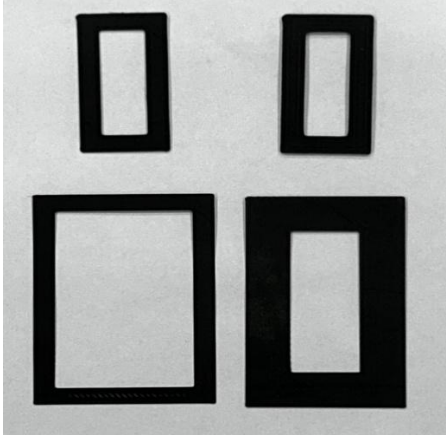
Por otro lado, la cantidad de material a utilizar fue dictado por el tamaño de los moldes utilizados, y estos a su vez, fueron creados a partir del tamaño de las probetas donde estarán los sensores. Las probetas y los experimentos a las cuales fueron sometidas se verán con detalle más adelante. Cabe mencionar que una cantidad de 23,3 [g] de BT, 6,6 [g] de epoxi y 3,3 [g] de endurecedor satisficieran

las proporciones establecidas con anterioridad y los requerimientos de material para cada lote de sensores hecho. El orden de mezclado es el siguiente:

- I Tener los 23,3 [g] de BT en un recipiente A.
- II Depositar los 6,6 [g] de epoxi en un recipiente B.
- III Depositar suficiente endurecedor en el recipiente B con tal de alcanzar los 10 [g].
- IV Mezclar el epoxi con el endurecedor, utilizando una bagueta de vidrio, por 5 [min].
- V Verter el contenido del recipiente A en el recipiente B, un tercio a la vez, y mezclar rigurosamente por otros 10 [min]. Procurar realizarlo de forma lenta para evitar espacios la creación de burbujas.
- VI Considerando que ahora la mezcla es una pasta relativamente espesa, utilizar la bagueta como pincel y e ir poniendo material dentro de los moldes, utilizar movimientos lentos y circulares para evitar espacios de aire.
- VII Por último, se deberá dejar curando la mezcla, a presión, a lo menos 12 [h]. Se utilizaron dos paneles de madera, envueltos en plástico, y un par de sargentos para producir una prensa.

Respecto a los moldes utilizados, estos fueron diseñados con el programa Inventor de Autodesk, hechos de PLA y fabricados con la impresora 3D K1 Max de Creality. Las dimensiones se especifican en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Medidas de sensores utilizados.

Medidas [mm]	Referencia
30x10x0.2	
30x10x1	
50x20x0.2	
40x15x0.2	

4.2.3 Polarizado del material

Este paso es bastante crítico, permite ordenar la orientación de electrónica del sensor, lo cual aumenta exponencialmente el efecto piezoeléctrico del material, tal como lo expuso Payo [28]. En la misma línea, el tiempo de polarizado incidirá directamente en cuanto durará el sensor polarizado, descrito

por Moulson [37]. Por otro lado, no se tomó en consideración el punto de rompimiento dieléctrico del sensor, el cual es el punto donde un material aislante se transforma en conductor, debido a que tanto el epoxi como el BT son bastante altos, con valores de $11700 [V/mm]$ y $2000 [V/\mu m]$ respectivamente [38], [39]. Dicho esto, se utilizó una fuente de poder modelo U21060 de 3B, la cual entrego $7.15 [kV]$ en promedio, a $2 [mA]$. Se puso el sensor entre dos electrodos, separados por $10 [mm]$ de uno a otro, por $60 [min]$. Esto implicó que a que el material piezoeléctrico se sometió a un potencial eléctrico de $715 [V/mm]$. Es importante señalar que antes de la polarización, se recomienda calentar el piezoeléctrico a una temperatura cercana a la temperatura de Curie del Titanato de Bario, la cual es de $120 [^{\circ}C]$ tal como lo indica Chlup [40], esto hace más fácil el reordenamiento de su estructura. En efecto, previo a la polarización se calentó el sensor en un horno convencional hasta los $130 [^{\circ}C]$, esto se supervisó utilizando una cámara infrarroja FLIR ONE EDGE de Teledyne FLIR. En las Figura 4.2 y Figura 4.3 se puede ver una imagen infrarroja y el sistema de polarizado.

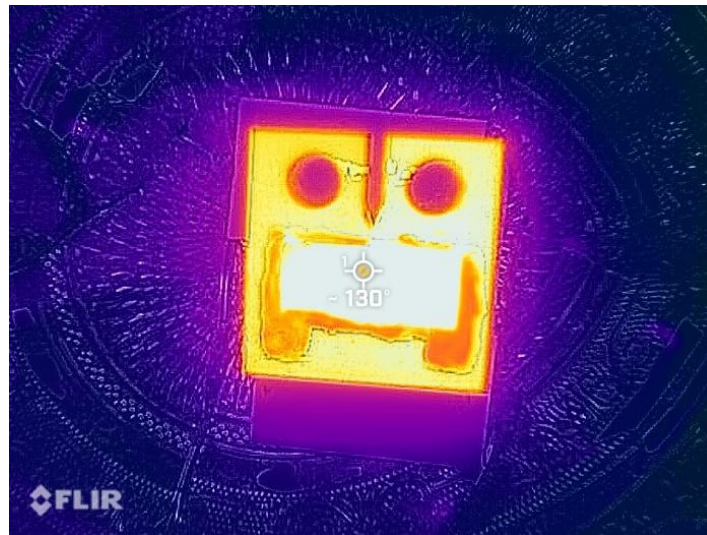


Figura 4.2. Perspectiva de la cámara FLIR.

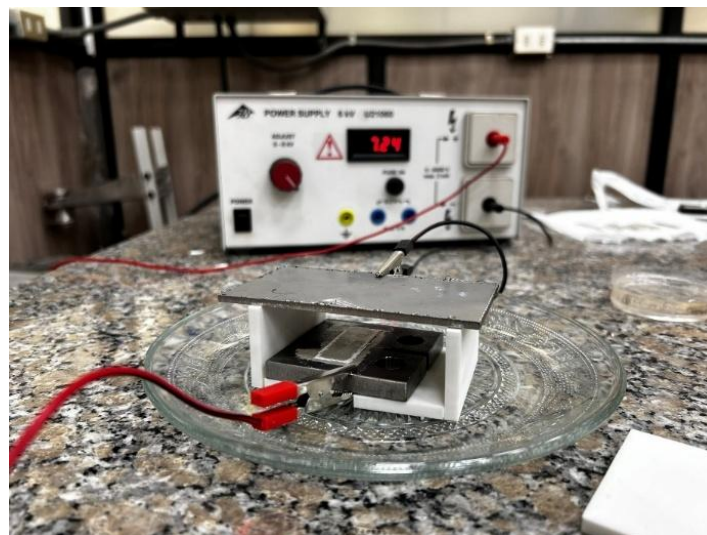


Figura 4.3. Sistema de polarizado.

4.2.4 Electrónica de los sensores

Considerando los bajos voltajes producidos por los materiales piezoeléctricos, y el nivel de ruido electrónico presente en las instalaciones en donde se trabaja, se buscó un equipo capaz de amplificar la señal producida, y a su vez, filtrar el mencionado ruido. En efecto, se utilizó un sistema de adquisición de datos (DAQ) modelo MP35 de Biopac Systems, a una tasa de muestreo de 10 [kHz] con filtro de red de 5 – 250 [Hz] . Mediante pruebas, se determinó que la mejor forma de medir estas señales sería con una configuración diferencial, la cual compara la señal de un par de electrodos con respecto a una referencia, en este caso la probeta donde está adosado el sensor. En efecto, resultó un sistema como el que se puede apreciar en las Figura 4.4 y Figura 4.5.

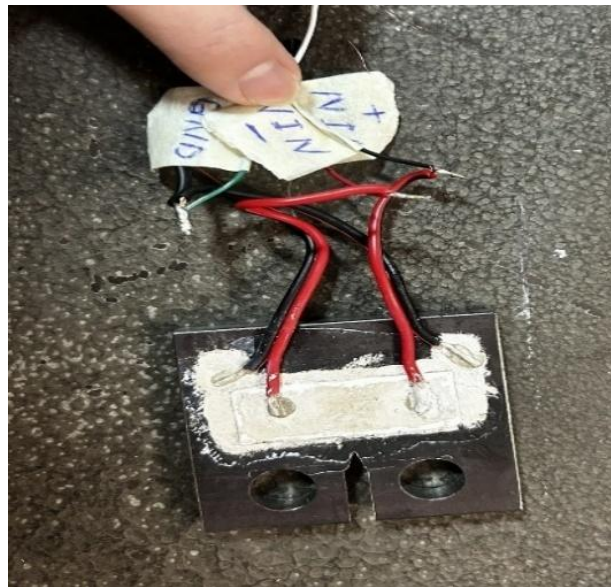


Figura 4.4. Cableado del sistema.



Figura 4.5. MP35 de Biopac Systems.

4.3 Ensayos mecánicos: Material piezoeléctrico

Con tal de responder el objetivo principal de esta memoria, si es que se pueden detectar grietas con materiales piezoeléctricos, se proponen una serie de experimentos que se expondrán en esta sección. En primer lugar, se deberá caracterizar la respuesta del sensor bajo los estímulos más comunes en las estructuras, como lo son las fuerzas de baja duración y las vibraciones tal como lo indica Barrientos [41]. Por otro lado, ya teniendo certeza en que el sensor da una señal trabajable, se procederá a hacer pruebas directamente de fatiga, donde se buscará documentar que tipo de respuesta da el sensor para las distintas etapas que sufrirá a medida que se propaga en una grieta a través de este (y la estructura en la cual esta adosado), para luego, reproducir el experimento propuesto por Zhang [29], el cual será explicado con detalle más adelante.

4.3.1 Impacto

Se buscará simular las fuerzas de baja duración con este experimento, como también, ver en como varia la respuesta entre sensores de distintas dimensiones y espesores bajo los mismos estímulos. La prueba consistió en soltar una bola de acero de 17 [g], dentro de un tubo de PVC, a alturas de 0.5 [m], 1.0 [m] y 1.5 [m]. Considerando que la bola rompió una primera tanda de sensores al impactar con ellos directamente, se utilizó un trozo rectangular de PLA de 60x15x5 [mm] como intermediario para el impacto, tal como se puede observar en las Figura 4.6 y Figura 4.7.

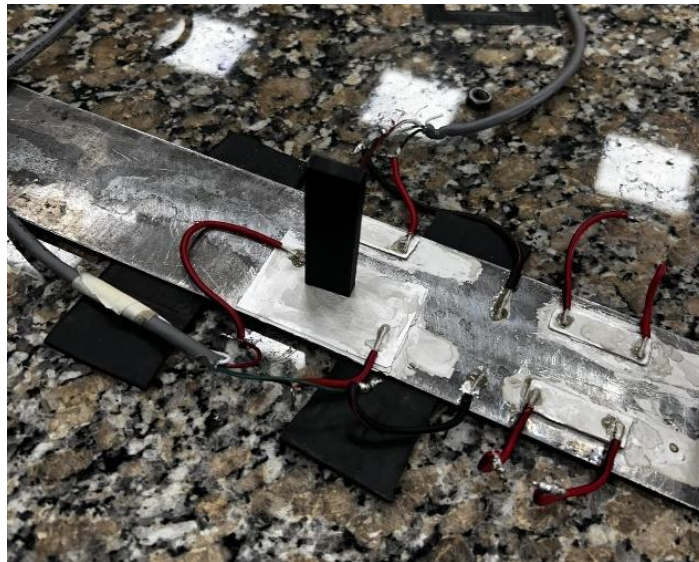


Figura 4.6. Pieza de PLA utilizada.



Figura 4.7. Tubo de PVC con agujeros a las alturas señaladas.

Con respecto a los sensores, se utilizaron dos pares, donde un par contenía sensores de distintas dimensiones y mismo espesor, mientras que el otro par, contenía sensores de mismas dimensiones y distintas dimensiones. Las dimensiones del primer par fueron de: $30 \times 10 \times 0.2$ [mm] y $50 \times 30 \times 0.2$ [mm], en contraste, las medidas del segundo par fueron de: $30 \times 10 \times 0.2$ [mm] y $30 \times 10 \times 1$ [mm] teniendo ambos pares un sensor en común. Se fabricaron los sensores sobre una barra de acero de $1000 \times 50 \times 1$ [mm], la cual se ocupará para el siguiente experimento, como se puede ver en la Figura 4.8.



Figura 4.8. Sensores sobre la barra de acero.

Para las mediciones de este experimento se utilizó el sistema MP35 de Biopac para adquisición de señales, con un filtro de red para frecuencias entre $5 - 250$ [Hz] y frecuencia de muestreo de 10 [kHz], computadora portátil y una conexión eléctrica diferencial con el sensor.

4.3.2 Vibraciones

Tal como se expuso en el estado del arte, una de las aplicaciones de más comunes para la detección de grietas a través de sensores piezoeléctricos es mediante el análisis de vibraciones. Brevemente, esto usualmente implica tener un par de sensores adosados a la estructura de interés, donde a uno se le hace vibrar inyectándole electricidad, y a su vez, estas vibraciones se propagan a lo largo de la estructura hasta llegar al otro sensor, el cual genera una respuesta a estas vibraciones que los técnicos y programas a fines interpretan. A fin a lo anterior, se hará un acercamiento a este tema caracterizando la respuesta del sensor creado para unas vibraciones a frecuencia y aceleración conocida.

Este experimento consiste en someter una barra en voladizo a vibraciones de 18 [Hz], 19 [Hz] y 20 [Hz]. La barra es de 1000x50x1 [mm], esta sujeta en un extremo por dos sargentos de Crownman, mientras que en el otro extremo está conectada mediante un hilo M6 de 70 [cm] a una máquina de vibraciones tipo Vibration Test System TV 51110 de Tira. Esta barra tiene adosada un par de sensores, cuyas dimensiones son: 30x10x0.2 [mm] y 50x30x0.2 [mm], a una distancia de 10 [cm] desde la fuente de excitación. Por otro lado, se colocó un acelerómetro modelo 603C02 de IMI entre los sensores y la máquina de vibraciones. El sistema se puede visualizar en la Figura 4.9.



Figura 4.9. Sistema vibratorio.

Para las mediciones de este experimento se utilizó el sistema MP35 de Biopac para adquisición de señales, con un filtro de red para frecuencias entre 5 – 250 [Hz] y frecuencia de muestreo de 10 [kHz], computadora portátil y una conexión eléctrica diferencial con el sensor. Mas el equipo asociado a la maquina de vibraciones y el acelerómetro.

4.3.3 Fatiga: 1 Canal

Este experimento se realizó con tal de caracterizar y documentar el sensor directamente bajo la influencia la fatiga, la cual es causante de la aparición y propagación de grietas estructurales. La idea expuesta en el estado del arte para la detección de grietas implica a que una grieta que este surgiendo en la estructura base en la que está sujeta el sensor, pasará también por este último, lo cual debería generar una señal distinta a medida que evoluciona este acontecimiento.

Para llevar a cabo lo anterior, se dispuso de tres probetas de acero tipo Compact Tension (CT), de $60 \times 60 \times 8$ [mm]. Tanto las probetas, como el ensayo de fatiga, se realizaron en concordancia a la norma ASTM E647 [42]. La máquina de fatiga utilizada fue la ServoHydraulic testing system 8801 de Instron, configurada para que ejerciera una fuerza de 20 [kN] a 10 [Hz], con punto de ajuste a los 5 [kN], y una forma de carga de medio senoverso (solo tracción). Se puede observar el sistema en la Figura 4.10.

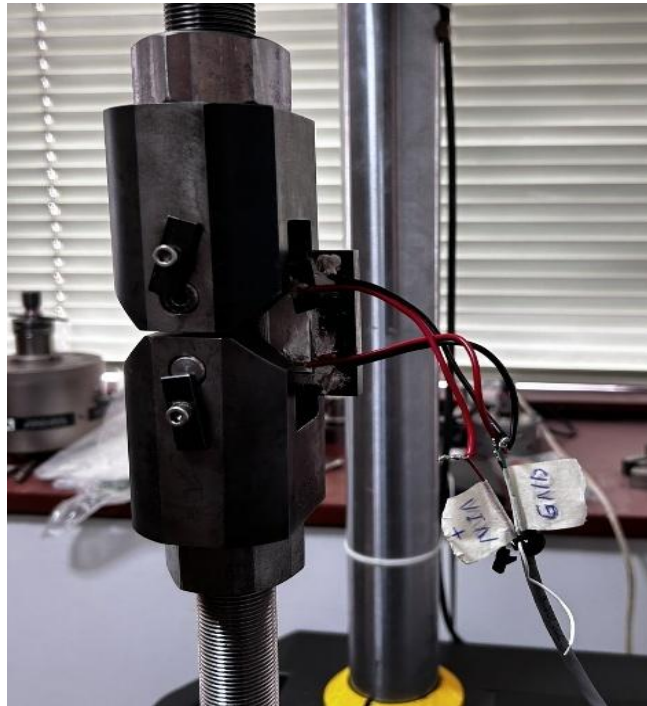


Figura 4.10. Sistema montado en la máquina de tracción.

Para las mediciones de este experimento se utilizó el sistema MP35 de Biopac para adquisición de señales, con un filtro de red para frecuencias entre $5 - 250$ [Hz] y frecuencia de muestreo de 10 [kHz], computadora portátil y una conexión eléctrica diferencial con el sensor. El ensayo fue grabado en video con tal de captar y correlacionar con las mediciones los eventos importantes dentro del ensayo, por ejemplo, comienzo de la grieta, rompimiento del sensor, entre otros.

4.3.4 Fatiga: 1 Canal – Sensor angosto

A partir de las señales obtenidas del experimento anterior, las cuales se presentarán y discutirán en el siguiente capítulo, surgió la siguiente hipótesis:

¿Podrá un sensor más delgado entregar señales similares en una menor escala de tiempo?

Este experimento se realizó para comprobar aquella hipótesis, lo cual implicaría, tener detectar una grieta de una forma más oportuna que la configuración anteriormente utilizada. En efecto, se realizó el mismo experimento, con los mismo equipos y configuración. Lo único que cambio fue la anchura del sensor utilizado, tal como se puede observar en la Figura 4.11.

