



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Cálculo de las propiedades
dinámicas de una masa líquida
sintonizada empleando técnicas de
cámara de alta velocidad y sensores
de medición del tirante de agua**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Civil

P R E S E N T A

Alexis Ruiz Santiago

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Adrián Pozos Estrada



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado CALCULO DE LAS PROPIEDADES DINAMICAS DE UNA MASA LIQUIDA SINTONIZADA EMPLEANDO TECNICAS DE CAMARA DE ALTA VELOCIDAD Y SENSORES DE MEDICION DEL TIRANTE DE AGUA que presenté para obtener el título de INGENIERO CIVIL es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

ALEXIS RUIZ SANTIAGO
Número de cuenta: 317176007

JURADO ASIGNADO

Presidente	Dr. Gerardo Rodríguez Gutiérrez
Secretario	Dr. Adrián Pozos Estrada
1 ^{er} Vocal	Dr. Armando Rafael Hermosillo Arteaga
2 ^{do} Vocal	M.I. Rodrigo Takashi Sepúlveda Hirose
3 ^{er} Vocal	Dr. Cesar Paniagua Lovera

Lugar donde se realizó la tesis: **Instituto de Ingeniería de la UNAM.**

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Adrián Pozos Estrada

Firma

A mis padres, Bertha y Gustavo,

este trabajo se los dedico como parte de todo lo que me han dado, con amor y agradecimiento para ustedes.

A mi hermano Oscar,

gracias por todos los momentos que hemos vivido juntos.

A mi hermana Estefany,

por llenar mi vida y corazón de alegría y felicidad.

A Valeria,

por acompañarme; por tu apoyo y cariño cuando más lo necesito.

A mis amigos Martin, Sergio y Eder,

por todas las anécdotas, las risas y su compañía.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México, una de las mejores universidades del mundo, por todo lo que me ha dado desde que soy parte de ella: estudio y preparación en bachillerato y licenciatura, recursos para la realización de este trabajo, una estancia de investigación, compañeros y amigos que conocí en el camino.

Mi enorme agradecimiento y reconocimiento al Dr. Adrián Pozos Estrada, por su tiempo, conocimiento y consejos que me brindo, gracias por apoyarme, orientarme y por su asesoramiento en el proceso de la realización de este trabajo.

Gracias a todos y cada uno de los integrantes del Grupo de Ingeniería de Viento (GIV) del Instituto de Ingeniería, por su ayuda al realizar las pruebas experimentales, así como su tiempo, conocimiento y las pláticas amenas en el cubículo; quiero agradecer especialmente al M.I. Rigoberto Nava González por la ayuda que me brindo, todo su conocimiento, su paciencia y sus consejos.

Agradezco a todos mis amigos, gracias por los momentos vividos, por esas pláticas y cada risa.

A todos mis profesores que fueron parte fundamental de mi desarrollo como ingeniero.

Gracias a todas aquellas personas que a lo largo de mi vida han dejado una enseñanza en mí.

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IN103422

RESUMEN

Existen dispositivos para el control de las vibraciones excesivas en estructuras, un ejemplo de ello son los amortiguadores de masa sólida o líquida sintonizada, que aumentan el amortiguamiento de la estructura principal para reducir la respuesta cuando la estructura es sometida a cargas dinámicas. Para este trabajo se llevaron a cabo numerosas pruebas de vibración forzada a un tanque con pantallas disipadoras a escala 1:10, que funciona como un amortiguador de masa líquida sintonizada.

Las pruebas realizadas indicaron que la eficiencia de 2 métodos empleados para calcular las propiedades dinámicas del amortiguador líquido sintonizado es adecuada. Los métodos incluyeron el empleo de sensores medidores de tirante de agua distribuidos dentro del tanque en ubicaciones de interés y una cámara de video de alta velocidad ubicada en un punto predefinido para grabar la variación del tirante de agua. Los resultados de los métodos de prueba se compararon de manera gráfica y numérica con la finalidad de evaluar el error entre los métodos empleados. Asimismo, se pudieron comparar los valores experimentales con los teóricos.

ABSTRACT

There are devices for controlling excessive vibrations in structures, an example of which are tuned solid or liquid mass dampers, which increase the damping of the main structure to reduce its response when subjected to dynamic loads. For this work, numerous forced vibration tests were carried out on a tank with dissipative screens at a scale of 1:10, which functions as a tuned liquid mass damper.

The tests indicated that the efficiency of two methods used to calculate the dynamic properties of the tuned liquid damper is adequate. The methods included the use of water depth measuring sensors distributed within the tank at locations of interest and a high-speed video camera positioned at a predefined point to record water level variations. The results of the test methods were compared graphically and numerically in order to evaluate the error between the methods used. Likewise, the experimental values could be compared with the theoretical ones.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT.....	iv
INTRODUCCIÓN.....	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
OBJETIVOS.....	2
ALCANCES Y LIMITACIONES	2
CONTENIDO DE LA TESIS.....	3
CAPÍTULO 1 EMPLEO DE MASAS LÍQUIDAS SINTONIZADAS EN ESTRUCTURAS	4
1.1 DISPOSITIVOS DE CONTROL DE VIBRACIONES.....	4
1.2 AMORTIGUADORES PASIVOS	5
1.2.1 AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA (AMS).....	5
1.2.2 AMORTIGUADORES DE LÍQUIDO SINTONIZADO (ALS).....	6
1.2.2.1 ALS ADICIONADO CON PANTALLAS DISIPADORAS.....	9
1.2.2.2 MÚLTIPLES ALS.....	11
CAPÍTULO 2 ARREGLO EXPERIMENTAL Y DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE UN AMORTIGUADOR LÍQUIDO SINTONIZADO.....	12
2.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO	12
2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO	12
2.1.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL DEL AMORTIGUADOR LÍQUIDO SINTONIZADO	13
2.2 DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO	16
2.3 METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS.....	21
CAPÍTULO 3 RESULTADOS EXPERIMENTALES.....	29
3.1 SENSORES MEDIDORES DE TIRANTE DE AGUA	29
3.2 CÁMARA PHANTOM.....	38

CAPÍTULO 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	45
4.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS	45
4.2 COMPARACIÓN ENTRE LOS METODOS DE PRUEBA	49
4.3 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PRUEBA CON EL MODELO TEÓRICO... 54	
4.3.1 CÁMARA PHANTOM Y MODELO TEÓRICO	55
4.3.2 SENSORES MEDIDORES DE TIRANTE DE AGUA Y MODELO TEÓRICO.....	59
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
BIBLIOGRAFÍA	67
GLOSARIO DE TÉRMINOS	69
ANEXO A.....	71
ANEXO B.....	161

INTRODUCCIÓN

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las principales edificaciones sensibles al viento son los edificios altos, los cuales van en aumento con el paso del tiempo, debido a la alta demanda de espacios para uso habitacional por causa del aumento de la población; por lo anterior, los edificios son cada vez más altos y a su vez, más esbeltos, tanto en México como en el mundo. Por lo tanto, resulta importante que las futuras edificaciones, y las ya construidas, continúen funcionando de manera segura y eficaz, esto incluye que los ocupantes se sientan cómodos y seguros. Asimismo, se sabe que los edificios altos tienden a ser estructuras con menor rigidez y amortiguamiento, además, son más vulnerables ante vientos extremos y a sus efectos dinámicos (Bergolla, 2021), ya que la velocidad del viento suele crecer con la altura sobre el terreno (Meseguer et al., 2013), lo que provoca que mientras mayor altura posea un edificio, sea más susceptible a presentar problemas por los efectos del viento.

Asimismo, resulta importante realizar un correcto diseño por viento de los edificios, ya que existen numerosos ejemplos en donde han llegado a fallar distintas partes no estructurales de la edificación, debido a fuertes vientos. Cada estructura debe diseñarse para las presiones tanto positivas (empujes) como negativas (succiones), de acuerdo con la normativa vigente de cada región, recordando que la incidencia del viento depende de las propiedades dinámicas de la estructura, la altura del edificio, la rugosidad del terreno y de las velocidades del propio viento.

Existen diversas opciones de solución para mitigar los efectos del viento en una estructura. Dichas medidas incluyen desde cambiar la geometría del sistema estructural, incrementar su rigidez lateral o incluir sistemas de control que permitan reducir la respuesta del sistema estructural (Santos et al., 2021). De acuerdo con la Norma Técnica Complementaria para Diseño por viento (NTC-Viento, 2023) de la Ciudad de México, en el apartado 8. *Estados límite de servicio por efectos del viento*, se establecen distorsiones, desplazamientos y aceleraciones permisibles, en la altura máxima de los edificios; esto debido a que, si se sobrepasa un determinado intervalo de valores, se puede ver interrumpido el confort de los ocupantes, puesto que hay altas probabilidades de que existan vibraciones que sean perceptibles y puedan ocasionar molestias. Recordando que la naturaleza de la vibración depende de las propiedades dinámicas de la estructura y de los tipos de excitación (Pozos Estrada et al., 2010). Es por ello que, en la normativa antes mencionada se contempla y se permite el uso de dispositivos de amortiguamiento auxiliar para mitigar las acciones del viento; como lo son las masas sólidas y líquidas sintonizadas o resonantes. Estas tecnologías son nuevas e innovadoras para varios países del mundo incluyendo México, aunque en otros países ya se han implementado

desde hace décadas. Cabe destacar que, para estudiar el comportamiento de estos dispositivos, ha sido esencial desarrollar modelos que capturen de manera precisa su impacto en las edificaciones.

OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es identificar las propiedades dinámicas de una masa líquida sintonizada, empleando diferentes técnicas, como lo son: cámara de alta velocidad y sensores de medición del tirante de agua; posteriormente comparar dichas propiedades con las teóricas, lo anterior con la finalidad de identificar tanto la eficacia de dicho dispositivo como la eficacia de los métodos utilizados en las pruebas.

Para cumplir con el objetivo antes descrito se necesita cumplir con los siguientes objetivos específicos:

- Poner en marcha el dispositivo a escala del amortiguador de masa líquida sintonizada (ALS) previamente diseñado para un caso de estudio en particular
- Realizar pruebas de vibración forzada al dispositivo, excitándolo de manera aleatoria
- Usar el programa especializado *tracker* para identificar el comportamiento del tirante de agua del dispositivo, empleando los videos grabados con cámara de alta velocidad (*phantom*)
- Usar el programa *Akamina* para identificar la variación del tirante de agua que se registró con los sensores distribuidos dentro del dispositivo.
- Desarrollar de un código en *Matlab* para procesar y limpiar las señales obtenidas, y calcular la frecuencia y amortiguamiento de cada una de las pruebas.
- Comparar las señales de cada uno de los métodos de prueba, de forma gráfica y numérica.
- Obtener el porcentaje de error de las propiedades dinámicas de los resultados experimentales (cada uno de los métodos de prueba) y lo teórico.

ALCANCES Y LIMITACIONES

Este trabajo se limita a estudiar un amortiguador de masa líquida sintonizada (ALS) a escala, diseñada para un caso de estudio en particular, propuestos por Nava González (2019) y Nava González et. al. (2023). Por lo tanto, también se limita únicamente a mostrar los parámetros de diseño del dispositivo.

Se comparan dos técnicas, tanto gráficamente como numéricamente, para la obtención de las señales del comportamiento del tirante de agua dentro del tanque para así obtener las propiedades

dinámicas del dispositivo ensayado; para ello es fundamental el uso de una cámara de alta velocidad, así como de medidores de tirantes de agua; posteriormente, se comparan numéricamente las propiedades dinámicas del dispositivo ensayado, obtenidas con ambos métodos, así como cada uno de los métodos con los valores teóricos. Resulta importante destacar que la excitación que se le proporciona al dispositivo es por medio de fuerzas aleatorias, debido a que la fuerza aplicada era proporcionada por personas que ayudaron con la experimentación.

La cámara de alta velocidad requiere de mucha iluminación en la toma, entonces, para obtener una tasa alta de fotogramas por segundo se necesita de dispositivos adicionales que proporcionen iluminación.

CONTENIDO DE LA TESIS

En el Capítulo 1 se describen los tipos de amortiguadores, enfatizando en las masas líquidas sintonizadas, las cuales corresponden a amortiguadores de tipo pasivo; posteriormente, en el Capítulo 2 se describe el caso de estudio, tanto el edificio como el dispositivo estudiado, además de todo el arreglo experimental requerido, asimismo se describe la metodología de las pruebas. En el Capítulo 3 se presentan los resultados obtenidos en las pruebas realizadas, para que posteriormente se discutan en el Capítulo 4. Finalmente, en el Capítulo 5 se muestran las conclusiones a las que se llegó con la realización del ensayo del dispositivo, así como las recomendaciones para trabajos posteriores.

CAPÍTULO 1

EMPLEO DE MASAS LÍQUIDAS SINTONIZADAS EN ESTRUCTURAS

“El proceso mediante el cual la amplitud de la vibración disminuye de manera constante se denomina amortiguamiento. La energía cinética y la energía de deformación del sistema vibratorio se disipan mediante diversos mecanismos de amortiguamiento, (...). En un edificio en vibración éstos incluyen la fricción en las conexiones de acero, la apertura y cierre de microfisuras en el concreto y la fricción entre la propia estructura y los elementos no estructurales, tales como muros divisorios” (Chopra, 2014).

1.1 DISPOSITIVOS DE CONTROL DE VIBRACIONES

Los edificios en México se construyen principalmente para resistir las fuerzas sísmicas, gracias a ello se diseñan cada vez más ligeros, flexibles y a su vez, altos. Debido a esto, los edificios altos son vulnerables a las fuerzas del viento, lo cual puede producir vibraciones excesivas en la estructura, lo que ocasiona que sean perceptibles para los ocupantes y les generen incomodidad, malestar o incluso miedo. Asimismo, el viento también puede causar problemas en las fachadas, revestimientos o equipos. Una posible solución son los dispositivos auxiliares para el control de las vibraciones, los cuales proporcionan al edificio mayor amortiguamiento, para no sobrepasar el estado límite de servicio. De acuerdo con Tamura (1998), las personas suelen ser más sensibles a las vibraciones horizontales en torno a una frecuencia de 2 Hz, aproximadamente.

Las vibraciones pueden mitigarse debido al diseño estructural: al aumentar la rigidez aumenta la frecuencia natural del edificio; asimismo, la aceleración máxima y los desplazamientos disminuyen en dado caso de aumentar la frecuencia (Tamura, 1998), por otro lado, el aumento de la masa del edificio reduce su frecuencia, pero podría aumentar los desplazamientos. En comparación, resulta más eficaz implementar un Amortiguador de Vibraciones Dinámicas (DVA, por sus siglas en inglés), específicamente un amortiguador de masa, ya que reduciría la respuesta gracias a la adición de una masa auxiliar relativamente pequeña en comparación con la masa total de edificio.

A pesar de que los Amortiguadores de Vibraciones Dinámicas (DVA) han sido objeto de estudios extensos, específicamente durante las últimas décadas, su adopción ha sido limitada sobre todo en países en vías de desarrollo tecnológico (Riascos-González et al, 2019). La oposición para utilizar estos sistemas se debe principalmente a la incertidumbre, los costos adicionales que pudieran generar, la falta de confianza y/o la ausencia de normativas para su ejecución y puesta en marcha. Sin embargo, para el caso de la Ciudad de México, la NTC-Viento (2023) incluye el Apéndice B DISPOSITIVOS DE AMORTIGUAMIENTO AUXILIAR PARA MITIGAR LAS ACCIONES DEL VIENTO, en donde se presentan requisitos que sirven como un criterio mínimo que deben cumplir los dispositivos de amortiguamiento auxiliar que fuesen considerados en los análisis de la respuesta estructural.

De acuerdo con la Norma Técnica Complementaria para Diseño por viento (NTC-Viento, 2023) de la Ciudad de México

Los DVA suelen clasificarse en tres categorías: pasivos, activos y semiactivos. Los sistemas de control activo suelen ofrecer niveles muy altos de rendimiento, pero necesitan de energía externa para aplicar una fuerza de control, en este tipo de dispositivos se incluyen los sistemas de arriostamiento activo y los amortiguadores de masa activa; por otro lado, los sistemas de control semiactivos también requieren de energía, pero a diferencia de los activos, suele ser mucho menor, habitualmente se consideran sistemas pasivos controlables (Tait, 2004). Finalmente, los sistemas de control pasivos se definen en la siguiente sección.

1.2 AMORTIGUADORES PASIVOS

Un enfoque económico para mitigar la respuesta vibratoria de las estructuras sometidas a cargas dinámicas (e.g., sismo y viento) consiste en proporcionar amortiguamiento adicional mediante DVA (Hajighasem et al., 2018), ya que disipa la energía proveniente de las excitaciones, tanto directa como indirectamente, ejemplos de este tipo de dispositivos son los amortiguadores viscoelásticos y los de masa sintonizada, respectivamente. La instalación de un dispositivo pasivo que incluya amortiguadores mecánicos es también una forma, cada vez más común, de suprimir las vibraciones no deseadas (Sun, 1991).

Los dispositivos pasivos para el control de vibraciones no requieren ningún tipo de suministro de energía y se pueden dividir en 3 categorías: amortiguadores viscosos, los cuales utilizan materiales de viscosidad alta; amortiguadores histeréticos, como los amortiguadores de acero, los de juntas de acero, de plomo, de fricción y los viscoelásticos; y amortiguadores de masa sintonizada (tanto masa líquida como sólida), los cuales se explicarán a continuación. Todos estos dispositivos poseen la ventaja de ser sencillos, pero fiables.

1.2.1 AMORTIGUADORES DE MASA SINTONIZADA (AMS)

El amortiguador de masa sintonizada (también llamado TMD, Tuned Mass Damper, por sus siglas en inglés) se basan en el efecto de inercia de una masa adicional instalada en los últimos niveles del edificio (Tamura, 1998), es decir, las fuerzas inerciales generadas por el desplazamiento de la masa del dispositivo son las encargadas de contrarrestar el movimiento de la estructura. Un TMD consta de una masa oscilante, un resorte y amortiguador viscoso.

La eficacia de un TMD depende de que su masa, rigidez y amortiguamiento se ajusten o sintonicen correctamente a las características dinámicas de la estructura primaria. Un TMD correctamente diseñado tiene gran eficacia en un intervalo de frecuencias cercanas a la frecuencia modal natural de la estructura cuya respuesta se desea suprimir (Tait, 2004). La frecuencia del

amortiguador, que de acuerdo con Tamura (1998) viene dada por $f_D = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_D}{m_D}}$, donde k_D es la rigidez del dispositivo y m_D es su masa. Dicha frecuencia se debe sintonizar con la frecuencia natural del edificio, para que de esa manera se transfiera la energía del edificio al amortiguador y pueda ser disipada gracias a su mecanismo.

El amortiguamiento efectivo que es proporcionado por un TMD suele definirse como el amortiguamiento adicional que sería necesario para lograr la misma reducción en la respuesta dinámica de la estructura de un grado de libertad (Tait, 2004). Cabe destacar que dicho amortiguamiento efectivo está influenciado por el amortiguamiento inherente de la estructura.

Este sistema de control es el segundo más utilizado alrededor mundo, solo después de los aisladores sísmicos (Riascos-González et al, 2019). Numerosos investigadores han estudiado y experimentado con este dispositivo, con el fin de analizar su comportamiento y su funcionamiento, lo cual también ha dado pie a numerosas innovaciones y adaptaciones del dispositivo original patentado por Frahm Hermann en 1909.

Actualmente, existen muchas aplicaciones de este tipo de dispositivos utilizados en edificios susceptibles a los efectos de cargas dinámicas como sismo y viento, ejemplos de ello es el edificio Taipei 101, ubicado en la ciudad de Taipei, en Taiwán, en el que se tiene instalado el TMD más grande del mundo (Riascos-González et al, 2019), con alrededor de 660 toneladas de peso, y tiene forma de péndulo.

1.2.2 AMORTIGUADORES DE LÍQUIDO SINTONIZADO (ALS)

El amortiguador de líquido sintonizado ALS (o TLD, Tuned Liquid Damper, por sus siglas en inglés) surgió como DVA de tipo pasivo, en el que se utiliza un depósito rígido, con una masa o volumen determinado de un líquido que chapotea libremente (usualmente agua), para aumentar el amortiguamiento efectivo y a su vez reducir la respuesta de las estructuras o del sistema sometido a cargas dinámicas (viento y sismo). Se dice que está “sintonizado” ya que el agua chapotea a la misma frecuencia natural que la estructura primaria ante las cargas dinámicas aplicadas, de lo contrario su eficacia reduciría considerablemente; dicho chapoteo produce fuerzas inerciales que modifican la respuesta del edificio haciendo que se reduzcan los movimientos de la estructura, es por ello que aumenta el amortiguamiento.

Desde su creación, han tenido aplicaciones principalmente en las áreas aeroespacial y marítima, en satélites espaciales y buques marinos (Sun, 1991; Tait, 2004), respectivamente; no obstante, en los últimos años se han utilizado cada vez más para controlar la respuesta estructural principalmente en edificios altos, en el área de la ingeniería civil. Cabe resaltar que algunas de sus otras principales características son la de ser dispositivos económicos, que al tener almacenada agua en un tanque puede llegar a ocuparse ante una adversidad, por ejemplo, en un incendio; además, son de fácil instalación inclusive en estructuras ya existentes, y necesita de poco mantenimiento a pesar de ser dispositivos robustos, ya que se necesita un espacio significativamente grande para lograr la relación necesaria de masa entre el ALS y el edificio.

El contenedor o depósito que contiene al fluido puede presentar distintos tamaños y formas, para ejemplo de ello se han estudiado dispositivos en forma circular, rectangular y anular. Sun et al.

(1995) estudiaron las 3 formas antes mencionadas y encontraron que el amortiguador en el cual participaba la mayor cantidad de masa era el de forma rectangular, y concluyeron que la forma del depósito tiene gran influencia en el rendimiento de un ALS.

Un ALS puede ser modelado como un TMD equivalente, ya que funcionan de manera similar (Tamura, 1998), al menos en su mecanismo básico, puesto que su mayor diferencia es la no linealidad del ALS (Sun et al. 1995); el rendimiento de un ALS depende de la relación entre las masas y las frecuencias tanto del amortiguador como de la estructura, así mismo del amortiguamiento inherente del líquido (Fediw et al., 1995). Además, de acuerdo con lo mencionado anteriormente, un TLD diseñado correctamente posee una gran eficiencia dentro de un gran intervalo de amplitudes, al menos ante cargas inducidas por el viento, es decir, amplitudes de excitación pequeñas.

En un ALS la principal fuente de amortiguamiento son las paredes del tanque, las superficies del fondo y la “contaminación” que se encuentre en la superficie libre del agua; además se produce un pequeño amortiguamiento adicional debido a la histéresis capilar en el menisco; así mismo, se sabe que la ruptura de las olas produce una gran disipación de energía. Del mismo modo, el amortiguamiento de un ALS sin dispositivos adicionales suele estar por debajo del valor deseado para que funcione eficazmente (Fediw et al., 1995). Pero dicha eficacia puede mejorarse añadiendo dispositivos de amortiguamiento internos para aumentar a su vez el amortiguamiento inherente, así lo indica Tait, (2004), mediante las pruebas realizadas.

De acuerdo con Sun (1991), el chapoteo de líquido en el ALS tiene ciertos aspectos especiales, por ejemplo:

- El nivel del líquido en el dispositivo es poco profundo para lograr un mayor amortiguamiento y una frecuencia natural baja que se adapte a una estructura. Sin embargo, la poca profundidad del líquido induce a grandes no linealidades, lo cual hace que una teoría lineal no resulte satisfactoria para tratar el problema.
- El amortiguamiento del líquido es un parámetro de suma importancia que influye en la eficiencia del TLD.
- El rompimiento de olas puede presentarse en el líquido bajo movimientos de gran amplitud.

Existen ALS de aguas poco profundas y de aguas profundas, esta clasificación está en función de la relación entre el tirante del fluido, h , y la longitud del tanque, L . En el caso de las aguas poco profundas, la configuración permite que la mayor parte del fluido participe en el movimiento de chapoteo, por el contrario, para aguas profundas la participación del fluido en el chapoteo es menor, es decir, existe masa que no participa y no disipa energía adicional (Tait, 2004), por lo tanto, se reduce la eficacia.

La principal limitación de un ALS en comparación con otros dispositivos de amortiguamiento de vibraciones dinámicas (DVA) es su comportamiento dinámico no lineal, lo que conlleva un proceso de análisis y diseño más complejo. Además, su respuesta se vuelve cada vez menos lineal a medida que disminuye la relación h/L (Tait, 2004), lo que hace que el comportamiento del dispositivo sea cada vez menos predecible. Asimismo, para aguas profundas se suele requerir de mecanismos de amortiguamiento adicionales, tales como pantallas, redes, etc; esto para aumentar la disipación de energía y tener un mejor control del chapoteo dentro del tanque.

El modelo más general de interacción ALS-estructura, consiste en una estructura lineal de un solo grado de libertad (SDOF) y un ALS acoplado, además sirve para simular la respuesta de dicha interacción. Dicho sistema está sometido a una fuerza $P(t)$ aleatoria en dirección x .

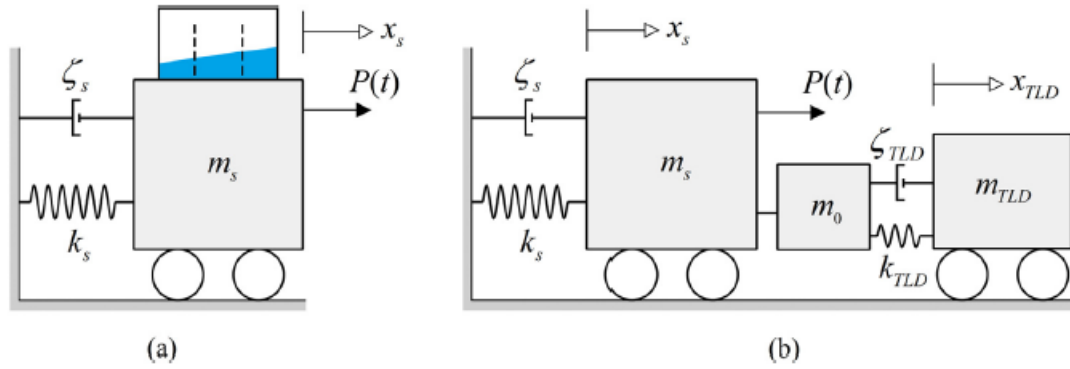


Figura 1. a) Representación TLD-Estructura. b) Representación teórica TLD-Estructura (Hajighasem et al., 2018)

De acuerdo con Pozos Estrada (2009), el sistema mostrado en la Figura 1 posee la siguiente ecuación de movimiento:

$$M_s \ddot{Y}_s + C_s \dot{Y}_s + K_s Y_s = P(t)$$

Donde Y_s es el desplazamiento lateral; M_s , C_s y K_s representan la masa, el amortiguamiento y la rigidez de la estructura principal; mientras que $P(t)$ representa la fuerza generalizada del viento transversal que actúa sobre la estructura principal.

Dado el carácter no lineal de las propiedades dinámicas de un ALS, las características de respuesta de un sistema TLD-estructura no son sencillas de determinar, es por ello que muchos investigadores han estudiado y desarrollado diversos métodos para calcular los parámetros de dicho dispositivo (frecuencia, masa y amortiguamiento).

De acuerdo con Tait (2004), la frecuencia fundamental de chapoteo del agua se puede estimar gracias a la ecuación propuesta por Lamb (1932), utilizando la teoría de ondas lineales:

$$f_w = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi g}{L} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)}$$

Donde g es la aceleración de la gravedad, L es la longitud del tanque, paralela a la dirección de la fuerza aplicada, y h es el tirante de agua.

Según Nava González et al. (2024) el ALS óptimo produce la máxima reducción de la respuesta en la estructura para la que fue diseñado; de esta manera, existen ciertos parámetros que caracterizan al ALS (Tait, 2004), a su vez, estos parámetros se ven afectados por varias magnitudes físicas como el tamaño del tanque, la profundidad del líquido y la viscosidad del líquido:

- *Relación de frecuencias*

$$\Omega = \frac{f_A}{f_s}$$

Donde f_A es la frecuencia natural del amortiguador dinámico de vibraciones, f_{TLD} para un TLD y f_s es la frecuencia natural de la estructura primaria.

- *Relación de masas*

$$\mu_{TLD} = \frac{m_{TLD}}{M^*}$$

$$m_{TLD} \approx \frac{8 \tan h \left(\frac{\pi h}{L} \right)}{\pi^3 \left(\frac{h}{L} \right)} m_w$$

Donde M^* es la masa de la estructura en el modo de vibrar que se desea suprimir, m_{TLD} es la masa efectiva del dispositivo, es decir, la porción de la masa del agua que contribuye al chapoteo y m_w es la masa total del fluido contenida en el tanque.

- *Relación de amortiguamiento* inherente del fluido que chapotea en el interior del tanque. De acuerdo con la teoría de ondas lineales, y suponiendo un tanque rectangular sin dispositivos adicionales como las pantallas de rejillas, dicho valor puede estimarse según Sun (1991) como:

$$\xi_{TLD} = \frac{1}{2h} \sqrt{\frac{v_w}{\pi f_w}} \left(1 + \frac{h}{b} \right)$$

Donde v es la viscosidad cinemática del fluido, usualmente agua; se puede observar que a mayor viscosidad del fluido o a un menor tirante de agua se pueden aumentar dicho amortiguamiento adicional.

A medida que el valor de la amplitud de la excitación aumenta, también aumentan los parámetros de f_{TLD} , m_{TLD} y ξ_{TLD} , por lo que de acuerdo con Tait (2004a), se debe a que el amortiguamiento efectivo disminuye a grandes amplitudes de excitación, por consiguiente, para valores constantes, el dispositivo es menos eficaz.

Los valores óptimos de ξ_{TLD} , se encuentran cuando μ_{TLD} ronda los valores del 1 al 5% (Tait, 2004), es decir, cuando la masa del agua que participa en el chapoteo del líquido es de 1 a 5% de la masa total de la estructura; y dicha relación de amortiguamiento se sitúa entre 5 a 15%

1.2.2.1 ALS ADICIONADO CON PANTALLAS DISIPADORAS

Como ya se mencionó, el valor del amortiguamiento suele ser inferior al deseado para que el dispositivo funcione de una manera más eficaz; sin embargo, las pantallas sumergidas dentro del tanque han mostrado ser dispositivos complementarios de disipación de energía sencillos pero

eficaces; no obstante, para aprovechar al máximo su utilidad, ha sido esencial desarrollar modelos que capturen de manera precisa su impacto en el comportamiento del TLD (Hajighasem et al., 2018). Cabe destacar que los modelos lineales y no lineales de TLD equipados con pantallas se basaron inicialmente en la teoría de olas en aguas poco profundas, la cual se puede encontrar explicada en (Sun, 1991).

A niveles de respuesta de chapoteo más elevados, se producen algunas características no lineales asociadas a los grandes movimientos de la superficie libre, como las ondas de ruptura (Sun y Fujino, 1994). Estos fenómenos constituyen fuentes adicionales de disipación de energía. Además, la respuesta del fluido está dominada por el primer modo de chapoteo (Hajighasem et al., 2018), debido a que la mayor velocidad suele producirse en el centro del tanque (Tait, 2004).

Para comprobar la eficiencia de las pantallas amortiguadoras en TLDs se han hecho múltiples estudios que comparan el comportamiento del dispositivo, con y sin pantallas, como Tait (2004a). También se ha comprobado que estas pantallas reducen significativamente la respuesta dinámica de las estructuras. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de un amortiguador líquido sintonizado con la implementación de pantallas disipadoras.

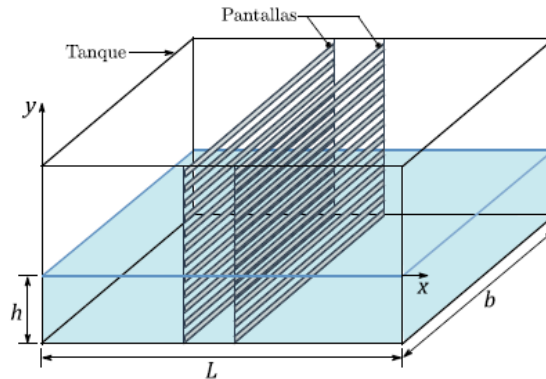


Figura 2. TLD con pantallas disipadoras de rejillas. (Ramírez, 2017)

Las pantallas a 0.4 y 0.6 de la longitud del tanque, producen un mayor amortiguamiento según Hajighasem et al. (2018). Además, esa disposición en específico de las pantallas se utiliza en Hong Kong en varios dispositivos instalados en edificios altos (Tschanz, 2002). Fediw et al. (1995) han comprobado que dos pantallas, en lugar de solo una, reducen aún más la respuesta de los edificios. Tait (2004) demostró que tener 3 pantallas dentro del tanque aumenta aún más la disipación de energía. Además, cuando la configuración incluye dos pantallas, se disipa menor energía conforme estén más alejadas del centro.

En este trabajo se utilizaron pantallas amortiguadoras de rejillas con la configuración mostrada en la Figura 3, las cuales son de fácil instalación, dichas rejillas poseen una determinada separación que puede modificar la relación de solidez (S) que es la porción sólida de la pantalla, y el área bruta de la misma; para modificar a su vez el ξ_{TLD} . Tait (2004) comprobó que la introducción de pantallas de rejillas a un TLD reduce las amplitudes máximas de respuesta de las olas; además, el aumento en el valor de ξ_{TLD} reduce la no linealidad del dispositivo. El número y la ubicación de las pantallas intervienen ampliamente en el amortiguamiento, además de la relación de solidez, ya que cambia el comportamiento del fluido y a su vez la energía que se disipa. Además, Marivani y

Hamed (2014) demostraron gracias a sus experimentos, que las ubicaciones de las pantallas pueden cambiar la frecuencia del dispositivo.

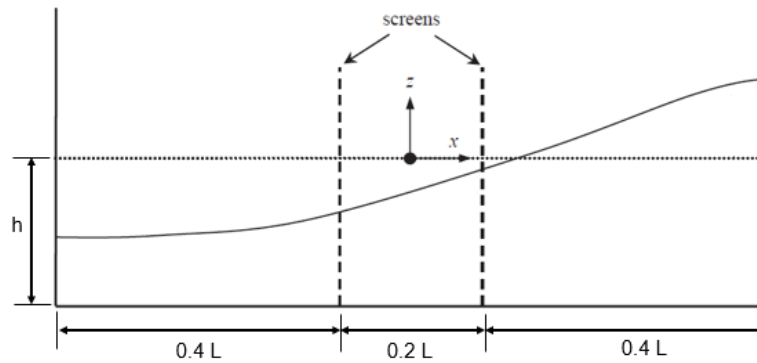


Figura 3. Disposición de las pantallas amortiguadoras dentro del tanque. Modificada de (Tait et al., 2005)

Se han llevado a cabo diversos estudios donde reafirman la eficacia de este tipo de dispositivos adicionales para disminuir la respuesta del edificio. Ejemplo de ello, Marivani y Hamed (2014) llevaron a cabo experimentos en un TLD adicionado con 2 pantallas, excitándolo de manera aleatoria logrando disminuir la respuesta de la estructura hasta en un 38%.

Tait (2008) describió el comportamiento de un amortiguador líquido sintonizado equipado con pantallas amortiguadoras por medio de la teoría del flujo potencial; asimismo, propuso una metodología para obtener los parámetros óptimos de un ALS con base en las propiedades equivalentes de un amortiguador de masa sintonizada; misma que utilizó Nava González et al. (2023) para diseñar el dispositivo utilizado en este trabajo.

1.2.2.2 MÚLTIPLES ALS

El empleo de aguas extremadamente poco profundas implica el uso de múltiples tanques para poder alcanzar la relación de masas deseada y eficiente, lo que a su vez se traduce en mayor requerimiento de espacio.

Los múltiples Amortiguadores de Líquido Sintonizados o MTLTD, consisten en varios TLDs con frecuencias naturales distribuidas en un cierto rango alrededor de la frecuencia natural de la estructura. Dicho dispositivo es muy eficaz para suprimir la vibración estructural, incluso cuando cada TLD tiene un amortiguamiento pequeño (Sun, 1991). Cada uno se diseña para poseer el mismo tamaño y así satisfacer la masa líquida requerida, pero variando la profundidad del líquido en cada TLD para tener frecuencias naturales distintas. Esto se traduce en un mayor costo de fabricación debido a los múltiples contenedores, además de un mayor mantenimiento.

CAPÍTULO 2

ARREGLO EXPERIMENTAL Y DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS DE UN AMORTIGUADOR LÍQUIDO SINTONIZADO

2.1 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

En este trabajo se estudió un amortiguador líquido sintonizado de forma rectangular ubicado en la parte más alta de un edificio diseñado y modelado por Nava González (2019). En las siguientes secciones se describen el dispositivo de amortiguamiento y el edificio en donde se consideró instalarlo.

2.1.1 DESCRIPCIÓN DEL EDIFICIO

Nava González (2019) modeló un edificio alto, el cual pertenece a una estructura del grupo “B”, por ser utilizado como edificio de departamentos. El edificio cuenta con una geometría rectangular en planta, la cual mide 40 m x 60 m, teniendo un área de 2,400 m². Dispone de 50 niveles con alturas de entrepiso de 4 m, dando una altura total del edificio de 200 m, como se muestra en la Figura 4.

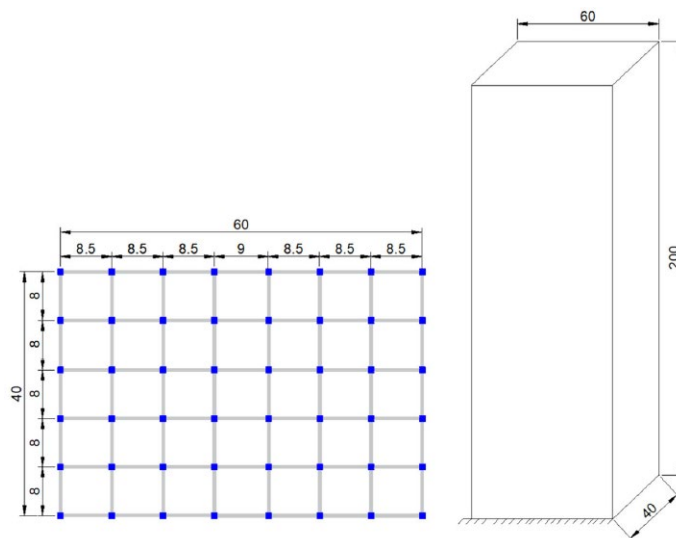


Figura 4. A la derecha la vista en planta del edificio y a la izquierda la geometría de este. Modificada de Nava González (2024)

La estructuración del edificio se basa en marcos ortogonales, en ambas direcciones, tanto longitudinal como transversal. Las columnas son de concreto reforzado de sección cuadrada, variando sus dimensiones con la altura, en los primeros niveles poseen dimensiones de 2.0 m x 2.0 m, mientras que en el último nivel constan de una sección de 1.0 m x 1.0 m; para las trabes, todas poseen una misma sección en todos los niveles del edificio, de 0.5 m x 1.0 m y son de concreto reforzado. Para el caso del sistema de piso, fue estructurado con una losa maciza de concreto

reforzado con 20 cm de espesor. La resistencia del concreto utilizado en todos los elementos estructurales es de 700 kg/cm².

Su diseño se llevó a cabo con base en la normativa de la Ciudad de México vigente en ese entonces, es decir, de acuerdo con las NTC (2017). Para obtener las propiedades dinámicas del edificio, en el nivel de terreno se contempló que la estructura estuviese empotrada, es decir, no se tomó en cuenta la interacción suelo-estructura. Se encontraron las formas modales con sus respectivos periodos a través de un análisis modal. En la Tabla 1 se muestran los primeros dos periodos de vibrar de la estructura.

Tabla 1. Información modal de la estructura. Modificada de Nava González (2019)

MODO	PERIODO (s)	FRECUENCIA (Hz)
Traslación en X	5.032	0.199
Traslación en Y	5.144	0.194

2.1.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO EXPERIMENTAL DEL AMORTIGUADOR LÍQUIDO SINTONIZADO

Como ya se mencionó en este documento, un TLD consiste en un depósito rígido con un volumen de líquido conocido que chapotea libremente, además es utilizado para aumentar el amortiguamiento de la estructura y reducir su respuesta ante cargas dinámicas; el modelo experimental fue construido y diseñado por Nava González et al. (2023). Este modelo fue construido a escala conforme los factores utilizados para los parámetros del dispositivo, basados en el trabajo de Jae-Sung et al. (2009), los cuales se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Factores de escala para cada parámetro del TLD

PARÁMETRO	FACTOR DE ESCALA
Longitudes [m]	1:10
Frecuencia [Hz]	$1:\frac{1}{\sqrt{10}} \approx 1:0.32$
Amortiguamiento	1:1

Resulta importante destacar que el dispositivo se diseñó para una sola dirección, en este caso para reducir la respuesta de la estructura principalmente en el eje x, es decir, en donde se tiene un periodo de 5.032 [s] y una frecuencia de 0.199 [Hz], según la Tabla 1.

Nava González et al. (2023) y Nava González et al. (2024) utilizaron la metodología propuesta por Tait (2008) para obtener los parámetros óptimos del amortiguador líquido sintonizado del cual se basa este trabajo, pero resulta importante destacar que Nava González et al. (2024) utilizaron un valor de amortiguamiento de 2% para el edificio; sin embargo, en este trabajo se utilizó un amortiguamiento de 1% para la estructura principal; es indispensable explicarlo debido a que los parámetros del dispositivo son sumamente dependientes del amortiguamiento inherente de la

estructura en donde se colocara. El valor de los parámetros del ALS, así como las ecuaciones con los cuales fueron obtenidos se encuentran en la Tabla 3, asimismo es indispensable comentar que este trabajo se limita a mencionar los valores de los parámetros.

Tabla 3. Parámetros óptimos del ALS. Modificado de Nava González et al. (2024)

Parámetro	Ecuación	Valor
Amortiguamiento efectivo	$\xi_{eff} = \xi_s \left(\frac{\sigma_s^2 - inicial}{\sigma_s^2 - objetivo} - 0.8 \right)$	0.032
Relación de masa μ	$\mu = \frac{m_{eq}}{M_s + (\rho b h L - m_{eq})}$	0.016
Relación de amortiguamiento óptimo Ω	$\Omega^{opt} = \sqrt{\frac{1 + \frac{\mu}{2}}{1 + \mu}}$	0.988
Amortiguamiento equivalente ξ	$\xi_{eq} = \xi_a - \xi_w$	0.05
Masa equivalente m_{eq} , (Kg)	$m_{eq} = \frac{8\rho b L^2}{\pi^3} \tanh\left(\frac{\pi h}{L}\right)$	1.26×10^5
Rigidez equivalente k_{eq} , (N/m)	$k_{eq} = \frac{8\rho b g}{\pi^2} \tanh^2\left(\frac{\pi h}{L}\right)$	1.991×10^5
Coefficiente de amortiguamiento equivalente c_{eq} , (N/(m/s))	$c_{eq} = c_l \frac{16\rho b L}{\pi^3} \sqrt{\frac{32}{\pi^2} \tanh^3\left(\frac{\pi h}{L}\right) \Delta \Xi \omega \sigma_r}$	1.6×10^4

En la Tabla 4 se muestra un resumen del valor de algunos parámetros de diseño del TLD a escala, por lo que resulta importante destacar que dichos valores ya fueron afectados con los factores de escala mostrados en la Tabla 2.

Tabla 4. Valores de algunos parámetros del TLD a escala

PARÁMETRO	VALOR A ESCALA
Largo	100 cm
Ancho	100 cm
Alto	50 cm
Tirante	17.5 cm
Frecuencia	0.62 Hz
Amortiguamiento	5%

Primeramente, se resalta que todo el modelo experimental fue puesto en marcha gracias a la ayuda de todos los integrantes del Grupo de Ingeniería de Viento (GIV) del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Se utilizaron placas de acrílico con espesor de 95 mm. El dispositivo cuenta con dimensiones de 100 cm de largo x 100 cm de ancho x 50 cm de altura, por lo tanto, su vista en planta tiene una sección cuadrada. Además, el dispositivo está suspendido con 4 cables de acero, uno en cada una de sus esquinas, a un bastidor metálico; esto para que el depósito pueda moverse libremente cada que sea excitado. Asimismo, el bastidor metálico descansa sobre 4 rodillos, esto para facilitar el movimiento de todo el modelo. También, dicho bastidor posee un “brazo” en donde se coloca la cámara de video de alta velocidad, tiene 3 posibles ubicaciones, en la parte central y en cada uno de

los extremos del tanque, dependiendo de la parte que nos interese estudiar y analizar en cada una de las pruebas.

El tanque posee en la parte frontal exterior 4 reglas numéricas hechas con cinta de color azul, las cuales están marcadas a cada centímetro, para ayudar a identificar la altura del tirante de agua antes, durante y después de cada prueba; al calibrar el volumen de agua que necesita el dispositivo, en la realización cada una de las pruebas para distinguir la variación del tirante de agua en tiempo real y posteriormente para el análisis de los videos con la cámara de alta velocidad.

En la Figura 5 se puede observar el modelo experimental del Amortiguador Líquido Sintónico sostenido por medio de cables de acero al bastidor de acero de color rojo, el cual descansa sobre rodillos.

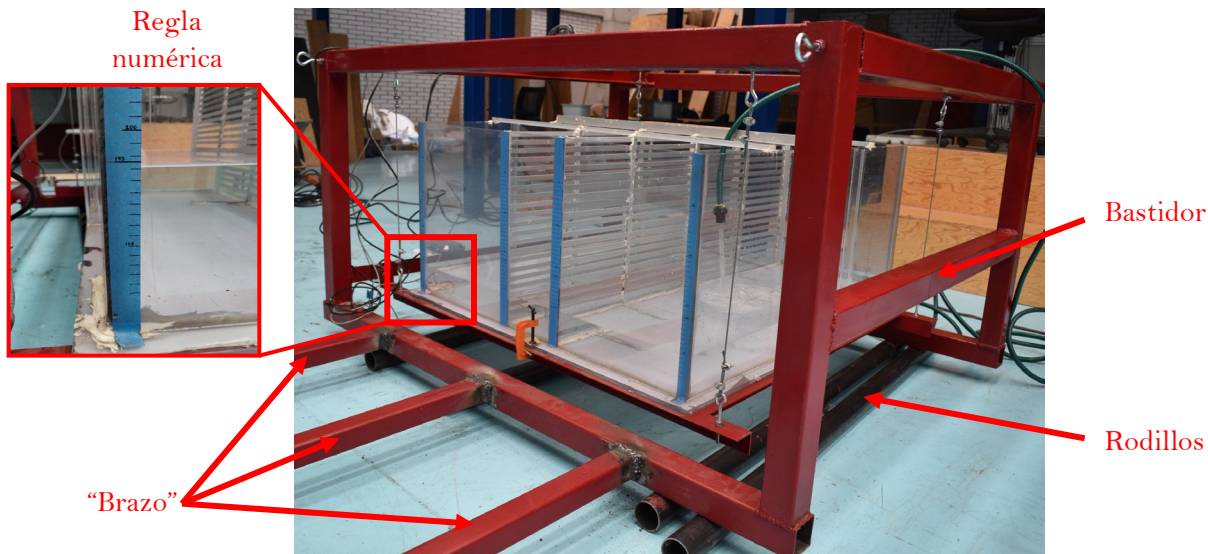


Figura 5. Modelo experimental del ALS

Dentro del dispositivo se colocaron 2 pantallas amortiguadoras de rejillas horizontales uniformemente espaciadas y equidistantes, perpendiculares a la dirección de la excitación, a 0.4 y 0.6 metros de la longitud del tanque. Estas rejillas fueron hechas a base de soleras de aluminio de $\frac{1}{16}$ " de espesor y $\frac{1}{2}$ " de ancho, además cuenta con una separación entre soleras (o rejillas) de 10 mm, asimismo se encuentran distribuidas por todo lo alto del tanque (50 cm).

De igual forma, se obstruyen las entradas de luz en las partes laterales y trasera del tanque con placas de unigel pintadas de color negro para evitar el reflejo de la luz en el agua, dejando únicamente descubierta la parte frontal del dispositivo, de esta manera se facilita la identificación del tirante de agua.

En la Figura 6 se identifican las pantallas amortiguadoras instaladas, así como la utilización de 3 largueros para rigidizarlas; además se observa la instalación de las placas de unigel antes mencionadas.

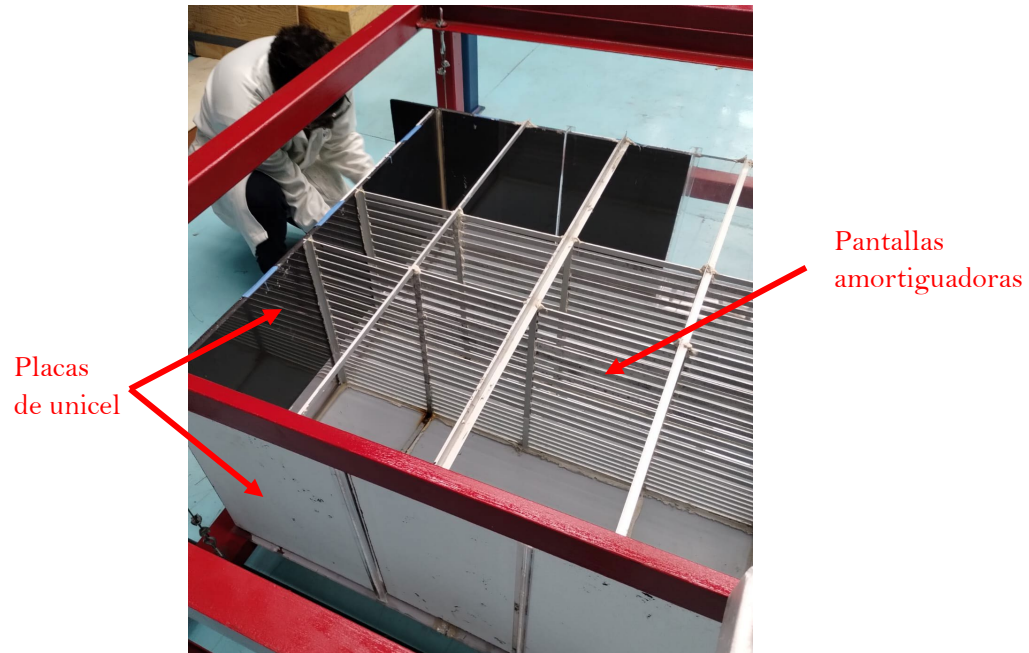


Figura 6. Configuración de las pantallas amortiguadoras e instalación de placas de unicel

2.2 DESCRIPCIÓN DEL ARREGLO

Posteriormente a poner en marcha el modelo experimental, se procedió con la instalación de los equipos necesarios para el desarrollo de las pruebas, tanto los equipos de medición como los de procesamiento de datos. Asimismo, resulta importante destacar que todo el arreglo experimental fue montado gracias a la ayuda de todos los integrantes del Grupo de Ingeniería de Viento (GIV) del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

En la Figura 7 se muestra una fotografía vista en planta del montaje experimental, dicho arreglo incluye una cámara de video de alta velocidad (comúnmente llamada cámara *phantom*), la cual graba en todo momento mientras se está llevando a cabo cada una de las pruebas experimentales; además, dicha cámara está montada sobre el brazo del bastidor metálico, debido a la necesidad de grabar en todo momento un mismo punto de interés, dichos puntos de interés pueden ser en alguna de las paredes del tanque o exactamente en el centro del depósito.

La cantidad de iluminación necesaria es directamente proporcional a la cantidad de imágenes que puede conseguir grabar en un segundo por la cámara de video de alta velocidad; es por ello que también en la Figura 7 se puede observar un sistema de iluminación adicional que consta de 7 lámparas ubicadas frente al dispositivo, las cuales, como se mencionó, son sumamente necesarias y de gran ayuda a la cámara *phantom* porque sirve para poder iluminar de manera suficiente el tanque y más específicamente el punto de interés. Con esta configuración de lámparas, la cámara grababa 120 cuadros por segundo en cada una de las pruebas realizadas para este trabajo.



Figura 7. Montaje experimental de las pruebas para el TLD

Es de gran relevancia destacar que la cámara *phantom* necesita estar conectada a una computadora debido a que a través de ésta se controla la cámara; el control incluye el inicio y fin de la grabación, se establecen los ajustes como la resolución, la velocidad de los cuadros, el índice de exposición, etc., como se muestra en la Figura 8, además se visualiza en tiempo real la grabación para posteriormente guardarla.

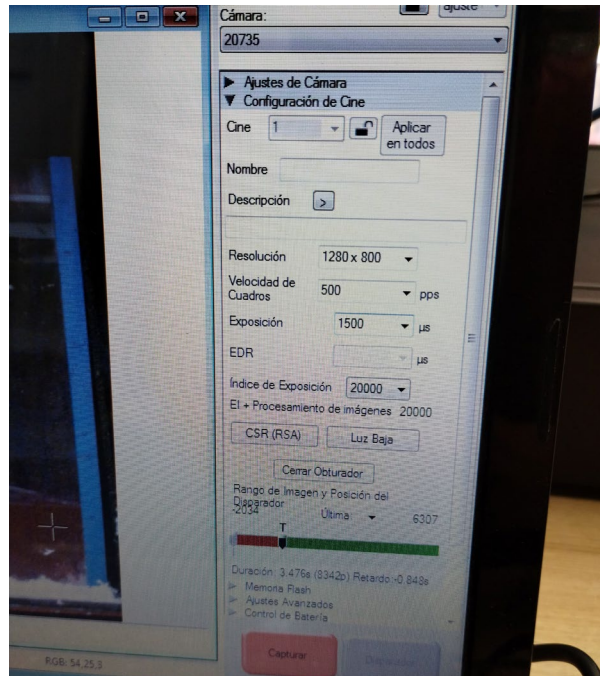


Figura 8. Ejemplo de configuración de la cámara phantom

También se utilizaron 5 sensores medidores de tirante de agua previamente calibrados, que consisten en un tipo de arco donde la cuerda es la encargada de medir los cambios del tirante de agua, se puede observar dicho dispositivo en la Figura 9. Los sensores se encuentran repartidos dentro del tanque en ubicaciones de interés, como se muestra en la Figura 10, se localizan en cada una de las paredes laterales, en cada una de las pantallas amortiguadoras y uno exactamente en el centro, dando un total de 5. Los sensores son alámbricos y están conectados en serie por medio de “cajas” (en la Figura 9 se encuentra un ejemplo de ésta), las cuales terminan conectados a un dispositivo que recibe toda la información, y luego se manda dicha información a una computadora, en donde se pueden guardar las pruebas en formato .csv (valores separados por comas).



Figura 9. Sistema Akamina Technologies (2016): (a) sensor medidor de tirante de agua de tipo arco; (b) dispositivo al cual se conecta el sensor.

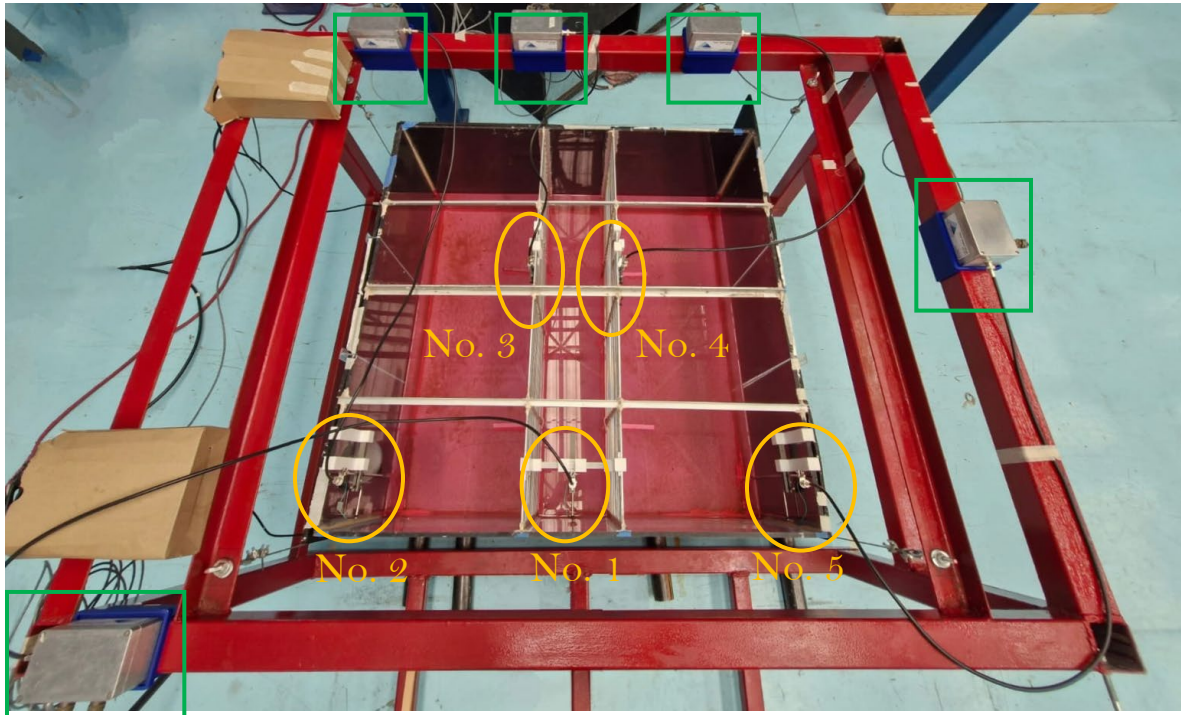


Figura 10. Distribución de los sensores medidores de tirante dentro del TLD

La información obtenida por este método es básicamente el cambio de tirante de agua que identifica cada uno de los sensores, con una frecuencia de muestreo de 1000 [Hz] ; gracias al software *WaveGen-Studio* se puede observar el comportamiento de la superficie libre del agua en tiempo real, además de obtener datos en un cierto periodo de tiempo previamente establecido, y al mismo tiempo graficarlos; de igual manera, dentro del programa, se hacen las calibraciones del conjunto de sensores. De acuerdo con Akamina Technologies (2016), el software combina cuatro componentes:

- 1) adquisición de datos,
- 2) síntesis de ondas,
- 3) generación de ondas y,
- 4) análisis de datos de ondas en una interfaz gráfica intuitiva para permitir a los usuarios gestionar fácilmente incluso los experimentos más complejos.

En la Figura 11 se muestra la interfaz de dicho software.

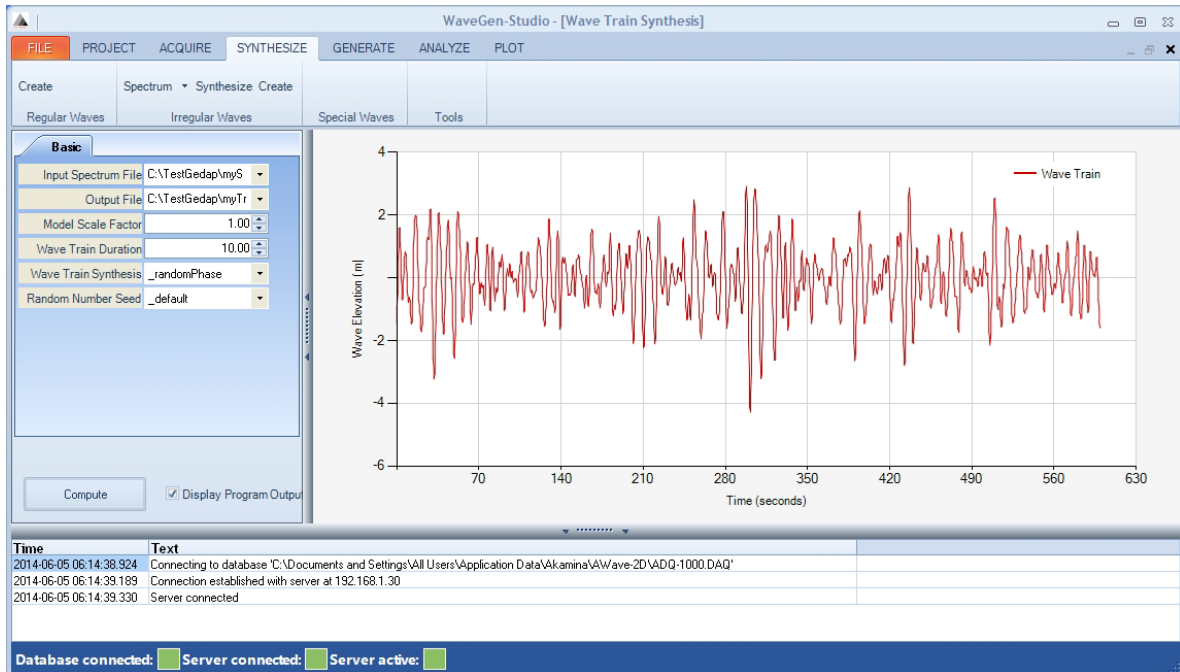


Figura 11. Interfaz del software WaveGen-Studio. Akamina Technologies (2016)

También se instaló un acelerómetro para identificar la medida de la aceleración que era proporcionada al tanque al excitarlo en cada una de las pruebas. El acelerómetro se instaló sobre el bastidor metálico, como se muestra en la Figura 12.

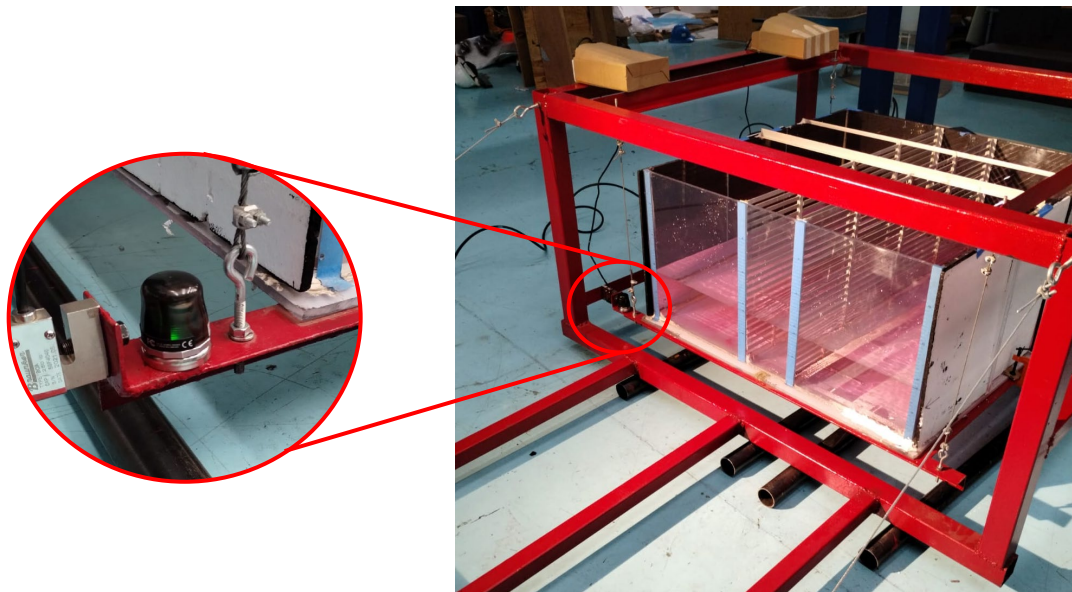


Figura 12. Ubicación del acelerómetro

2.3 METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

Se llevaron a cabo pruebas de vibración forzada, las cuales se definen como la aplicación de una fuerza a un sistema, sin importar las condiciones iniciales de este (Chopra, 2014); las pruebas se realizaron con el fin de obtener las propiedades dinámicas del Amortiguador Líquido Sintonizado a escala. Es importante resaltar que el dispositivo se excita de manera no controlada, debido a que la fuerza aplicada al tanque es proporcionada gracias a personas que ayudaron con la experimentación, en consecuencia, la fuerza excitadora fue variable tanto en magnitud como en frecuencia, esto sirvió para evaluar el comportamiento del dispositivo. A causa de ello, se cuenta con un acelerómetro que registra la aceleración aplicada al dispositivo en dirección de la excitación.

Se realizaron 220 pruebas, en donde tanto el tiempo de muestreo como el tipo de excitación al dispositivo fue variable, esto para comprobar experimentalmente el comportamiento del TLD, ya que, la frecuencia fundamental del dispositivo debe ser siempre la misma, siempre y cuando no se alteren las propiedades geométricas del tanque o de las pantallas amortiguadoras, así como la disposición de estas últimas; de la misma manera, ninguna propiedad del líquido que se encuentra dentro del tanque.

Como ya se comentó en la descripción del arreglo experimental, se cuenta con 5 sensores medidores del tirante del agua, es decir, que por cada tirante obtenemos una señal de cómo se desplaza la superficie libre del agua conforme pasa el tiempo, por lo tanto, cada prueba corresponde a 5 señales, y cada señal corresponde a la ubicación en donde fue instalado cada sensor, como se muestra en la Figura 10, es importante resaltar que del programa se obtiene un archivo .csv con los datos de la prueba, este archivo contiene una tabla que para cada valor de tiempo nos indica la ubicación de la superficie libre del agua teniendo como nivel de referencia inicial (de valor cero) el tirante de diseño del dispositivo a escala (17.5 cm). Por lo tanto, en la Figura 13 se muestra el comportamiento de la superficie libre del agua que registró cada sensor para la primera prueba a analizar, se puede observar una buena comparación de lo que ocurre en cada una de las distintas ubicaciones.

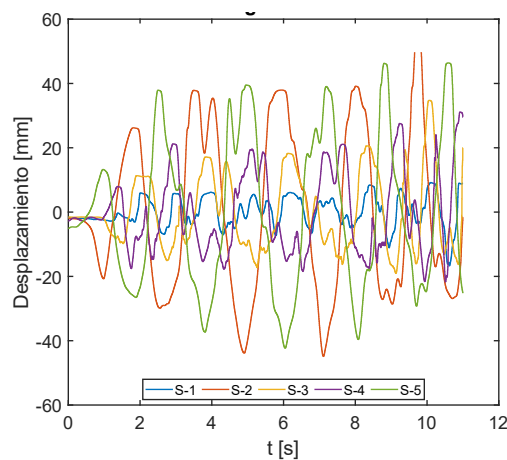


Figura 13. Comportamiento de la superficie libre del agua en cada uno de los puntos donde se encontraba un sensor para la prueba 1.

Al mismo tiempo que los sensores registraban información, la cámara de video de alta velocidad grababa la prueba, consiguiendo una frecuencia de muestreo óptima de 120 cuadros por segundo para cada una de las pruebas. Es importante destacar que la cámara solo es utilizada para observar el comportamiento de la superficie libre del agua en un solo punto, y lo más conveniente es que fuera en donde se encuentra algún sensor, para realizar la comparación entre ambos métodos; se eligió la ubicación del sensor 2. La ubicación de la cámara se observa en la Figura 14.

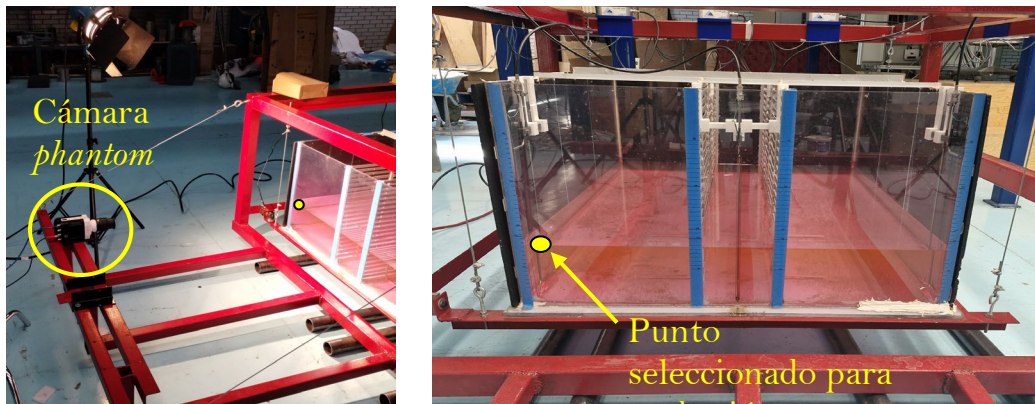


Figura 14. Ubicación de la cámara de video y del punto seleccionado para la grabación

En la Figura 15 se muestra la interfaz de la cámara *Phantom* cuando el video ya ha sido grabado. Posteriormente a la obtención del video, se guarda en formato .mov para que pueda ser leído por otro software para su posterior procesamiento.

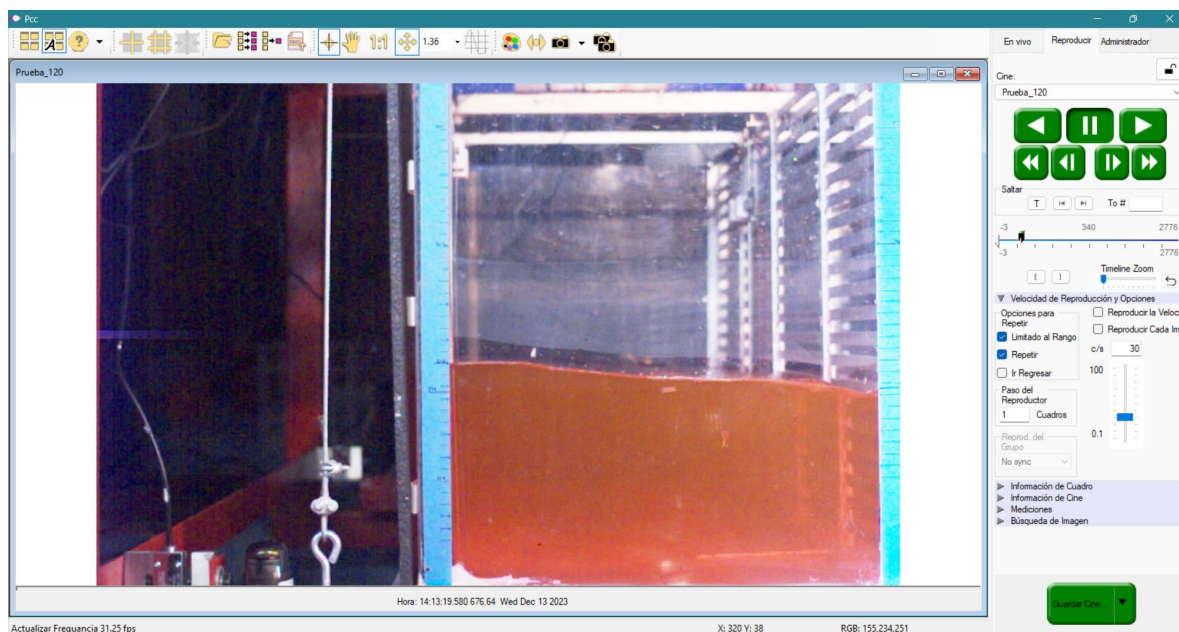


Figura 15. Interfaz de la cámara phantom

El procesamiento de las imágenes obtenidas con el video de alta velocidad de la cámara *phantom* se analiza con el software *Tracker*, el cual es una herramienta gratuita de análisis y modelado de video diseñada sobre Java Open Source Physics (OSP), el cual está diseñado principalmente para ser utilizado en la enseñanza de la física (Brown, 2005). Este programa analiza cuadro por cuadro el comportamiento de un punto previamente escogido (masa puntual o punto de control), dentro del espacio de trabajo en 2D. *Tracker* crea en tiempo real gráficas tiempo-desplazamiento, además de tablas que indican el comportamiento de dicha masa puntual tanto sobre el eje X como en el eje Y, todo esto después de elegir ejes de referencia. El análisis o la búsqueda de la masa puntual para la siguiente imagen del video puede hacerse de manera manual o forma automática, el problema de proceder automáticamente es que en muchos casos detecta puntos diferentes a los requeridos o a los esperados, para este trabajo el punto de interés está en la superficie libre del agua (porque nos interesa su comportamiento a través del tiempo después de haberlo excitado); en consecuencia, se procedió a añadirle colorante vegetal de color rojo al volumen de agua contenido en el tanque, para facilitarle al programa la búsqueda de los puntos. A pesar de ello, en algunas ocasiones continúa siendo difícil la detección automática de la superficie libre del agua, asimismo dentro del software se pueden aplicar determinados filtros para ayudar en la búsqueda de los puntos. En la Figura 16 se presenta un ejemplo del procesamiento de imágenes con el software *Tracker* descrito anteriormente.

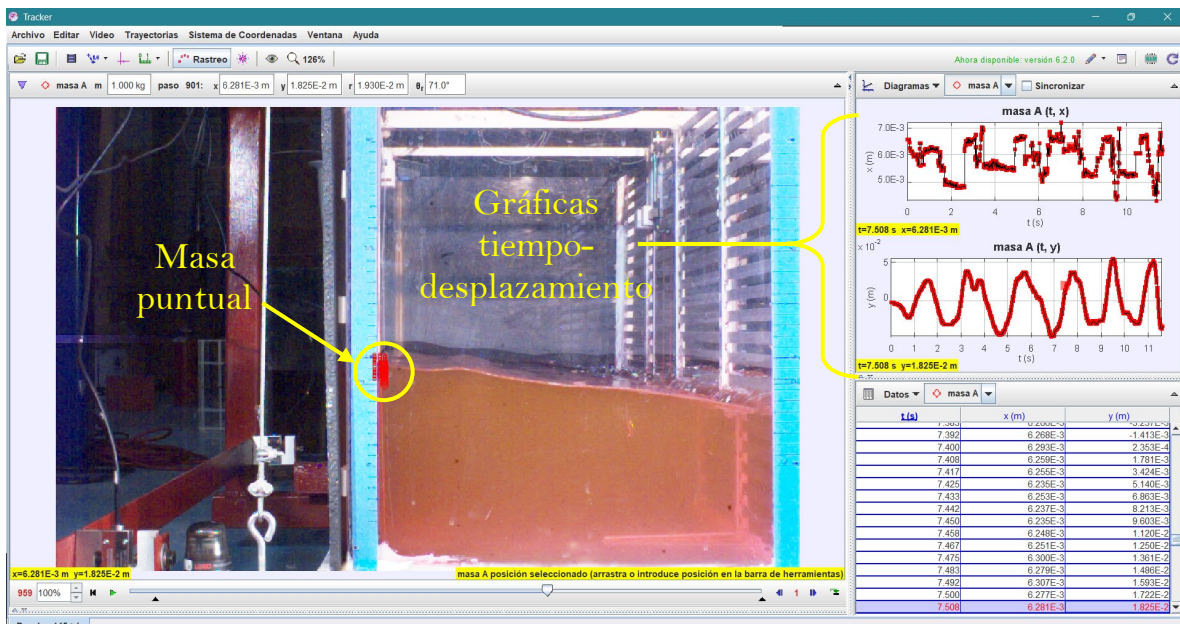


Figura 16. Interfaz del software tracker, utilizado para obtener la señal en cada una de las pruebas grabadas con la cámara phantom

Posterior al procesamiento de los videos, y con el software *tracker*, se obtienen los datos tabulados para poder graficar las señales como en la Figura 17.

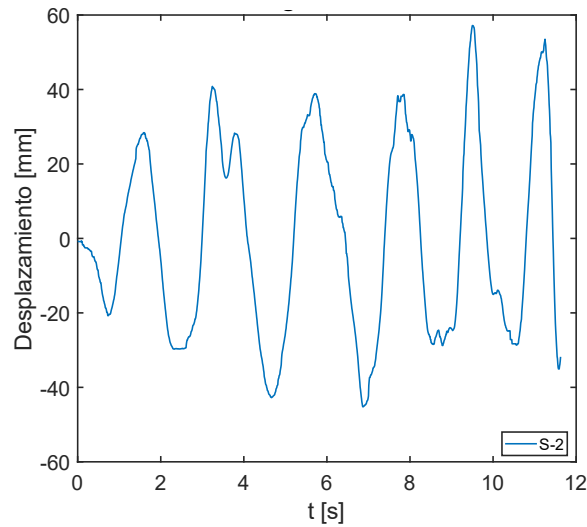


Figura 17. Comportamiento de la superficie libre del agua obtenido con el método de la cámara phantom y en la ubicación del sensor 2.

De acuerdo con Marivani y Hamed, (2014) la respuesta de la superficie libre del agua se compone de en una combinación de varias respuestas armónicas, por lo que se puede encontrar la frecuencia fundamental del TLD mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) de las señales obtenidas, tanto con los sensores como con la cámara de video; el pico más alto corresponde a la frecuencia fundamental del dispositivo, como se puede observar, con el método de los sensores para una de las pruebas, en la Figura 18, en donde se muestra del lado izquierdo la señal original de la prueba y del lado derecho la transformada rápida de Fourier de dicha señal, en la que se observan múltiples picos, en donde el pico más alto para cada uno de los sensores corresponde a la frecuencia fundamental del dispositivo; de la misma manera también se observa que los demás picos corresponden a otras frecuencias que van desde 0 hasta 10 [Hz], pero con menores amplitudes; esto pasa en todas y cada una de las pruebas; sin embargo, no son de interés las frecuencias que son diferentes a la frecuencia fundamental del edificio en donde se desea disminuir su respuesta, por lo tanto las señales obtenidas por cada uno de los métodos necesitan ser filtradas, para eliminar dichas frecuencias que no son de nuestro interés.

Para limpiar las señales se desarrolló un código en Matlab (2023), dicho software además ayudó para el tratamiento de los datos y en la realización de gráficas; la limpieza de la señal consiste en un filtro pasabandas que elimina todo lo que no esté alrededor del 5% de la frecuencia de interés; de acuerdo con la Tabla 4, la frecuencia fundamental que nos interesa del dispositivo es de 0.62 [Hz], por lo tanto, el intervalo de interés es desde $0.95 \times 0.62 = 0.589$ [Hz] hasta $1.05 \times 0.62 = 0.651$ [Hz]

En la Figura 19 se muestra del lado izquierdo la señal filtrada de la señal original mostrada en la Figura 18, y a la derecha su respectiva transformada rápida de Fourier. Se puede observar que la cantidad de picos disminuyó y ahora el pico más alto corresponde a la frecuencia fundamental del

dispositivo, en este caso se le llamará frecuencia espectral debido a que corresponde a la frecuencia obtenida del espectro de Fourier, la cual tiene un valor de 0.636 [Hz]

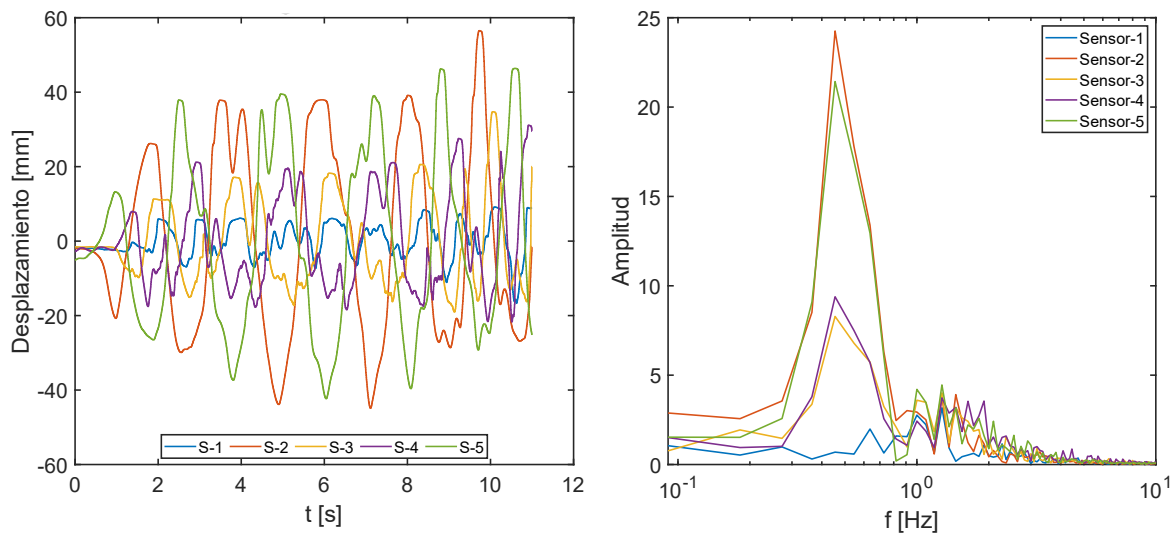


Figura 18. A la izquierda la señal original de la prueba de ejemplo y a la derecha su transformada rápida de Fourier (FFT)

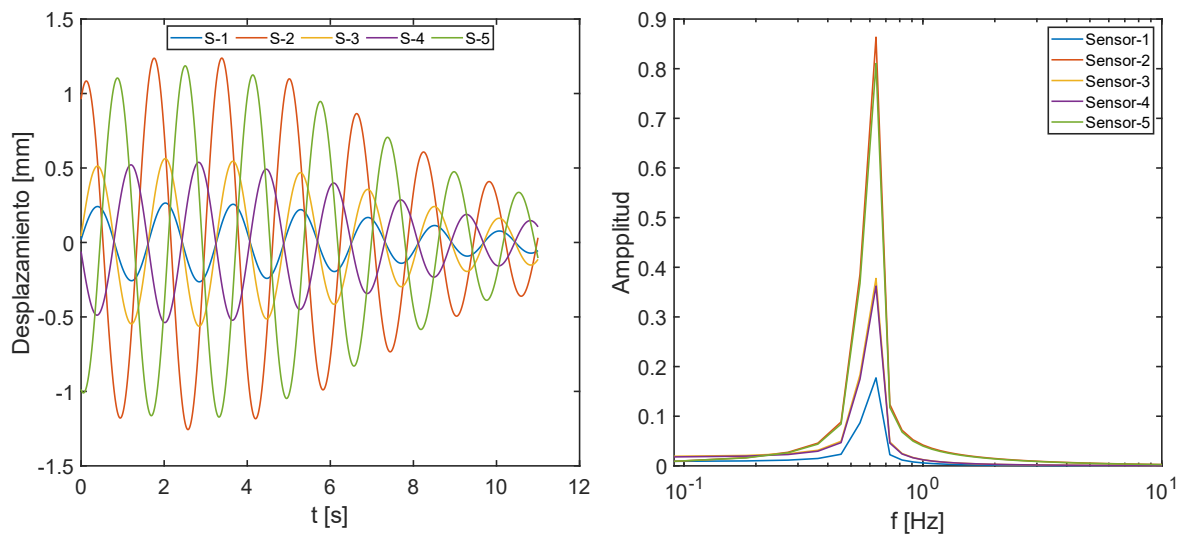


Figura 19. A la izquierda la señal filtrada de la prueba mostrada en la Figura 18 y a la derecha su transformada rápida de Fourier (FFT)

Como se ha mencionado, otra de las propiedades dinámicas estudiadas para el amortiguador líquido sintonizado es el amortiguamiento, el cual se define como un proceso en el cual disminuye la amplitud de una vibración. El amortiguamiento se puede identificar a partir de las señales

ocasionadas por las pruebas de vibración forzada, sin conocer la fuerza aplicada. Para este trabajo, el amortiguamiento fue calculado de la siguiente manera (Chopra, 2014):

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_i}{u_{i+j}}$$

Donde j es el número de ciclos durante el cual el movimiento disminuye (o la amplitud se reduce), el cual puede calcularse como el número de crestas menos uno ($n - 1$), recordemos que un ciclo se forma de una cresta a otra; u es el valor de la amplitud, y puede variar a lo largo de la señal, como se puede observar en la Figura 20, u_i es el valor de la amplitud en la primera cresta a partir de la cual queremos calcular el amortiguamiento y u_{i+j} el valor de la amplitud en la última cresta estudiada.

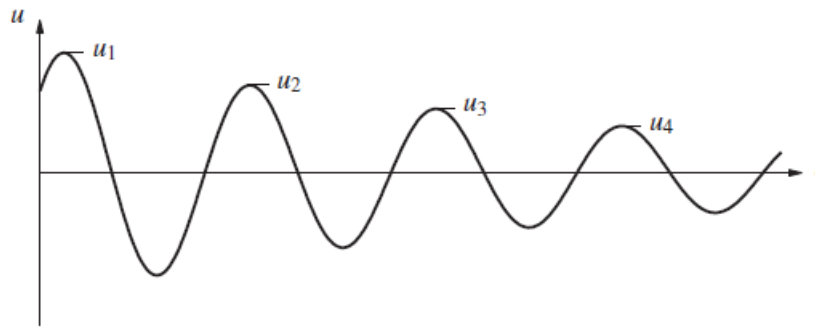


Figura 20. Gráfica de ejemplificación de la disminución de la amplitud entre crestas. (Chopra, 2014)

Resulta importante destacar que para el cálculo del amortiguamiento la señal a estudiar debe ser recortada, de manera que empiece a partir de la cresta de mayor amplitud y ésta vaya siempre disminuyendo, y termine hasta antes de que se haga plana, es decir, que el cambio de amplitudes sea casi imperceptible o nulo; un ejemplo del recorte hecho para la señal filtrada de la Figura 19 se muestra en la Figura 21. Esto es ocasionado por la vibración libre, posterior a la excitación del dispositivo, es decir, cuando ya no se le está aplicando fuerza alguna al dispositivo.

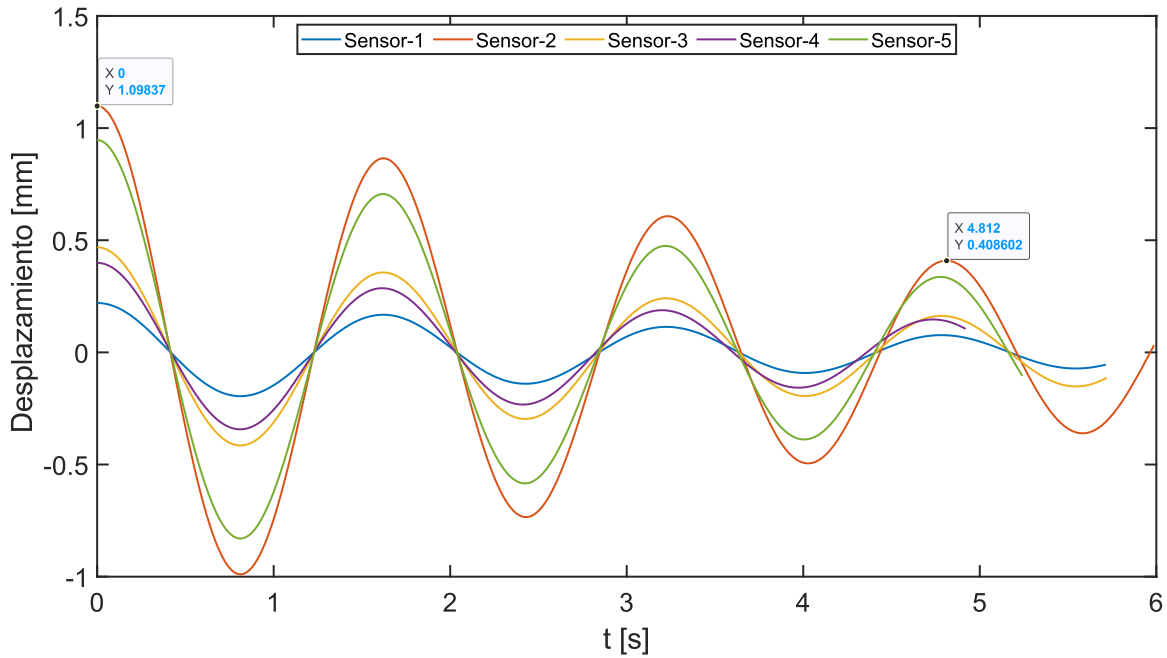


Figura 21. Señal recortada para el cálculo del amortiguamiento de la señal filtrada de la Figura 19

Posteriormente al recorte de la señal se realiza el cálculo del amortiguamiento con la ecuación expuesta con anterioridad, se muestra un ejemplo a continuación para la señal recortada de la Figura 21. En la Tabla 5 se muestra el resultado.

$$\xi = \frac{1}{2\pi j} \ln \frac{u_1}{u_{1+3}} = \frac{1}{2\pi(3)} \ln \frac{1.09837}{0.408602} = 0.05246$$

Asimismo, a partir de la señal recortada también se procedió a calcular la frecuencia fundamental del dispositivo de manera manual con la siguiente expresión:

$$f = \left(\frac{t_f - t_i}{j} \right)^{-1}$$

Donde j sigue siendo el número de ciclos durante los cuales la amplitud disminuye, t_f el tiempo que corresponde a la última cresta a estudiar y t_i el tiempo en donde se presenta la primera cresta. Para la misma prueba que se muestra en la Figura 21 se obtiene lo siguiente:

$$f = \left(\frac{t_f - t_i}{j} \right)^{-1} = \left(\frac{4.812 [s] - 0 [s]}{3} \right)^{-1} = 0.623 [Hz]$$

Finalmente, una vez identificadas las propiedades dinámicas del dispositivo en cada una de las pruebas, se procede a calcular el porcentaje de error, definido como la diferencia que hay entre los valores teóricos y experimentales, obtenidos tanto de la frecuencia (manual y espectral) como del amortiguamiento, estos valores se comparan utilizando la siguiente expresión, en donde para este ejemplo el valor aproximado es el valor experimental y el valor real es el valor teórico:

$$e = \frac{|valor\ aproximado - valor\ real|}{valor\ real} \times 100$$

En la Figura 5 se muestra un resumen de los valores obtenidos para la prueba ejemplo, además de los valores teóricos tanto para la frecuencia como para el amortiguamiento, así como el error calculado.

Tabla 5. Comparación de resultados experimental vs teórico de la prueba ejemplo

Propiedad dinámica	Valor experimental	Valor teórico	error [%]
Frecuencia espectral [Hz]	0.636	0.62	2.58
Frecuencia manual [Hz]	0.623	0.62	0.48
Amortiguamiento	0.05246	0.05	4.92

Todo este proceso se realiza para las señales obtenidas por medio de los sensores, como en el ejemplo que se ha venido desarrollando, pero también para las señales obtenidas por la cámara *phantom*. De la misma forma se realiza una comparación entre ambos métodos, en donde el valor aproximado es el valor obtenido con la cámara *phantom* y el valor real es el obtenido por medio de los sensores; esto es así debido a que hay mayor discrepancia con los valores de la cámara *phantom*, a diferencia de los valores de los sensores que son más precisos. En la Figura 6 se encuentra el error calculado con la comparación de ambos métodos, esto para la misma prueba que se ha venido ejemplificando.

Tabla 6. Comparación de resultados obtenidos con la cámara *phantom* vs sensor

Propiedad dinámica	Valor (cámara)	Valor (sensor)	error [%]
Frecuencia espectral [Hz]	0.6017	0.636	2.95
Frecuencia manual [Hz]	0.626	0.623	0.97
Amortiguamiento	0.06068	0.05246	21.36

Finalmente, se realiza el mismo proceso y las comparaciones para todas las pruebas realizadas, los resultados se muestran en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES

Después de realizar 220 pruebas, donde su metodología y procesamiento de datos fue descrita con anterioridad, se seleccionaron 90 pruebas para poder analizarlas, debido a que eran las pruebas con mayor cantidad de información y mejor calidad. Finalmente, se obtuvieron los siguientes resultados que se presentan en las siguientes secciones.

3.1 SENSORES MEDIDORES DE TIRANTE DE AGUA

Primeramente, se muestran algunas de las gráficas obtenidas gracias al procesamiento de cada una de las pruebas, en todas las imágenes se muestra lo siguiente:

- 1) En el cuadro superior izquierdo la señal original (obtenida gracias a los sensores),
- 2) del lado derecho de la señal original, se muestra su FFT,
- 3) debajo de la señal original se encuentra, del lado izquierdo, la señal filtrada con el filtro pasabandas,
- 4) del lado derecho de la señal filtrada se muestra su respectiva FFT.
- 5) Por último, en la parte inferior se encuentra la señal recortada, con la cual se identificó el amortiguamiento y la frecuencia de manera manual.

Es importante mencionar que solo se muestran las gráficas para las 3 primeras pruebas analizadas, de manera de ejemplo; las gráficas de las 90 pruebas se encuentran en el apartado de anexos.