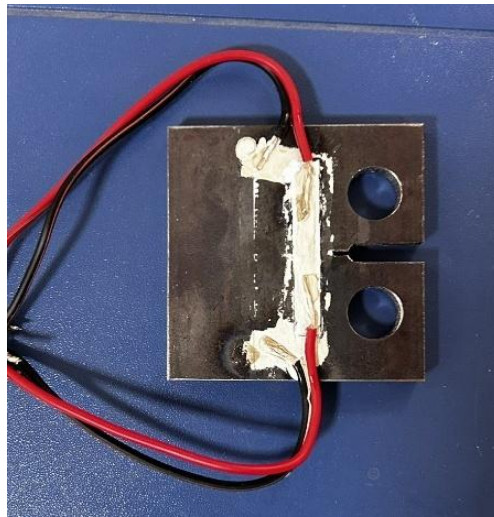


Figura 4.11. Sensor angosto propuesto.

4.3.5 Fatiga: 2 Canales

Una vez ya caracterizada la respuesta del sensor con los experimentos previos, se realizó la experiencia presentada por Zhang [29], la cual consiste en detectar grietas a través de la comparación de las señales que emite el sensor a medida que este se vaya rompiendo al ser atravesado por la grieta, tal como se ve en la Figura 3.10.

Tal como los experimentos pasados, tanto el equipamiento, configuraciones y condiciones se mantuvieron. El único cambio fueron las nuevas conexiones del sensor al DAQ, al pasar a medir en ambos extremos del piezoelectrico, y asignándoles a cada extremo un canal en el sistema de adquisición. Esto se puede visualizar en la Figura 4.12.

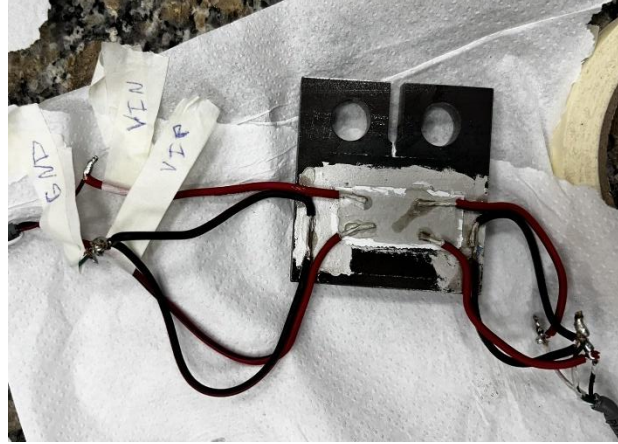


Figura 4.12. Nuevas conexiones del sensor.

4.4 Ensayos mecánicos: Material piezorresistivo

En base a lo expuesto y visto en el estado del arte, surgió la siguiente hipótesis:

¿Se podrá caracterizar el Velostat de tal forma que se pueda detectar cuando se produce una grieta para determinada estructura?

Para responder esta interrogante, se planteó un simple experimento para observar y documentar el comportamiento del material para un escenario no exactamente igual a la fatiga, pero que genera una grieta que para estos efectos sirve para resolver la interrogante.

4.4.1 Tracción

Tomando en cuenta el limitado inventario de probetas tipo CT disponibles, las cuales fueron casi todas ocupadas para los ensayos con los sensores piezoeléctricos, se propuso replicar este tipo de probetas en material PLA. Estas tuvieron las mismas dimensiones que sus colegas de metal, fueron fabricadas mediante la impresora 3D K1 Max de Creality, con un 25% de material de relleno y una configuración de impresión tal que permitiera el desarrollo de una grieta de una forma relativamente controlada al ser sometida a tracción.

Con respecto a esto último, para estos ensayos no se contó con la máquina de fatiga utilizada en experimentos anteriores, en efecto, se utilizó la máquina de ensayos universal Z005 de Zwick Roell. Este equipo aplicó una tracción continua a la probeta hasta alcanzar un desplazamiento equivalente al 80% de su longitud de ajuste original de la probeta respecto a la máquina. El montaje se puede observar en la Figura 4.13.

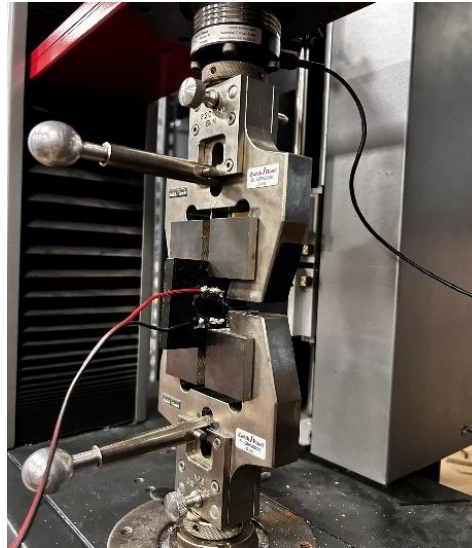


Figura 4.13. Sistema montado en la máquina.

El sensor estuvo compuesto de un trozo rectangular de Velostat de $30 \times 20 \times 0.1$ [mm]. Luego, se le hizo tres agujeros en cada extremo a los cuales se les introdujo un cable de cobre descubierto. En seguida, para eliminar posibles vacíos entre el cobre y el sensor, se le aplicó una capa de pintura de plata a lo largo de sus ambos extremos. Después del curado de la plata, fue adherido a la probeta usando el pegamento instantáneo Rex. A su vez, el sensor está conectado a un Arduino UNO, intermediariamente usando una protoboard, siguiendo la configuración mostrada por la Figura 4.14, donde la resistencia desconocida correspondería al sensor. El Arduino suministra un voltaje continuo de 5 [V] al sensor, y a su vez, compara el voltaje de salida con una resistencia conocida de 23000 [Ω], y en base a eso, realiza una estimación de la resistencia del piezorresistente. La electrónica del sistema se puede apreciar en la Figura 4.15. Por último, se utilizó el programa Realterm para guardar los datos capturados por el Arduino.

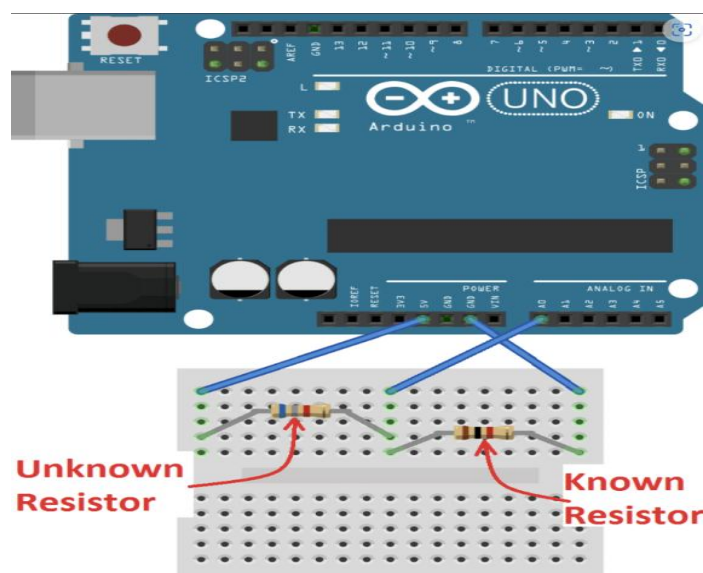


Figura 4.14. Sistema de medición (Fuente: [43]).

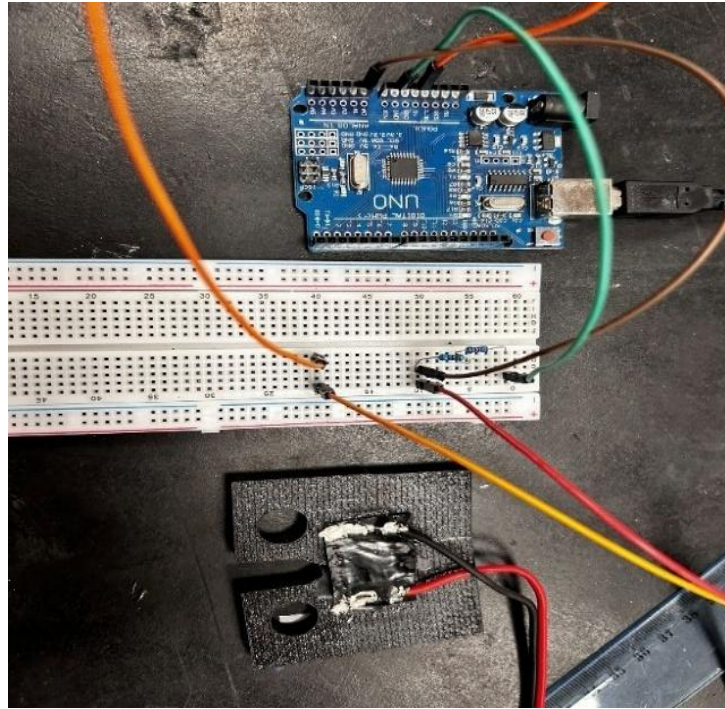


Figura 4.15. Sistema implementado.

CAPÍTULO 5: Resultados y discusión

5.1 Resultados de sensores piezoeléctricos

En este capítulo se expondrá y analizará los resultados de cada uno de los experimentos propuestos en la metodología. Por razones de optimización de espacio, para las experiencias donde se hicieron más de una prueba, se adjuntará sus resultados en la sección de anexos. Todos los gráficos presentados en este capítulo fueron creados con datos de sus respectivos DAQ y el programa Matlab.

5.1.1 Respuesta al impacto

Siguiendo la metodología planteada anteriormente, se documentaron y compararon las respuestas entre sensores con tal de observar en cómo influye la variación de dimensiones y espesor entre un sensor a otro. En las Figura 5.1 y Figura 5.2 se aprecian las señales emitidas por el sensor de menor y mayor dimensiones, respectivamente. De izquierda a derecha, en ambas, se ven las amplitudes alcanzadas por el impacto de la bola de acero a 0.5 [m], 1.0 [m] y 1.5 [m]. La Tabla 5.1 muestra y compara la señal para cada sensor. Cabe destacar que para el sensor 30x10x1 [mm] no se hicieron todas las pruebas en una tanda, en efecto, se tienen varios gráficos, como se puede ver en las Figura 5.3, Figura 5.4 y Figura 5.5.

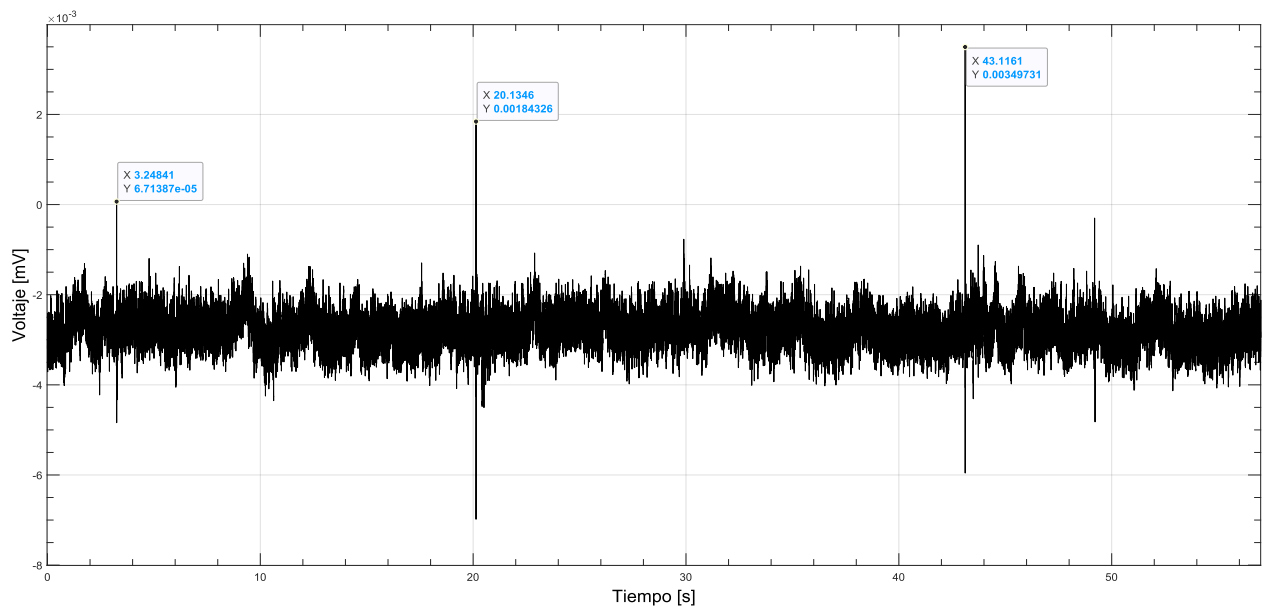


Figura 5.1. Respuesta de impactos del sensor de 30x10x0.2 [mm].

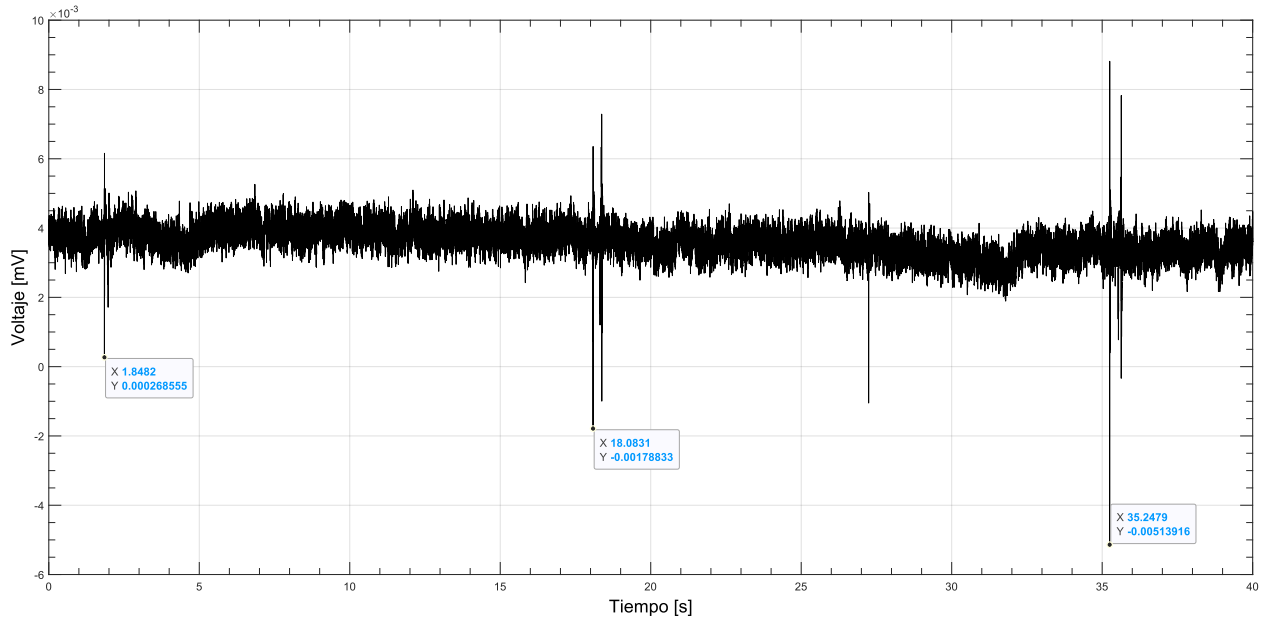


Figura 5.2. Respuesta a impactos del sensor de 50x30x0.2 [mm].

Tabla 5.1. Amplitud de la respuesta al impacto.

Altura [m]	Señal de sensores [μV]		
	30x10x0.2 [mm]	50x30x0.2 [mm]	30x10x1 [mm]
0.5	3	3.8	0.8
1.0	4	5	1.2
1.5	6.4	7.2	1.9

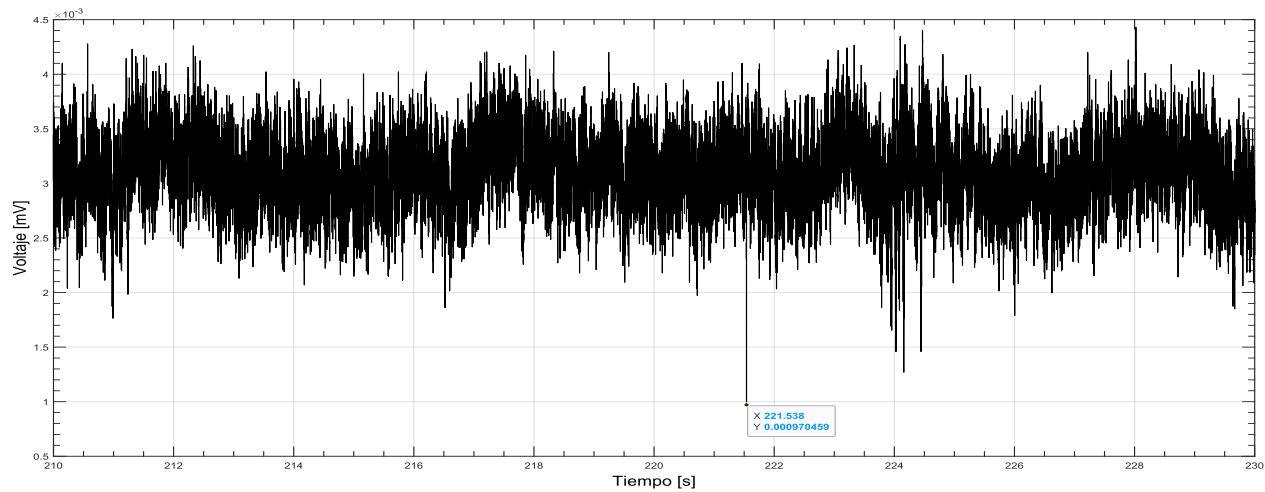


Figura 5.3. Respuesta a impacto del sensor de 30x10x1 [mm], para 0.5 [m] altura.

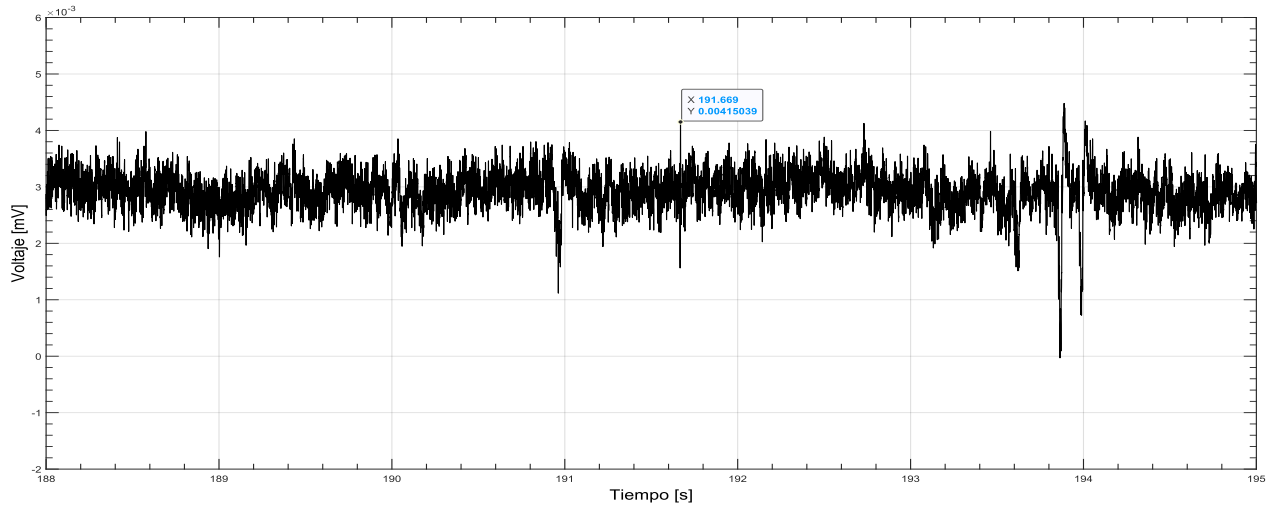


Figura 5.4. Respuesta a impacto del sensor de $30 \times 10 \times 1$ [mm], para 1.0 [m] altura.

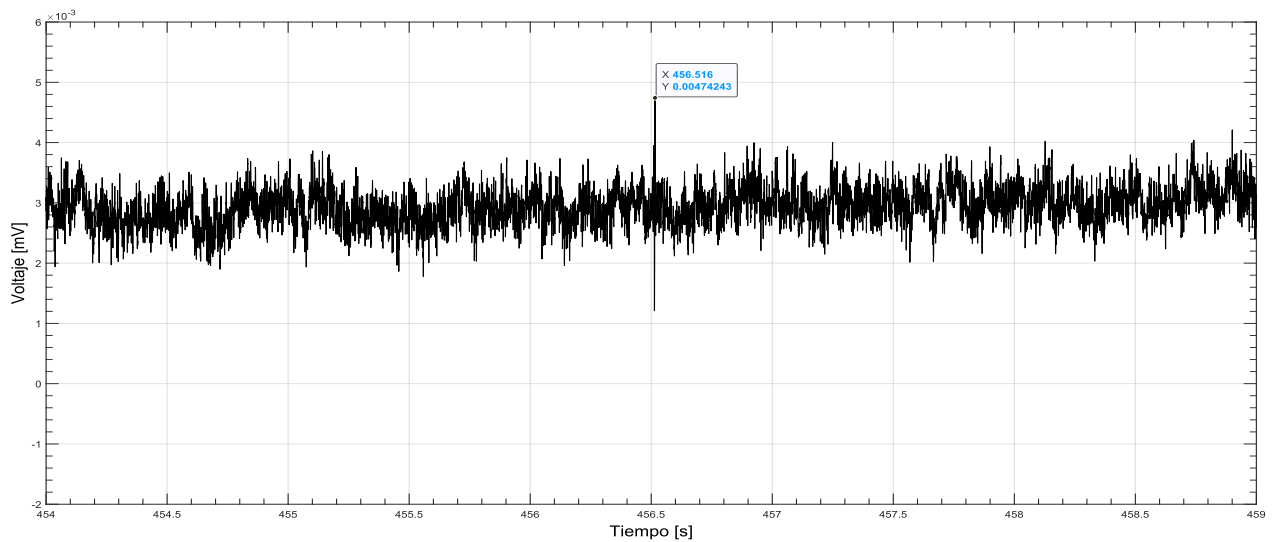


Figura 5.5. Respuesta a impacto del sensor de $30 \times 10 \times 1$ [mm], para 1.5 [m] altura.

En base a lo anterior, se puede verificar que entre mayor sean las dimensiones en el plano del sensor, mayor señal dará para un mismo estímulo. Al contrario, entre más espesor tenga un sensor, menor será la respuesta a este mismo estímulo. Si bien el primer caso resulta razonable debido a que una mayor área, y en efecto, un mayor volumen del sensor estará bajo deformación lo cual producirá mayor potencial eléctrico. En el segundo caso, a pesar de que se cumple la misma lógica anterior, no pasa. Esto podría explicarse a que todos los sensores fueron polarizados de la misma forma, y el sensor más grueso, al tener más espesor que todos los demás, el campo electroestático tuvo menos efecto sobre él. Esto podría solucionarse al aumentar la potencia de dicho campo, o su tiempo de exposición a este.

5.1.2 Respuesta a vibraciones

Para efectos prácticos, se presentará y comparará la respuesta del par de sensores sometidos a una frecuencia de 18 [Hz] con 9.03 [m/s^2] de aceleración y 20 [Hz] con 4.12 [m/s^2] de aceleración. La señal de estos para 19 [Hz] se adjuntará al Anexo A. Las Figura 5.6 y Figura 5.8 corresponden a la señal del sensor de menores dimensiones, mientras que las Figura 5.7 y Figura 5.9 son del sensor de mayores dimensiones. Todos los gráficos muestran, de izquierda a derecha, cuando la barra está sometida a vibraciones, cuando se detiene, y cuando queda estacionaria. La flecha azul marca el momento de la transición desde el movimiento a la detención.

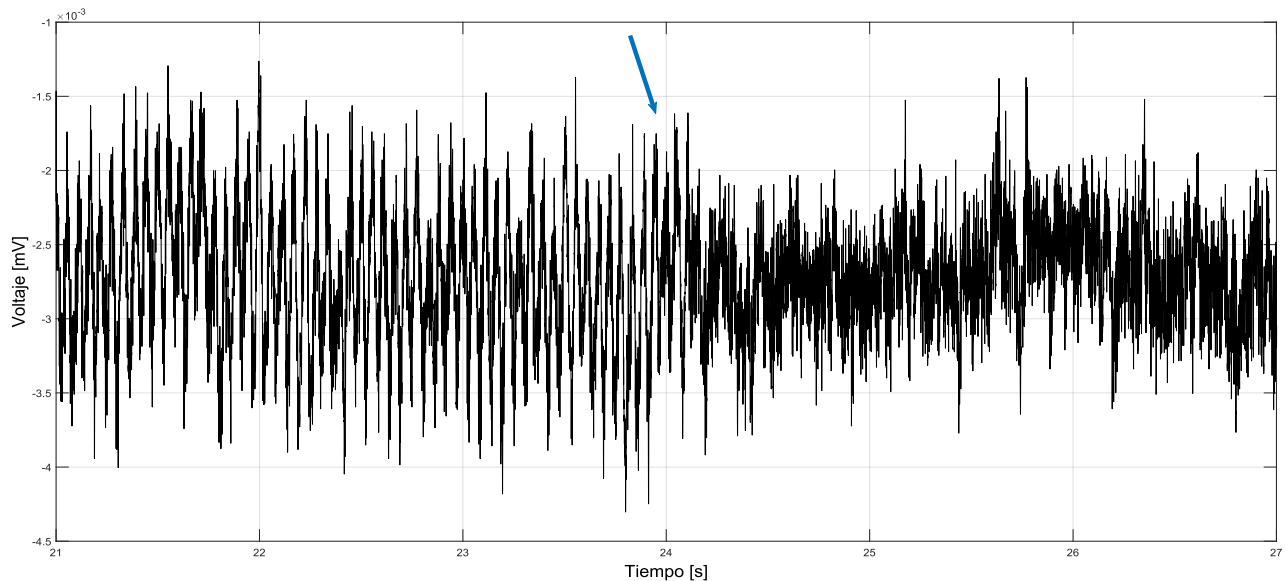


Figura 5.6. Respuesta del sensor de 30x10x0.2 [mm] a 18 [Hz]

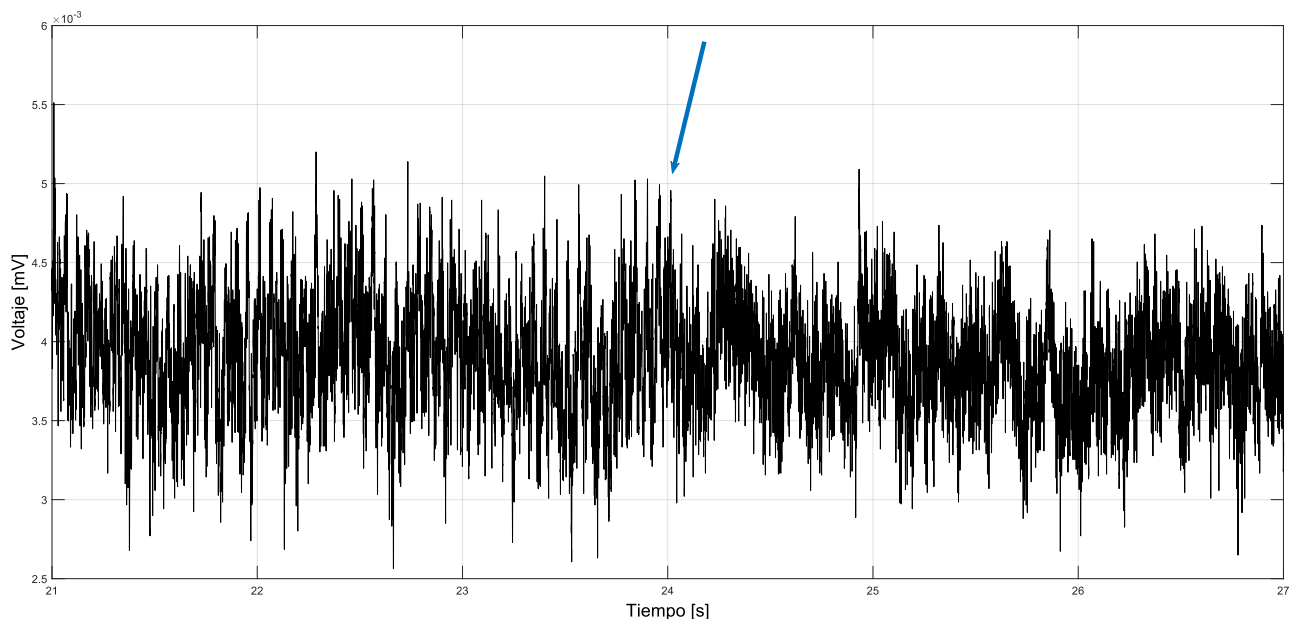


Figura 5.7. Respuesta del sensor de 50x30x0.2 [mm] a 18 [Hz].

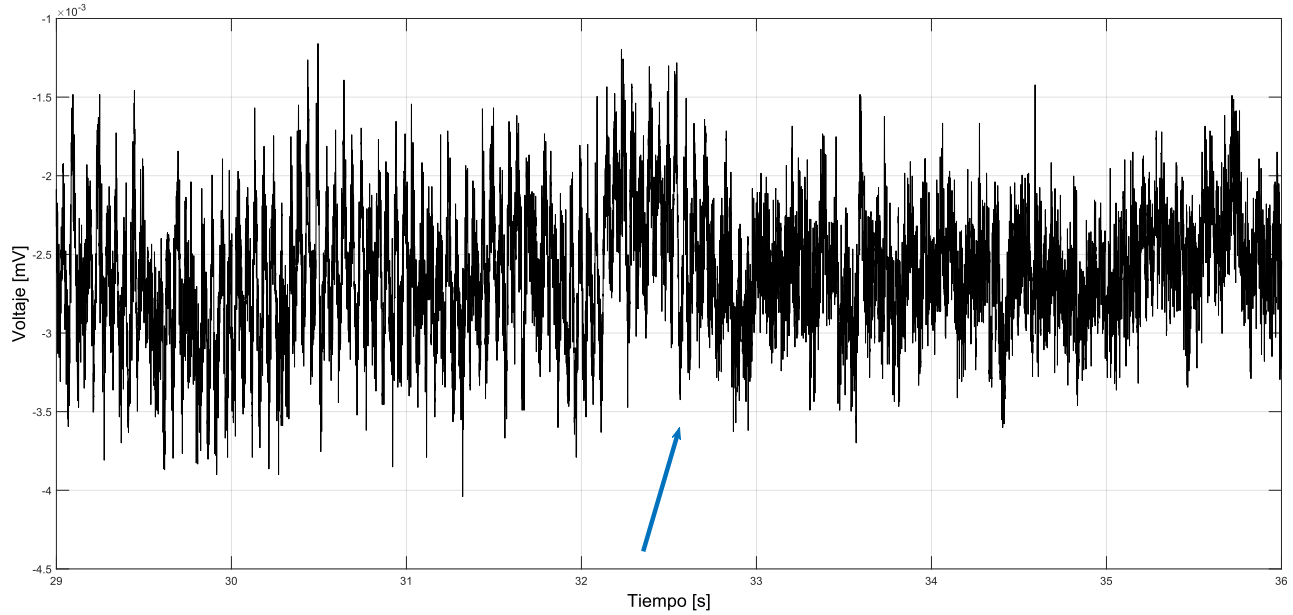


Figura 5.8. Respuesta del sensor de $30 \times 10 \times 0.2$ [mm] a 20 [Hz].

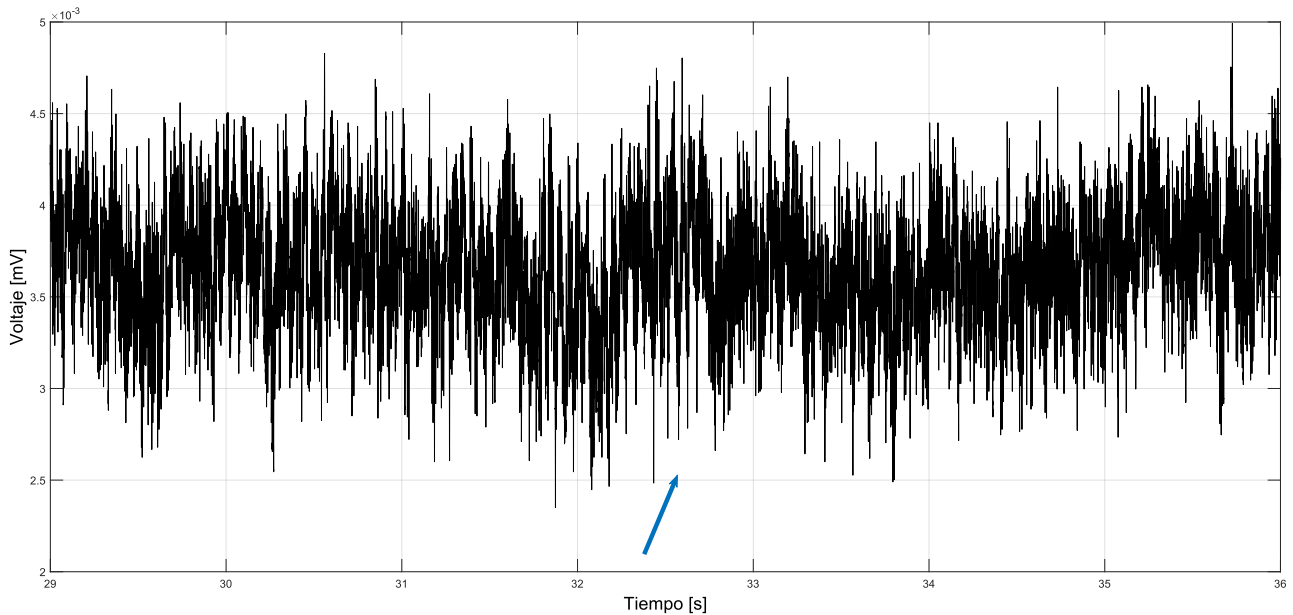


Figura 5.9. Respuesta del sensor de $50 \times 30 \times 0.2$ [mm] a 20 [Hz]

Del análisis de los gráficos se puede desprender que efectivamente el sensor da una señal a la misma frecuencia de la excitación, y su amplitud, será directamente proporcional a la aceleración en la que este sometida. Por ejemplo, para el caso del sensor menor se puede medir una amplitud promedio de $1.8 \mu V$ para una excitación $18 [Hz]$ a $9.03 [m/s^2]$, mientras que, la señal para el mismo sensor sometido a una excitación de $20 [Hz]$ a $4.12 [m/s^2]$ es en promedio de $1 \mu V$. Por otro lado, es notable lo ruidoso que es la señal del sensor mayor en comparación al sensor de menores dimensiones en el caso de $20 [Hz]$, esto se podría explicar a que, debido a las características de la barra, y la configuración de cómo fue instalada, presentaba modos de vibrar que creaban nodos cercanos a los

sensores. El sensor más grande se acercaba más a este nodo, en el cual, la onda estacionaria es nula. A la ausencia de movimiento, ausencia de señal del piezoeléctrico, predominando el ruido eléctrico.

Finalmente, no se pudo apreciar diferencia entre las amplitudes de los sensores (más allá de lo mencionado anteriormente) bajo la misma excitación. Se debe destacar que una caracterización de un barrido más amplio de frecuencias permitiría definir los límites de operación del sensor para aplicaciones acústicas o de vibraciones.

5.1.3 Respuesta a la fatiga: 1 canal

Para este experimento se utilizaron tres probetas, de las cuales se expondrán los resultados de la última de estas, esto debido a que fue la probeta donde se pudo visualizar con mayor claridad cada evento que se analizara a continuación. Se adjunta los resultados de los demás especímenes en el Anexo A. En la Figura 5.10 se puede observar todo el experimento, donde los primeros 10 [s] el sistema se encuentra estacionario, esto se puede visualizar de mejor forma en la Figura 5.11 para tomarlo como base de comparación. De todas formas, en la Figura 5.10 se ve que la medición es relativamente lisa hasta los 170 [s], esto se debe a que las diferencias de las amplitudes de los fenómenos que suceden durante el final de la prueba, como lo son la ruptura del sensor, de su electrodo y probeta, son de magnitudes ($> 10^2$) más grandes que los momentos previos a estos eventos. Por otro lado, tal como se mencionó en la metodología, se correlacionó los momentos capturados en video con respecto a las mediciones de señales realizadas.