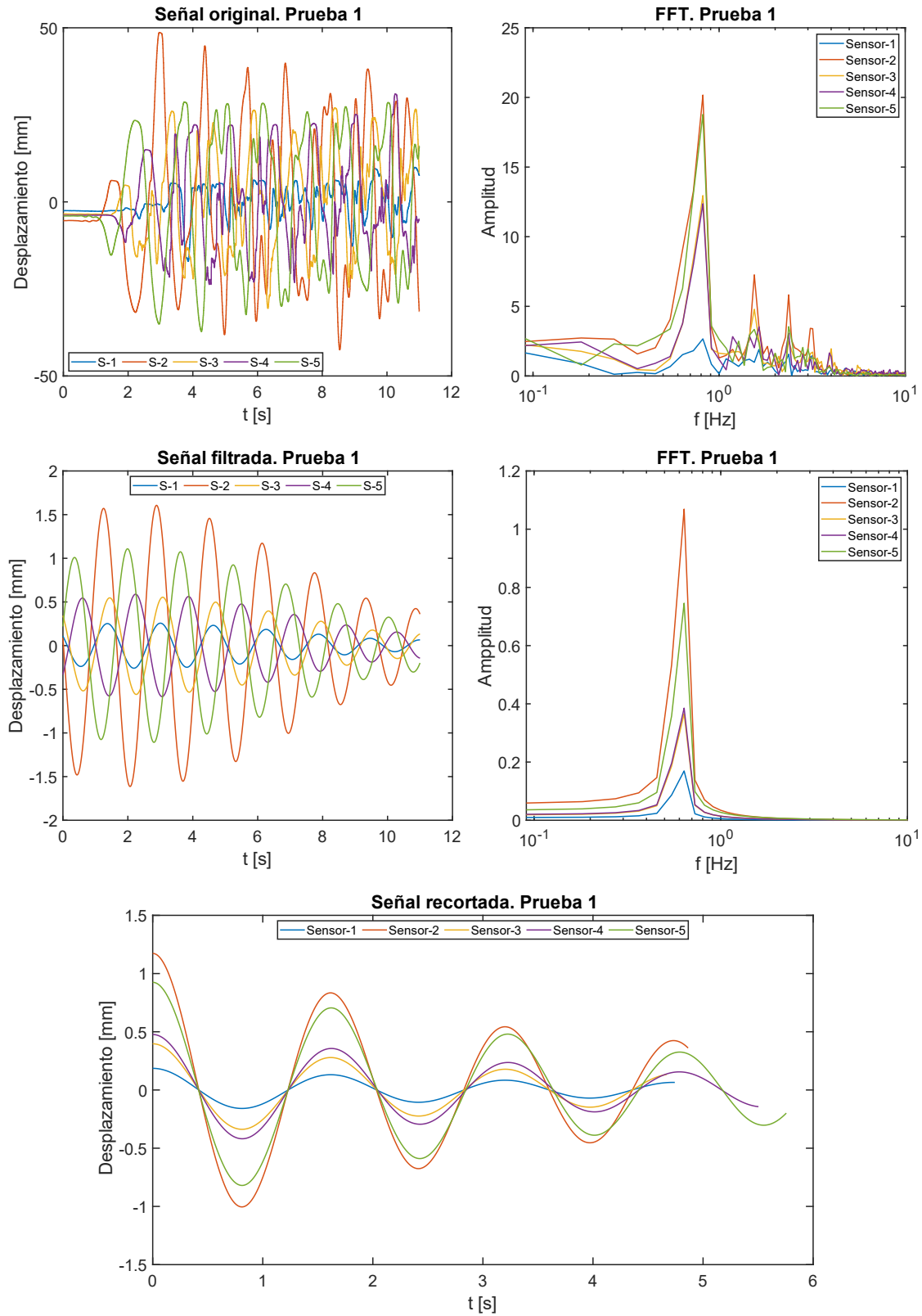


Figura 22. Graficas de la prueba 1 obtenidas a partir de los sensores

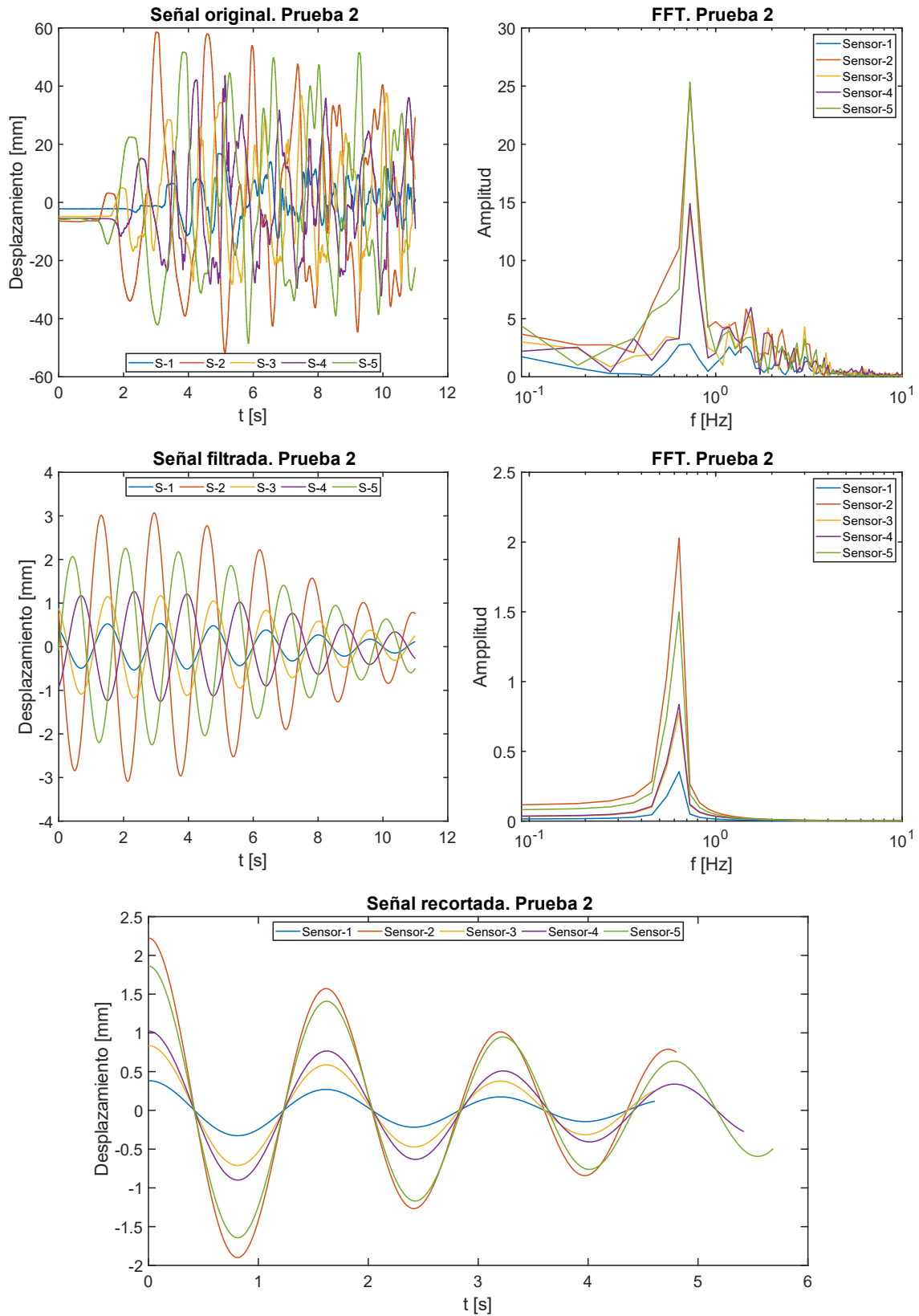


Figura 23. Graficas de la prueba 2 obtenidas a partir de los sensores

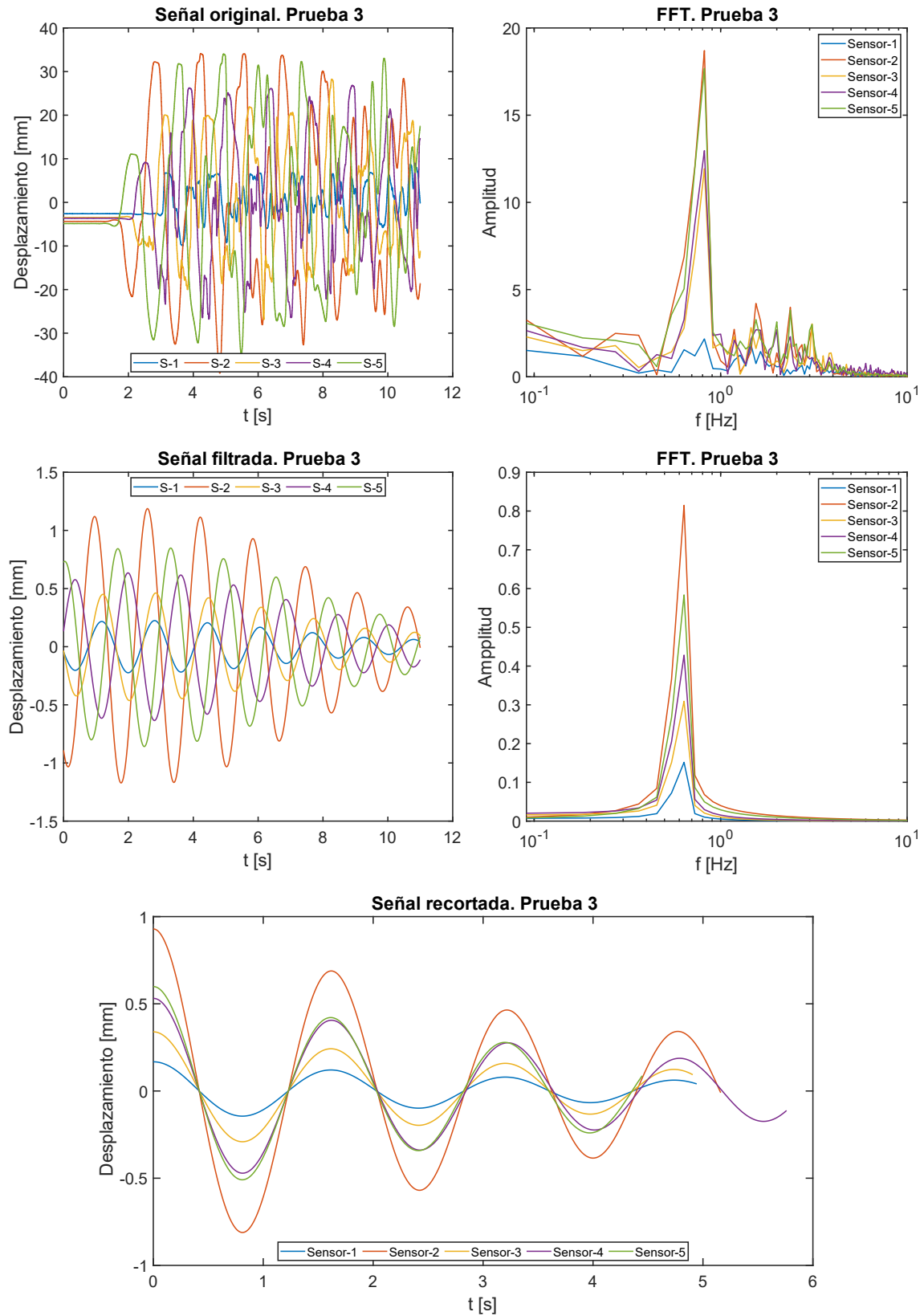


Figura 24. Graficas de la prueba 3 obtenidas a partir de los sensores

En la Tabla 7 se muestran las frecuencias calculadas de manera manual, obtenidas por cada sensor de cada una de las 90 pruebas experimentales seleccionadas, además de los promedios de la frecuencia por cada sensor y por cada prueba, también se incluyen las frecuencias mínimas y máximas por cada sensor.

Tabla 7. Frecuencias manuales obtenidas por cada sensor en cada prueba, en [Hz]

Prueba	Sensor					Promedio
	1	2	3	4	5	
1	0.635	0.634	0.625	0.627	0.627	0.630
2	0.625	0.635	0.625	0.627	0.627	0.628
3	0.633	0.629	0.634	0.627	0.626	0.630
4	0.625	0.635	0.625	0.627	0.627	0.628
5	0.625	0.625	0.623	0.627	0.627	0.625
6	0.626	0.626	0.626	0.632	0.627	0.627
7	0.625	0.635	0.625	0.627	0.627	0.628
8	0.627	0.627	0.627	0.625	0.635	0.628
9	0.627	0.627	0.628	0.625	0.632	0.628
10	0.627	0.624	0.627	0.634	0.628	0.628
11	0.627	0.626	0.627	0.633	0.627	0.628
12	0.627	0.627	0.627	0.625	0.632	0.628
13	0.624	0.625	0.624	0.630	0.627	0.626
14	0.626	0.626	0.627	0.633	0.627	0.628
15	0.628	0.627	0.630	0.624	0.625	0.627
16	0.626	0.635	0.624	0.627	0.628	0.628
17	0.628	0.627	0.630	0.624	0.625	0.627
18	0.625	0.635	0.625	0.627	0.627	0.628
19	0.625	0.633	0.625	0.628	0.626	0.627
20	0.627	0.624	0.627	0.634	0.628	0.628
21	0.626	0.625	0.626	0.628	0.628	0.627
22	0.625	0.631	0.635	0.628	0.627	0.629
23	0.625	0.625	0.623	0.629	0.627	0.626
24	0.627	0.627	0.628	0.635	0.629	0.629
25	0.634	0.628	0.632	0.627	0.625	0.629
26	0.625	0.625	0.627	0.634	0.634	0.629
27	0.626	0.635	0.625	0.627	0.627	0.628
28	0.627	0.635	0.631	0.627	0.626	0.629
29	0.626	0.631	0.624	0.627	0.625	0.627
30	0.624	0.624	0.628	0.636	0.629	0.628
31	0.633	0.625	0.628	0.635	0.631	0.630
32	0.627	0.627	0.627	0.624	0.633	0.628
33	0.625	0.634	0.635	0.627	0.626	0.629
34	0.629	0.628	0.628	0.627	0.634	0.629
35	0.625	0.634	0.625	0.627	0.627	0.628
36	0.635	0.632	0.634	0.628	0.624	0.631
37	0.635	0.632	0.634	0.628	0.627	0.631
38	0.626	0.625	0.627	0.633	0.629	0.628
39	0.628	0.626	0.627	0.632	0.631	0.629
40	0.632	0.627	0.627	0.635	0.634	0.631
41	0.627	0.627	0.627	0.625	0.628	0.627
42	0.627	0.625	0.627	0.634	0.627	0.628
43	0.628	0.634	0.625	0.628	0.627	0.628
44	0.630	0.627	0.628	0.625	0.634	0.629
45	0.629	0.626	0.627	0.623	0.632	0.628
46	0.631	0.627	0.628	0.634	0.634	0.631
47	0.627	0.624	0.626	0.632	0.627	0.627
48	0.625	0.627	0.631	0.626	0.624	0.627
49	0.627	0.624	0.625	0.631	0.627	0.627
50	0.627	0.627	0.627	0.626	0.634	0.628
51	0.627	0.627	0.627	0.624	0.634	0.628
52	0.627	0.627	0.627	0.624	0.633	0.628
53	0.627	0.627	0.630	0.624	0.624	0.627

Cont. Tabla 8. Frecuencias manuales obtenidas por cada sensor en cada prueba, en [Hz]

Prueba	Sensor					Promedio
	1	2	3	4	5	
54	0.628	0.625	0.627	0.635	0.629	0.629
55	0.627	0.626	0.627	0.625	0.630	0.627
56	0.628	0.627	0.627	0.624	0.634	0.628
57	0.627	0.624	0.627	0.631	0.630	0.628
58	0.627	0.627	0.633	0.625	0.625	0.627
59	0.627	0.625	0.625	0.628	0.627	0.626
60	0.634	0.626	0.633	0.633	0.629	0.631
61	0.635	0.631	0.635	0.628	0.625	0.631
62	0.626	0.625	0.627	0.635	0.630	0.629
63	0.623	0.623	0.627	0.633	0.625	0.626
64	0.627	0.627	0.630	0.623	0.623	0.626
65	0.627	0.625	0.626	0.625	0.631	0.627
66	0.626	0.627	0.627	0.626	0.625	0.626
67	0.629	0.629	0.629	0.635	0.635	0.631
68	0.635	0.634	0.624	0.626	0.625	0.629
69	0.625	0.626	0.627	0.629	0.627	0.627
70	0.627	0.627	0.627	0.635	0.632	0.630
71	0.623	0.625	0.624	0.630	0.627	0.626
72	0.627	0.627	0.628	0.626	0.625	0.627
73	0.625	0.635	0.624	0.627	0.627	0.628
74	0.627	0.624	0.627	0.634	0.628	0.628
75	0.627	0.627	0.627	0.625	0.635	0.628
76	0.626	0.624	0.626	0.627	0.625	0.626
77	0.625	0.627	0.627	0.633	0.632	0.629
78	0.625	0.635	0.635	0.627	0.625	0.629
79	0.628	0.626	0.627	0.635	0.632	0.629
80	0.625	0.635	0.624	0.627	0.624	0.627
81	0.627	0.625	0.627	0.631	0.628	0.628
82	0.625	0.627	0.627	0.624	0.624	0.625
83	0.630	0.633	0.625	0.627	0.627	0.628
84	0.627	0.627	0.630	0.625	0.624	0.627
85	0.628	0.632	0.625	0.627	0.627	0.628
86	0.627	0.626	0.627	0.625	0.632	0.627
87	0.630	0.627	0.632	0.627	0.625	0.628
88	0.624	0.625	0.626	0.632	0.627	0.627
89	0.626	0.624	0.625	0.629	0.626	0.626
90	0.627	0.634	0.625	0.629	0.627	0.628
Promedio	0.627	0.628	0.627	0.629	0.628	0.628
Max	0.635	0.635	0.635	0.636	0.635	0.631
Min	0.623	0.623	0.623	0.623	0.623	0.625

Asimismo, en la Tabla 9 se muestran los valores de amortiguamiento calculados de manera manual, obtenidos por cada sensor de cada una de las 90 pruebas experimentales seleccionadas, además de los promedios de los amortiguamientos por cada sensor y por cada prueba, y los valores de los amortiguamientos mínimos y máximos por cada sensor.

Tabla 9. Amortiguamientos manuales obtenidas por cada sensor en cada prueba

Prueba	Sensor					Promedio
	1	2	3	4	5	
1	0.0556	0.0540	0.0637	0.0594	0.0554	0.0576
2	0.0629	0.0550	0.0632	0.0587	0.0570	0.0593
3	0.0525	0.0531	0.0535	0.0552	0.0609	0.0550
4	0.0627	0.0552	0.0627	0.0575	0.0575	0.0591
5	0.0630	0.0636	0.0523	0.0565	0.0593	0.0589
6	0.0532	0.0600	0.0546	0.0526	0.0573	0.0555
7	0.0631	0.0549	0.0636	0.0594	0.0556	0.0593
8	0.0563	0.0590	0.0576	0.0618	0.0549	0.0579
9	0.0591	0.0555	0.0594	0.0637	0.0523	0.0580
10	0.0548	0.0526	0.0549	0.0533	0.0552	0.0541
11	0.0551	0.0596	0.0548	0.0521	0.0557	0.0555
12	0.0590	0.0553	0.0592	0.0635	0.0520	0.0578
13	0.0519	0.0627	0.0523	0.0523	0.0590	0.0556
14	0.0530	0.0596	0.0551	0.0512	0.0555	0.0549
15	0.0537	0.0585	0.0520	0.0518	0.0632	0.0558
16	0.0600	0.0556	0.0519	0.0586	0.0572	0.0566
17	0.0537	0.0586	0.0521	0.0523	0.0633	0.0560
18	0.0628	0.0558	0.0633	0.0590	0.0580	0.0598
19	0.0634	0.0524	0.0636	0.0593	0.0538	0.0585
20	0.0559	0.0525	0.0561	0.0531	0.0549	0.0545
21	0.0598	0.0637	0.0604	0.0546	0.0593	0.0596
22	0.0635	0.0543	0.0546	0.0591	0.0614	0.0586
23	0.0605	0.0624	0.0518	0.0521	0.0583	0.0570
24	0.0588	0.0584	0.0586	0.0558	0.0551	0.0573
25	0.0532	0.0549	0.0522	0.0555	0.0620	0.0555
26	0.0633	0.0603	0.0547	0.0529	0.0520	0.0566
27	0.0603	0.0541	0.0636	0.0576	0.0557	0.0583
28	0.0565	0.0552	0.0516	0.0585	0.0538	0.0551
29	0.0530	0.0515	0.0519	0.0593	0.0630	0.0557
30	0.0634	0.0514	0.0563	0.0539	0.0524	0.0555
31	0.0531	0.0522	0.0553	0.0549	0.0515	0.0534
32	0.0566	0.0552	0.0588	0.0631	0.0520	0.0571
33	0.0621	0.0527	0.0556	0.0590	0.0538	0.0566
34	0.0536	0.0575	0.0575	0.0603	0.0545	0.0567
35	0.0632	0.0537	0.0636	0.0584	0.0554	0.0589
36	0.0557	0.0523	0.0535	0.0589	0.0527	0.0546
37	0.0542	0.0522	0.0538	0.0591	0.0601	0.0559
38	0.0528	0.0525	0.0588	0.0523	0.0531	0.0539
39	0.0566	0.0532	0.0566	0.0516	0.0519	0.0540
40	0.0523	0.0557	0.0596	0.0553	0.0545	0.0555
41	0.0590	0.0582	0.0589	0.0529	0.0545	0.0567
42	0.0554	0.0529	0.0551	0.0537	0.0580	0.0550
43	0.0578	0.0558	0.0530	0.0539	0.0568	0.0555
44	0.0521	0.0591	0.0543	0.0638	0.0536	0.0566
45	0.0532	0.0551	0.0587	0.0525	0.0524	0.0544
46	0.0520	0.0593	0.0535	0.0562	0.0554	0.0553
47	0.0589	0.0604	0.0599	0.0525	0.0587	0.0581
48	0.0634	0.0595	0.0522	0.0597	0.0632	0.0596
49	0.0588	0.0637	0.0622	0.0523	0.0589	0.0592
50	0.0591	0.0580	0.0573	0.0601	0.0545	0.0578
51	0.0589	0.0566	0.0586	0.0633	0.0533	0.0581
52	0.0565	0.0554	0.0586	0.0632	0.0526	0.0572
53	0.0566	0.0575	0.0520	0.0523	0.0620	0.0561
54	0.0578	0.0533	0.0587	0.0555	0.0531	0.0557
55	0.0569	0.0545	0.0597	0.0639	0.0532	0.0576
56	0.0585	0.0571	0.0578	0.0624	0.0547	0.0581
57	0.0544	0.0522	0.0578	0.0522	0.0519	0.0537
58	0.0563	0.0563	0.0524	0.0529	0.0615	0.0559
59	0.0592	0.0632	0.0609	0.0535	0.0589	0.0591
60	0.0549	0.0604	0.0514	0.0527	0.0543	0.0547

Cont. Tabla 10. Amortiguamientos manuales obtenidas por cada sensor en cada prueba

Prueba	Sensor					Promedio
	1	2	3	4	5	
61	0.0547	0.0510	0.0544	0.0576	0.0517	0.0539
62	0.0532	0.0524	0.0577	0.0546	0.0517	0.0539
63	0.0518	0.0524	0.0580	0.0541	0.0581	0.0549
64	0.0559	0.0560	0.0518	0.0520	0.0640	0.0559
65	0.0548	0.0533	0.0627	0.0639	0.0528	0.0575
66	0.0607	0.0562	0.0586	0.0528	0.0630	0.0582
67	0.0541	0.0579	0.0582	0.0520	0.0529	0.0550
68	0.0553	0.0544	0.0621	0.0529	0.0528	0.0555
69	0.0515	0.0593	0.0564	0.0528	0.0554	0.0551
70	0.0589	0.0556	0.0577	0.0541	0.0513	0.0555
71	0.0518	0.0626	0.0521	0.0521	0.0587	0.0555
72	0.0563	0.0590	0.0544	0.0596	0.0634	0.0585
73	0.0621	0.0552	0.0634	0.0582	0.0567	0.0591
74	0.0558	0.0524	0.0563	0.0538	0.0542	0.0545
75	0.0587	0.0580	0.0560	0.0620	0.0546	0.0579
76	0.0603	0.0632	0.0605	0.0583	0.0529	0.0590
77	0.0613	0.0595	0.0570	0.0530	0.0522	0.0566
78	0.0635	0.0557	0.0561	0.0591	0.0532	0.0575
79	0.0570	0.0538	0.0590	0.0551	0.0519	0.0554
80	0.0633	0.0554	0.0638	0.0584	0.0526	0.0587
81	0.0545	0.0529	0.0593	0.0520	0.0566	0.0551
82	0.0545	0.0593	0.0594	0.0633	0.0638	0.0601
83	0.0523	0.0531	0.0637	0.0594	0.0582	0.0573
84	0.0556	0.0593	0.0524	0.0610	0.0622	0.0581
85	0.0540	0.0524	0.0620	0.0597	0.0592	0.0575
86	0.0559	0.0538	0.0590	0.0633	0.0517	0.0567
87	0.0518	0.0545	0.0515	0.0541	0.0598	0.0543
88	0.0519	0.0605	0.0539	0.0522	0.0566	0.0550
89	0.0604	0.0619	0.0530	0.0527	0.0586	0.0573
90	0.0554	0.0537	0.0637	0.0525	0.0582	0.0567
Promedio	0.0570	0.0563	0.0571	0.0564	0.0562	0.0566
Max	0.0635	0.0637	0.0638	0.0639	0.0640	0.0601
Min	0.0515	0.0510	0.0514	0.0512	0.0513	0.0534

Una manera gráfica, e inclusive más sencilla de visualizar los datos, es a través de un diagrama de caja (boxplot en inglés) o también llamado diagrama de caja y bigotes, el cual se ejemplifica en la Figura 25. Este tipo de gráfico se compone de las siguientes partes:

- De color azul se muestra la caja, la parte inferior es el percentil 25, mientras que la parte superior es el percentil 75, y significa que el 25 y 75 por ciento de los datos, respectivamente, se ubican ahí o por debajo. La distancia que hay entre ambos percentiles, es decir, la altura de la caja es el rango intercuartil.
- La línea de color rojo representa la mediana de los datos, es decir, donde la mitad de los datos están por debajo y la otra mitad por encima.
- Las líneas que se extienden por debajo y por encima de la caja son los bigotes, los cuales se ubican hasta el valor del dato más alejado, en ambos sentidos, sin superar el máximo de 1.5 veces el rango intercuartil contado a partir de los percentiles.
- Todos los demás valores, si es que existen, se consideran valores atípicos y estarán identificados gráficamente por un símbolo de “+” de color rojo, además, se situarán fuera del rango de los bigotes. Por lo tanto, se puede definir un valor atípico como un valor que está a más de 1.5 veces el rango intercuartil.

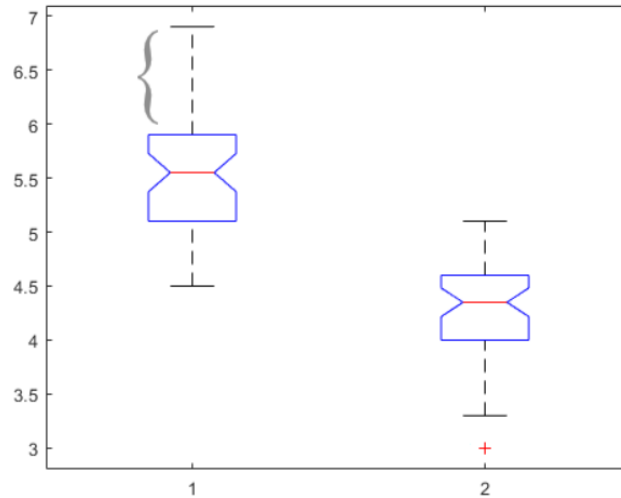


Figura 25. Ejemplo de diagrama de caja. Modificada de The MathWorks Inc. (2024).

En la Figura 26 y Figura 27, se presentan los boxplot de la distribución de las frecuencias y de los valores de amortiguamiento, respectivamente, obtenidos a partir de las señales con el método de los sensores medidores de tirante de agua.

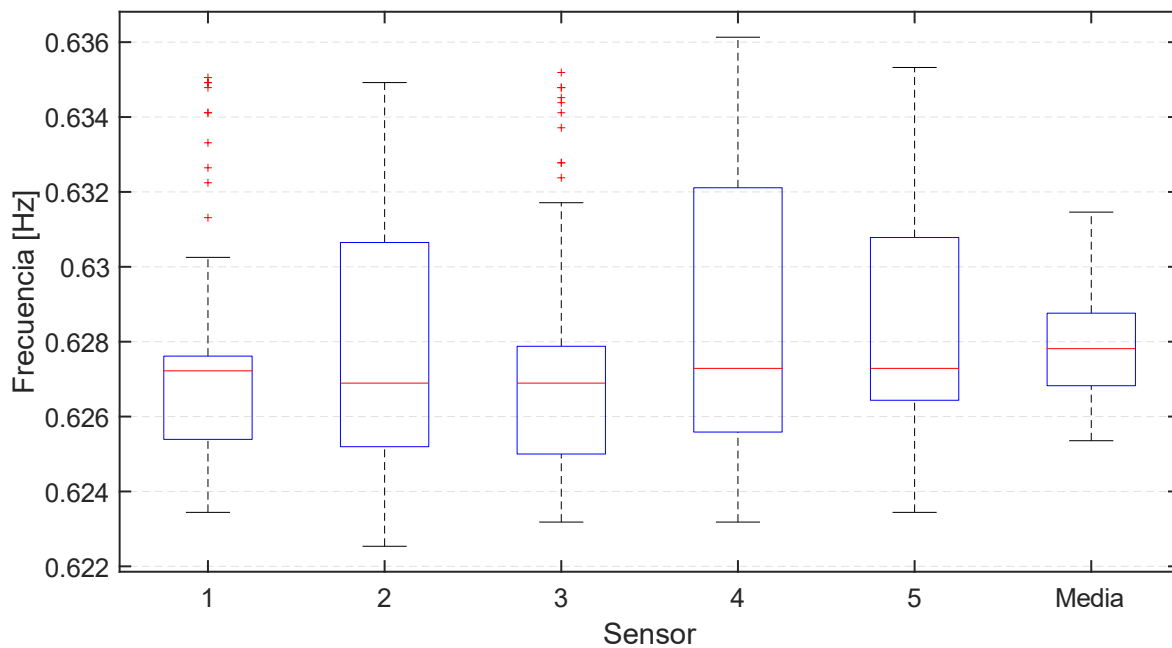


Figura 26. Boxplot de la distribución de las frecuencias por cada sensor

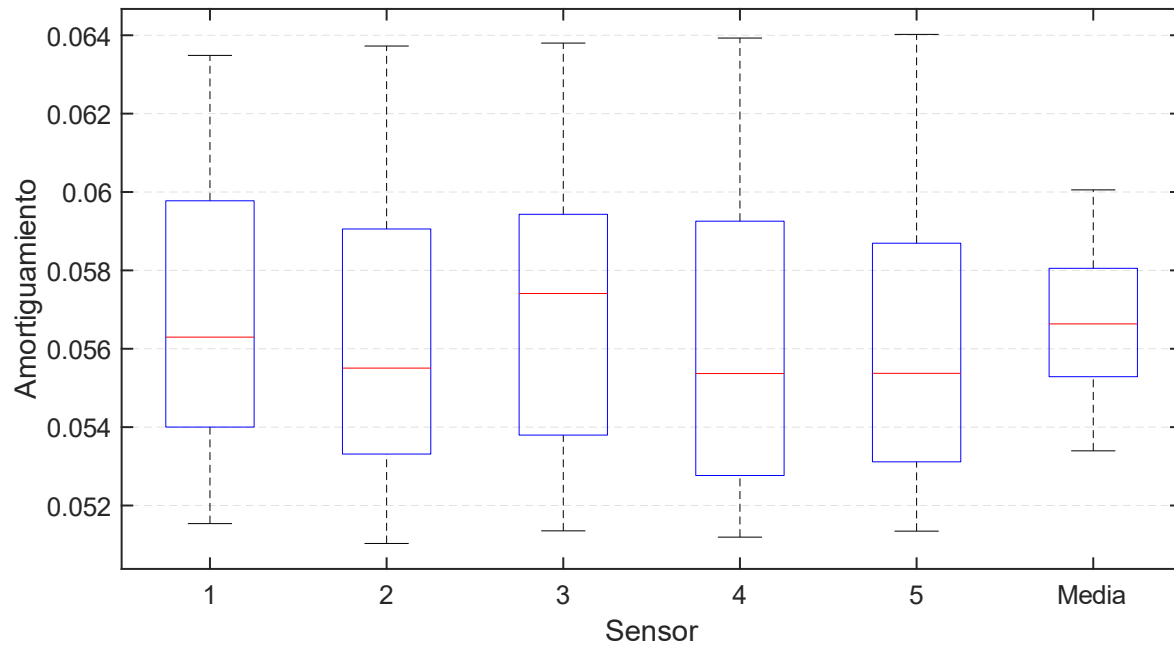


Figura 27. Boxplot de la distribución de los amortiguamientos por cada sensor

3.2 CÁMARA PHANTOM

Asimismo, se muestran algunas de las gráficas obtenidas al aplicar el procesamiento de cada una de las pruebas obtenidas por medio de la cámara de video. Únicamente se muestran las gráficas para las primeras 3 pruebas analizadas, a manera de ejemplo; las gráficas de todas las señales se encuentran en el apartado de anexos.

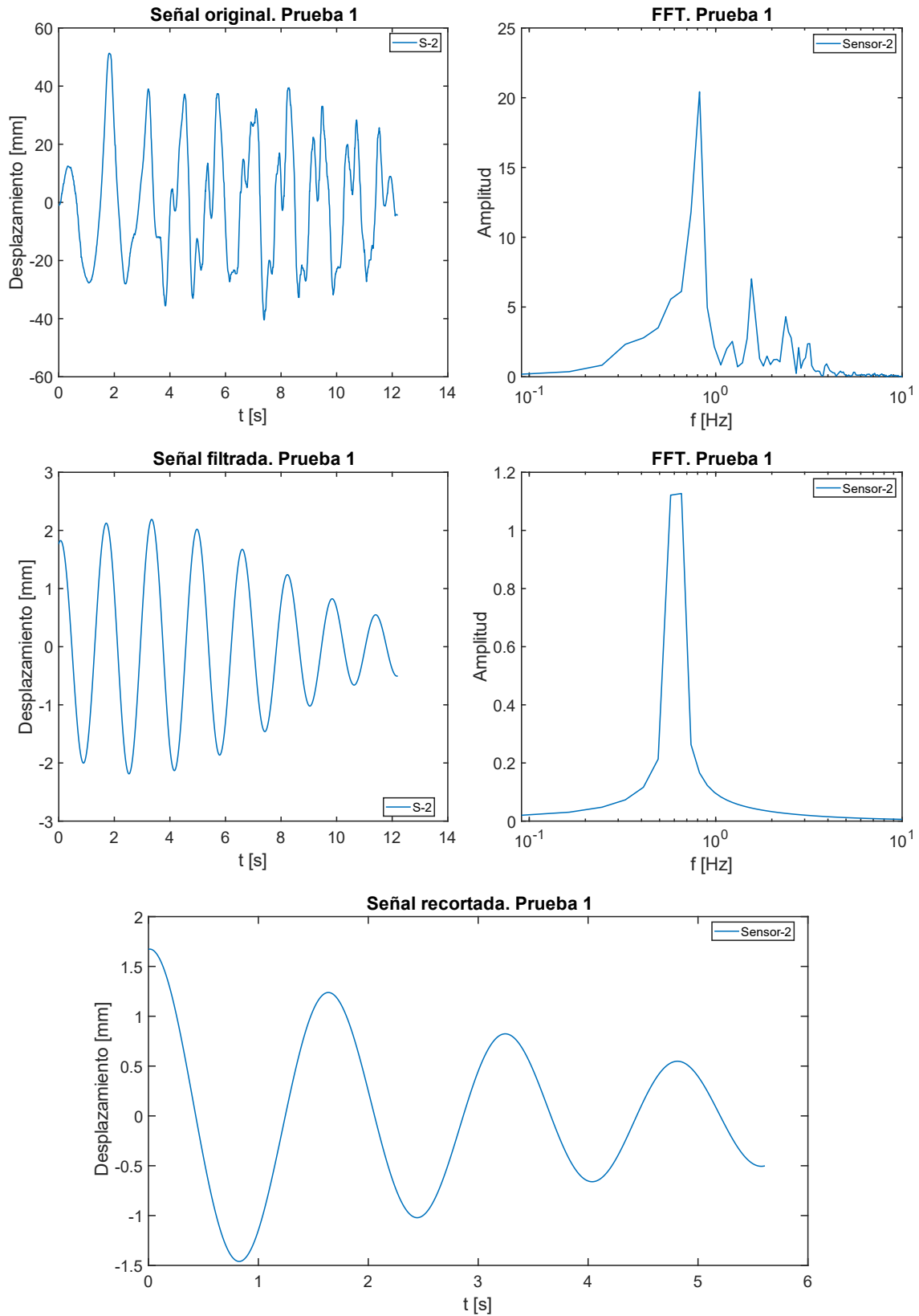


Figura 28. Gráficas de la prueba 1 obtenidas a partir de la cámara de video

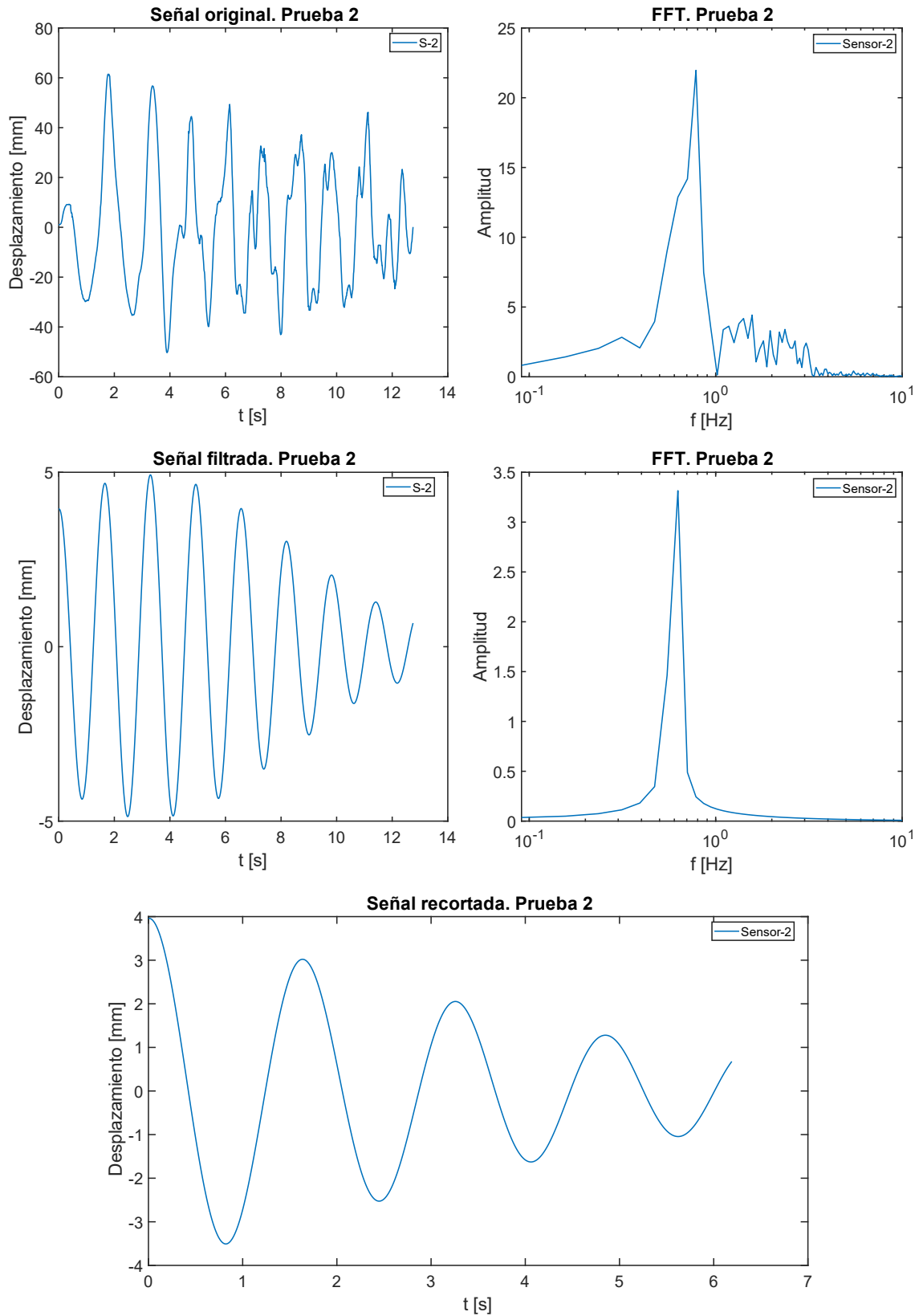


Figura 29. Gráficas de la prueba 2 obtenidas a partir de la cámara de video

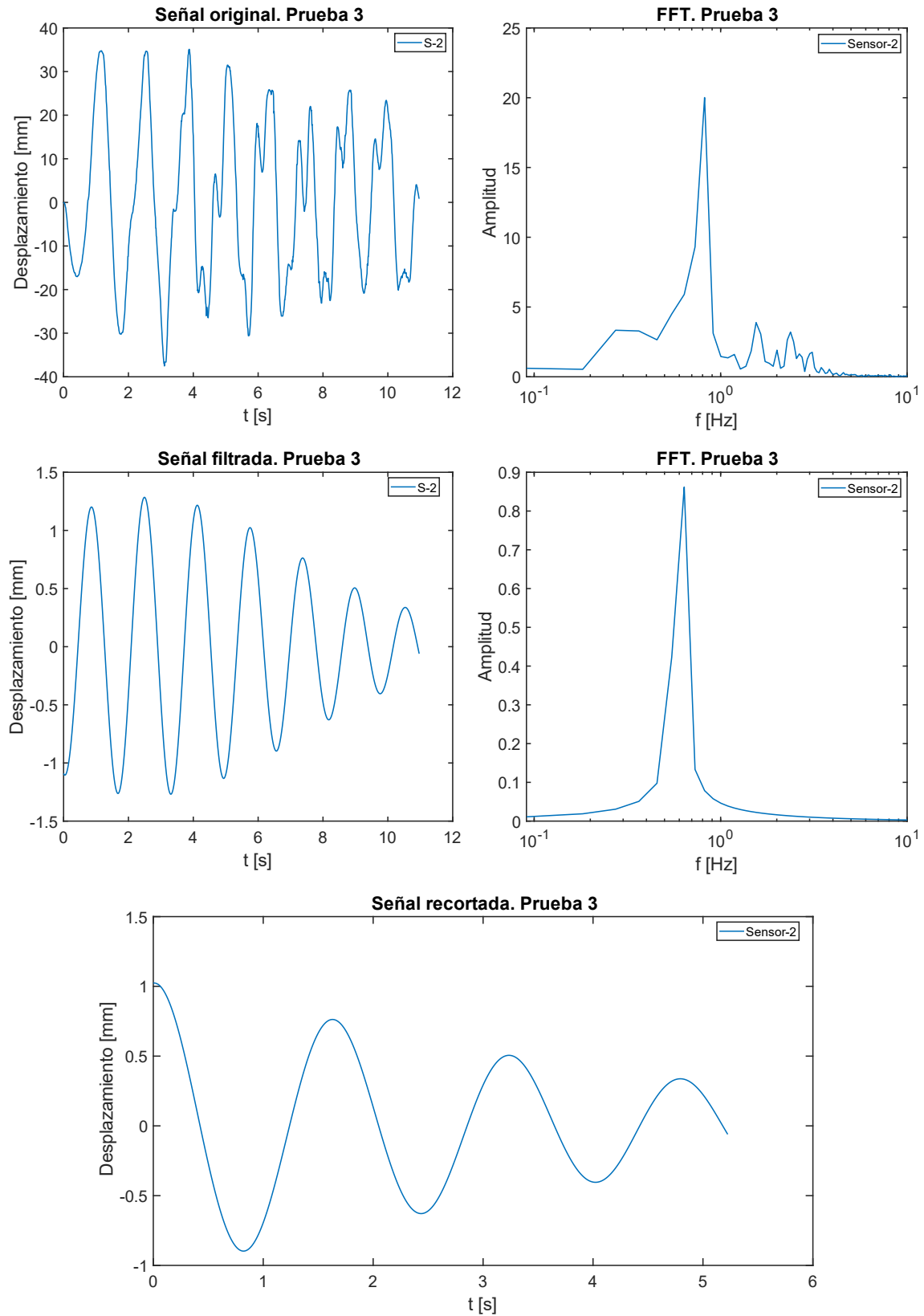


Figura 30. Gráficas de la prueba 3 obtenidas a partir de la cámara de video

En la Tabla 11 se muestra un resumen de las frecuencias calculadas de manera manual y de las frecuencias espectrales, así como de los valores de amortiguamientos identificados con la cámara de video en la ubicación del sensor 2, de cada una de las 90 pruebas experimentales seleccionadas. Además, se incluyen los promedios de cada una de las propiedades dinámicas, así como los valores mínimos y máximos.

Tabla 11. Propiedades dinámicas obtenidas en la ubicación del sensor 2 por el método de la cámara phantom

Prueba	Frecuencia manual [Hz]	Frecuencia Espectral [Hz]	Amortiguamiento
1	0.624	0.655	0.0592
2	0.620	0.627	0.0599
3	0.627	0.638	0.0589
4	0.625	0.626	0.0622
5	0.621	0.614	0.0580
6	0.621	0.611	0.0547
7	0.617	0.643	0.0536
8	0.625	0.609	0.0605
9	0.616	0.615	0.0510
10	0.612	0.591	0.0550
11	0.613	0.578	0.0528
12	0.615	0.614	0.0512
13	0.618	0.590	0.0539
14	0.615	0.595	0.0499
15	0.614	0.595	0.0509
16	0.612	0.585	0.0520
17	0.626	0.645	0.0525
18	0.621	0.616	0.0584
19	0.618	0.605	0.0526
20	0.626	0.602	0.0607
21	0.612	0.634	0.0528
22	0.623	0.608	0.0597
23	0.626	0.618	0.0586
24	0.635	0.648	0.0580
25	0.627	0.586	0.0508
26	0.626	0.612	0.0545
27	0.622	0.602	0.0555
28	0.620	0.579	0.0581
29	0.618	0.591	0.0532
30	0.614	0.602	0.0517
31	0.616	0.635	0.0517
32	0.617	0.593	0.0535
33	0.613	0.609	0.0485
34	0.620	0.608	0.0564
35	0.612	0.613	0.0471
36	0.619	0.639	0.0512
37	0.615	0.629	0.0509
38	0.617	0.611	0.0499
39	0.617	0.608	0.0515
40	0.615	0.613	0.0516
41	0.614	0.606	0.0470
42	0.611	0.606	0.0498
43	0.613	0.591	0.0515
44	0.615	0.630	0.0510
45	0.613	0.621	0.0500
46	0.615	0.625	0.0522
47	0.614	0.632	0.0512
48	0.614	0.615	0.0558
49	0.610	0.612	0.0521

Cont. Tabla 12. Propiedades dinámicas obtenidas en la ubicación del sensor 2 por el método de la cámara phantom

Prueba	Frecuencia manual [Hz]	Frecuencia Espectral [Hz]	Amortiguamiento
50	0.625	0.645	0.0631
51	0.633	0.629	0.0528
52	0.622	0.654	0.0556
53	0.621	0.623	0.0557
54	0.620	0.601	0.0583
55	0.620	0.601	0.0583
56	0.629	0.621	0.0527
57	0.620	0.650	0.0566
58	0.619	0.623	0.0519
59	0.618	0.636	0.0496
60	0.623	0.637	0.0495
61	0.615	0.581	0.0476
62	0.616	0.599	0.0476
63	0.597	0.593	0.0615
64	0.613	0.596	0.0483
65	0.616	0.635	0.0518
66	0.615	0.585	0.0467
67	0.618	0.618	0.0483
68	0.623	0.634	0.0563
69	0.626	0.614	0.0610
70	0.619	0.616	0.0497
71	0.624	0.595	0.0508
72	0.625	0.651	0.0628
73	0.627	0.616	0.0613
74	0.628	0.614	0.0539
75	0.620	0.636	0.0577
76	0.613	0.611	0.0478
77	0.614	0.593	0.0489
78	0.615	0.614	0.0492
79	0.617	0.620	0.0503
80	0.615	0.613	0.0490
81	0.612	0.614	0.0473
82	0.612	0.593	0.0509
83	0.617	0.621	0.0516
84	0.616	0.619	0.0521
85	0.615	0.595	0.0526
86	0.626	0.598	0.0592
87	0.620	0.616	0.0551
88	0.619	0.646	0.0589
89	0.619	0.639	0.0583
90	0.619	0.608	0.0552
Promedio	0.619	0.615	0.0537
Máx.	0.635	0.655	0.0631
Mín.	0.597	0.578	0.0467

En la Figura 31 y Figura 32, se encuentran los boxplot de la distribución de las frecuencias calculadas de forma manual y las espectrales, así como de los valores de amortiguamientos, respectivamente, obtenidos a partir de las señales con el método de la cámara de video de alta velocidad.

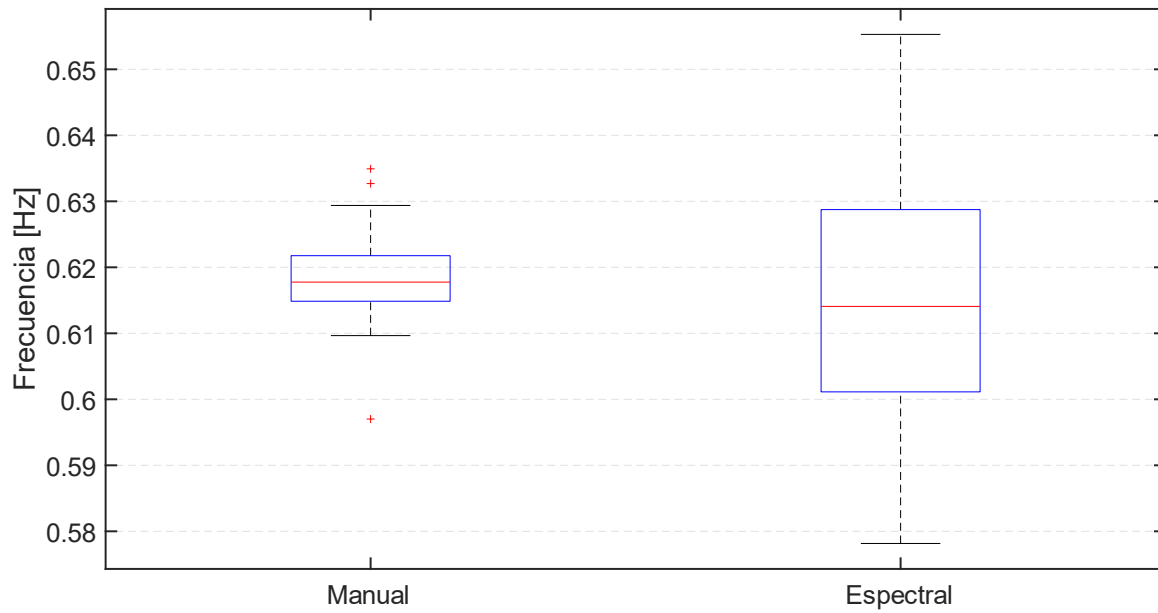


Figura 31. Boxplot de la distribución de las frecuencias manuales y espectrales de la cámara phantom

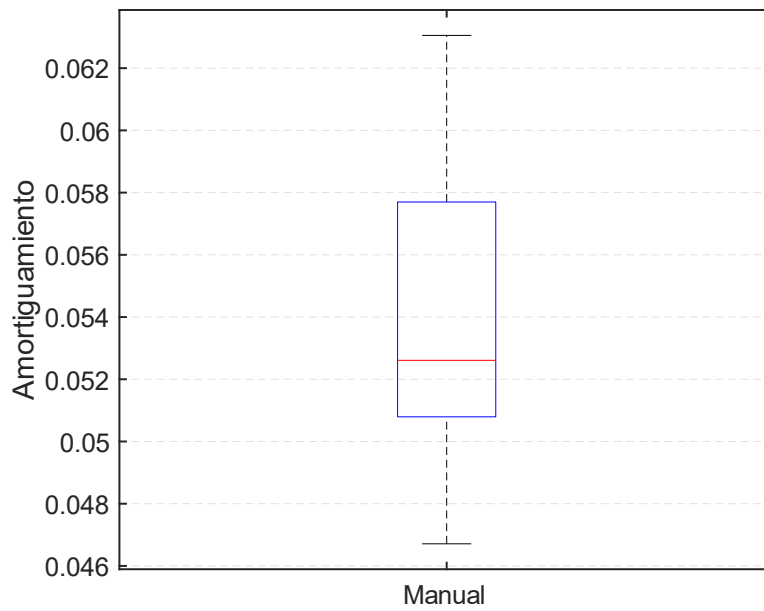


Figura 32. Boxplot de la distribución de los amortiguamientos de la cámara phantom

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 COMPARACIÓN DE RESULTADOS

En esta sección se comparan gráficamente las señales obtenidas al emplear las dos metodologías de registro (i.e., cámara *phantom* y medidores de niveles de tirante de agua); como se ha mencionado anteriormente, se contó con 5 sensores y con una cámara de video de alta velocidad que registro la variación del tirante de agua en la ubicación del sensor 2, por lo que, ésta es la única ubicación en donde se pueden comparar ambos métodos de prueba.

En la Figura 33, Figura 34 y Figura 35 se presenta la comparación gráfica de las primeras 3 pruebas analizadas. Cada figura consta de 5 gráficas y se muestra lo siguiente:

- 1) En el cuadro superior izquierdo la señal original (obtenida por ambos métodos),
- 2) del lado derecho de la señal original, se muestra su FFT,
- 3) debajo de la señal original se encuentra, del lado izquierdo, la señal filtrada con el filtro pasabandas,
- 4) del lado derecho de la señal filtrada se muestra su respectiva FFT.
- 5) Por último, en la parte inferior se encuentra la señal recortada, con la cual se identificó el amortiguamiento y la frecuencia de manera manual, para ambos métodos.

Además, se puede observar a simple vista que las señales tienen una muy buena aproximación, pero para saber con exactitud la diferencia que existe entre ambos métodos se procederá a calcular el porcentaje de error que existe entre ambos, y cada uno de los métodos con la frecuencia y el valor de amortiguamiento teórico del dispositivo estudiado.

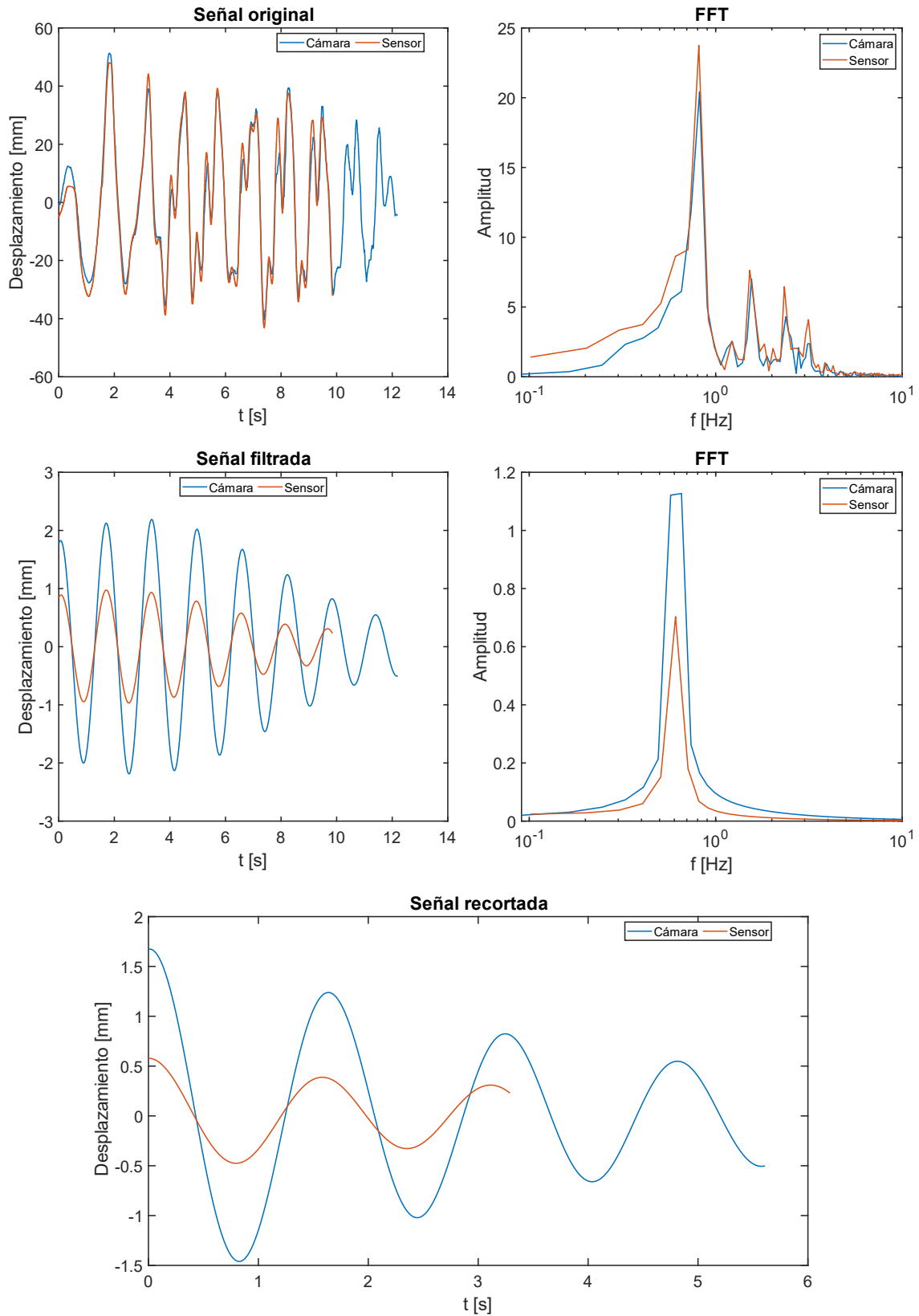


Figura 33. Comparación gráfica entre la cámara de video y el sensor 2. Prueba 1

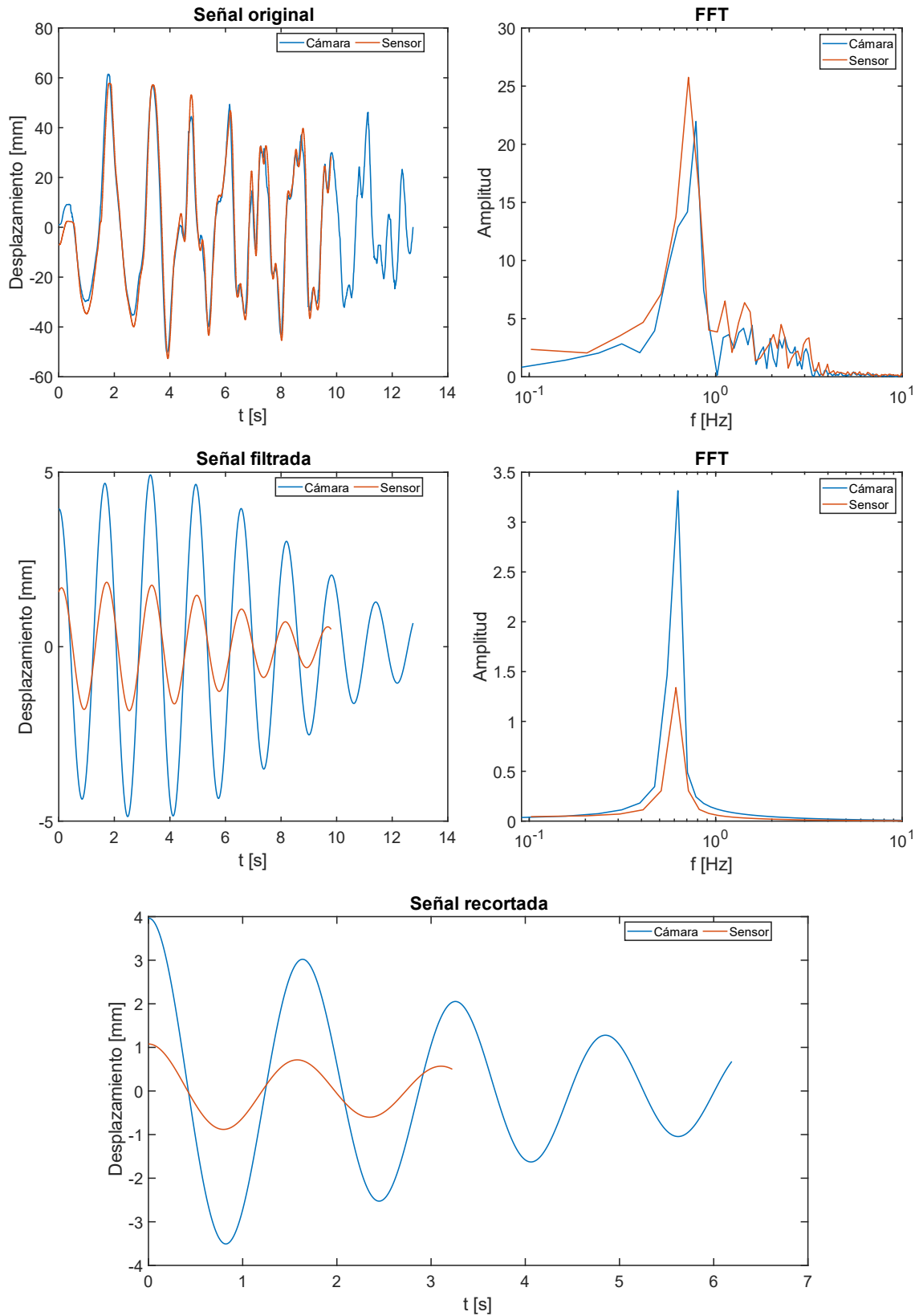


Figura 34. Comparación gráfica entre la cámara de video y el sensor 2. Prueba 2

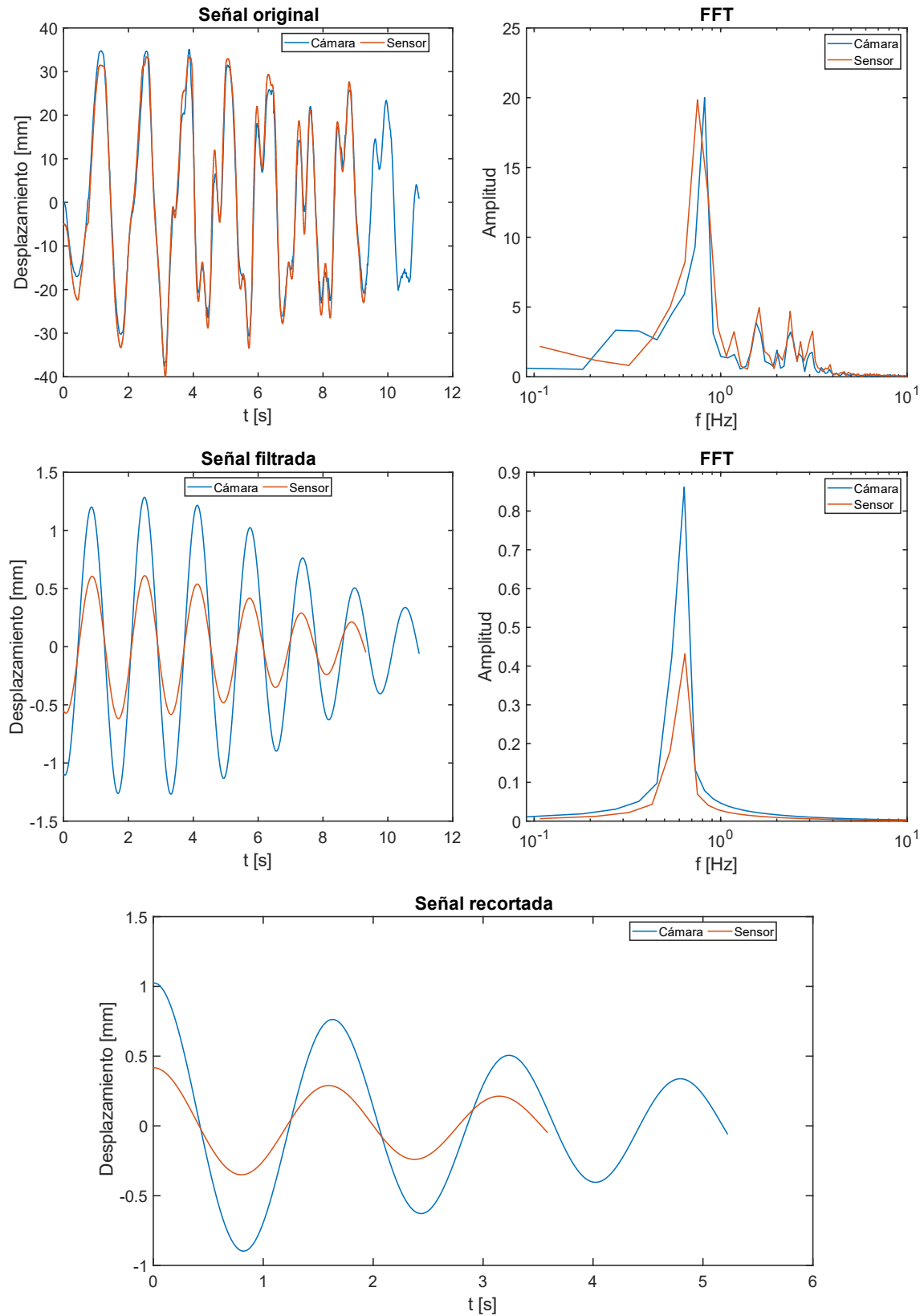


Figura 35. Comparación gráfica entre la cámara de video y el sensor 2. Prueba 3

4.2 COMPARACIÓN ENTRE LOS METODOS DE PRUEBA

En la Figura 36 se muestra una distribución de las frecuencias obtenidas con ambos métodos, sensores y cámara *phantom*, se observa que hay mayor dispersión de los datos con el método de la cámara de video que con el método de los sensores; asimismo, se observa que para la cámara *phantom* hay mayor dispersión en las frecuencias espectrales que en las calculadas manualmente; asimismo, entre mayor sea la dispersión es probable que haya mayor error comparando cada uno de los valores con los valores teóricos.

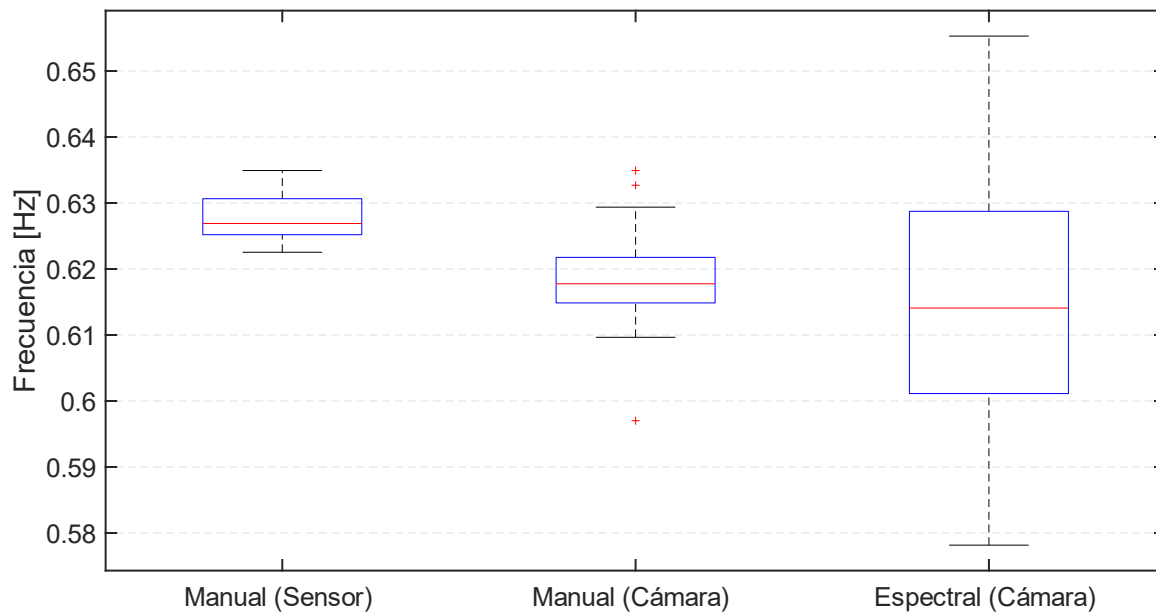


Figura 36. Boxplot de la distribución de las frecuencias obtenidas manualmente con ambos métodos (sensor y cámara) y la frecuencia espectral obtenida de las señales de la cámara *phantom*

Por otro lado, sucede algo parecido con los valores de amortiguamiento. Se puede observar en la Figura 37 que también es mayor la dispersión de datos para el método de la cámara, en comparación con el método de los sensores, asimismo se observa que para el método de los sensores ningún valor es menor al teórico (recordando que el ALS fue diseñado para un amortiguamiento del 5%) y ocurre lo contrario con el método de la cámara de video.

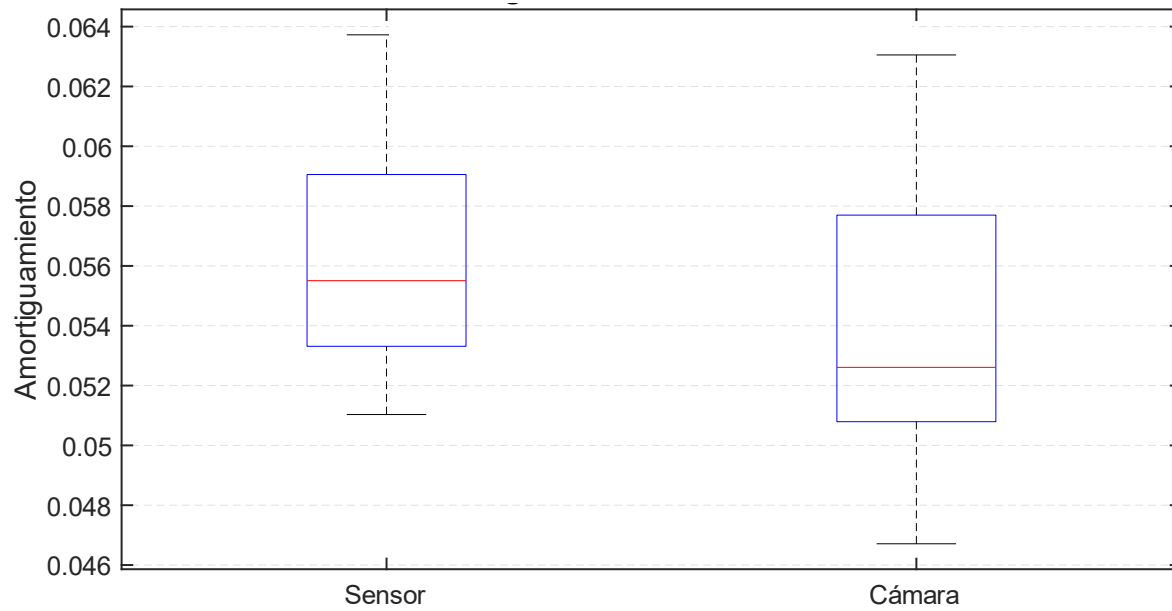


Figura 37. Boxplot de la distribución de los amortiguamientos obtenidos manualmente con ambos métodos, para el sensor 2 y la cámara de video

Comparando ambos métodos de manera numérica, en la Tabla 13 se muestra un resumen de las frecuencias calculadas manualmente y por ambos métodos, tomando como valor real el valor obtenido con el sensor, debido a que tiene menor dispersión.

Tabla 13. Resumen de las frecuencias obtenidas manualmente por ambos métodos y cálculo del error entre ellos

Prueba	Cámara [Hz]	Sensor [Hz]	error [%]
1	0.624	0.634	1.63
2	0.620	0.635	2.37
3	0.627	0.629	0.28
4	0.625	0.635	1.54
5	0.621	0.625	0.58
6	0.621	0.626	0.80
7	0.617	0.635	2.74
8	0.625	0.627	0.37
9	0.616	0.627	1.78
10	0.612	0.624	1.92
11	0.613	0.626	2.06
12	0.615	0.627	1.87
13	0.618	0.625	1.13
14	0.615	0.626	1.81
15	0.614	0.627	2.01
16	0.612	0.635	3.63
17	0.626	0.627	0.16
18	0.621	0.635	2.14
19	0.618	0.633	2.39
20	0.626	0.624	0.38
21	0.612	0.625	2.04
22	0.623	0.631	1.22
23	0.626	0.625	0.24
24	0.635	0.627	1.21
25	0.627	0.628	0.07
26	0.626	0.625	0.14
27	0.622	0.635	2.01

Cont. Tabla 14. Resumen de las frecuencias obtenidas manualmente por ambos métodos y cálculo del error entre ellos

Prueba	Cámara [Hz]	Sensor [Hz]	error [%]
28	0.620	0.635	2.41
29	0.618	0.631	2.08
30	0.614	0.624	1.54
31	0.616	0.625	1.50
32	0.617	0.627	1.64
33	0.613	0.634	3.29
34	0.620	0.628	1.31
35	0.612	0.634	3.54
36	0.619	0.632	2.10
37	0.615	0.632	2.65
38	0.617	0.625	1.27
39	0.617	0.626	1.38
40	0.615	0.627	1.89
41	0.614	0.627	2.14
42	0.611	0.625	2.31
43	0.613	0.634	3.42
44	0.615	0.627	1.89
45	0.613	0.626	2.10
46	0.615	0.627	1.78
47	0.614	0.624	1.61
48	0.614	0.627	2.08
49	0.610	0.624	2.30
50	0.625	0.627	0.40
51	0.633	0.627	0.87
52	0.622	0.627	0.81
53	0.621	0.627	0.96
54	0.620	0.625	0.80
55	0.620	0.626	0.92
56	0.629	0.627	0.34
57	0.620	0.624	0.63
58	0.619	0.627	1.32
59	0.618	0.625	1.08
60	0.623	0.626	0.49
61	0.615	0.631	2.42
62	0.616	0.625	1.39
63	0.597	0.623	4.10
64	0.613	0.627	2.24
65	0.616	0.625	1.47
66	0.615	0.627	1.98
67	0.618	0.629	1.75
68	0.623	0.634	1.86
69	0.626	0.626	0.01
70	0.619	0.627	1.42
71	0.624	0.625	0.10
72	0.625	0.627	0.37
73	0.627	0.635	1.16
74	0.628	0.624	0.73
75	0.620	0.627	1.25
76	0.613	0.624	1.87
77	0.614	0.627	1.93
78	0.615	0.635	3.04
79	0.617	0.626	1.47
80	0.615	0.635	3.12
81	0.612	0.625	2.08
82	0.612	0.627	2.41
83	0.617	0.633	2.50
84	0.616	0.627	1.80
85	0.615	0.632	2.71
86	0.626	0.626	0.03
87	0.620	0.627	1.23
88	0.619	0.625	1.06
89	0.619	0.624	0.94
90	0.619	0.634	2.39
Promedio	0.619	0.628	1.60
Max	0.635	0.635	4.10
Min	0.597	0.623	0.01

Se observa en la Tabla 13 y en la Figura 38 que el error mínimo es muy cercano al 0%, mientras que el máximo es de 4.1%, esto es que, a pesar de que con el método de la cámara de video se obtiene una mayor dispersión, dicha dispersión no es tan grande, llegando inclusive a ser menor del 0.1% el error en algunas pruebas. Además, de tener un promedio de error del 1.6% para todas las pruebas.

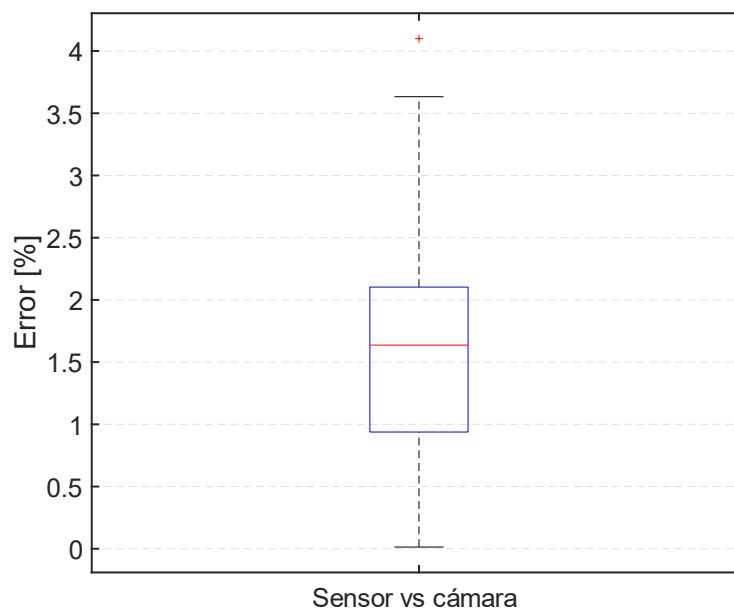


Figura 38. Boxplot de la distribución de los errores comparando las frecuencias obtenidas manualmente con ambos métodos, para el sensor 2 y la cámara de video

Asimismo, se muestra en la Tabla 15 un resumen de los amortiguamientos calculados manualmente y por ambos métodos; de igual manera tomando como valor real el valor obtenido con el sensor, debido a que tiene menor dispersión.

Tabla 15. Resumen de los amortiguamientos obtenidas por ambos métodos y cálculo del error entre ellos

Prueba	Cámara	Sensor	error [%]
1	0.0592	0.0540	9.67
2	0.0599	0.0550	8.88
3	0.0589	0.0531	10.92
4	0.0622	0.0552	12.76
5	0.0580	0.0636	8.84
6	0.0547	0.0600	8.77
7	0.0536	0.0549	2.37
8	0.0605	0.0590	2.56
9	0.0510	0.0555	7.99
10	0.0550	0.0526	4.53
11	0.0528	0.0596	11.43
12	0.0512	0.0553	7.33
13	0.0539	0.0627	14.03
14	0.0499	0.0596	16.28
15	0.0509	0.0585	12.95
16	0.0520	0.0556	6.36
17	0.0525	0.0586	10.38
18	0.0584	0.0558	4.71
19	0.0526	0.0524	0.27
20	0.0607	0.0525	15.68
21	0.0528	0.0637	17.19
22	0.0597	0.0543	10.03
23	0.0586	0.0624	6.09
24	0.0580	0.0584	0.69
25	0.0508	0.0549	7.47

Cont. Tabla 16. Resumen de los amortiguamientos obtenidas por ambos métodos y cálculo del error entre ellos

Prueba	Cámara	Sensor	error [%]
26	0.0545	0.0603	9.63
27	0.0555	0.0541	2.57
28	0.0581	0.0552	5.25
29	0.0532	0.0515	3.29
30	0.0517	0.0514	0.70
31	0.0517	0.0522	0.97
32	0.0535	0.0552	3.05
33	0.0485	0.0527	7.92
34	0.0564	0.0575	2.04
35	0.0471	0.0537	12.23
36	0.0512	0.0523	2.10
37	0.0509	0.0522	2.34
38	0.0499	0.0525	5.05
39	0.0515	0.0532	3.10
40	0.0516	0.0557	7.26
41	0.0470	0.0582	19.30
42	0.0498	0.0529	5.87
43	0.0515	0.0558	7.73
44	0.0510	0.0591	13.58
45	0.0500	0.0551	9.25
46	0.0522	0.0593	11.91
47	0.0512	0.0604	15.16
48	0.0558	0.0595	6.18
49	0.0521	0.0637	18.14
50	0.0631	0.0580	8.69
51	0.0528	0.0566	6.80
52	0.0556	0.0554	0.48
53	0.0557	0.0575	3.13
54	0.0583	0.0533	9.45
55	0.0583	0.0545	7.06
56	0.0527	0.0571	7.66
57	0.0566	0.0522	8.27
58	0.0519	0.0563	7.85
59	0.0496	0.0632	21.55
60	0.0495	0.0604	17.98
61	0.0476	0.0510	6.67
62	0.0476	0.0524	9.31
63	0.0615	0.0524	17.42
64	0.0483	0.0560	13.81
65	0.0518	0.0533	2.85
66	0.0467	0.0562	16.83
67	0.0483	0.0579	16.62
68	0.0563	0.0544	3.45
69	0.0610	0.0593	2.90
70	0.0497	0.0556	10.60
71	0.0508	0.0626	18.89
72	0.0628	0.0590	6.37
73	0.0613	0.0552	10.92
74	0.0539	0.0524	2.87
75	0.0577	0.0580	0.57
76	0.0478	0.0632	24.28
77	0.0489	0.0595	17.74
78	0.0492	0.0557	11.76
79	0.0503	0.0538	6.44
80	0.0490	0.0554	11.67
81	0.0473	0.0529	10.65
82	0.0509	0.0593	14.19
83	0.0516	0.0531	2.96
84	0.0521	0.0593	12.18
85	0.0526	0.0524	0.52
86	0.0592	0.0538	10.04
87	0.0551	0.0545	1.07
88	0.0589	0.0605	2.59
89	0.0583	0.0619	5.84
90	0.0552	0.0537	2.84
Promedio	0.0537	0.0563	8.5173
Max	0.0631	0.0637	24.282
Min	0.0467	0.0510	0.270

De acuerdo con la Tabla 15 y la Figura 39 hay diversos porcentajes de error que son menores al 1%, pero el máximo se encuentra en más de 24%, esto es, hay una mayor dispersión de los errores comparando los valores de amortiguamiento que con la frecuencia; asimismo, lo anterior indica que hay una mayor diferencia en el valor de amortiguamiento calculado con ambos métodos. Además, resulta importante destacar que por el método de la cámara de video se encontraron valores de amortiguamiento por debajo del valor teórico, por ejemplo, el menor valor que se obtuvo fue de 4.6%, situación que con el método de los sensores no ocurrió, ya que su valor de amortiguamiento identificado fue menor de 5.1%.

De la misma manera también existen valores de amortiguamiento mayores al 6% con ambos métodos, que implica una desviación del valor teórico, pero para esta propiedad mientras mayor sea su valor es mejor, puesto que, como se ha venido señalando en este documento, el valor de amortiguamiento es el proceso por el cual las vibraciones disminuyen, por lo tanto, mientras mayor sea el amortiguamiento las vibraciones disminuirán en mayor medida.

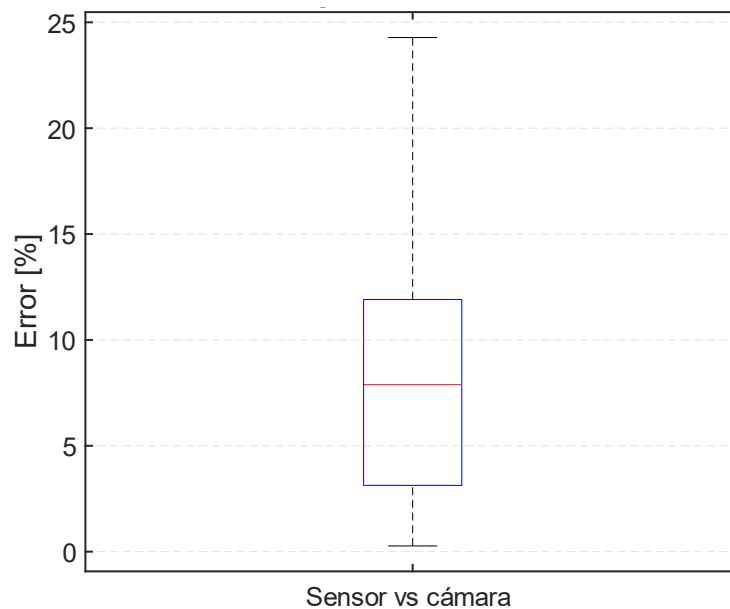


Figura 39. Boxplot de la distribución de los errores comparando los amortiguamientos obtenidos manualmente con ambos métodos, para el sensor 2 y la cámara de video

4.3 COMPARACIÓN DE LOS MÉTODOS DE PRUEBA CON EL MODELO TEÓRICO

Una vez comparados los métodos de prueba entre sí, se procede a comparar ambos métodos contra los valores teóricos, esto es, los valores con los que se diseñó el amortiguador líquido sintonizado; esto con el propósito de investigar que método es el más certero y confiable.

4.3.1 CÁMARA PHANTOM Y MODELO TEÓRICO

En la Tabla 17 se muestra una comparación del error entre las frecuencias experimentales, tanto manuales como espectrales, obtenidas de las señales con a la cámara *phantom*, contra la frecuencia teórica del dispositivo.

Tabla 17. Comparación de las frecuencias manuales y espectrales obtenidas experimentalmente con la cámara phantom contra las frecuencias teóricas y cálculo del error porcentual

Prueba	Valor teórico [Hz]	Valor experimental de la frecuencia manual [Hz]	error [%]	Valor experimental de la frecuencia espectral [Hz]	error [%]
1	0.620	0.624	0.63	0.655	5.69
2	0.620	0.620	0.06	0.627	1.14
3	0.620	0.627	1.16	0.638	2.87
4	0.620	0.625	0.81	0.626	1.03
5	0.620	0.621	0.15	0.614	0.93
6	0.620	0.621	0.15	0.611	1.50
7	0.620	0.617	0.44	0.643	3.75
8	0.620	0.625	0.81	0.609	1.75
9	0.620	0.616	0.66	0.615	0.74
10	0.620	0.612	1.33	0.591	4.75
11	0.620	0.613	1.05	0.578	6.75
12	0.620	0.615	0.74	0.614	0.95
13	0.620	0.618	0.36	0.590	4.77
14	0.620	0.615	0.83	0.595	3.99
15	0.620	0.614	0.91	0.595	4.04
16	0.620	0.612	1.33	0.585	5.68
17	0.620	0.626	0.94	0.645	3.99
18	0.620	0.621	0.15	0.616	0.68
19	0.620	0.618	0.36	0.605	2.37
20	0.620	0.626	0.98	0.602	2.95
21	0.620	0.612	1.25	0.634	2.31
22	0.620	0.623	0.46	0.608	1.97
23	0.620	0.626	0.98	0.618	0.38
24	0.620	0.635	2.41	0.648	4.53
25	0.620	0.627	1.20	0.586	5.52
26	0.620	0.626	0.98	0.612	1.25
27	0.620	0.622	0.28	0.602	2.88
28	0.620	0.620	0.06	0.579	6.56
29	0.620	0.618	0.36	0.591	4.71
30	0.620	0.614	0.89	0.602	2.92
31	0.620	0.616	0.64	0.635	2.46
32	0.620	0.617	0.54	0.593	4.39
33	0.620	0.613	1.17	0.609	1.80
34	0.620	0.620	0.06	0.608	2.00
35	0.620	0.612	1.32	0.613	1.20
36	0.620	0.619	0.23	0.639	3.06
37	0.620	0.615	0.83	0.629	1.44
38	0.620	0.617	0.54	0.611	1.42
39	0.620	0.617	0.44	0.608	1.86
40	0.620	0.615	0.83	0.613	1.15
41	0.620	0.614	1.00	0.606	2.20
42	0.620	0.611	1.50	0.606	2.20
43	0.620	0.613	1.18	0.591	4.61
44	0.620	0.615	0.74	0.630	1.55
45	0.620	0.613	1.08	0.621	0.23
46	0.620	0.615	0.74	0.625	0.81
47	0.620	0.614	0.91	0.632	1.97
48	0.620	0.614	1.00	0.615	0.80

Cont. Tabla 18. Comparación de las frecuencias manuales y espectrales obtenidas experimentalmente con la cámara phantom contra las frecuencias teóricas y cálculo del error porcentual

Prueba	Valor teórico [Hz]	Valor experimental de la frecuencia manual [Hz]	error [%]	Valor experimental de la frecuencia espectral [Hz]	error [%]
49	0.620	0.610	1.67	0.612	1.35
50	0.620	0.625	0.81	0.645	4.06
51	0.620	0.633	2.05	0.629	1.41
52	0.620	0.622	0.28	0.654	5.40
53	0.620	0.621	0.11	0.623	0.51
54	0.620	0.620	0.03	0.601	3.04
55	0.620	0.620	0.03	0.601	3.04
56	0.620	0.629	1.51	0.621	0.21
57	0.620	0.620	0.06	0.650	4.83
58	0.620	0.619	0.23	0.623	0.41
59	0.620	0.618	0.32	0.636	2.62
60	0.620	0.623	0.46	0.637	2.73
61	0.620	0.615	0.74	0.581	6.25
62	0.620	0.616	0.60	0.599	3.47
63	0.620	0.597	3.71	0.593	4.33
64	0.620	0.613	1.17	0.596	3.90
65	0.620	0.616	0.66	0.635	2.35
66	0.620	0.615	0.82	0.585	5.63
67	0.620	0.618	0.32	0.618	0.34
68	0.620	0.623	0.41	0.634	2.27
69	0.620	0.626	0.98	0.614	1.03
70	0.620	0.619	0.23	0.616	0.62
71	0.620	0.624	0.68	0.595	3.98
72	0.620	0.625	0.81	0.651	4.94
73	0.620	0.627	1.16	0.616	0.67
74	0.620	0.628	1.33	0.614	0.96
75	0.620	0.620	0.06	0.636	2.54
76	0.620	0.613	1.17	0.611	1.50
77	0.620	0.614	0.89	0.593	4.42
78	0.620	0.615	0.74	0.614	0.95
79	0.620	0.617	0.49	0.620	0.03
80	0.620	0.615	0.83	0.613	1.10
81	0.620	0.612	1.25	0.614	0.95
82	0.620	0.612	1.33	0.593	4.42
83	0.620	0.617	0.40	0.621	0.18
84	0.620	0.616	0.66	0.619	0.13
85	0.620	0.615	0.83	0.595	4.09
86	0.620	0.626	0.98	0.598	3.57
87	0.620	0.620	0.06	0.616	0.60
88	0.620	0.619	0.23	0.646	4.20
89	0.620	0.619	0.23	0.639	3.09
90	0.620	0.619	0.23	0.608	1.89
Promedio		0.619	0.77	0.615	2.58
Max		0.635	3.71	0.655	6.75
Min		0.597	0.03	0.578	0.03

Se observa en la Figura 40 la dispersión que existe entre los errores calculados en la Tabla 17, y se observa que hay mayor variación en la comparación de las frecuencias espectrales contra los teóricos. Además, se muestra que hay una gran cantidad de datos en donde el valor del error es

menor al 1%, asimismo, el error máximo es del 6.75% para la frecuencia espectral y de 3.71% para la frecuencia calculada de forma manual.

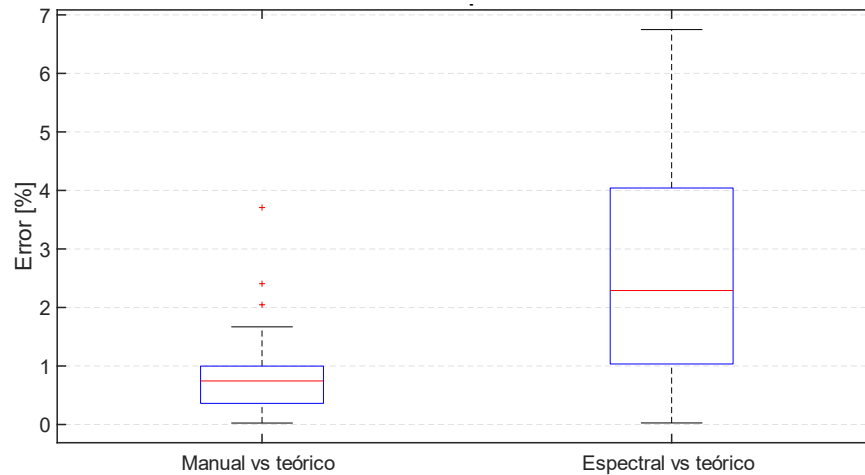


Figura 40. Boxplot de la distribución de la comparación de errores entre las frecuencias experimentales (manual y espectral) obtenidas de las señales de la cámara phantom contra la frecuencia teórica

Asimismo, en la Tabla 13 se presenta una comparación numérica (cálculo del error) entre los valores de amortiguamiento experimentales obtenidos de las señales con la cámara phantom, contra el valor de amortiguamiento teórico del dispositivo.