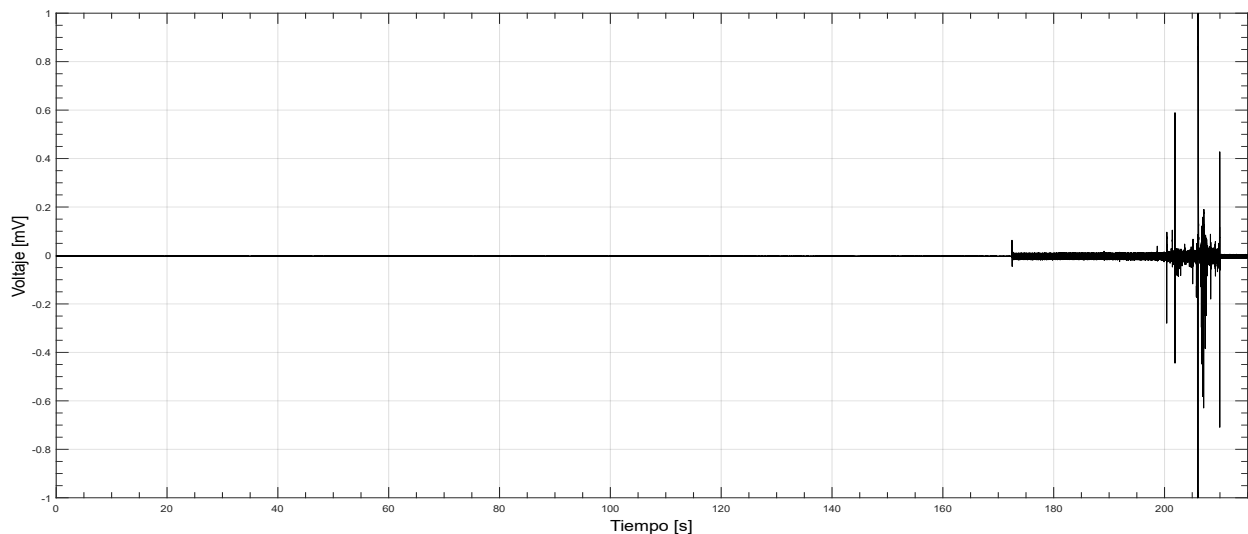


Figura 5.10. Señal del sensor durante todo el experimento.

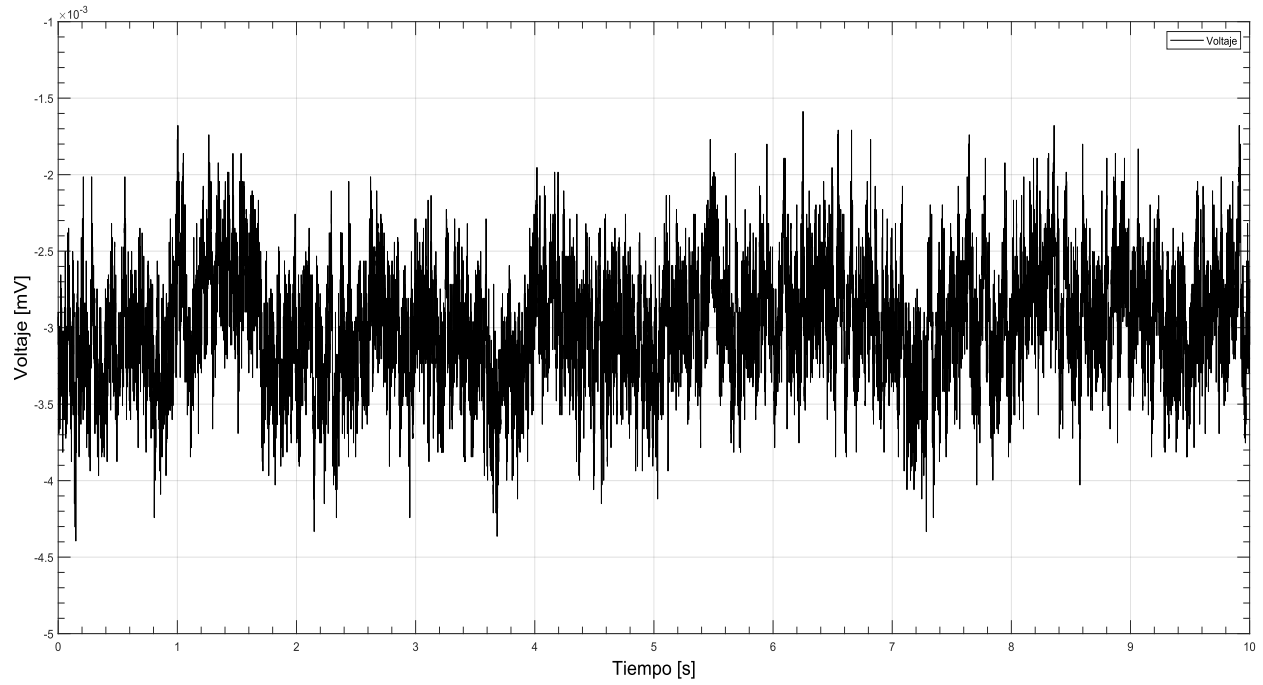


Figura 5.11. Señal del sensor antes de comenzar la prueba.

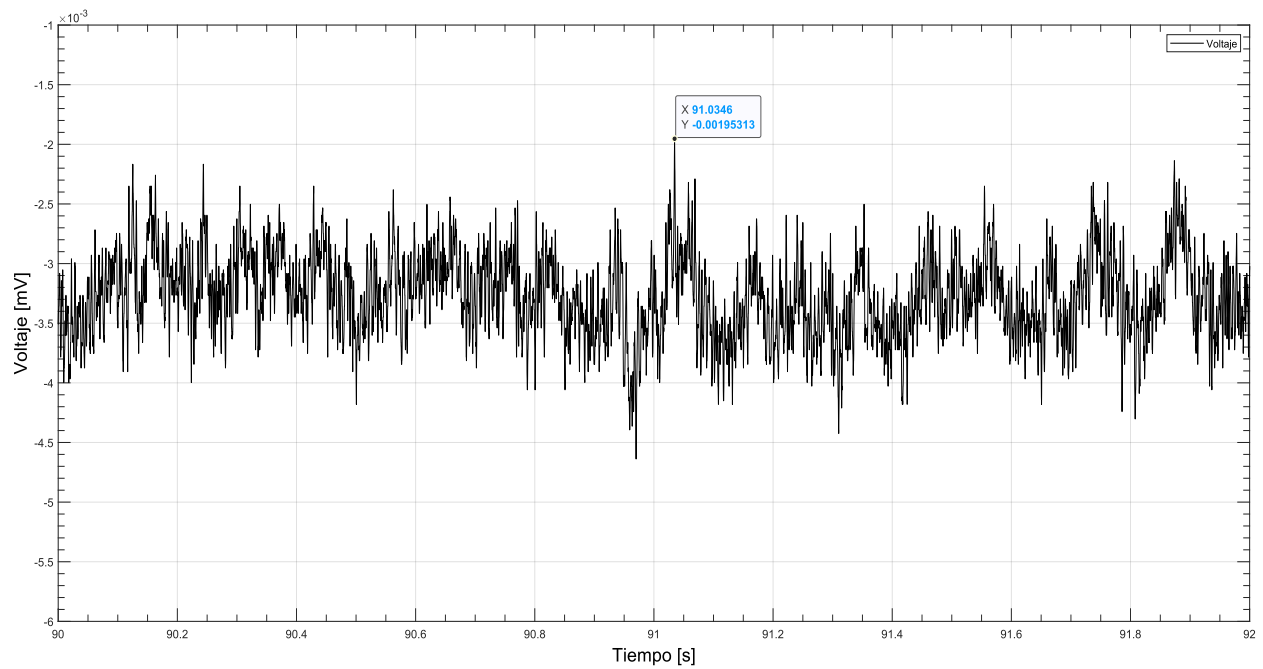


Figura 5.12. Señal al comienzo de la ruptura del sensor.

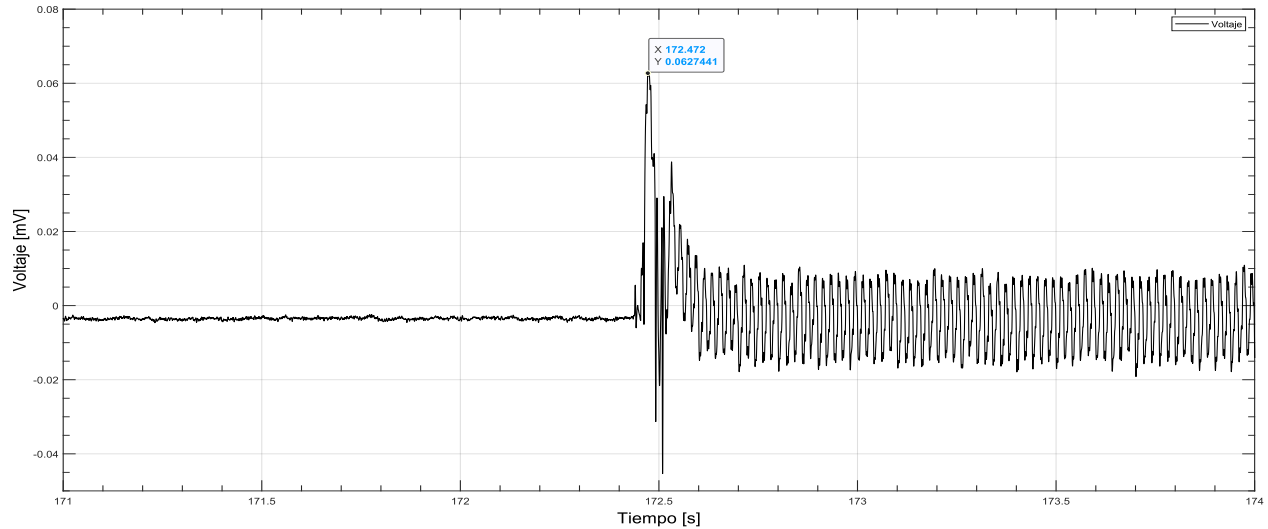


Figura 5.13. Señal al término de la ruptura del sensor.

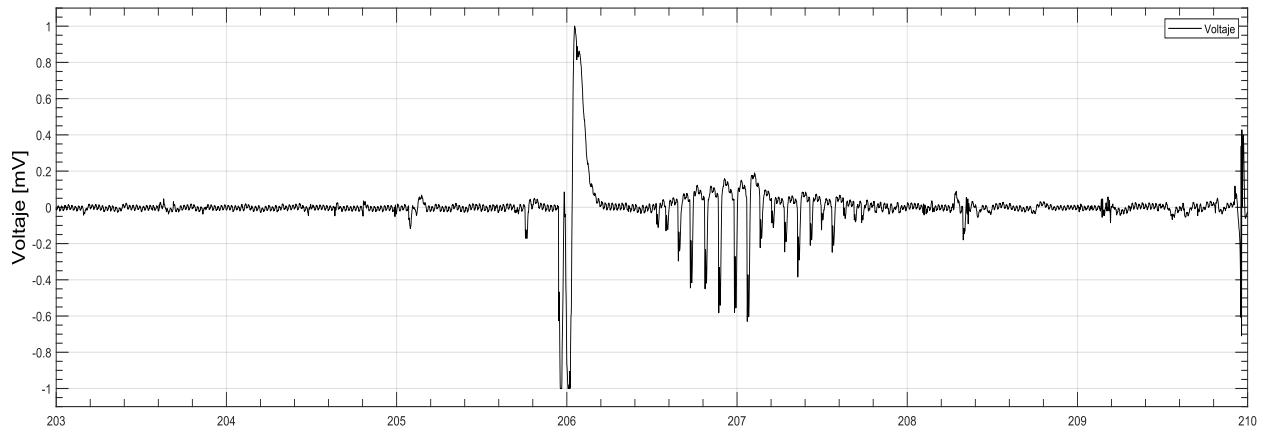


Figura 5.14. Señal al momento de la ruptura de la probeta.

El primer evento visible tanto en video como en el gráfico fue cuando se empezó a romper el sensor piezoeléctrico, el cual se puede observar en la Figura 5.12. Donde tuvo un pico de $1.2 \text{ } [\mu\text{V}]$. Así mismo, y como fue comprobado en el experimento anterior, el sensor da una respuesta con una frecuencia de $10 \text{ } [\text{Hz}]$, la cual es también la frecuencia a la que se está realizando el ensayo.

La siguiente señal visible, corresponde al momento en que se termina de romper el sensor, demostrada en la Figura 5.13. Esta tiene una amplitud bastante mayor de cerca de $66 \text{ } [\mu\text{V}]$, tomando en cuenta las mediciones previas, es probable que esta amplitud se debió a que, en ese momento, se perdió la conexión diferencial que había, esto debido a que también se termina de cortar el electrodo superior del sensor. Esto queda evidenciado por el cambio de amplitud y frecuencia de la señal después del evento.

Por último, la mayor señal detectada en la experiencia corresponde al momento en que se termina de romper la probeta en cuestión, la amplitud de este evento alcanza $1 \text{ } [\text{mV}]$. Considerando que el sensor ya se rompió en el evento anterior, y el alto valor de la señal, hace pensar que simplemente corresponde

a la respuesta que genera el DAQ a medida que su referencia de tierra (la probeta) se parte por la mitad. Cabe destacar la forma en que se terminó rompiendo esta probeta en particular, la cual se puede observar en la probeta inferior en la Figura 5.15.

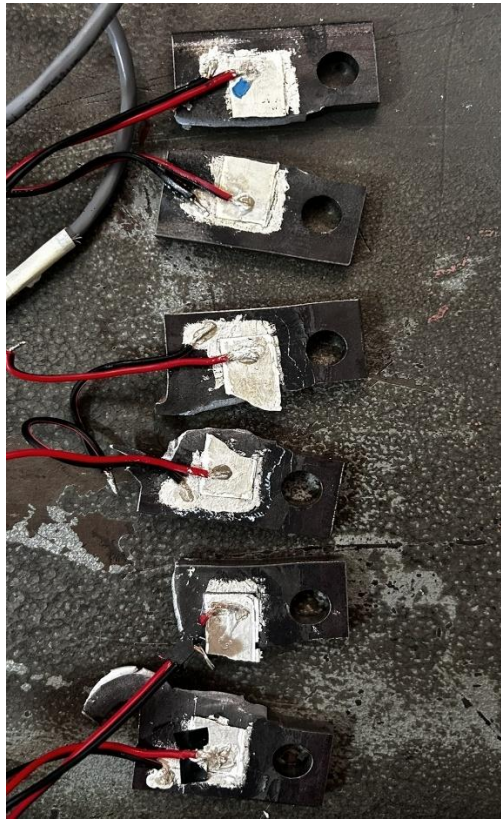


Figura 5.15. Probetas ensayadas, de arriba hacia abajo, probetas 1, 2 y 3.

5.1.4 Respuesta a la fatiga: 1 canal – angosto

Tal como se dijo en la metodología, este experimento tiene como objetivo verificar la siguiente hipótesis: Detectar la aparición de una grieta de forma más oportuna, utilizando un sensor más delgado, con respecto a los sensores probados con anterioridad. Considerando lo anterior, en la Figura 5.16 se muestra el ensayo completo, donde los primeros 10 [s] se encuentra el sistema estacionario.

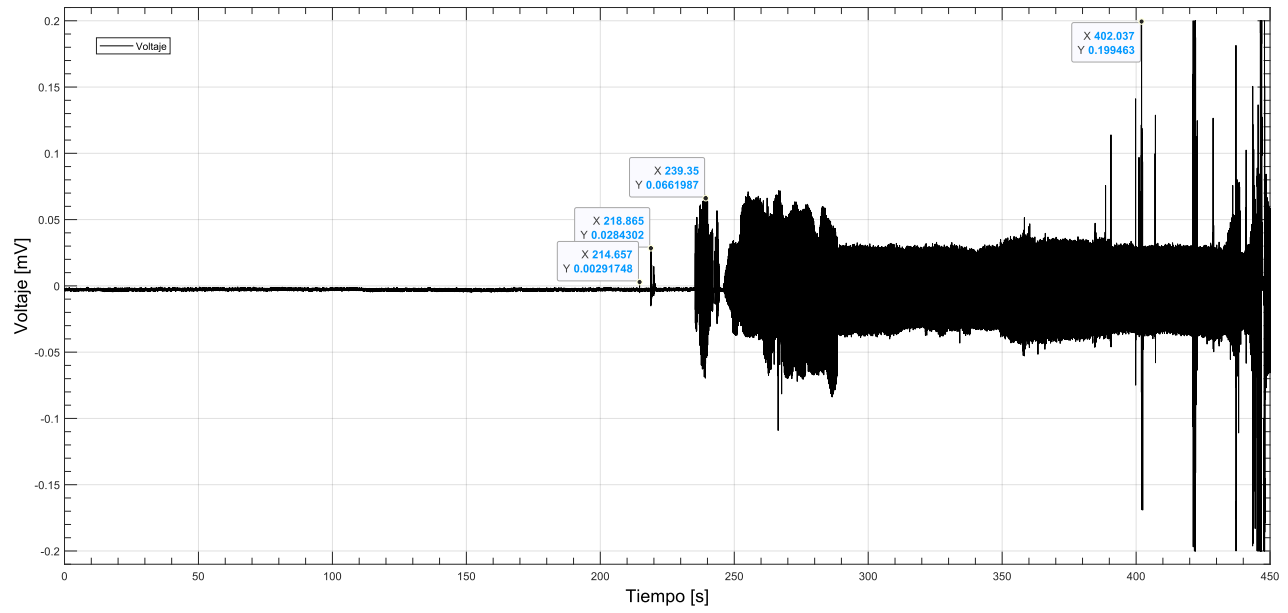


Figura 5.16. Ensayo completo.