Tabla 19. Comparación de los amortiguamientos obtenidos experimentalmente con la cámara phantom contra los amortiguamientos teóricos y cálculo del error

Prueba	Valor teórico	Valor experimental	error [%]
1	0.0500	0.0592	18.35
2	0.0500	0.0599	19.87
3	0.0500	0.0589	17.74
4	0.0500	0.0622	24.43
5	0.0500	0.0580	15.97
6	0.0500	0.0547	9.41
7	0.0500	0.0536	7.16
8	0.0500	0.0605	21.04
9	0.0500	0.0510	2.06
10	0.0500	0.0550	9.92
11	0.0500	0.0528	5.56
12	0.0500	0.0512	2.47
13	0.0500	0.0539	7.77
14	0.0500	0.0499	0.18
15	0.0500	0.0509	1.82
16	0.0500	0.0520	4.04
17	0.0500	0.0525	4.97
18	0.0500	0.0584	16.86
19	0.0500	0.0526	5.15
20	0.0500	0.0607	21.37
21	0.0500	0.0528	5.54
22	0.0500	0.0597	19.48
23	0.0500	0.0586	17.11
24	0.0500	0.0580	15.91
25	0.0500	0.0508	1.56
26	0.0500	0.0545	8.92
27	0.0500	0.0555	10.98
28	0.0500	0.0581	16.14

Cont. Tabla 20. Comparación de los amortiguamientos obtenidos experimentalmente con la cámara phantom contra los amortiguamientos teóricos y cálculo del error

Prueba	Valor teórico	Valor experimental	error [%]
29	0.0500	0.0532	6.35
30	0.0500	0.0517	3.49
31	0.0500	0.0517	3.31
32	0.0500	0.0535	6.98
33	0.0500	0.0485	3.00
34	0.0500	0.0564	12.73
35	0.0500	0.0471	5.70
36	0.0500	0.0512	2.35
37	0.0500	0.0509	1.86
38	0.0500	0.0499	0.29
39	0.0500	0.0515	3.08
40	0.0500	0.0516	3.23
41	0.0500	0.0470	6.01
42	0.0500	0.0498	0.44
43	0.0500	0.0515	2.95
44	0.0500	0.0510	2.07
45	0.0500	0.0500	0.00
46	0.0500	0.0522	4.44
47	0.0500	0.0512	2.45
48	0.0500	0.0558	11.61
49	0.0500	0.0521	4.28
50	0.0500	0.0631	26.11
51	0.0500	0.0528	5.55
52	0.0500	0.0556	11.24
53	0.0500	0.0557	11.36
54	0.0500	0.0583	16.68
55	0.0500	0.0583	16.68
56	0.0500	0.0527	5.41
57	0.0500	0.0566	13.12
58	0.0500	0.0519	3.72
59	0.0500	0.0496	0.80
60	0.0500	0.0495	0.94
61	0.0500	0.0476	4.74
62	0.0500	0.0476	4.88
63	0.0500	0.0615	23.09
64	0.0500	0.0483	3.49
65	0.0500	0.0518	3.59
66	0.0500	0.0467	6.58
67	0.0500	0.0483	3.45
68	0.0500	0.0563	12.58
69	0.0500	0.0610	22.09
70	0.0500	0.0497	0.55
71	0.0500	0.0508	1.58
72	0.0500	0.0628	25.53
73	0.0500	0.0613	22.50
74	0.0500	0.0539	7.86
75	0.0500	0.0577	15.40
76	0.0500	0.0478	4.31
77	0.0500	0.0489	2.10
78	0.0500	0.0492	1.64
79	0.0500	0.0503	0.70
80	0.0500	0.0490	2.08
81	0.0500	0.0473	5.49
82	0.0500	0.0509	1.76
83	0.0500	0.0516	3.16
84	0.0500	0.0521	4.10
85	0.0500	0.0526	5.28
86	0.0500	0.0592	18.30
87	0.0500	0.0551	10.21
88	0.0500	0.0589	17.89
89	0.0500	0.0583	16.63
90	0.0500	0.0552	10.50
Promedio		0.0537	8.58
Max		0.0631	26.11
Min		0.0467	0.00

Se observa en la Figura 41 la dispersión que existe entre los errores calculados en la Tabla 19, en donde se identificó que el error mínimo es de 0% y el mayor es de 26.11%, pero corresponde a un valor de amortiguamiento teórico de 6.31%, por lo tanto, a pesar de ser un error grande no es malo, ya que entre mayor valor de amortiguamiento posea el dispositivo significa que disminuirá en mayor medida la respuesta del edificio.

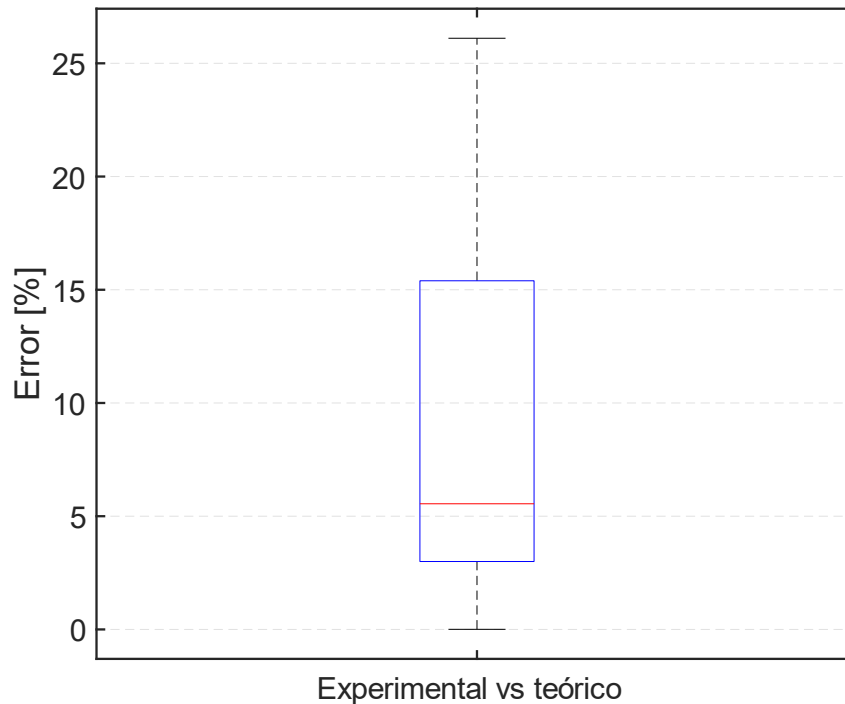


Figura 41. Boxplot de la distribución de la comparación de errores entre los amortiguamientos experimentales obtenidos de las señales de la cámara phantom contra el amortiguamiento teórico

4.3.2 SENSORES MEDIDORES DE TIRANTE DE AGUA Y MODELO TEÓRICO

En la Tabla 21 se muestra una comparación numérica (cálculo del error) entre las frecuencias experimentales, tanto manuales como espectrales, obtenidas de las señales gracias al método de los sensores, contra la frecuencia teórica del dispositivo.

Tabla 21. Comparación de las frecuencias manuales obtenidas experimentalmente con los sensores contra las frecuencias teóricas y cálculo del error porcentual

Prueba	Valor teórico [Hz]	Valor experimental (sensor 2) [Hz]	Error [%]	Valor experimental (promedio de sensores) [Hz]	Error [%]
1	0.620	0.634	2.30	0.630	1.53
2	0.620	0.635	2.36	0.628	1.24
3	0.620	0.629	1.44	0.630	1.56
4	0.620	0.635	2.38	0.628	1.24
5	0.620	0.625	0.74	0.625	0.86
6	0.620	0.626	0.96	0.627	1.20
7	0.620	0.635	2.36	0.628	1.24
8	0.620	0.627	1.19	0.628	1.31
9	0.620	0.627	1.14	0.628	1.27
10	0.620	0.624	0.60	0.628	1.26
11	0.620	0.626	1.03	0.628	1.32
12	0.620	0.627	1.14	0.628	1.26
13	0.620	0.625	0.77	0.626	0.99
14	0.620	0.626	1.00	0.628	1.29
15	0.620	0.627	1.12	0.627	1.09
16	0.620	0.635	2.38	0.628	1.28
17	0.620	0.627	1.10	0.627	1.09
18	0.620	0.635	2.34	0.628	1.22
19	0.620	0.633	2.08	0.627	1.20
20	0.620	0.624	0.60	0.628	1.30
21	0.620	0.625	0.81	0.627	1.06
22	0.620	0.631	1.70	0.629	1.44
23	0.620	0.625	0.74	0.626	0.94
24	0.620	0.627	1.19	0.629	1.52
25	0.620	0.628	1.27	0.629	1.51
26	0.620	0.625	0.84	0.629	1.46
27	0.620	0.635	2.34	0.628	1.27
28	0.620	0.635	2.41	0.629	1.49
29	0.620	0.631	1.76	0.627	1.07
30	0.620	0.624	0.66	0.628	1.34
31	0.620	0.625	0.87	0.630	1.67
32	0.620	0.627	1.12	0.628	1.24
33	0.620	0.634	2.19	0.629	1.52
34	0.620	0.628	1.27	0.629	1.48
35	0.620	0.634	2.30	0.628	1.22
36	0.620	0.632	1.91	0.631	1.70
37	0.620	0.632	1.87	0.631	1.78
38	0.620	0.625	0.74	0.628	1.25
39	0.620	0.626	0.95	0.629	1.39
40	0.620	0.627	1.08	0.631	1.76
41	0.620	0.627	1.16	0.627	1.09
42	0.620	0.625	0.83	0.628	1.29
43	0.620	0.634	2.32	0.628	1.35
44	0.620	0.627	1.16	0.629	1.41
45	0.620	0.626	1.04	0.628	1.22
46	0.620	0.627	1.06	0.631	1.77
47	0.620	0.624	0.71	0.627	1.19
48	0.620	0.627	1.10	0.627	1.06
49	0.620	0.624	0.65	0.627	1.10
50	0.620	0.627	1.21	0.628	1.34
51	0.620	0.627	1.16	0.628	1.26
52	0.620	0.627	1.10	0.628	1.23
53	0.620	0.627	1.08	0.627	1.05
54	0.620	0.625	0.83	0.629	1.42
55	0.620	0.626	0.95	0.627	1.12
56	0.620	0.627	1.16	0.628	1.29
57	0.620	0.624	0.58	0.628	1.26

Cont. Tabla 22. Comparación de las frecuencias manuales obtenidas experimentalmente con los sensores contra las frecuencias teóricas y cálculo del error porcentual

Prueba	Valor teórico [Hz]	Valor experimental (sensor 2) [Hz]	Error [%]	Valor experimental (promedio de sensores) [Hz]	Error [%]
58	0.620	0.627	1.10	0.627	1.18
59	0.620	0.625	0.77	0.626	1.04
60	0.620	0.626	0.95	0.631	1.76
61	0.620	0.631	1.72	0.631	1.70
62	0.620	0.625	0.81	0.629	1.39
63	0.620	0.623	0.41	0.626	0.99
64	0.620	0.627	1.10	0.626	0.97
65	0.620	0.625	0.83	0.627	1.12
66	0.620	0.627	1.19	0.626	1.00
67	0.620	0.629	1.46	0.631	1.85
68	0.620	0.634	2.32	0.629	1.43
69	0.620	0.626	1.00	0.627	1.10
70	0.620	0.627	1.21	0.630	1.54
71	0.620	0.625	0.77	0.626	0.95
72	0.620	0.627	1.19	0.627	1.09
73	0.620	0.635	2.34	0.628	1.21
74	0.620	0.624	0.60	0.628	1.33
75	0.620	0.627	1.21	0.628	1.32
76	0.620	0.624	0.71	0.626	0.89
77	0.620	0.627	1.06	0.629	1.40
78	0.620	0.635	2.36	0.629	1.48
79	0.620	0.626	1.00	0.629	1.53
80	0.620	0.635	2.36	0.627	1.12
81	0.620	0.625	0.85	0.628	1.22
82	0.620	0.627	1.10	0.625	0.87
83	0.620	0.633	2.15	0.628	1.36
84	0.620	0.627	1.16	0.627	1.08
85	0.620	0.632	1.93	0.628	1.23
86	0.620	0.626	1.02	0.627	1.21
87	0.620	0.627	1.19	0.628	1.32
88	0.620	0.625	0.84	0.627	1.07
89	0.620	0.624	0.71	0.626	0.99
90	0.620	0.634	2.21	0.628	1.35
Promedio		0.628	1.30	0.628	1.28
Max		0.635	2.41	0.631	1.85
Min		0.623	0.41	0.625	0.86

Se observa en la Figura 42 la dispersión que existe entre los errores calculados en la Tabla 21, y se puede analizar que existe mayor variación en la comparación de las frecuencias del sensor contra los teóricos. Además, se muestra que existe una gran cantidad de datos en donde el valor del error es menor al 1%, asimismo, el error máximo es del 2.41% para las frecuencias del sensor 2 y de 1.85% para el promedio de frecuencias.

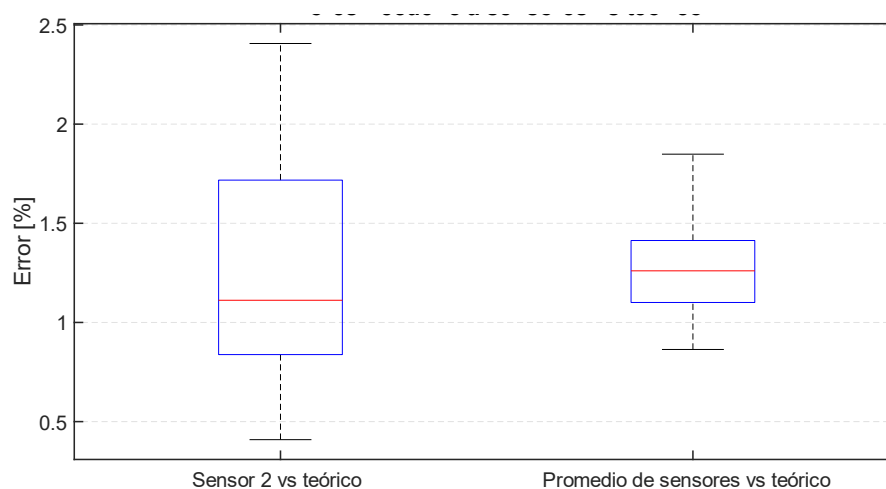


Figura 42. Boxplot de la distribución de la comparación de errores entre las frecuencias experimentales (del sensor 2 y el promedio por prueba de los 5 sensores) obtenidas de las señales captadas con los sensores, contra la frecuencia teórica

De la misma manera, en la Tabla 23 se muestra una comparación numérica (cálculo del error) entre los valores de amortiguamiento experimentales obtenidos de las señales gracias a los sensores, contra el amortiguamiento teórico del dispositivo.

Tabla 23. Comparación de los amortiguamientos manuales obtenidos experimentalmente con los sensores, contra los amortiguamientos teóricos y cálculo del error porcentual

Prueba	Valor teórico	Valor experimental del sensor 2 [Hz]	error [%]	Valor experimental promedio de sensores [Hz]	error [%]
1	0.0500	0.0540	7.92	0.0576	15.20
2	0.0500	0.0550	10.09	0.0593	18.69
3	0.0500	0.0531	6.15	0.0550	10.06
4	0.0500	0.0552	10.35	0.0591	18.21
5	0.0500	0.0636	27.22	0.0589	17.88
6	0.0500	0.0600	19.93	0.0555	11.06
7	0.0500	0.0549	9.75	0.0593	18.62
8	0.0500	0.0590	18.02	0.0579	15.83
9	0.0500	0.0555	10.92	0.0580	15.97
10	0.0500	0.0526	5.15	0.0541	8.29
11	0.0500	0.0596	19.18	0.0555	10.91
12	0.0500	0.0553	10.58	0.0578	15.60
13	0.0500	0.0627	25.36	0.0556	11.26
14	0.0500	0.0596	19.24	0.0549	9.73
15	0.0500	0.0585	16.96	0.0558	11.66
16	0.0500	0.0556	11.11	0.0566	13.29
17	0.0500	0.0586	17.14	0.0560	12.00
18	0.0500	0.0558	11.61	0.0598	19.54
19	0.0500	0.0524	4.87	0.0585	17.00
20	0.0500	0.0525	4.92	0.0545	8.96
21	0.0500	0.0637	27.45	0.0596	19.12
22	0.0500	0.0543	8.58	0.0586	17.16
23	0.0500	0.0624	24.70	0.0570	14.04
24	0.0500	0.0584	16.71	0.0573	14.66
25	0.0500	0.0549	9.75	0.0555	11.08
26	0.0500	0.0603	20.53	0.0566	13.26
27	0.0500	0.0541	8.20	0.0583	16.56
28	0.0500	0.0552	10.34	0.0551	10.23
29	0.0500	0.0515	2.96	0.0557	11.43
30	0.0500	0.0514	2.76	0.0555	10.96

Cont. Tabla 24. Comparación de los amortiguamientos manuales obtenidos experimentalmente con los sensores, contra los amortiguamientos teóricos y cálculo del error porcentual

Prueba	Valor teórico	Valor experimental del sensor 2 [Hz]	error [%]	Valor experimental promedio de sensores [Hz]	error [%]
31	0.0500	0.0522	4.32	0.0534	6.79
32	0.0500	0.0552	10.35	0.0571	14.27
33	0.0500	0.0527	5.34	0.0566	13.28
34	0.0500	0.0575	15.08	0.0567	13.35
35	0.0500	0.0537	7.43	0.0589	17.70
36	0.0500	0.0523	4.55	0.0546	9.27
37	0.0500	0.0522	4.30	0.0559	11.78
38	0.0500	0.0525	5.02	0.0539	7.81
39	0.0500	0.0532	6.38	0.0540	7.99
40	0.0500	0.0557	11.30	0.0555	10.96
41	0.0500	0.0582	16.46	0.0567	13.40
42	0.0500	0.0529	5.78	0.0550	10.07
43	0.0500	0.0558	11.57	0.0555	10.96
44	0.0500	0.0591	18.11	0.0566	13.13
45	0.0500	0.0551	10.18	0.0544	8.76
46	0.0500	0.0593	18.55	0.0553	10.57
47	0.0500	0.0604	20.77	0.0581	16.11
48	0.0500	0.0595	18.96	0.0596	19.22
49	0.0500	0.0637	27.40	0.0592	18.36
50	0.0500	0.0580	16.03	0.0578	15.59
51	0.0500	0.0566	13.25	0.0581	16.28
52	0.0500	0.0554	10.71	0.0572	14.48
53	0.0500	0.0575	14.95	0.0561	12.15
54	0.0500	0.0533	6.61	0.0557	11.37
55	0.0500	0.0545	8.99	0.0576	15.30
56	0.0500	0.0571	14.16	0.0581	16.16
57	0.0500	0.0522	4.48	0.0537	7.44
58	0.0500	0.0563	12.56	0.0559	11.79
59	0.0500	0.0632	26.46	0.0591	18.29
60	0.0500	0.0604	20.77	0.0547	9.49
61	0.0500	0.0510	2.06	0.0539	7.77
62	0.0500	0.0524	4.88	0.0539	7.89
63	0.0500	0.0524	4.83	0.0549	9.79
64	0.0500	0.0560	11.97	0.0559	11.86
65	0.0500	0.0533	6.63	0.0575	14.99
66	0.0500	0.0562	12.32	0.0582	16.46
67	0.0500	0.0579	15.79	0.0550	10.04
68	0.0500	0.0544	8.83	0.0555	11.03
69	0.0500	0.0593	18.65	0.0551	10.22
70	0.0500	0.0556	11.24	0.0555	11.08
71	0.0500	0.0626	25.25	0.0555	10.95
72	0.0500	0.0590	18.01	0.0585	17.08
73	0.0500	0.0552	10.44	0.0591	18.21
74	0.0500	0.0524	4.85	0.0545	9.04
75	0.0500	0.0580	16.05	0.0579	15.76
76	0.0500	0.0632	26.38	0.0590	18.09
77	0.0500	0.0595	19.01	0.0566	13.21
78	0.0500	0.0557	11.46	0.0575	15.02
79	0.0500	0.0538	7.63	0.0554	10.71
80	0.0500	0.0554	10.85	0.0587	17.40
81	0.0500	0.0529	5.77	0.0551	10.13
82	0.0500	0.0593	18.59	0.0601	20.11
83	0.0500	0.0531	6.30	0.0573	14.69
84	0.0500	0.0593	18.54	0.0581	16.20
85	0.0500	0.0524	4.74	0.0575	14.92
86	0.0500	0.0538	7.51	0.0567	13.44
87	0.0500	0.0545	9.04	0.0543	8.67
88	0.0500	0.0605	21.03	0.0550	10.02
89	0.0500	0.0619	23.87	0.0573	14.64
90	0.0500	0.0537	7.45	0.0567	13.40
Promedio		0.0563	12.66	0.0566	13.26
Max		0.0637	27.45	0.0601	20.11
Min		0.0510	2.06	0.0534	6.79

Se observa en la Figura 43 la dispersión que existe entre los errores calculados en la Tabla 23, se puede identificar que el error mínimo es de 2.06%, mientras que el mayor es de 27.45%, correspondiente a un valor de amortiguamiento de 6.37%. Además, resulta importante destacar que ningún valor de amortiguamiento es menor al 5%, esto es, en ninguna prueba se encontraron valores menores al valor teórico.

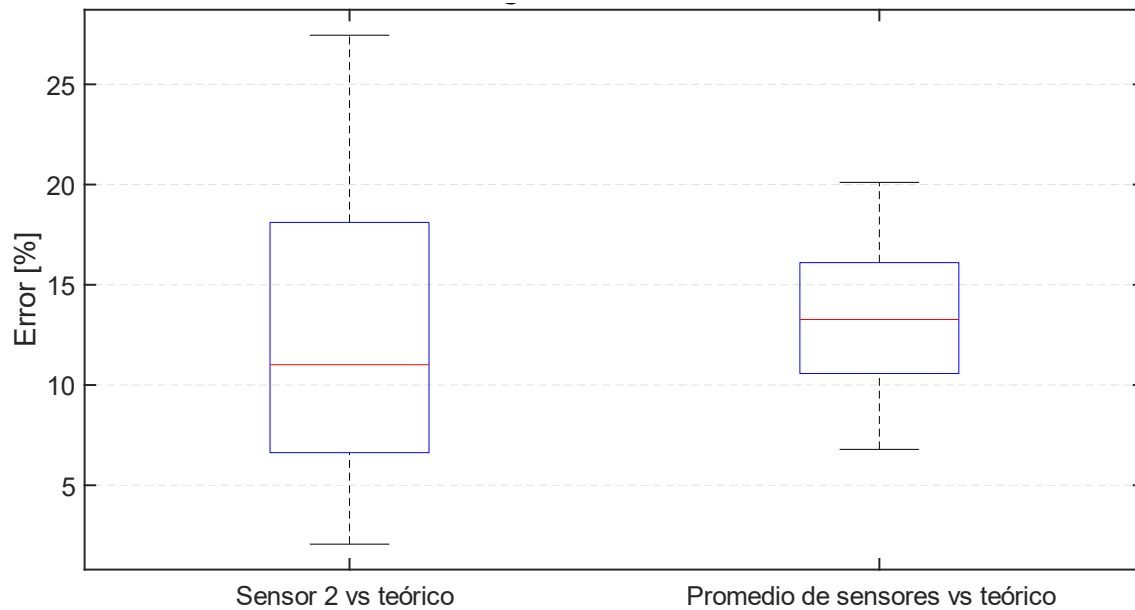


Figura 43. Boxplot de la distribución de la comparación de errores entre los valores de amortiguamiento experimentales obtenidos de las señales de los sensores (tanto del sensor 2 que es el cual se compara con la cámara de video, como el promedio de todos los sensores en cada prueba) contra el amortiguamiento teórico

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se realizó el cálculo de las propiedades dinámicas de una masa líquida sintonizada empleando técnicas de cámara de alta velocidad y sensores de medición del tirante de agua. Los resultados mostraron que el empleo de las metodologías empleadas es útil para la identificación de la frecuencia y valor de amortiguamiento de la masa líquida sintonizada. Más específicamente, se concluye lo siguiente:

Con el método de la cámara de video se obtienen valores de las propiedades dinámicas con mayor dispersión. A pesar de ello, comparando ambos métodos numéricamente (calculando el error que existe entre ambos) se tienen errores menores al 5% en las frecuencias, de hecho, el error máximo es de 4.1% y el mínimo de 0.01%, esto es, existen pruebas en donde el valor de las frecuencias es prácticamente el mismo; por ejemplo, en 24 de las 90 pruebas analizadas el error es menor al 1%. En contraste, para el amortiguamiento se obtienen errores de hasta 24.28%, mientras que el error mínimo es de 0.27%, además, existen 7 pruebas que cuentan con un error menor al 1%. Por lo tanto, se puede considerar que los resultados obtenidos con la cámara de video dan una muy buena aproximación a los valores obtenidos con los sensores tanto de frecuencia como amortiguamiento.

Asimismo, comparando ambos métodos de prueba contra los valores teóricos se obtuvo que para la frecuencia los sensores presentan un error máximo menor en comparación con la cámara de video, de 2.41% y 6.75%, respectivamente; asimismo, para el amortiguamiento, con los sensores se encontró un error máximo de 27.45% correspondiente a un amortiguamiento de 6.37%, esto es, un valor mucho mayor al teórico, pero en términos de amortiguamiento, mientras más grande sea su valor es mejor para la estructura, ya que se reducirá aún más la respuesta del edificio; y el error mínimo fue de 2.06% para un amortiguamiento del 5.1%, lo que indica que para ninguna prueba, en el caso de los sensores, se encontraron valores de amortiguamientos menores al 5%. Caso contrario para la cámara de video, con la cual se encontraron 20 pruebas con valores de amortiguamiento menores al 5%. Asimismo, el error máximo fue de 26.11% correspondiente a un amortiguamiento de 6.31%, aunque, también hubo una prueba con error del 0%.

Por lo tanto, se concluye que el método de los sensores suele tener una mejor aproximación a los valores teóricos del dispositivo ensayado, y por lo tanto es un mejor método para el estudio de las propiedades dinámicas, al menos con las consideraciones hechas en este trabajo.

La variación de los valores obtenidos por el método de la cámara de video puede deberse a diversos factores, entre los que se encuentran:

- Gran diferencia entre la tasa de muestreo entre ambos métodos. Ya que la tasa de muestreo en los sensores era de 1000 [Hz], esto es, los sensores tomaban 1000 datos cada segundo, mientras que la tasa de muestreo de la cámara de video era de tan solo 120 [Hz]. Por lo que existen instantes en los cuales el tirante de agua pudo haber variado de manera que los sensores capturaron cierta variación en la superficie libre del agua que la cámara no capturó
 - La necesidad de mucha iluminación. Puesto que, como se ha repetido varias veces dentro de este trabajo, para conseguir una mayor frecuencia de muestreo de la cámara de video se requiere mayor iluminación. Y mayor iluminación se traduce a una mejoría al momento de procesar el video para encontrar la señal tiempo-desplazamiento del tirante de agua.
-

- Dificultad de seleccionar un píxel que represente la superficie libre del agua. Debido a que el procesamiento del video capturado en cada prueba se realizaba en el software *tracker*, en donde era necesario seleccionar un solo punto, el cual iba a ser seguido cuadro por cuadro, de manera automática o manual cuando el propio software no muestre coincidencia alguna de un punto al siguiente.

Asimismo, a pesar de que los sensores demostraron ser un mejor método, también existen errores, aunque menores a los de la cámara de video, dichos errores pudieron deberse a errores humanos, por ejemplo, al llenar el tanque hasta los 17.5 cm, a pesar de tener una regla numérica para identificar el tirante de agua, la identificación del tirante era meramente visual, por lo que pudo haber variado unos cuantos milímetros; algo parecido pudo ocurrir también al momento de calibrar los sensores.

Es importante destacar que actualmente la frecuencia de muestreo de la cámara *phantom* utilizada en la realización de las pruebas (120 [Hz]) se puede obtener con teléfonos inteligentes de gama alta, por lo tanto, y tomando en cuenta el poco error que hay entre ambos métodos, se pueden utilizar teléfonos inteligentes para calcular las propiedades dinámicas de masas líquidas sintonizadas, teniendo en cuenta que existirá un error mayor en comparación con los medidores de tirantes de agua; la ventaja radica en el precio en comparación con una cámara de video de alta velocidad, y del arreglo experimental.

Para futuros trabajos se recomienda aumentar la frecuencia de muestreo de la cámara de video de alta velocidad, lo que conlleva a un aumento de iluminación en el tanque, para disminuir la variación que hay en comparación con los sensores, asimismo identificar una frecuencia de muestreo óptima para que el error entre ambos métodos sea todavía menor. Asimismo, también se recomienda el uso de un color distinto de colorante vegetal para el agua del tanque, recordando que en las pruebas realizadas para este trabajo se utilizó color rojo, debido a que el color seleccionado evitaba resaltar la cuerda del sensor, por lo tanto, se recomienda el color azul para futuras pruebas, para facilitar el procesamiento de los datos con el software *tracker*.

BIBLIOGRAFÍA

- Akamima Technologies. (2016). Akamina Wave Height Gauge.
- Bergolla, P. L. (2021). Dynamic analysis of tall buildings against wind loads by varying the damping ratio. *Revista Estudiantil Nacional de Ingeniería y Arquitectura*, 2(2). ISSN: 2307-471X
- Brown, D., (2005). Tracker Software, Video Analysis and Modelling Tool, Open Source Physics.
- Chopra, A.K. (2014). *Dinámica de estructuras*. Estado de México, México: Pearson.
- Fediw, A. A., Isyumov, N., y Vickery, B. J. (1995). Performance of a tuned sloshing water damper. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 57, 237-247. doi.org/10.1016/0167-6105(94)00107-O
- Frahm, H. (1911). Device for damping vibrations of bodies. United States Patent No. 989958
- Hajjighasem, K. A., Mahdi, H. A., y Asghari, K. (2018). A numerical study of tuned liquid damper based on incompressible SPH method combined with TMD analogy. *Journal of Fluids and Structures*, 82, 394-411. doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2018.07.013
- Jae-Sung, H., Sung-Kyung, L., Eunchurn, P., Sang-Hyun, L., Kyung-Won, M., Hongjin K.,... Bong-Ho, C. (2009). Performance test of a tuned liquid mass damper for reducing bidirectional responses of building structures. *The structural design of tall and special buildings*, 18, 789-805. Doi: 10.1002/tal.486
- Nava González, R. (2019). *Comparación de los efectos del viento en un edificio esbelto: metodología analítica vs metodología experimental en túnel de viento* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Nava González, R., Pozos Estrada, A. & López, I. A. (2024). Development of Fragility Curves for Tall Buildings with Tuned Liquid Dampers for Vibration Control Under Wind Loading. *International Journal of Civil Engineering*. Doi: 10.1007/s40999-024-01020-w
- Nava González R., Pozos Estrada, A., López, I. A. & Hernández, M. M. (2023). Development of a scaled rectangular tuned liquid damper to study experimentally wind-induced response mitigation.
- Marivani, M. & Hamed, M. S. (2014). Numerical Study of Slat Screen Pattern Effect on Design Parameters of Tuned Liquid Dampers. *Journal of Fluids Engineering*, 136(6). https://doi.org/10.1115/1.4026662
- Meseguer, R. J., Sanz, A. A., Pindado, C. S., Franchini, S. y Alonso, R. G. (2013). *Aerodinámica civil. Efectos del viento en edificaciones y estructuras*. Madrid, España: Garceta
- Pozos Estrada, A. (2009). *Reability of wind-sensitive buildings: a serviceability design consideration* (Tesis doctoral). University of Western Ontario, Canadá.
- Pozos Estrada, A., Hong, H.P. and Galsworthy, J.K. (2010). Serviceability Design Factors for Design of Wind-Sensitive Structures. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(5), pp. 728 – 738, ISSN: 0315-1468.
- Ramírez Z. S. (2017). *Empleo de masas líquidas resonantes para reducir la vibración inducida por el viento en edificios* (Tesis de maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México
-

-
- Riascos-González, C. A., Thomson, P., & Dyke, S. (2019). Evaluación del desempeño de un amortiguador de masa sintonizado no lineal mediante simulaciones híbridas en tiempo real. *INGE CUC*, 15(2), 11–22. <https://doi.org/10.17981/ingecuc.15.2.2019.02>
- Santos, S. M., Ruiz, S. E. y Valenzuela, B. F. (2021). Wind fragility curves for buildings with viscous dampers. *Revista Ingeniería y Tecnología UAS*, (3), pp. 18 – 25, ISSN: 2683-2445
- Sun, L. (1991). *Semi-analytical modelling of tuned liquid damper (TLD) with emphasis on damping of liquid sloshing* (Tesis doctoral). University of Tokyo, Japón.
- Sun, L. M., Fujino, Y., Chaiseri, P., & Pacheco, B. M. (1995), The properties of tuned liquid dampers using a TMD analogy, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 24, pp. 967-976. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290240704>
- Tait, M., Isyumov, N., El Damatty, A. (2004a). The efficiency and robustness of a uni-directional tuned liquid damper and modelling with an equivalent TMD. *Wind and Structures*, 7(4), 235-250. doi: <http://dx.doi.org/10.12989/was.2004.7.4.235>
- Tait, M. J. (2004). *The Performance of 1-D and 2-D Tuned Liquid Dampers* (Tesis doctoral), University of Western Ontario, Canadá
- Tait, M. J. (2008) Modelling and preliminary design of a structure-TLD system. *Engineering Structures*, 30(10), 2644–2655. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.02.017>
- Tait, M., El Damatty, A., Isyumov, N., Siddique, M. (2005). Numerical flow models to simulate tuned liquid dampers (TLD) with slat screens. *Journal of Fluids and Structures*, 20, 1007–1023. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2005.04.004
- Tamura, Y. (1998). Application of damping devices to suppress wind-induced responses of buildings. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 74, 49-72. doi.org/10.1016/S0167-6105(98)00006-3
- The MathWorks Inc. (2023). MATLAB versión: R2023b. The MathWorks Inc. <https://www.mathworks.com>
- The MathWorks Inc. (2024). *Boxplot*. The MathWorks Inc. Recuperado de: <https://la.mathworks.com/help/stats/boxplot.html>
-

GLOSARIO DE TÉRMINOS

c_{eq}	Coefficiente de amortiguamiento equivalente
C_S	Amortiguamiento de la estructura principal
e	Error porcentual entre dos valores
f	Frecuencia fundamental del dispositivo calculada de manera manual
f_A	Frecuencia natural del amortiguador dinámico de vibraciones
f_D	Frecuencia de un amortiguador de masa sintonizada
f_s	Frecuencia natural de la estructura primaria
f_{TLD}	Frecuencia natural de un amortiguador líquido sintonizado
f_w	Frecuencia fundamental de chapoteo del agua
g	Aceleración de la gravedad
h	Altura de tirante de agua
j	Número de ciclos durante el cual la amplitud en una señal disminuye
k_D	Rigidez de un amortiguador de masa sintonizada
k_{eq}	Rigidez equivalente
K_S	Rigidez de la estructura principal
L	Longitud del tanque de un amortiguador líquido sintonizado
m_D	Masa de un amortiguador de masa sintonizada
m_{eq}	Masa equivalente
M_S	Masa efectiva de un amortiguador líquido sintonizado
m_{TLD}	Masa de un amortiguador de masa sintonizada
m_w	Masa total del fluido contenida en el tanque del amortiguador líquido sintonizado
M^*	Masa de la estructura en el modo de vibrar que se desea suprimir
n	Numero de crestas
$P(t)$	Fuerza generalizada del viento transversal que actúa sobre la estructura principal

S	Relación de solidez
t_i	Tiempo en donde se presenta la primera cresta a estudiar
t_f	Tiempo que corresponde a la última cresta a estudiar
u_i	Valor de la amplitud en la primera cresta a partir de la cual se calcula el amortiguamiento
u_{i+j}	Valor de la amplitud en la última cresta estudiada
ν	Viscosidad cinemática
Y_s	Desplazamiento de una estructura
\dot{Y}	Velocidad lateral de una estructura
\ddot{Y}_s	Aceleración lateral de una estructura
$\sigma_{s-inicial}$	Valor cuadrático medio de la respuesta inicial
$\sigma_{s-objetivo}$	Valor cuadrático medio de la respuesta objetivo
μ_{TLD}	Relación de masas
Ω	Relación de frecuencias
ξ	Amortiguamiento manual calculado
ξ_{eff}	Amortiguamiento efectivo
ξ_{eq}	Amortiguamiento equivalente
ξ_{TLD}	Relación de amortiguamiento
ρ	Densidad del líquido

ANEXO A

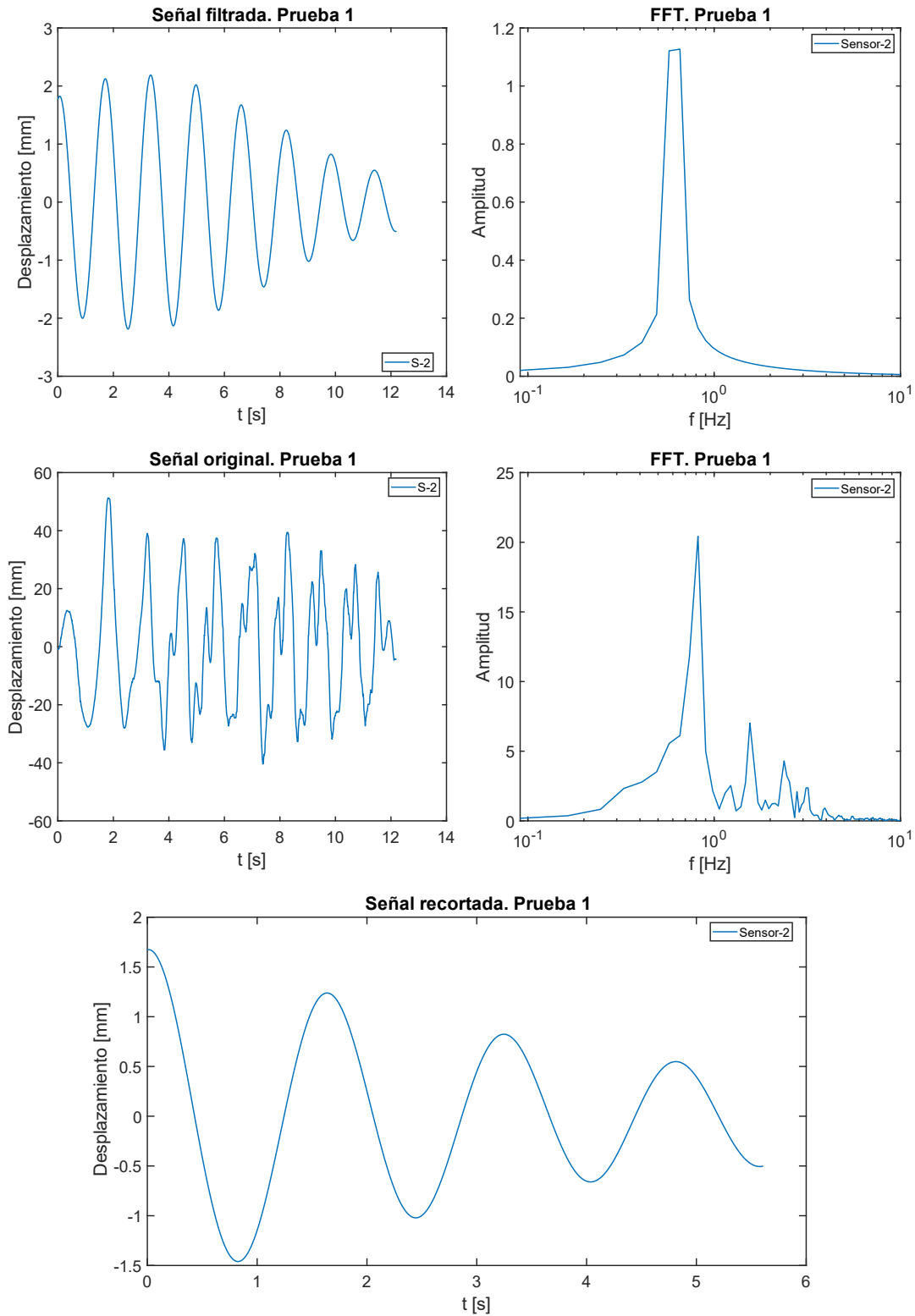


Ilustración 1. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 1, mediante el método de la cámara phantom.

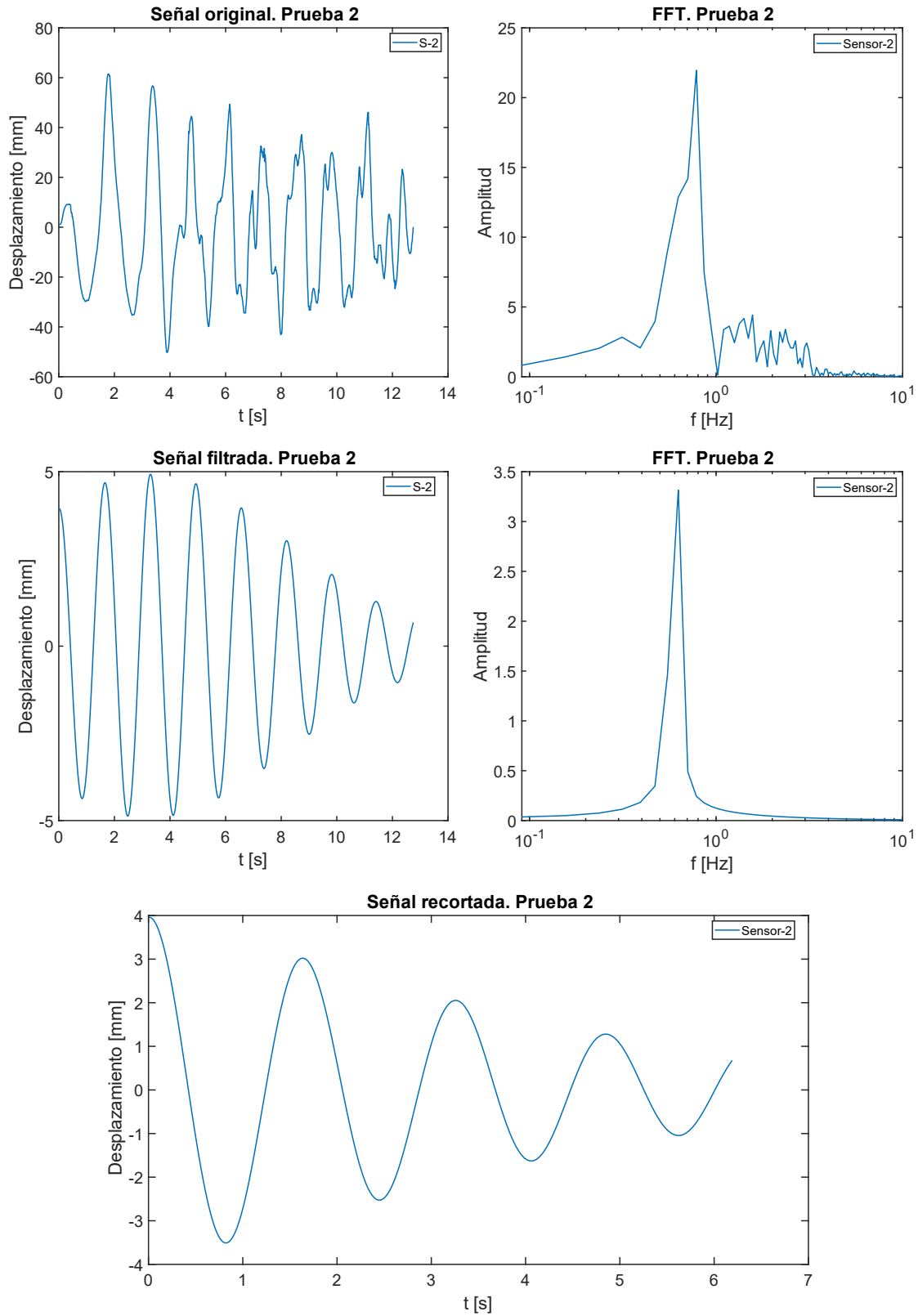


Ilustración 2. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 2, mediante el método de la cámara phantom.

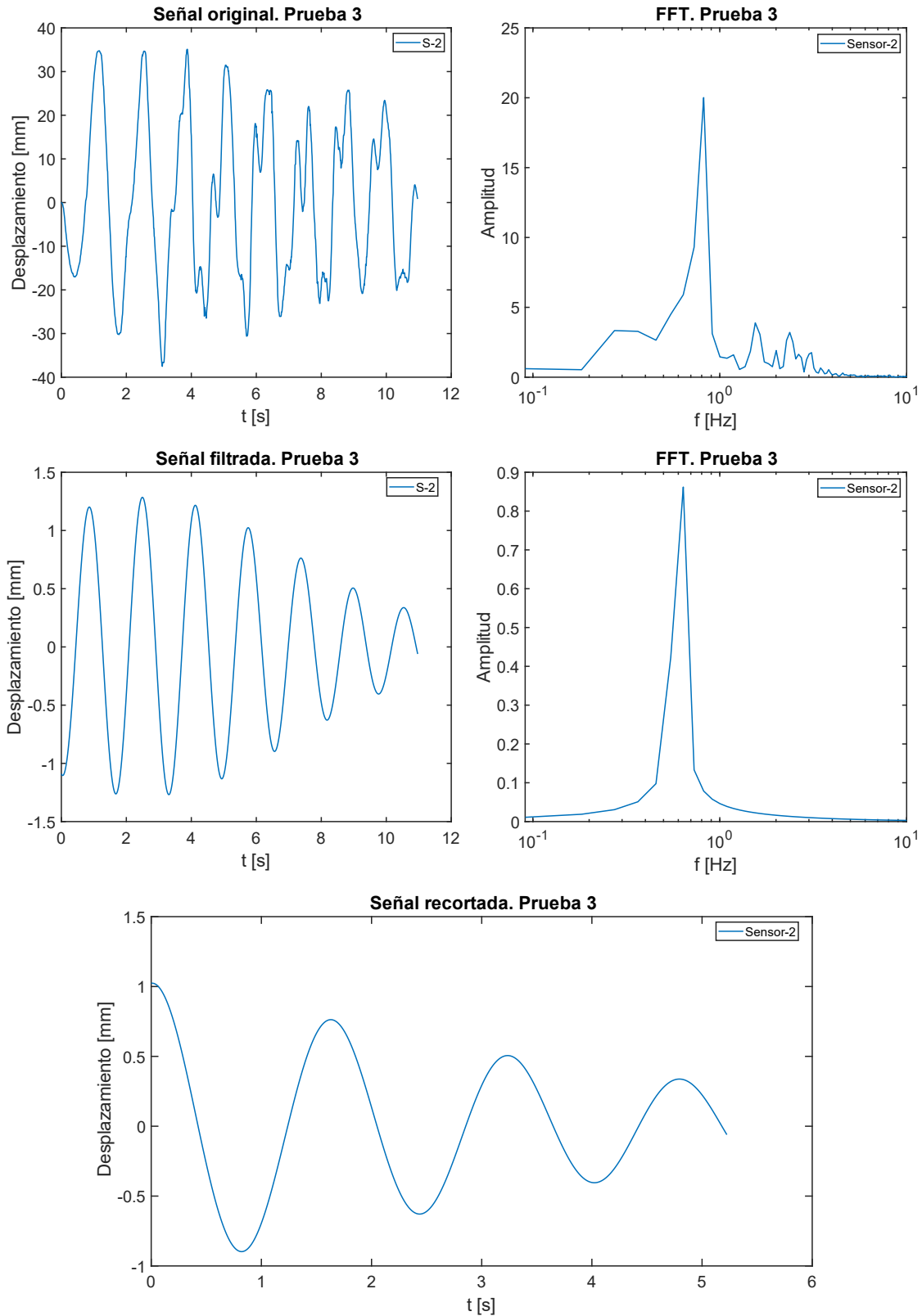


Ilustración 3. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 3, mediante el método de la cámara phantom.

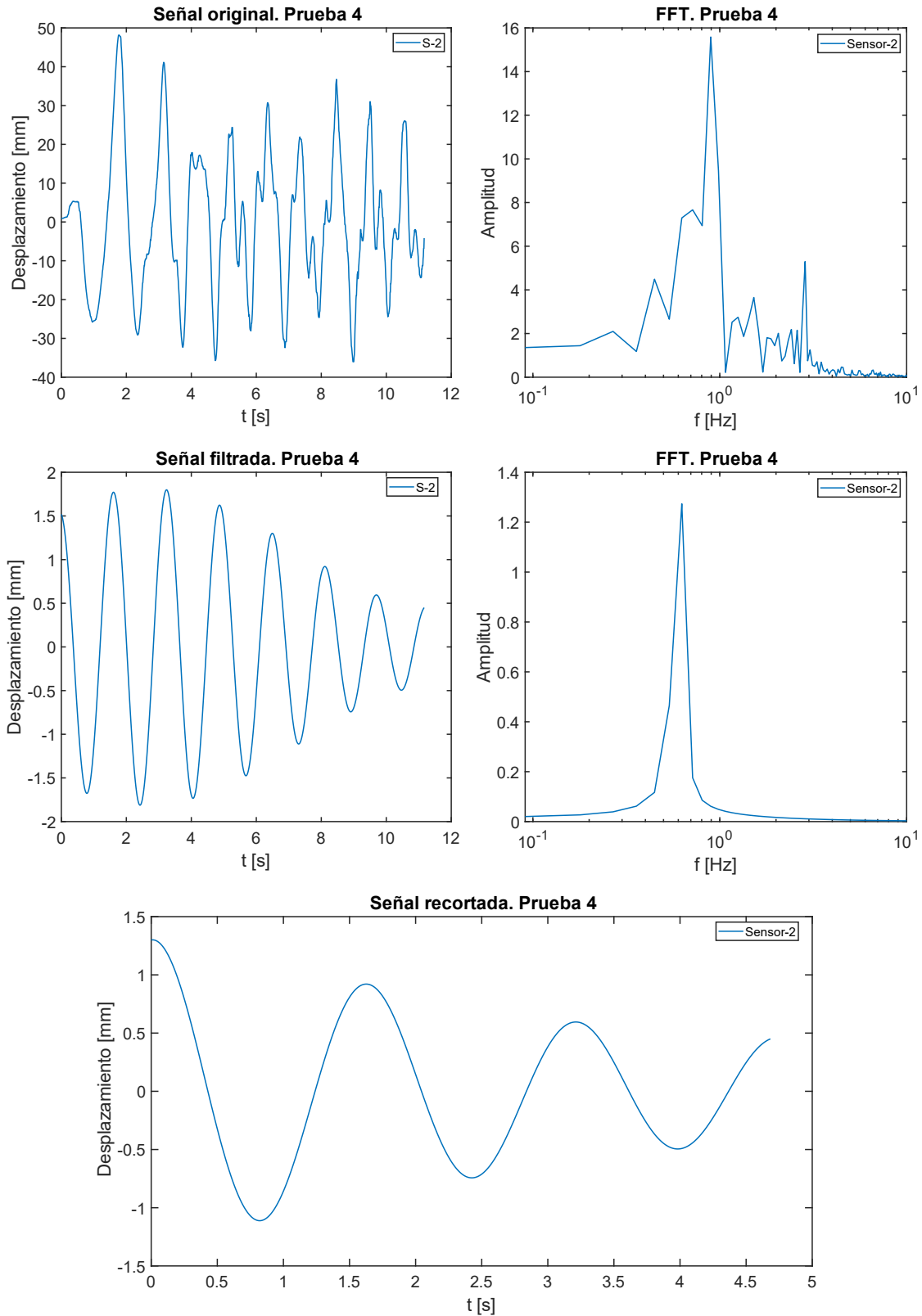


Ilustración 4. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 4, mediante el método de la cámara phantom.

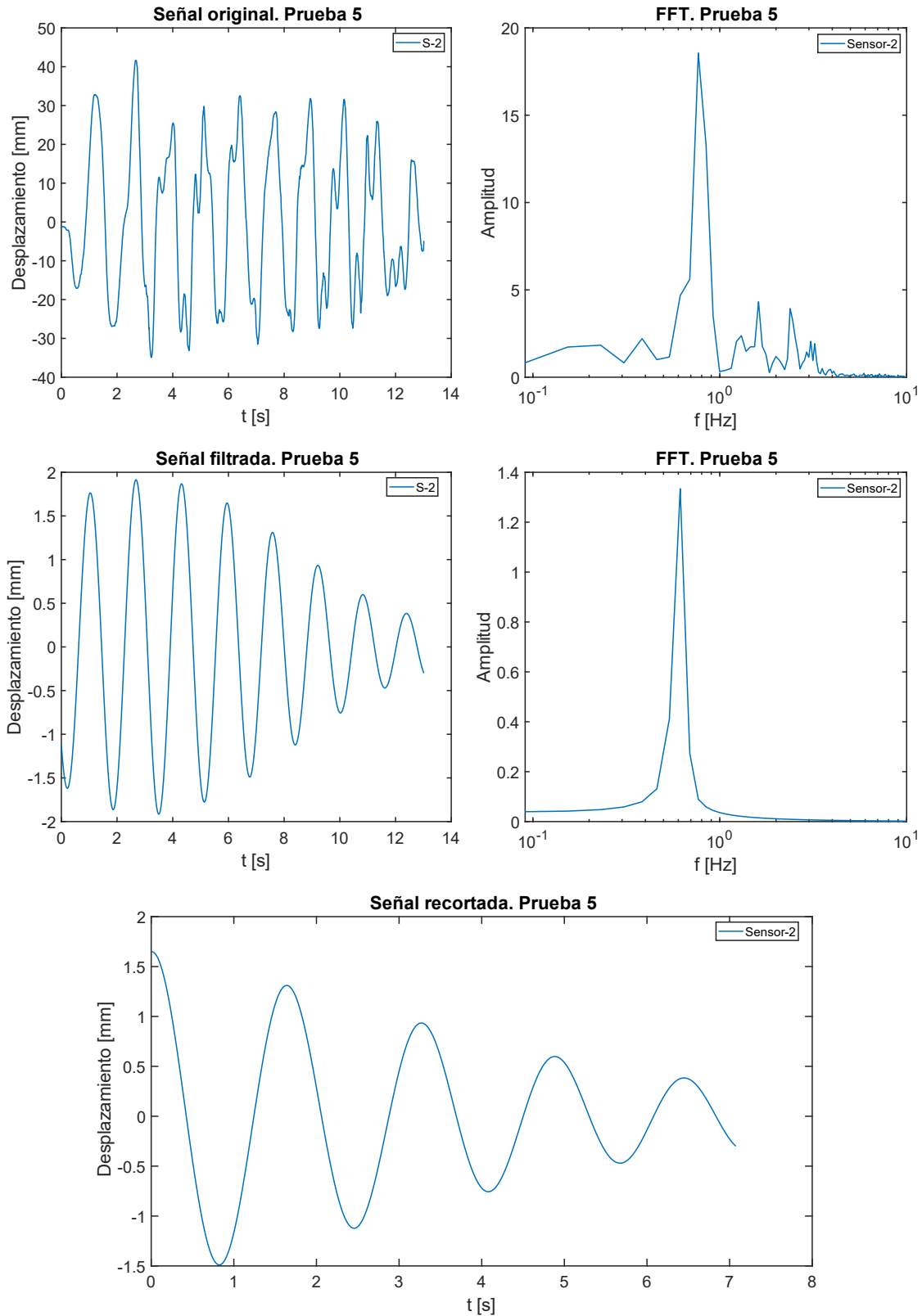


Ilustración 5. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 5, mediante el método de la cámara phantom.

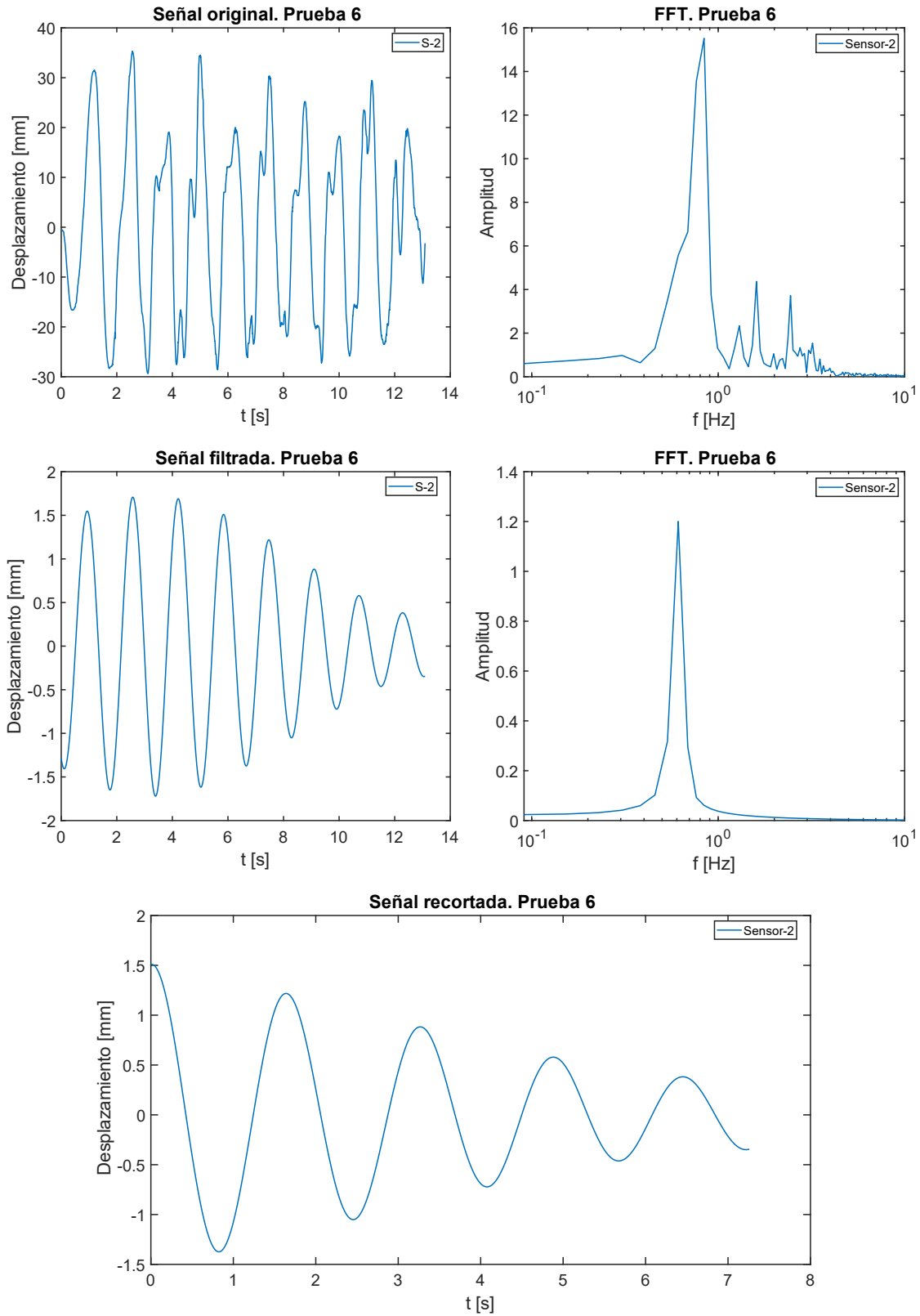


Ilustración 6. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 6, mediante el método de la cámara phantom.

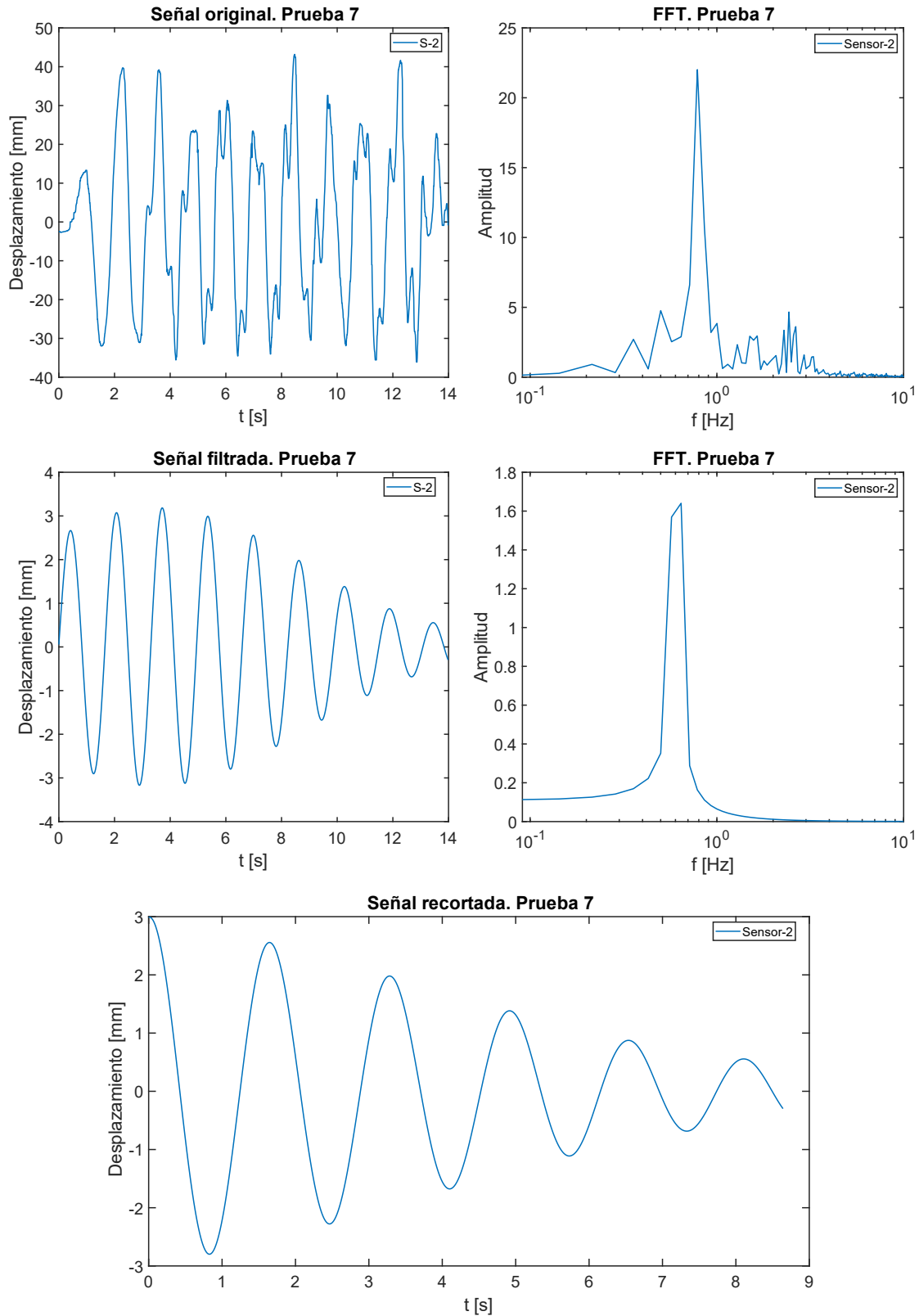


Ilustración 7. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 7, mediante el método de la cámara phantom.

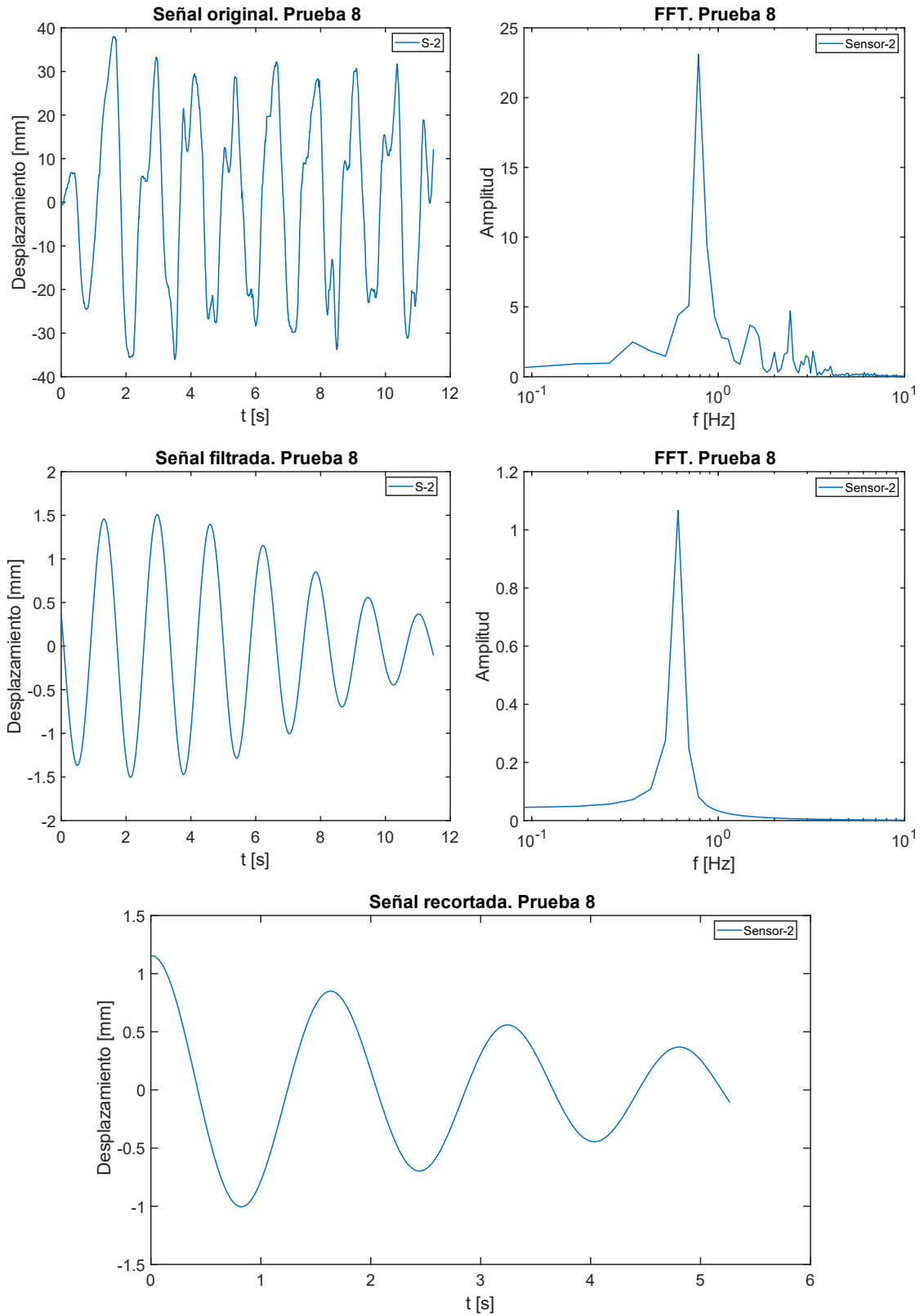


Ilustración 8. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 8, mediante el método de la cámara phantom.

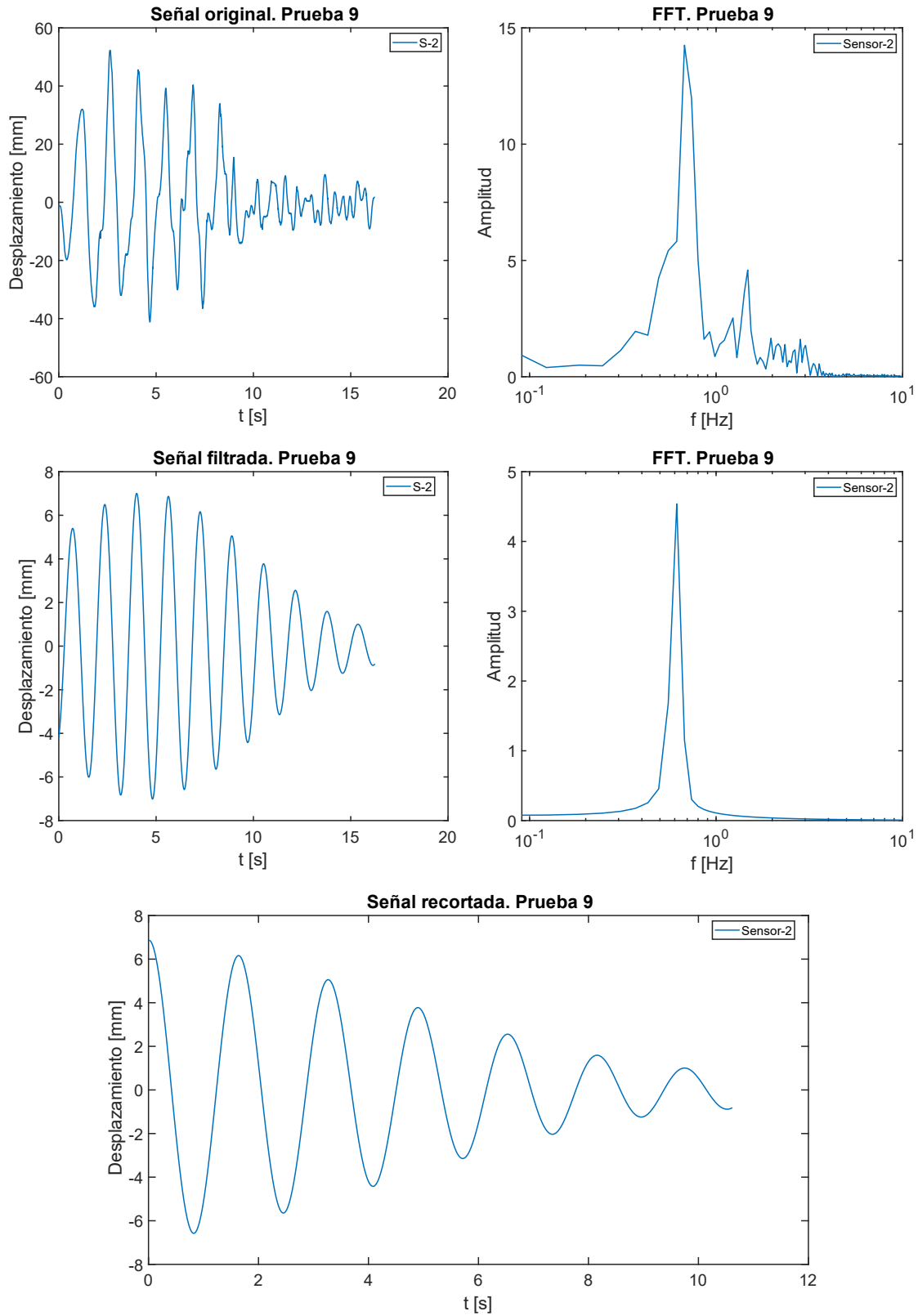


Ilustración 9. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 9, mediante el método de la cámara phantom.

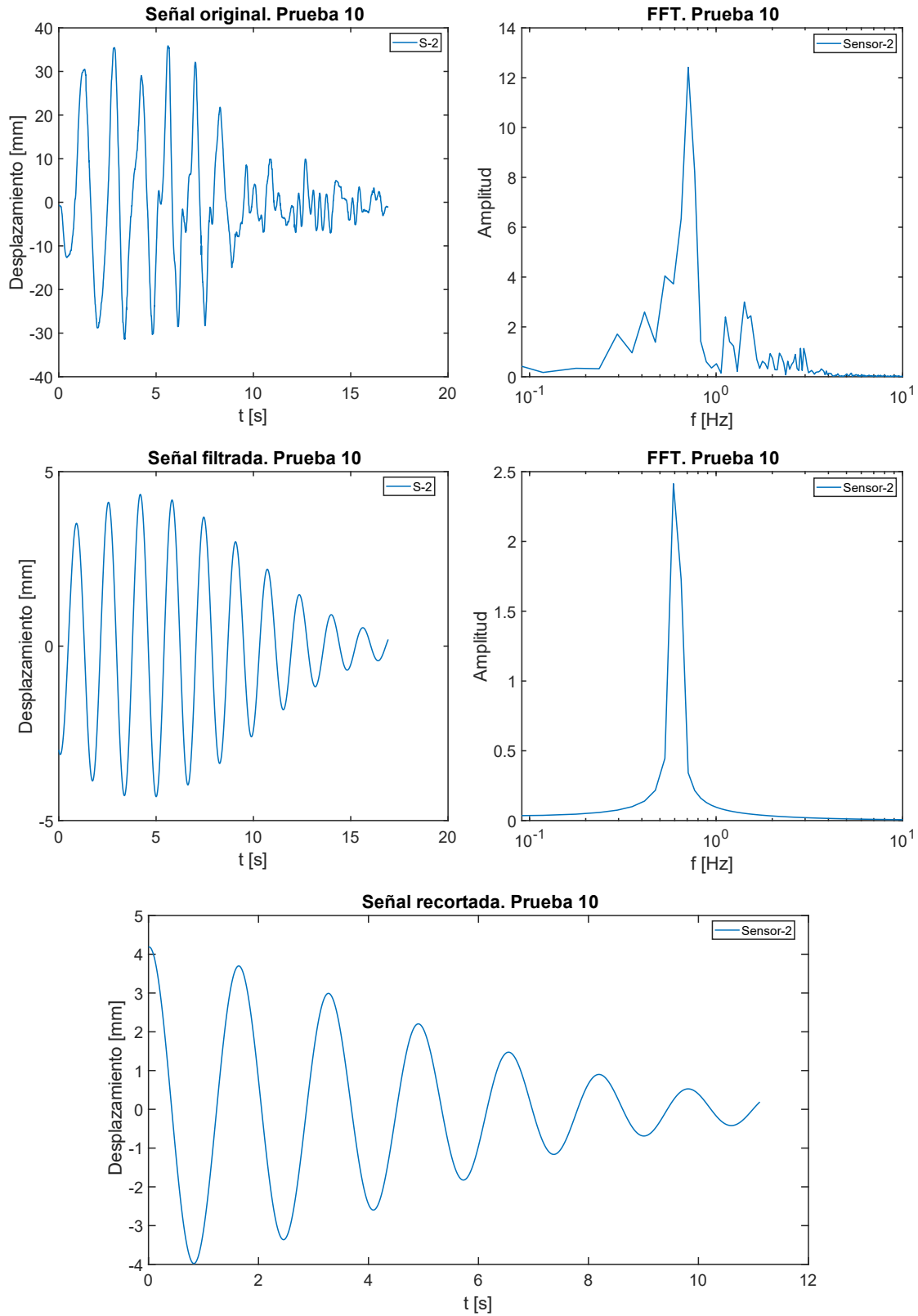


Ilustración 10. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 10, mediante el método de la cámara phantom.

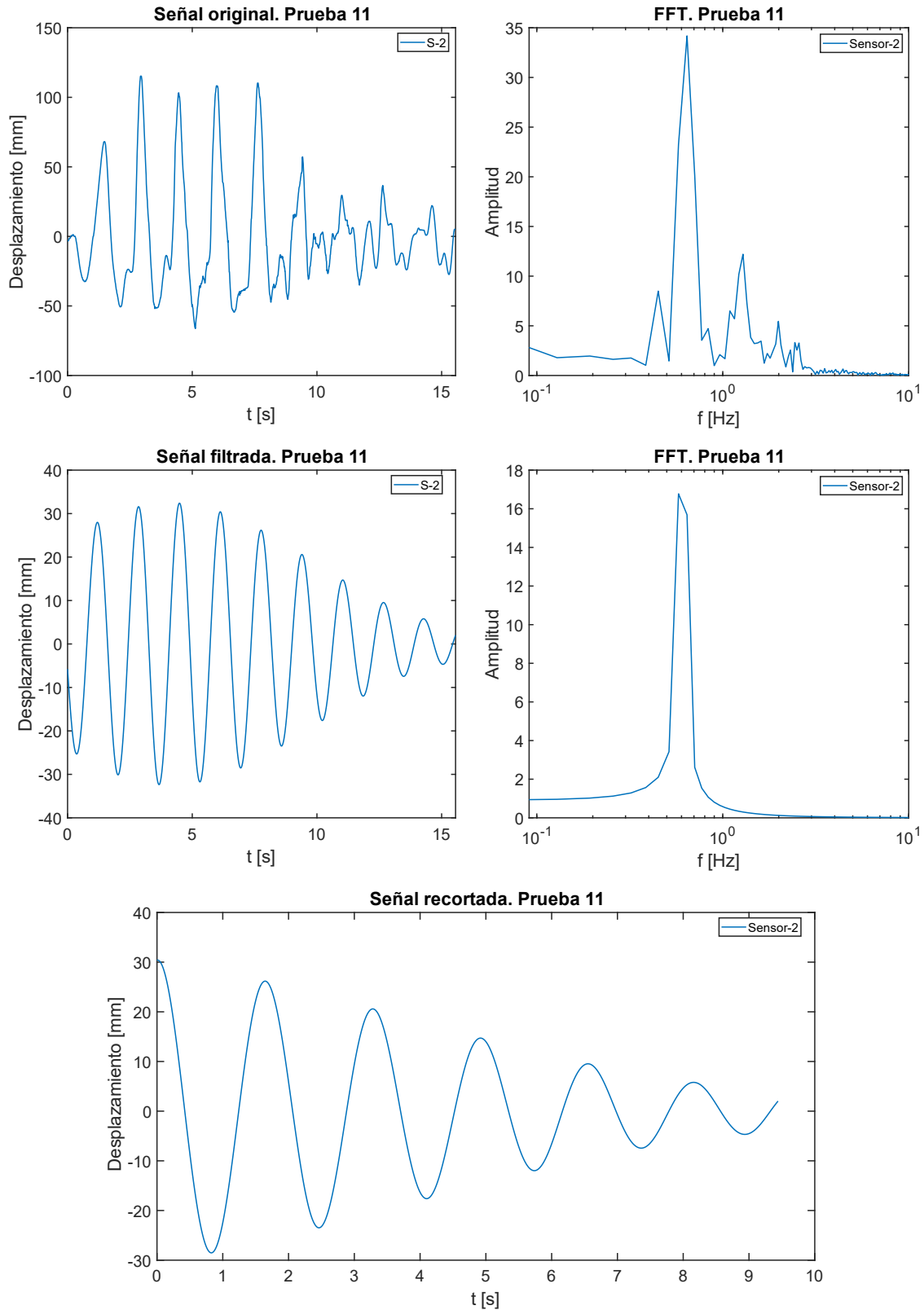


Ilustración 11. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 11, mediante el método de la cámara phantom.

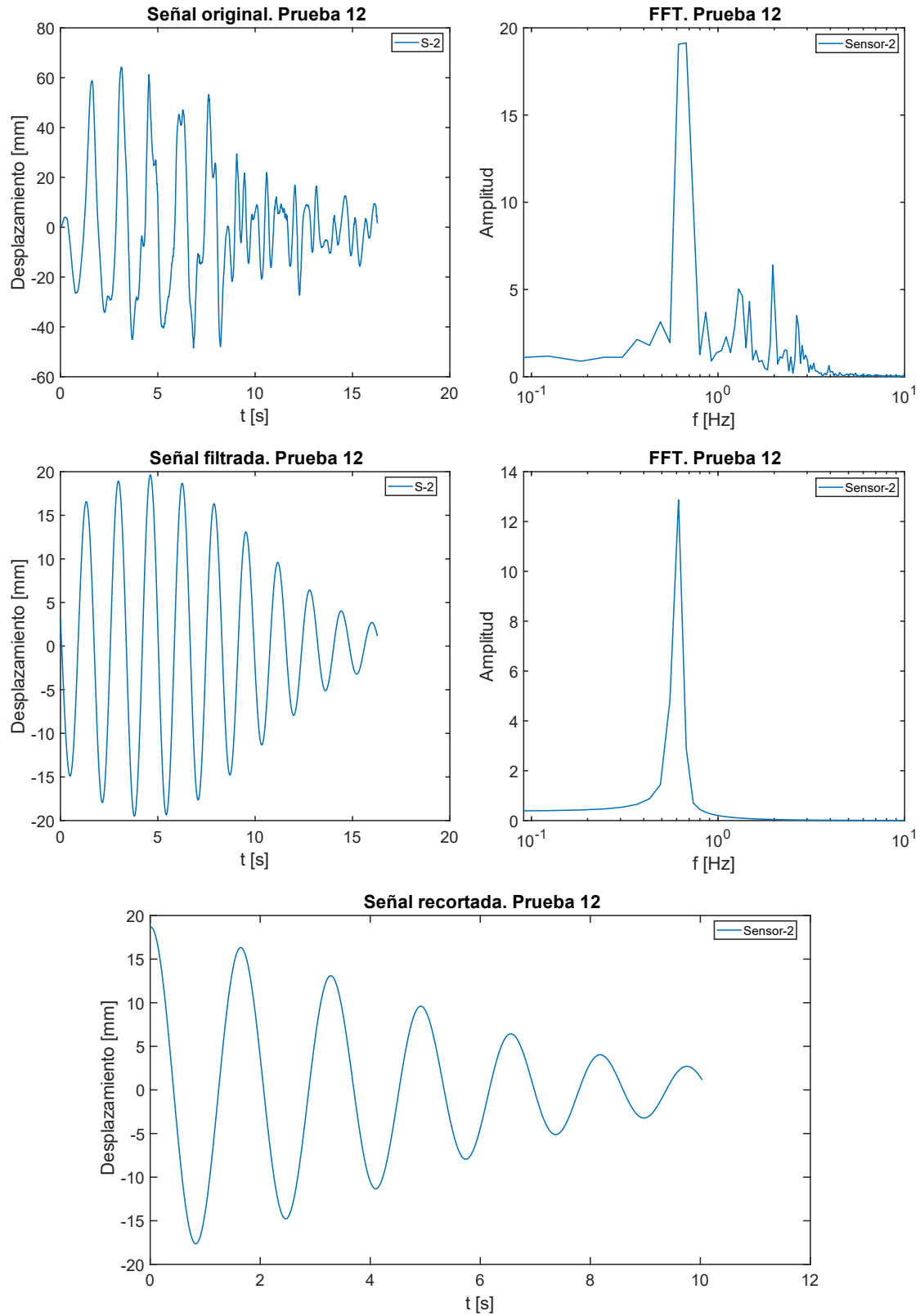


Ilustración 12. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 12, mediante el método de la cámara phantom.

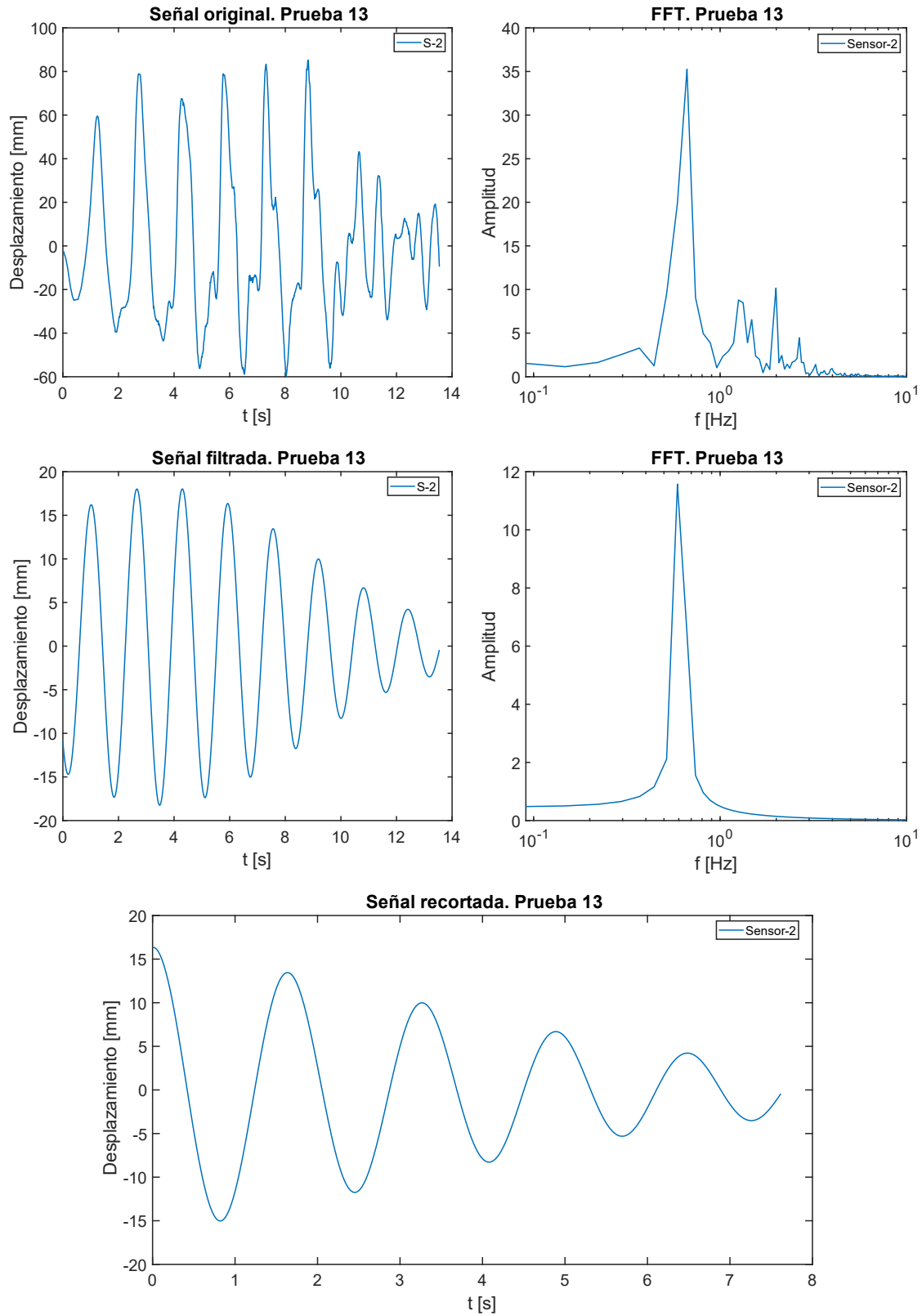


Ilustración 13. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 13, mediante el método de la cámara phantom.

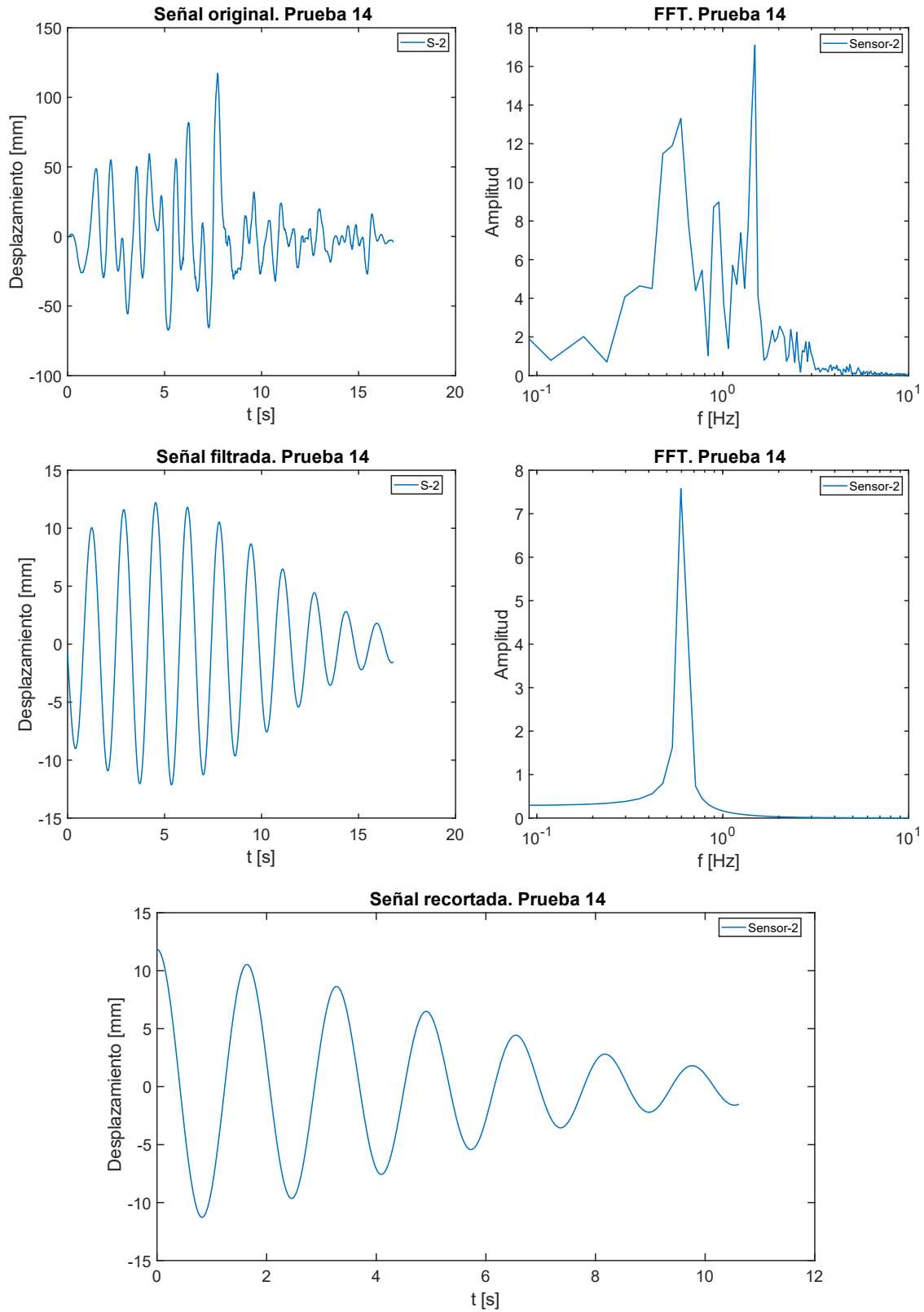


Ilustración 14. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 14, mediante el método de la cámara phantom.

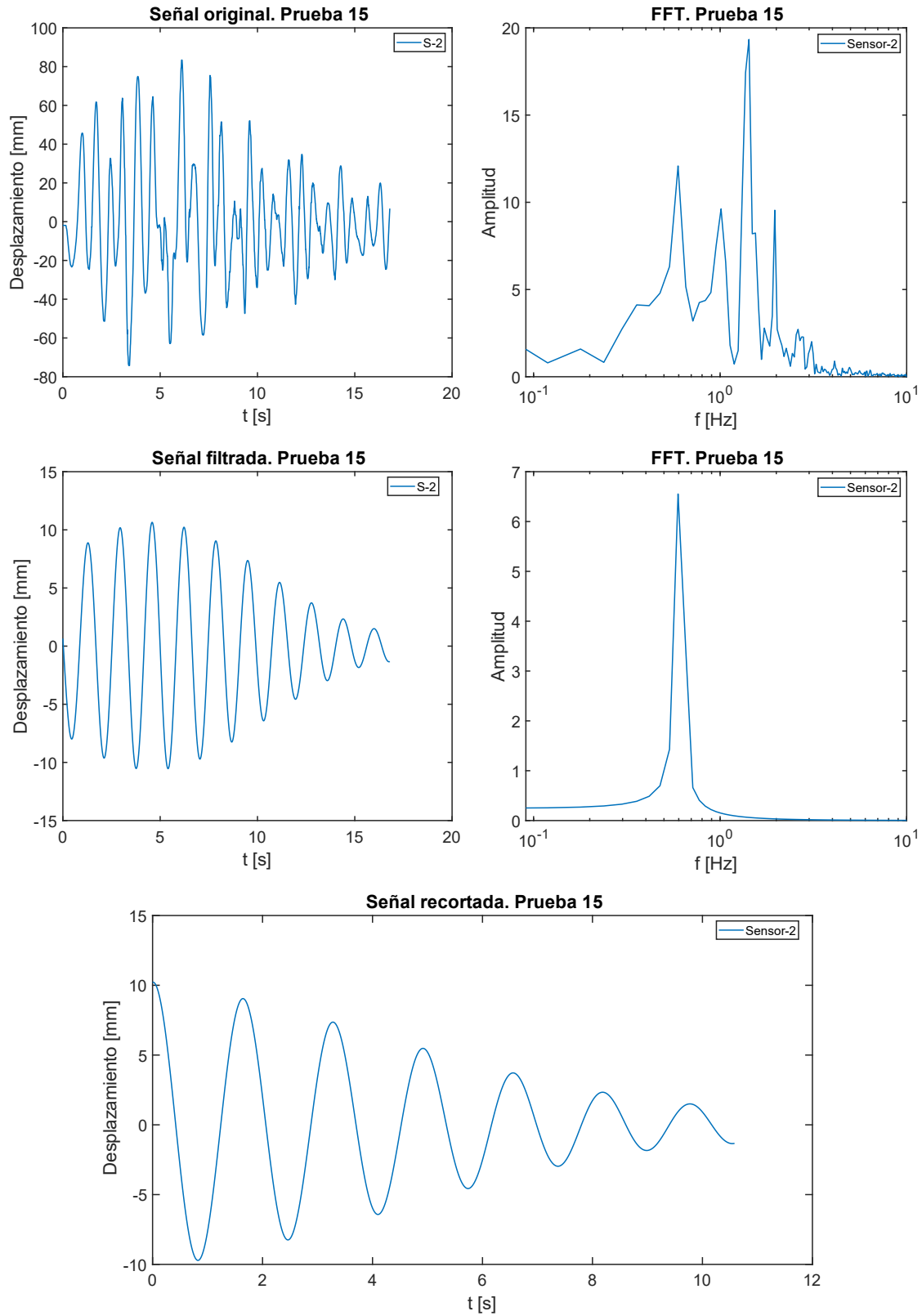


Ilustración 15. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 15, mediante el método de la cámara phantom.