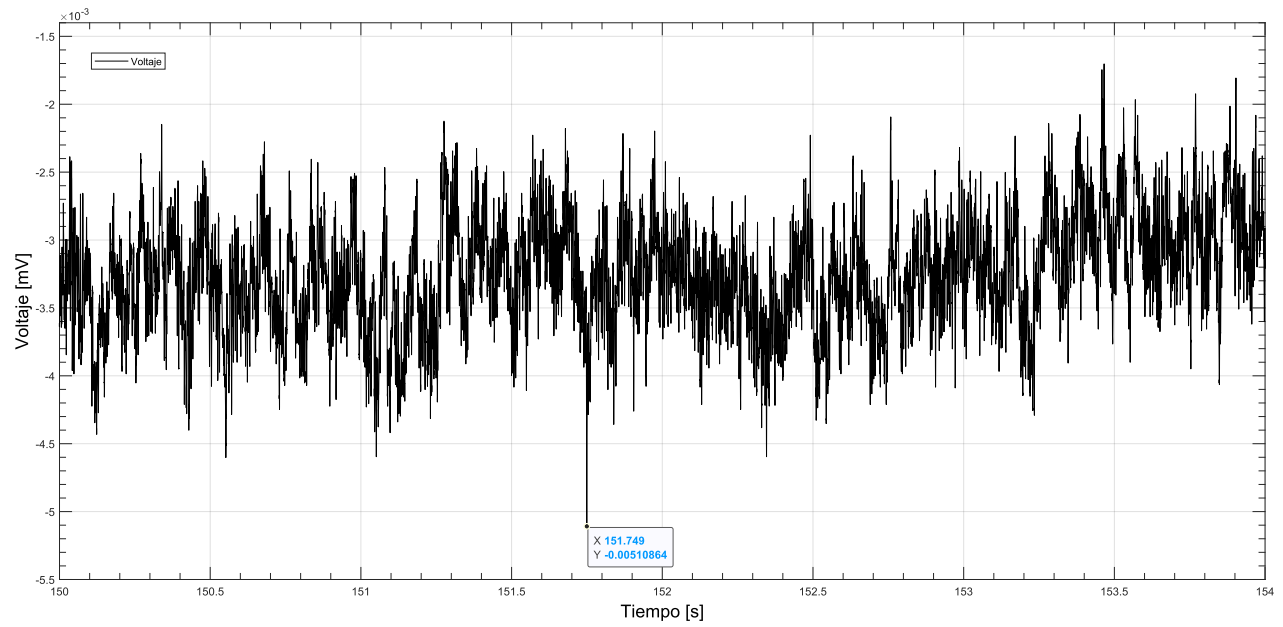


Figura 5.17. Señal al comienzo de la ruptura del sensor.

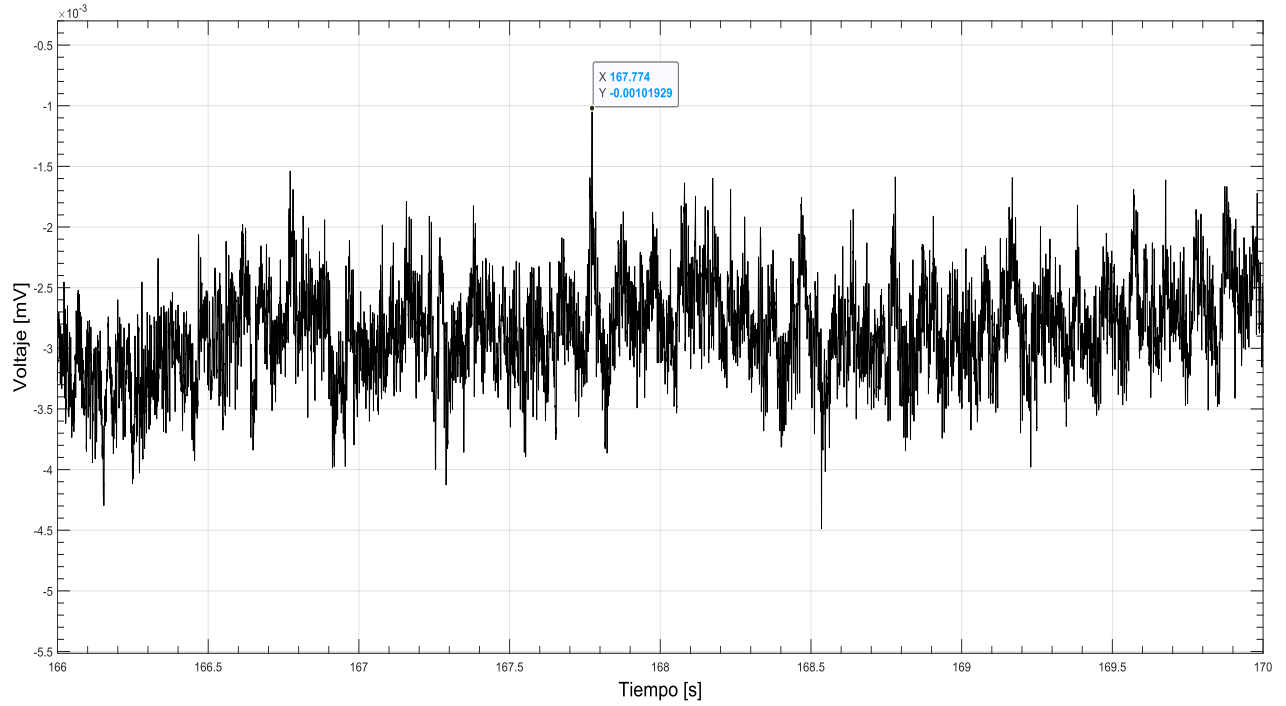


Figura 5.18. Señal al término de la ruptura del sensor.

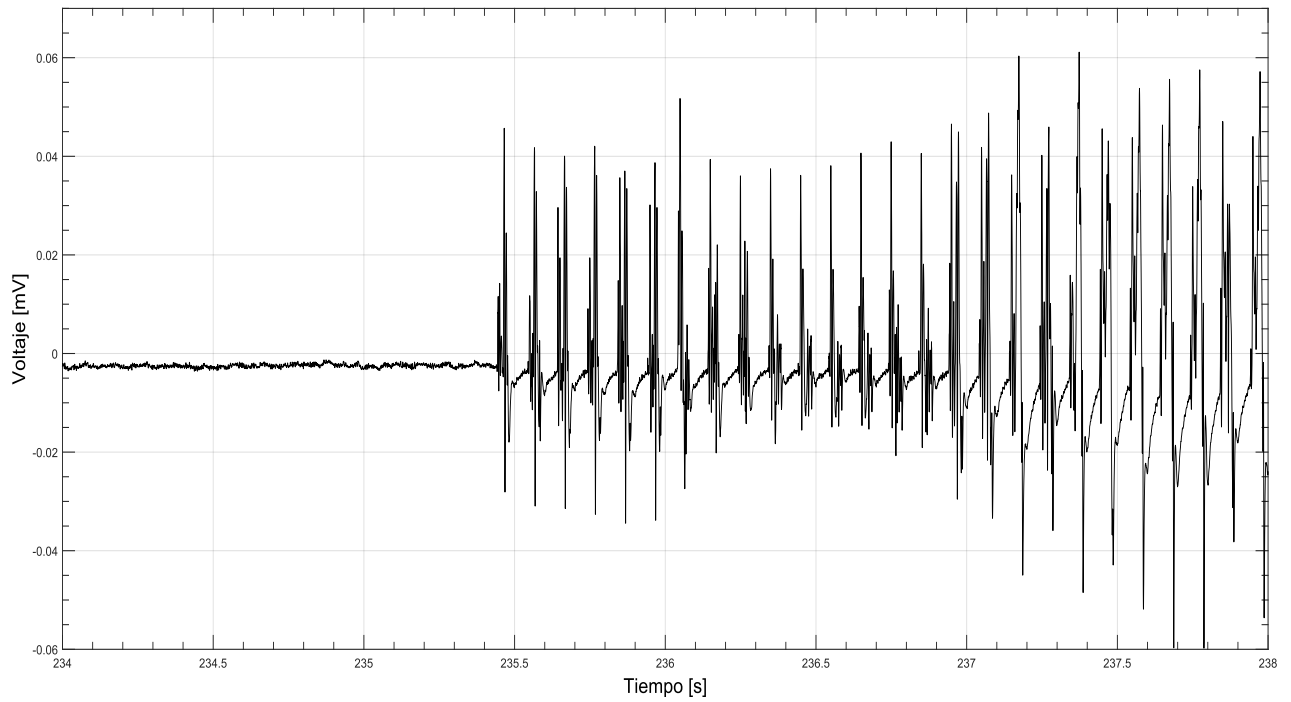


Figura 5.19. Señal al momento de término de la ruptura del electrodo superior del sensor.

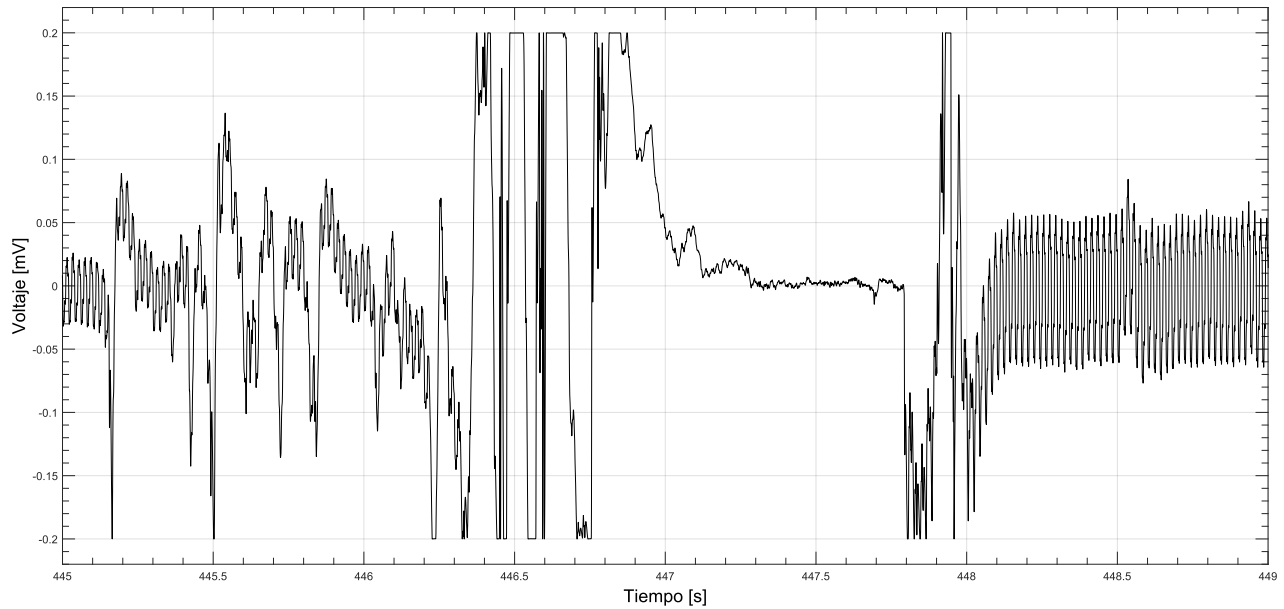


Figura 5.20. Señal de la ruptura de la probeta.

El primer evento visible fue cuando se empezó a romper el sensor, como se aprecia en la Figura 5.17, donde se alcanza una señal cercana a $1.6 \mu\text{V}$. Luego, al cabo de unos 16 [s], se termina de romper el sensor obteniendo una señal de $2.2 \mu\text{V}$, tal como se puede ver en la Figura 5.18. Después de esto, sucede algo bastante particular (considerando los experimentos anteriores), donde electrodo superior no se termina de romper junto al piezoeléctrico, sino, lo hace bastante después como queda demostrado en las Figura 5.19 y Figura 5.21. Por último, se termina el experimento con el rompimiento de la probeta, resultando en una respuesta de hasta 0.2 mV , como queda plasmado en la Figura 5.20.



Figura 5.21. Sensor luego de la ruptura, notar que aún no se separa totalmente el electrodo.

Comparando este experimento con el anterior, se puede destacar lo siguiente:

- ▶ En el experimento 3, el comienzo de la ruptura del sensor fue detectado a los 91 [s] de haber comenzada la experiencia. Considerando que todo el ensayo duro 195 [s], implica que la alarma mas temprana por la aparición de una grieta fue posible a un 46.7 % del tiempo total.
- ▶ En el experimento 4, el comienzo de la ruptura del sensor fue detectado a los 152 [s] de haber comenzada la experiencia. Considerando que todo el ensayo duro 436 [s], implica que la alarma mas temprana por la aparición de una grieta fue posible a un 34.8 % del tiempo total.

En base a lo anterior, se puede comprobar la hipótesis del experimento como acertada. A medida que un sensor piezoeléctrico sea más delgado, este podrá detectar una grieta de manera más oportuna.

5.1.5 Respuesta a la fatiga: 2 canales

Siguiendo la idea original presentada al final del estado del arte, la cual consiste en reproducir la experiencia planteada por Zhang [29] pero utilizando un material piezoeléctrico libre de plomo (BT). Brevemente, este ensayo compara la medición en ambos extremos (dos canales) de un mismo sensor. Ambas mediciones deberían ser iguales siempre y cuando el piezoeléctrico este intacto, pero a medida que este se rompa, la señal de cada entrada debería empezar a ser distinta de una a otra, tal como lo indica la Figura 3.10. En las Figura 5.22 y Figura 5.23 se pueden ver toda la experiencia en los canales 1 y 2, respectivamente.

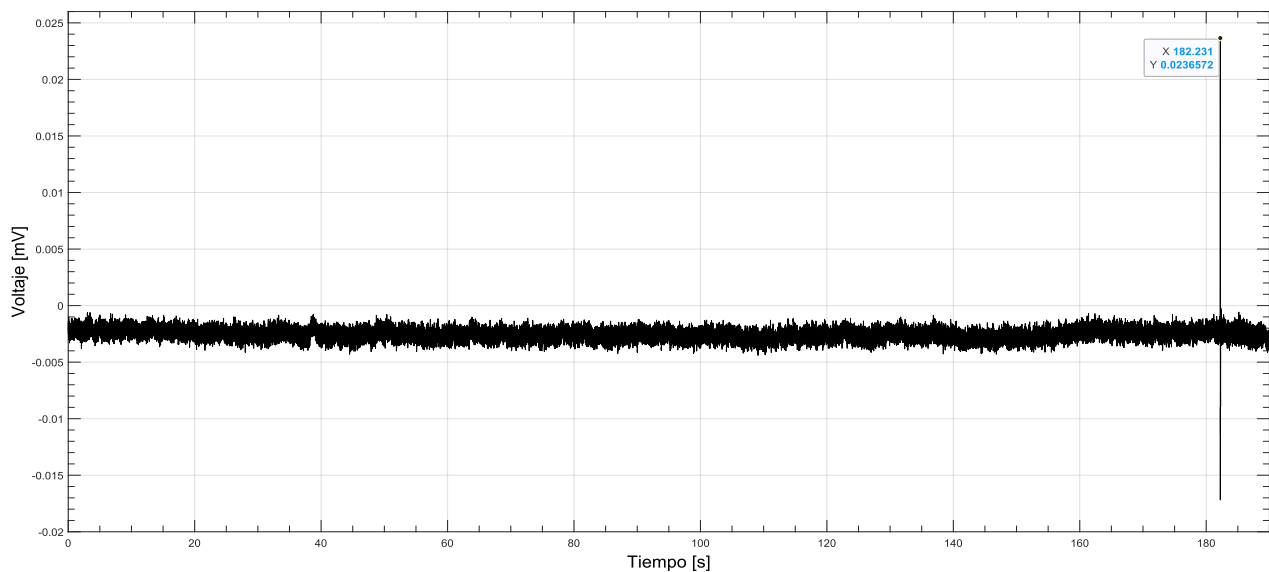


Figura 5.22. Señal completa del canal 1.

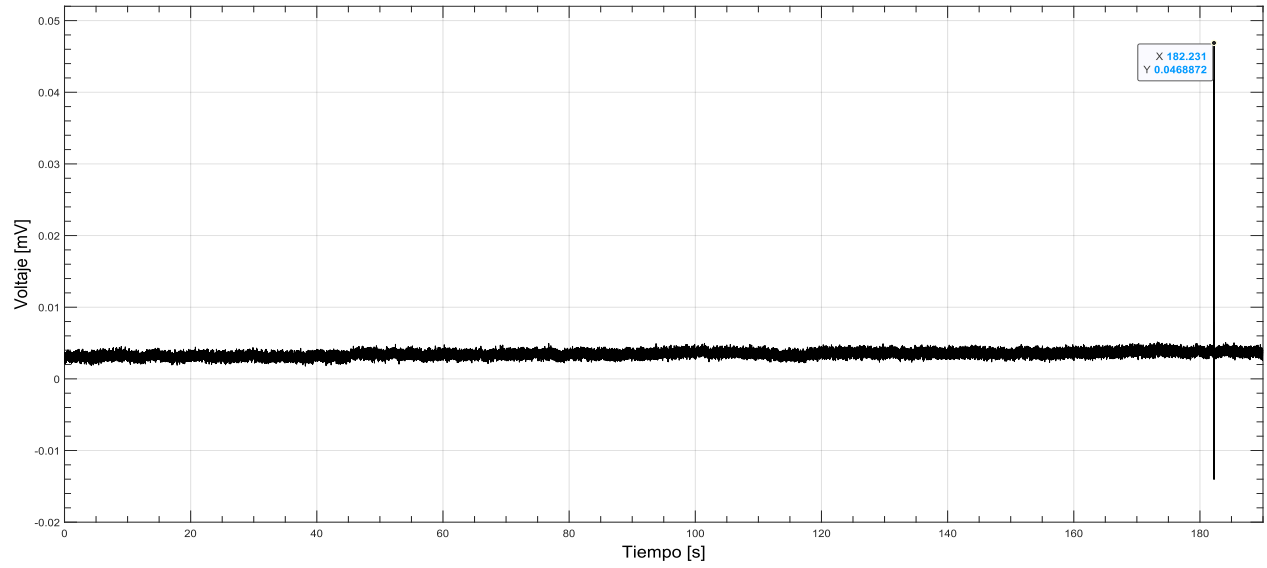


Figura 5.23. Señal completa del canal 2.

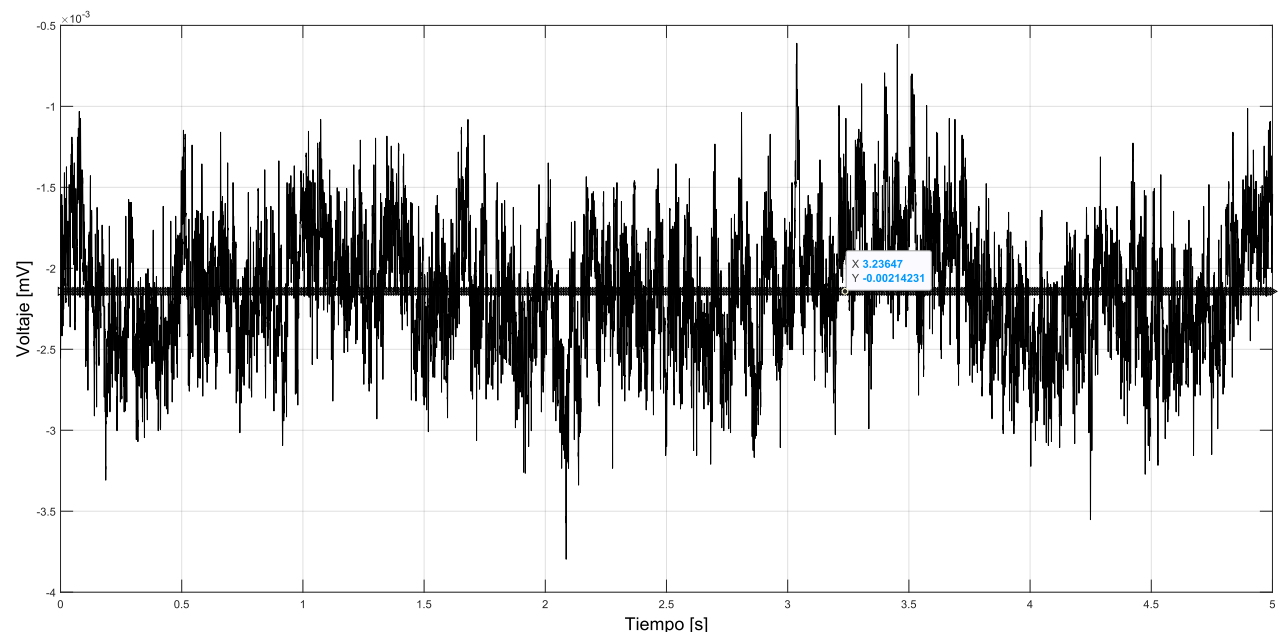


Figura 5.24. Señal del canal 1 con sistema estacionario.