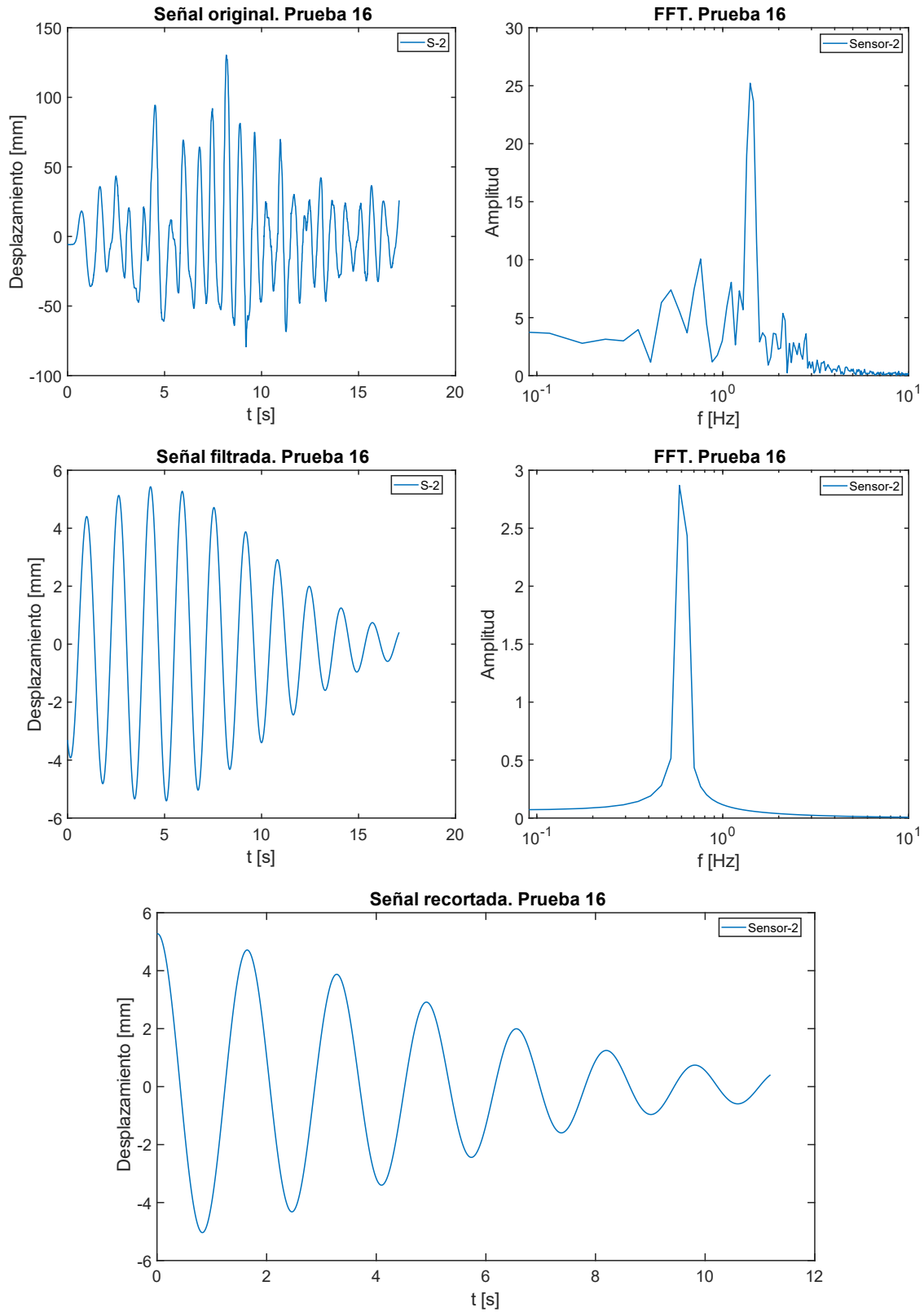


Ilustración 16. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 16, mediante el método de la cámara phantom.

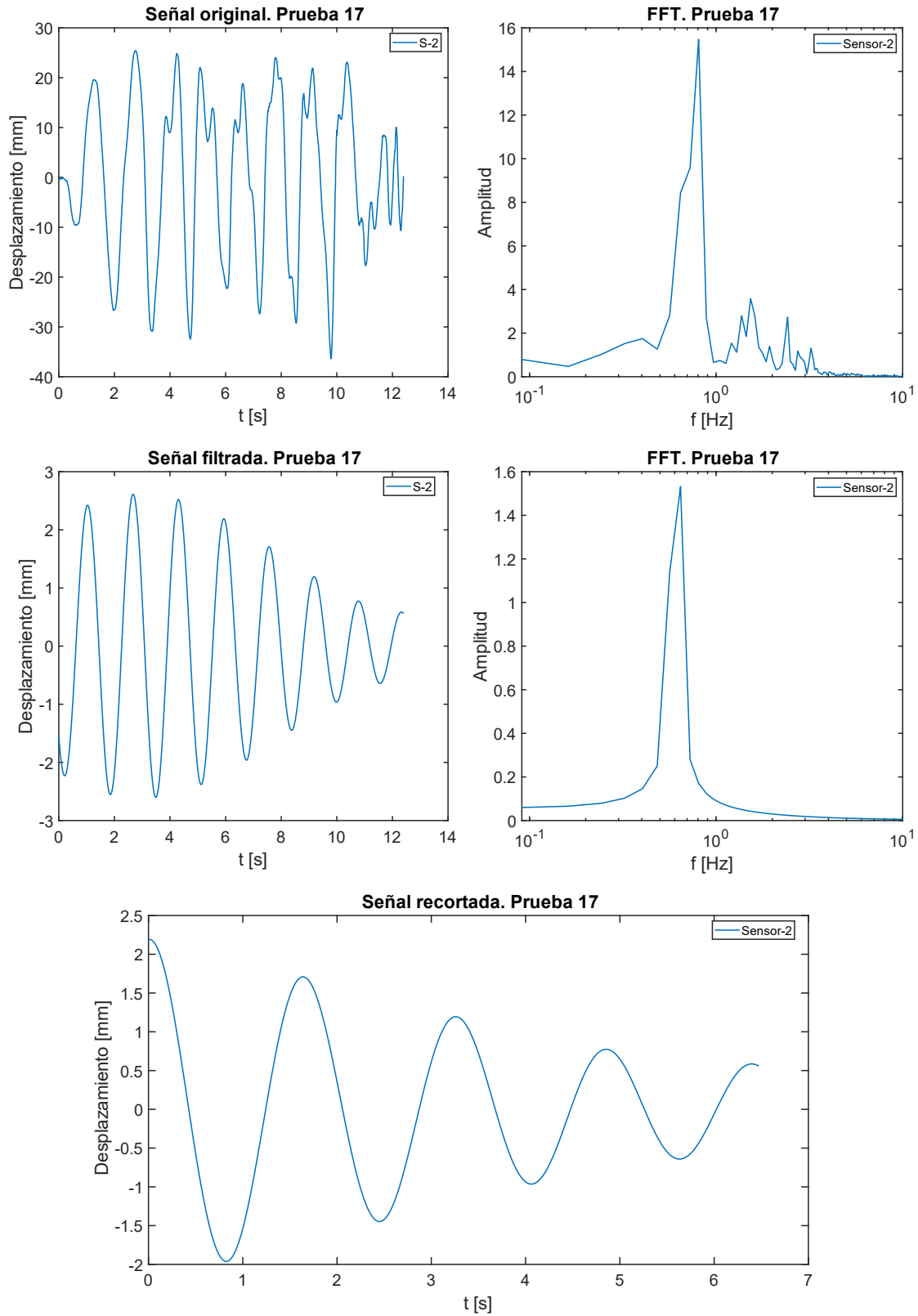


Ilustración 17. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 17, mediante el método de la cámara phantom.

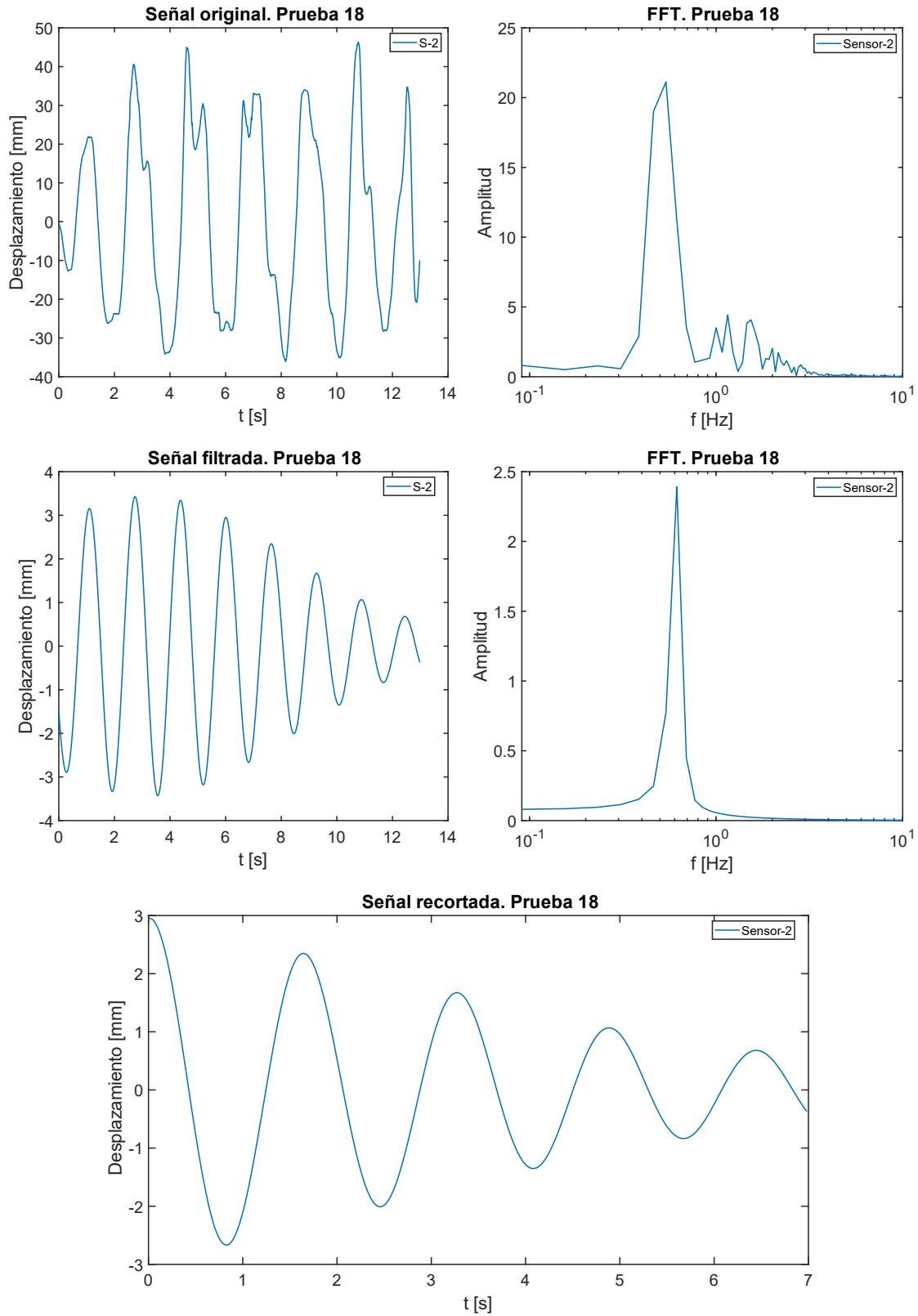


Ilustración 18. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 18, mediante el método de la cámara phantom.

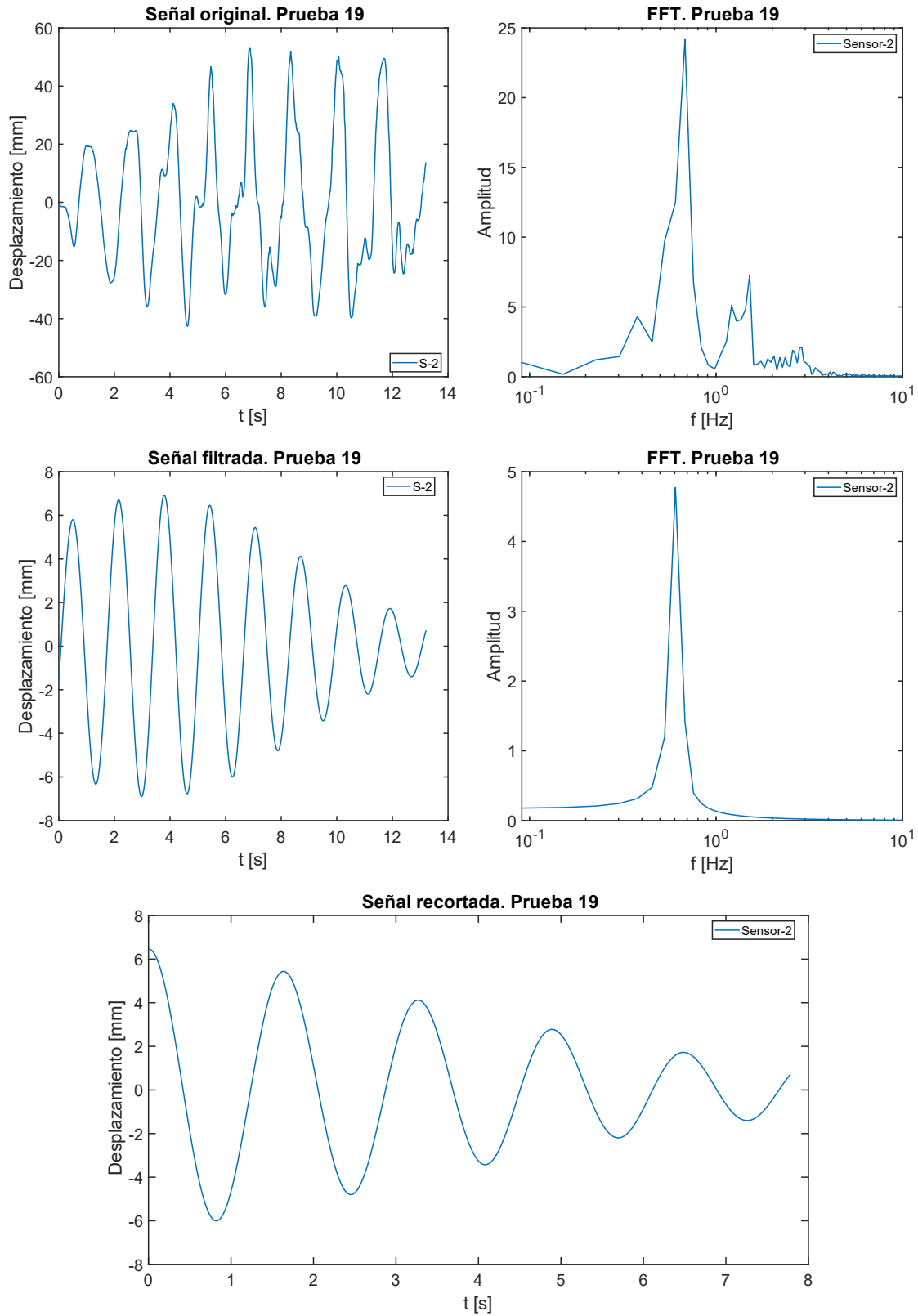


Ilustración 19. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 19, mediante el método de la cámara phantom.

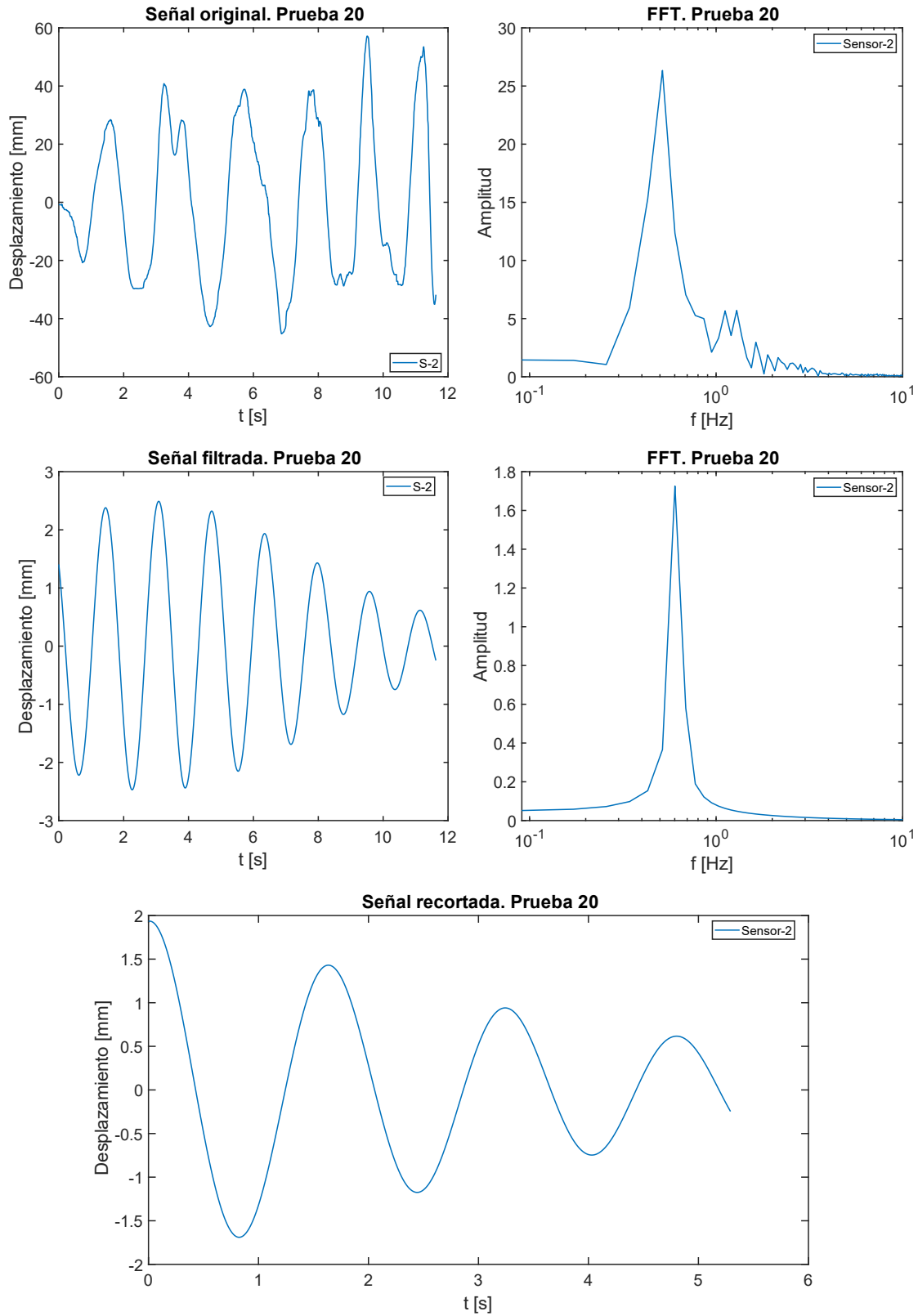


Ilustración 20. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 20, mediante el método de la cámara phantom.

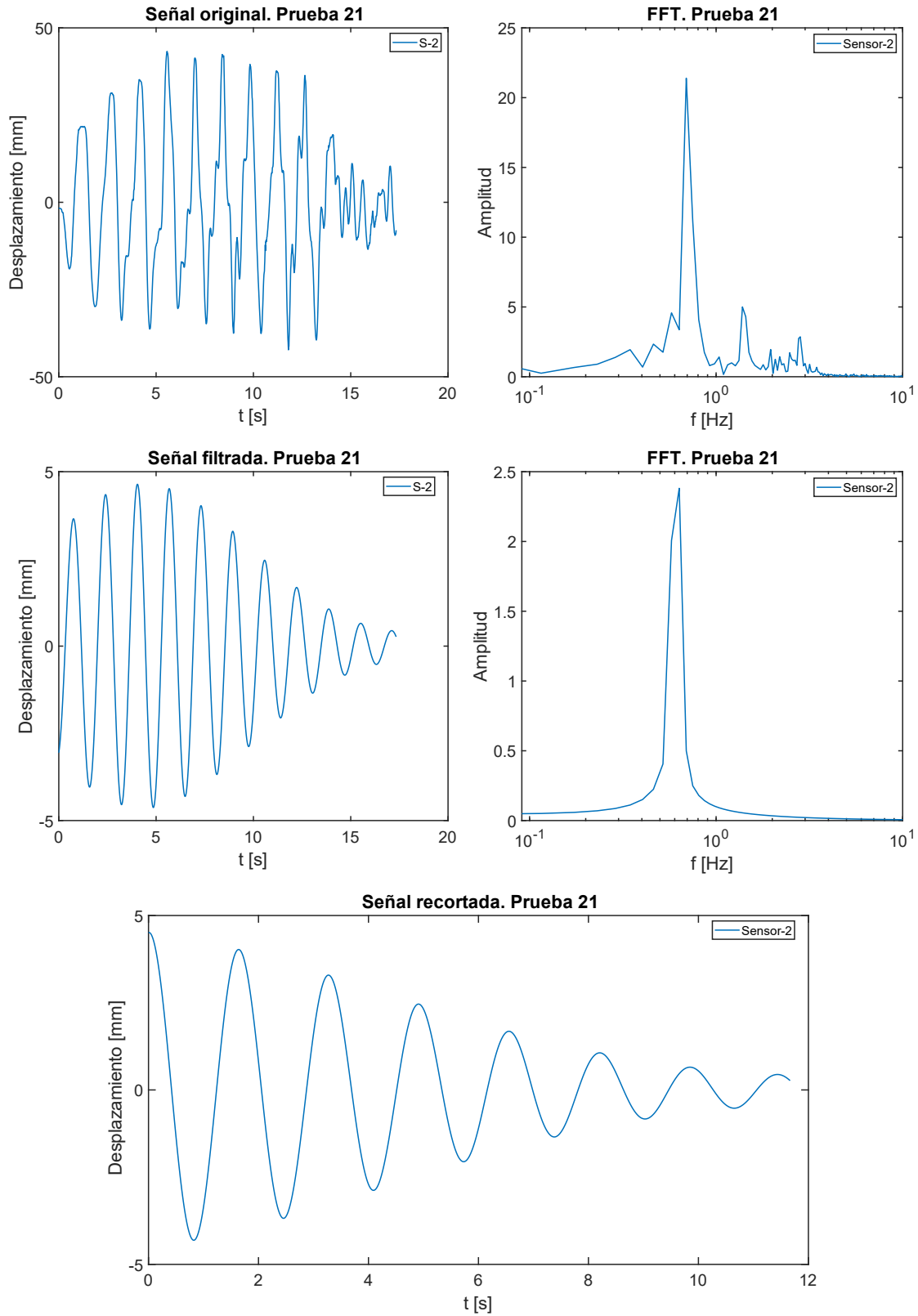


Ilustración 21. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 21, mediante el método de la cámara phantom.

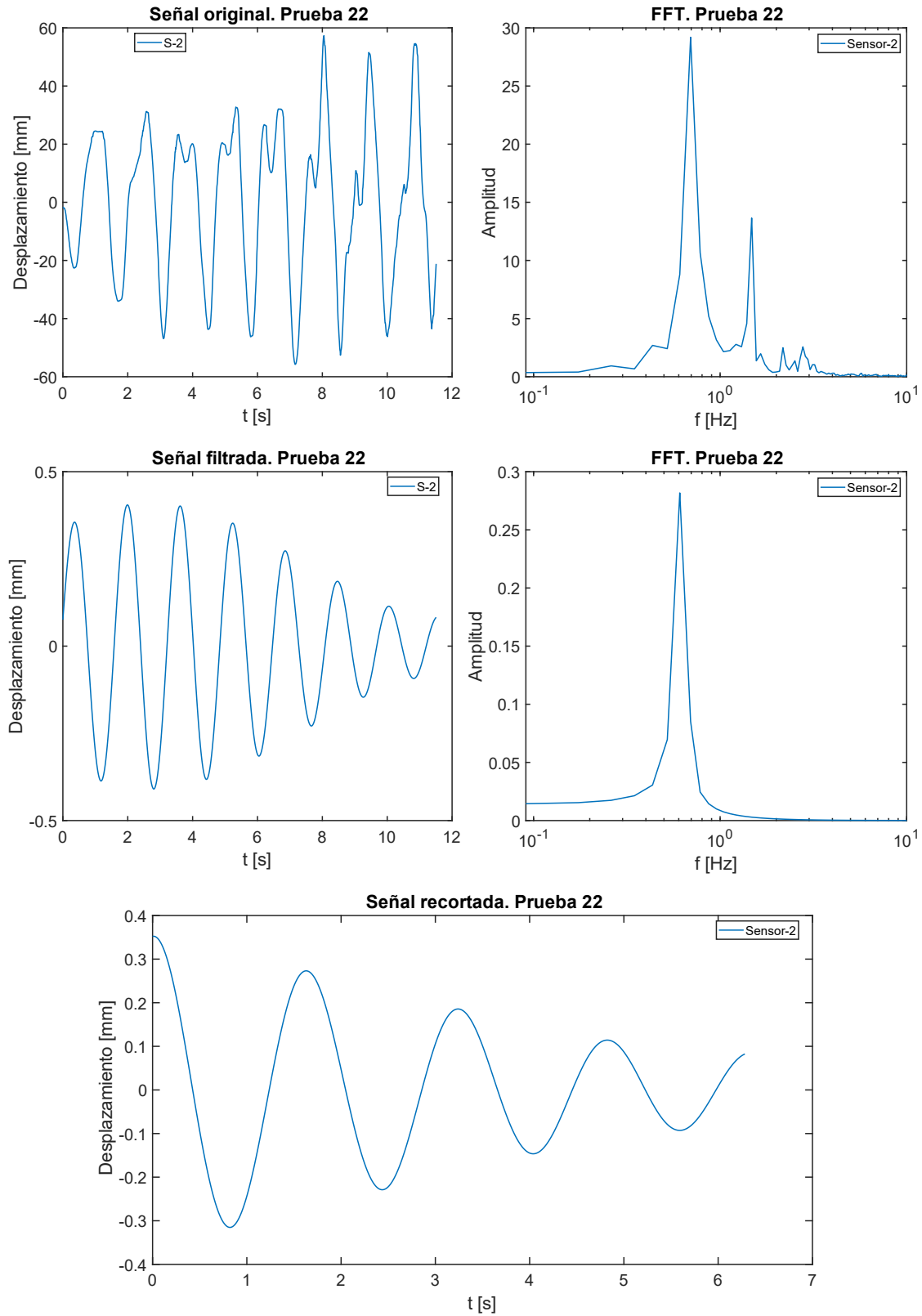


Ilustración 22. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 22, mediante el método de la cámara phantom.

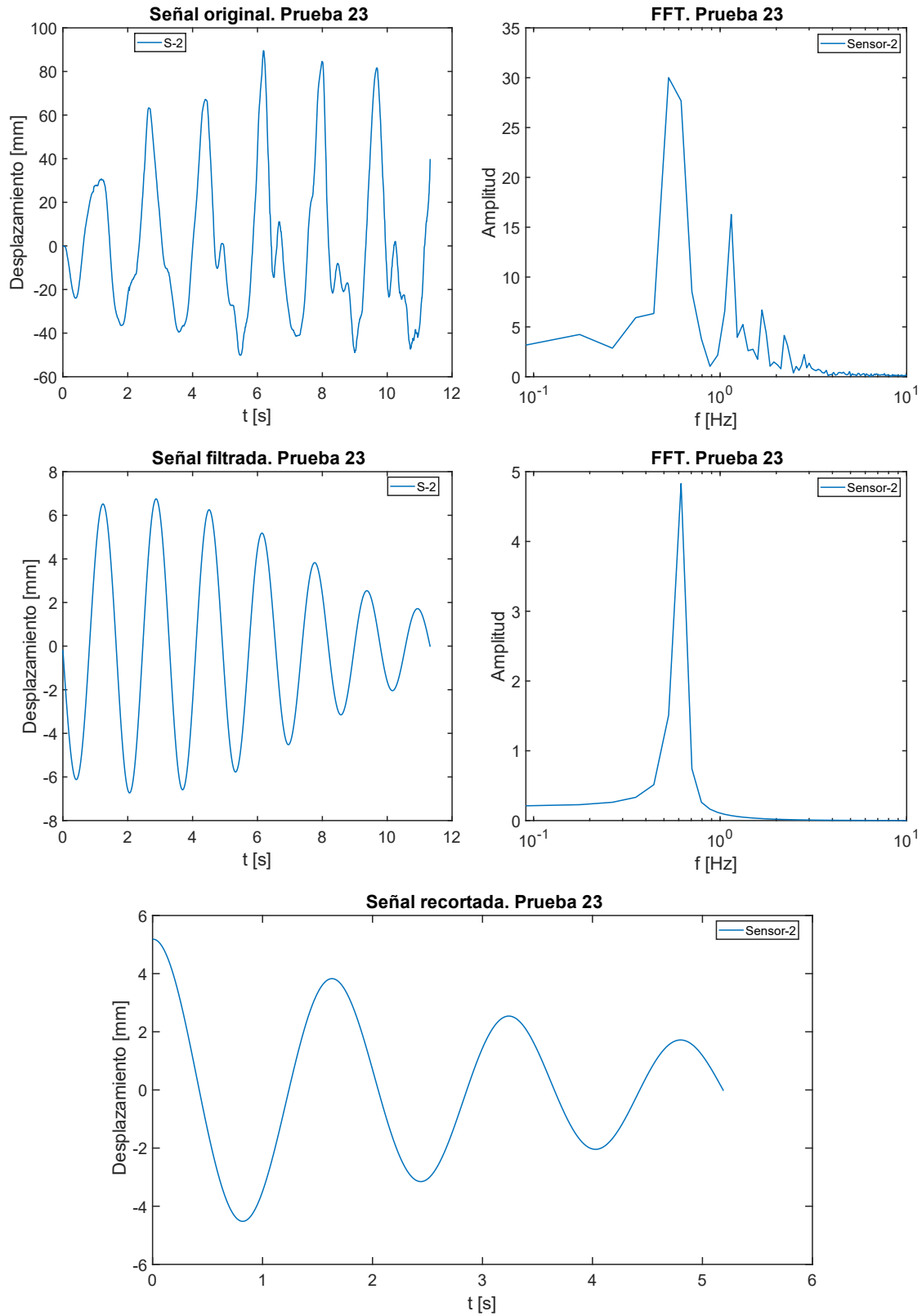


Ilustración 23. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 23, mediante el método de la cámara phantom.

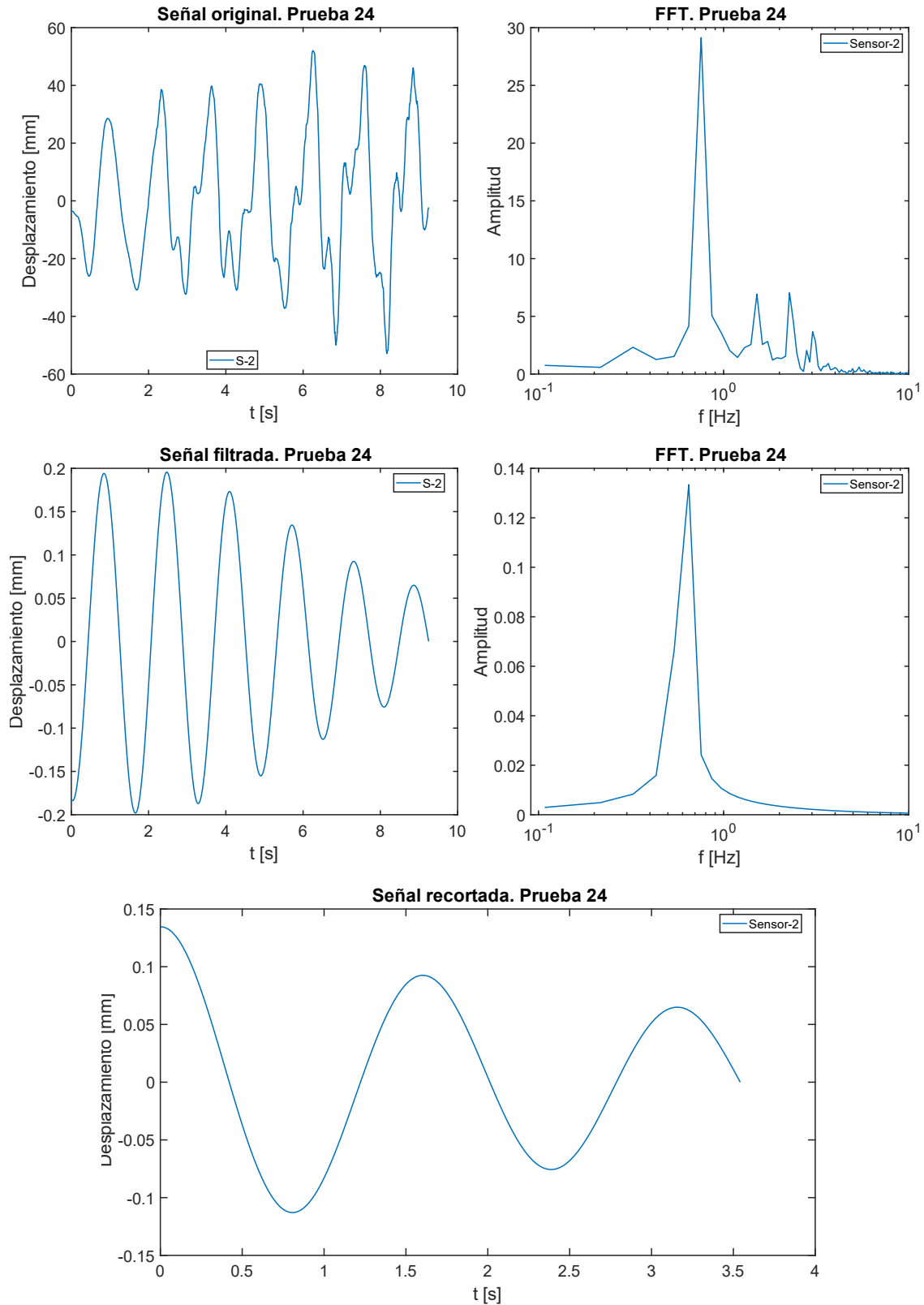


Ilustración 24. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 24, mediante el método de la cámara phantom.

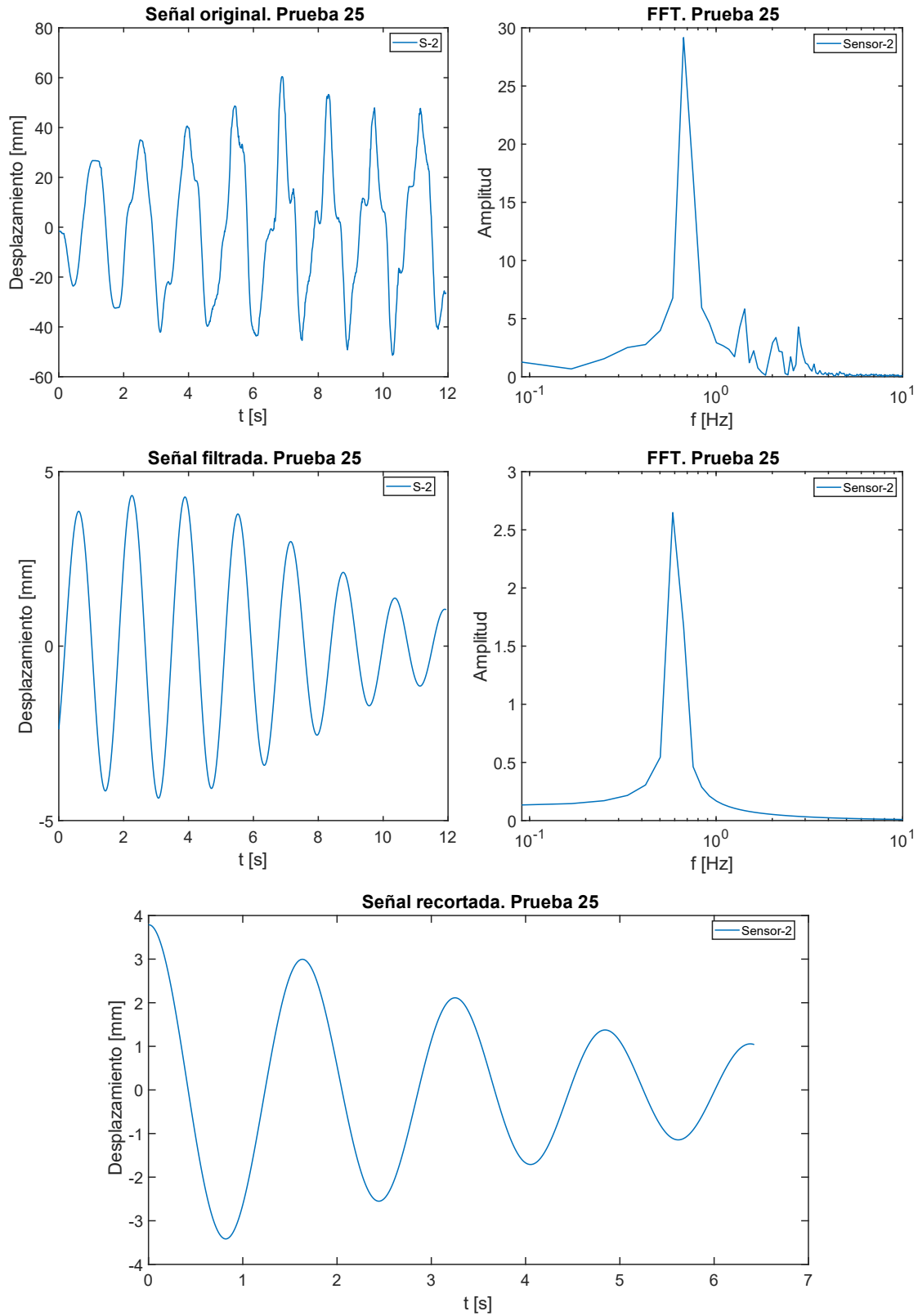


Ilustración 25. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 25, mediante el método de la cámara phantom.

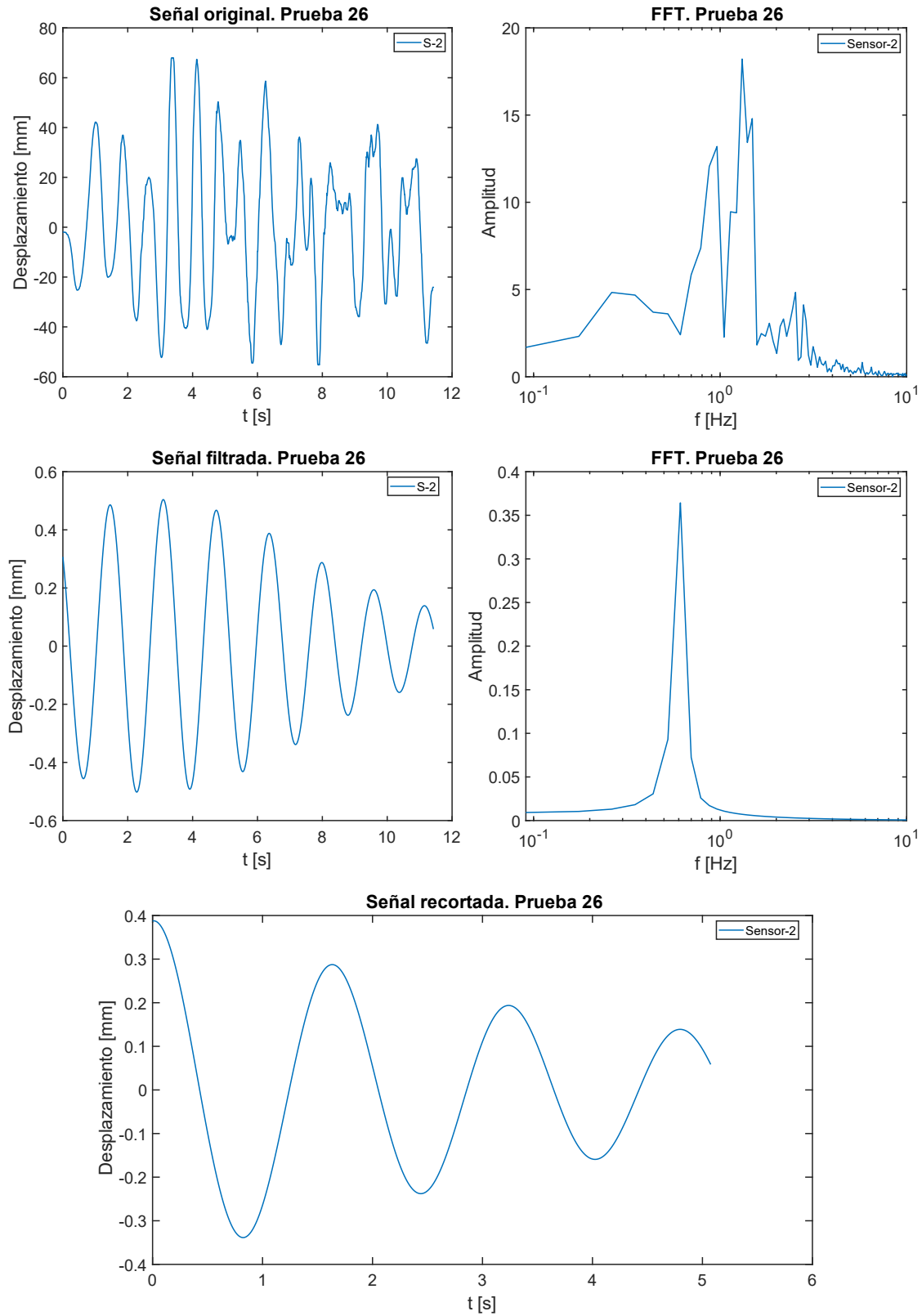


Ilustración 26. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 26, mediante el método de la cámara phantom.

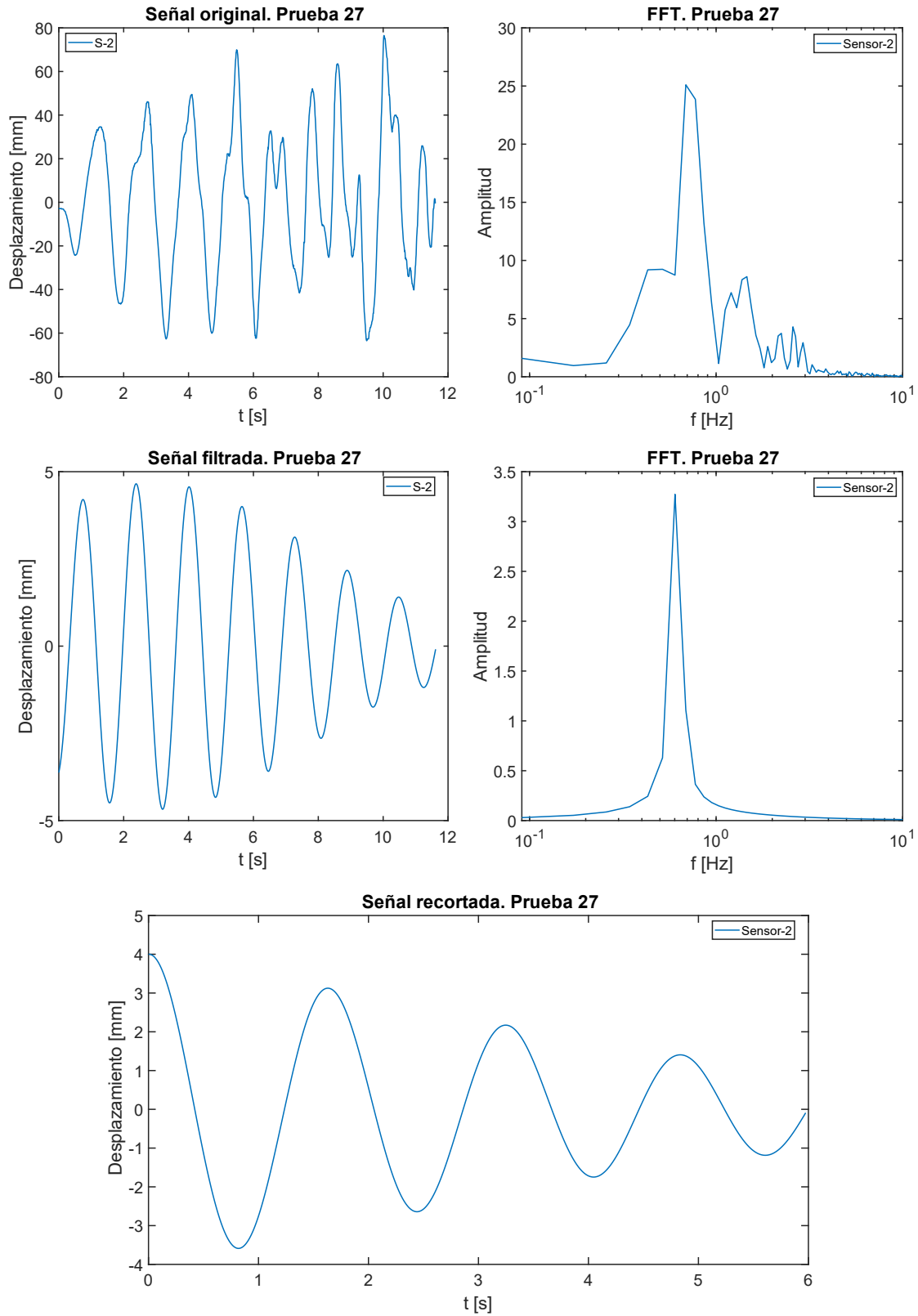


Ilustración 27. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 27, mediante el método de la cámara phantom.

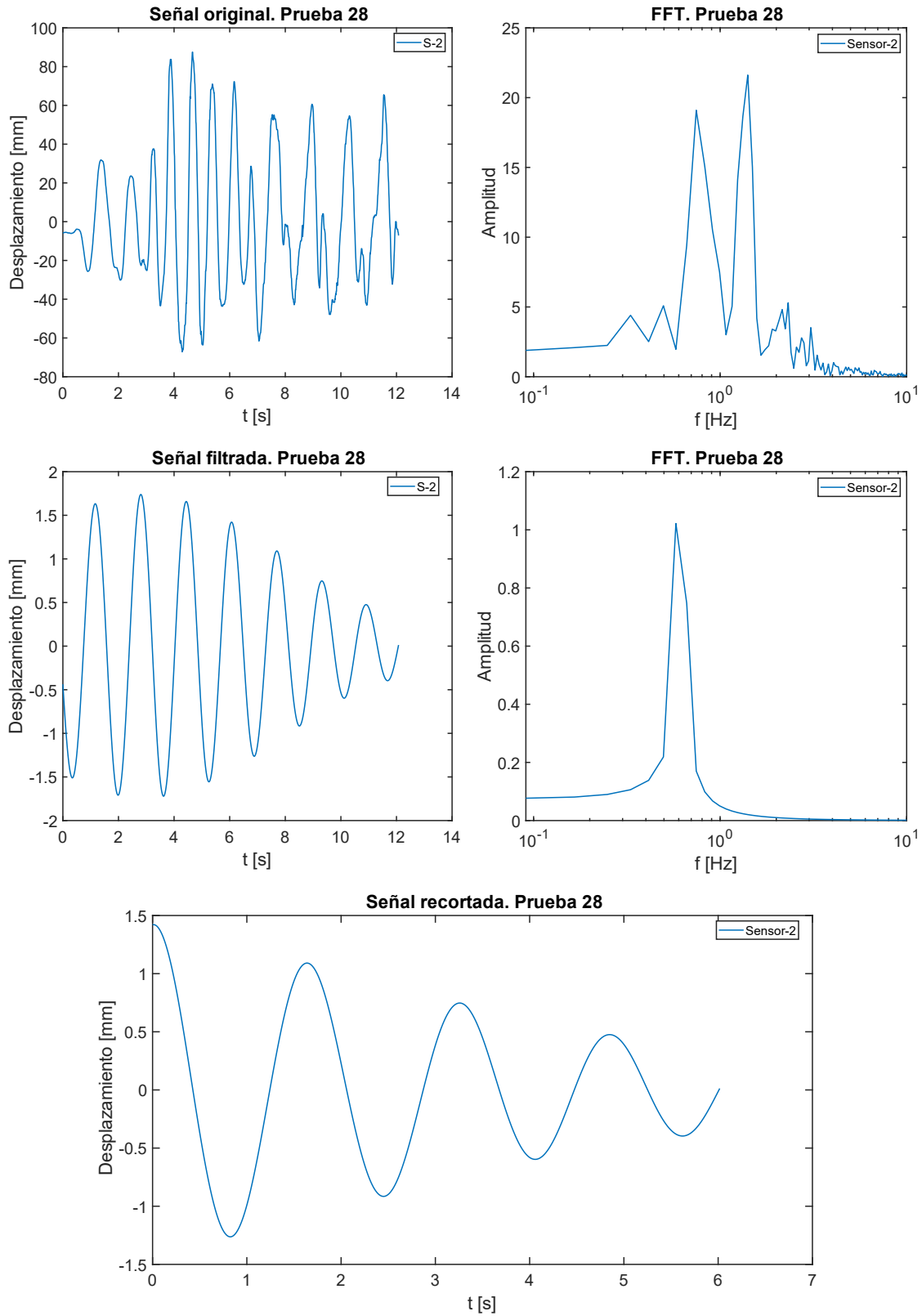


Ilustración 28. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 28, mediante el método de la cámara phantom.

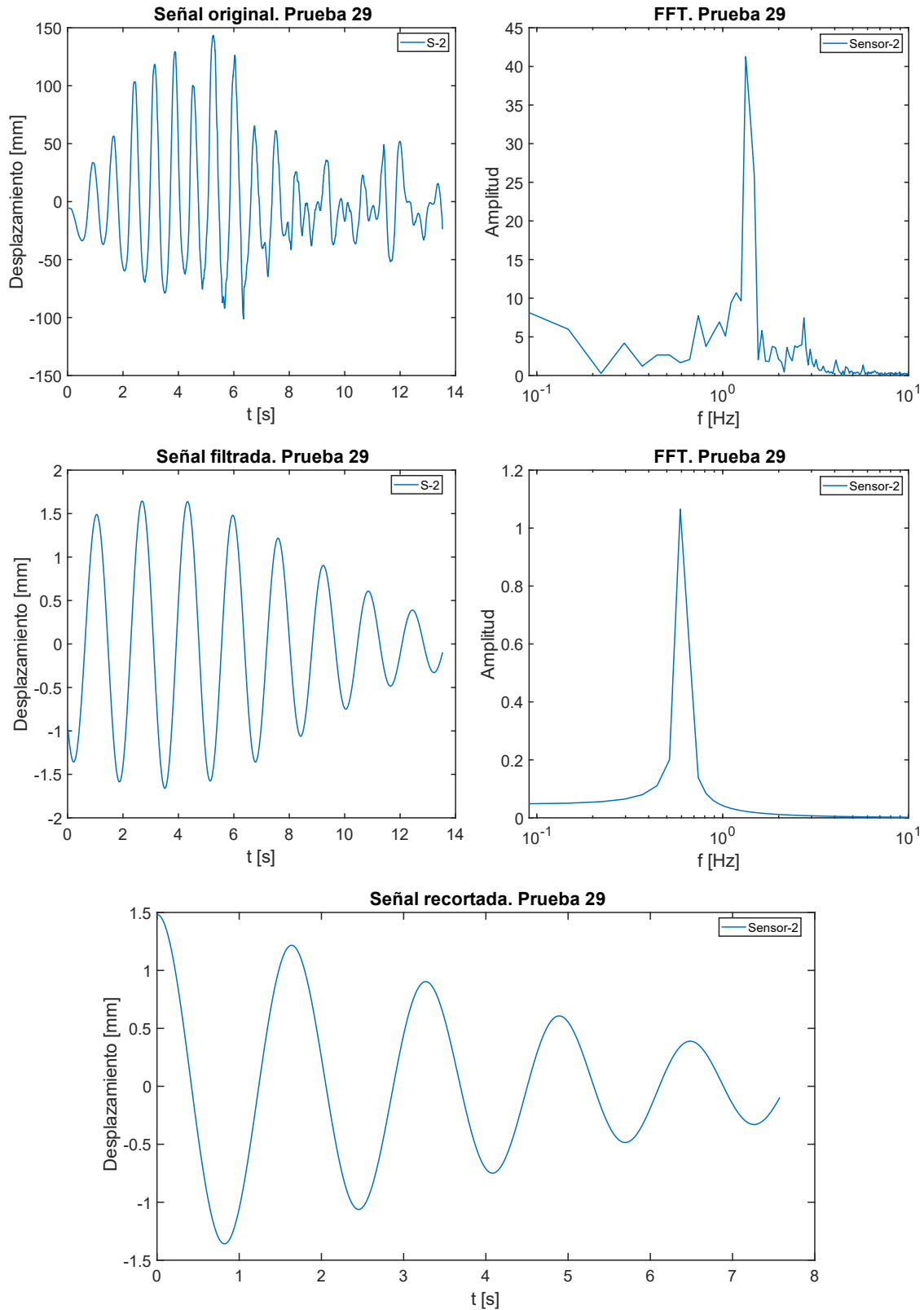


Ilustración 29. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 29, mediante el método de la cámara phantom.

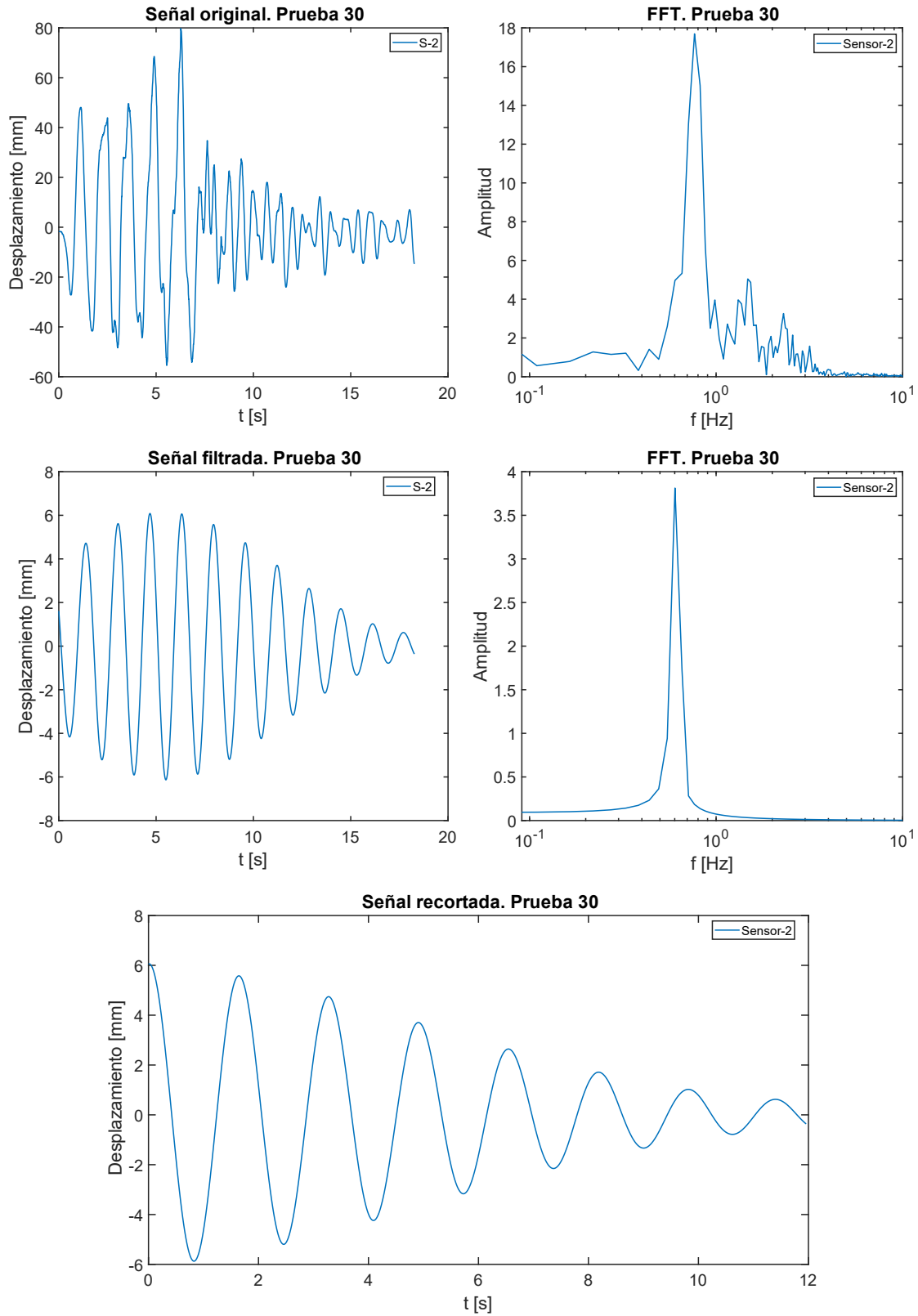


Ilustración 30. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 30, mediante el método de la cámara phantom.

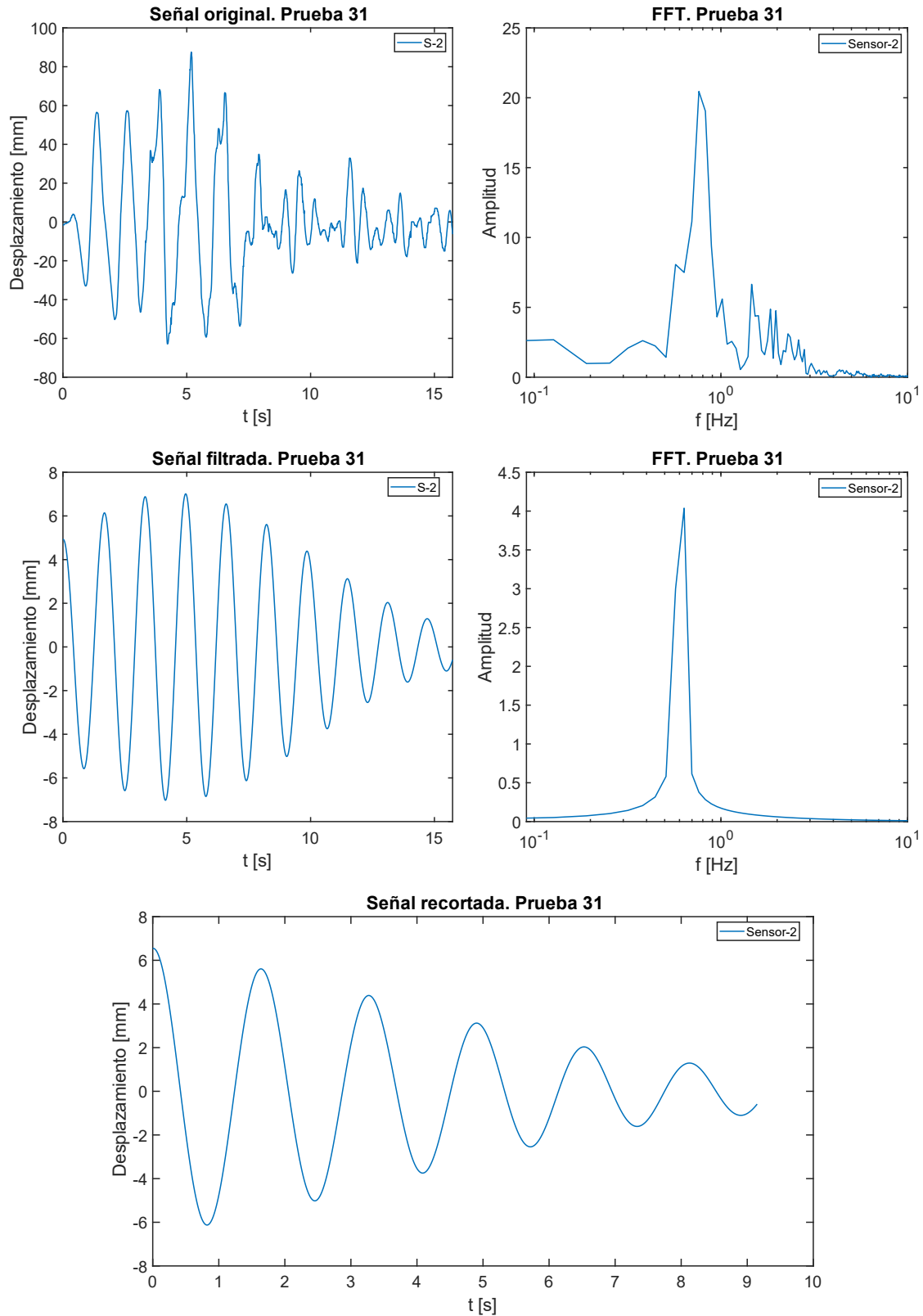


Ilustración 31. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 31, mediante el método de la cámara phantom.

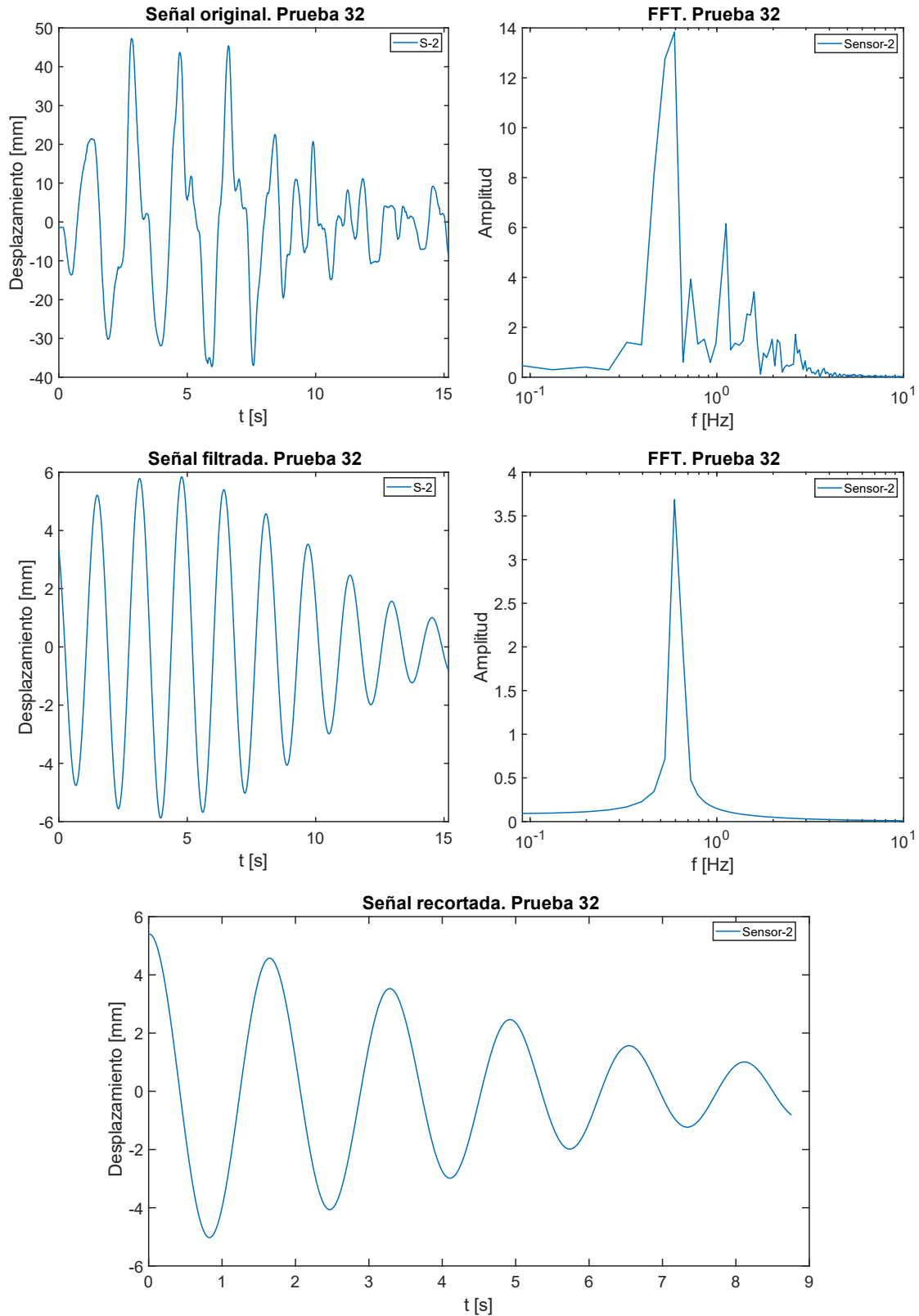


Ilustración 32. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 32, mediante el método de la cámara phantom.

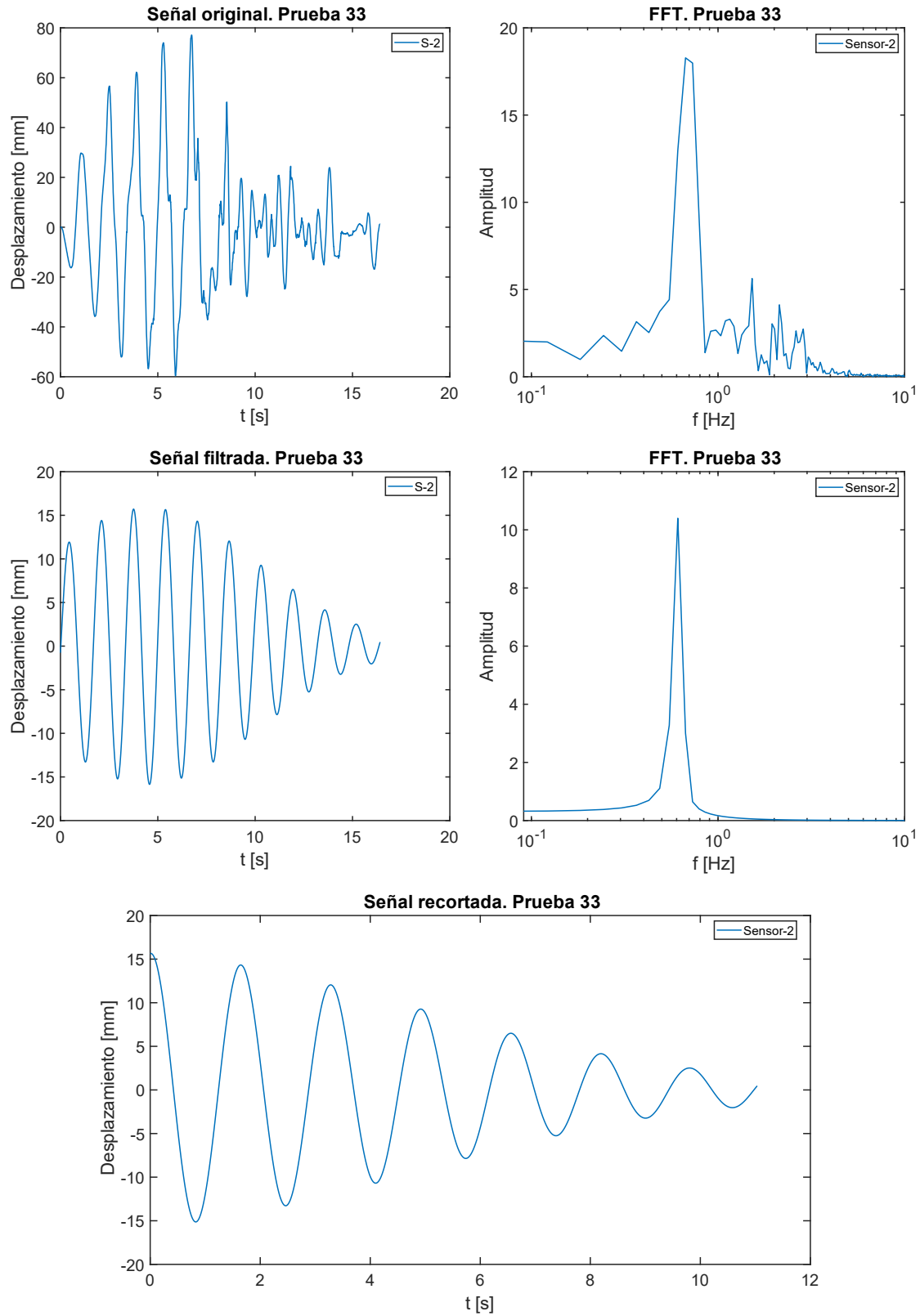


Ilustración 33. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 33, mediante el método de la cámara phantom.

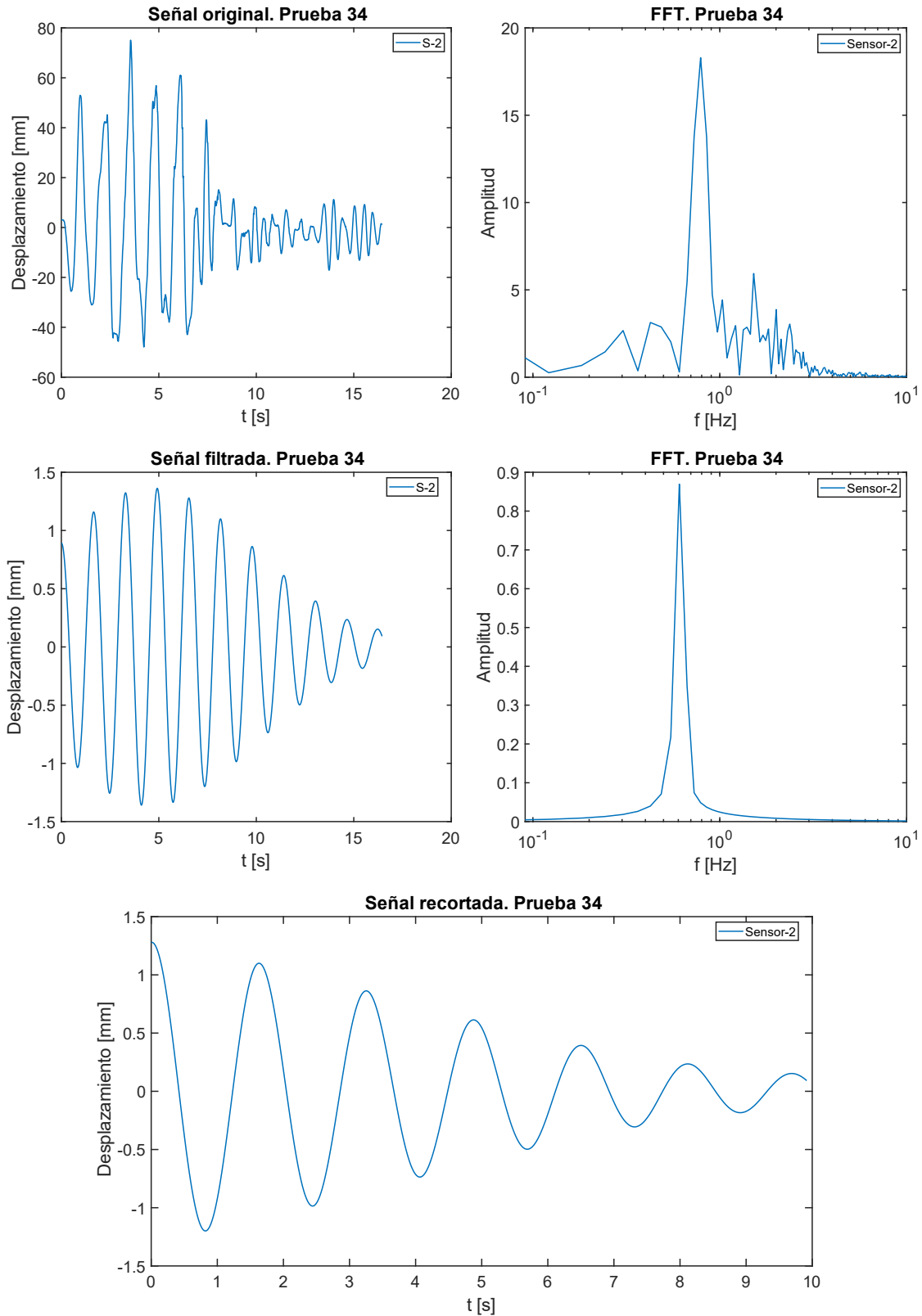


Ilustración 34. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 34, mediante el método de la cámara phantom.

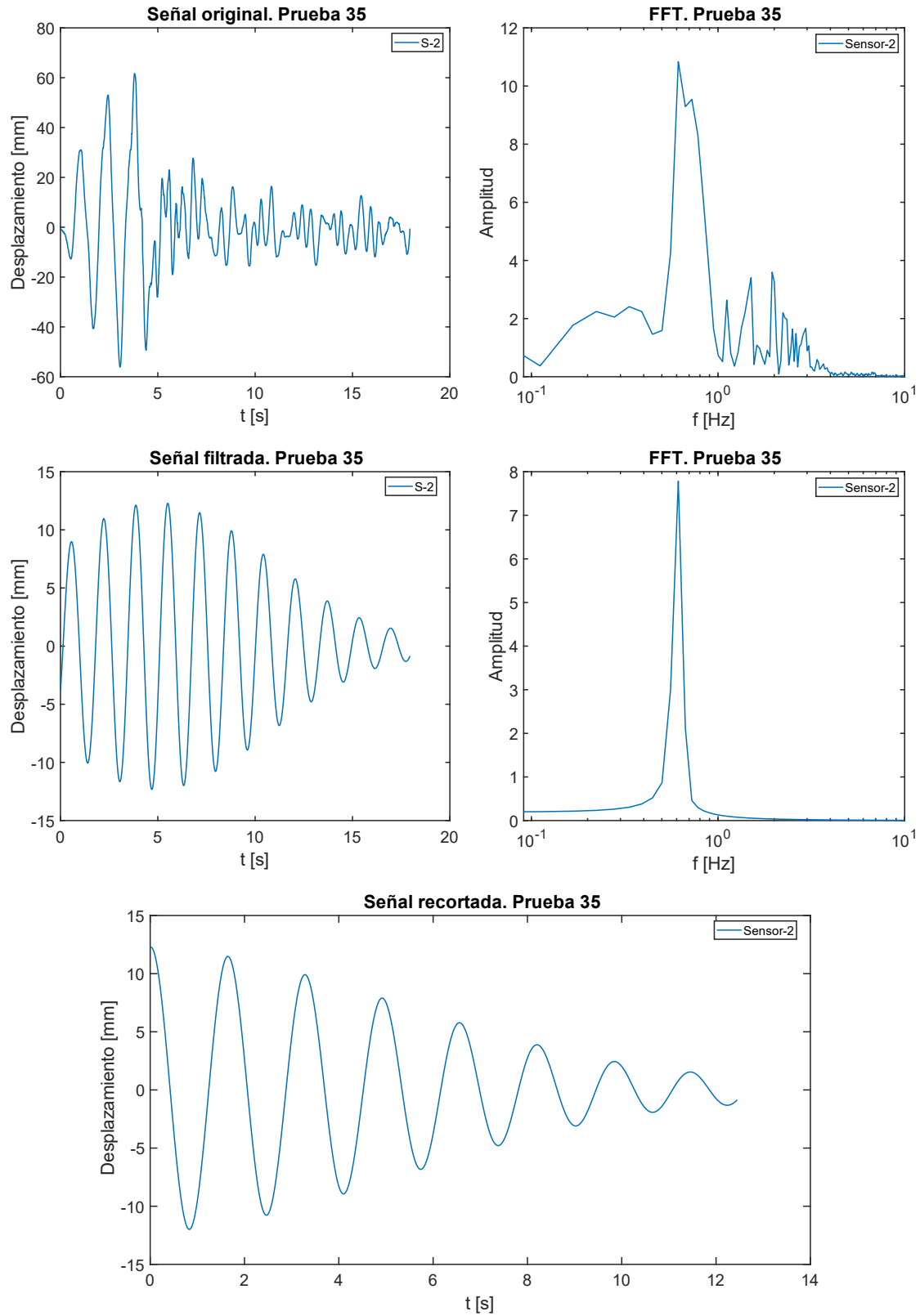


Ilustración 35. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 35, mediante el método de la cámara phantom.

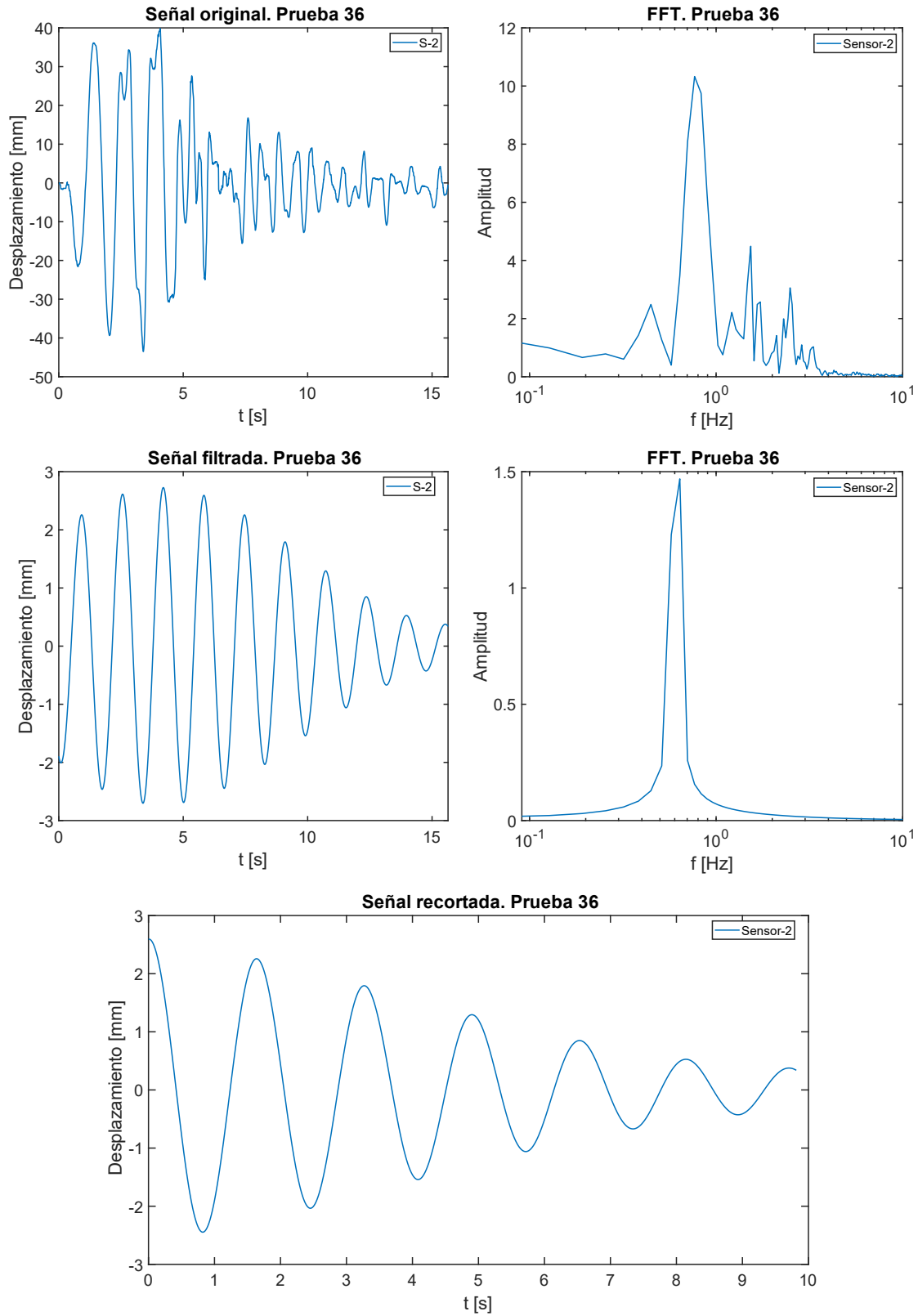


Ilustración 36. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 36, mediante el método de la cámara phantom.

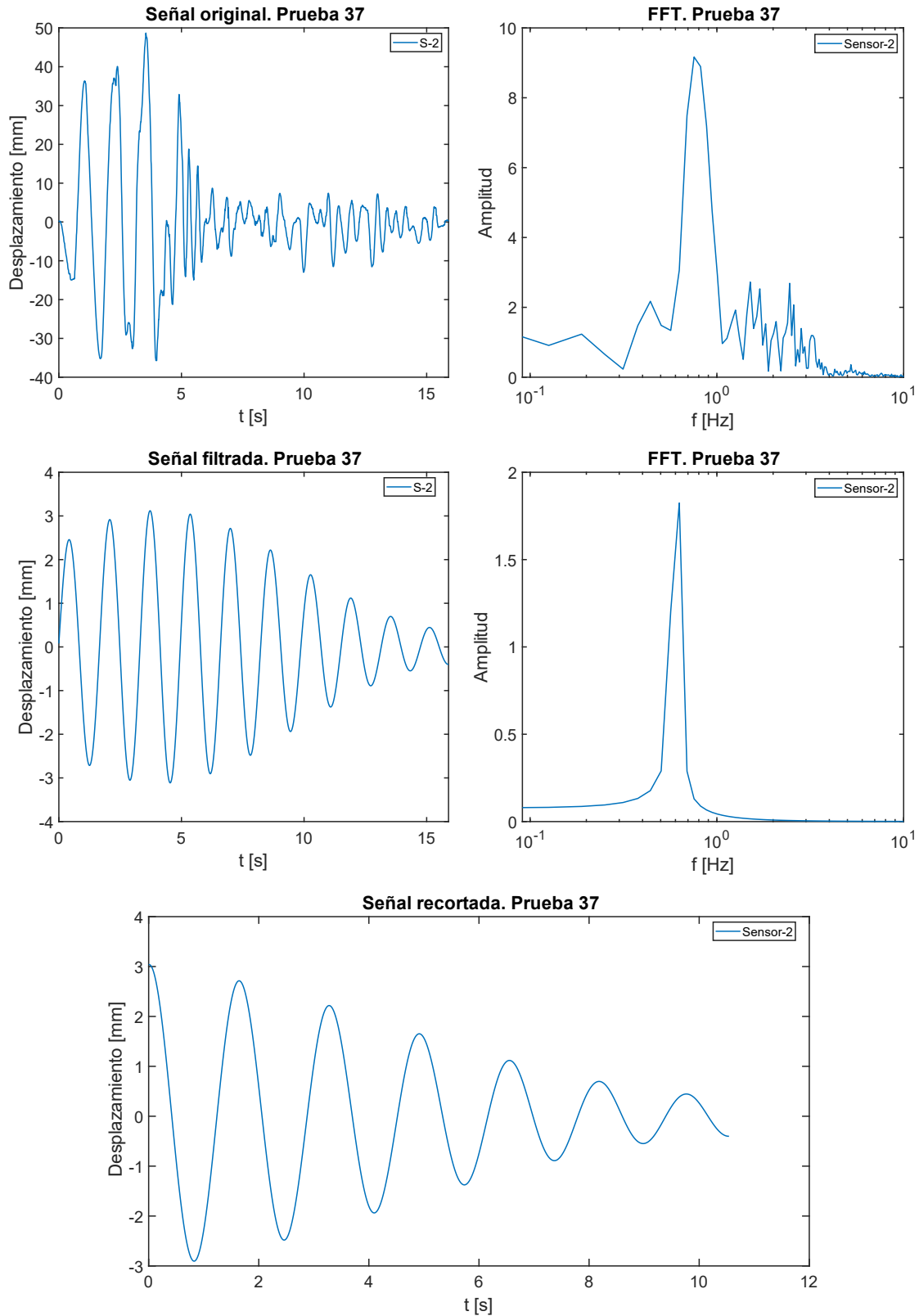


Ilustración 37. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 37, mediante el método de la cámara phantom.

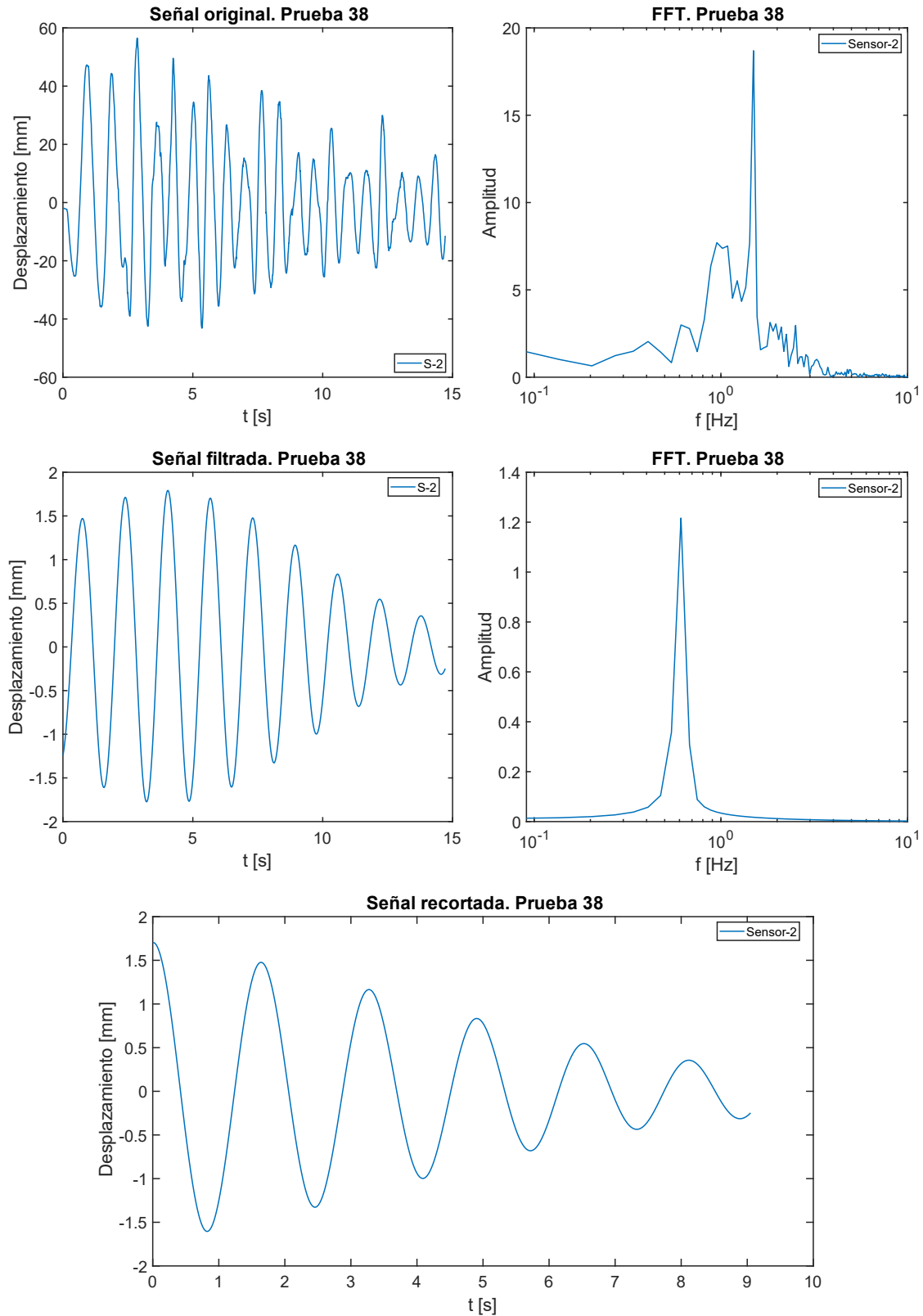


Ilustración 38. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 38, mediante el método de la cámara phantom.

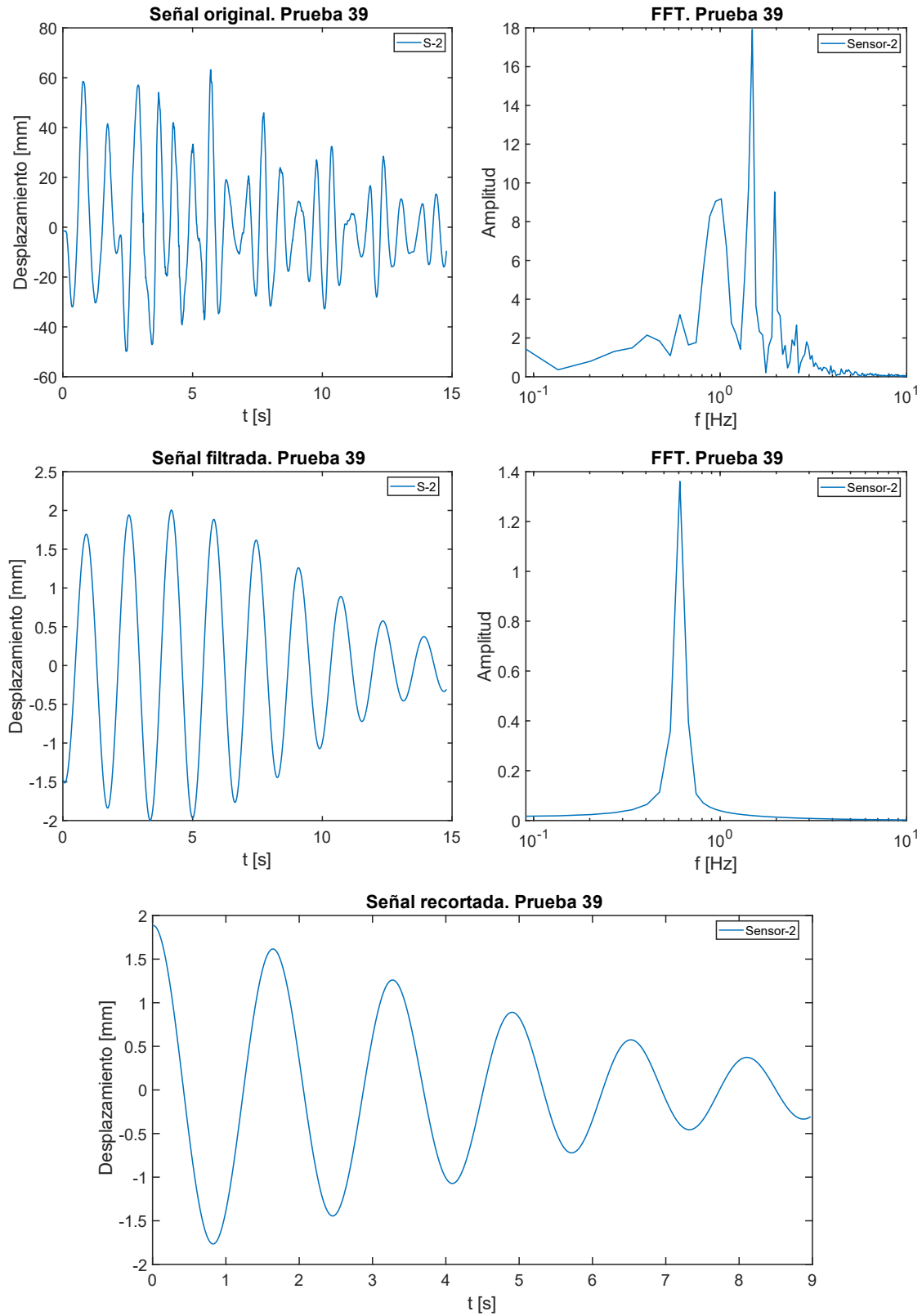


Ilustración 39. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 39, mediante el método de la cámara phantom.

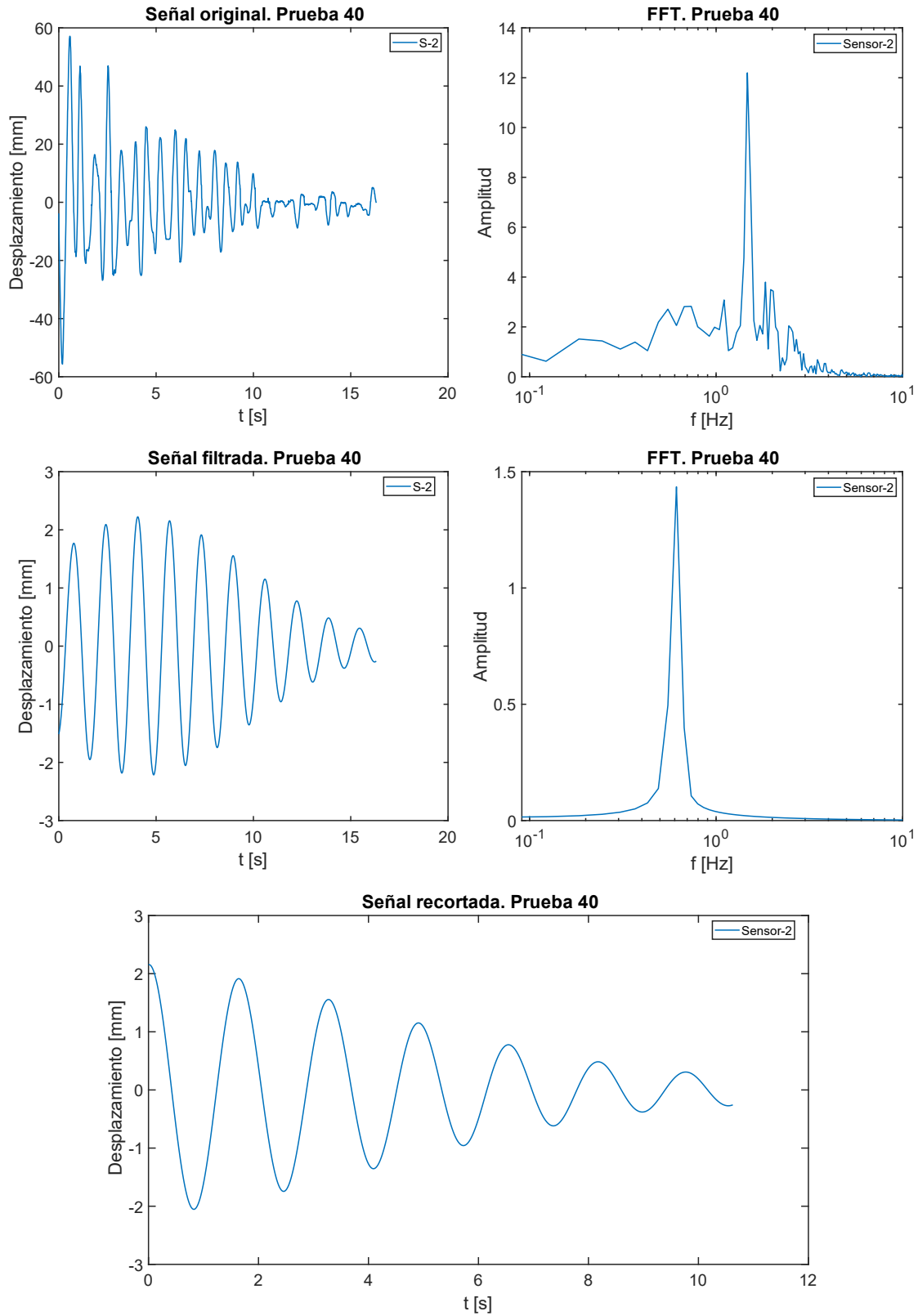


Ilustración 40. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 40, mediante el método de la cámara phantom.

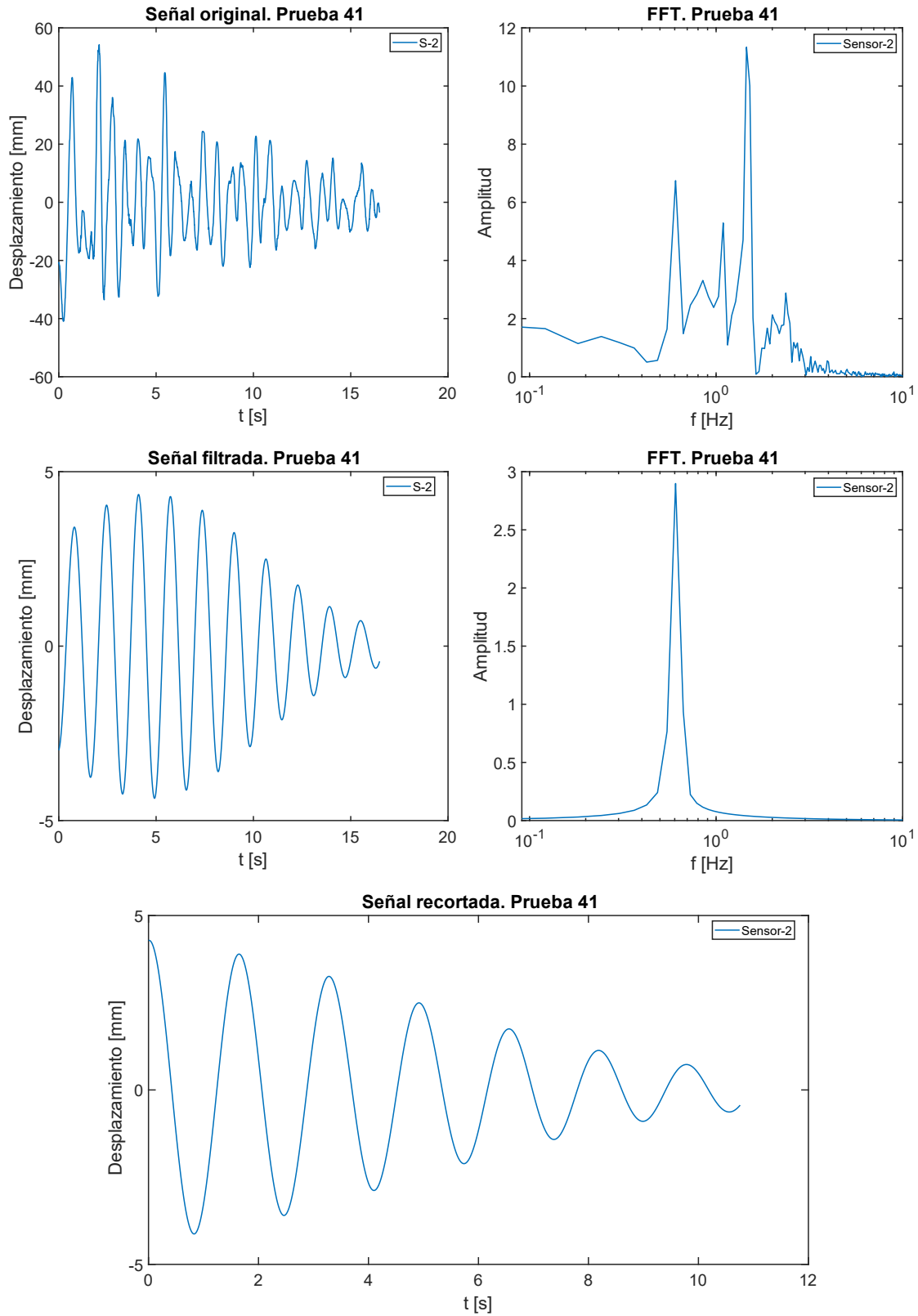


Ilustración 41. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 41, mediante el método de la cámara phantom.

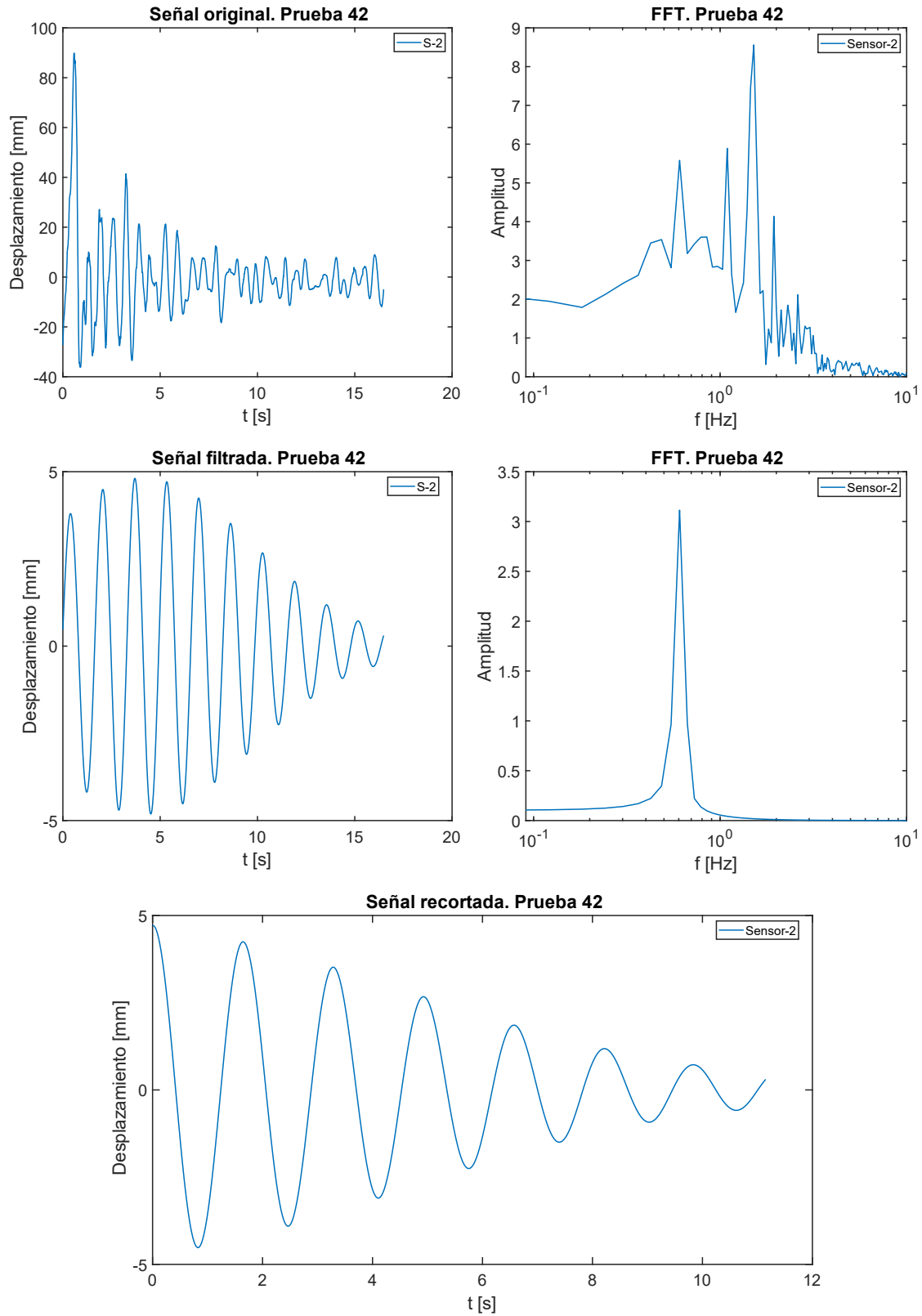


Ilustración 42. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 42, mediante el método de la cámara phantom.

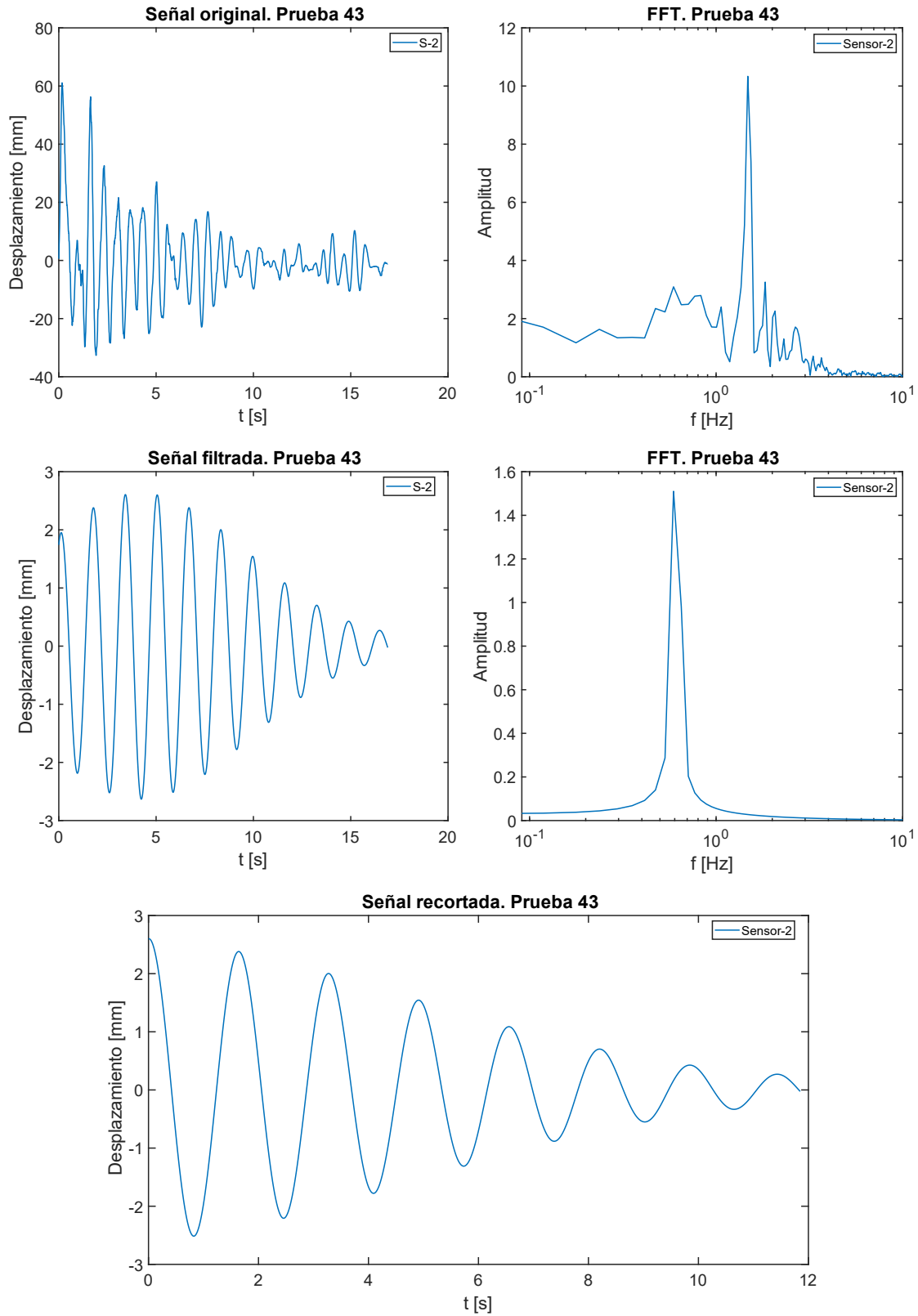


Ilustración 43. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 43, mediante el método de la cámara phantom.

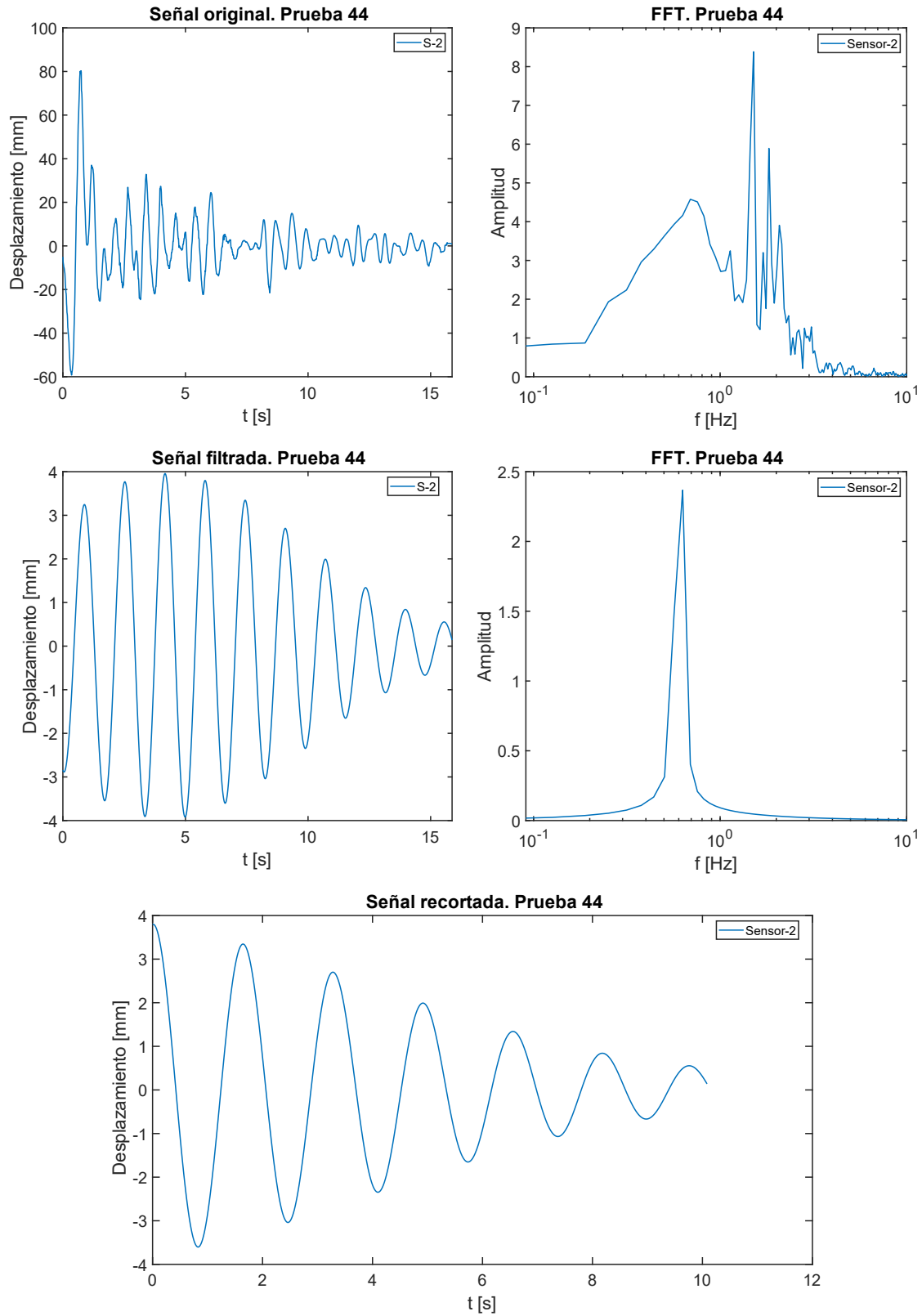


Ilustración 44. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 44, mediante el método de la cámara phantom.

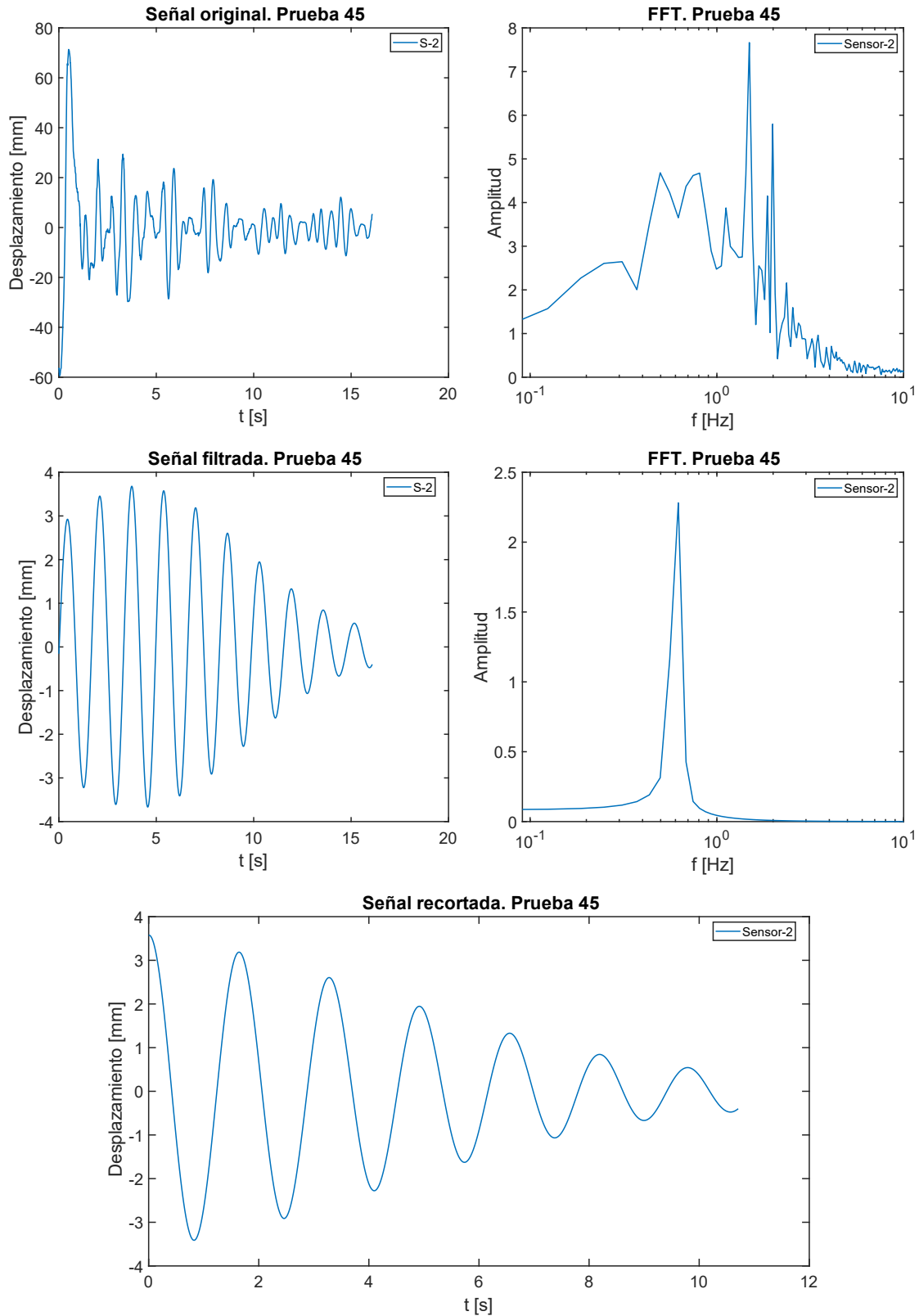


Ilustración 45. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 45, mediante el método de la cámara phantom.

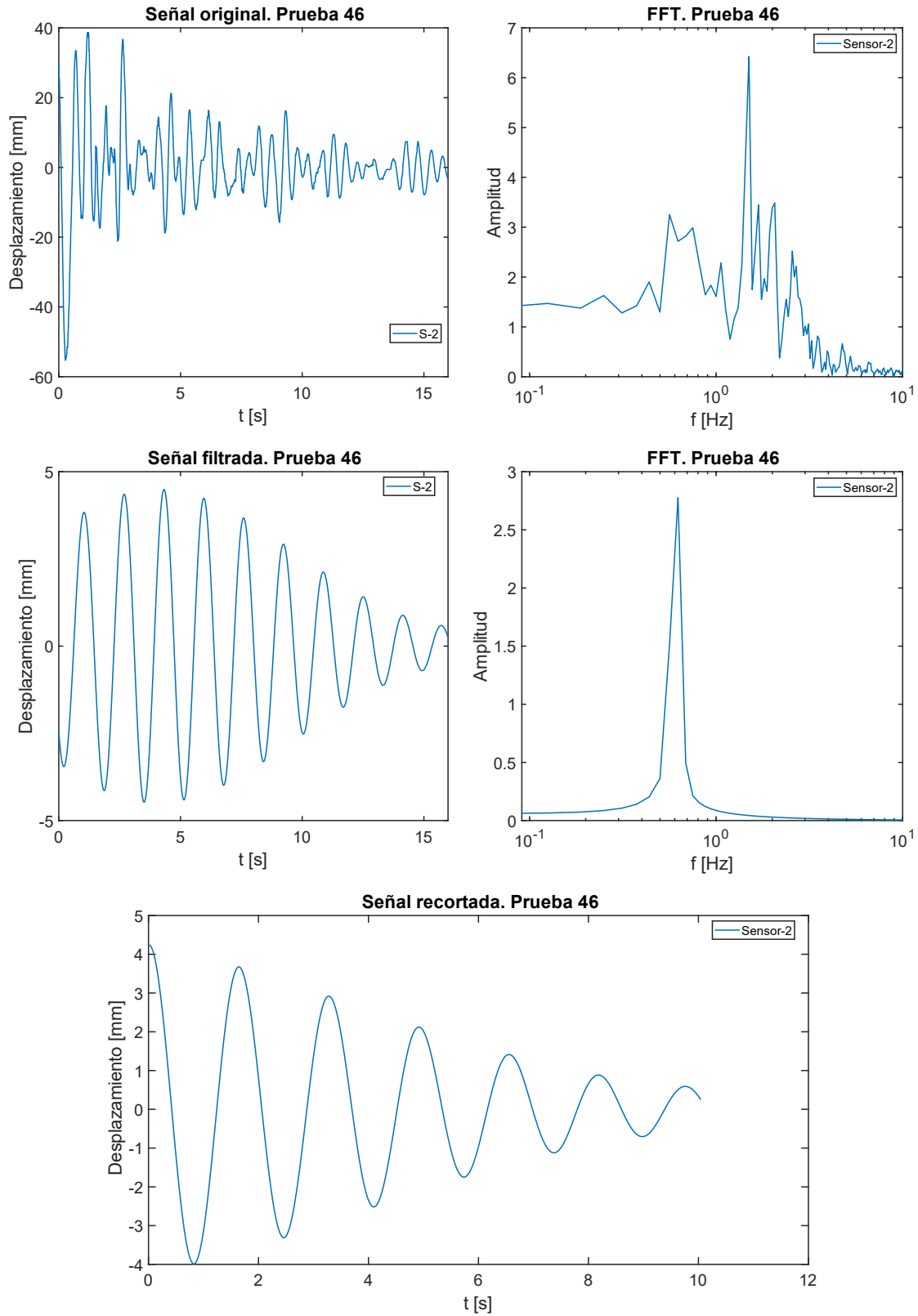


Ilustración 46. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 46, mediante el método de la cámara phantom.

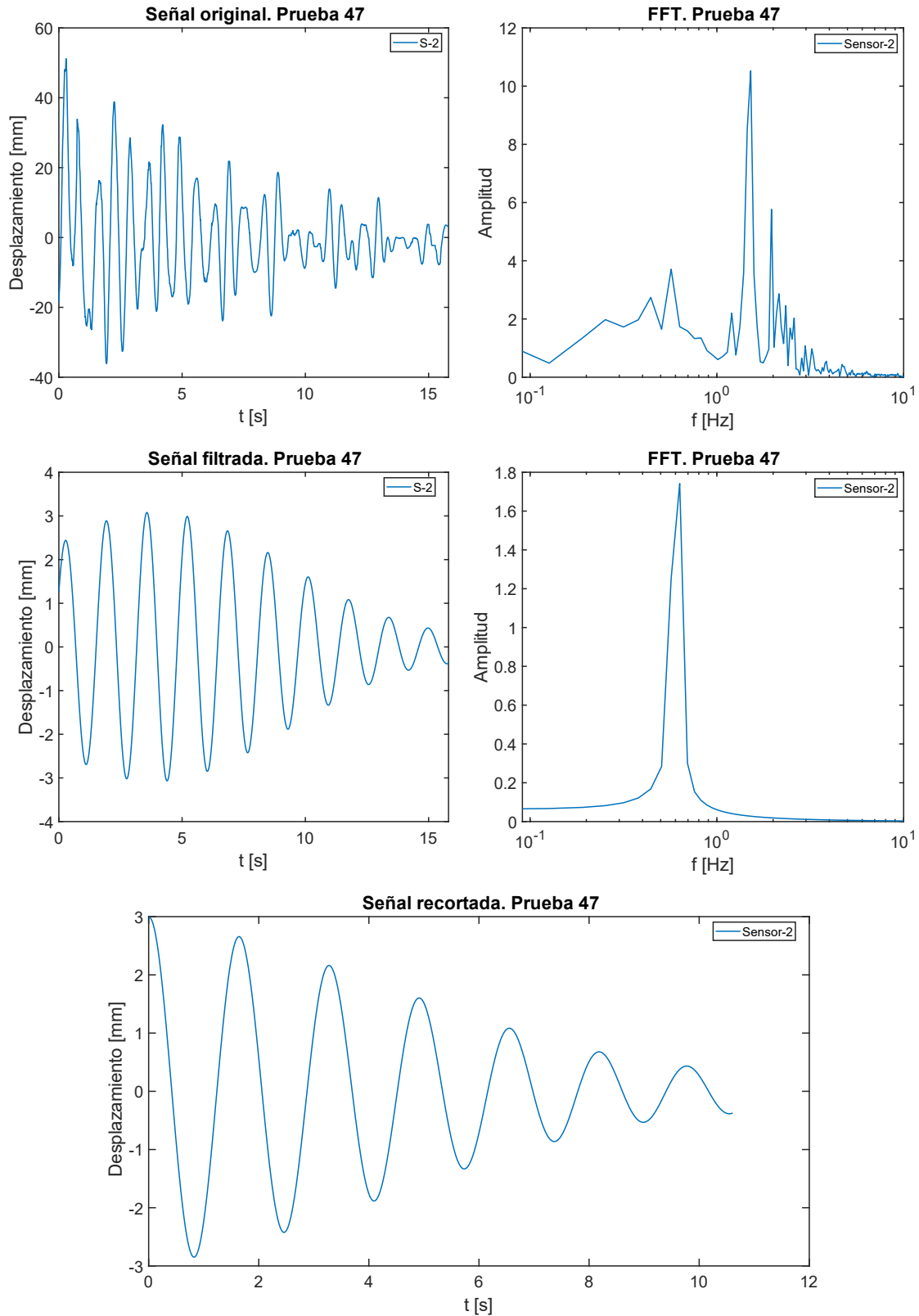


Ilustración 47. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 47, mediante el método de la cámara phantom.

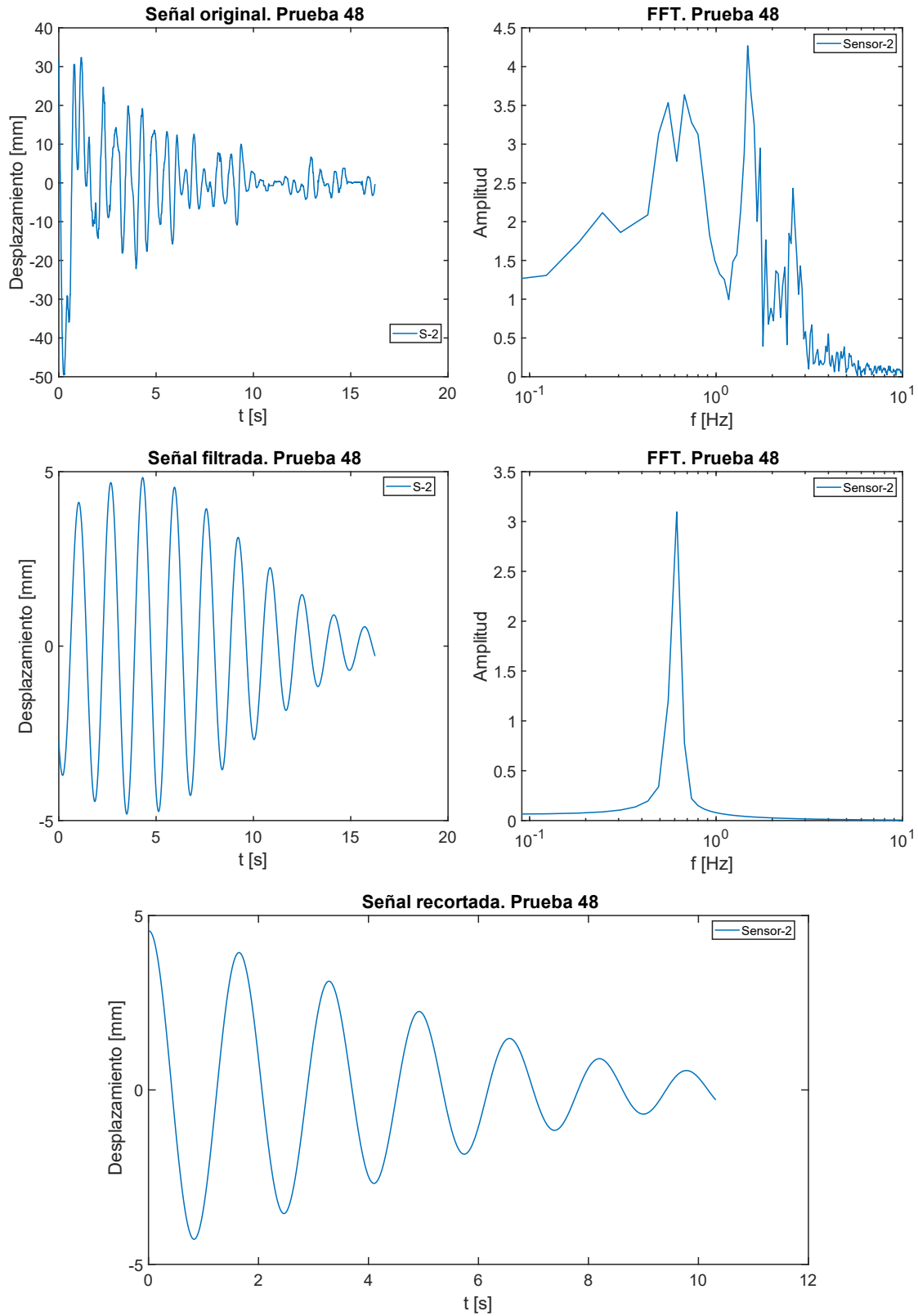


Ilustración 48. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 48, mediante el método de la cámara phantom.

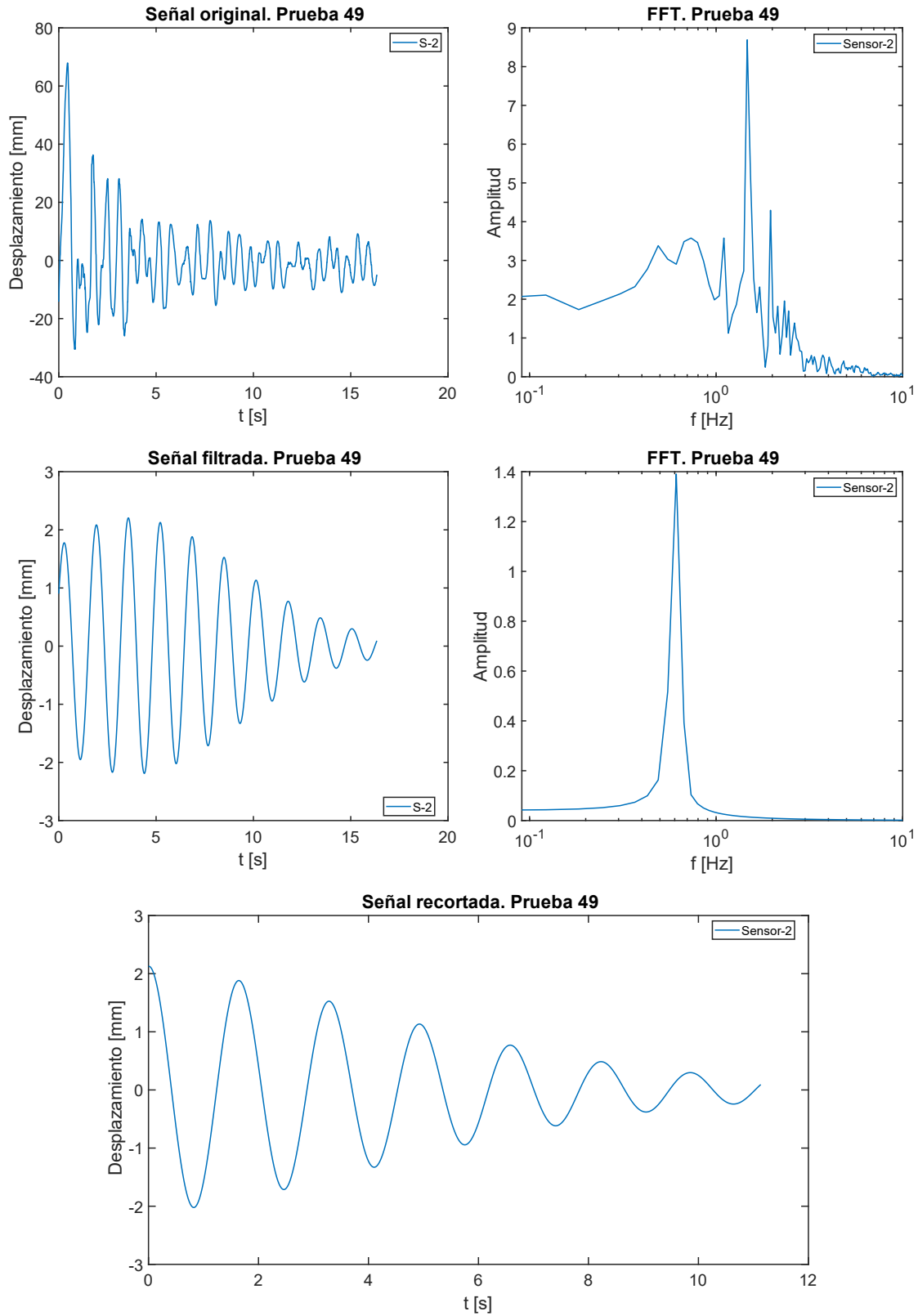


Ilustración 49. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 49, mediante el método de la cámara phantom.

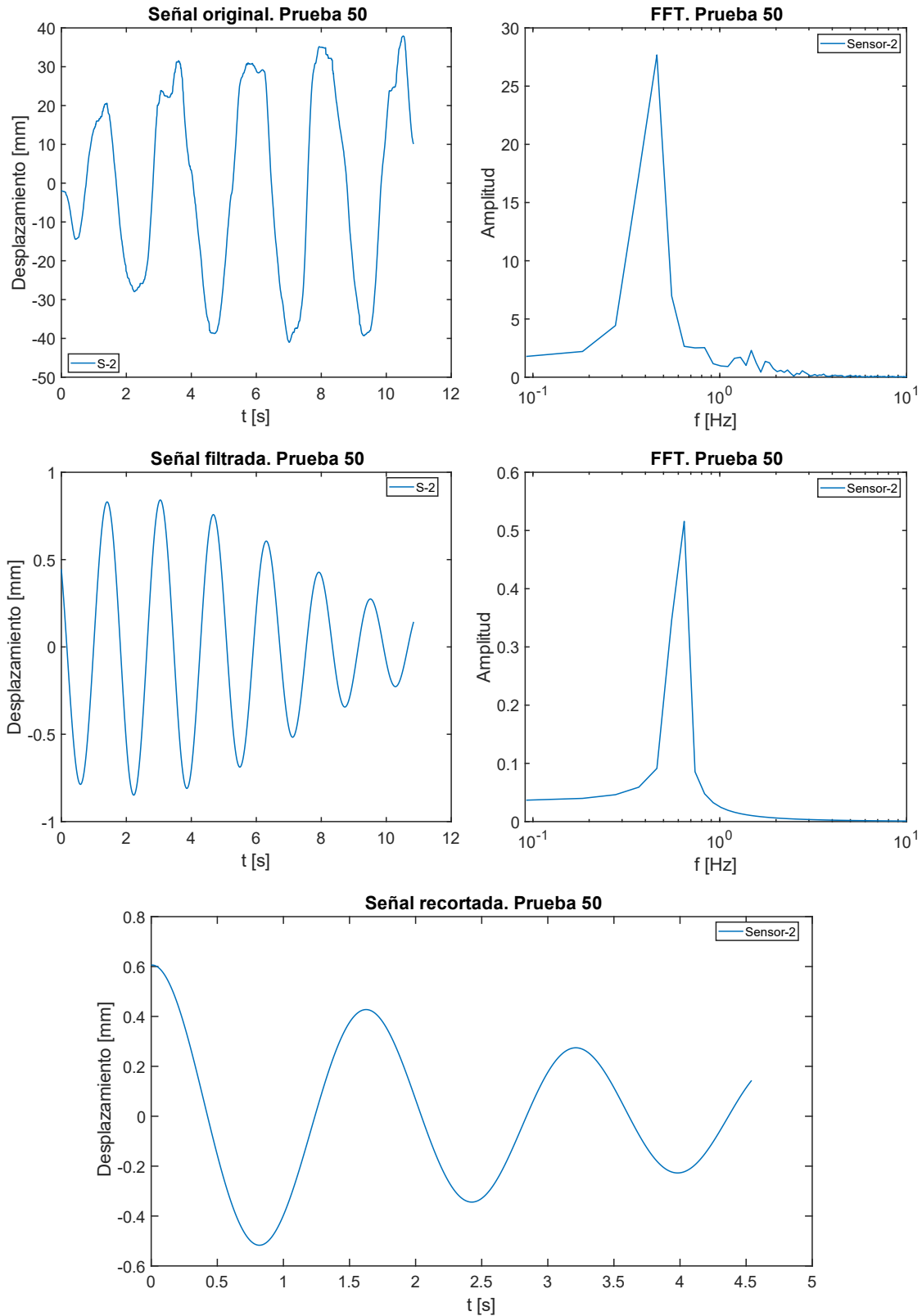


Ilustración 50. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 50, mediante el método de la cámara phantom.

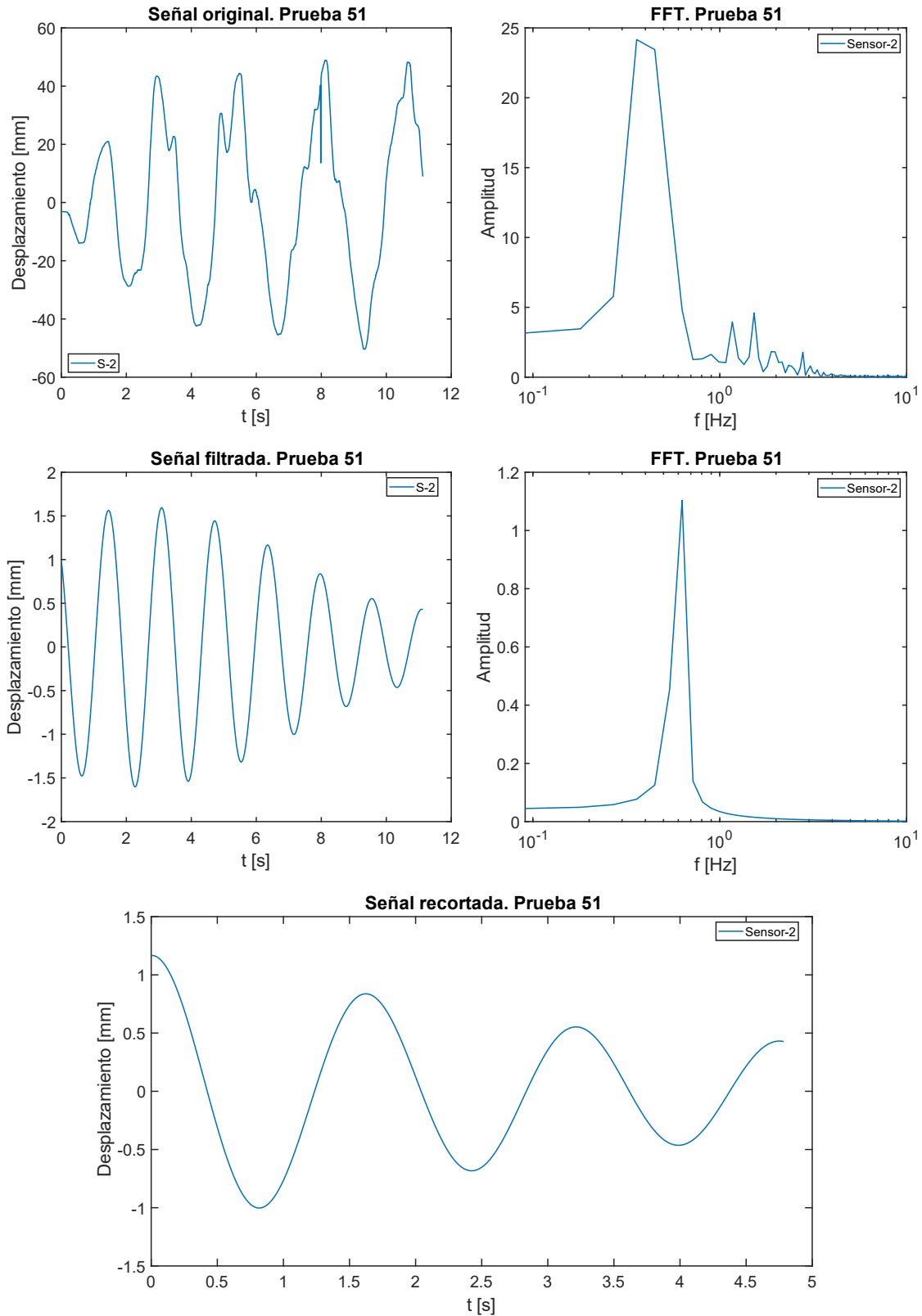


Ilustración 51. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 51, mediante el método de la cámara phantom.

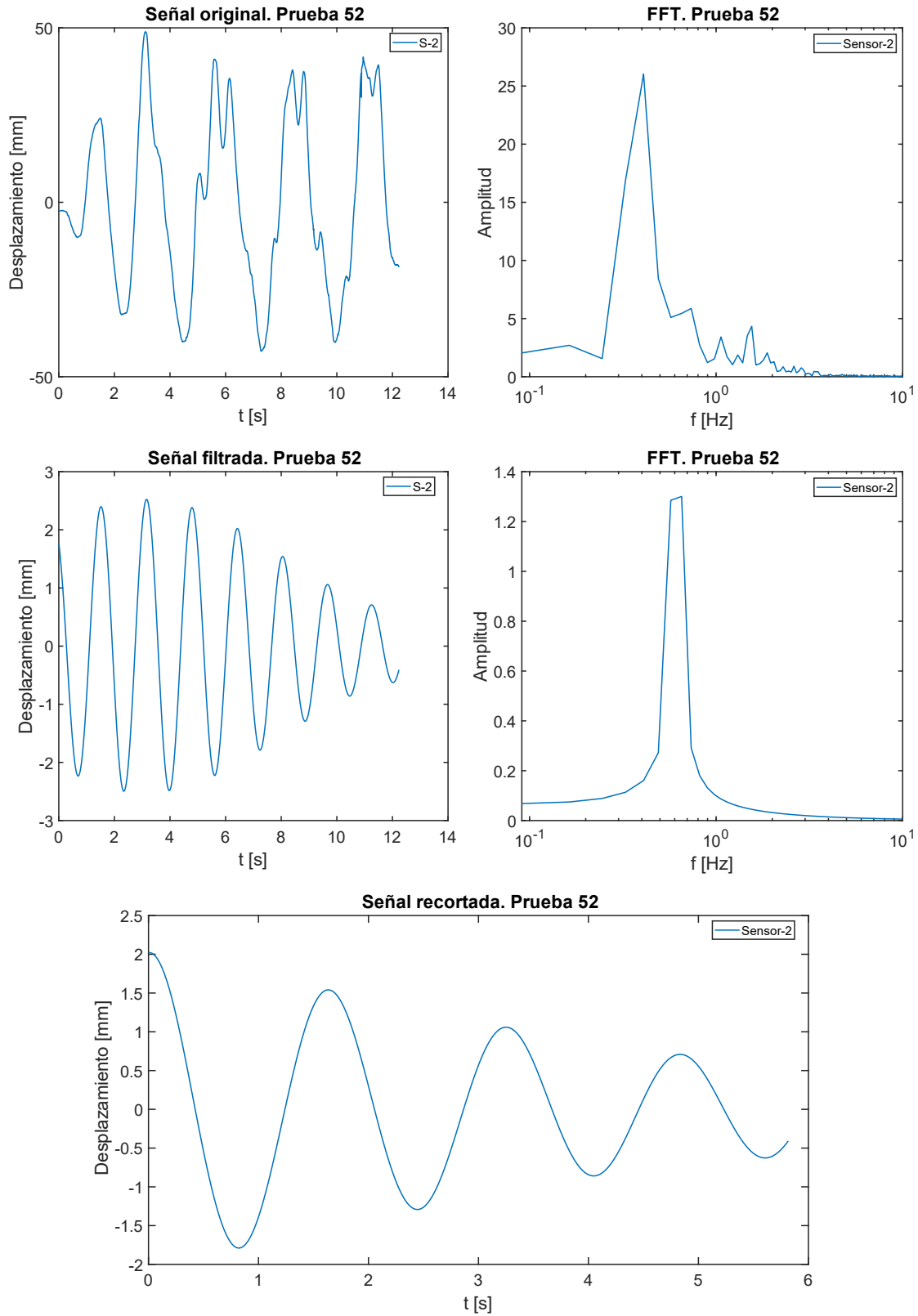


Ilustración 52. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 52, mediante el método de la cámara phantom.

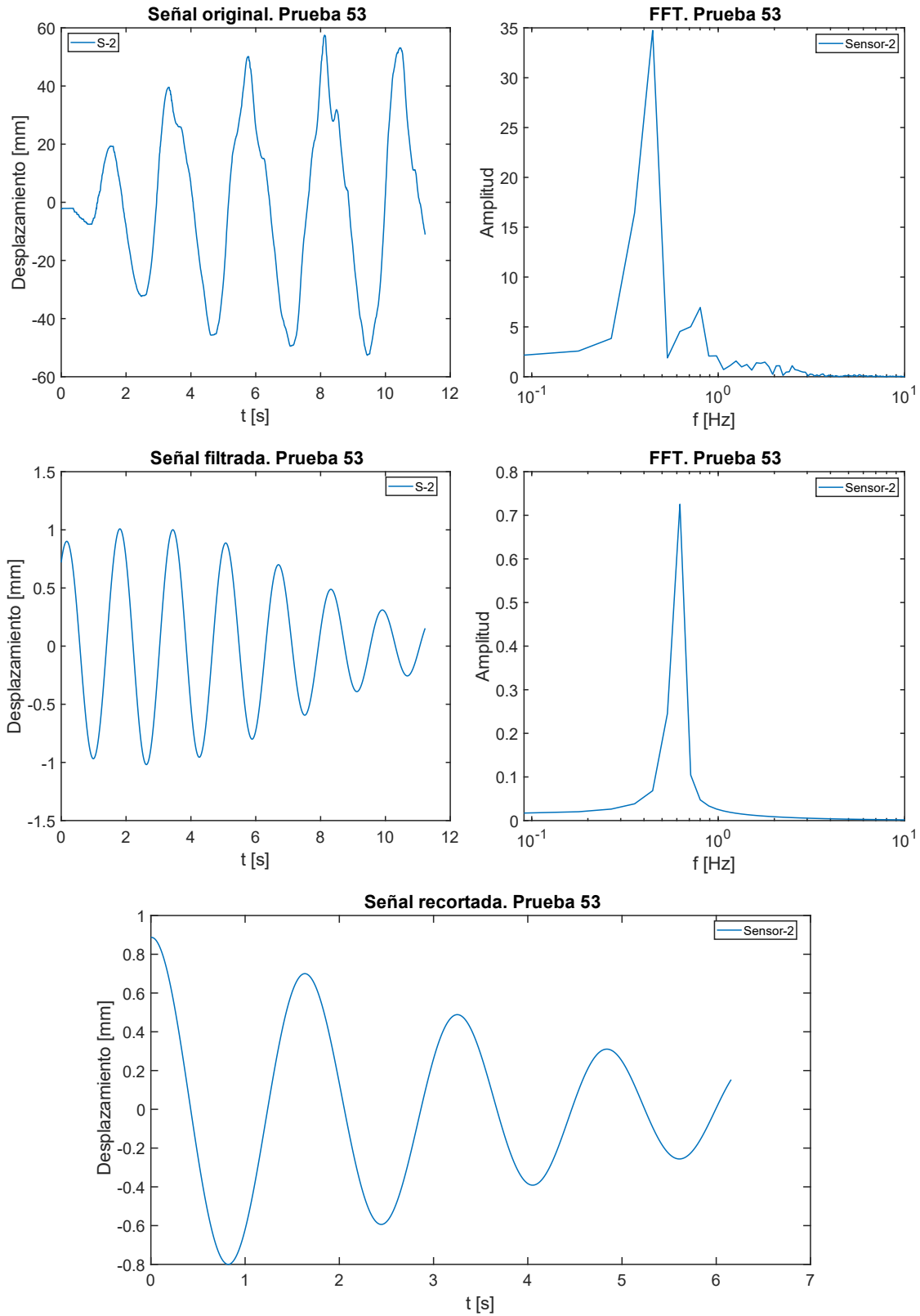


Ilustración 53. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 53, mediante el método de la cámara phantom.

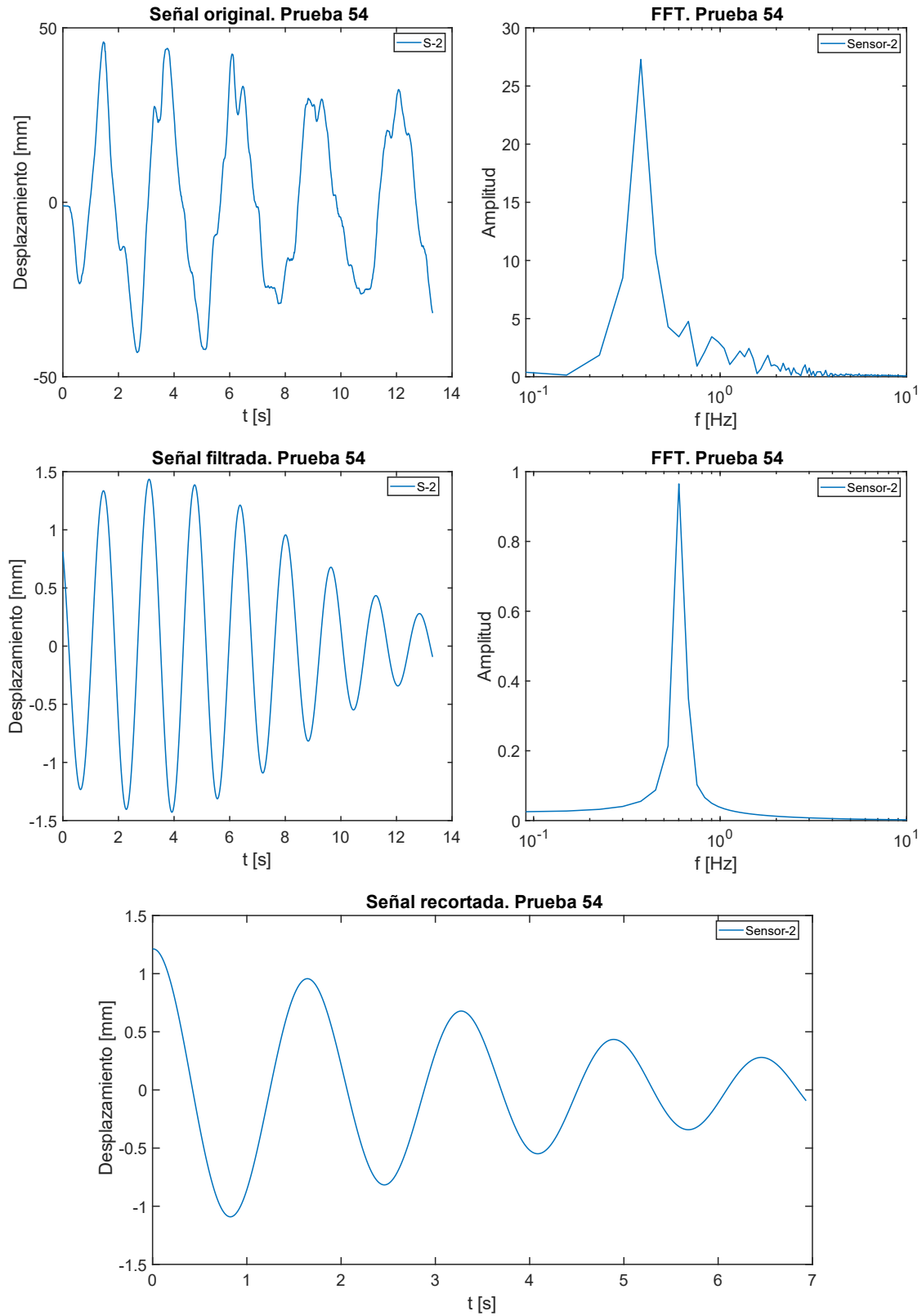


Ilustración 54. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 54, mediante el método de la cámara phantom.

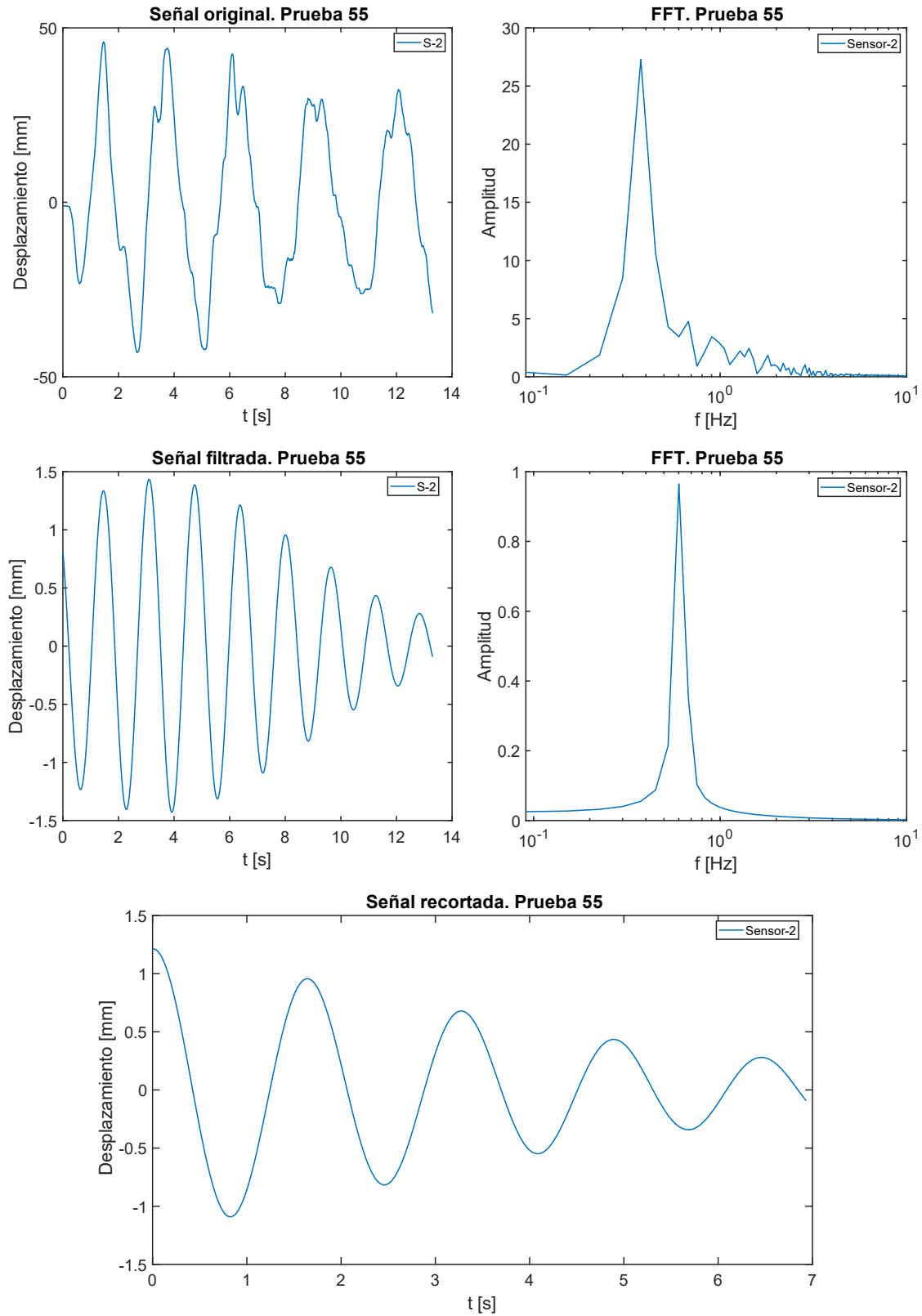


Ilustración 55. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 55, mediante el método de la cámara phantom.

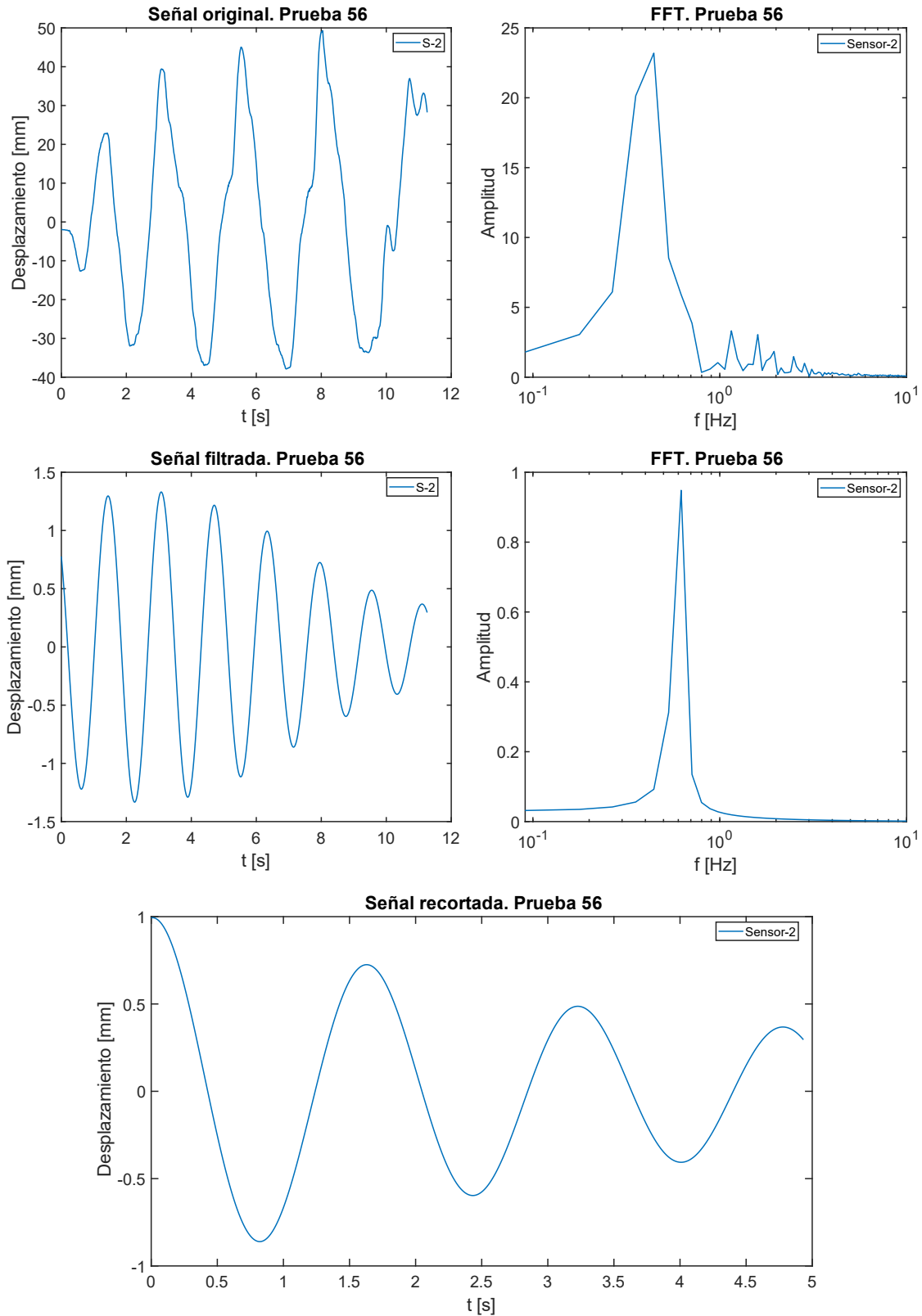


Ilustración 56. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 56, mediante el método de la cámara phantom.

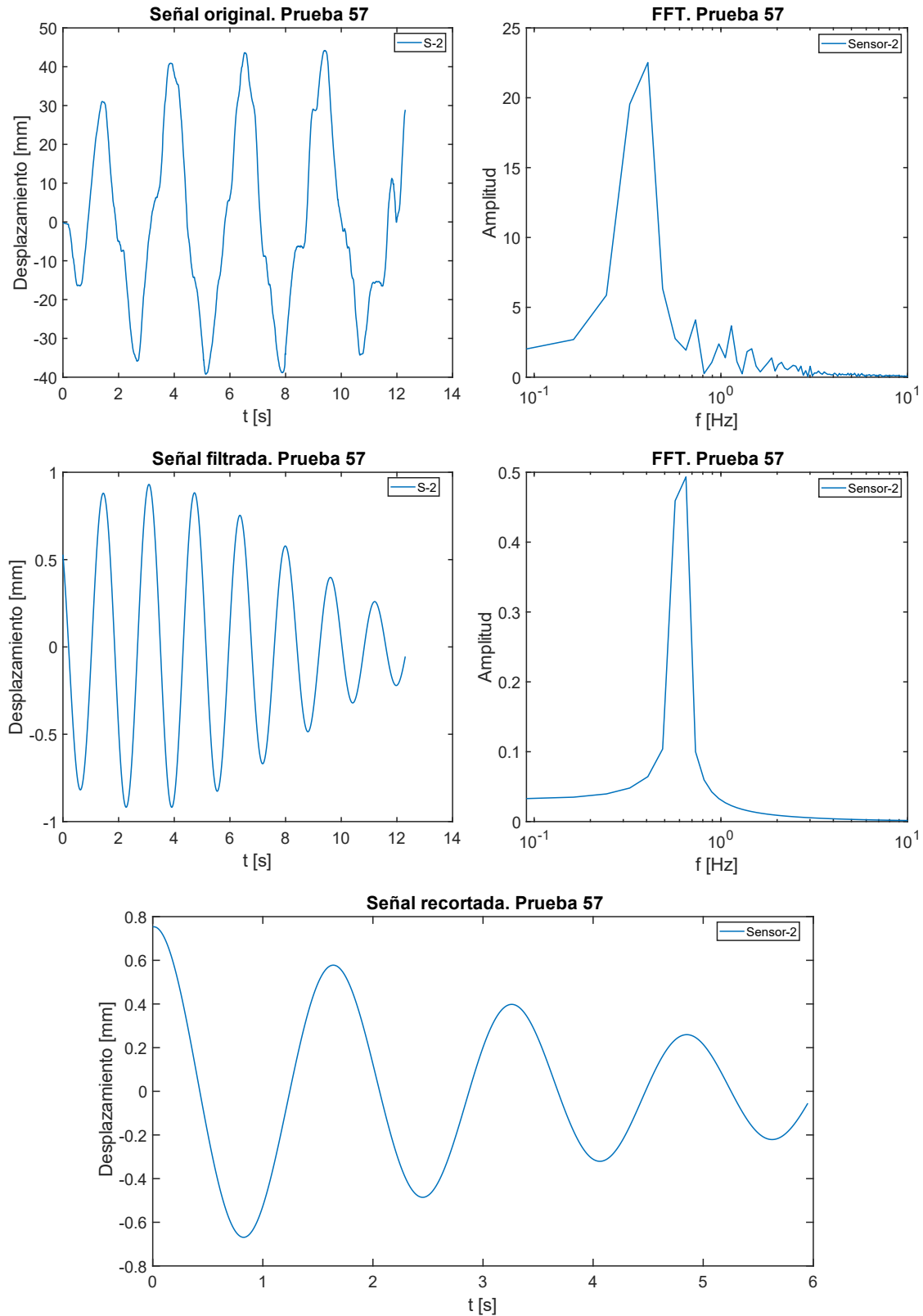


Ilustración 57. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 57, mediante el método de la cámara phantom.

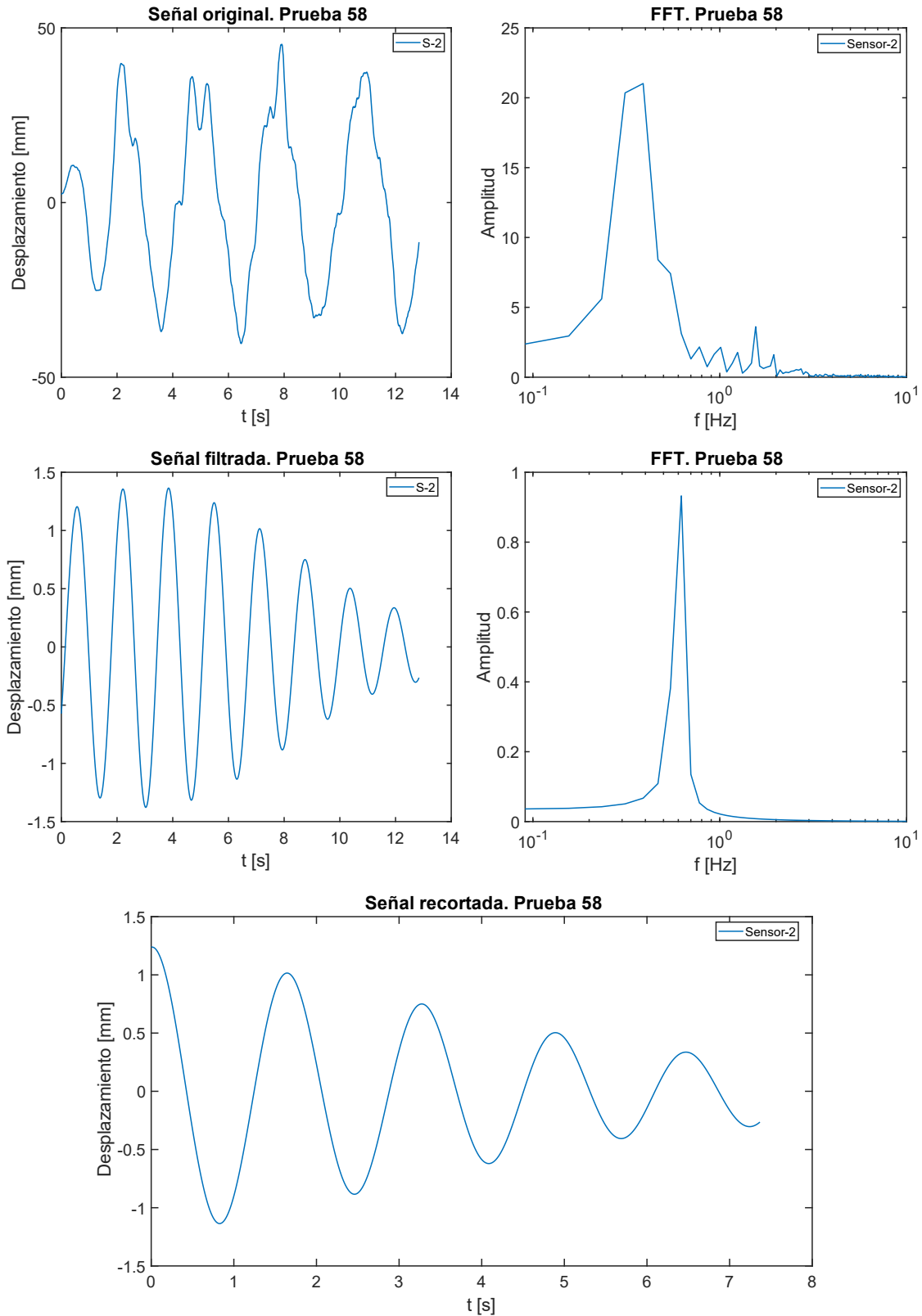


Ilustración 58. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 58, mediante el método de la cámara phantom.

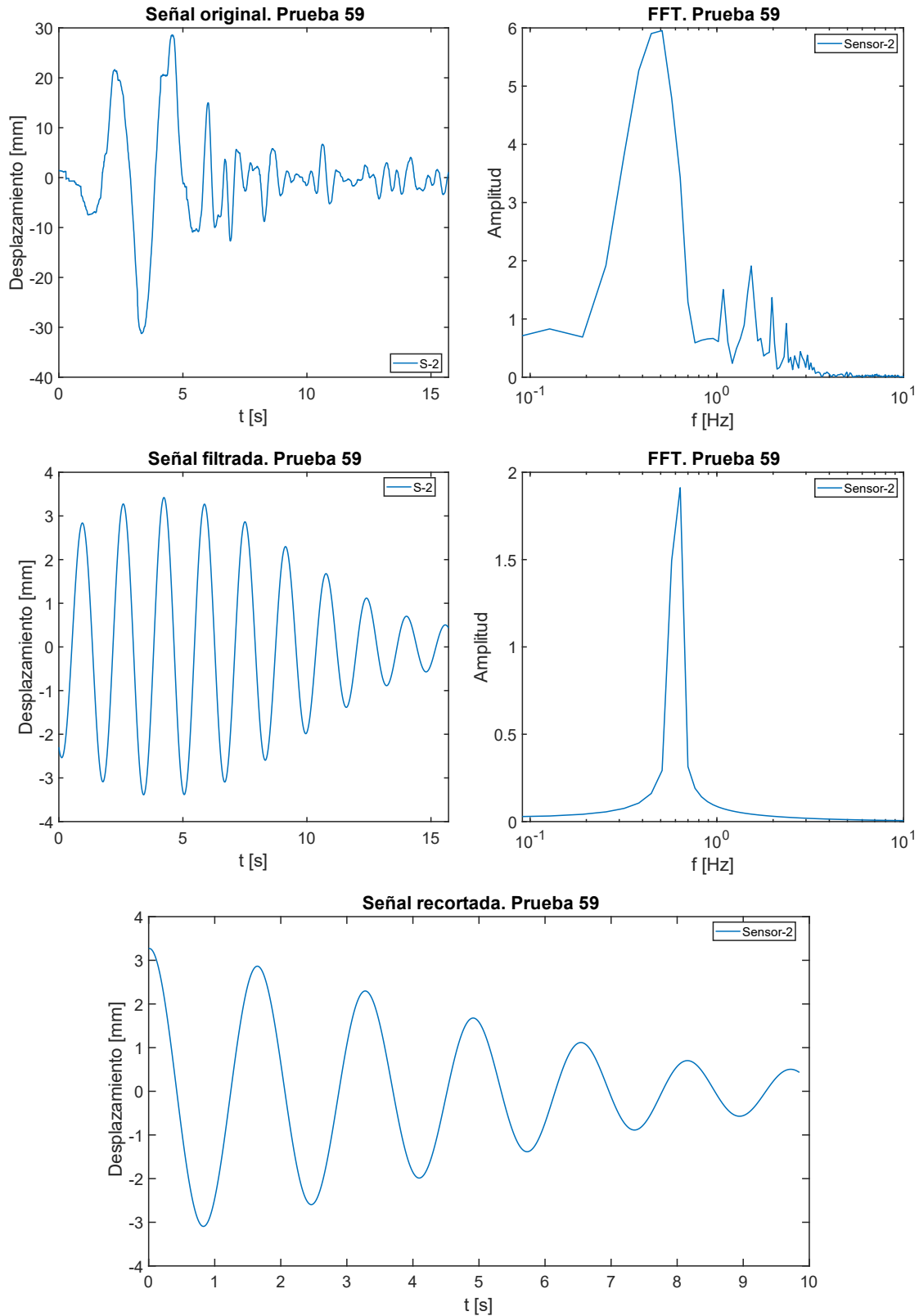


Ilustración 59. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 59, mediante el método de la cámara phantom.

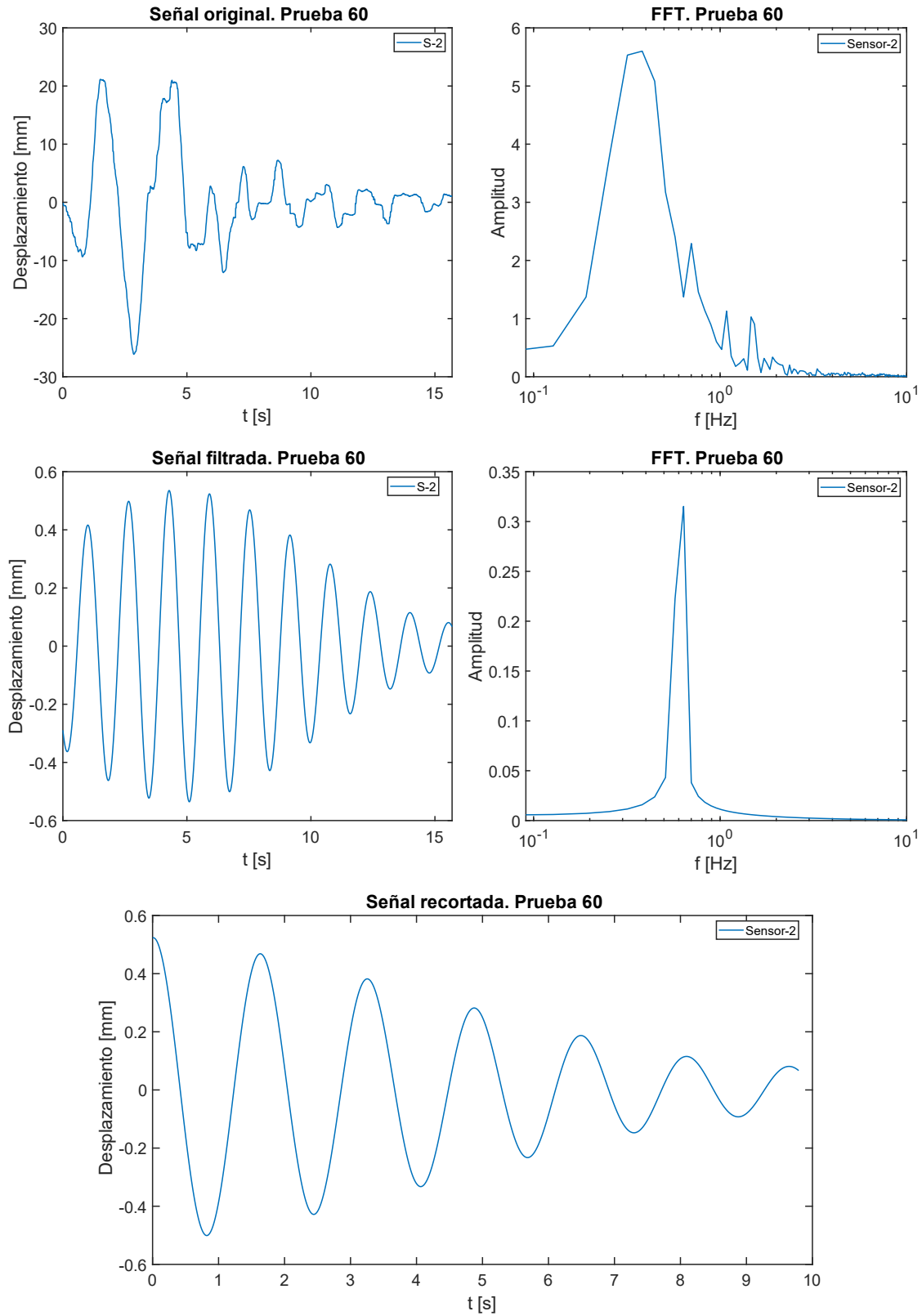


Ilustración 60. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 60, mediante el método de la cámara phantom.

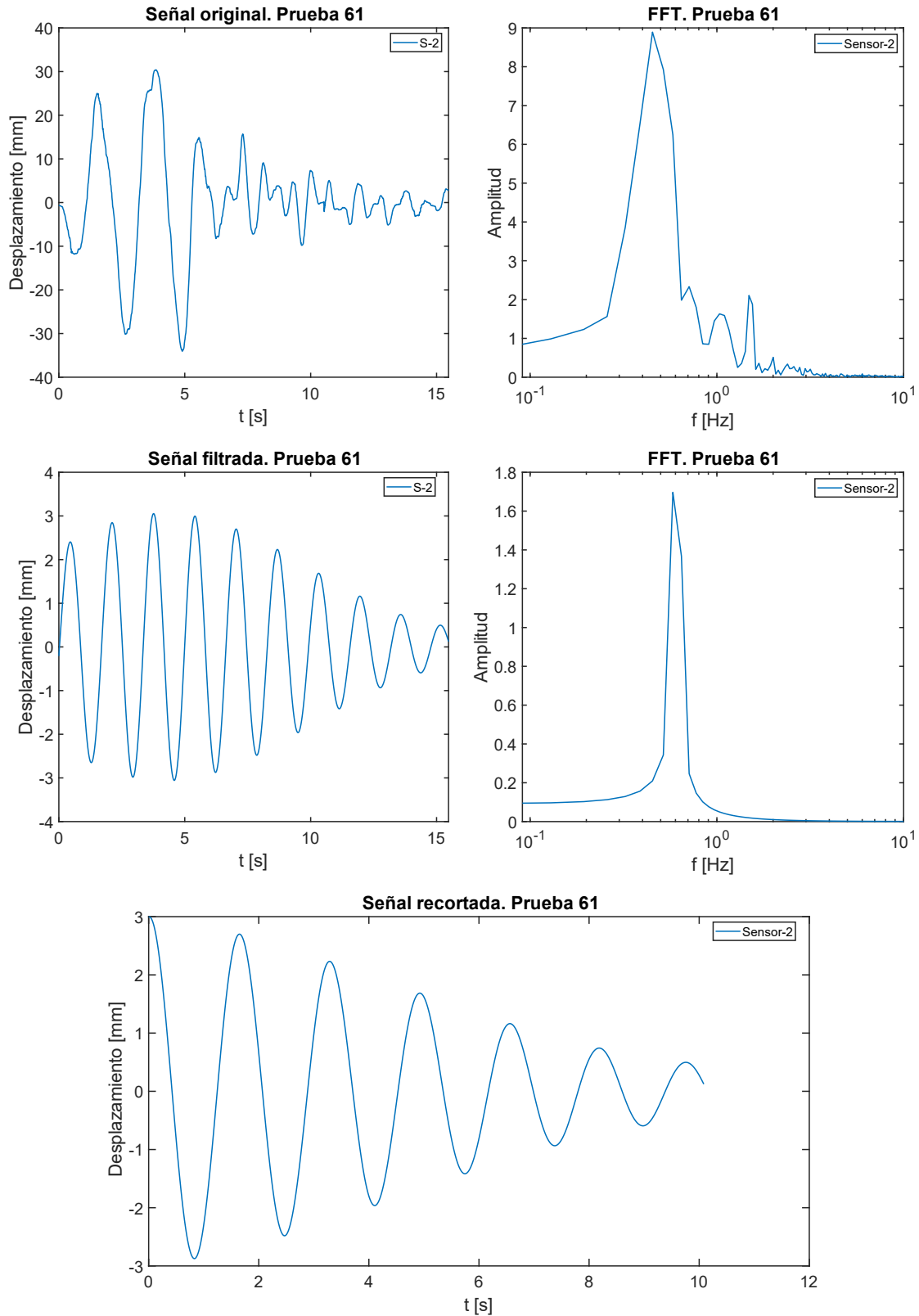


Ilustración 61. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 61, mediante el método de la cámara phantom.

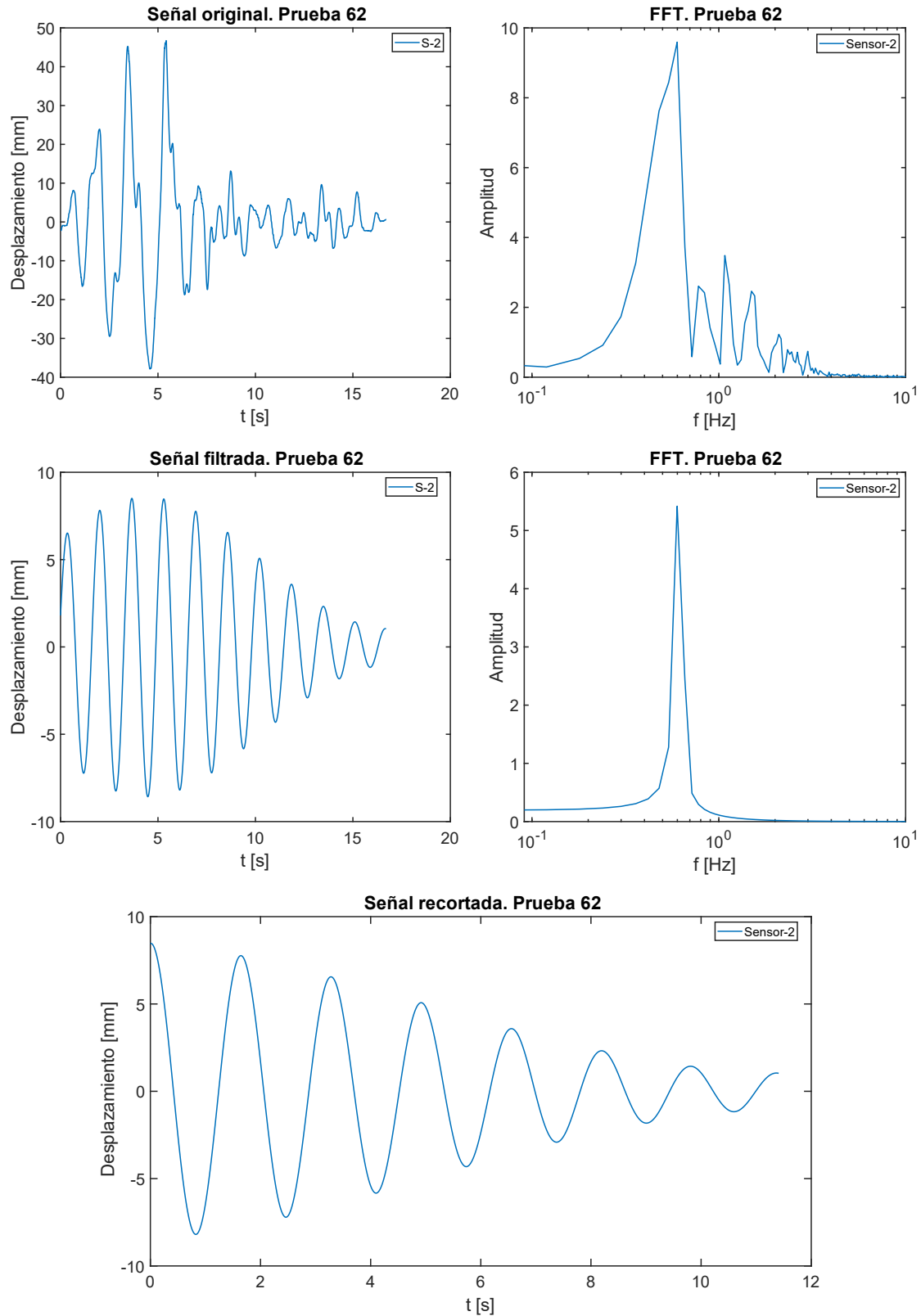


Ilustración 62. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 62, mediante el método de la cámara phantom.

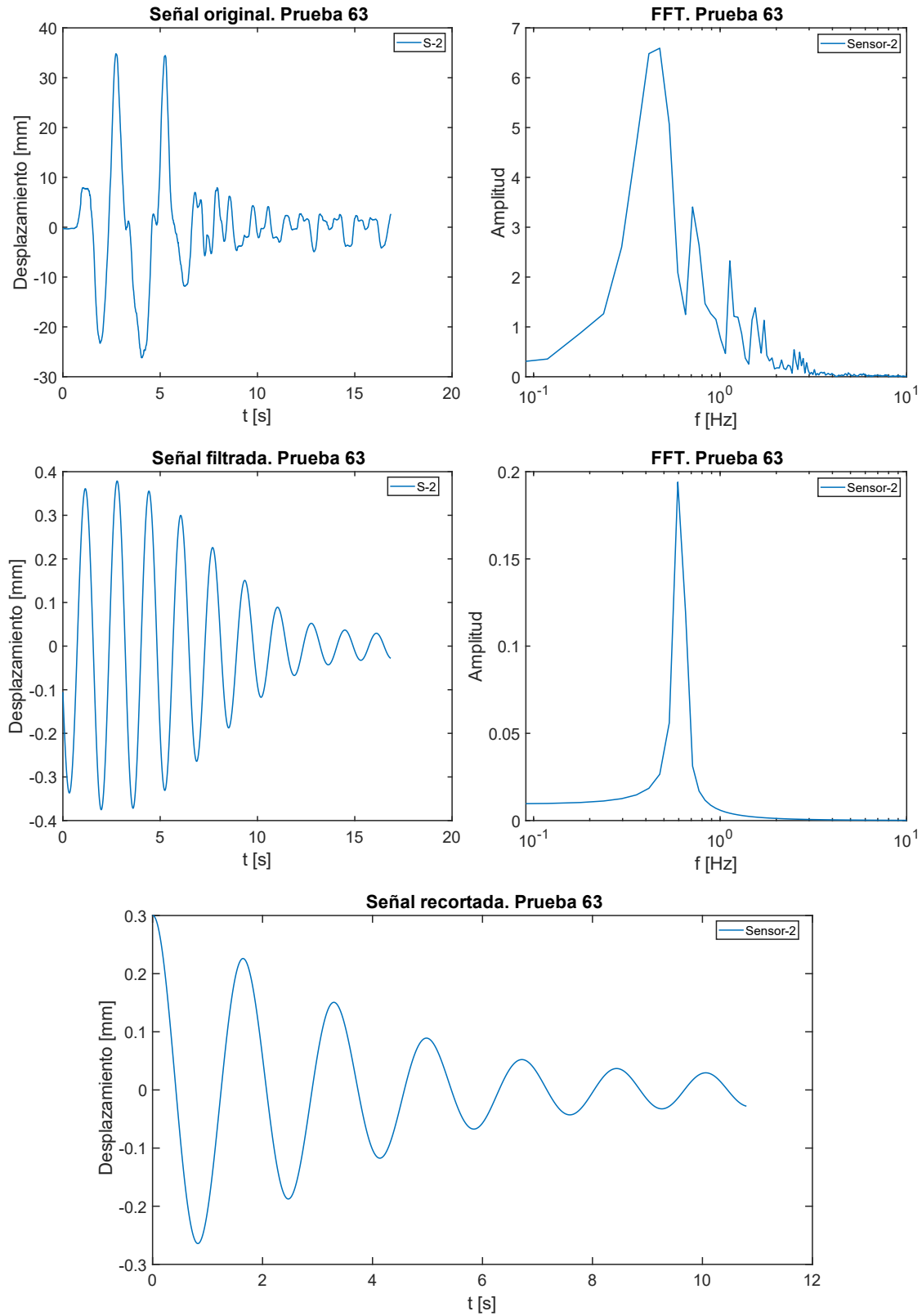


Ilustración 63. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 63, mediante el método de la cámara phantom.

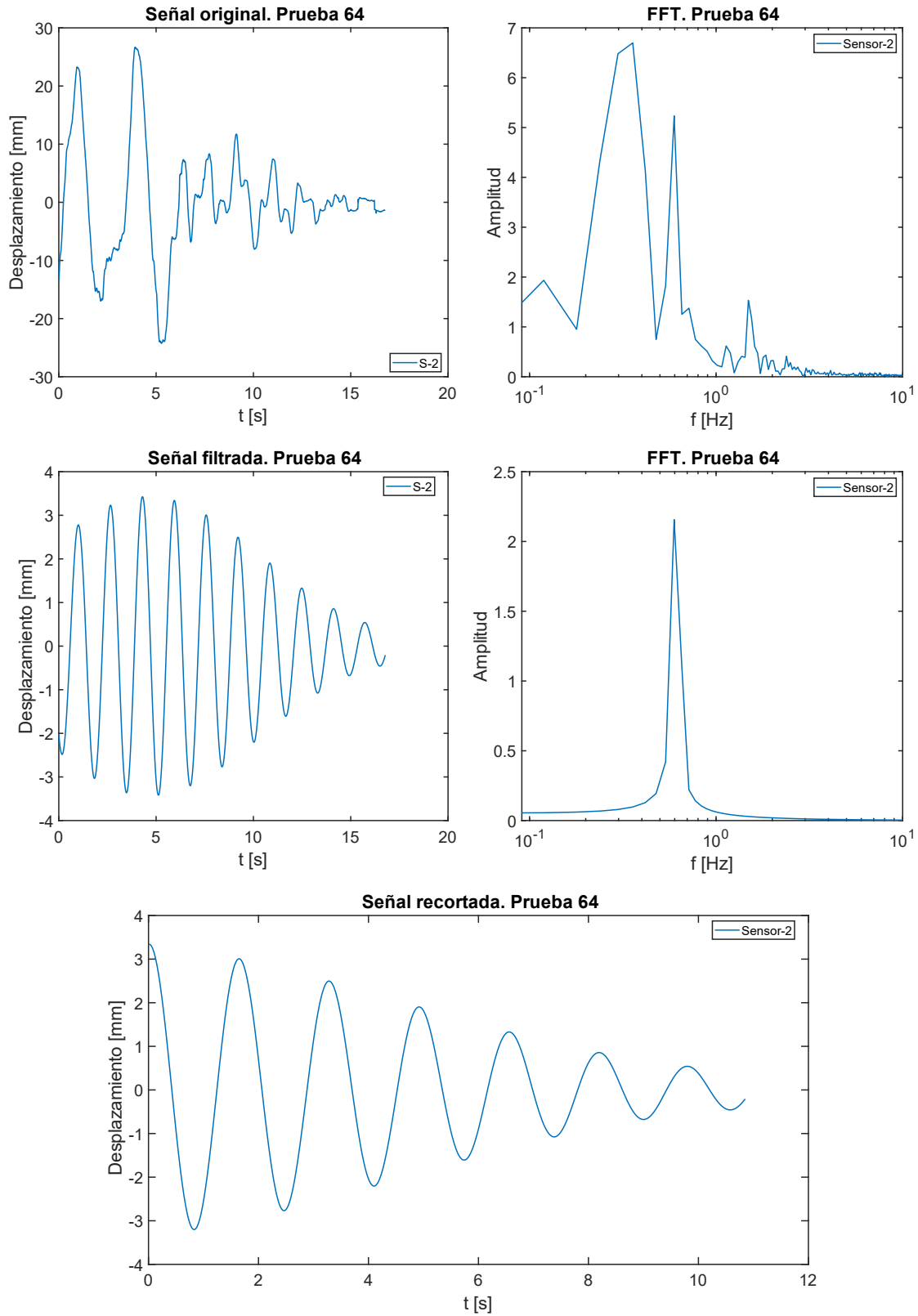


Ilustración 64. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 64, mediante el método de la cámara phantom.