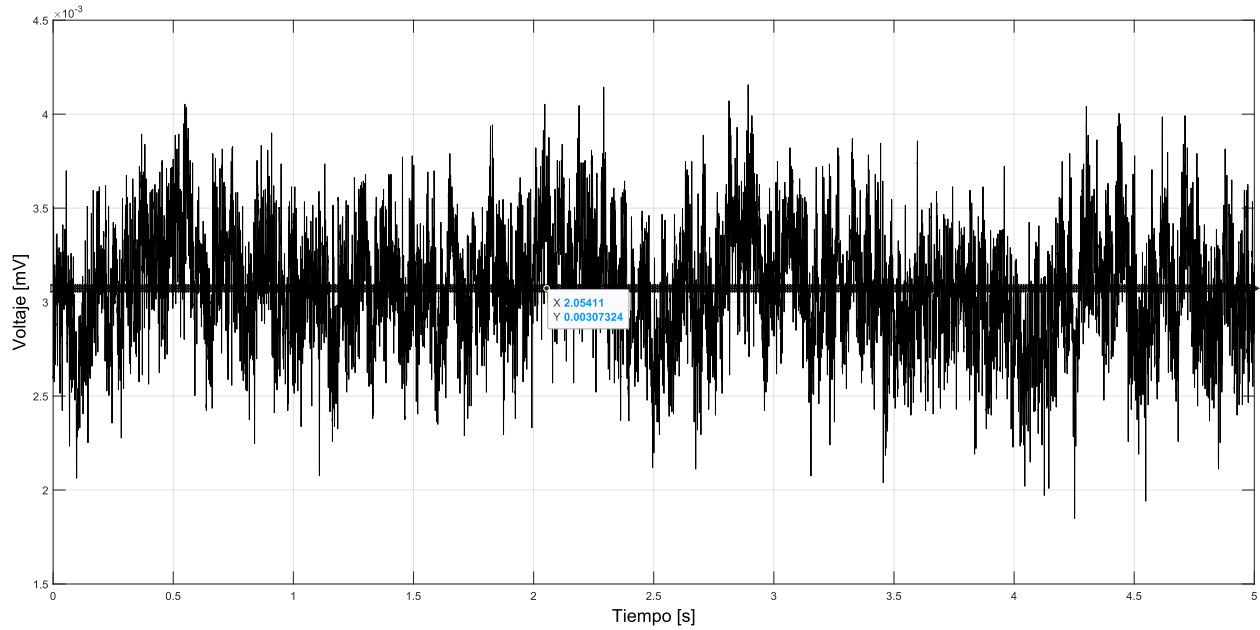


Figura 5.25. Señal del canal 2 con sistema estacionario.

Analizando las señales de ambos canales en estado estacionario, como se puede ver en las Figura 5.24 y Figura 5.25, se puede concluir de inmediato que las señales no son iguales. Esto a pesar de que la prueba aun no empieza, no hay grieta, por lo que deberían medir lo mismo. De todas formas, se expondrá las señales para los eventos vistos en los experimentos previos.

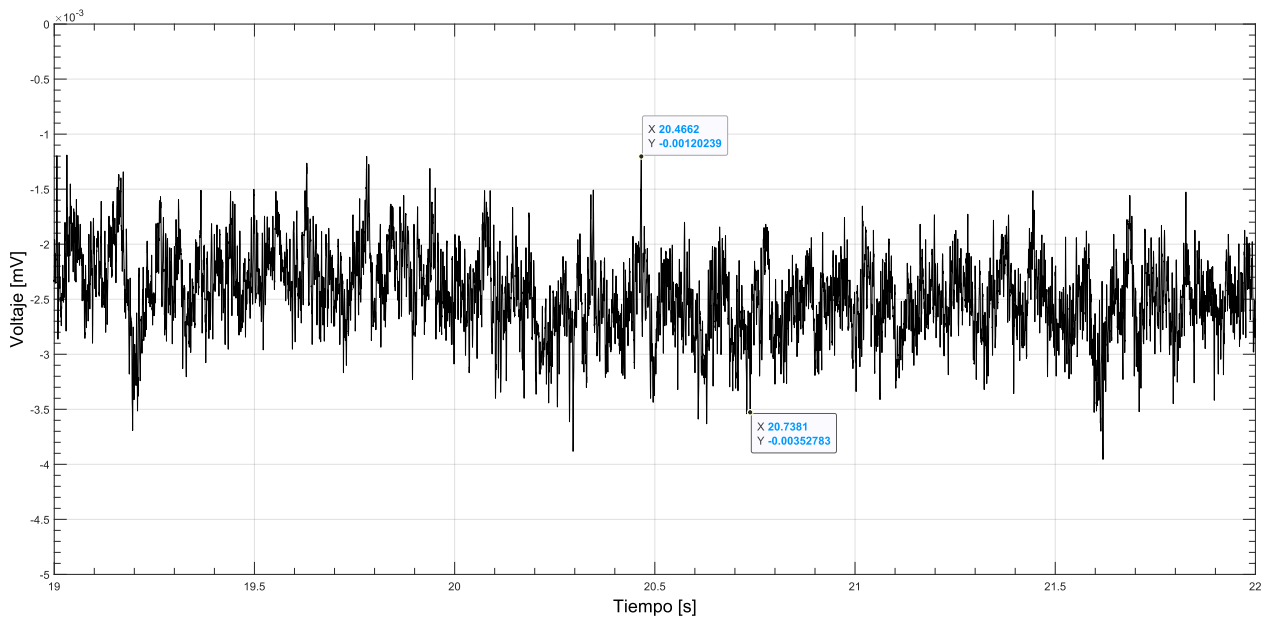


Figura 5.26. Señal al inicio de la ruptura del sensor, canal 1.

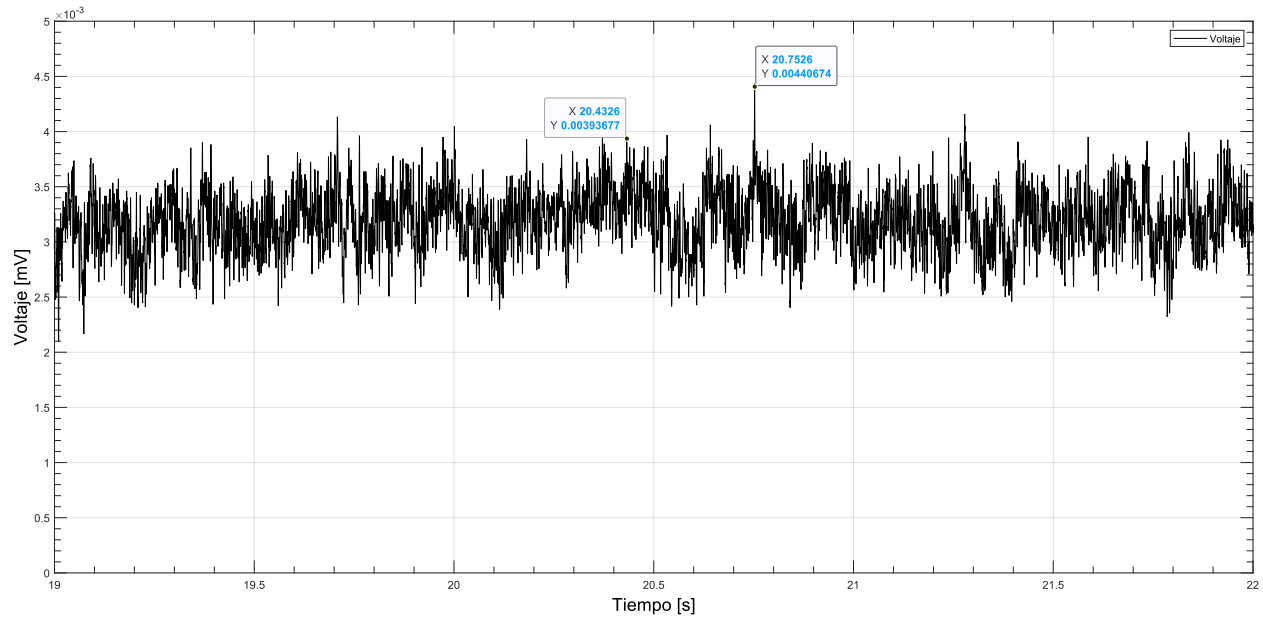


Figura 5.27. Señal al inicio de la ruptura del sensor, canal 2.

Correlacionando el tiempo del video con los gráficos presentados en las Figura 5.26 y Figura 5.27, el inicio de la grieta en el sensor es un poco antes de los 20.5 [s], en ambos canales es difícil identificar la grieta alrededor de momento ya que se tienen señales muy cercanas al ruido. De todas formas, si se toma un momento determinado como el de la primera marca del canal 1, y se comparan la amplitud de esta con su par del canal 2 (para el mismo tiempo), se puede observar que las señales siguen siendo bastante distintas.

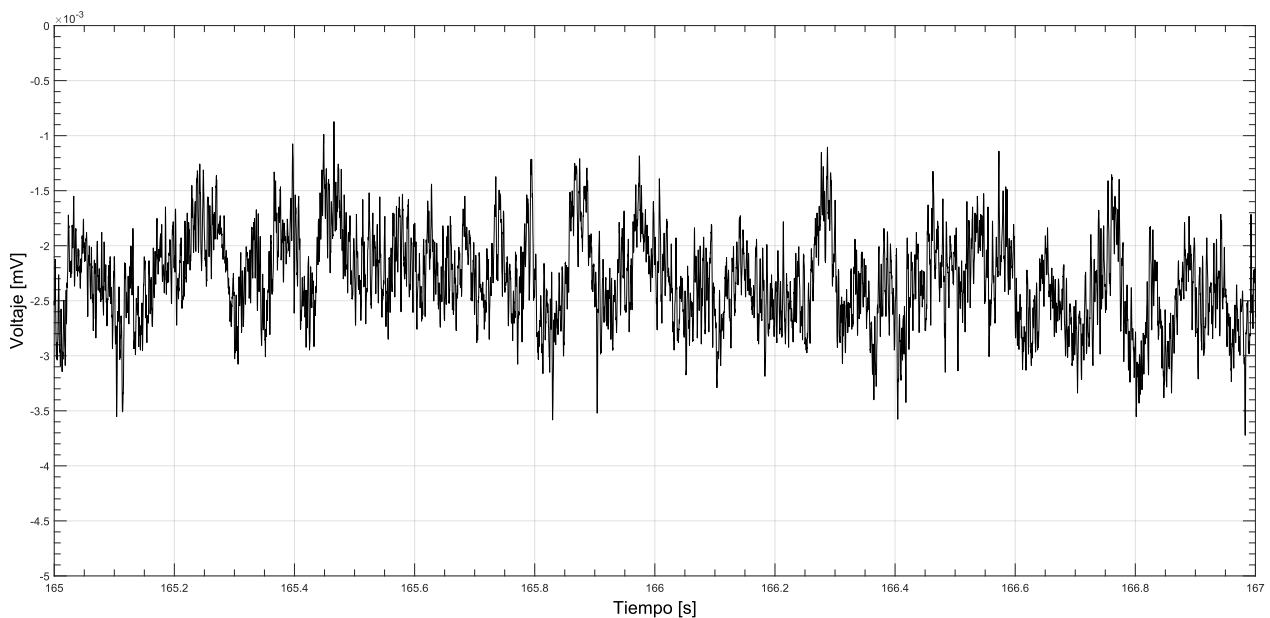


Figura 5.28. Señal al término de la ruptura del sensor, canal 1.

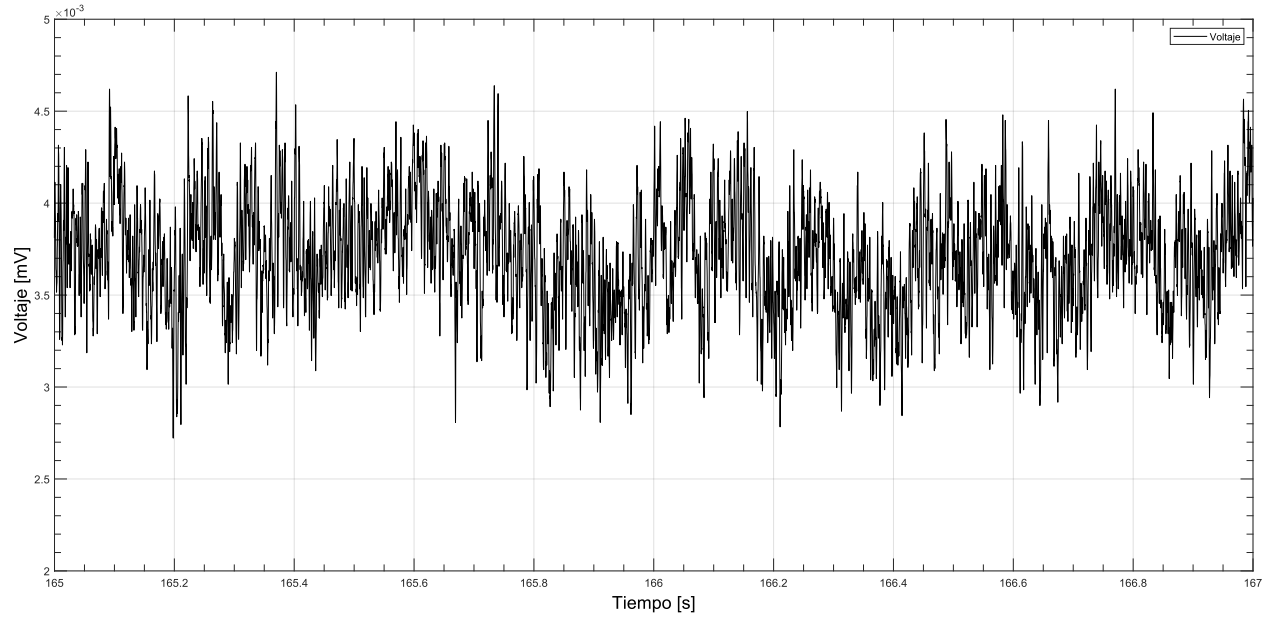


Figura 5.29. Señal al término de la ruptura del sensor, canal 2.

Análogo al caso anterior, el video informa del término de la ruptura del sensor a los 166 [s], pero al analizar las señales en ese tiempo para ambos canales, sus amplitudes no sobresalen del ruido. Esto está plasmado en las Figura 5.28 y Figura 5.29. Por otro lado, la diferencia de amplitudes para ese tiempo era lo esperado según el autor.

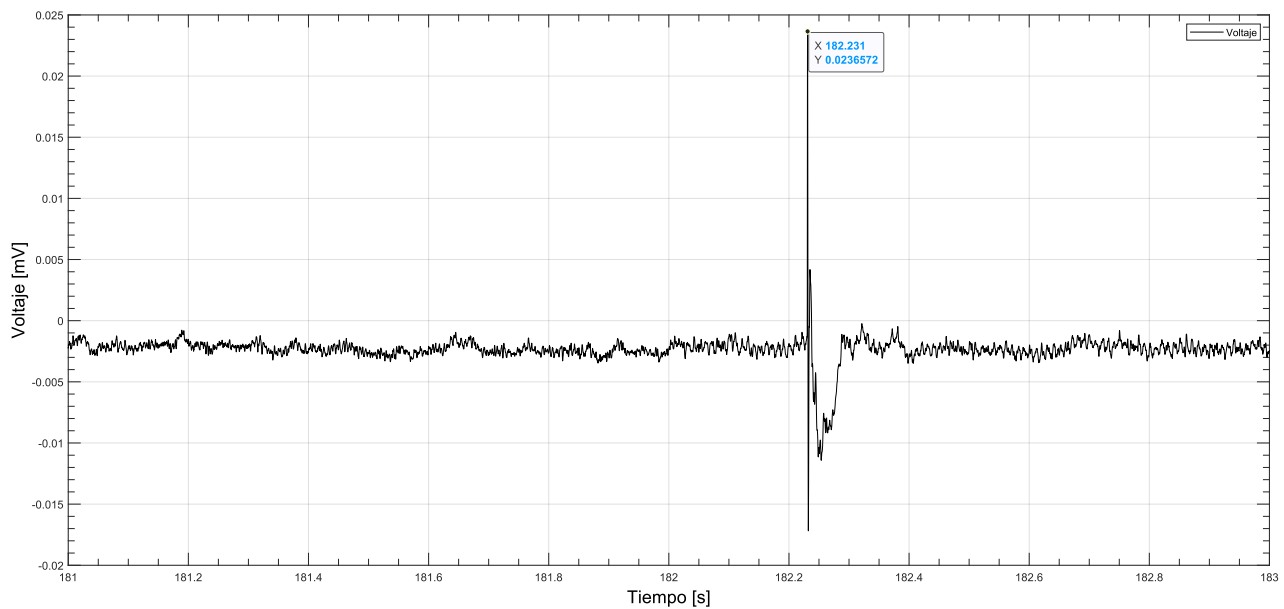


Figura 5.30. Señal al momento de la ruptura de la probeta, canal 1.