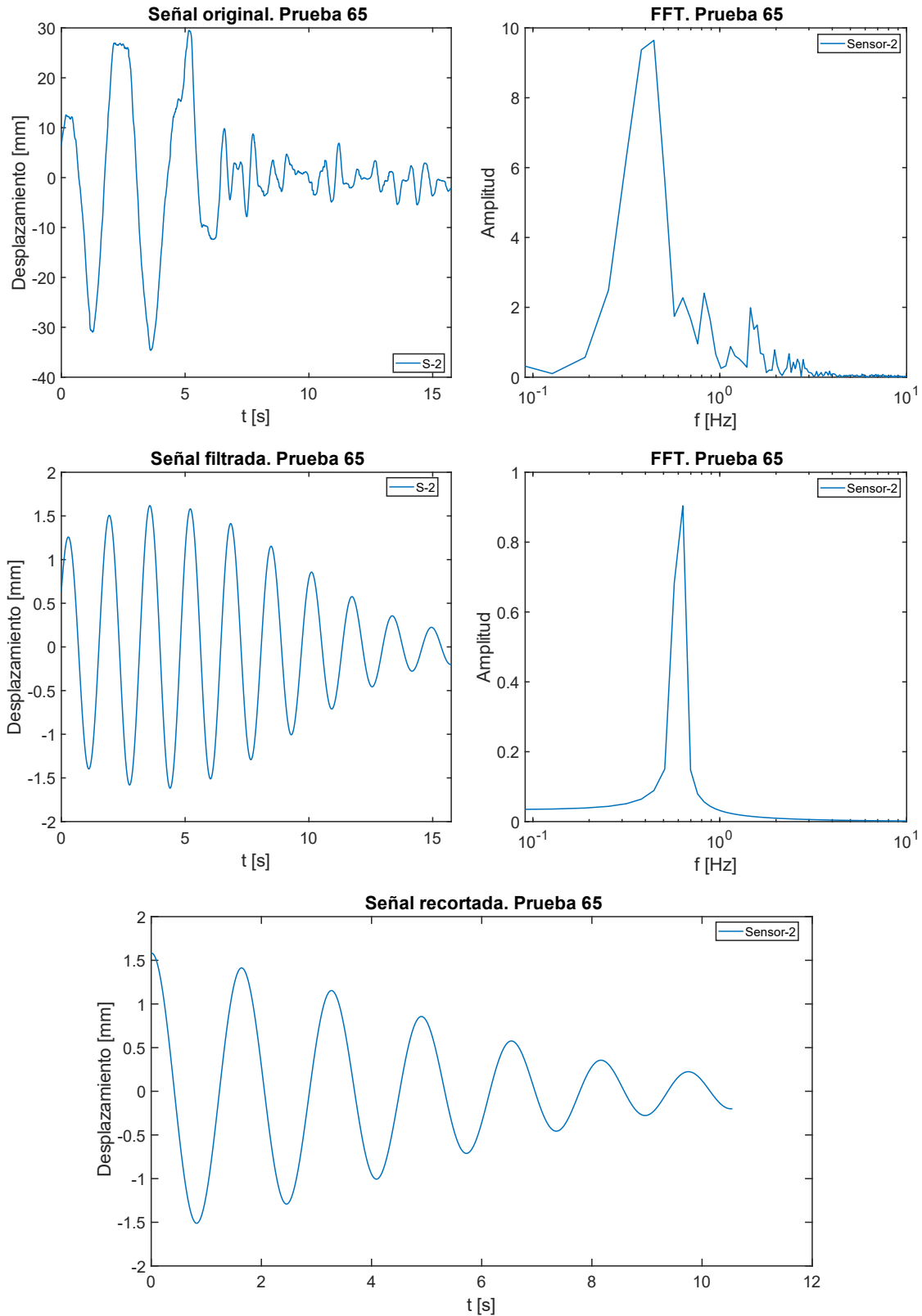


Ilustración 65. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 65, mediante el método de la cámara phantom.

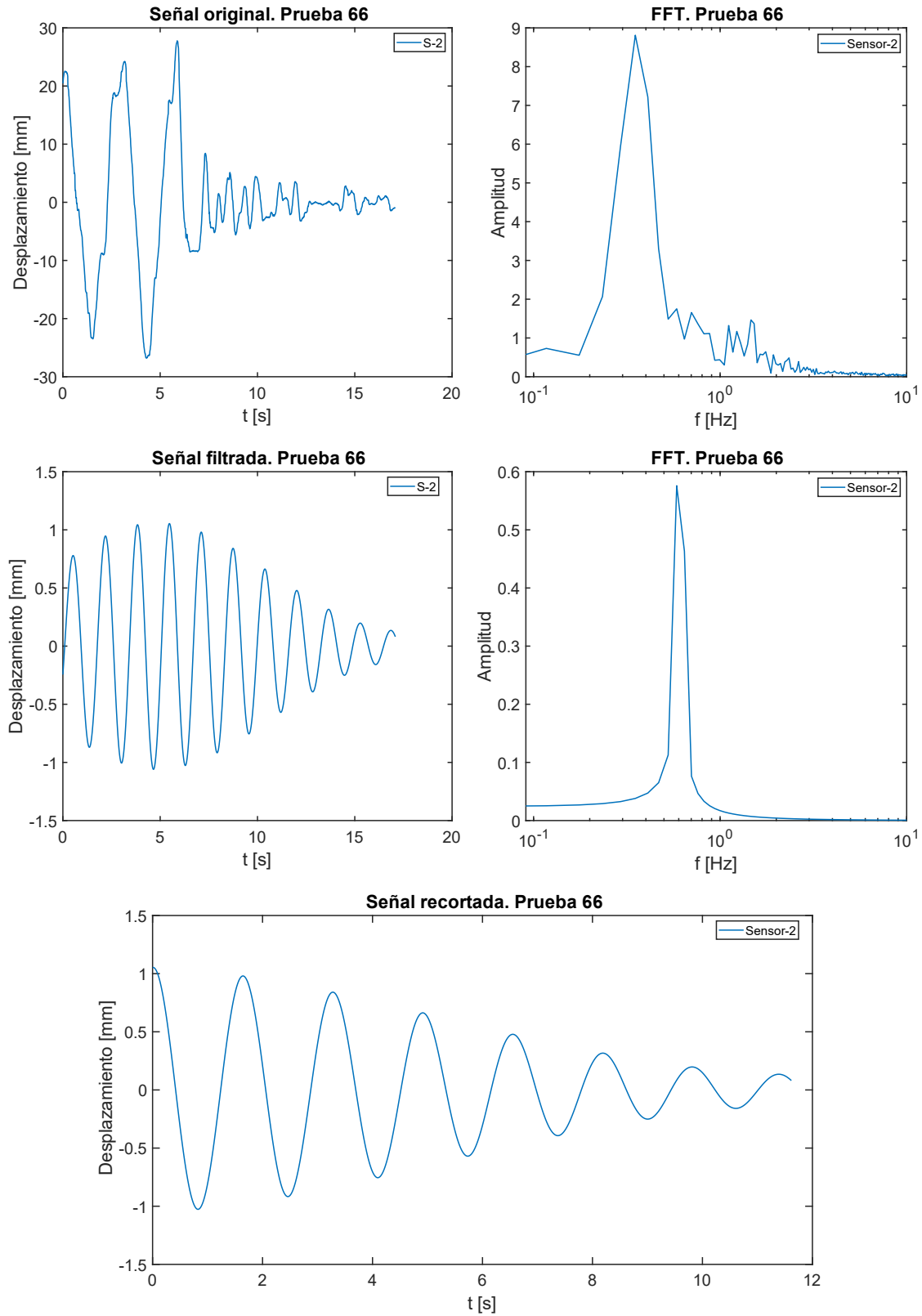


Ilustración 66. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 66, mediante el método de la cámara phantom.

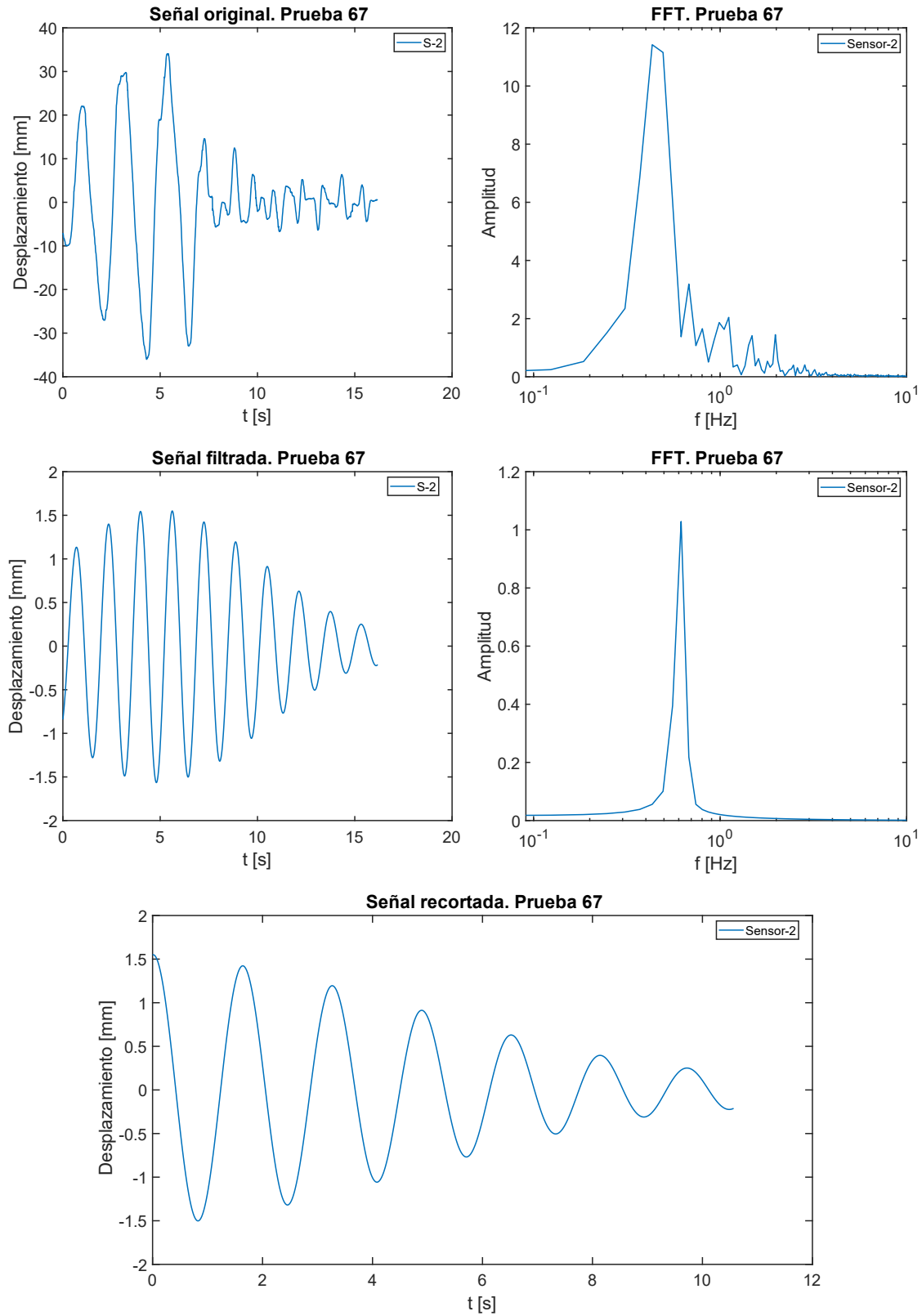


Ilustración 67. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 67, mediante el método de la cámara phantom.

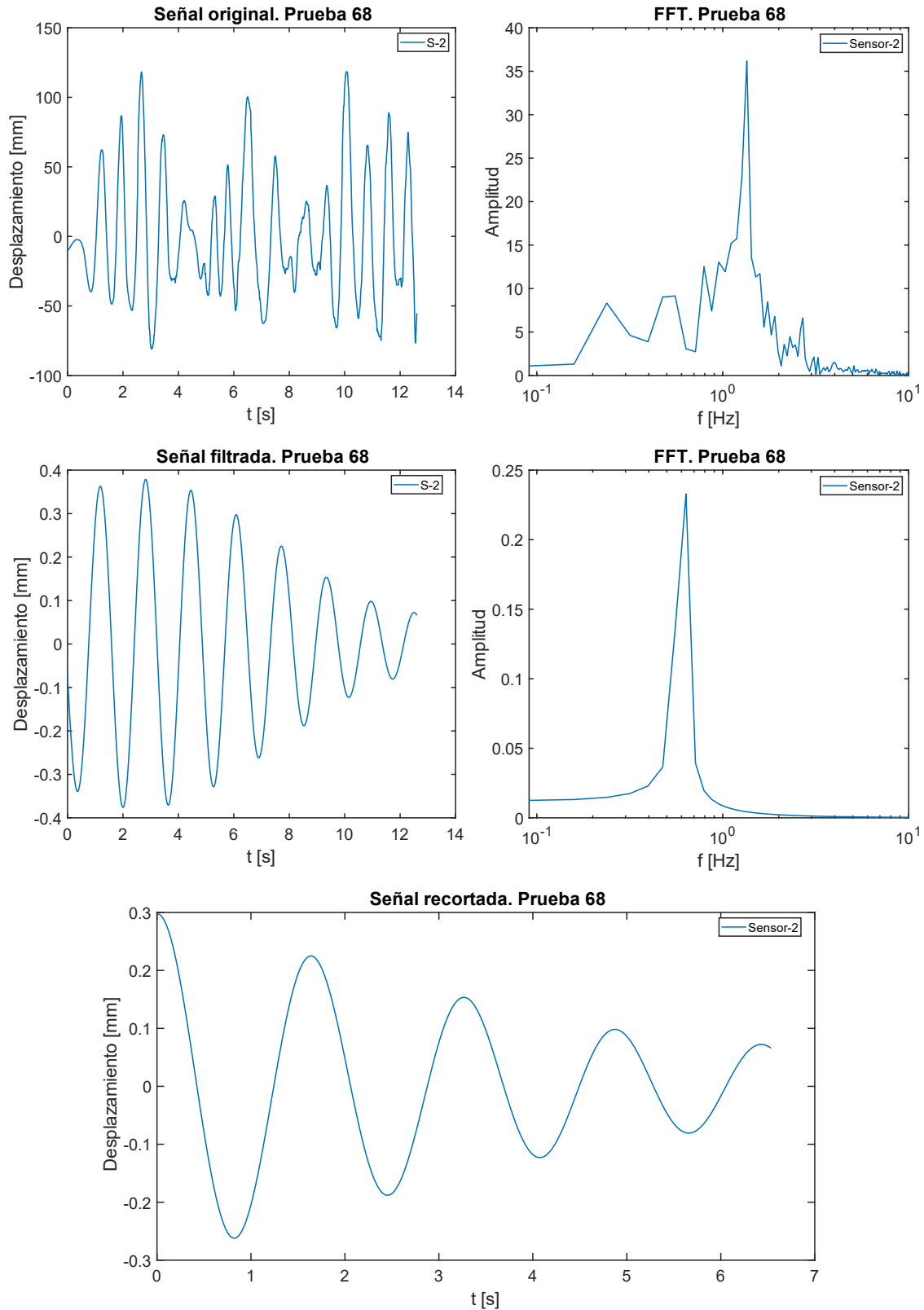


Ilustración 68. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 68, mediante el método de la cámara phantom.

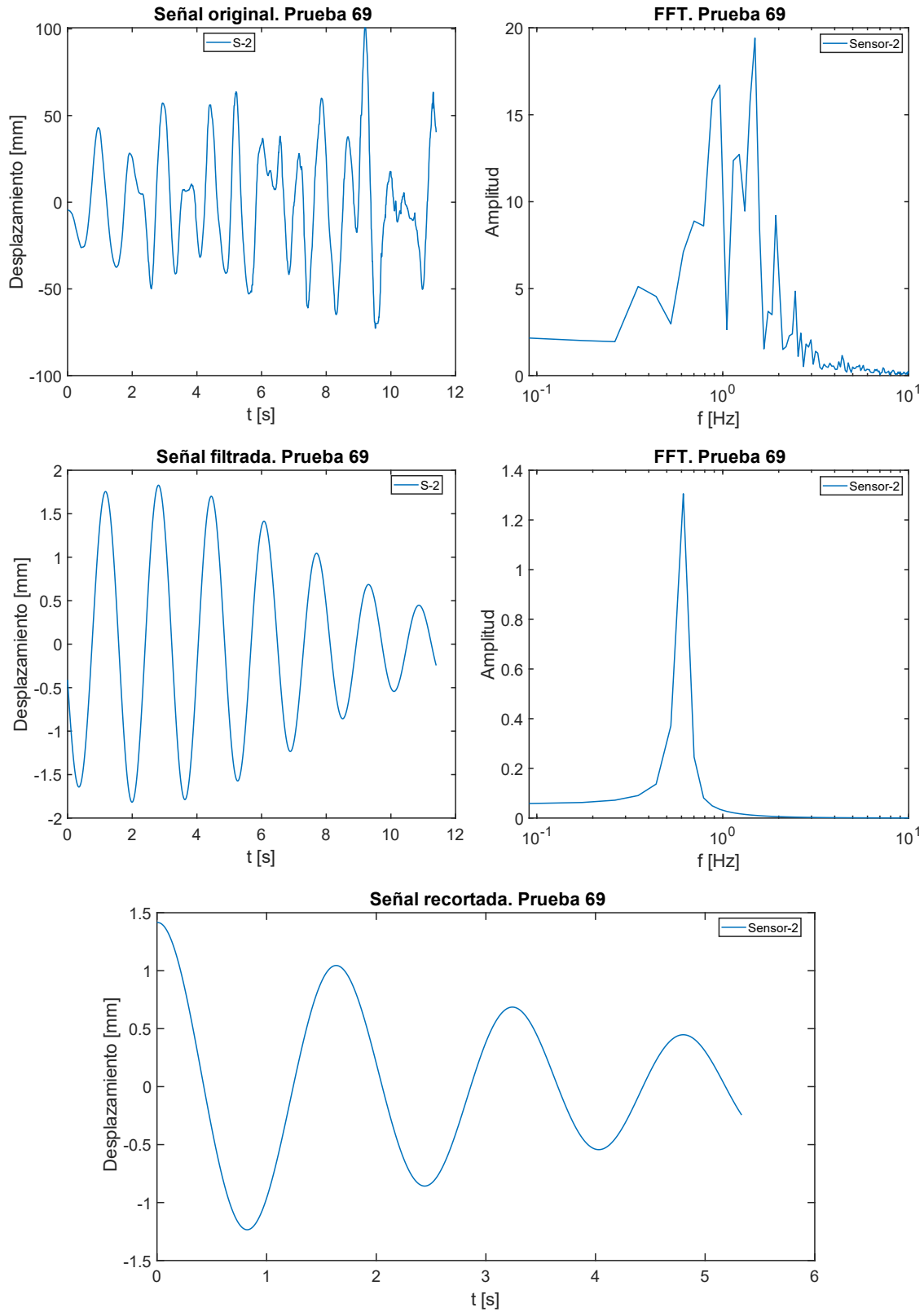


Ilustración 69. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 69, mediante el método de la cámara phantom.

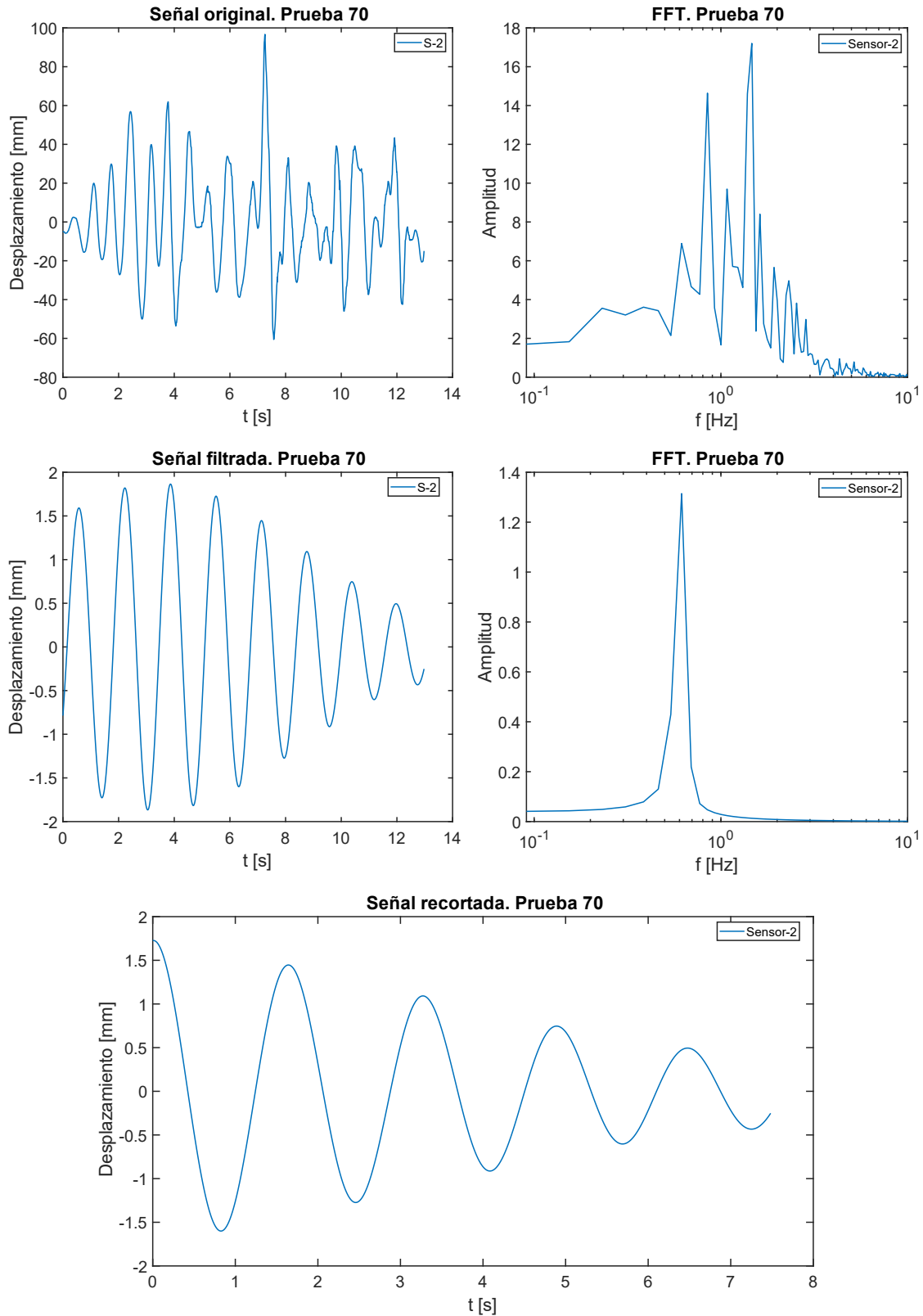


Ilustración 70. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 70, mediante el método de la cámara phantom.

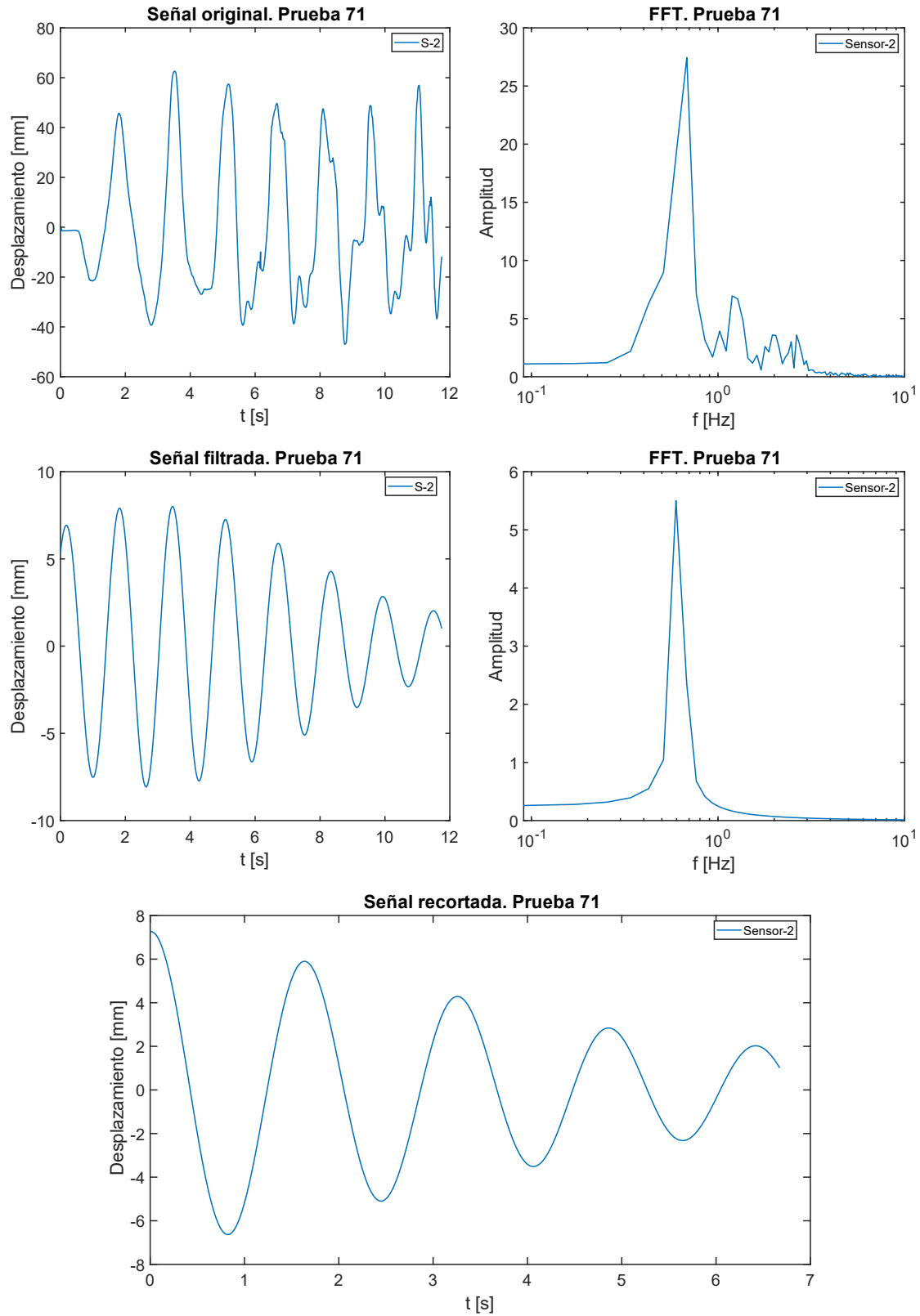


Ilustración 71. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 71, mediante el método de la cámara phantom.

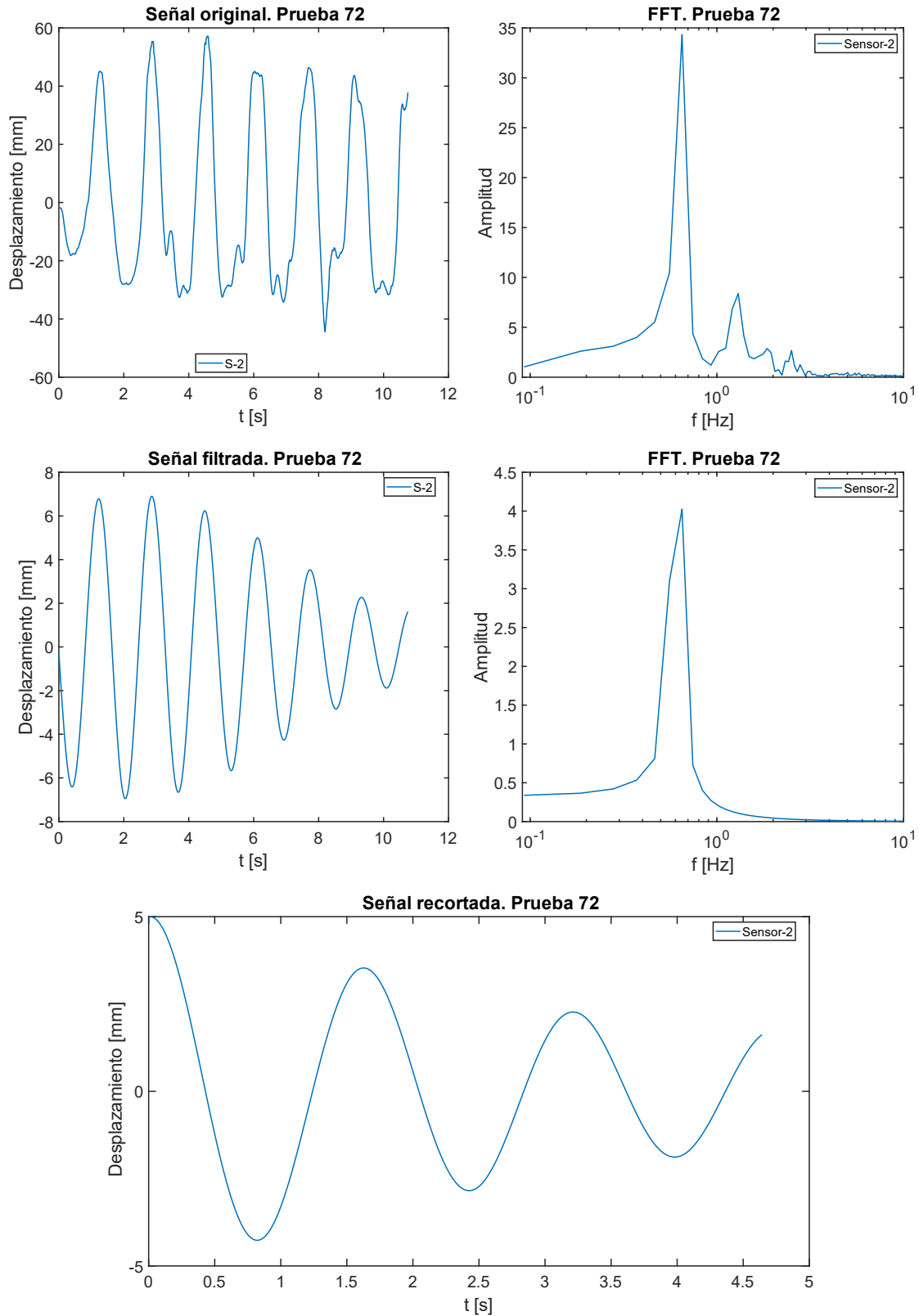


Ilustración 72. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 72, mediante el método de la cámara phantom.

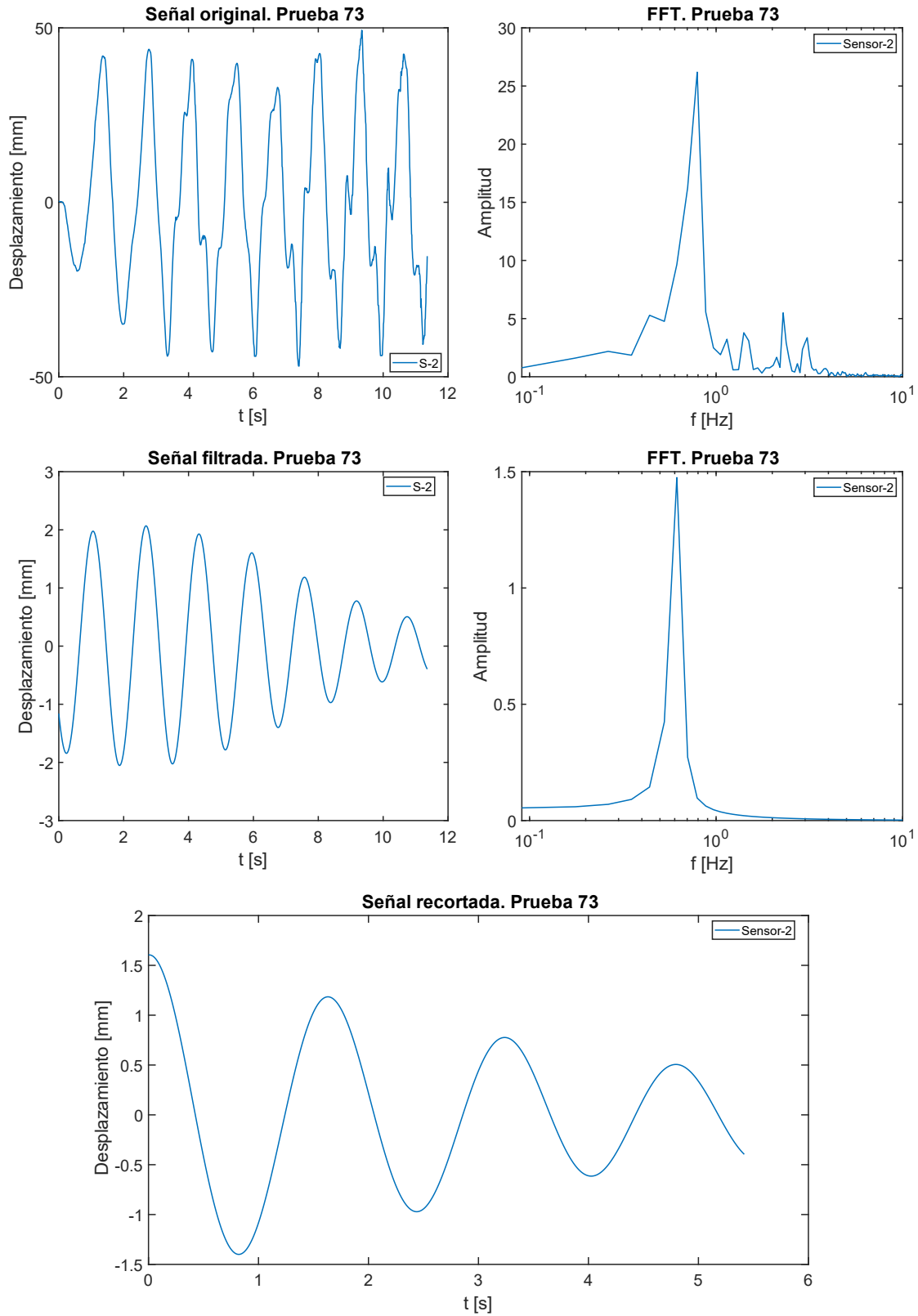


Ilustración 73. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 73, mediante el método de la cámara phantom.

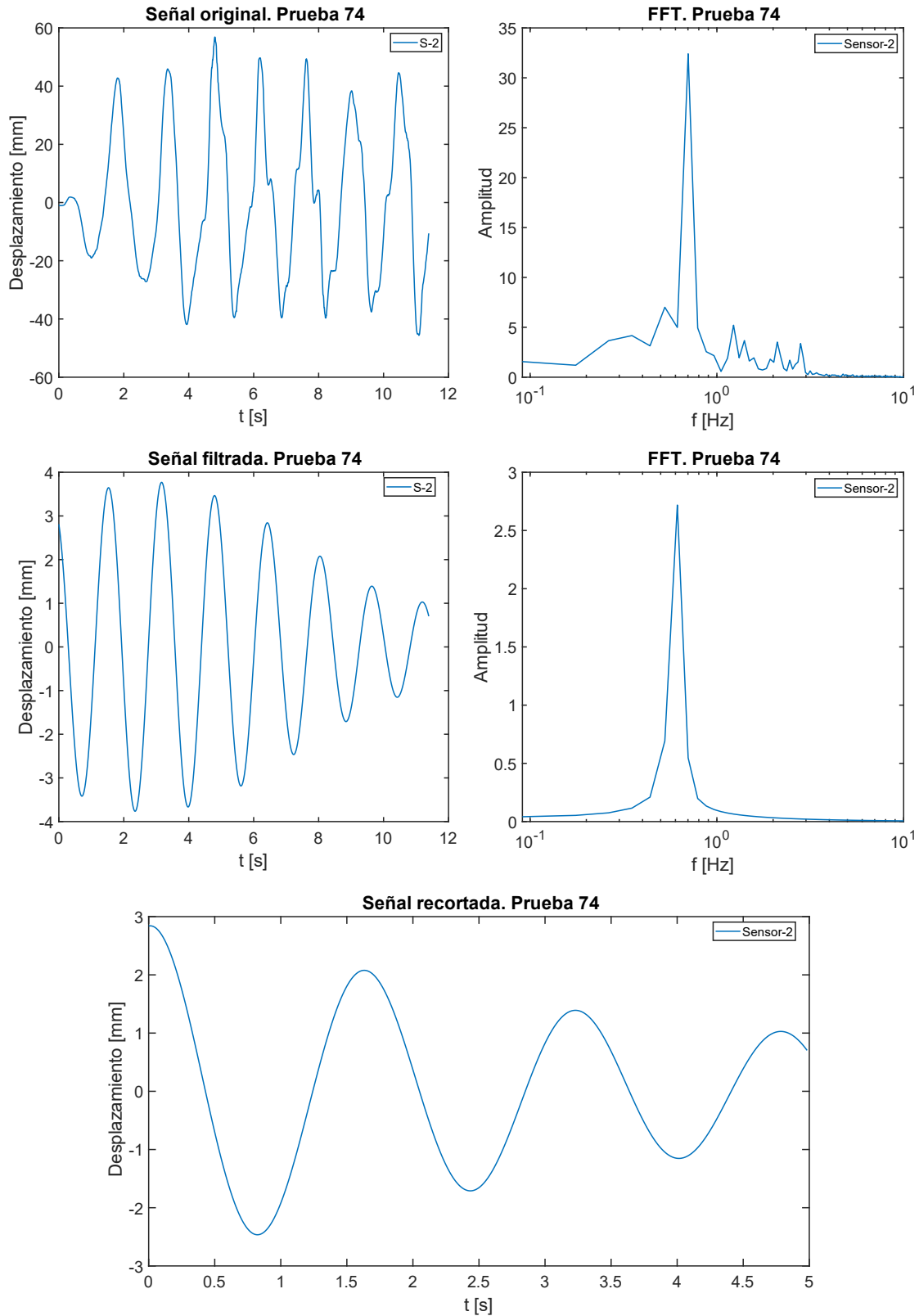


Ilustración 74. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 74, mediante el método de la cámara phantom.

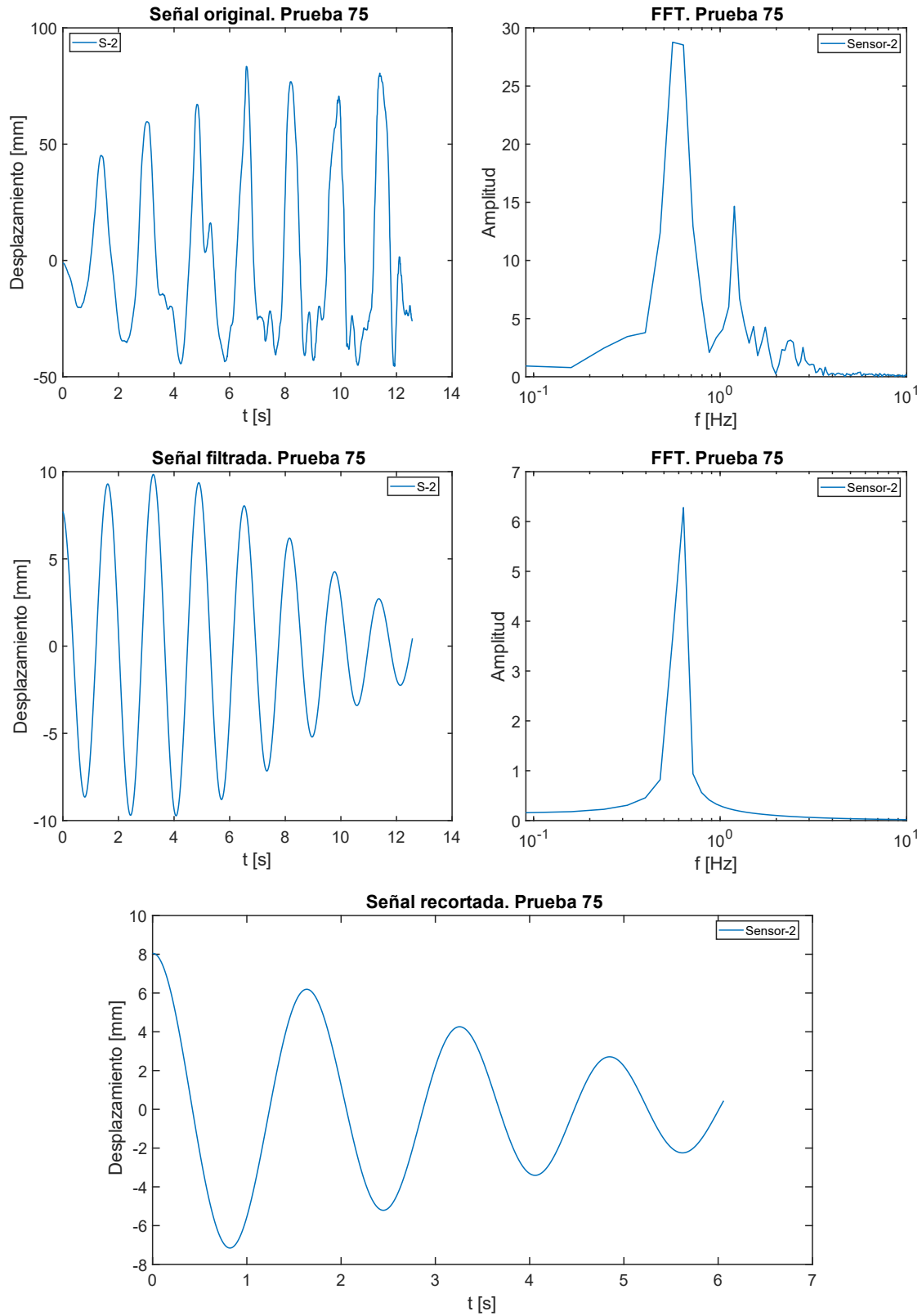


Ilustración 75. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 75, mediante el método de la cámara phantom.

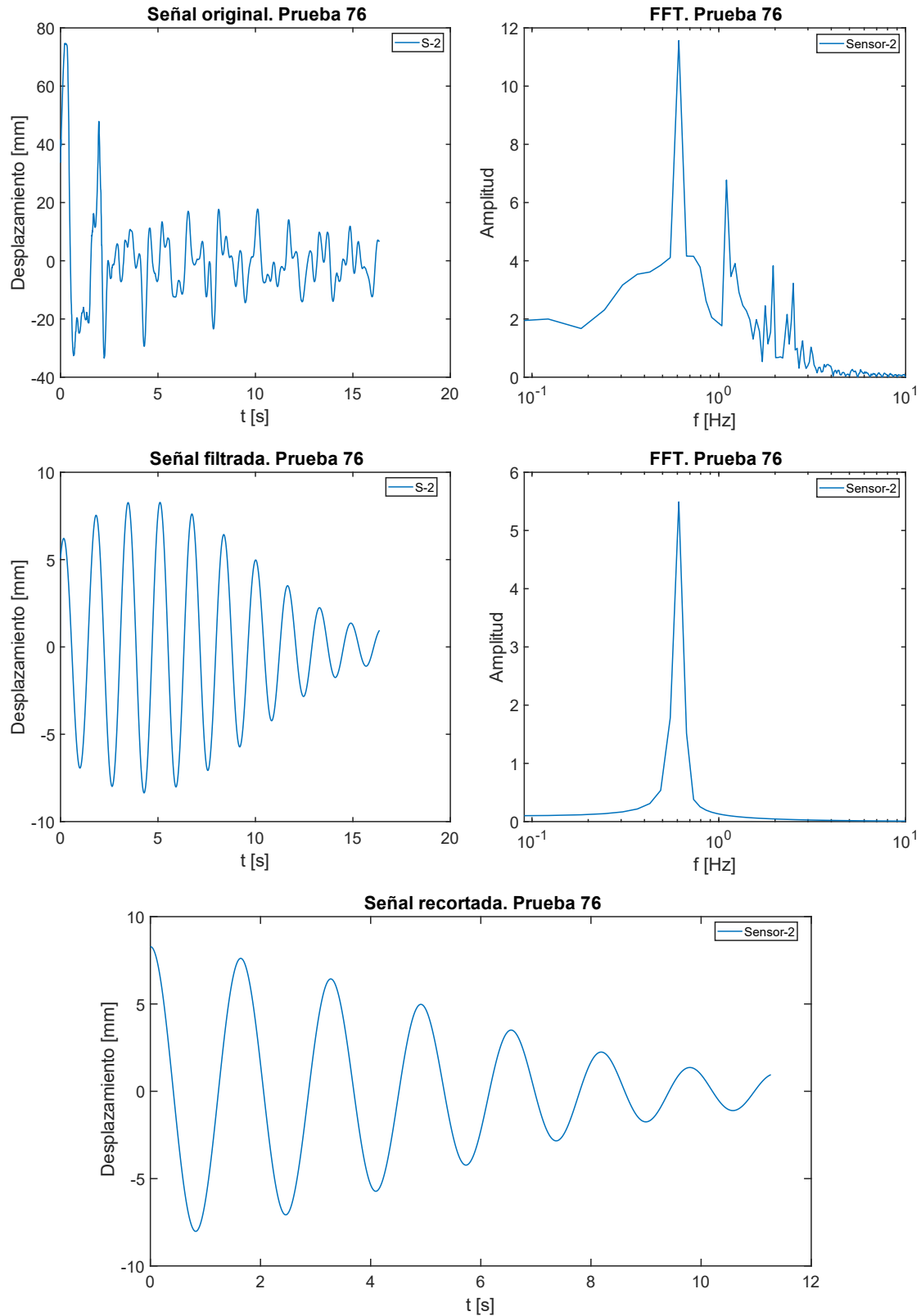


Ilustración 76. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 76, mediante el método de la cámara phantom.

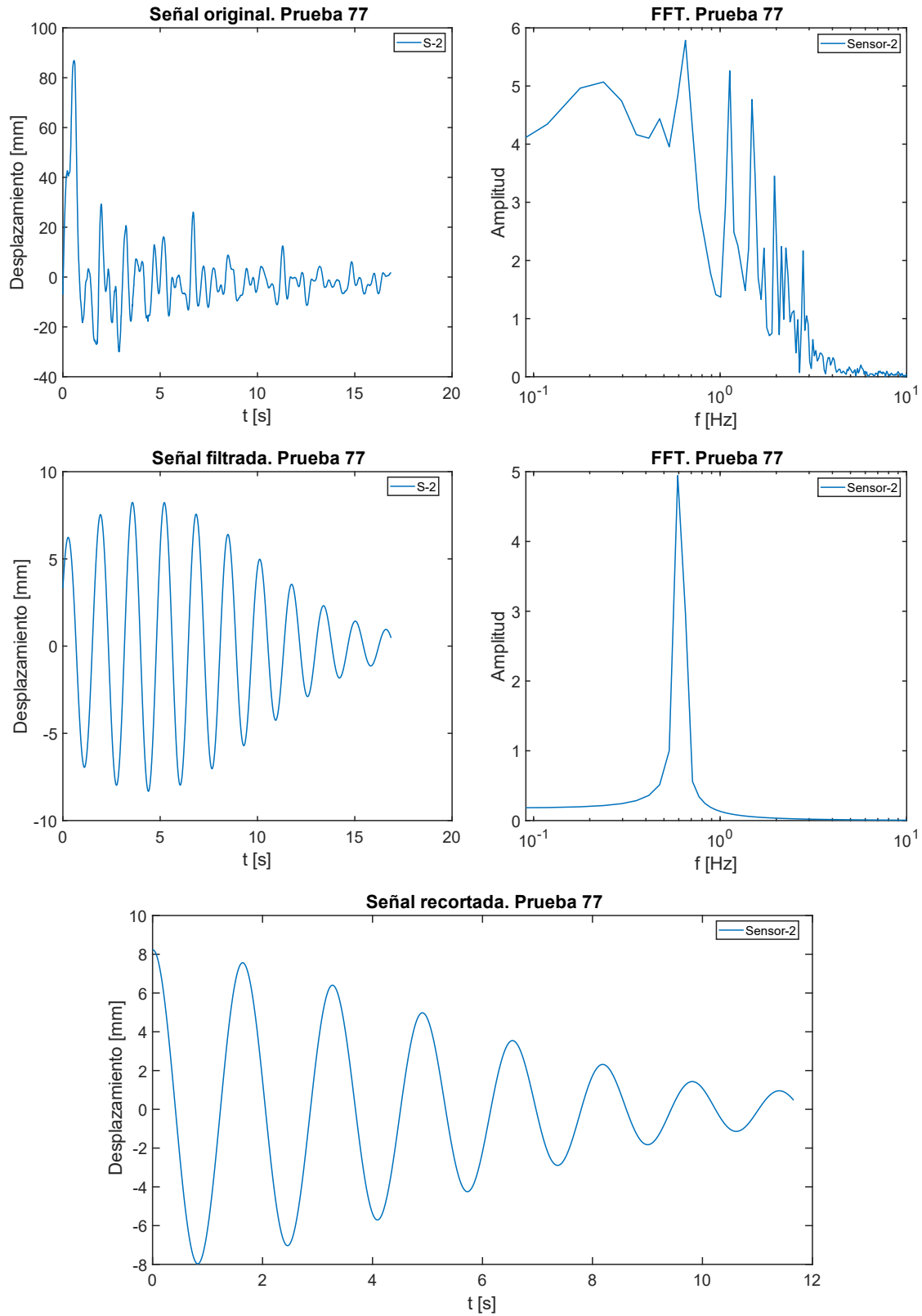


Ilustración 77. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 77, mediante el método de la cámara phantom.

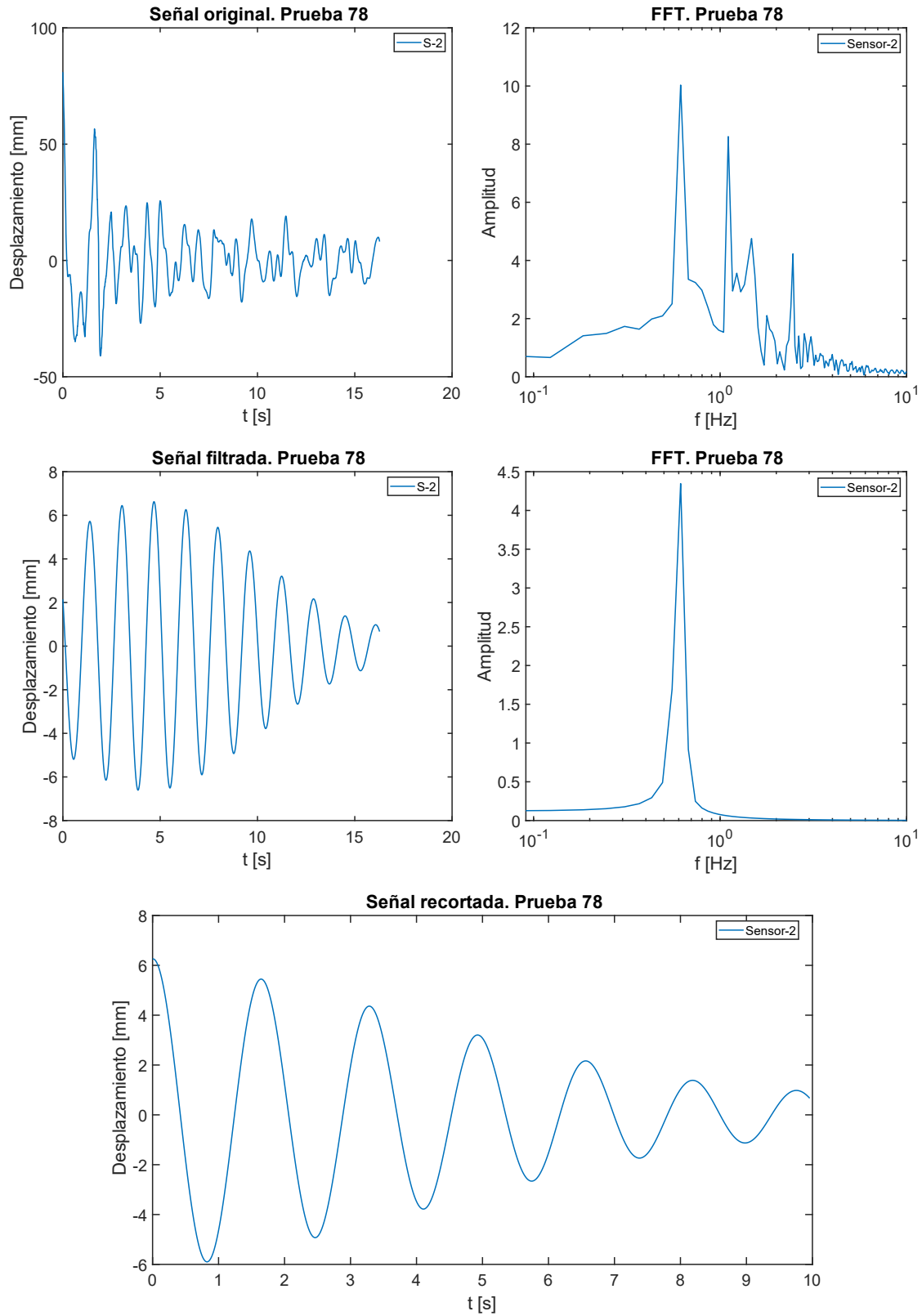


Ilustración 78. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 78, mediante el método de la cámara phantom.

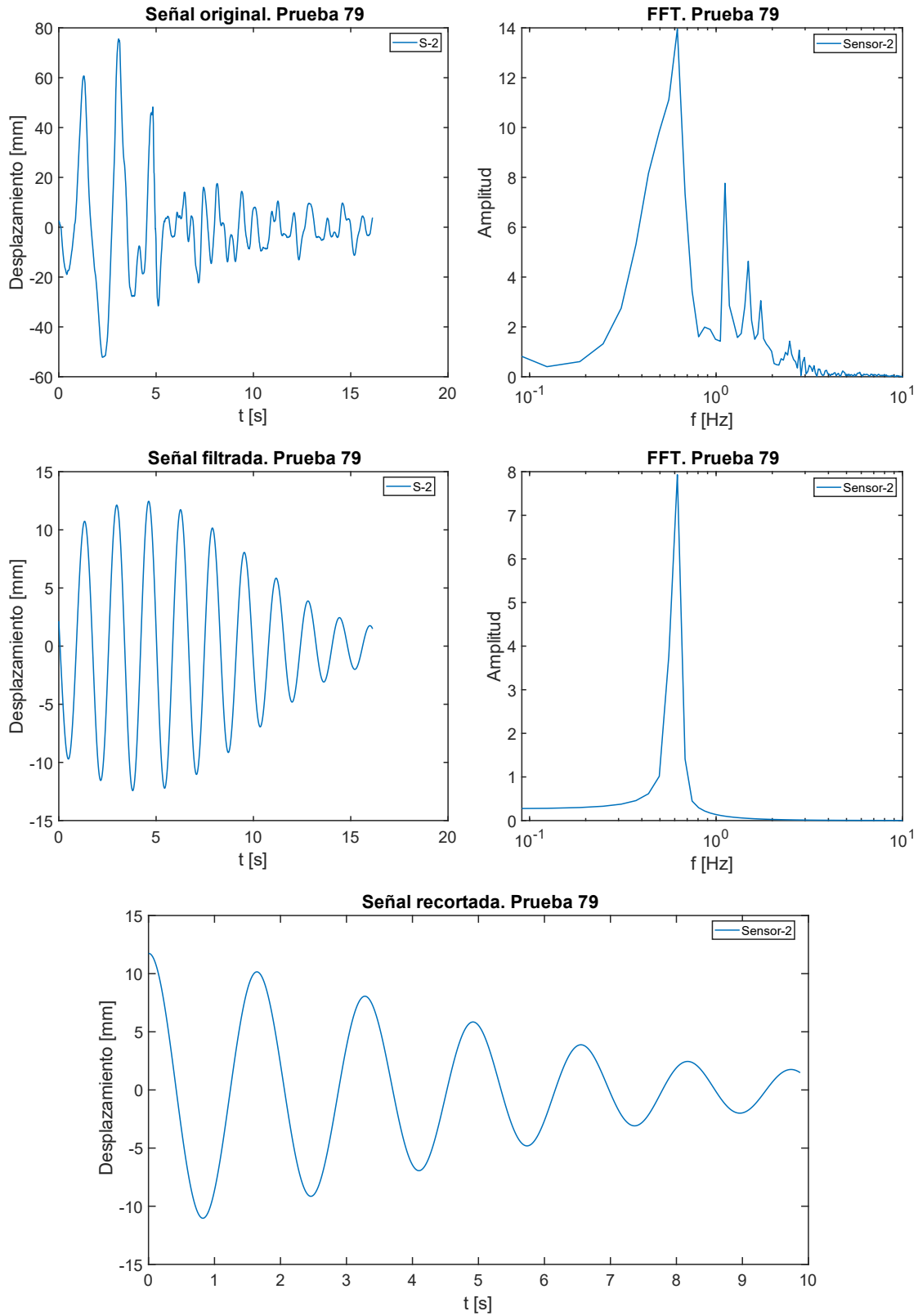


Ilustración 79. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 79, mediante el método de la cámara phantom.

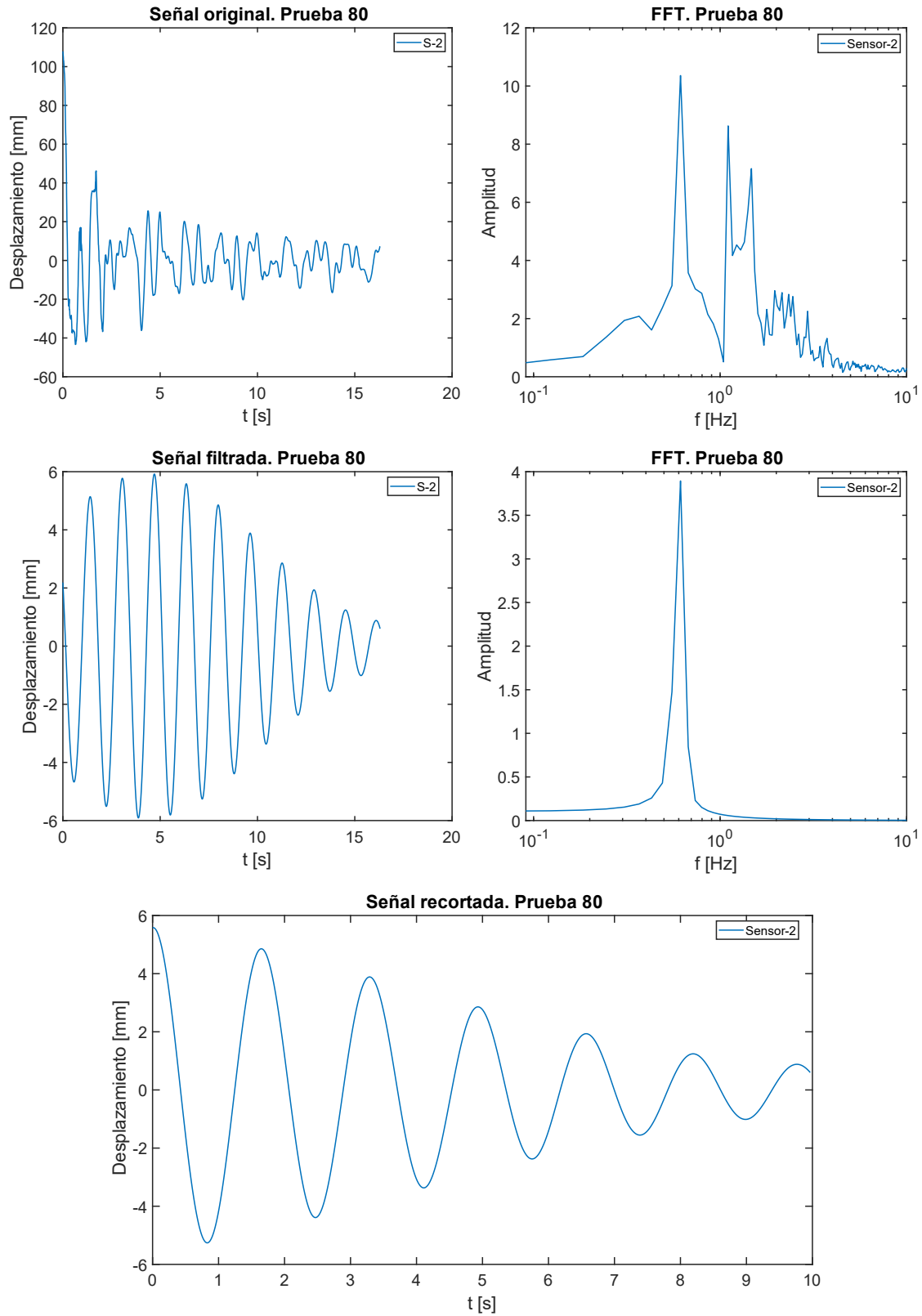


Ilustración 80. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 80, mediante el método de la cámara phantom.

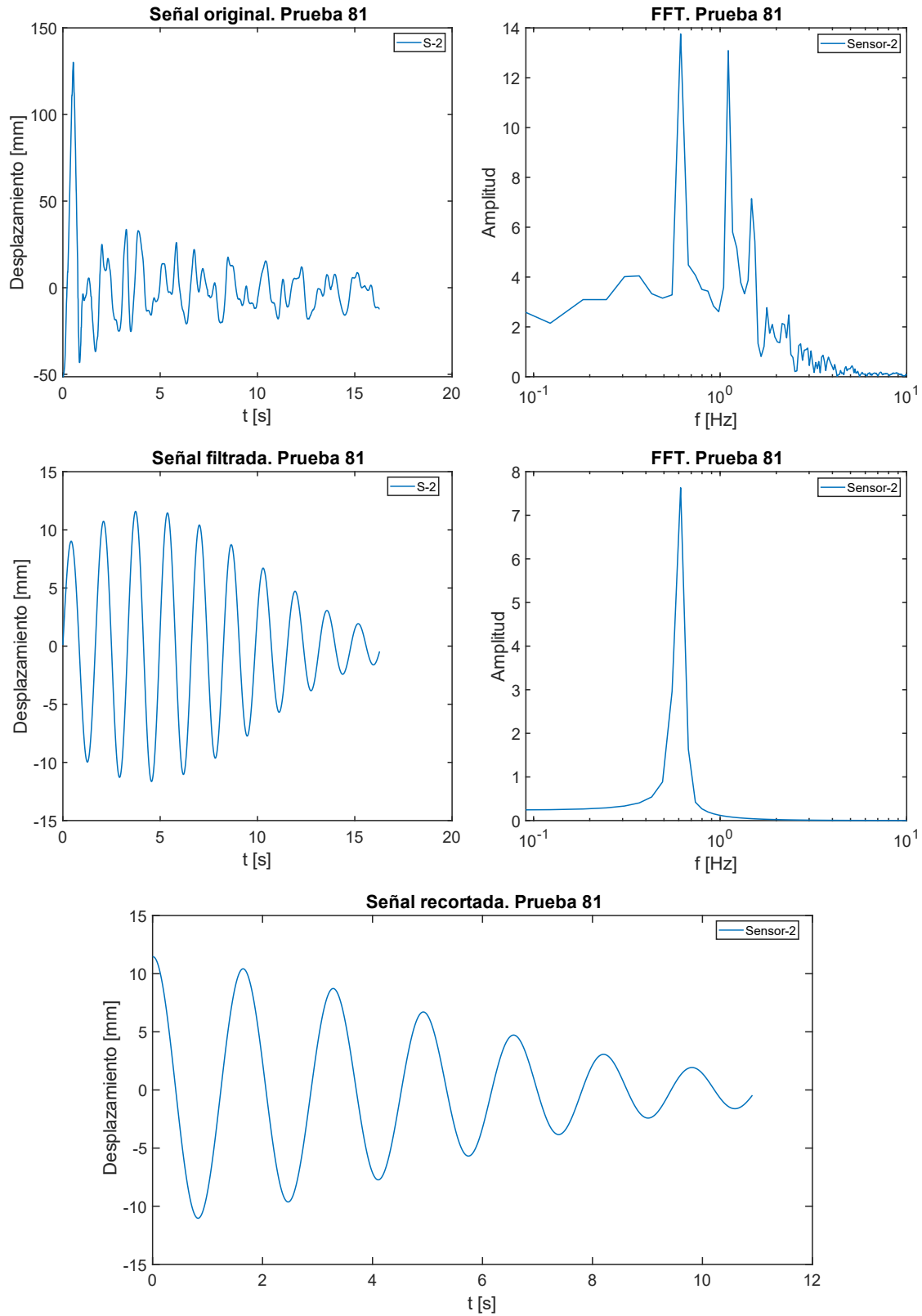


Ilustración 81. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 81, mediante el método de la cámara phantom.

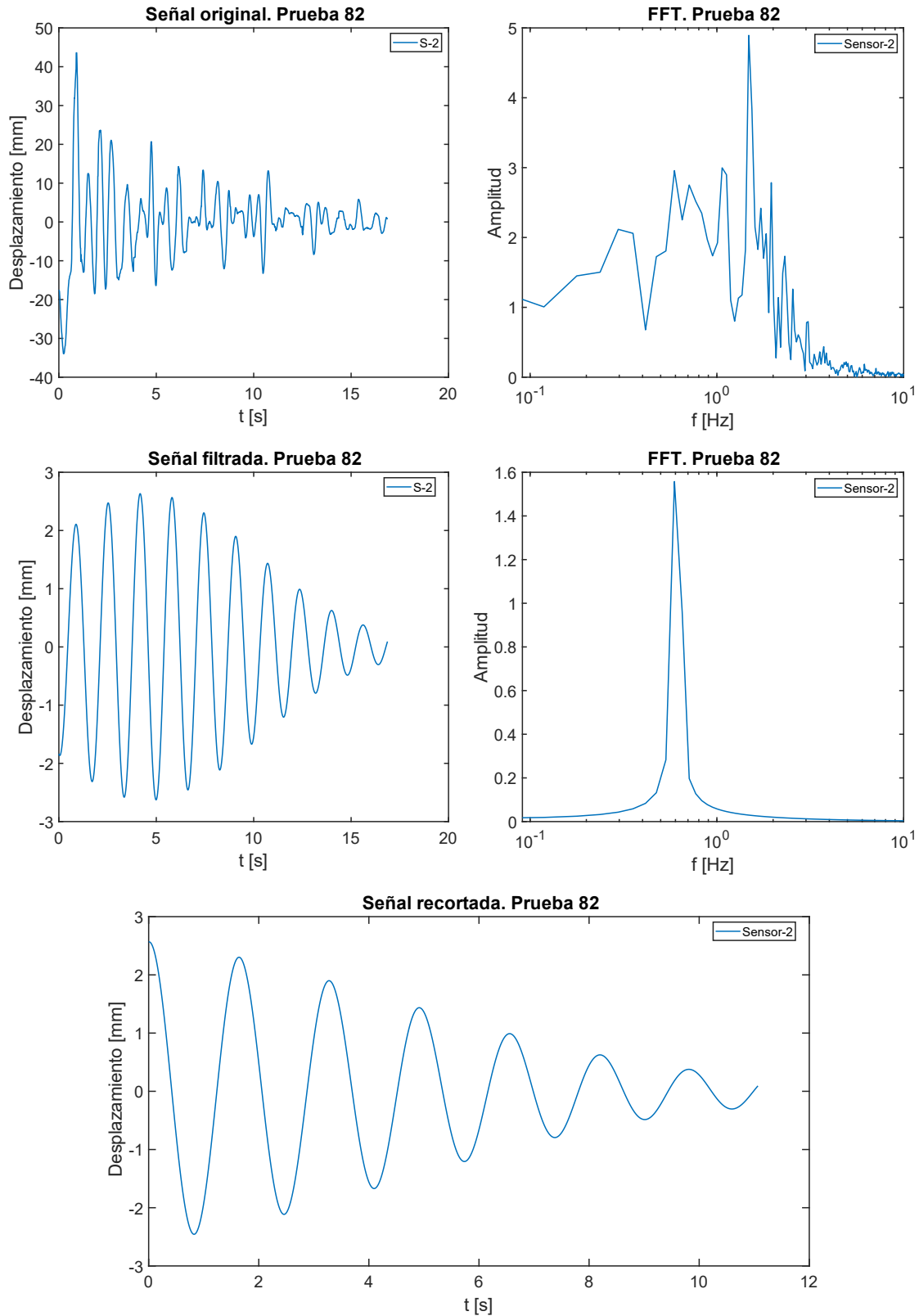


Ilustración 82. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 82, mediante el método de la cámara phantom.

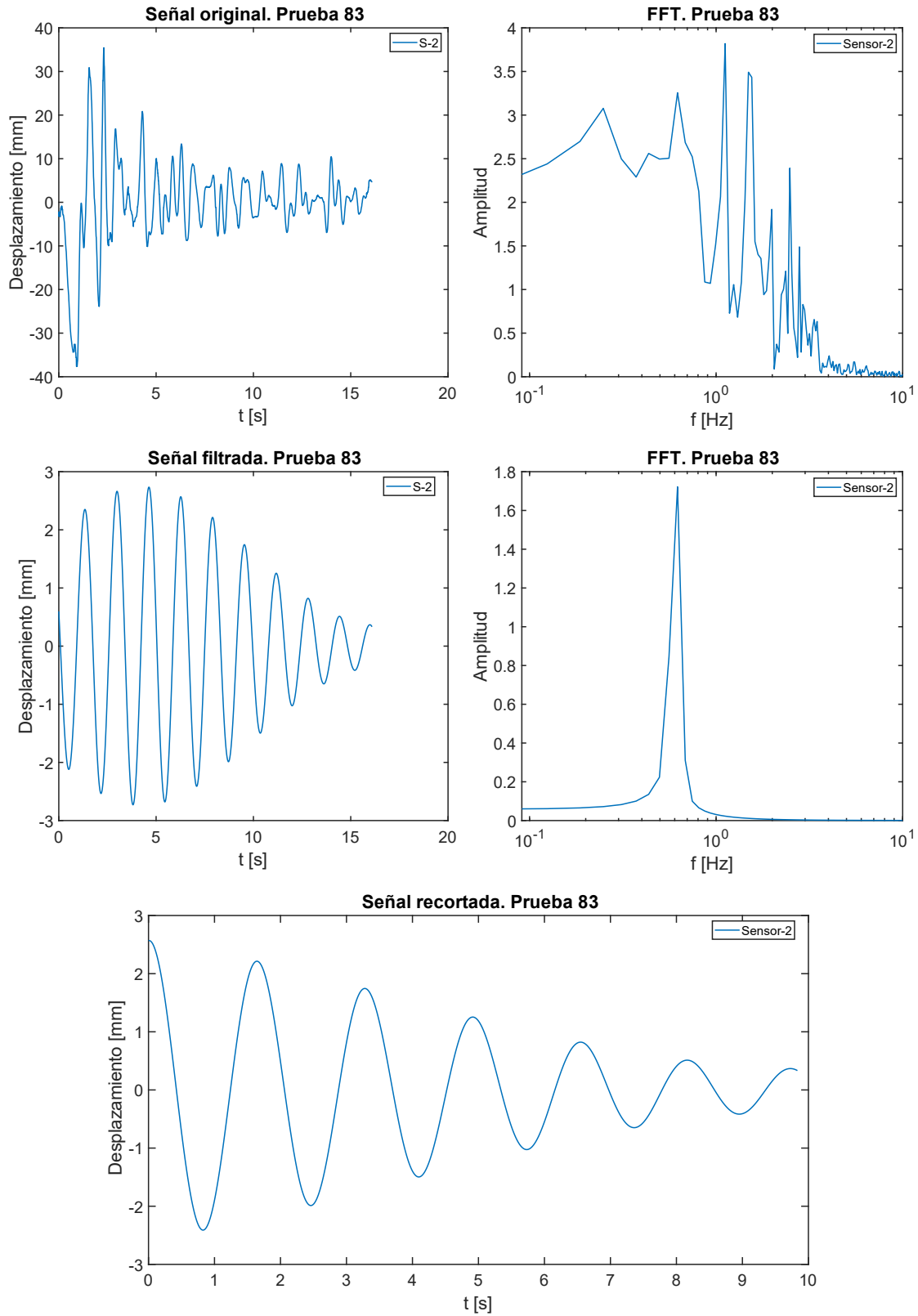


Ilustración 83. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 83, mediante el método de la cámara phantom.

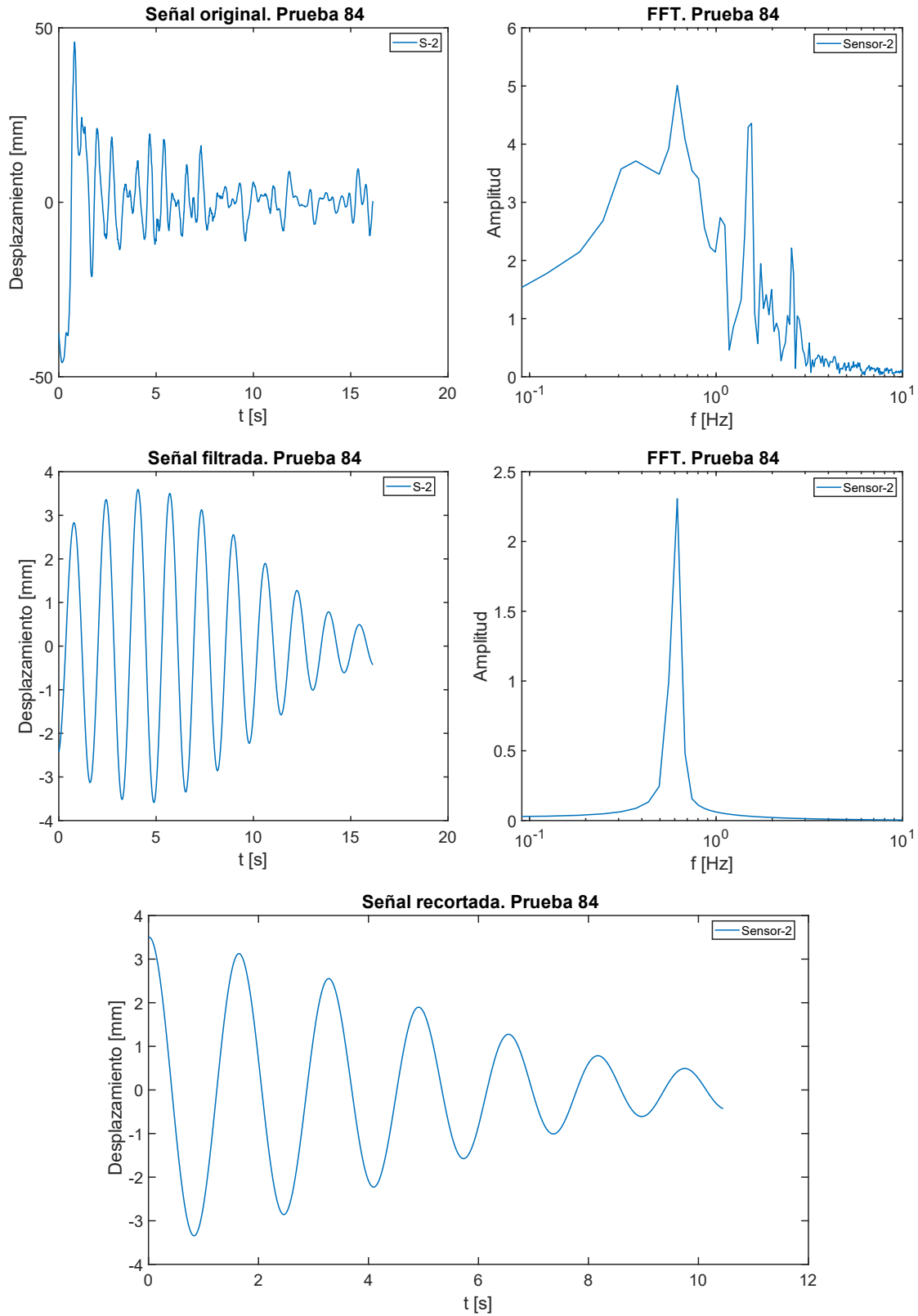


Ilustración 84. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 84, mediante el método de la cámara phantom.

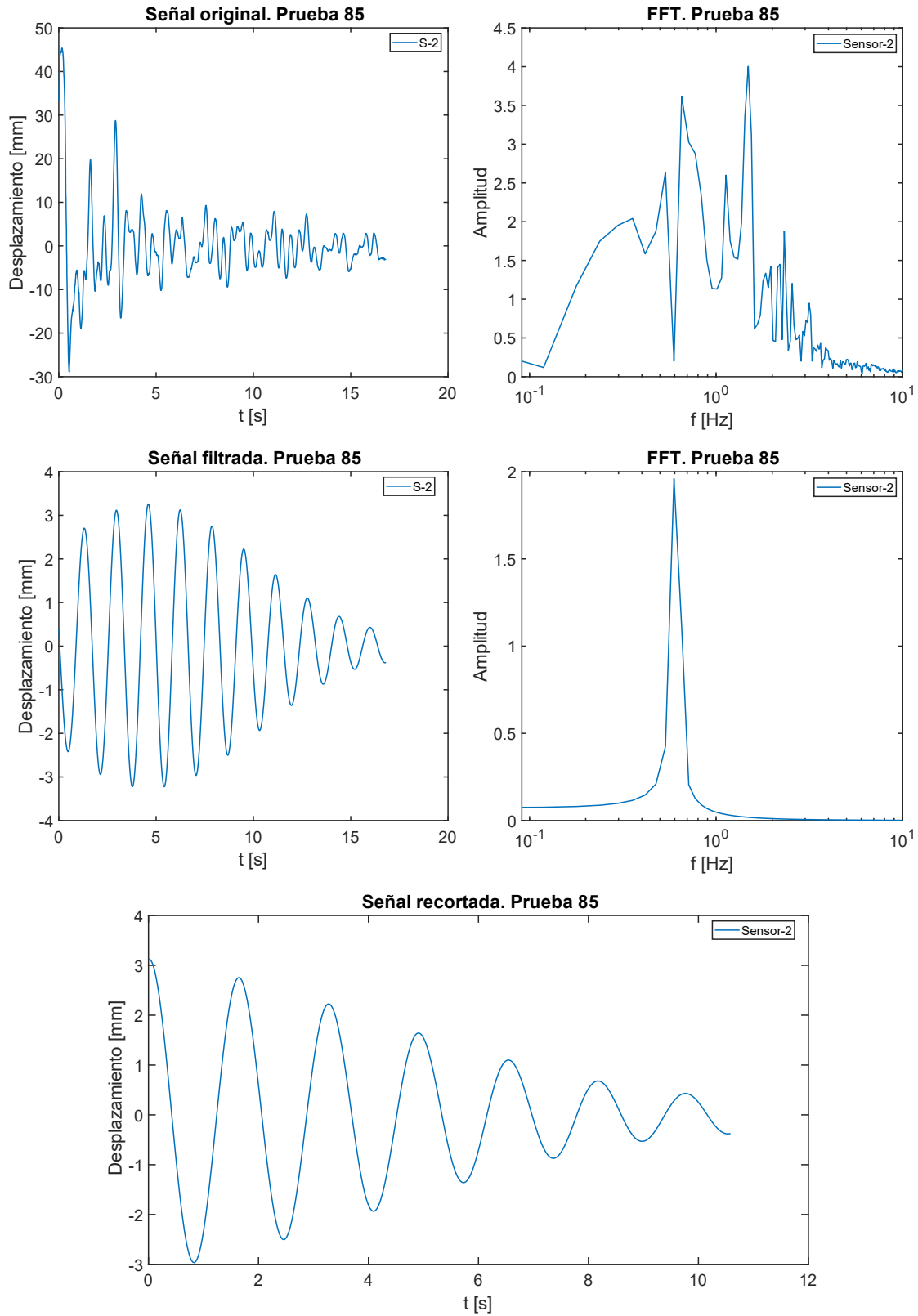


Ilustración 85. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 85, mediante el método de la cámara phantom.

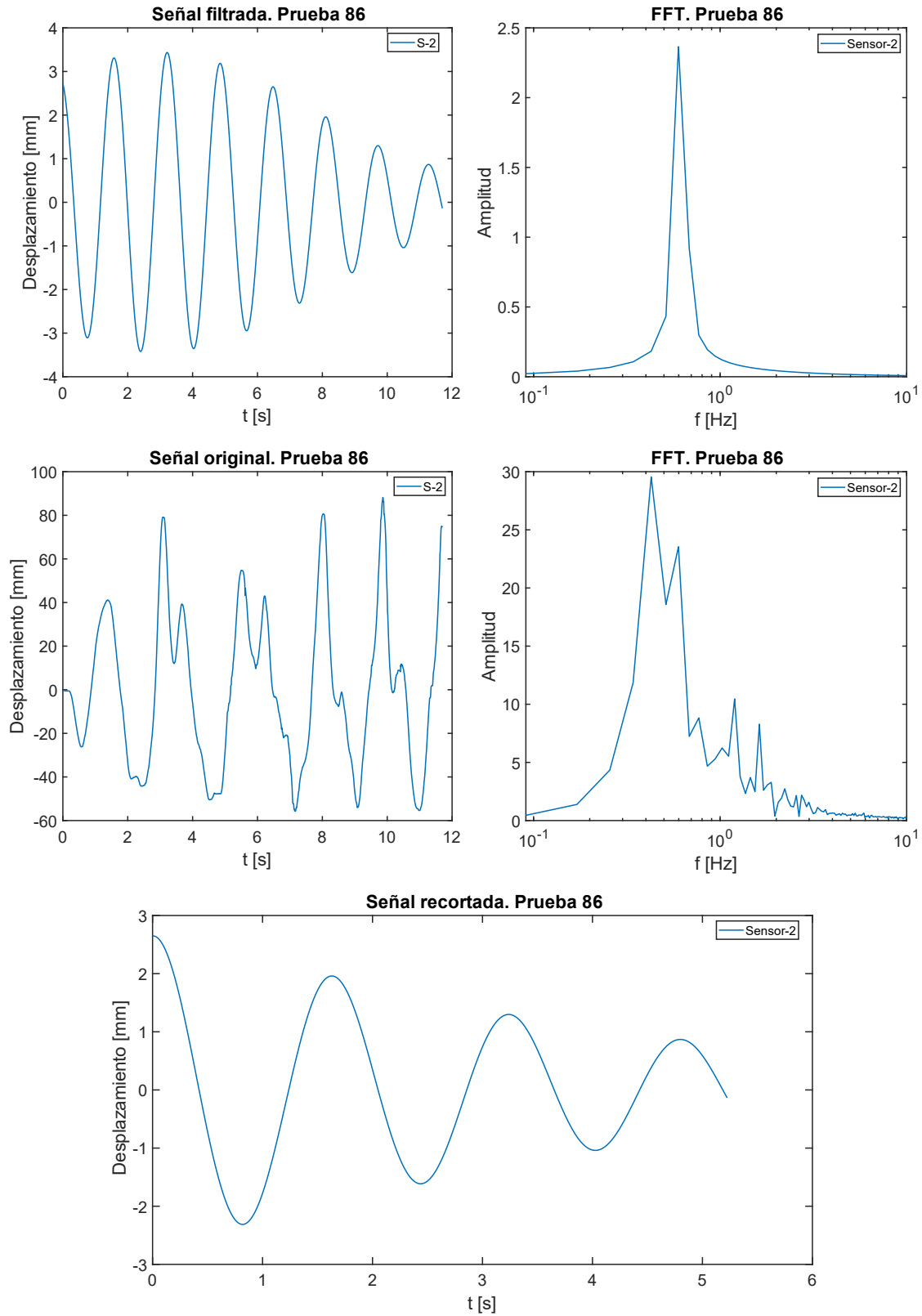


Ilustración 86. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 86, mediante el método de la cámara phantom.

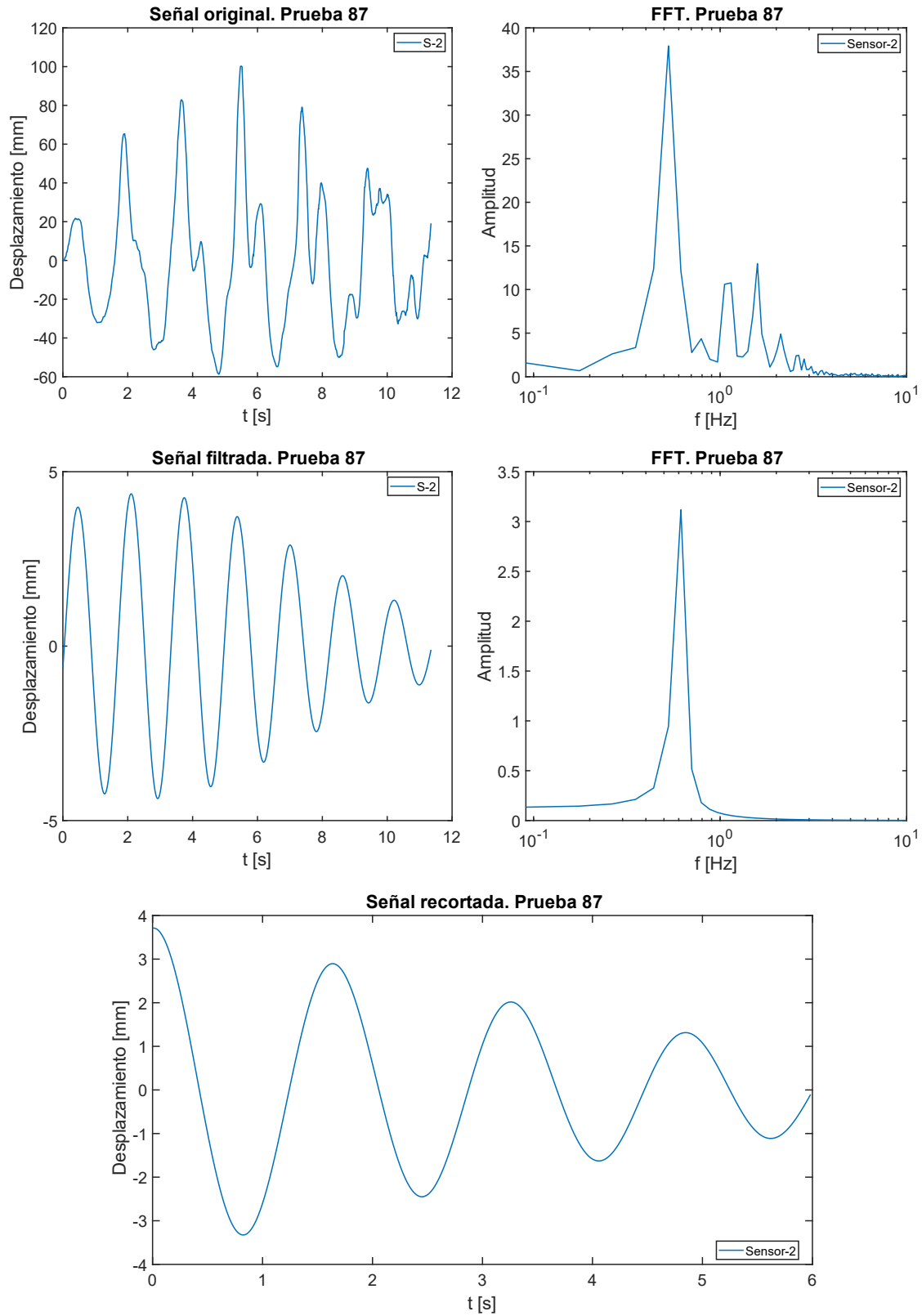


Ilustración 87. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 87, mediante el método de la cámara phantom.

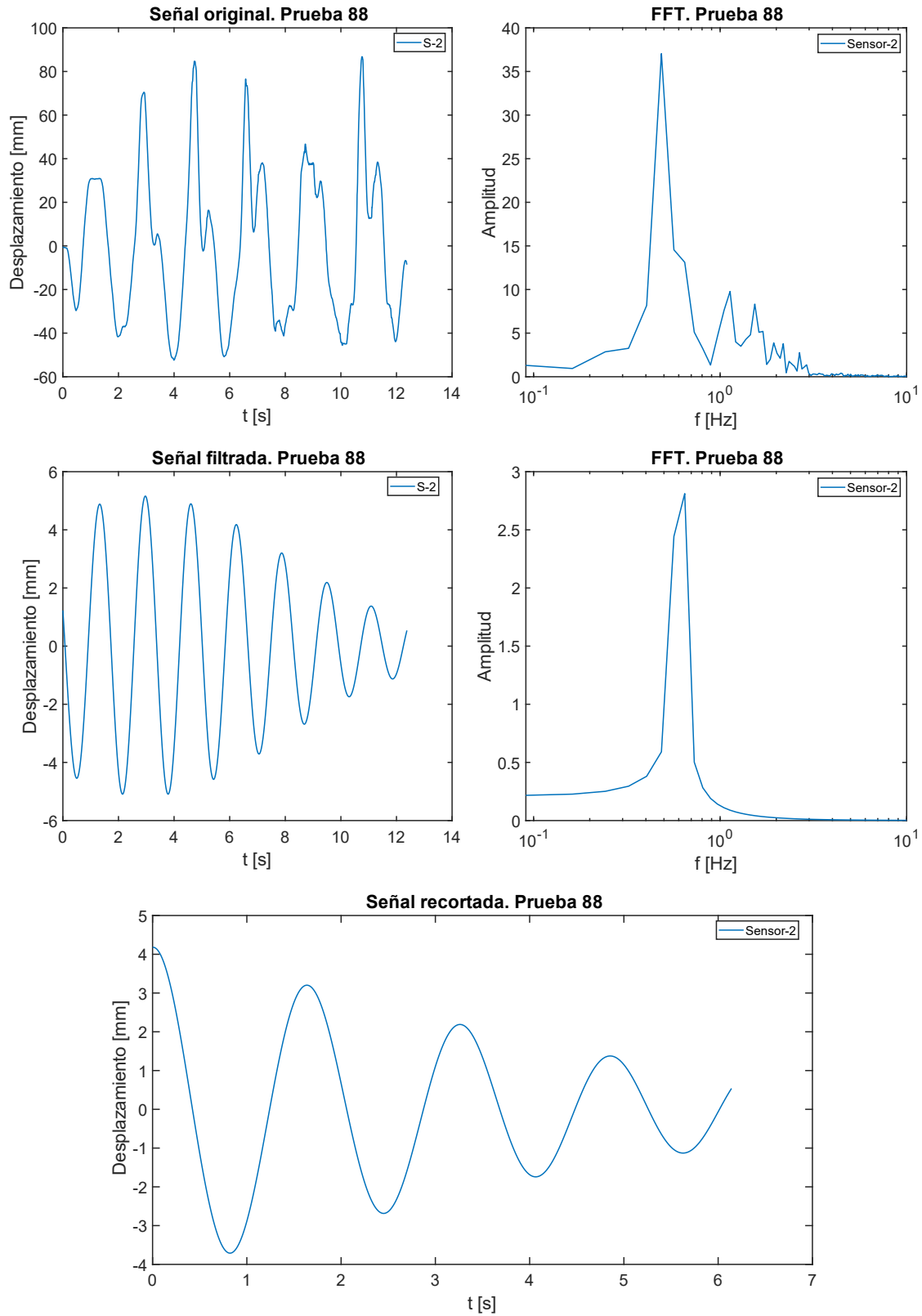


Ilustración 88. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 88, mediante el método de la cámara phantom.

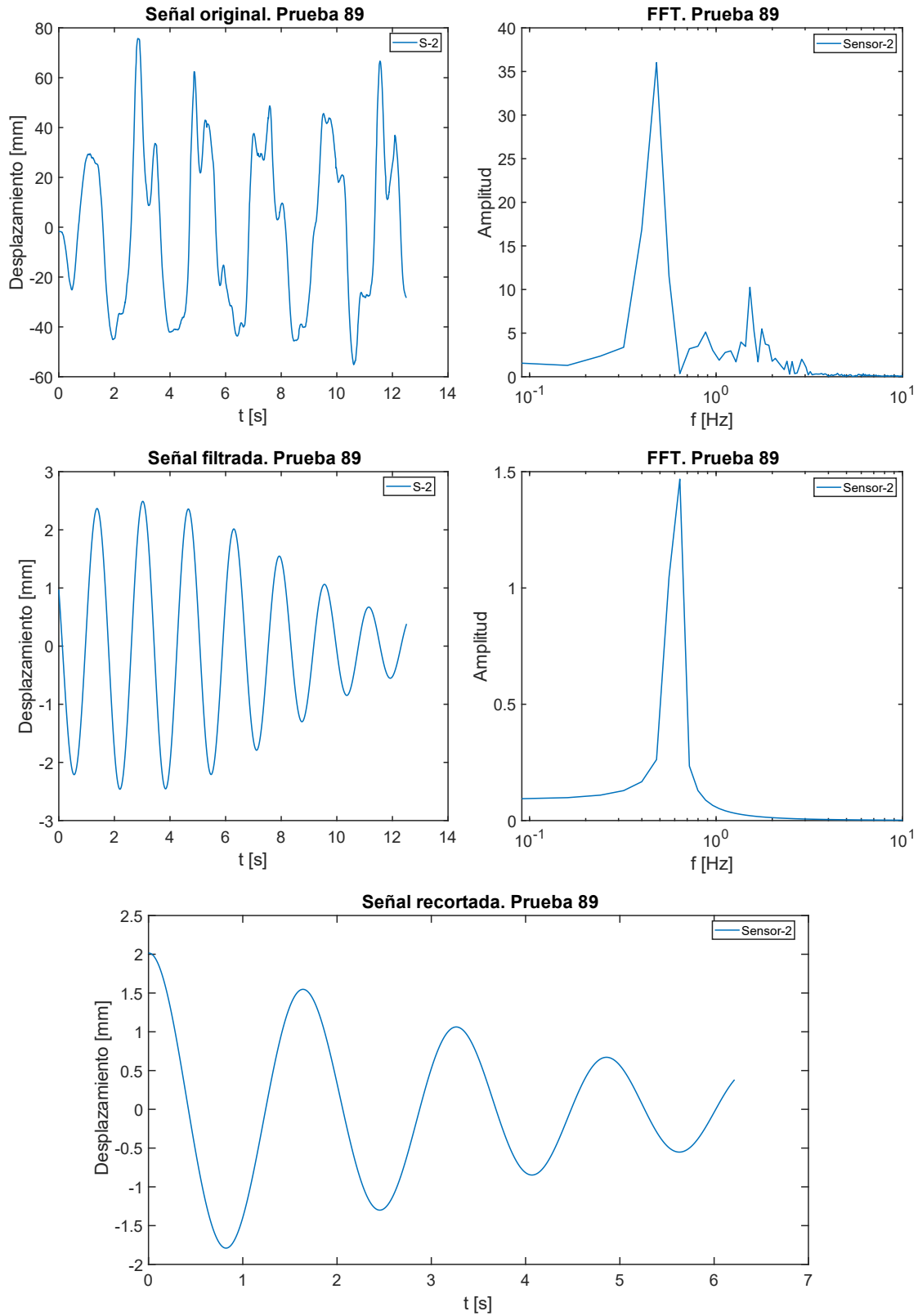


Ilustración 89. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 89, mediante el método de la cámara phantom.

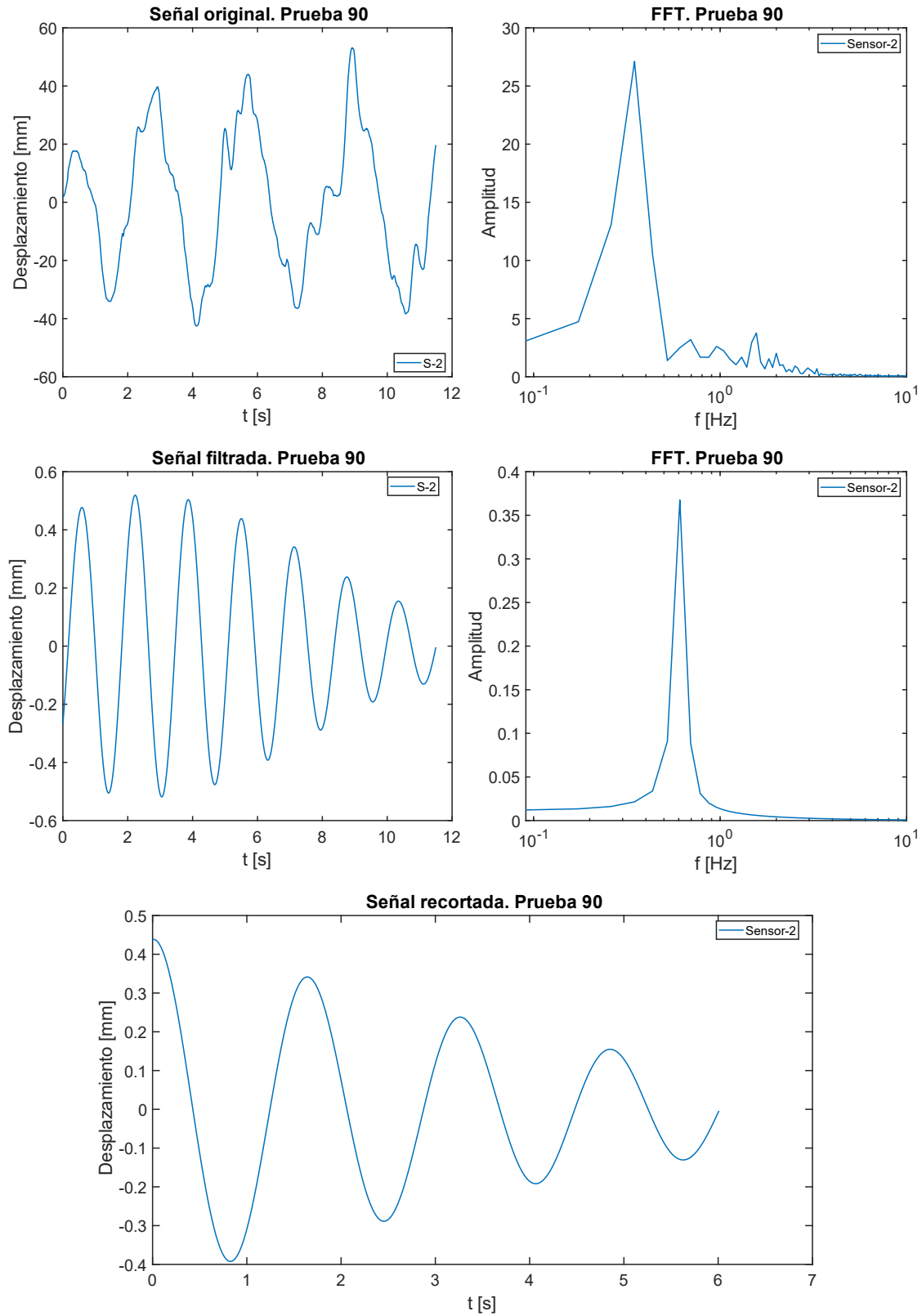


Ilustración 90. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 90, mediante el método de la cámara phantom.

ANEXO B

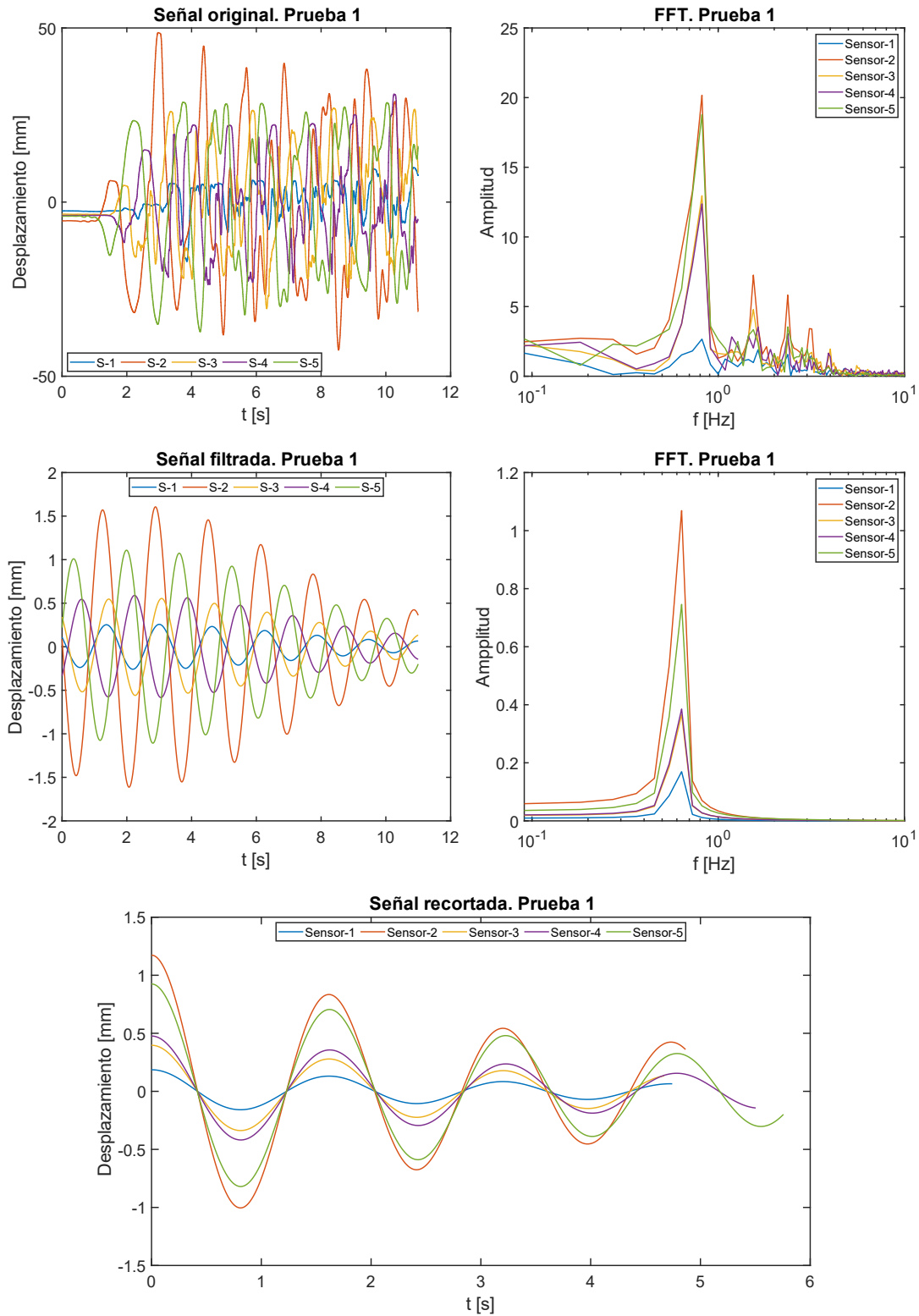


Ilustración 91. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 1, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

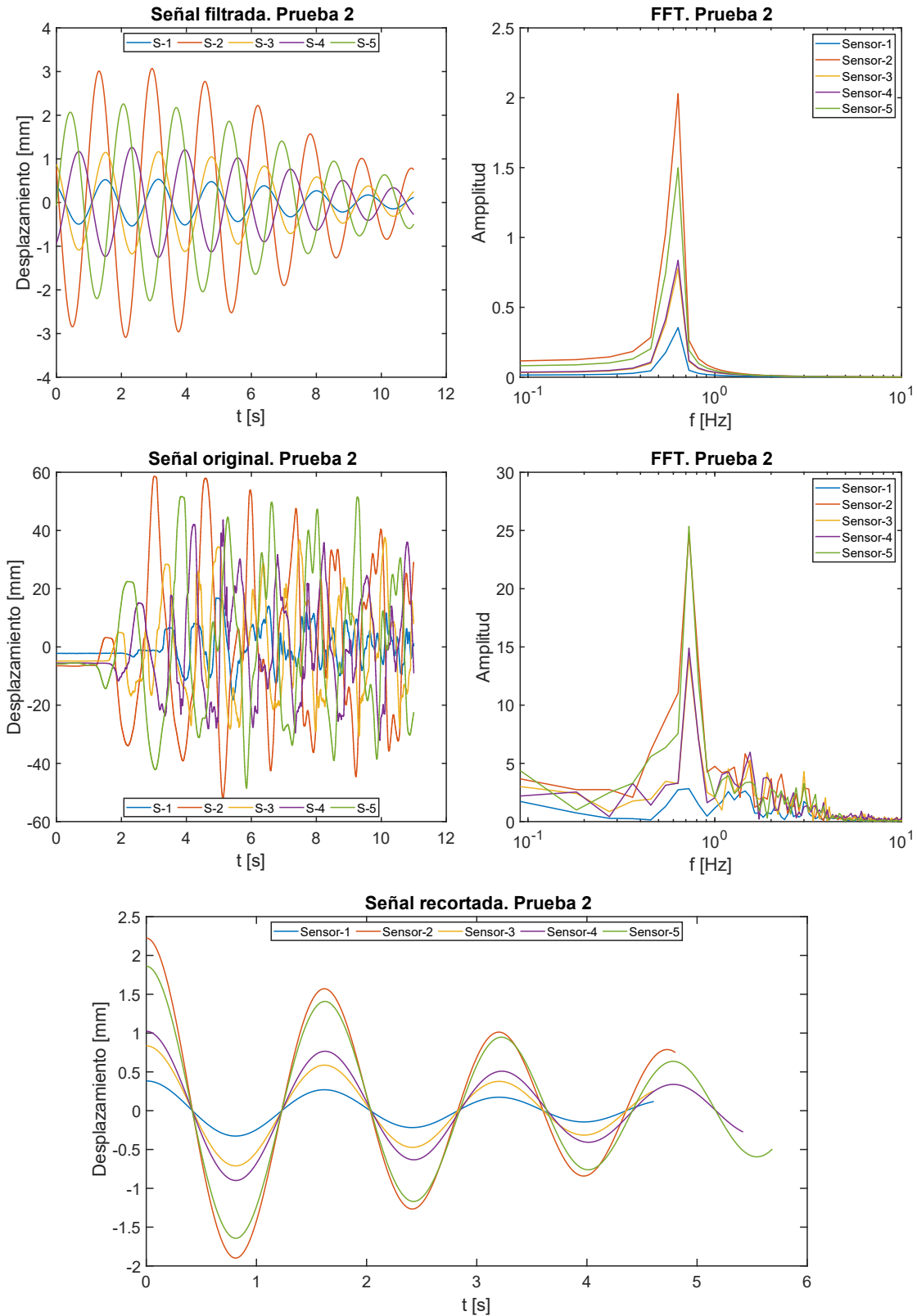


Ilustración 92. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 2, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

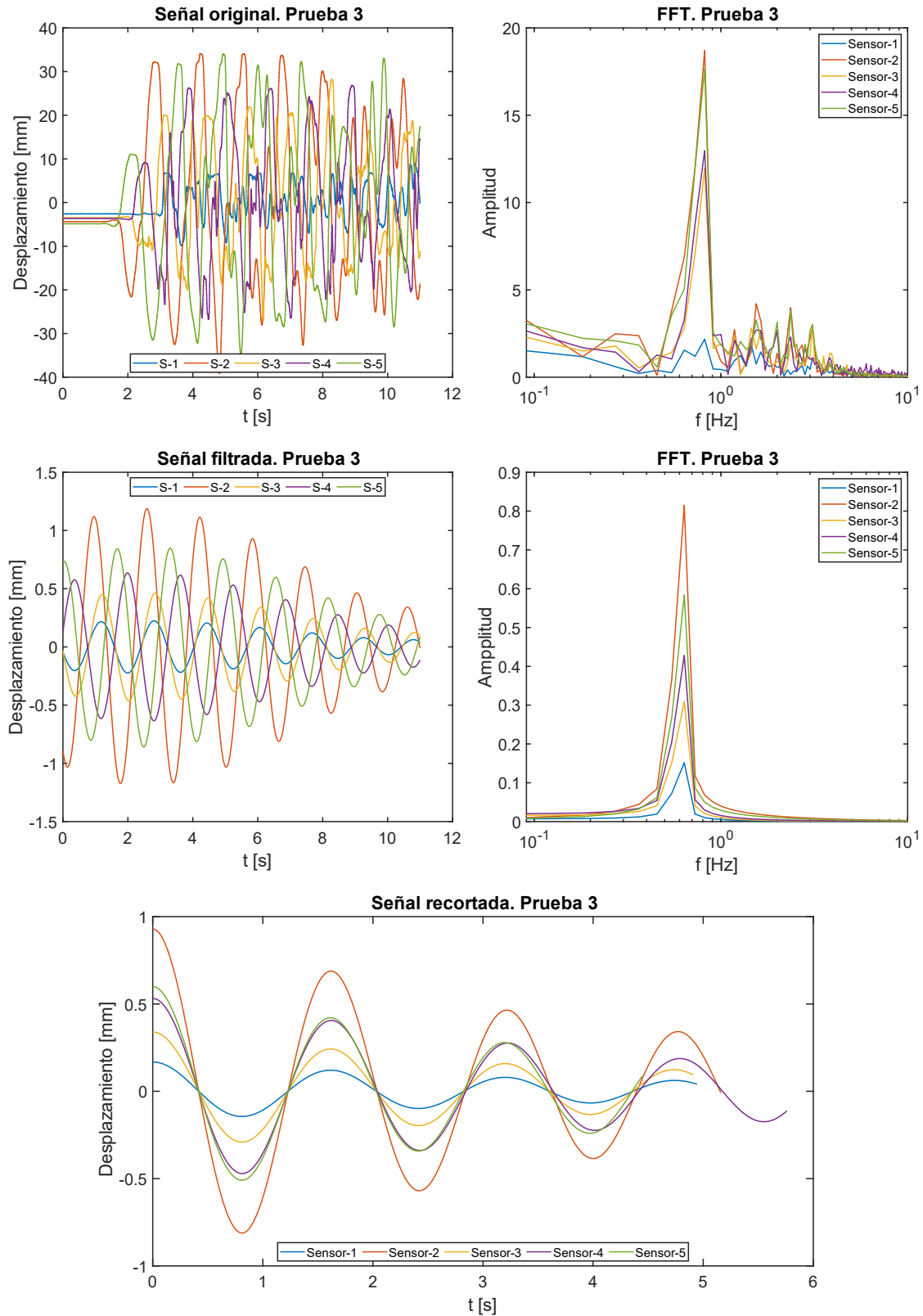


Ilustración 93. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 3, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

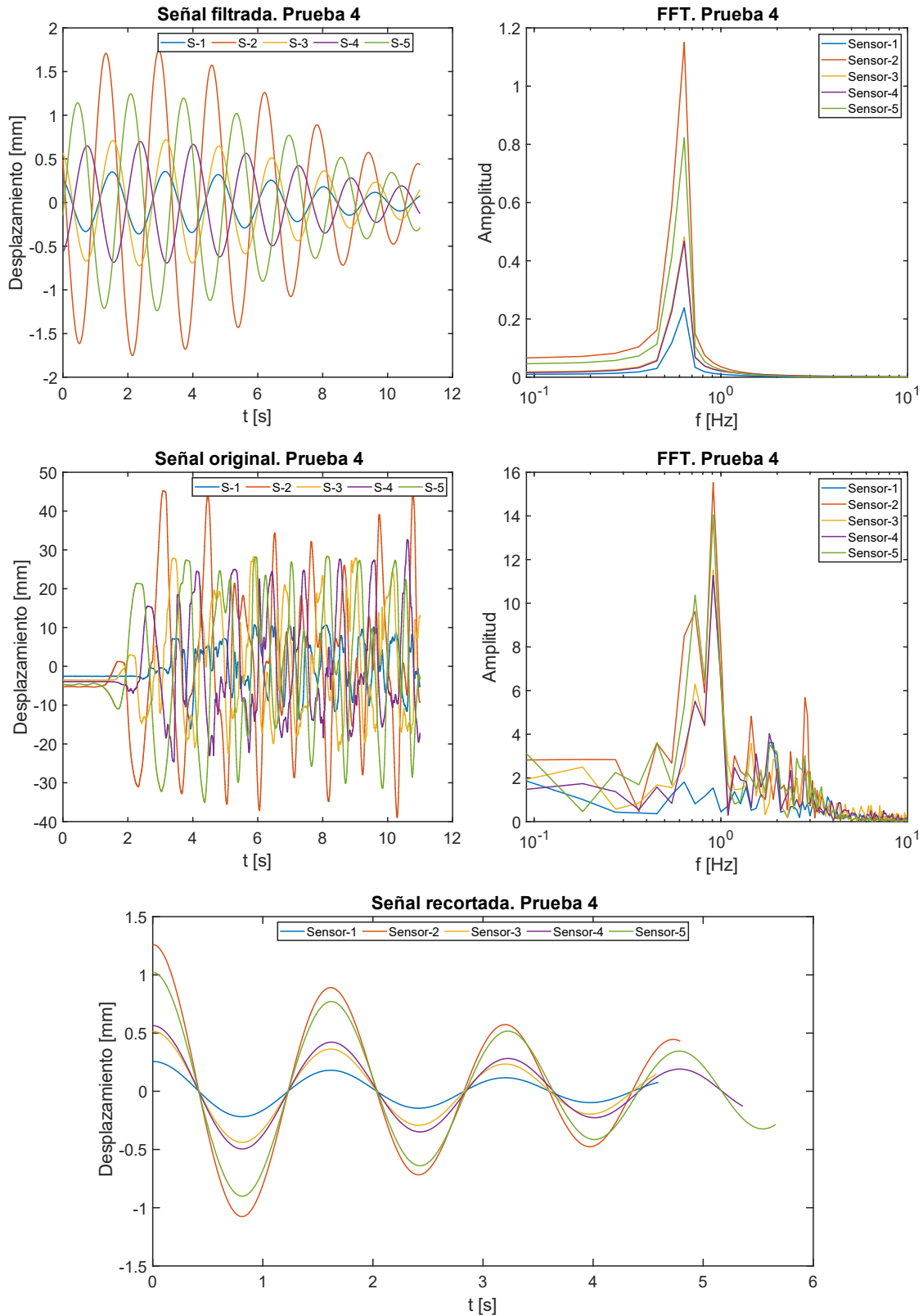


Ilustración 94. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 4, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

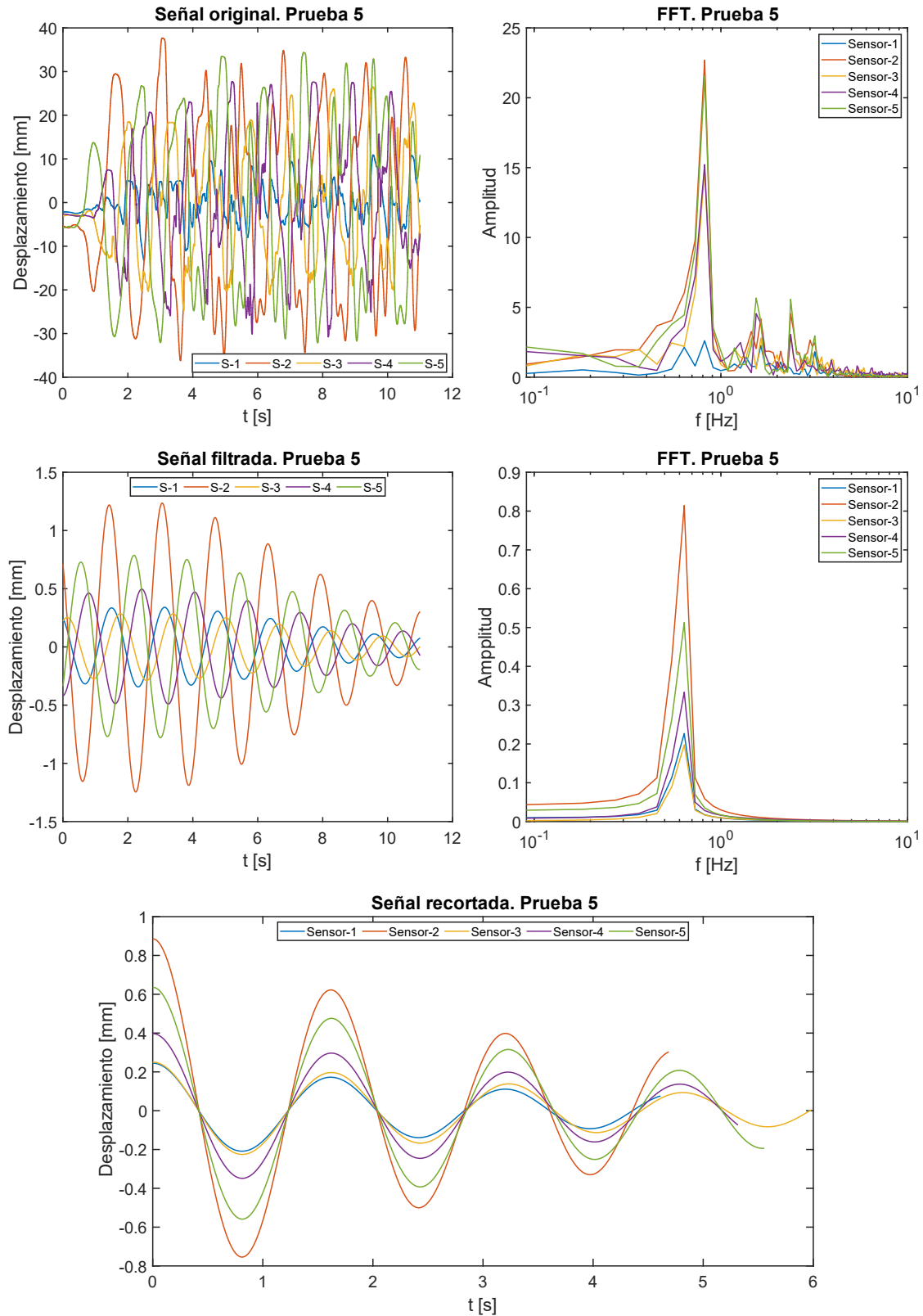


Ilustración 95. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 5, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

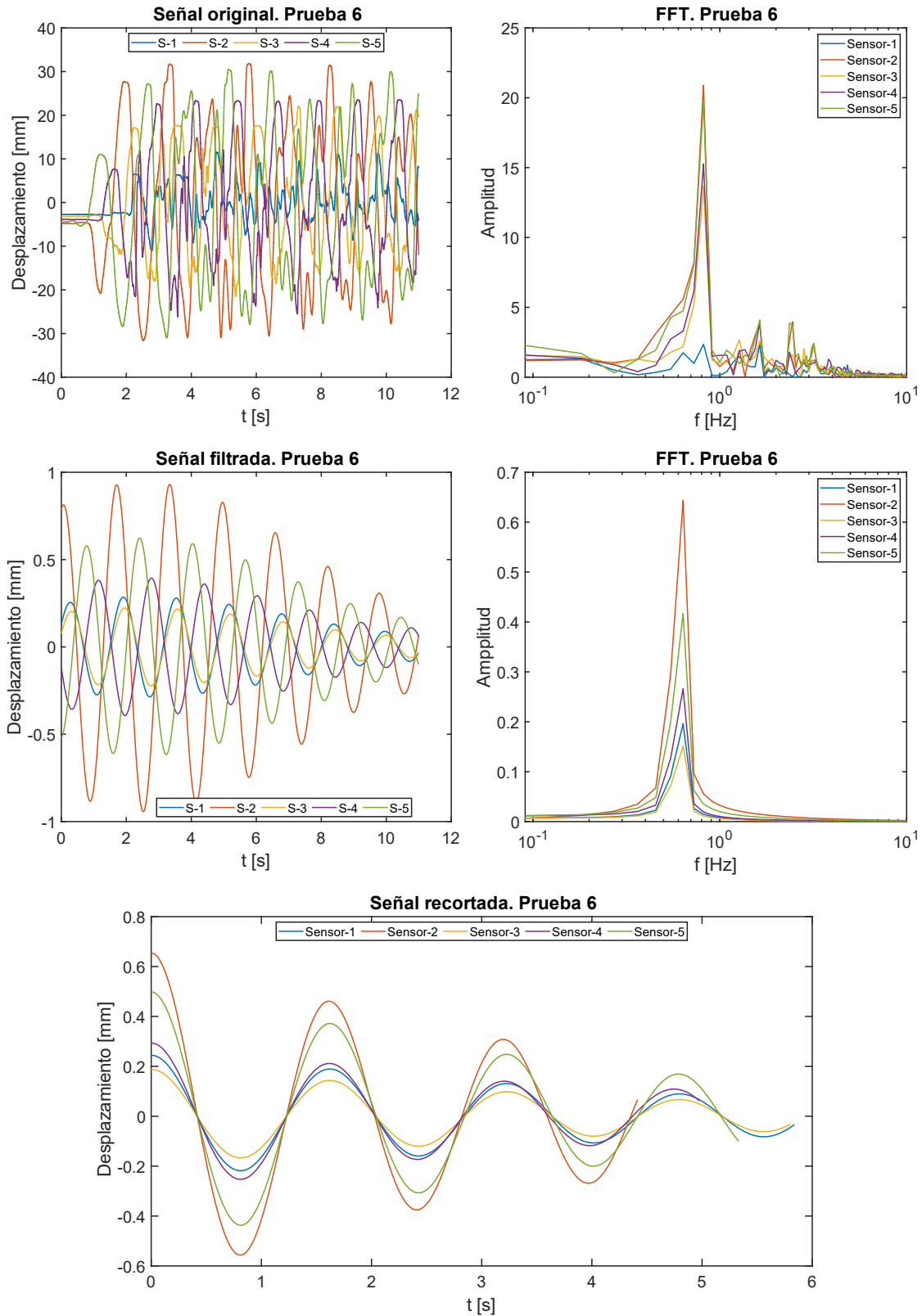


Ilustración 96. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 6, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

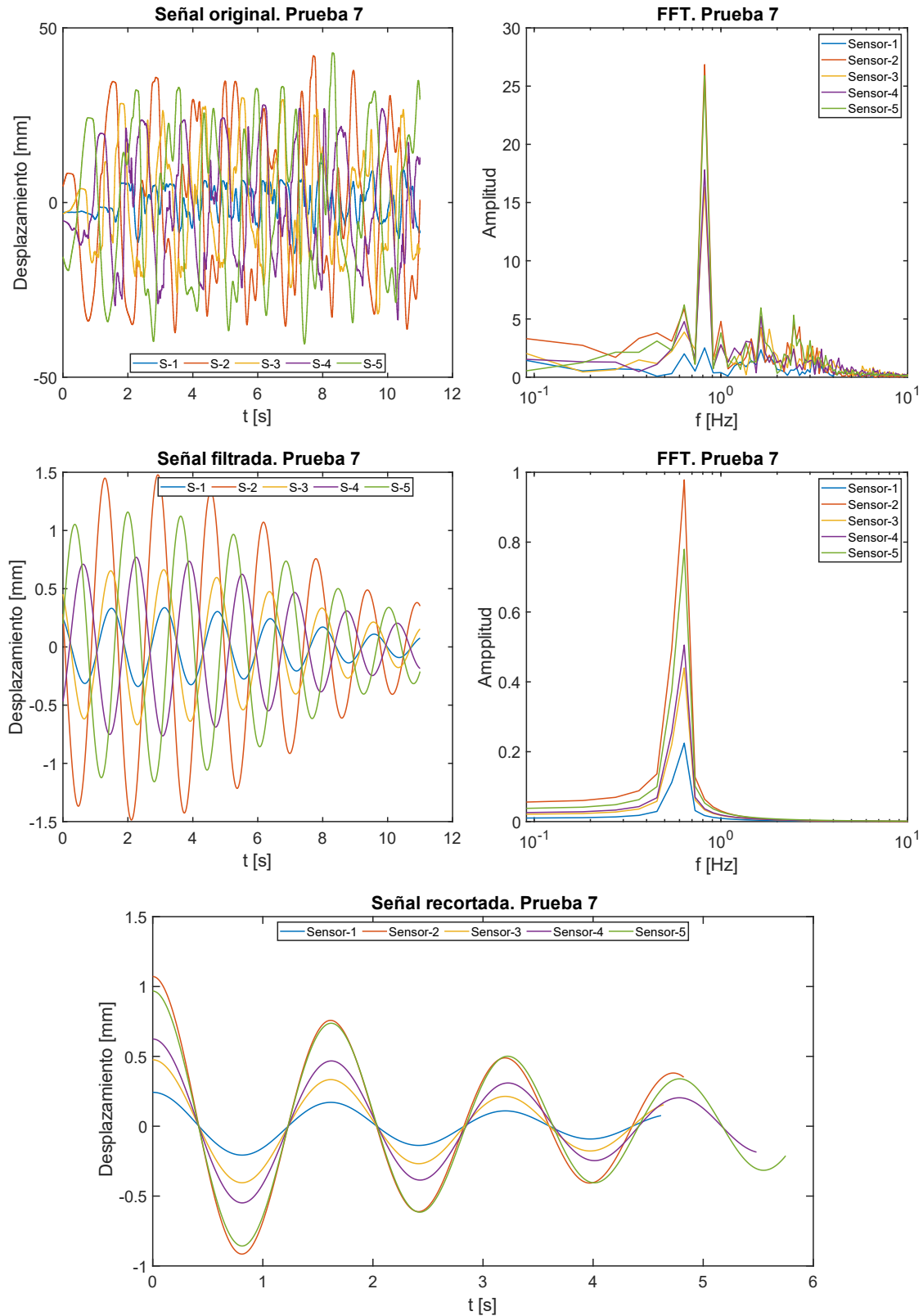


Ilustración 97. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 7, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

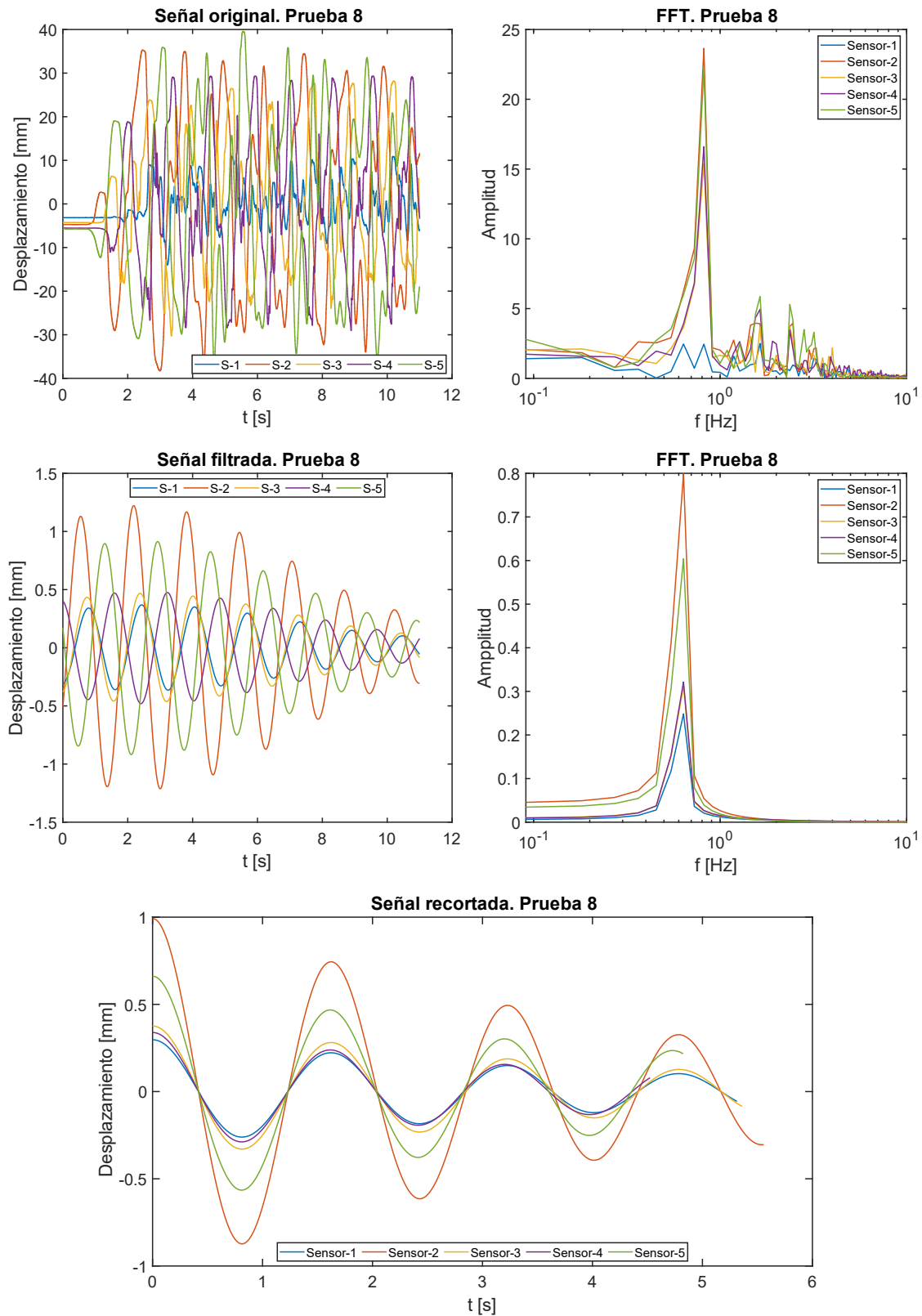


Ilustración 98. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 8, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

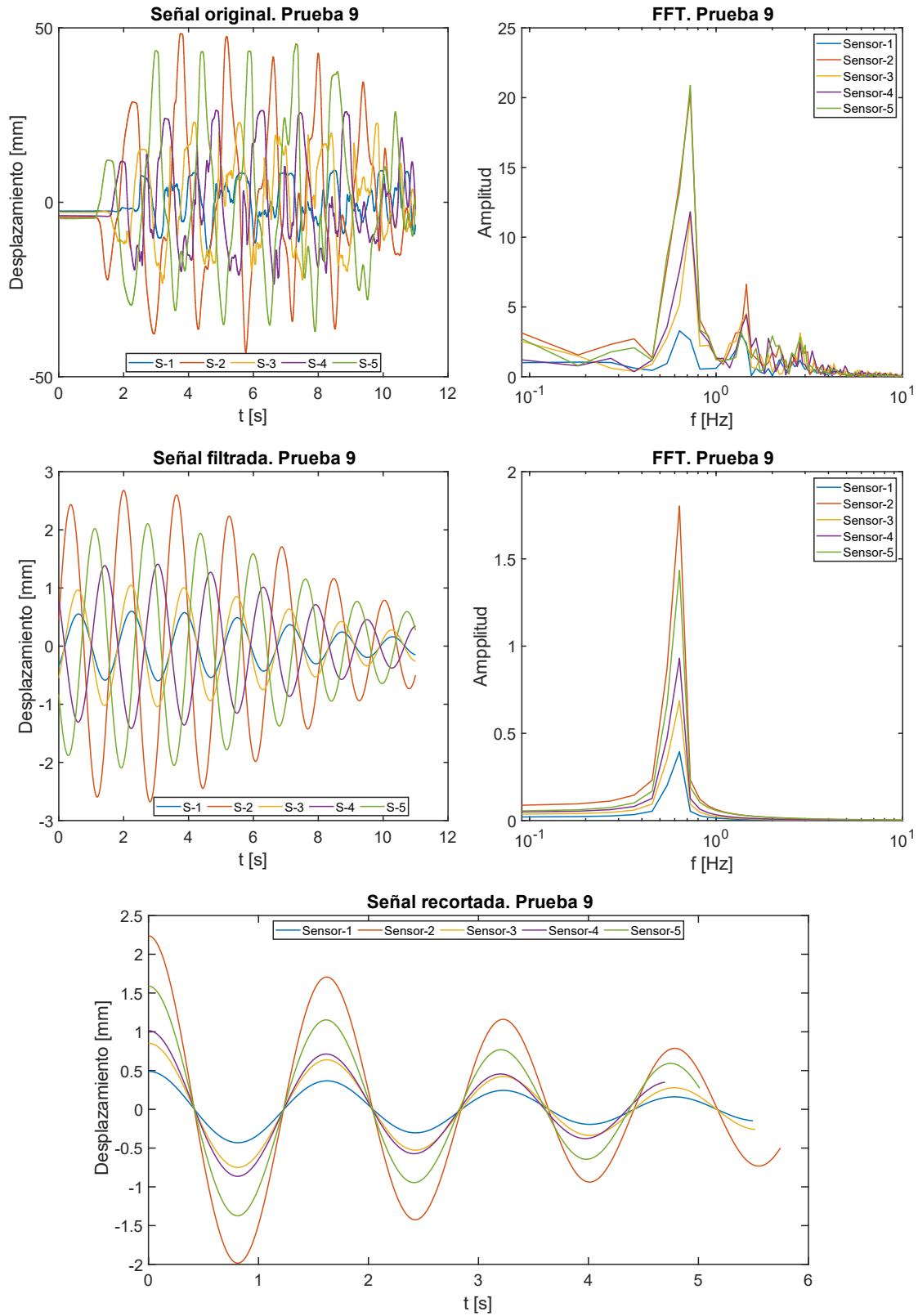


Ilustración 99. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 9, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

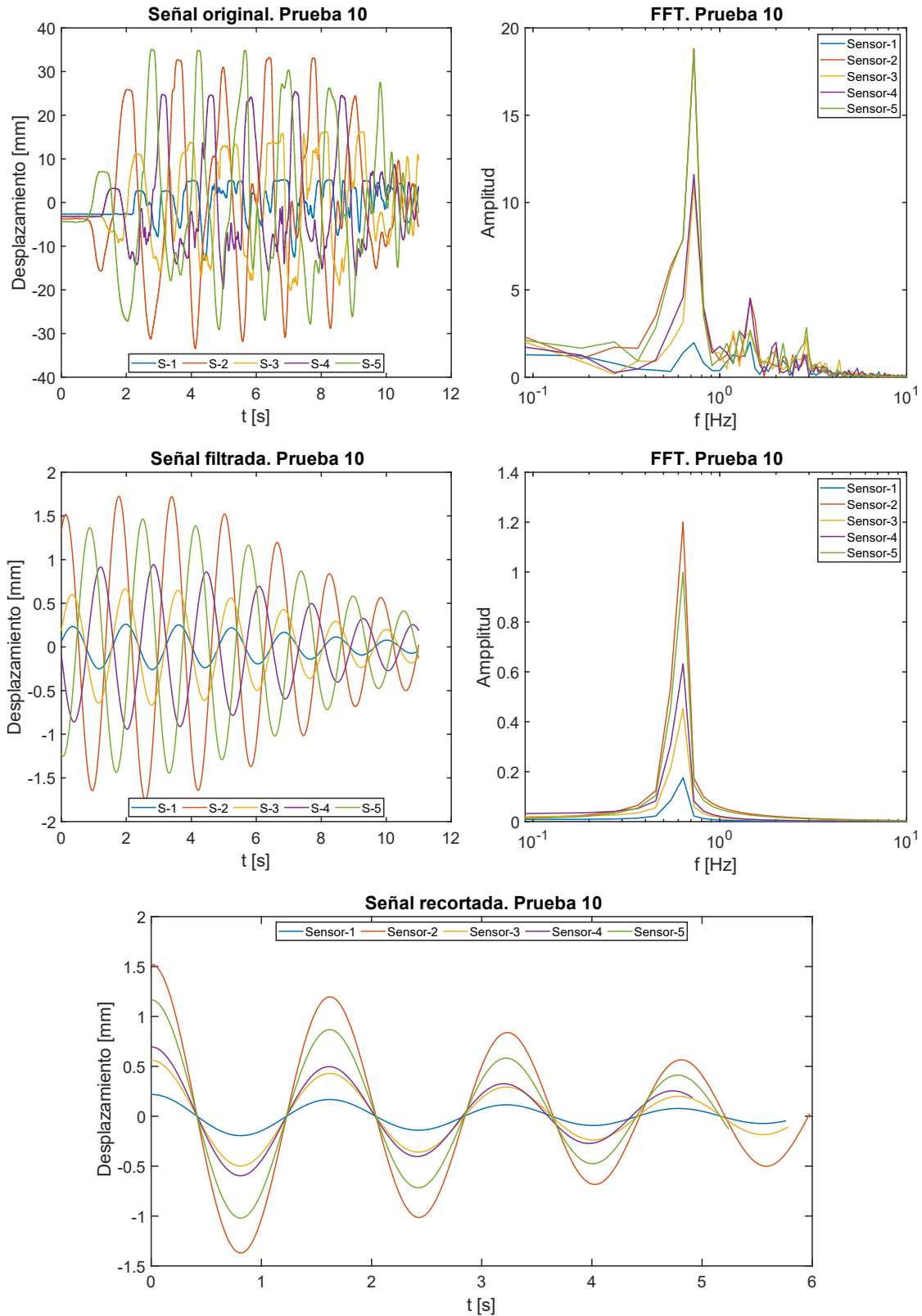


Ilustración 100. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 10, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

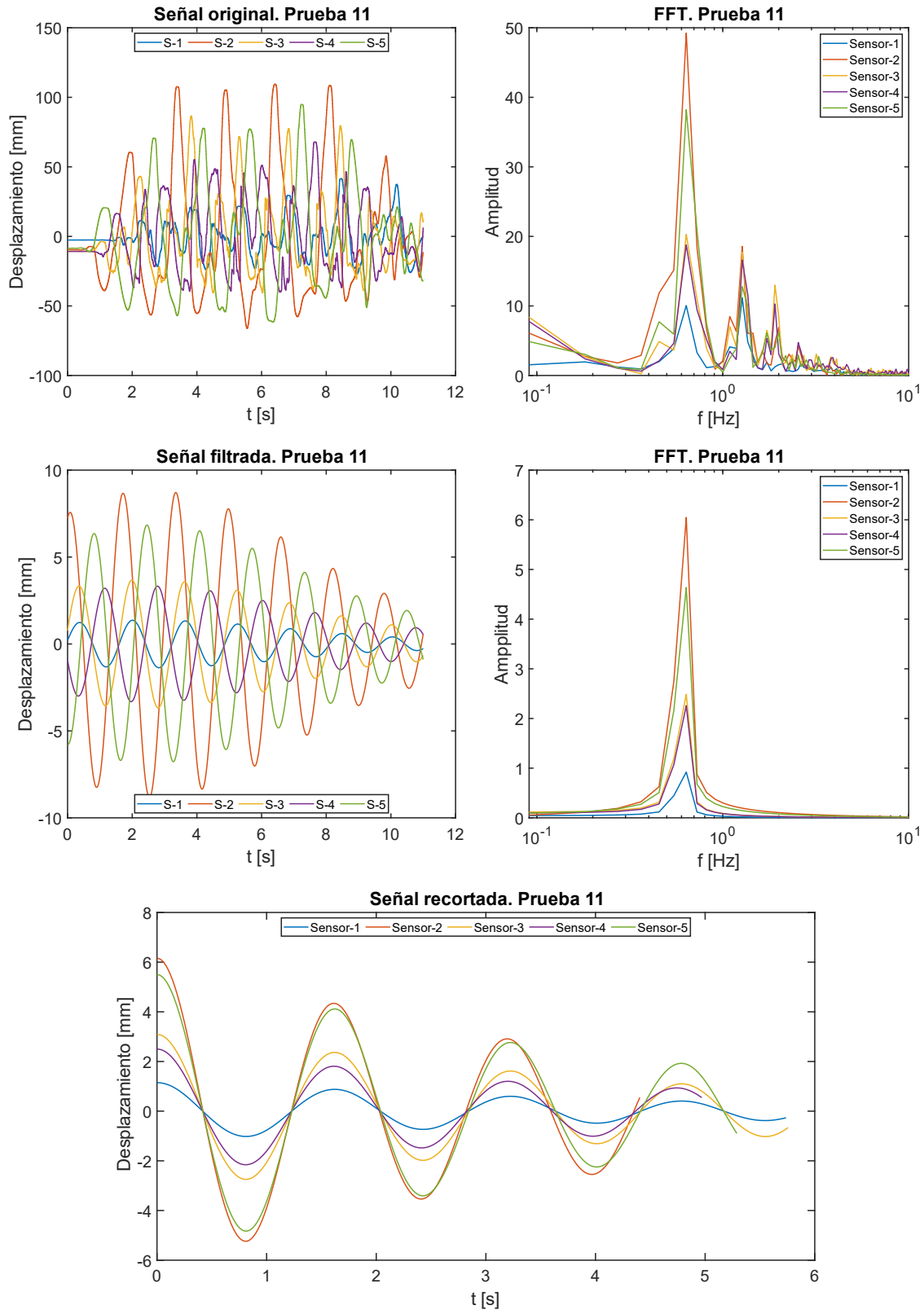


Ilustración 101. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 11, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

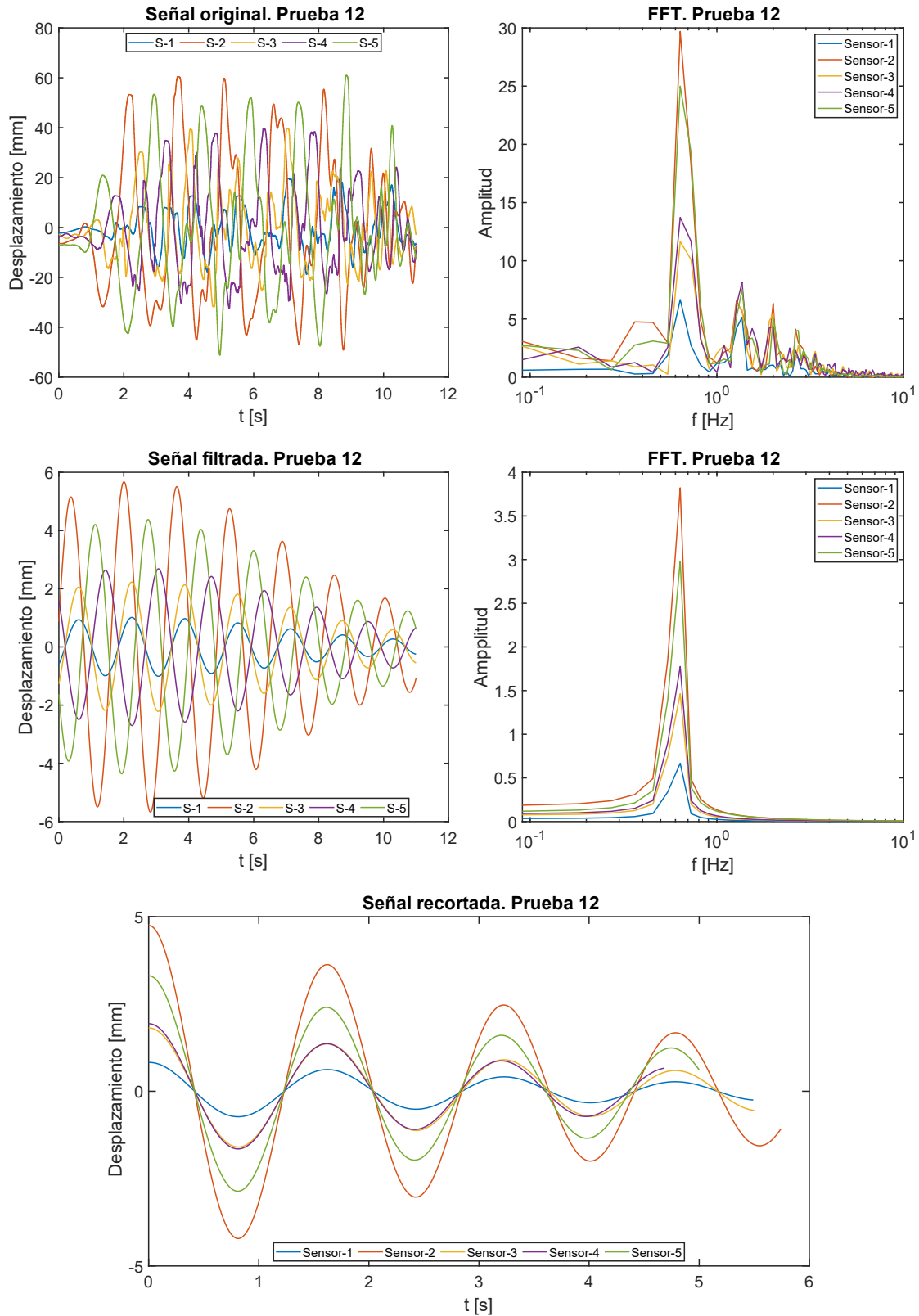


Ilustración 102. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 12, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

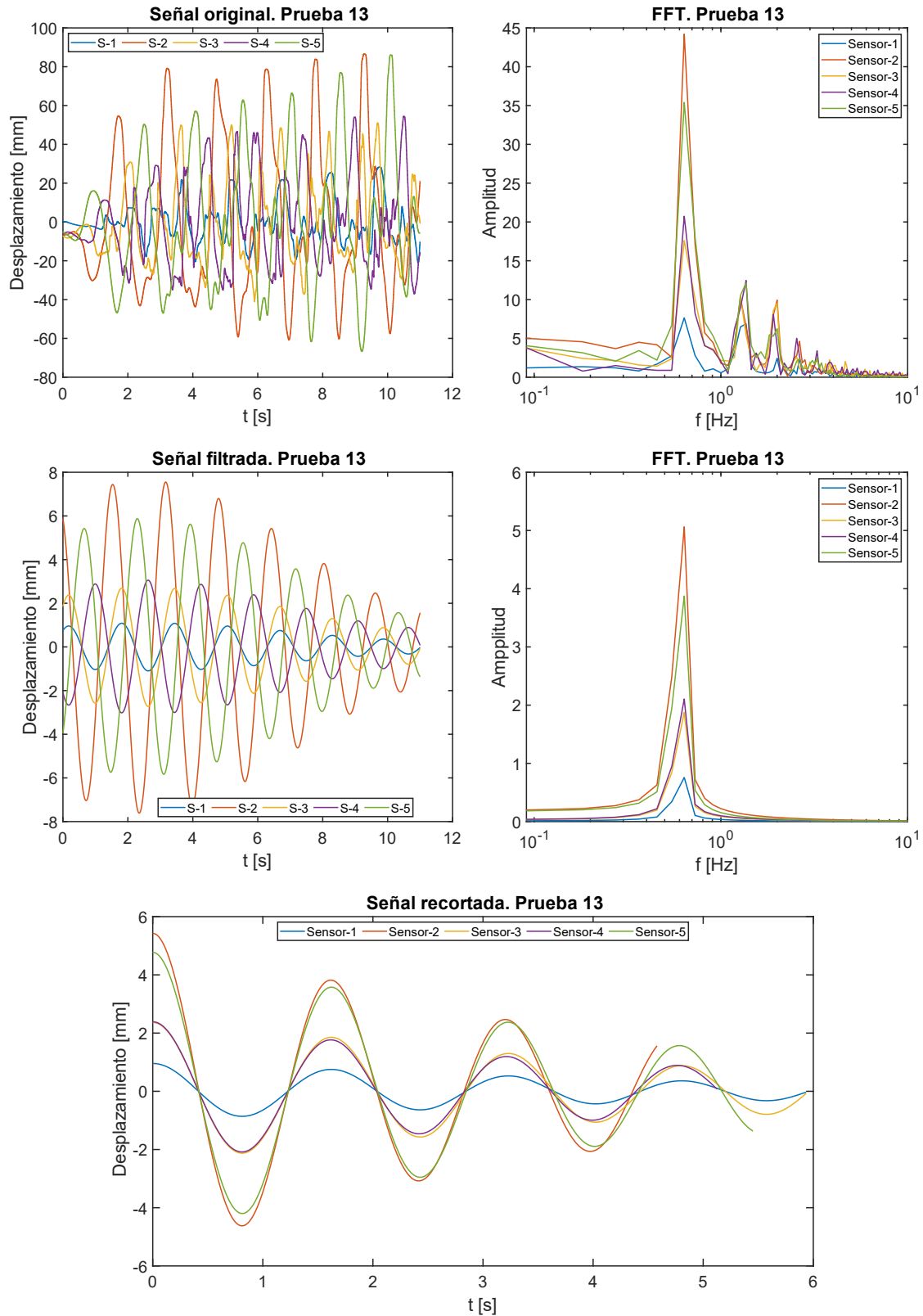


Ilustración 103. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 13, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

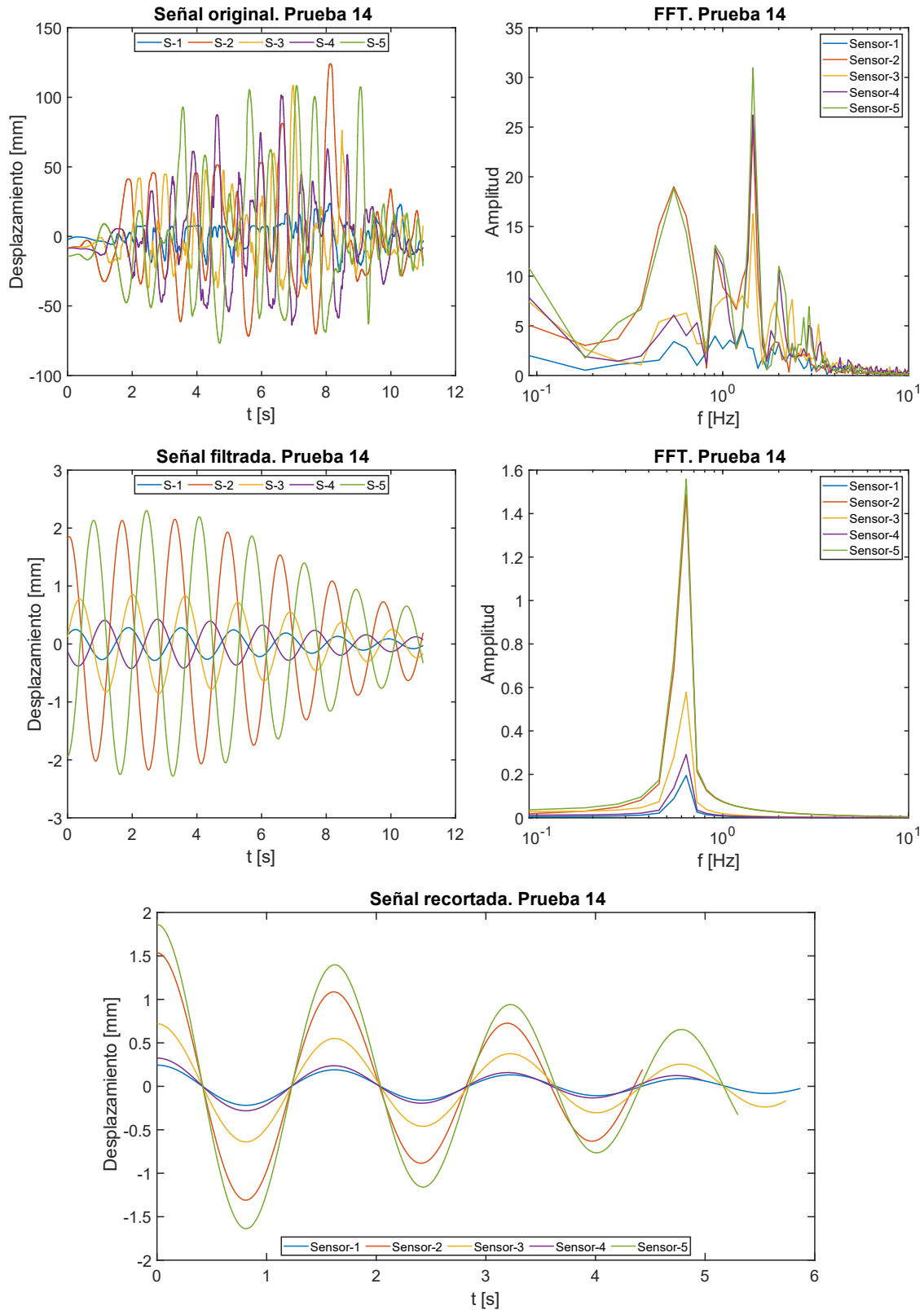


Ilustración 104. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 14, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

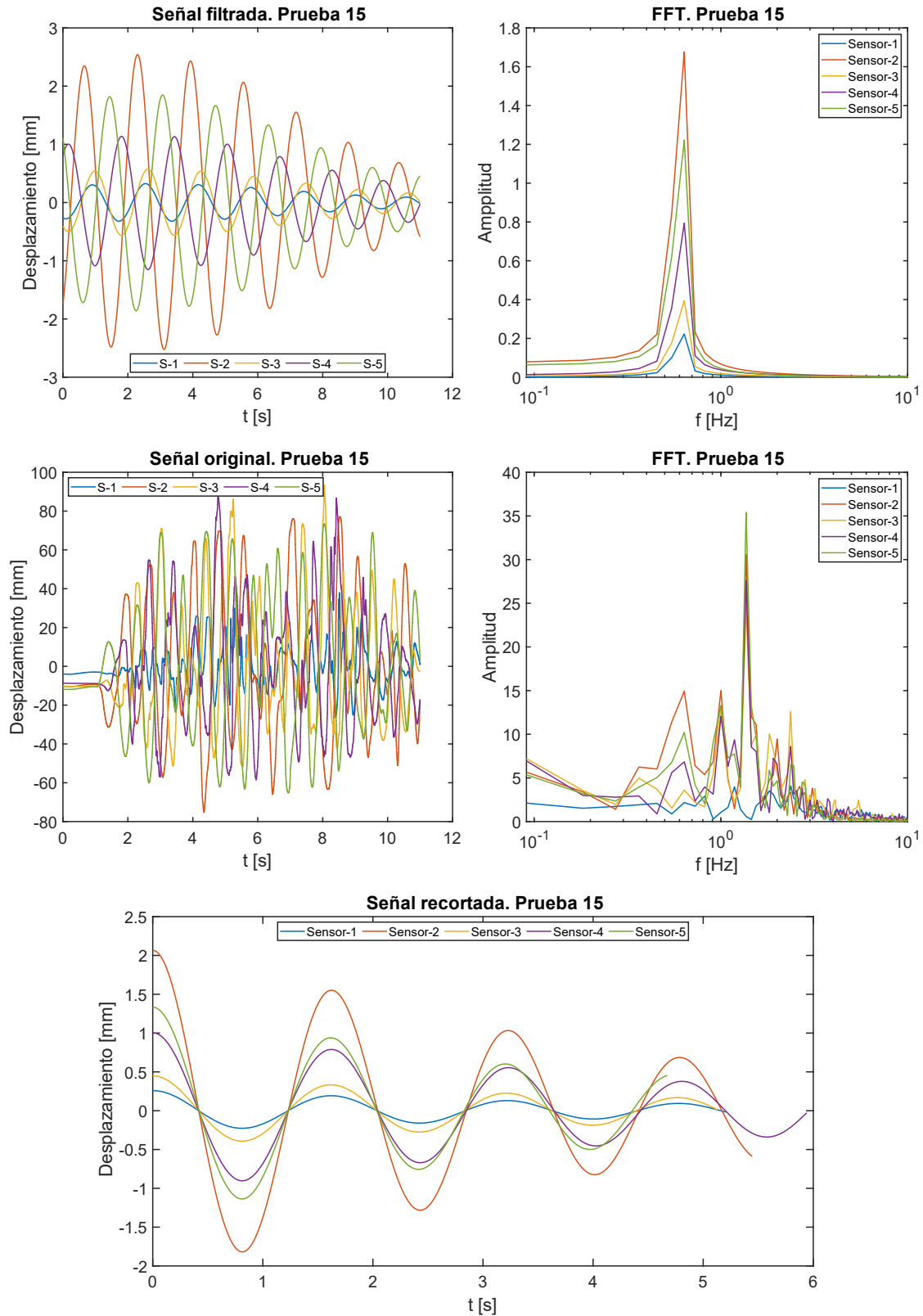


Ilustración 105. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 15, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

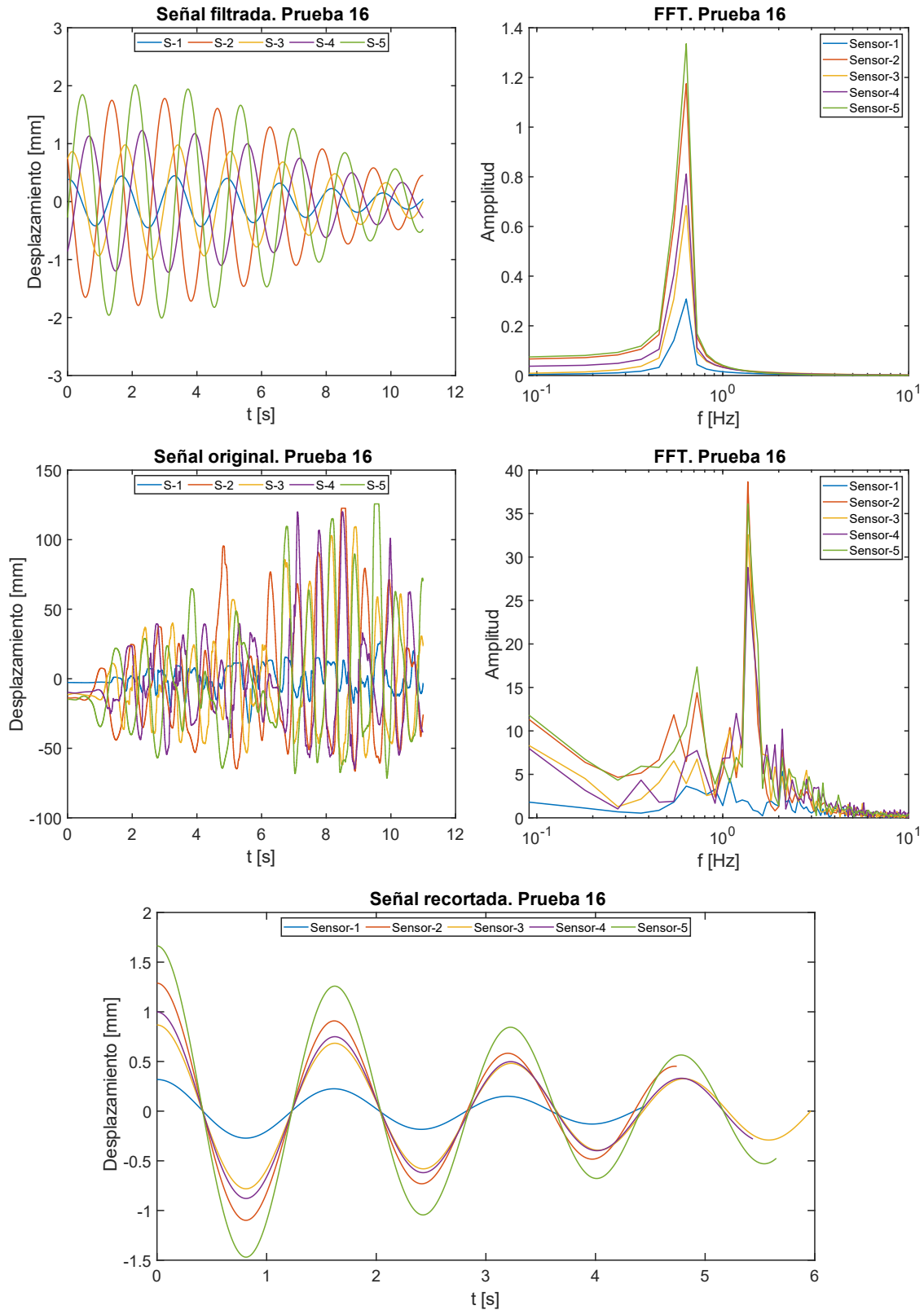


Ilustración 106. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 16, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

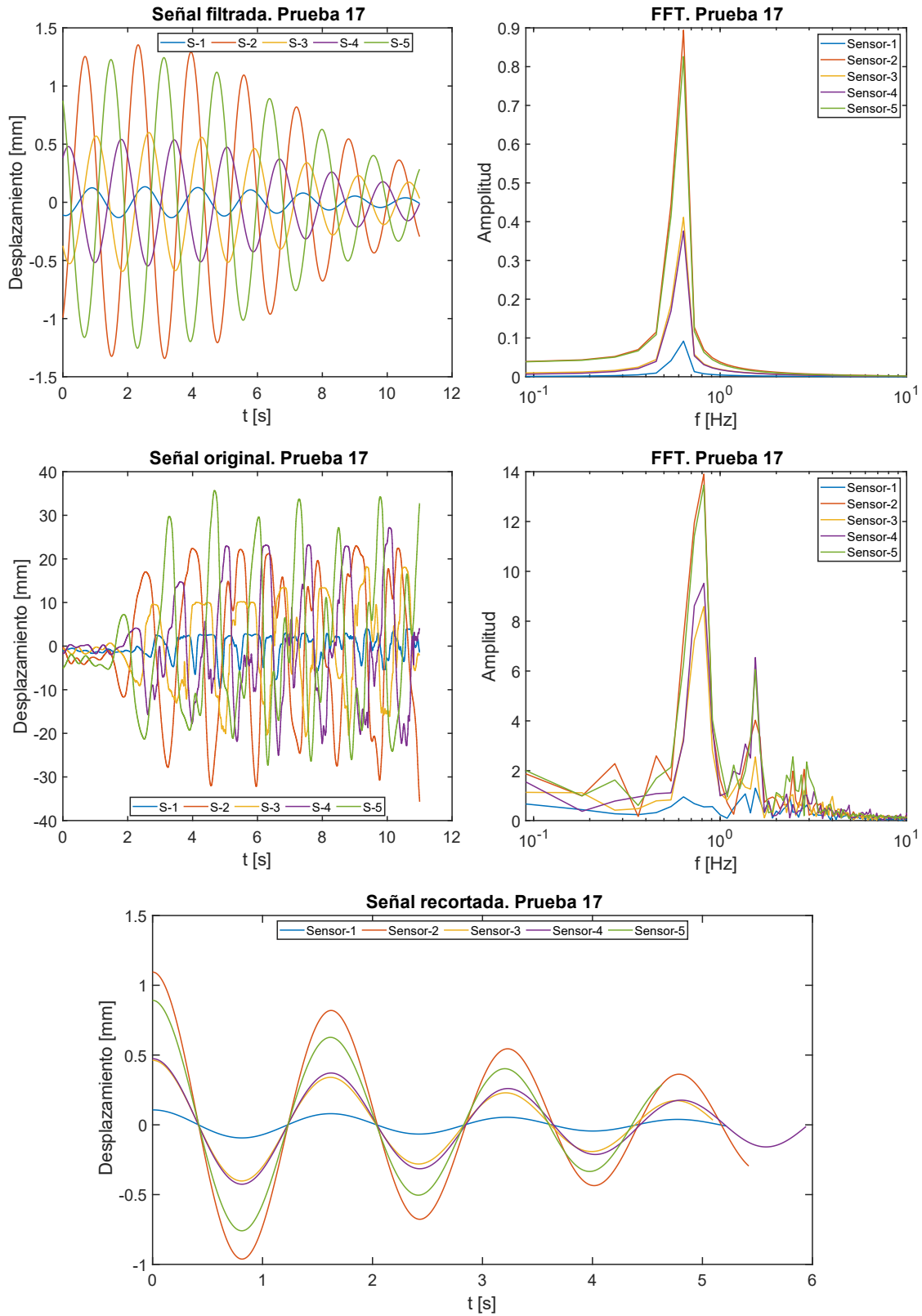


Ilustración 107. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 17, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

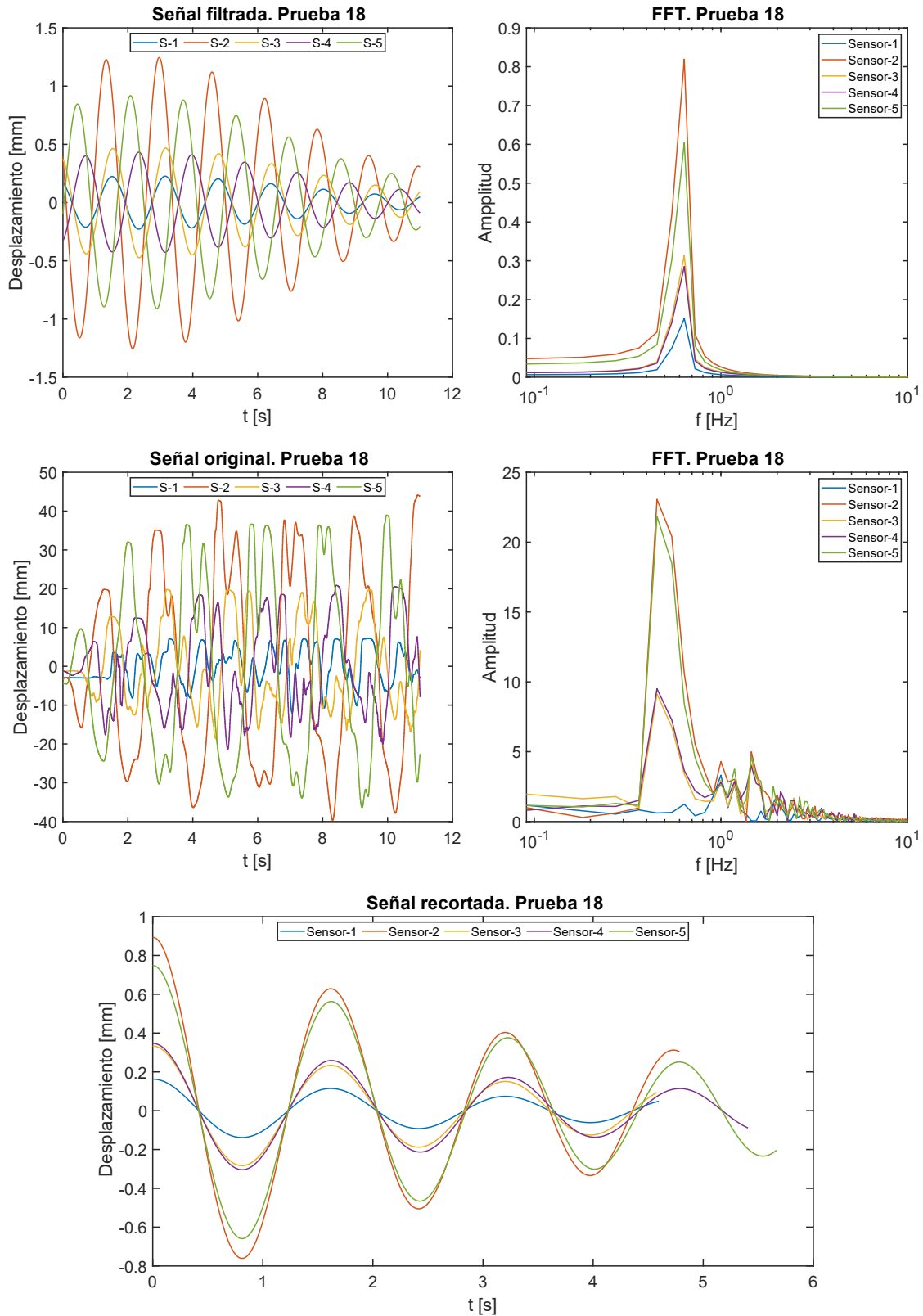


Ilustración 108. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 18, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

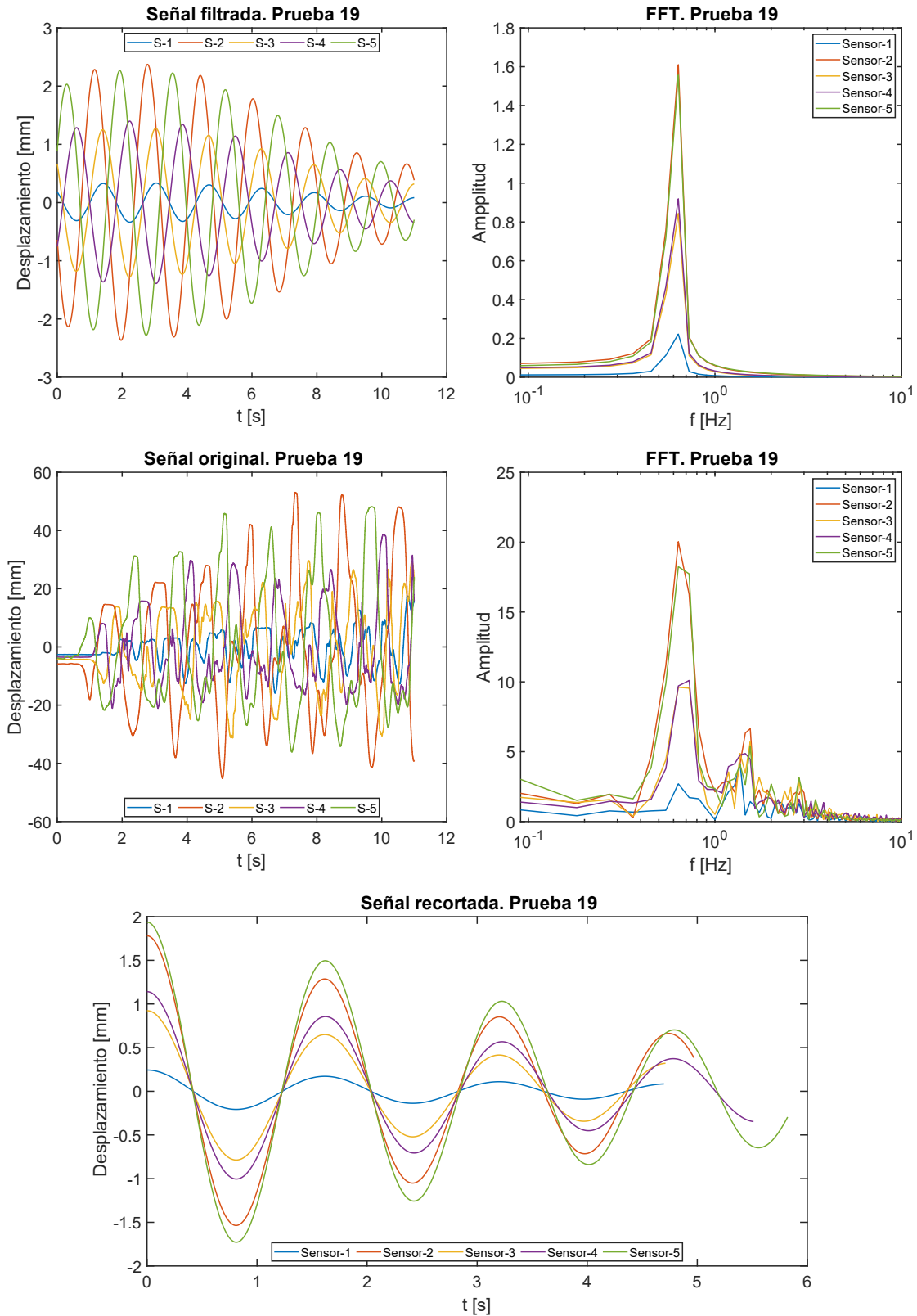


Ilustración 109. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 19, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

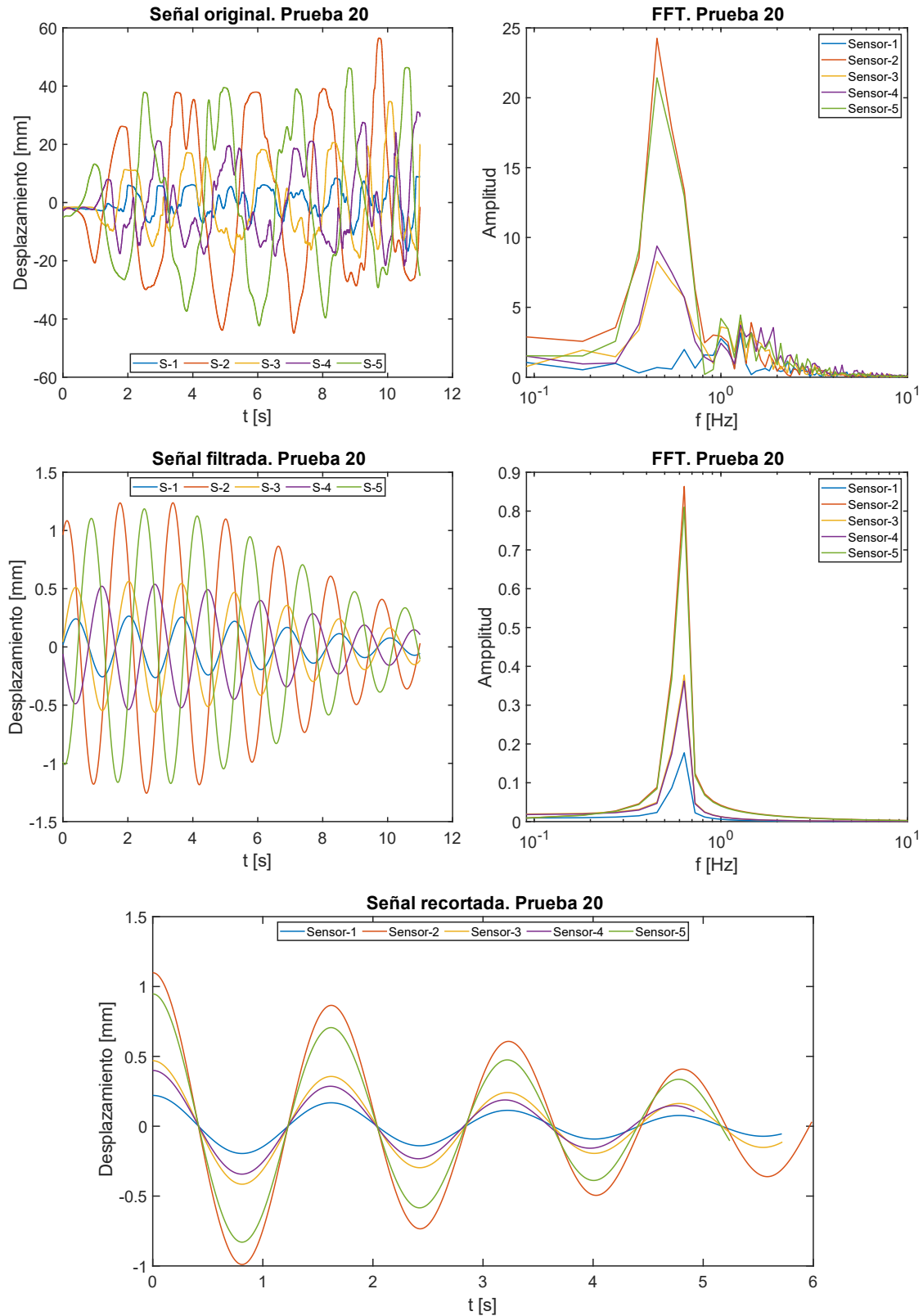


Ilustración 110. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 20, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

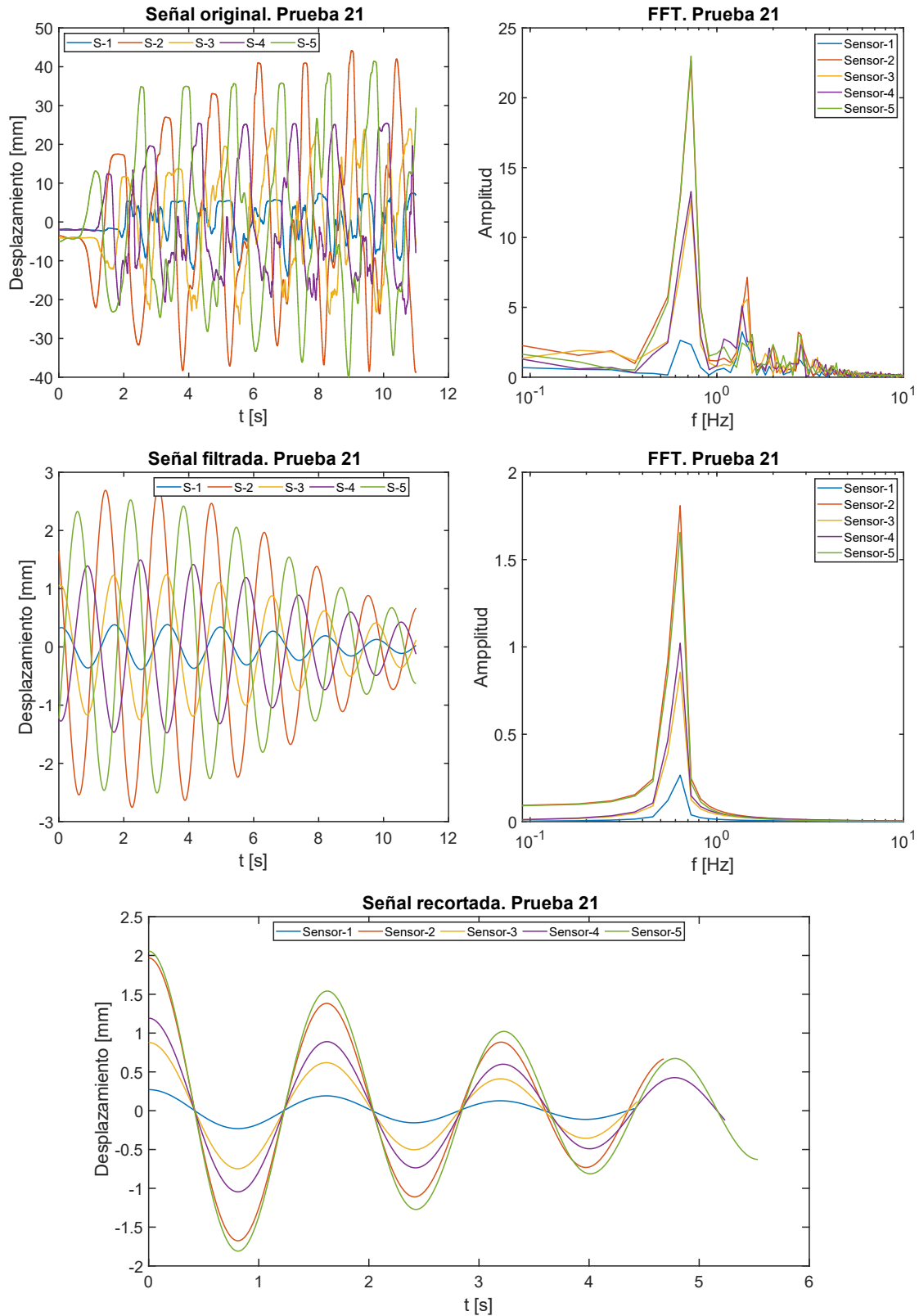


Ilustración 111. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 21, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

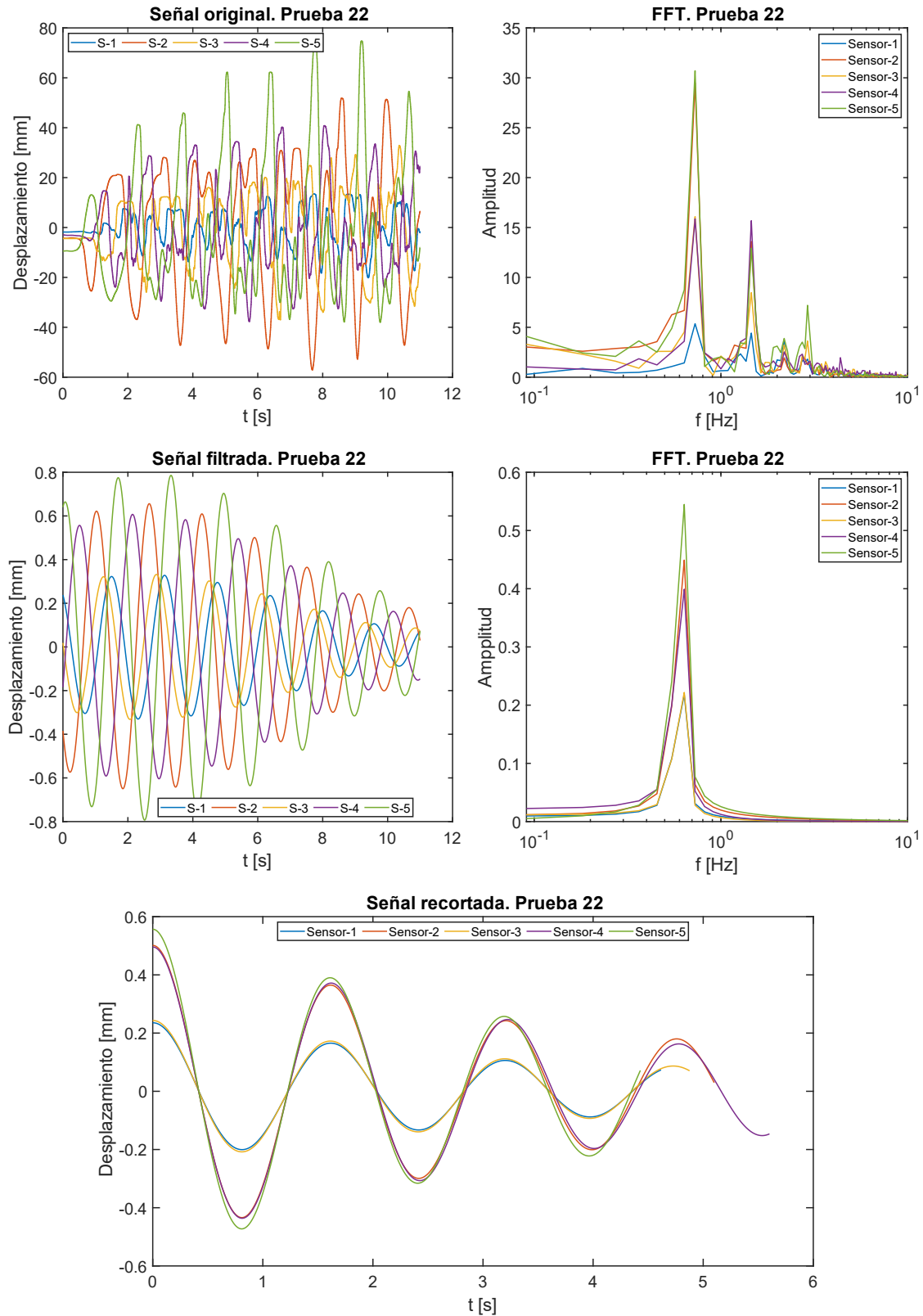


Ilustración 112. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 22, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