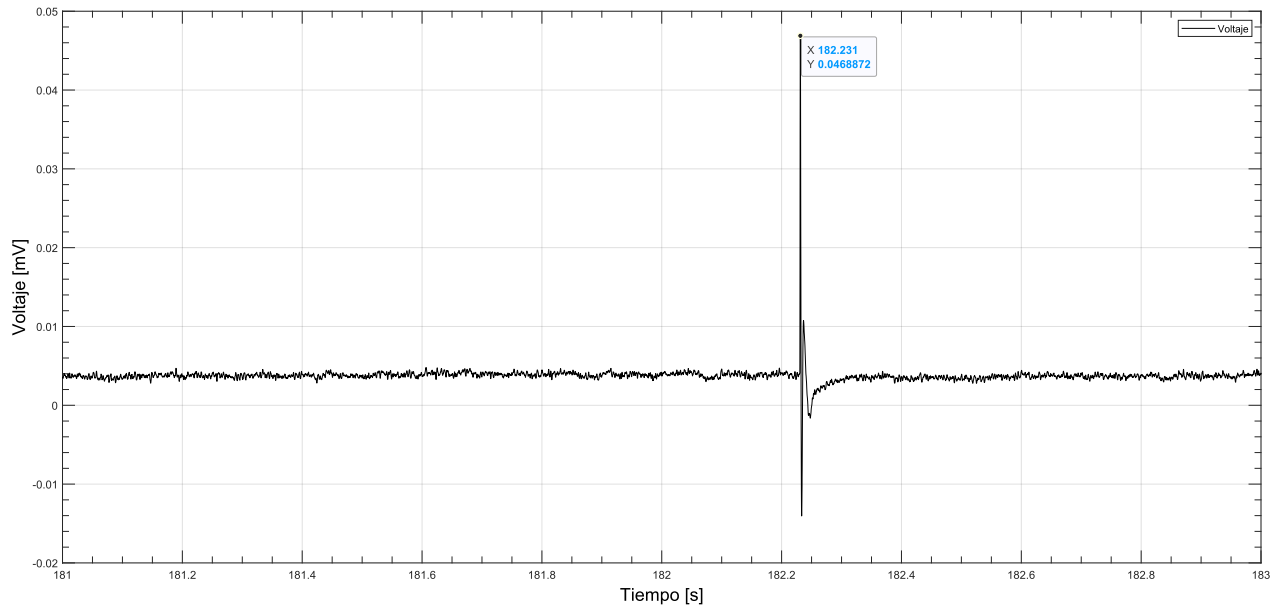


Figura 5.31. Señal al momento de la ruptura de la probeta, canal 2.

Finalmente, la única señal firme y que concuerda con el tiempo en ambos canales fue al momento final de la ruptura de la probeta. Según las Figura 5.30 y Figura 5.31, la amplitud de la señal del canal 2 casi dobla a la del canal 1, marcando 44 $[\mu\text{V}]$ y 20 $[\mu\text{V}]$ respectivamente.

Considerando todo lo anterior, se puede comprobar la hipótesis de este experimento como incorrecta. Las causas de que pudieron producir este desenlace son:

- ▶ Cada canal, y su respectivo cableado desde y hacia su par de electrodos, puede estar sometido a un ruido electrónico relativamente distinto de un canal a otro.
- ▶ El equipamiento y/o filtros utilizados no eran los indicados.
- ▶ El autor utilizó PZT en su experiencia, este material tiene un coeficiente piezoeléctrico más elevado que el BT usado en este proyecto. Esto implica que el autor tuvo un material de mayor sensibilidad y señal a su disposición, en efecto, más distintivo al ruido electrónico.

5.2 Resultados de sensores piezorresistivos

5.2.1 Respuesta a la tracción

Tal como se hizo en los experimentos con el sensor piezoeléctrico, se grabaron los ensayos con tal de correlacionar los momentos del video con los datos recopilados. Se realizaron tres ensayos con tres probetas distintas, los que se pueden ver en las Figura 5.32, Figura 5.33 y Figura 5.34. Por otro lado, se utilizará la probeta 3 como referencia, debido a que se visualizó de mejor forma cada etapa del experimento, en comparación a los otros especímenes. Se analizarán estas etapas a continuación.

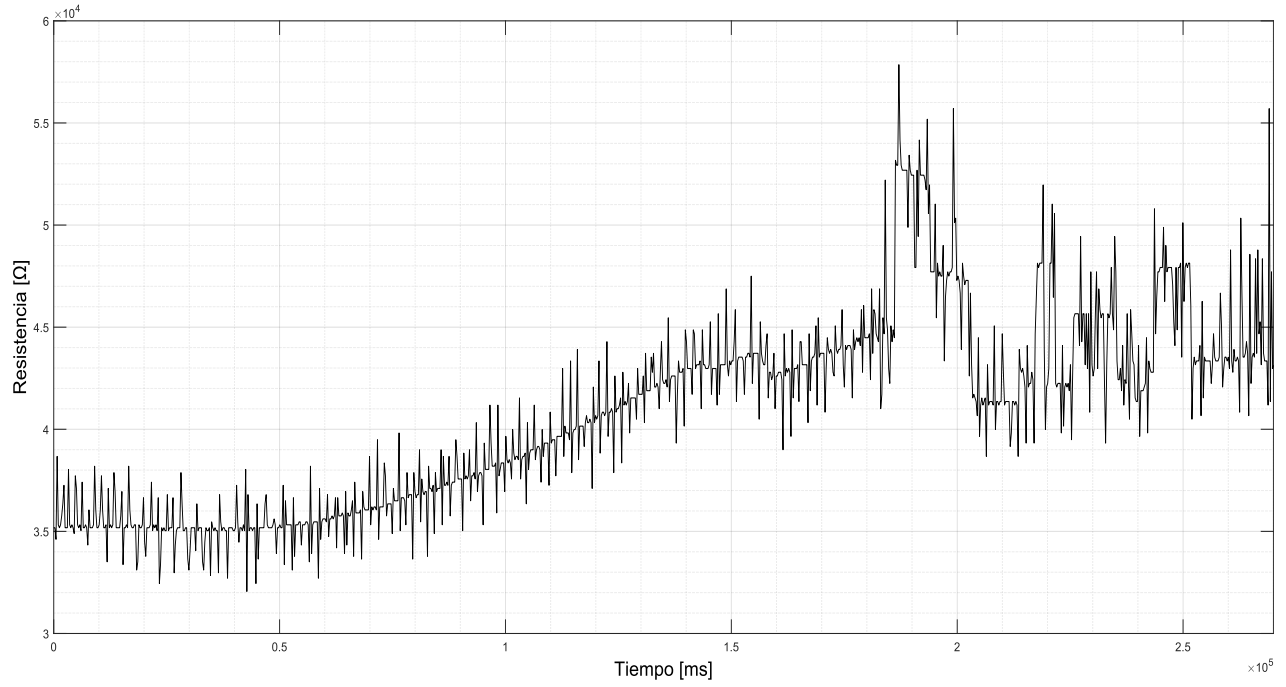


Figura 5.32. Respuesta de la probeta 1.

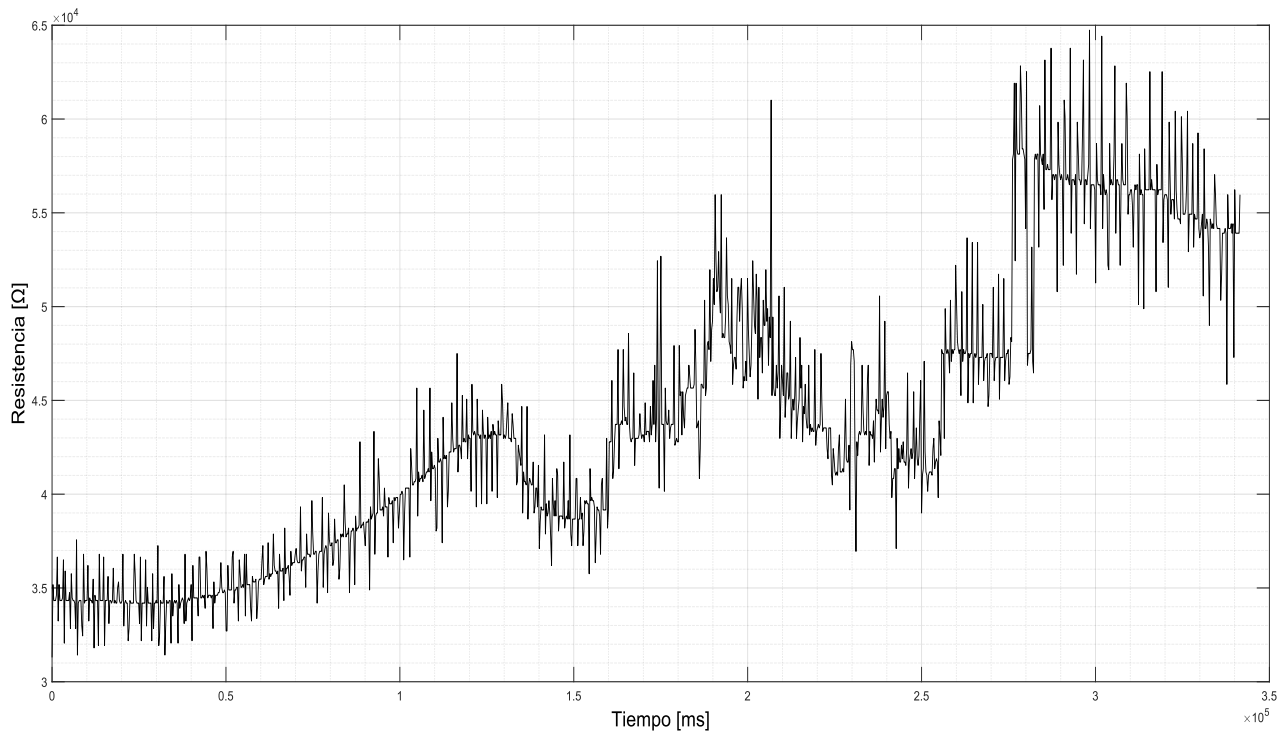


Figura 5.33. Respuesta de la probeta 2.

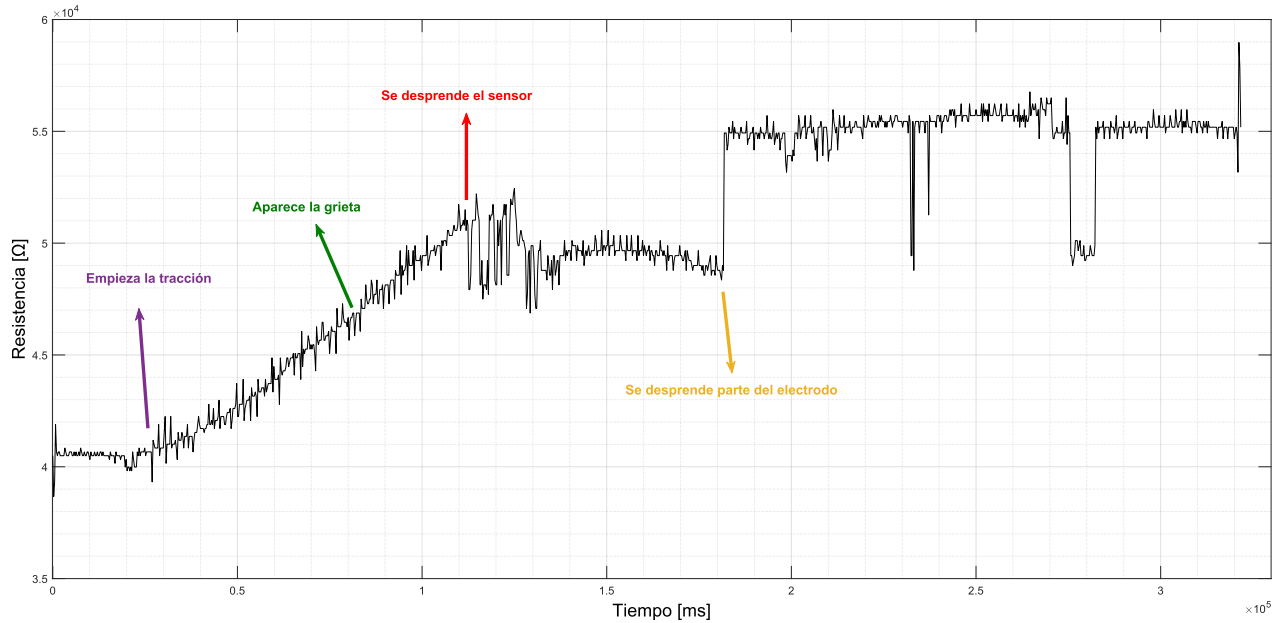


Figura 5.34. Respuesta de la probeta 3.

En la Figura 5.34 se puede observar cada etapa que caracterizaron estos ensayos. En las probetas 1 y 3 se puede ver un aumento lineal de la resistencia en los primeros 100 [s] de haber comenzado la tracción, mientras que para la probeta 2 es similar, pero a un periodo reducido a 80 [s]. Por otro lado, la grieta apareció en todos los casos en el periodo de crecimiento lineal del valor de la resistencia eléctrica, y a su vez, se pudo observar que este evento sucede entre el 60% a 67% de incremento por encima del valor inicial de la resistencia.

Cabe destacar que al estirarse el Velostat, este tiene dos opciones, cortarse o desprenderse de la estructura. La primera implicaría una medición de resistencia que tendería al infinito, mientras que la segunda, se obtendría una medición constante o errática, tal como se puede ver en los gráficos presentados.

Teniendo en cuenta lo anterior, se proponen dos métodos de detección de grietas en base a este material:

- ▶ Un sistema de control capaz de alertar cuando detecte el fin del crecimiento lineal de la resistencia.
- ▶ Un sistema de control capaz de alertar cuando se haya pasado un umbral de crecimiento de la resistencia según el valor inicial, en este caso, un 60% para ser precavido.

Luego del análisis anterior, se da como correcta la hipótesis presentada en la metodología para este experimento.

5.3 Costo económico del proyecto

En esta sección, se dará un breve recuento de los gastos económicos realizados en este proyecto. La Tabla 5.2 muestra el valor de los ítems más importantes de cada experimento. Se discriminaron los valores de las maquinas, instrumentos y programas utilizados debido a que ya se disponían de ellas.

Tabla 5.2. Costos asociados a cada tema.

Experimentos piezoeléctricos	
Material	Costo [CLP]
Titanato de Bario, 1 [Kg]	173,582 ³
Pintura de plata, 8 [gr]	90,000
Implementos electrónicos ⁴	22,350
Total	285,932
Experimentos piezorresistente	
Velostat, 30x30 [cm]	27,727
Arduino UNO	31,990
Implementos electrónicos	5,000
PLA, 1 [Kg]	12,390
Total	77,107

Si se quisiera seguir desarrollando el tema, y ya con un profesional, el costo promedio mensual para tener a un ingeniero civil mecánico es de 1,494,835 [CLP], según MiFuturo [44]. Si se le diera 6 meses de desarrollo, con los equipos y materiales disponibles, el costo del proyecto piezoeléctrico sería de 9,254,942 [CLP]. Mientras que, para el mismo periodo y condiciones, el costo del proyecto piezorresistente sería de 9,046,117 [CLP].

³ No se contó un cobro extra de FedEx relacionado a trámites con aduanas.

⁴ Cables, adaptadores, resistencias, pegamentos, etc...

5.4 ¿Sensor piezoeléctrico o piezorresistivo?

Luego de explorar dos rutas distintas para resolver el mismo problema, es razonable preguntarse, cual método es mejor, y de qué manera. En efecto, se dará brevemente un listado de hechos para cada método:

- ▶ El piezoeléctrico no necesita una fuente externa de poder para operar.
- ▶ El piezoeléctrico tiene una mayor sensibilidad a las deformaciones.
- ▶ El piezoeléctrico da respuesta bajo distintos estímulos, ya sea impacto, vibración o fatiga.
- ▶ El piezoeléctrico demostró a ser más flexible, en el sentido que tiene más caminos para detectar grietas (vía análisis acústico o de vibraciones).
- ▶ El piezorresistente puede adherirse a geometrías complejas sin necesidad de moldes o tratamientos especiales.
- ▶ El piezorresistente no requiere de filtros ni equipos especializados para operar.
- ▶ El piezorresistente está disponible en el mercado, no necesita ser fabricado para ser utilizable.
- ▶ El piezorresistente, para este proyecto, demostró ser más barato de implementar.

Para responder la pregunta de cuál es mejor, dependería en la aplicación o necesidad que se busca satisfacer, por ejemplo, resultaría más práctico y barato la opción piezorresistente para la detección de grietas en las probetas utilizadas. Por otro lado, si se quisiera medir grietas en un periodo largo de tiempo (meses o años), sería razonable utilizar la opción con material piezoeléctrico, donde ocupar un sensor lo más delgado posible ayudaría a obtener la señal más oportuna.

CAPÍTULO 6: Conclusiones

Esta memoria demostró que se pueden detectar grietas mediante sensores en base a material piezoeléctrico libre de plomo y piezorresistentes como el Velostat. Se pudo explorar y documentar un estado del arte sólido, lo cual permitió tomar conciencia en cómo se aplican estos materiales en la detección de grietas, y esto a su vez, permitió proponer unos sensores novedosos. Estos sensores mostraron una respuesta visible al ser sometidos a distintos estímulos (impacto, vibraciones y fatiga), siguiendo una metodología clara y sencilla de fabricación e implementación, de bajo costo, seguro de operar y amigable con el medioambiente. Por otro lado, el piezorresistivo demostró ser bastante simple y efectivo de operar, donde los materiales están disponibles económicamente en el mercado, y cuyo montaje no requirió de mayores esfuerzos. Finalmente, se logró caracterizar y documentar la respuesta de los sensores mediante pruebas de impacto, fatiga y vibraciones, en concordancia a la metodología propuesta. Tomando en cuenta todo lo anterior, se cumplió el objetivo general de este proyecto, y se satisficieron los objetivos específicos planteados.

Tal como se expuso en la introducción, el campo de SHM está en apogeo y solo se proyecta que siga creciendo a través del tiempo a medida que las estructuras críticas se vuelvan más antiguas y las estructuras inteligentes se vuelvan más populares y asequibles para el mercado. En la misma línea, el impacto que puede generar en la industria aeroespacial es inmenso, debido a que después de cada accidente de estos aparatos, suben las prestaciones y regulaciones de las aeronaves, y esto implica una necesidad de saber en tiempo real la aparición, evolución y criticidad de los efectos de fatiga sobre estructuras importantes, como lo son: wingbox, ventanas, tren de aterrizaje, entre otros. Con tal de dar al avión un mantenimiento oportuno, aumentando su disponibilidad y fiabilidad. En el campo espacial, sería una herramienta valiosa para monitorear el estado de módulos u otros componentes, debido a varios ciclos de expansión y contracción de estructuras expuesta al ambiente espacial, permitiendo tomar medidas oportunas de mitigación.

6.1 Trabajos futuros

En concordancia a lo dicho con anterioridad, resulta atractivo seguir desarrollando cualquiera de ambos temas, con tal de poder mejorar las prestaciones de cada uno, independizar y permitir la operación remota de los sensores e ir mejorando las técnicas de manufactura de ellas. En efecto, se recomienda indagar las siguientes líneas de investigativas con respecto al sensor piezoeléctrico:

- ▶ Eliminar el epoxi de la mezcla, y formar parches piezoeléctricos mediante sinterizado del material.
- ▶ Caracterizar, comparar y documentar la respuesta de un mismo sensor para distintos voltajes y tiempos de polarización. Ver cuánto se demora un sensor dado en despolarizar, y que condiciones lo provocarían.

- ▶ Fabricar pintura piezoeléctrica para eliminar el uso de moldes y prensas en los sensores.
- ▶ Para mejorar la sensibilidad de los sensores, sin tener que recurrir a piezoeléctricos en base a plomo, se recomienda utilizar Zirconato de titanato de Bario (BZT), Cuarzo, PVDF o combinación de estos.
- ▶ Caracterizar los sensores para un espectro más grande de frecuencias de vibraciones, después de todo, el campo de análisis de vibraciones es el fuerte de estos sensores.
- ▶ Explorar distintas formas de medir, ya sea con otros equipos o filtros, esto incluye programas o algoritmos que permitan una señal más clara. De la misma línea, desarrollar un DAQ más compacto para la implementación en estructuras más grandes, y generar un sensor remoto.

Por otro lado, se da las siguientes recomendaciones para seguir el trabajo en los sensores piezorresistentes:

- ▶ Pasar de detectar a medir grietas, se ha visto sistemas de balanzas en base Velostat que pueden medir cuanta fuerza, y en que parte del sensor, se está aplicando [45]. Sería interesante ese concepto en grietas.
- ▶ Implementar otros pegamentos o métodos de adhesión a los materiales, con tal que estos no interfieran con la deformación del Velostat.
- ▶ Mejorar el sistema de adquisición de datos, el Arduino por sí solo no permite exportar datos en tiempo real, y el programa Realterm no es eficiente ni cómodo de ocupar para la esta tarea.

Referencias

- [1] X. Xu *et al.*, “A systematic review of ultrasonic techniques for defects detection in construction and building materials,” Feb. 28, 2024, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.measurement.2024.114181.
- [2] GrandViewResearch, “Structural Health Monitoring Market Size, Share & Trends Analysis Report By Solution (Hardware, Software & Structural Health Monitoring Market Trends,” 2023. [Online]. Available: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/structural-health-monitoring-shm-market>
- [3] P. A. Withey, “FATIGUE FAILURE OF THE DE HAVILLAND COMET 1,” 1997.
- [4] R. Nijssen and E. Manrique, “Literature review of structural and non-structural wind turbine blade damage,” 2020. [Online]. Available: www.tno.nl
- [5] B. Nigar, “ANALYSIS OF CRACK INITIATION AND PROPAGATION IN SOLID ROCKET MOTOR NOZZLE THROATS A THESIS SUBMITTED TO THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES OF MIDDLE EAST TECHNICAL UNIVERSITY,” 2019.
- [6] R. Silvia, “DESARROLLO DE MATERIALES COMPUESTOS FLEXIBLES CERÁMICOS/POLÍMEROS FERROELÉCTRICOS PARA EL COSECHAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA,” 2020.
- [7] A. De la Rosa, “Paso a Paso los piezoelectricos generando,” *Centro Universitario México*, Feb. 2016.
- [8] A. H. Meitzler and H. F. Tiersten, “IEEE Standard on Piezoelectricity,” 1987. Accessed: Oct. 06, 2024. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=26560>
- [9] J. Sirohi’, I. Chopra’, A. Gessow, and R. Center, “Fundamental Understanding of Piezoelectric Strain Sensors,” 1999. [Online]. Available: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/>
- [10] S. McNamara, “Comprehensive Semiconductor Science and Technology,” *Semicond Sci Technol*, 2011.
- [11] C. R. Farrar and K. Worden, “An introduction to structural health monitoring,” *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 365, no. 1851, pp. 303–315, Feb. 2007, doi: 10.1098/rsta.2006.1928.
- [12] A. Enrico, D. Grosso, and A. E. Del Grosso, “Structural Health Monitoring: research and practice,” 2013. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/261119109>

- [13] H. Chen and Y. Ni, "Introduction to Structural Health Monitoring," in *Structural Health Monitoring of Large Civil Engineering Structures*, Wiley, 2018, pp. 1–14. doi: 10.1002/9781119166641.ch1.
- [14] V. Belloni, A. Sjölander, R. Ravanelli, M. Crespi, and A. Nascetti, "Crack Monitoring from Motion (CMfM): Crack detection and measurement using cameras with non-fixed positions," *Autom Constr*, vol. 156, Dec. 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.105072.
- [15] G. Świt, A. Krampikowska, and P. Tworzewski, "Non-Destructive Testing Methods for In Situ Crack Measurements and Morphology Analysis with a Focus on a Novel Approach to the Use of the Acoustic Emission Method," Dec. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/ma16237440.
- [16] W. L. Richards, E. Madaras, W. H. Prosser, and G. Studor, "NASA Applications of Structural Health Monitoring Technology," 2013.
- [17] R. Katam, V. D. K. Pasupuleti, and P. Kalapatapu, "A review on structural health monitoring: past to present," *Innovative Infrastructure Solutions*, vol. 8, no. 9, Sep. 2023, doi: 10.1007/s41062-023-01217-3.
- [18] F. Kosova, Ö. Altay, and H. Ö. Ünver, "Structural health monitoring in aviation: a comprehensive review and future directions for machine learning," 2024, *Taylor and Francis Ltd*. doi: 10.1080/10589759.2024.2350575.
- [19] M. C. Sekhar, E. Veena, N. S. Kumar, K. C. B. Naidu, A. Mallikarjuna, and D. B. Basha, "A Review on Piezoelectric Materials and Their Applications," Feb. 01, 2023, *John Wiley and Sons Inc*. doi: 10.1002/crat.202200130.
- [20] M. Ju *et al.*, "Piezoelectric Materials and Sensors for Structural Health Monitoring: Fundamental Aspects, Current Status, and Future Perspectives," Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/s23010543.
- [21] Y. H. Huh, J. I. Kim, J. H. Lee, S. G. Hong, and J. H. Park, "Application of PVDF film sensor to detect early damage in wind turbine blade components," in *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2011, pp. 3304–3309. doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.545.
- [22] X. Li, M. Kurata, and M. Nakashima, "Evaluating damage extent of fractured beams in steel moment-resisting frames using dynamic strain responses," *Earthq Eng Struct Dyn*, vol. 44, no. 4, pp. 563–581, Apr. 2015, doi: 10.1002/eqe.2536.
- [23] J. Sirohi and I. Chopra, "Fundamental understanding of piezoelectric strain sensors," *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 11, no. 4, pp. 246–257, Apr. 2000, doi: 10.1106/8BFB-GC8P-XQ47-YCQ0.
- [24] V. Giurgiutiu, A. Zagrai, and J. Bao, "EMBEDDED ACTIVE SENSORS FOR IN-SITU STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF AGING AIRCRAFT STRUCTURES," 2001. [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/252602636>

- [25] G. Song, H. Gu, Y. L. Mo, T. T. C. Hsu, and H. Dhonde, “Concrete structural health monitoring using embedded piezoceramic transducers,” *Smart Mater Struct*, vol. 16, no. 4, pp. 959–968, Aug. 2007, doi: 10.1088/0964-1726/16/4/003.
- [26] S. Egusa, N. Iwasawa, and † Takasaki, “Piezoelectric paints as one approach to smart structural materials with health-monitoring capabilities,” 1998.
- [27] D. H. Han and L. H. Kang, “Piezoelectric properties of paint sensor according to piezoelectric materials,” *Functional Composites and Structures*, vol. 2, no. 2, Jun. 2020, doi: 10.1088/2631-6331/ab90e1.
- [28] I. Payo and J. M. Hale, “Sensitivity analysis of piezoelectric paint sensors made up of PZT ceramic powder and water-based acrylic polymer,” *Sens Actuators A Phys*, vol. 168, no. 1, pp. 77–89, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.sna.2011.04.008.
- [29] Y. Zhang, “In situ fatigue crack detection using piezoelectric paint sensor,” *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 17, no. 10, pp. 843–852, Oct. 2006, doi: 10.1177/1045389X06059957.
- [30] Y. Zhang, J. Zeng, Y. Wang, and G. Jiang, “Flexible Three-Dimensional Force Tactile Sensor Based on Velostat Piezoresistive Films,” *Micromachines (Basel)*, vol. 15, no. 4, Apr. 2024, doi: 10.3390/mi15040486.
- [31] M. Kciuk, Z. Kowalik, G. Lo Sciuto, S. Sławski, and S. Mastrostefano, “Intelligent Medical Velostat Pressure Sensor Mat Based on Artificial Neural Network and Arduino Embedded System,” *Applied System Innovation*, vol. 6, no. 5, Oct. 2023, doi: 10.3390/asi6050084.
- [32] M. Hopkins, R. Vaidyanathan, and A. H. McGregor, “Examination of the Performance Characteristics of Velostat as an In-Socket Pressure Sensor,” *IEEE Sens J*, vol. 20, no. 13, pp. 6992–7000, Jul. 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2978431.
- [33] R. Moazzami, C. Hu, and W. H. Shepherd, “Electrical Characteristics of Ferroelectric PZT Thin Films for DRAM Applications,” 1992.
- [34] A. Von Hippel, “Ferroelectricity, Domain Structure, and Phase Transitions of Barium Titanate,” Jul. 1950. doi: 10.1103/revmodphys.22.221.
- [35] CDH, “MATERIAL SAFETY DATA SHEET SDS/MSDS: Barium Titanate.”
- [36] H. C. Polonini *et al.*, “Ecotoxicological studies of micro- and nanosized barium titanate on aquatic photosynthetic microorganisms,” *Aquatic Toxicology*, vol. 154, pp. 58–70, 2014, doi: 10.1016/j.aquatox.2014.05.005.
- [37] A. J. . Moulson and J. M. . Herbert, *Electroceramics : materials, properties, applications*. Wiley, 2003.
- [38] T. Abe, “ENCYCLOPEDIA OF ELECTROCHEMICAL POWER SOURCES,” 2009.

- [39] A. Guevara-Morales and A. C. Taylor, “Mechanical and dielectric properties of epoxy-clay nanocomposites,” *J Mater Sci*, vol. 49, no. 4, pp. 1574–1584, Feb. 2014, doi: 10.1007/s10853-013-7840-5.
- [40] Z. Chlup *et al.*, “Temperature effect on elastic and fracture behaviour of lead-free piezoceramic BaTiO₃,” *J Eur Ceram Soc*, vol. 43, no. 4, pp. 1509–1522, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.jeurceramsoc.2022.11.030.
- [41] G. Barrientos, “Análisis de Fallas en Equipos Industriales”.
- [42] ASTM, “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates,” *ASTM*, 2022, doi: 10.1520/E0647-22.
- [43] S. Campbell, “How to Make an Arduino Ohm Meter.”
- [44] MineDuc, “Estadísticas: Ingeniería Civil Mecánica.”
- [45] Sensing Tex, *Pressure Mat Dev Kit*, (2021).

Anexo A: Respuesta de los sensores piezoeléctricos

Se puede observar la respuesta la vibración de frecuencia 19 [Hz] a 0.78 [g] en la Figura A.1:

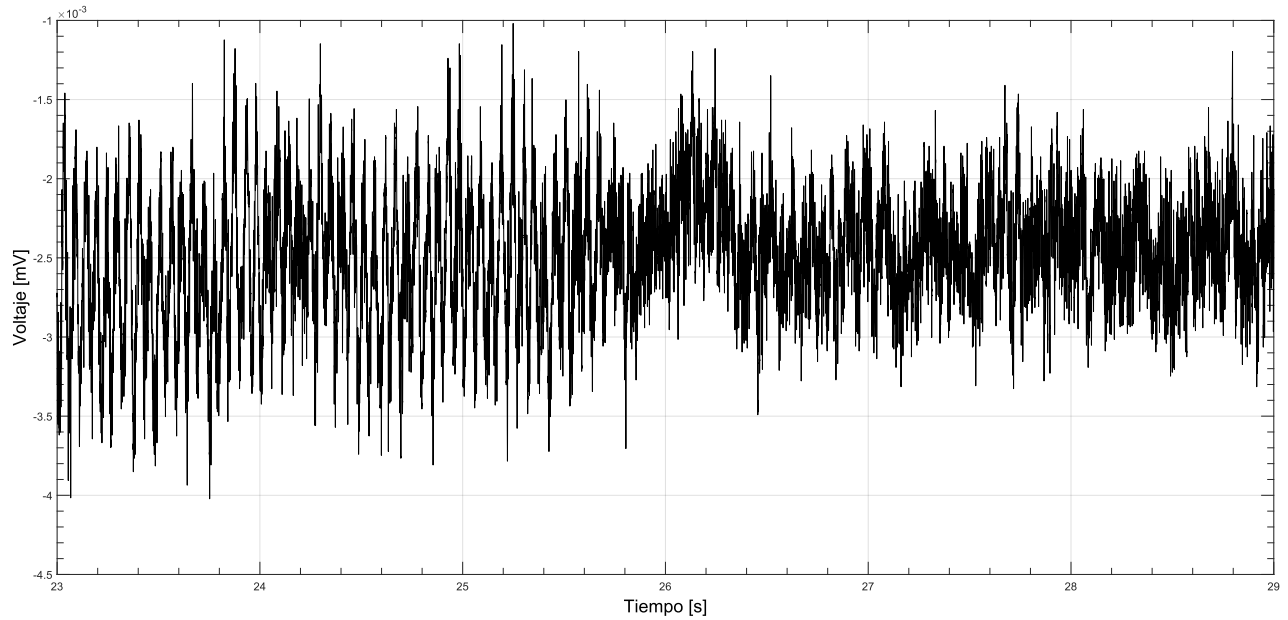


Figura A.1: Respuesta del sensor.

Por otro lado, desde el experimento 3, se agregan las respuestas de las probetas 1 y 2, Figura A.2 y Figura A.3, respectivamente.

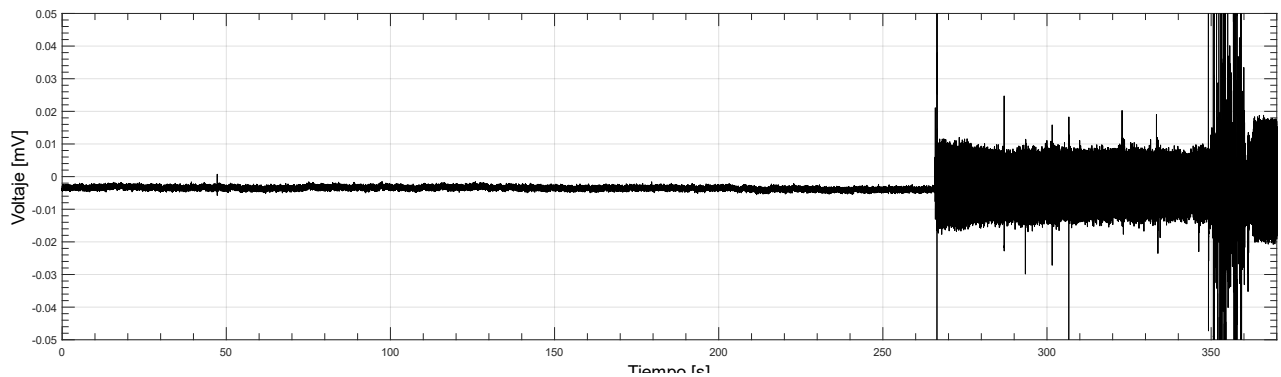


Figura A.2: Respuesta durante todo el experimento, probeta 1.

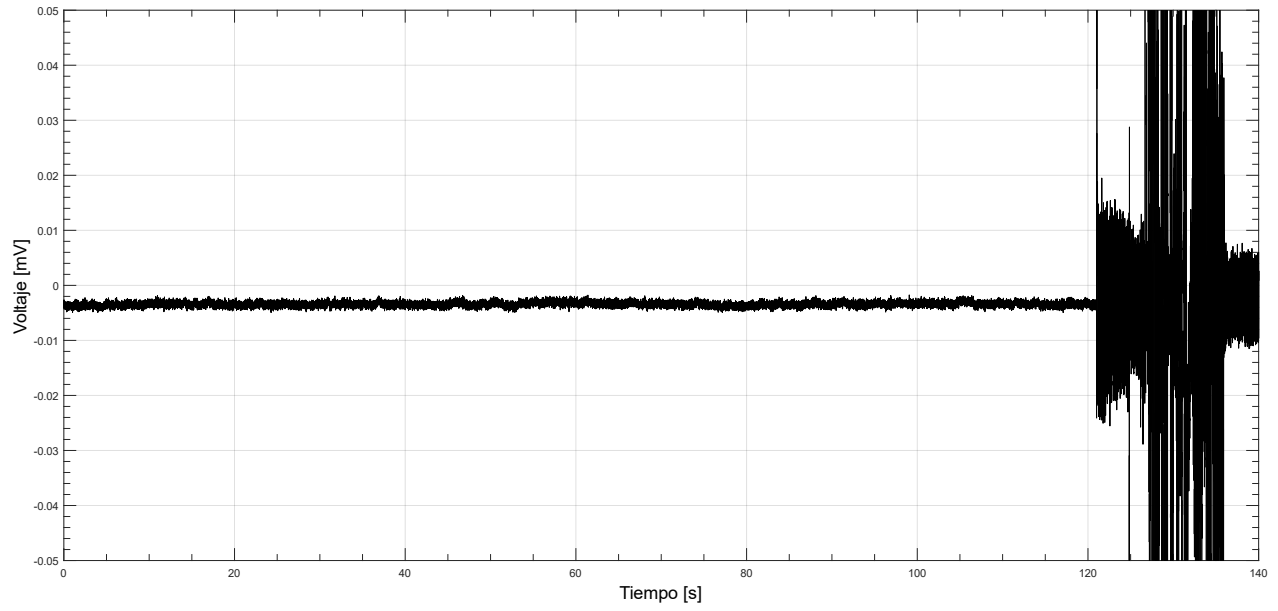


Figura A.3: Respuesta durante todo el experimento, probeta 2.