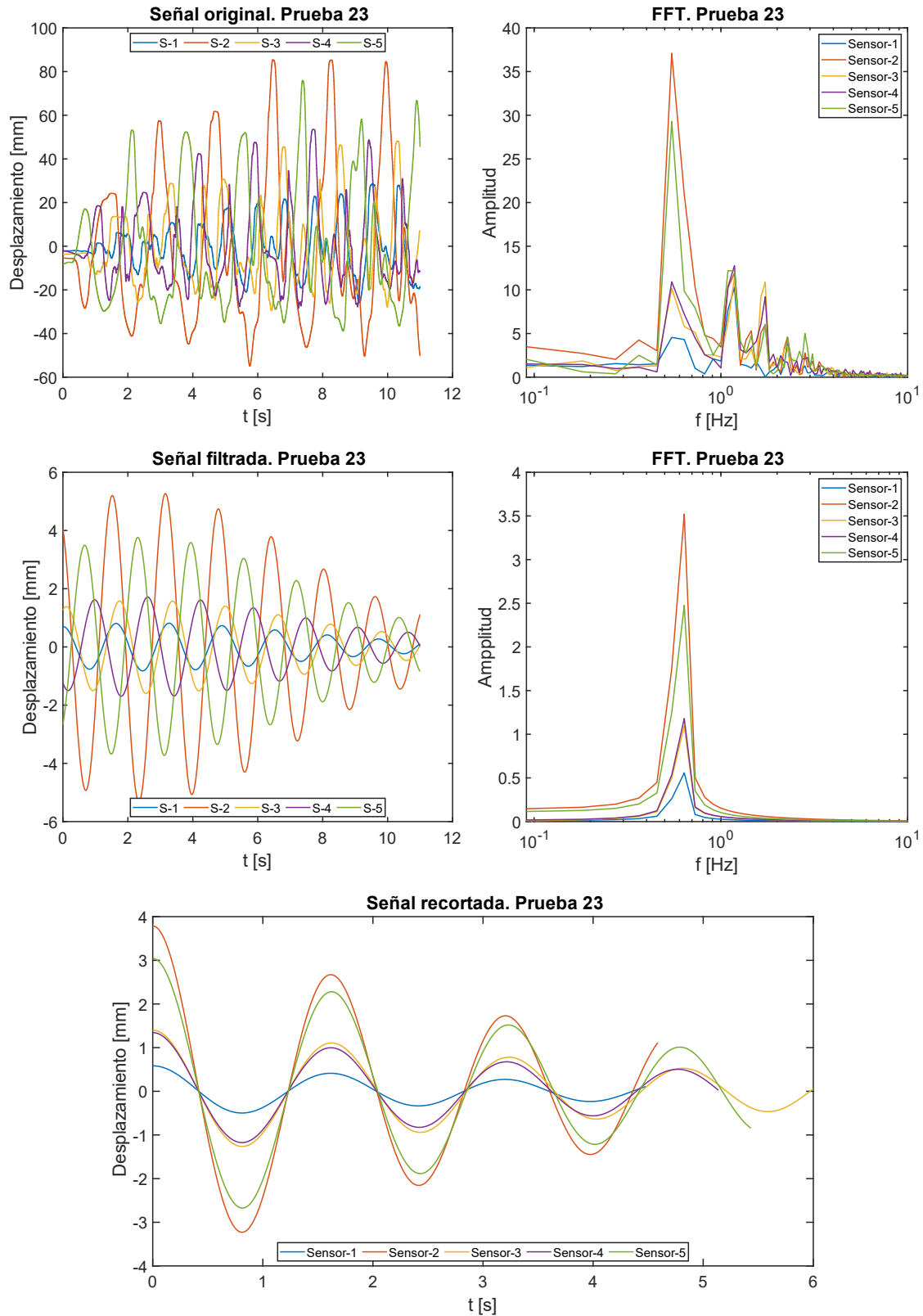


Ilustración 113. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 23, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

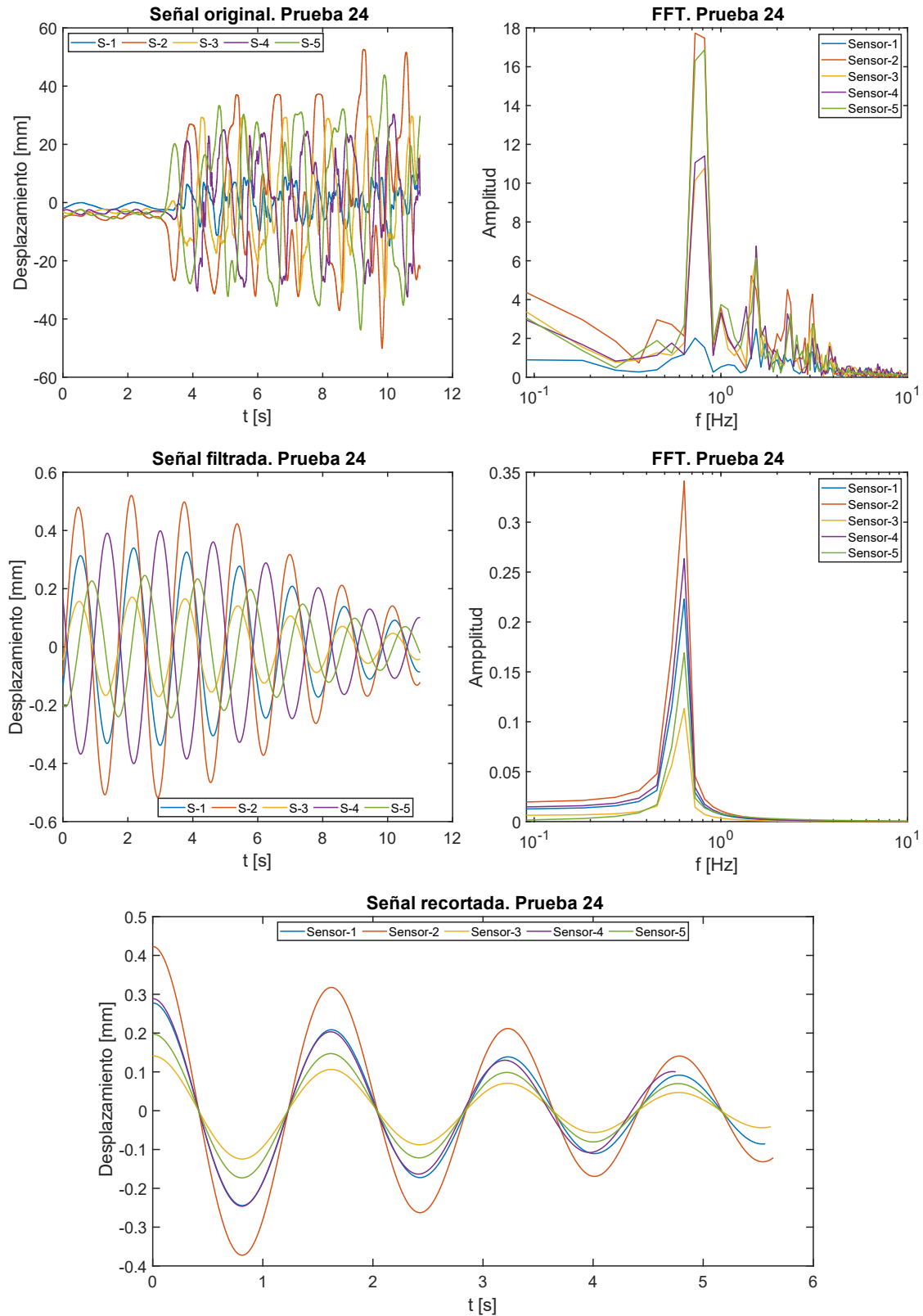


Ilustración 114. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 24, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

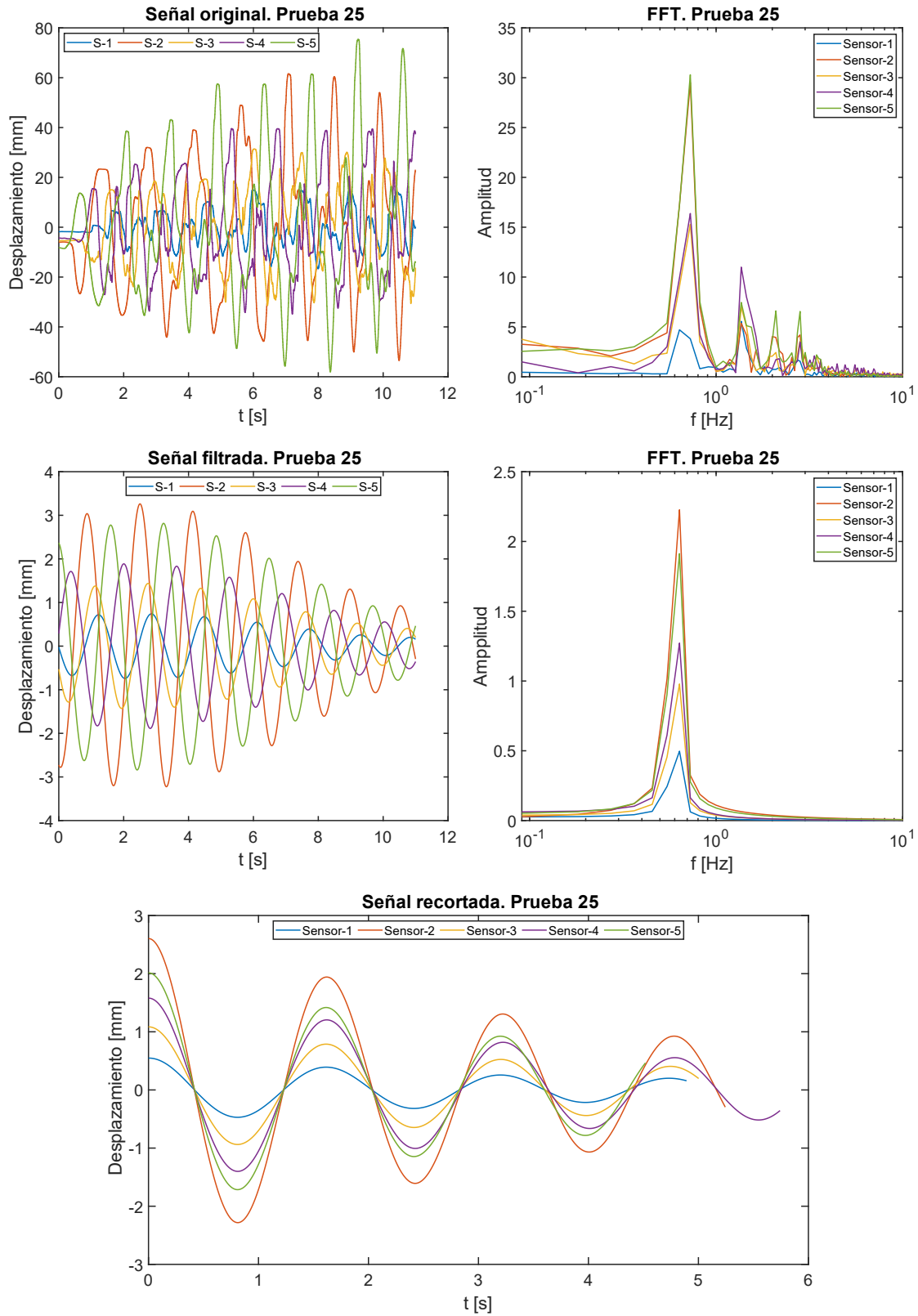


Ilustración 115. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 25, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

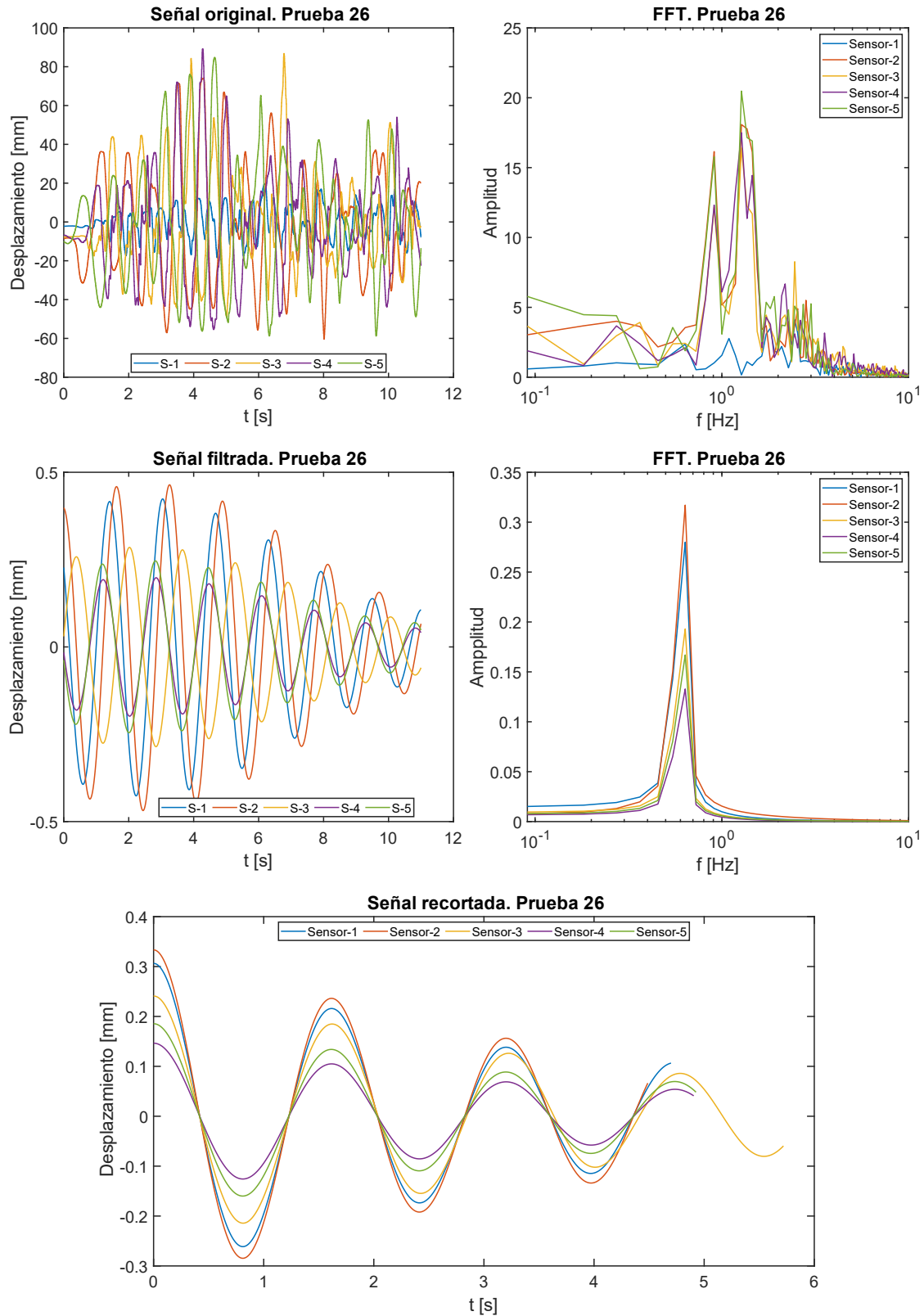


Ilustración 116. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 26, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

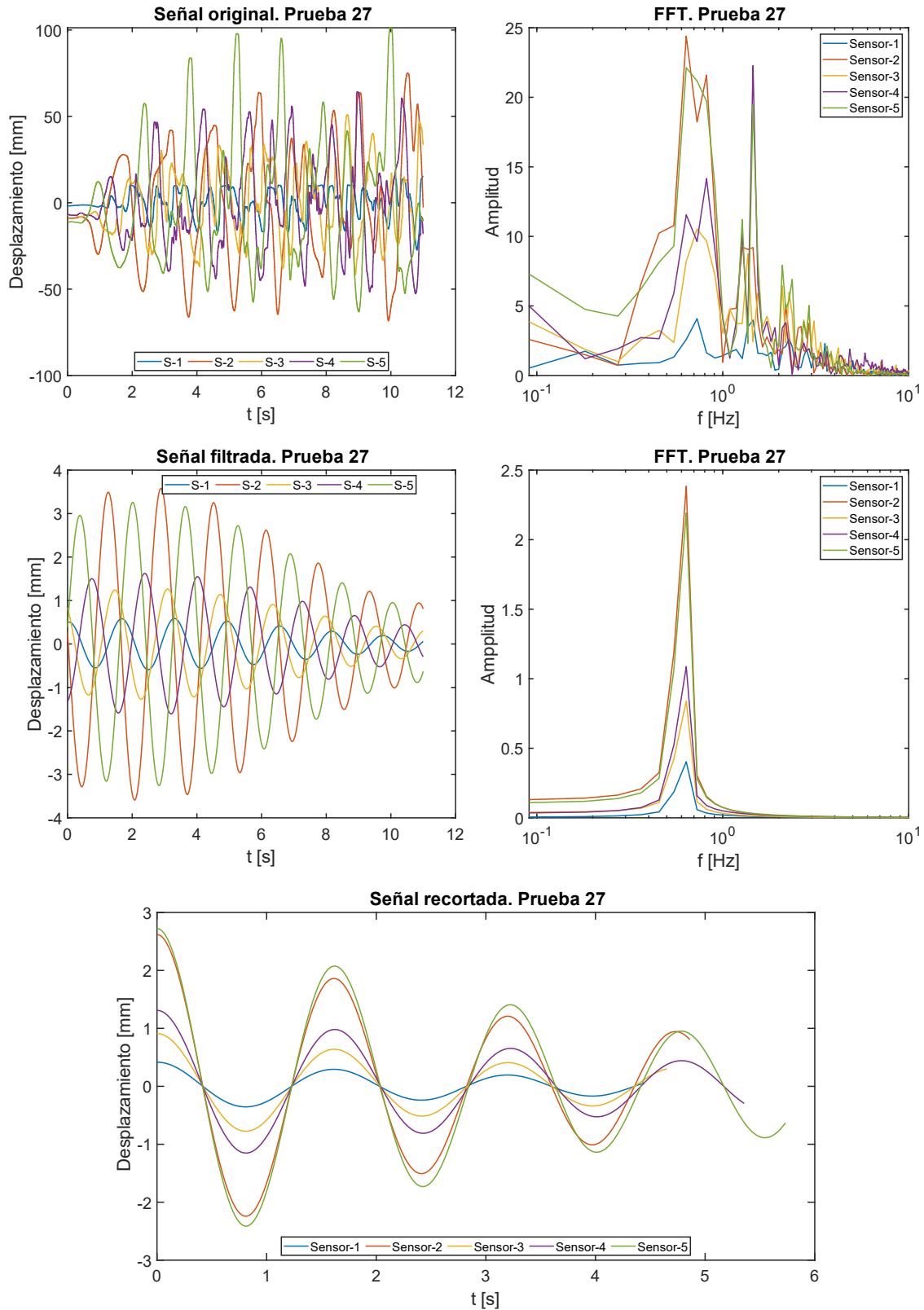


Ilustración 117. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 27, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

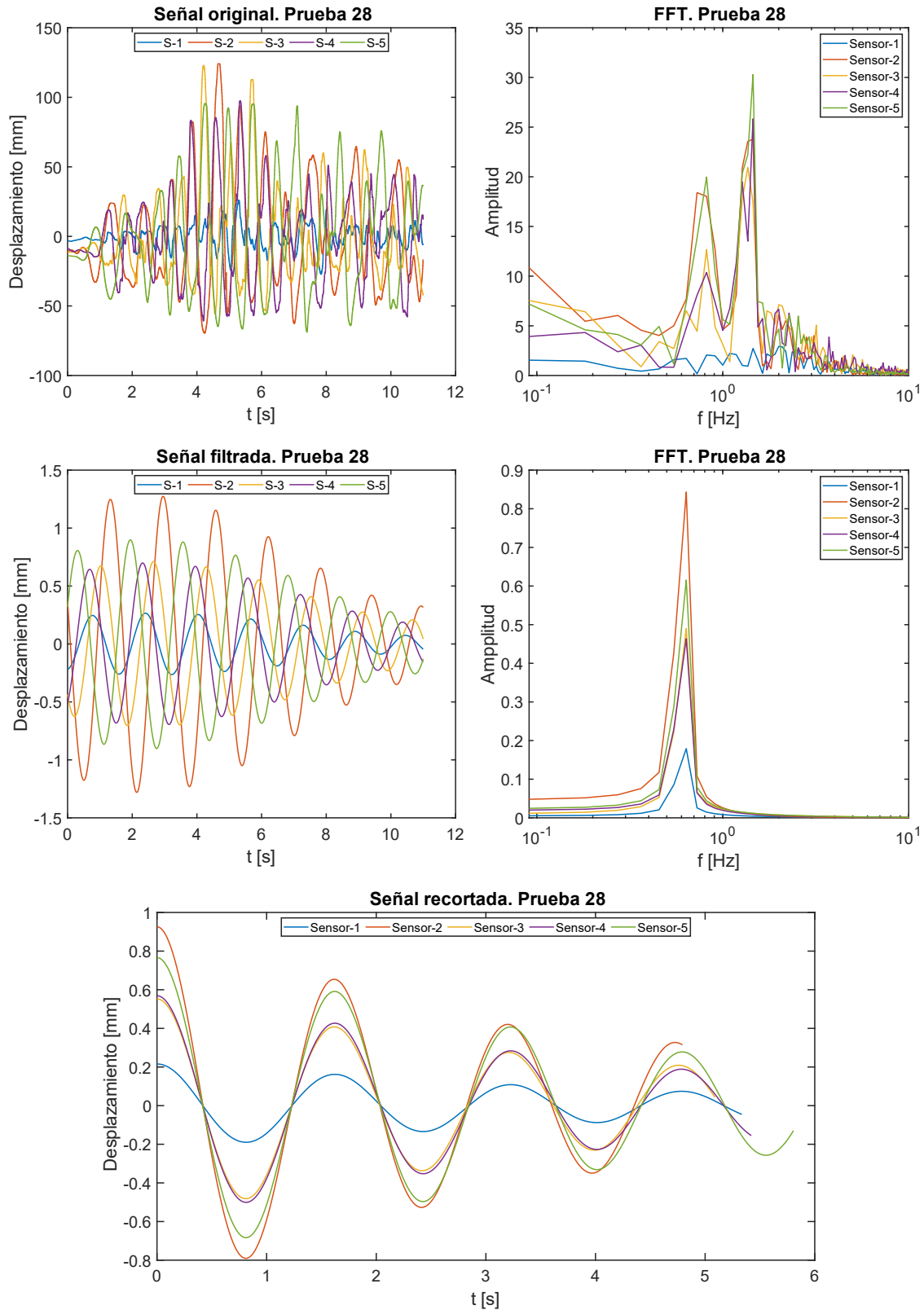


Ilustración 118. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 28, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

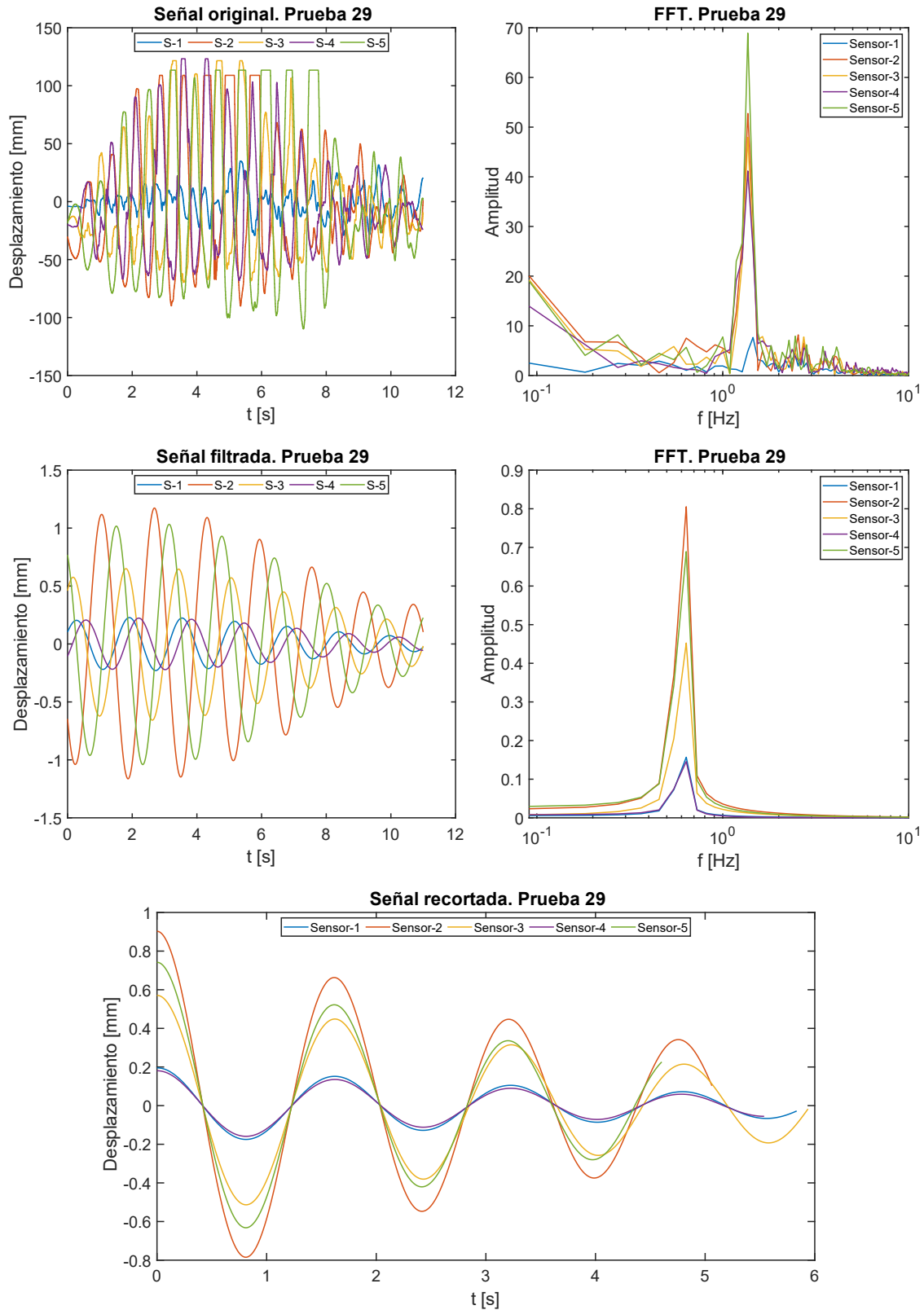


Ilustración 119. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 29, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

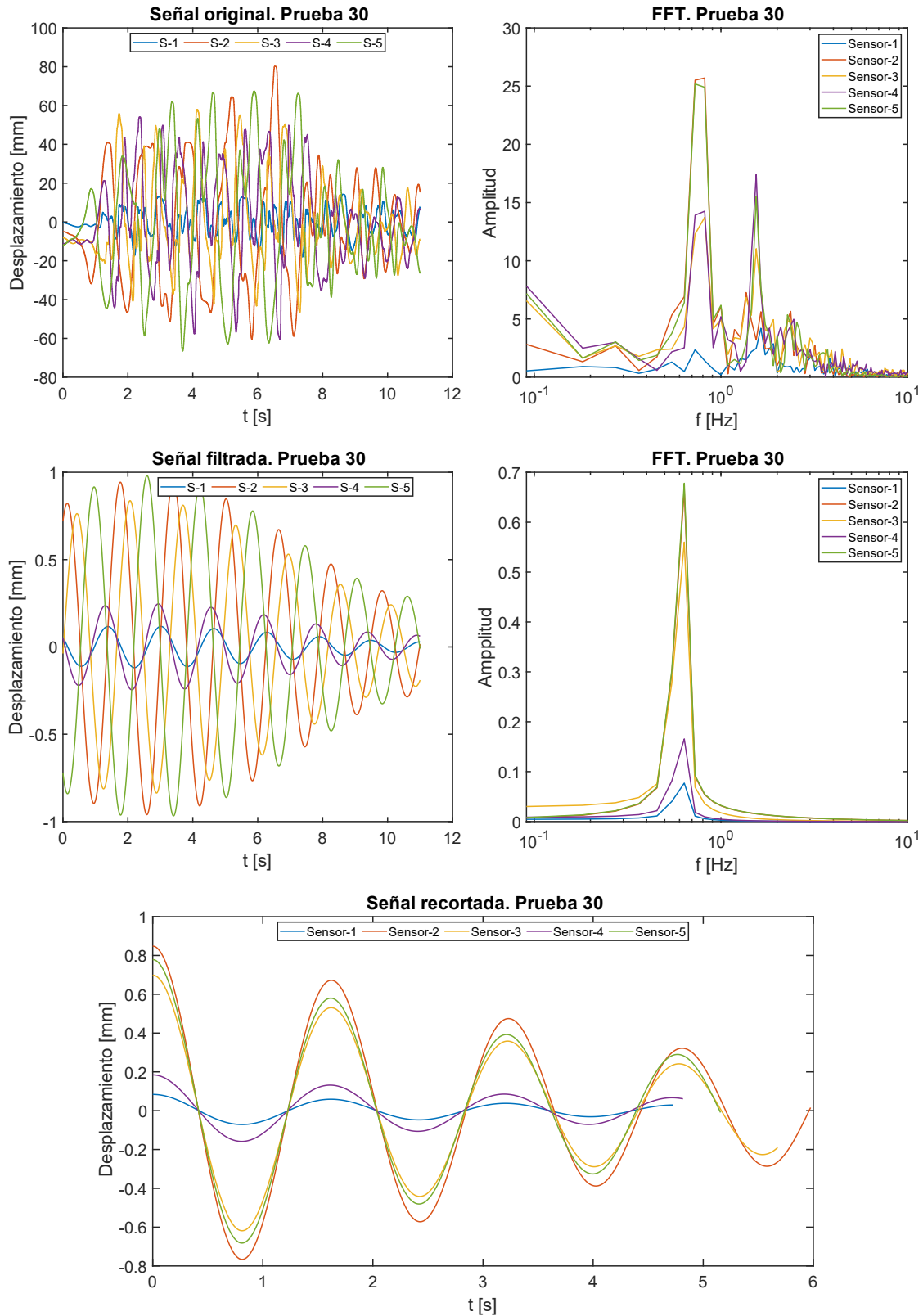


Ilustración 120. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 30, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

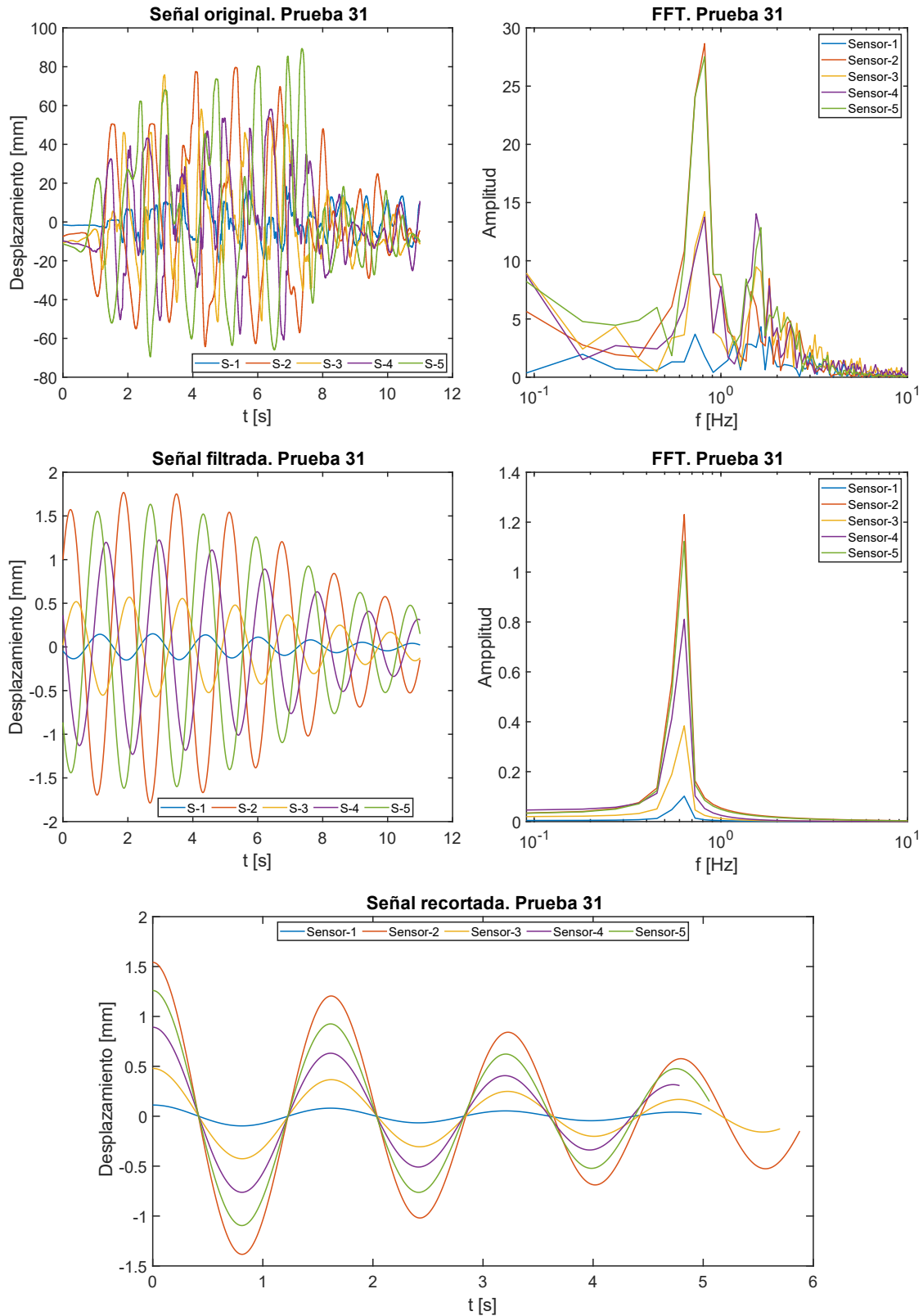


Ilustración 121. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 31, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

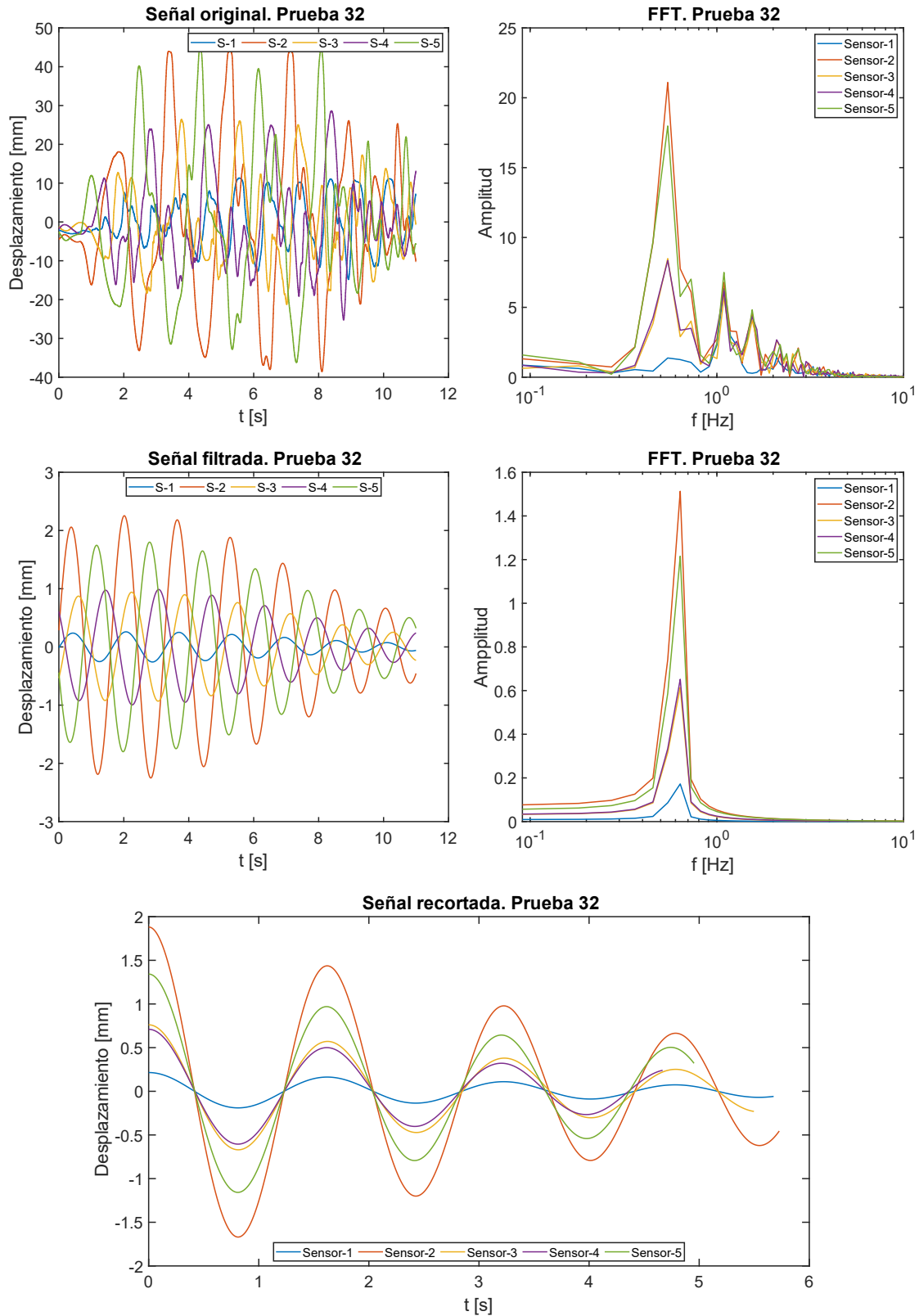


Ilustración 122. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 32, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

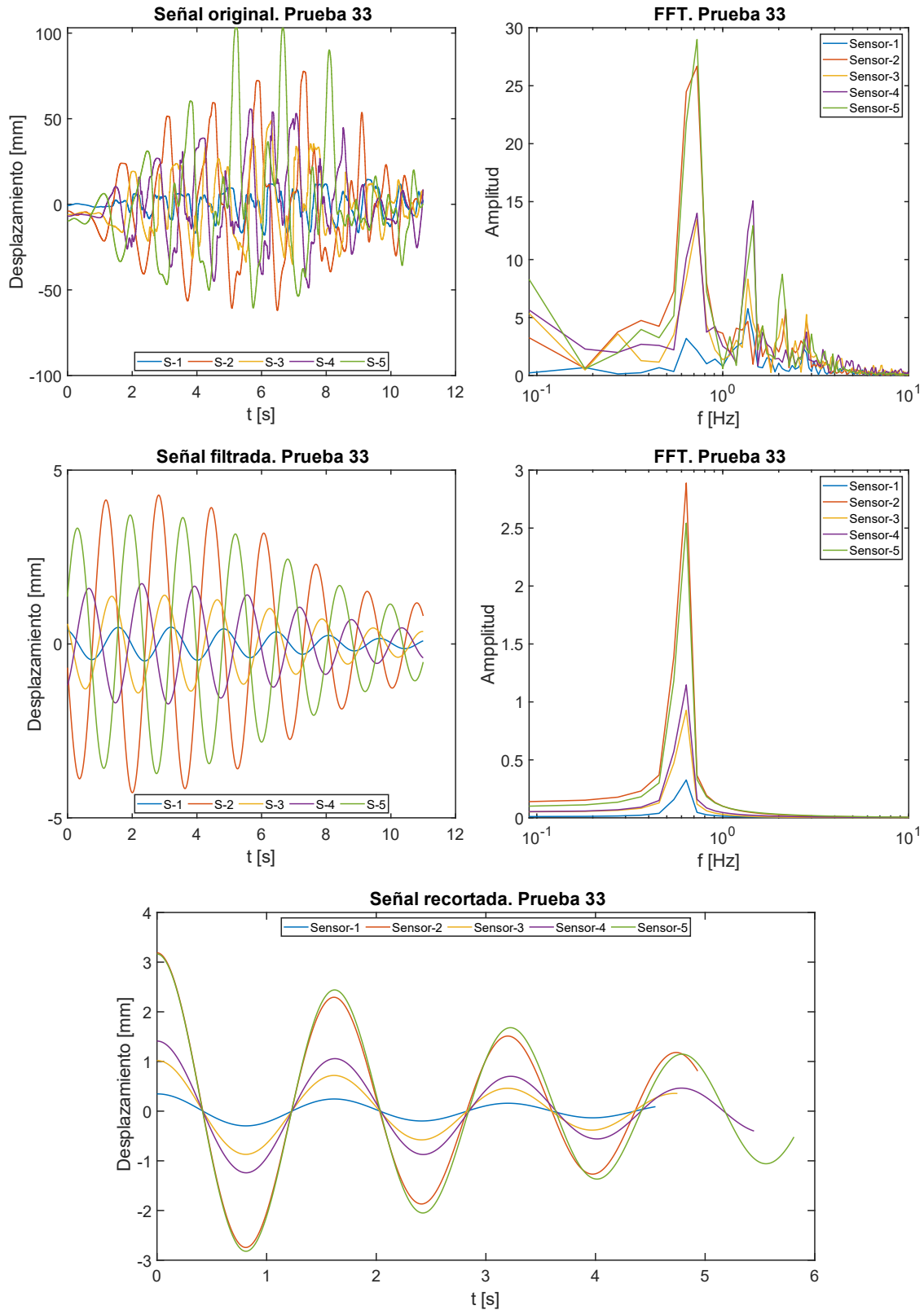


Ilustración 123. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 33, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

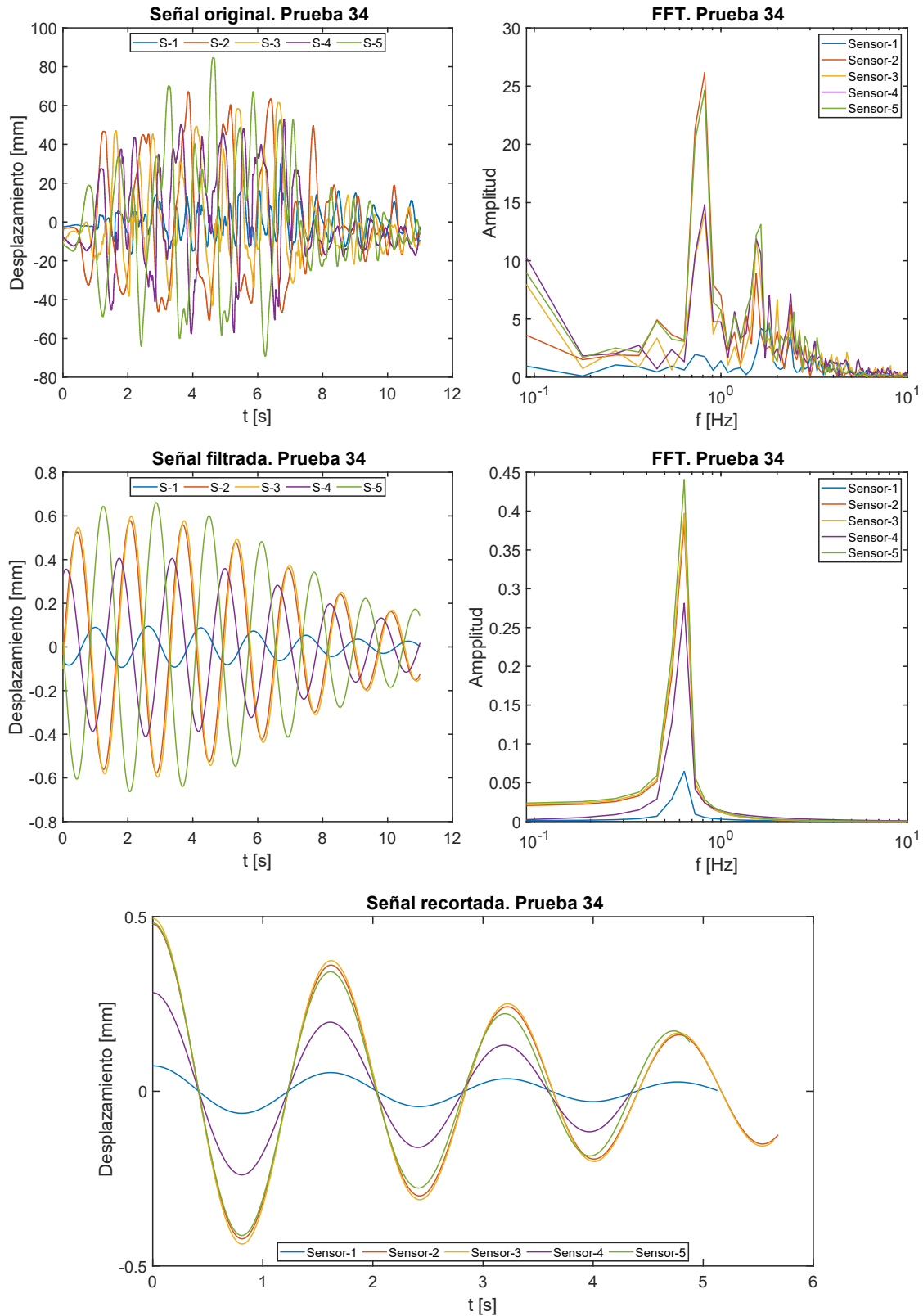


Ilustración 124. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 34, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

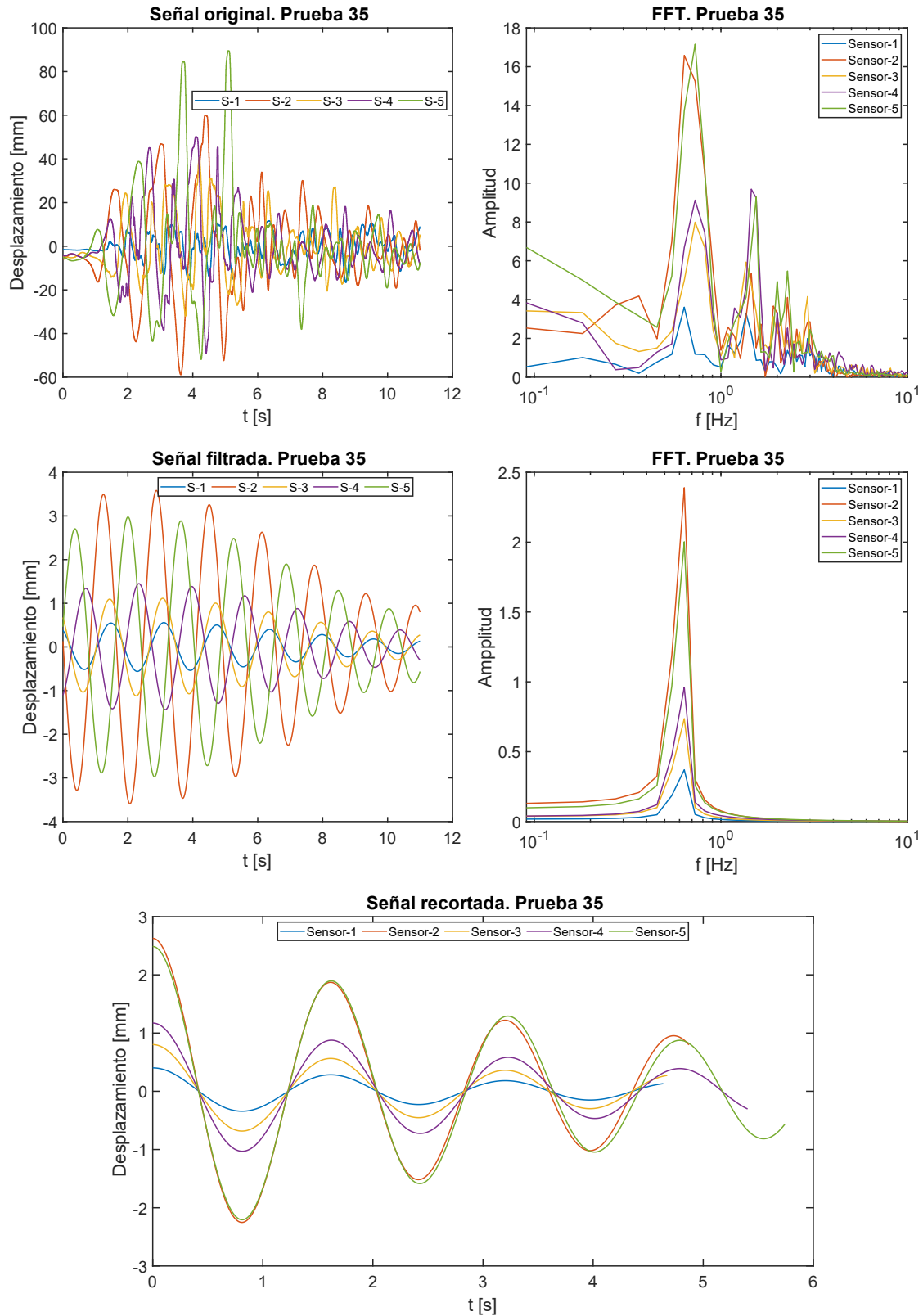


Ilustración 125. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 35, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

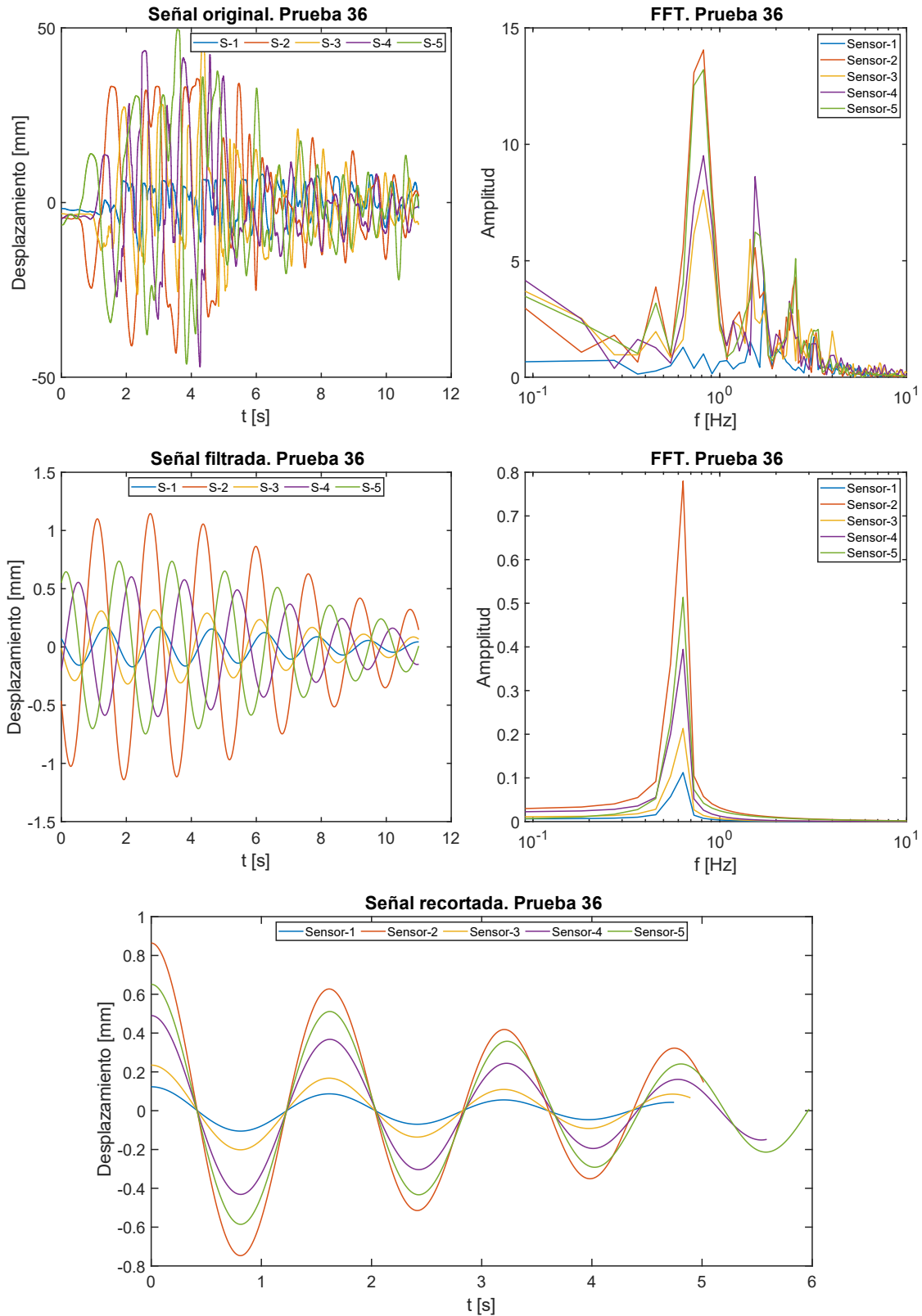


Ilustración 126. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 36, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

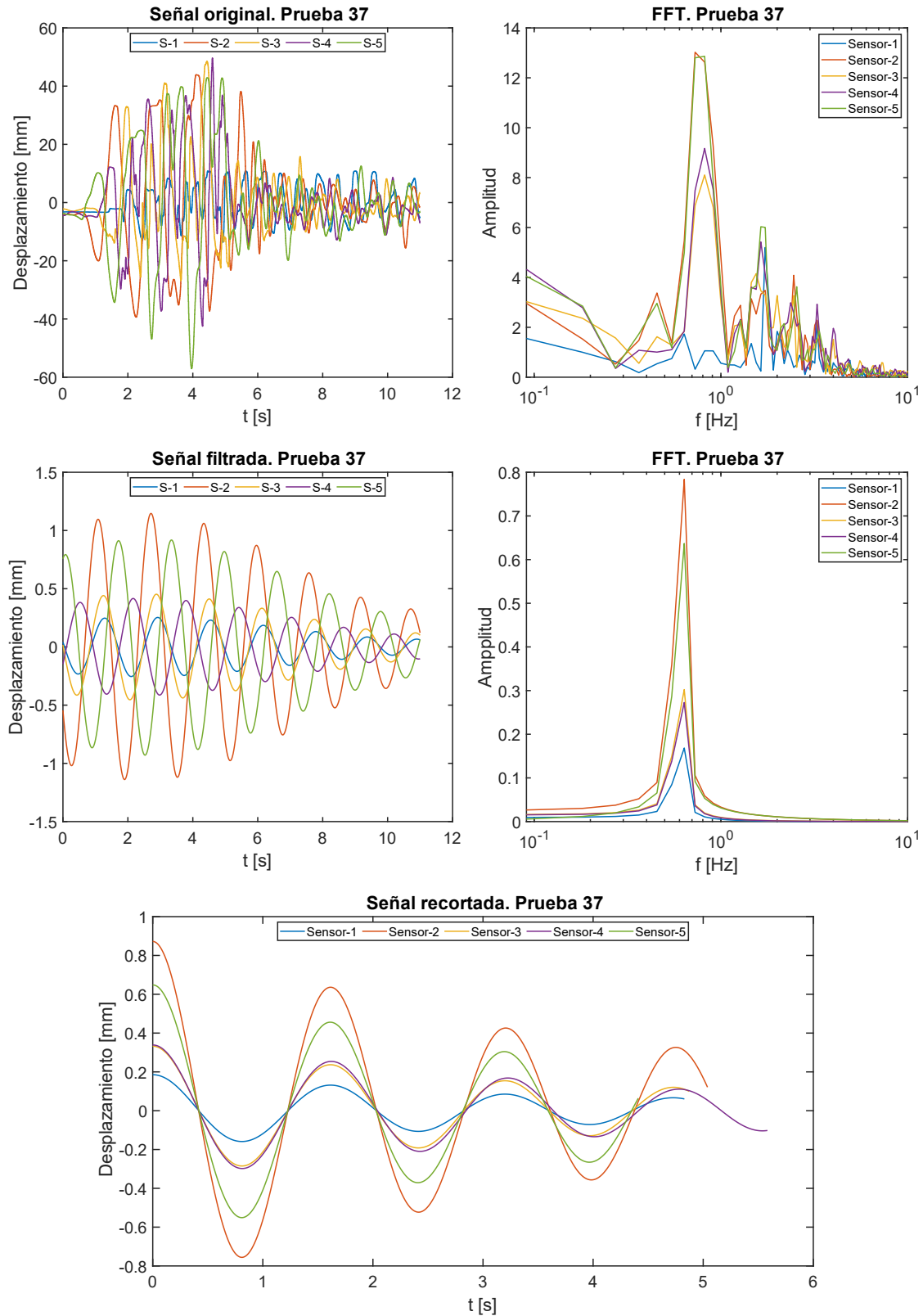


Ilustración 127. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 37, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

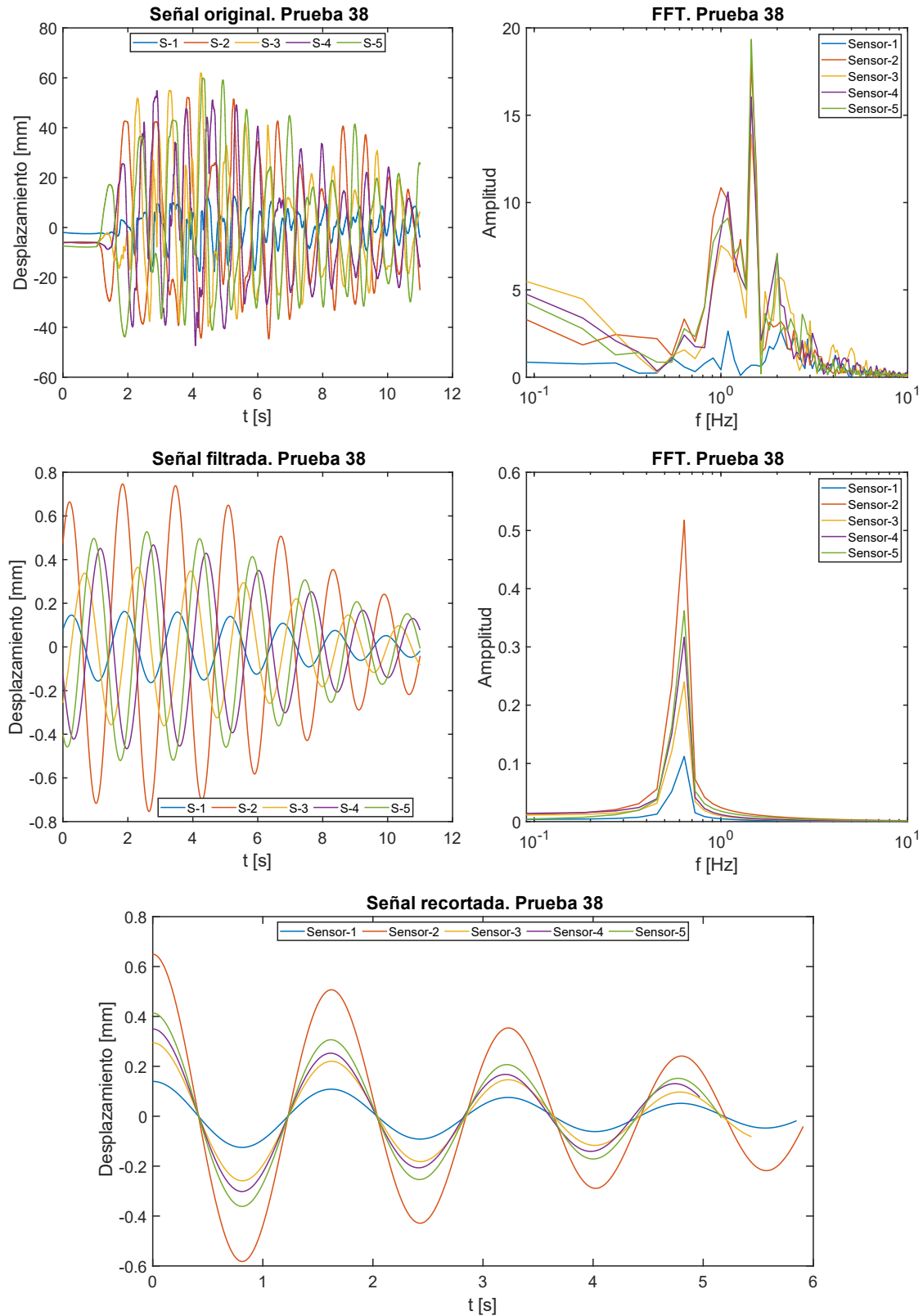


Ilustración 128. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 38, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

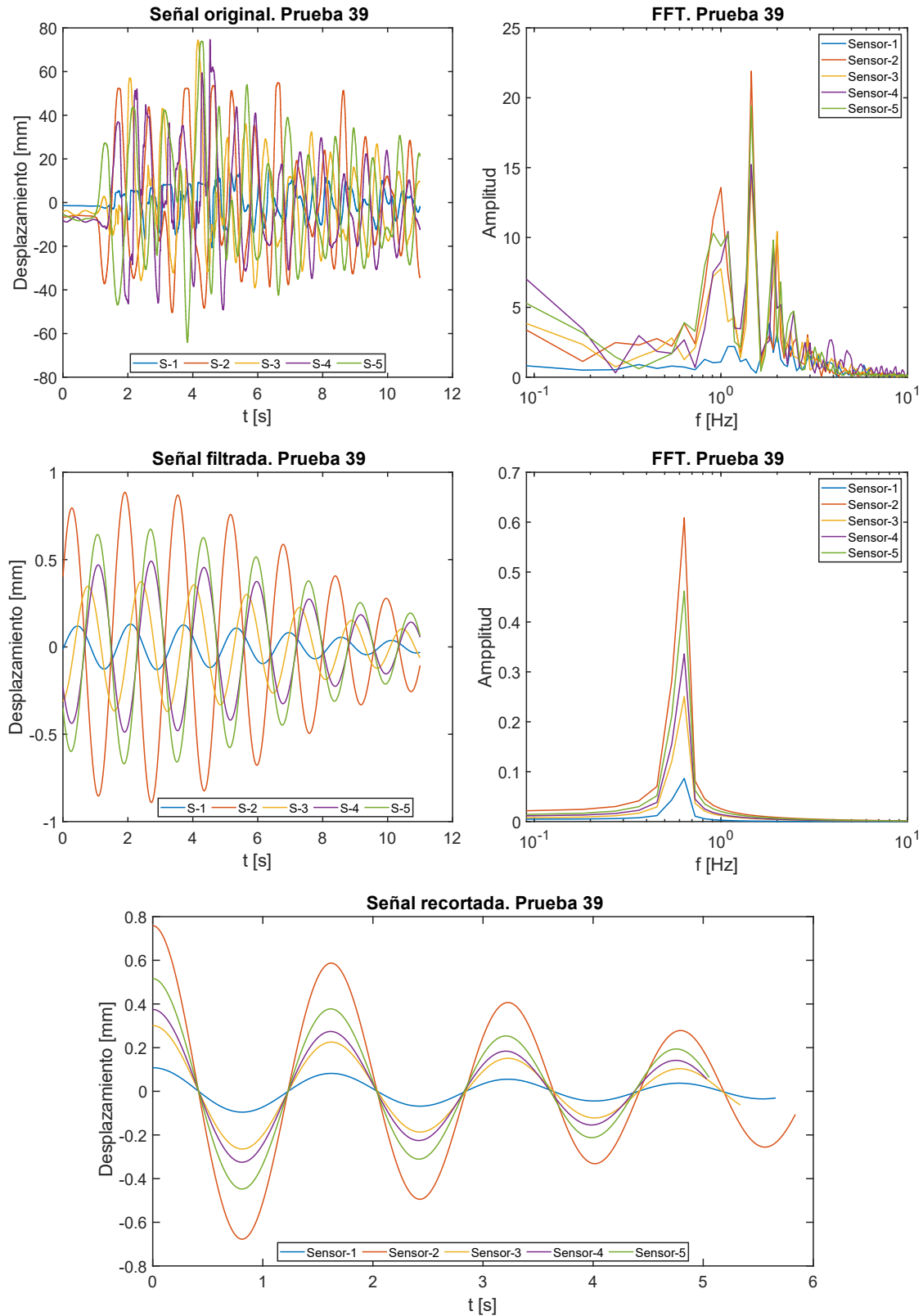


Ilustración 129. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 39, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

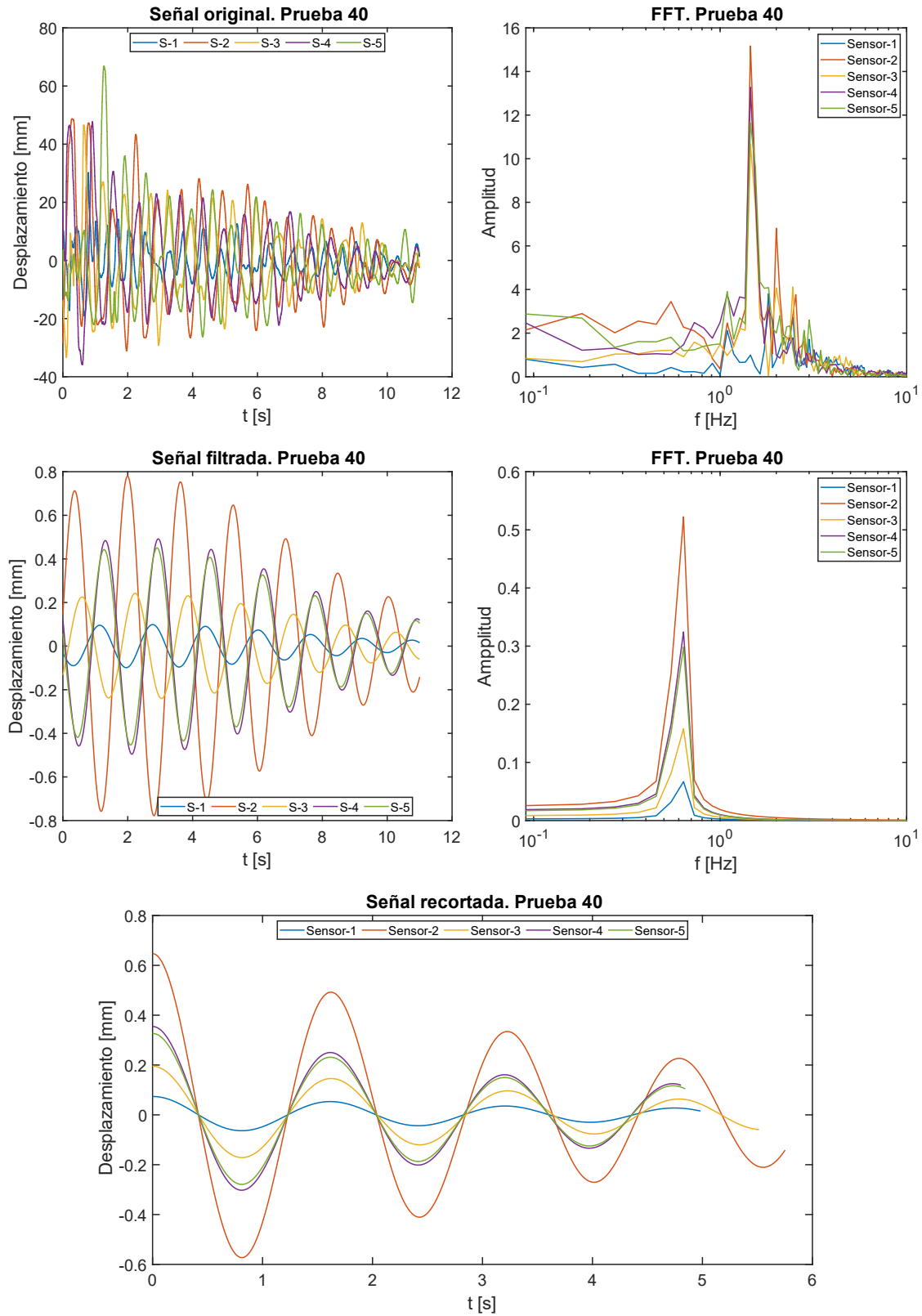


Ilustración 130. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 40, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

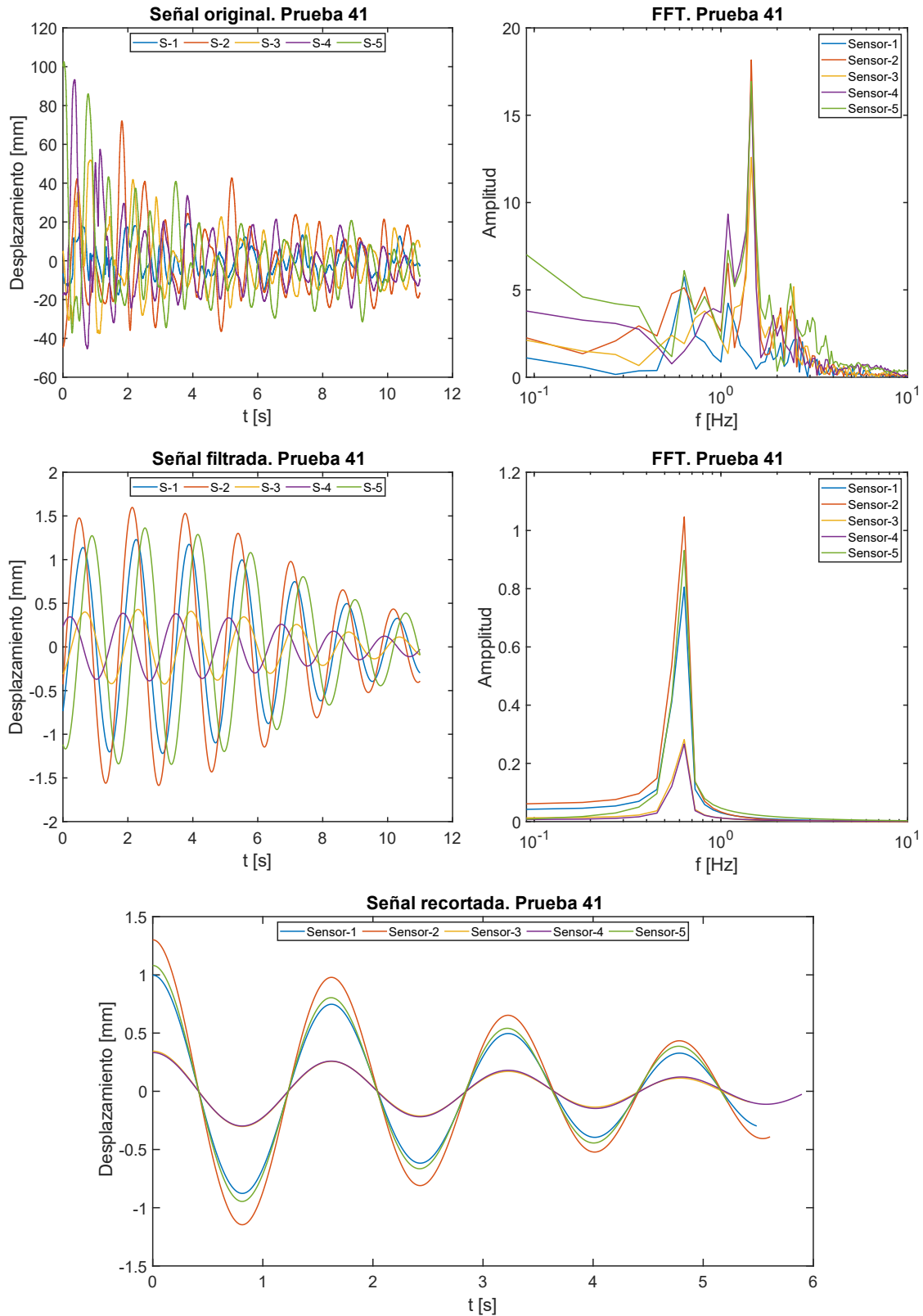


Ilustración 131. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 41, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

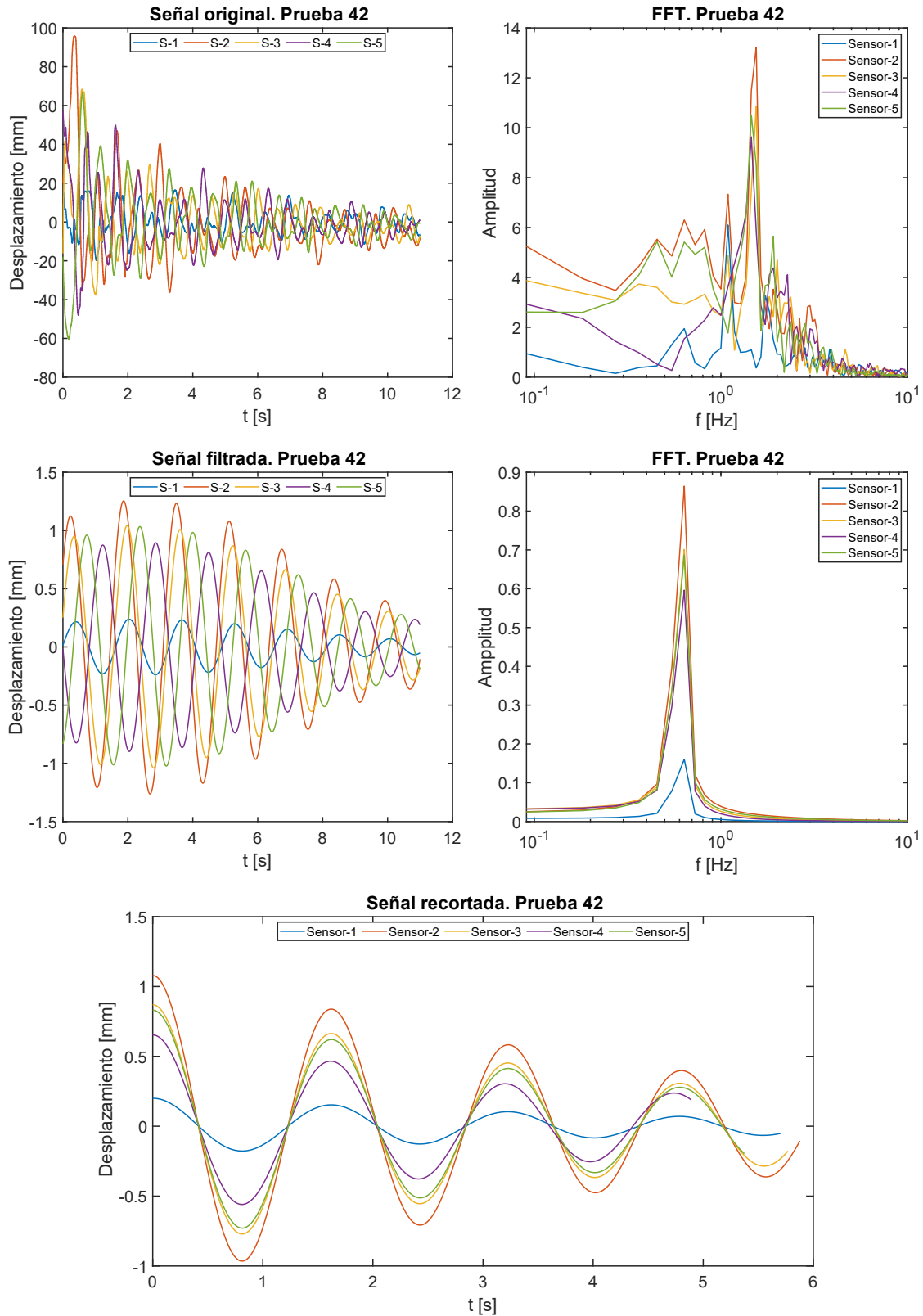


Ilustración 132. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 42, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

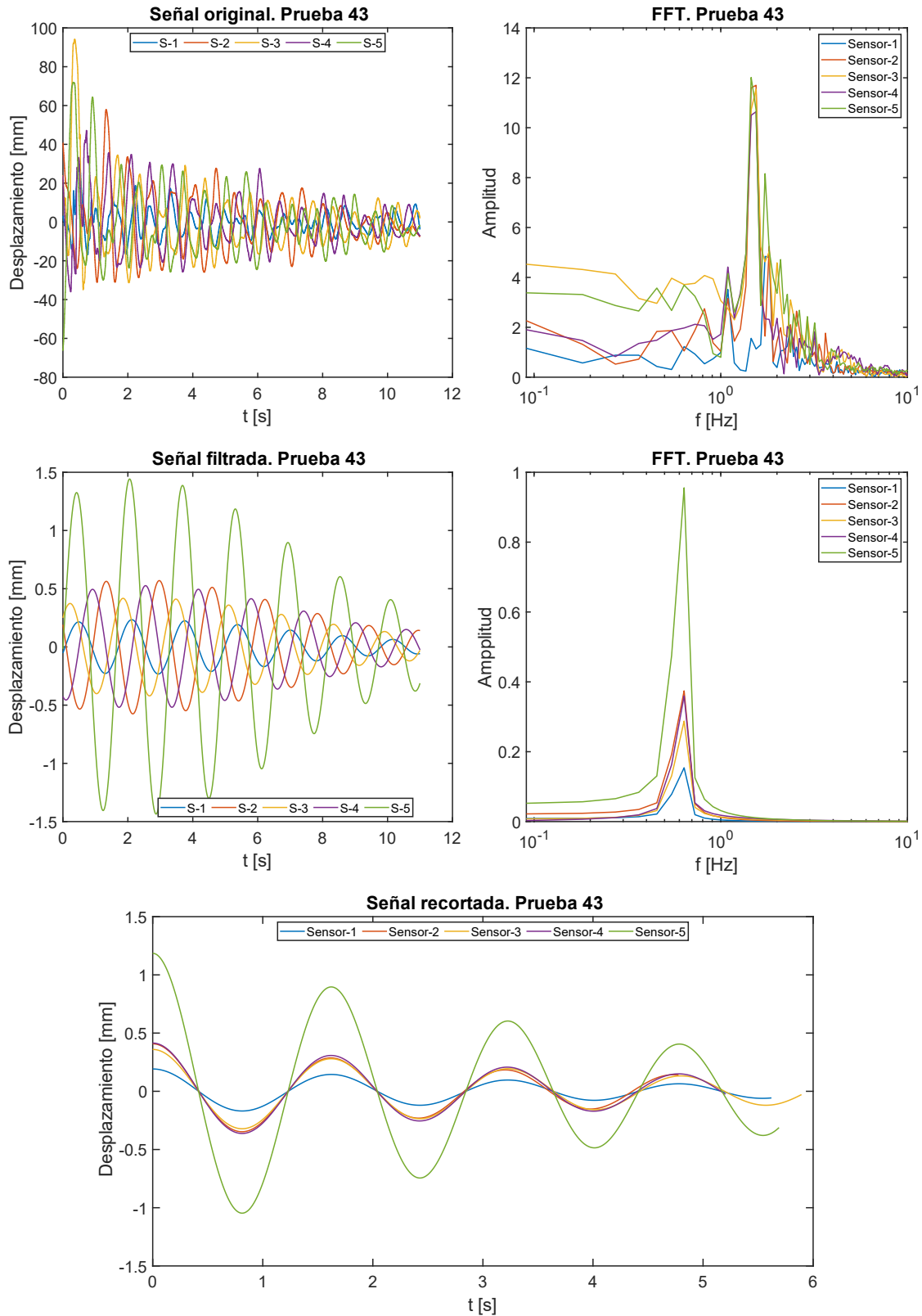


Ilustración 133. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 43, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

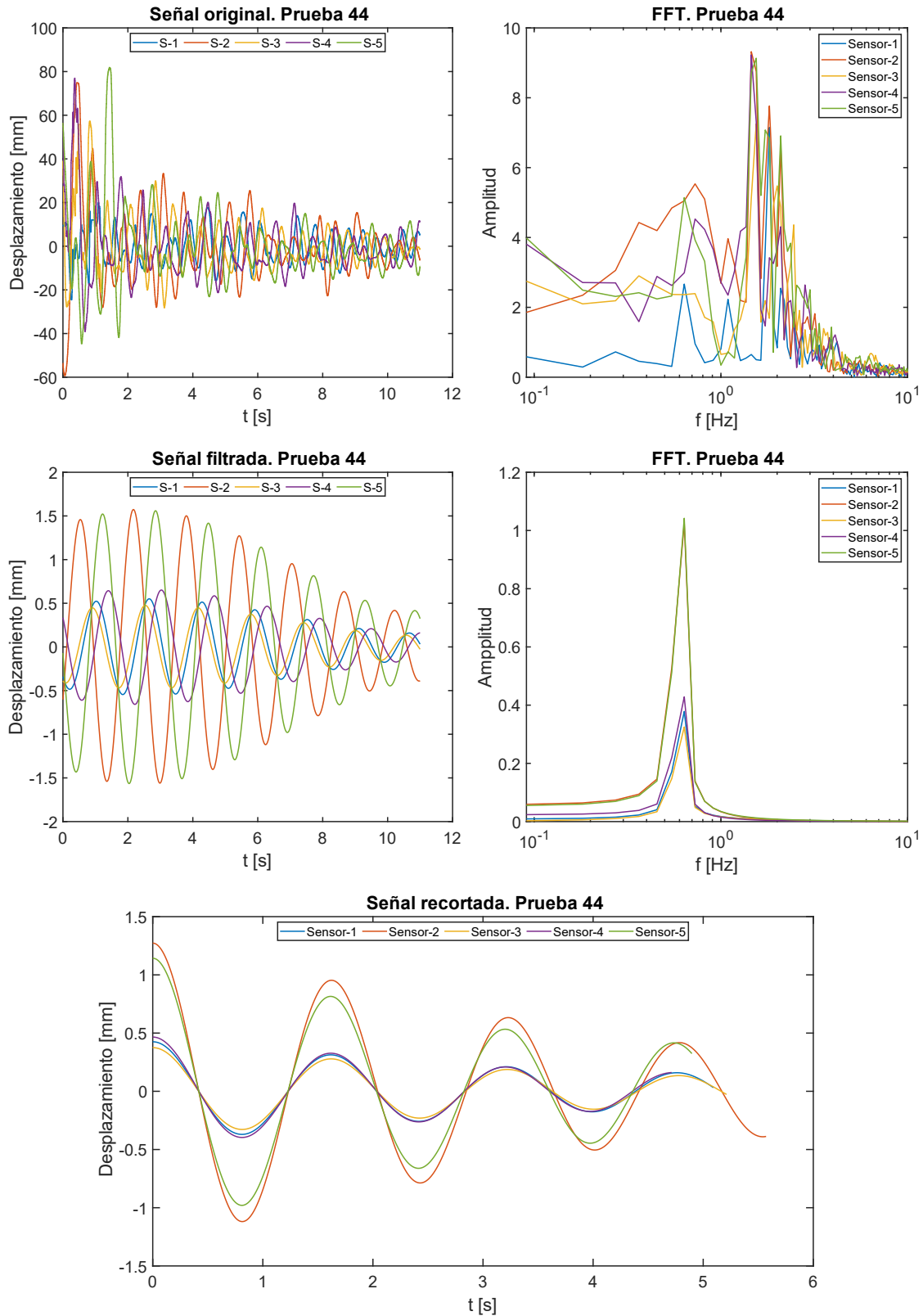


Ilustración 134. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 44, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

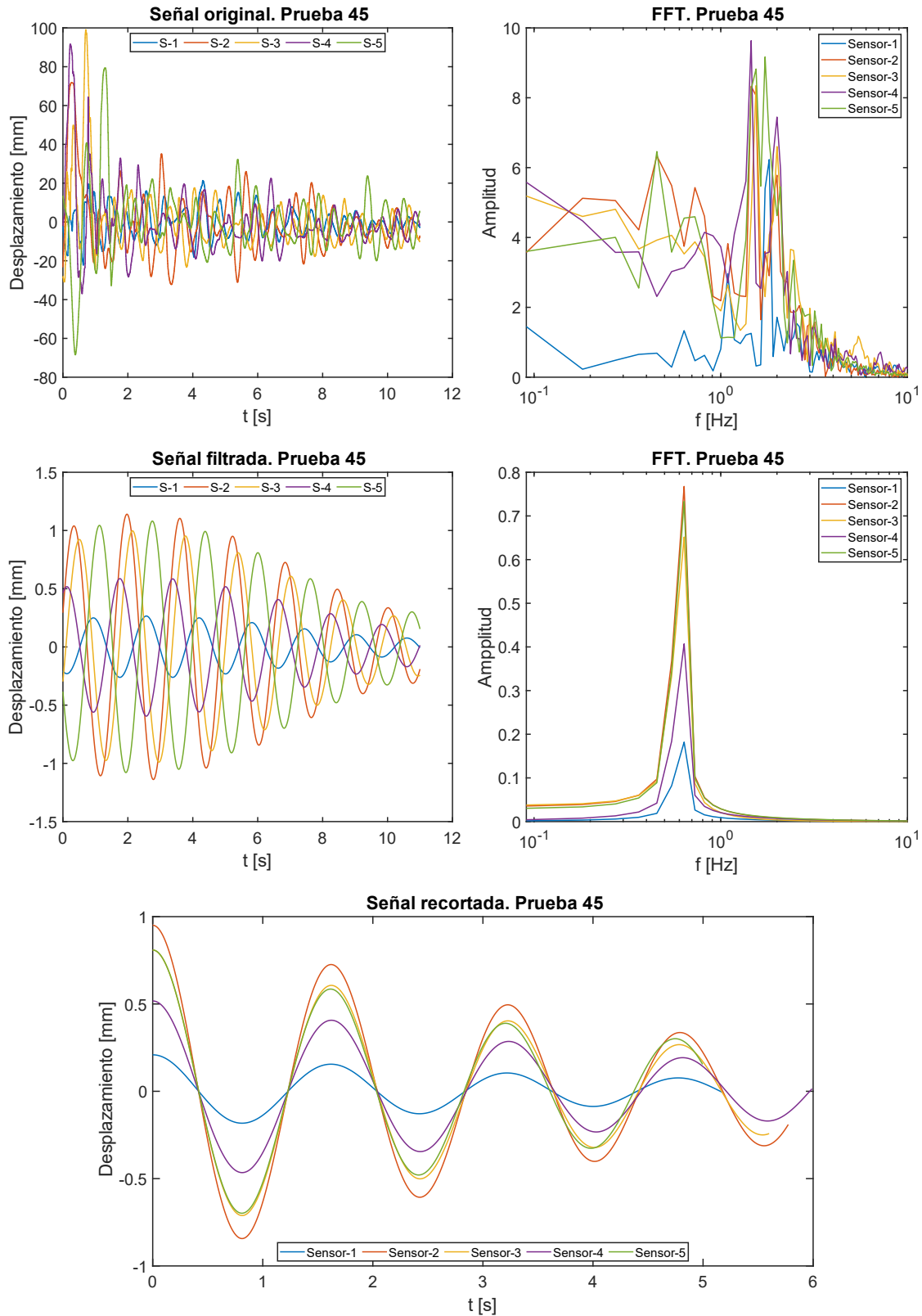


Ilustración 135. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 45, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

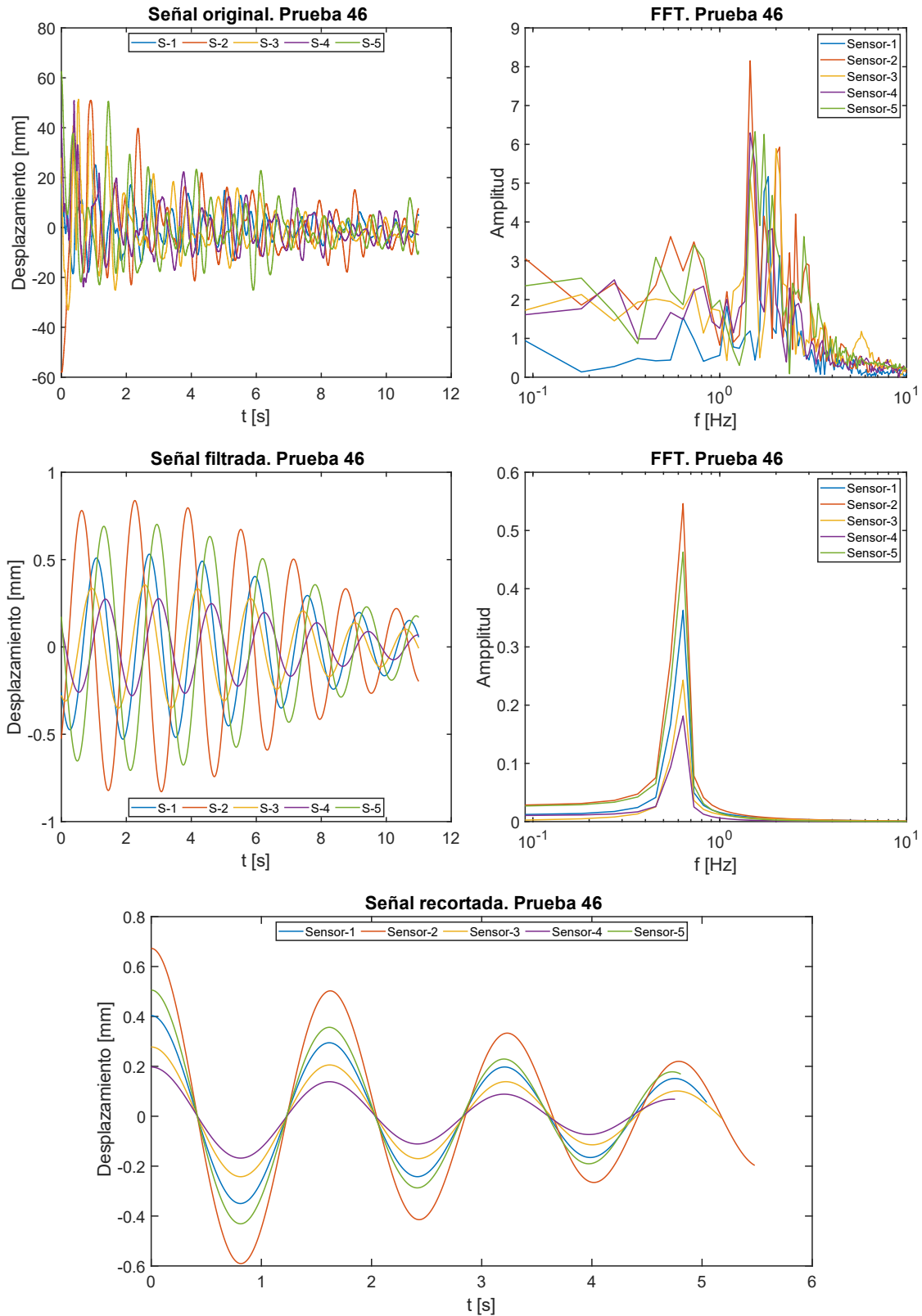


Ilustración 136. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 46, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

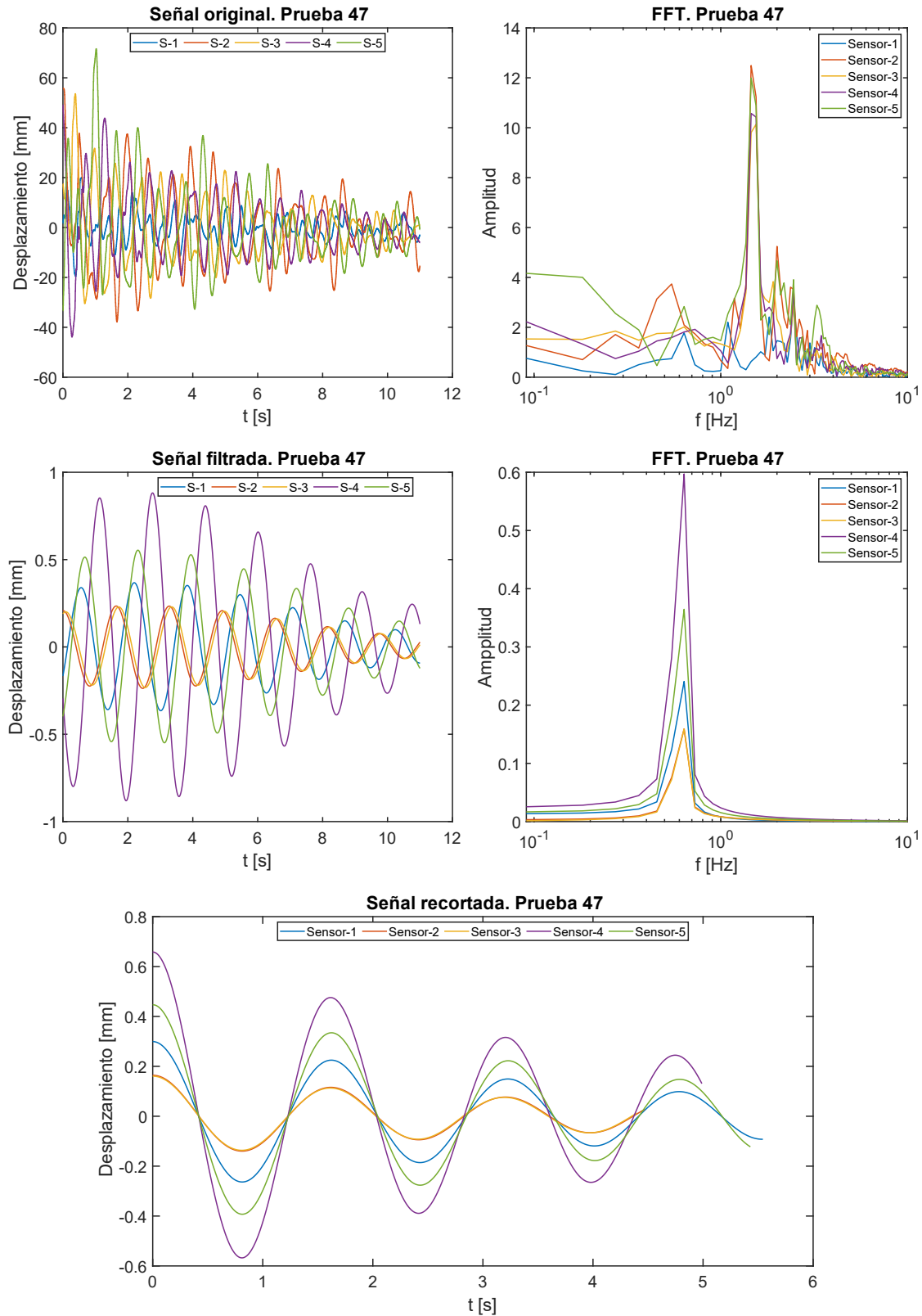


Ilustración 137. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 47, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

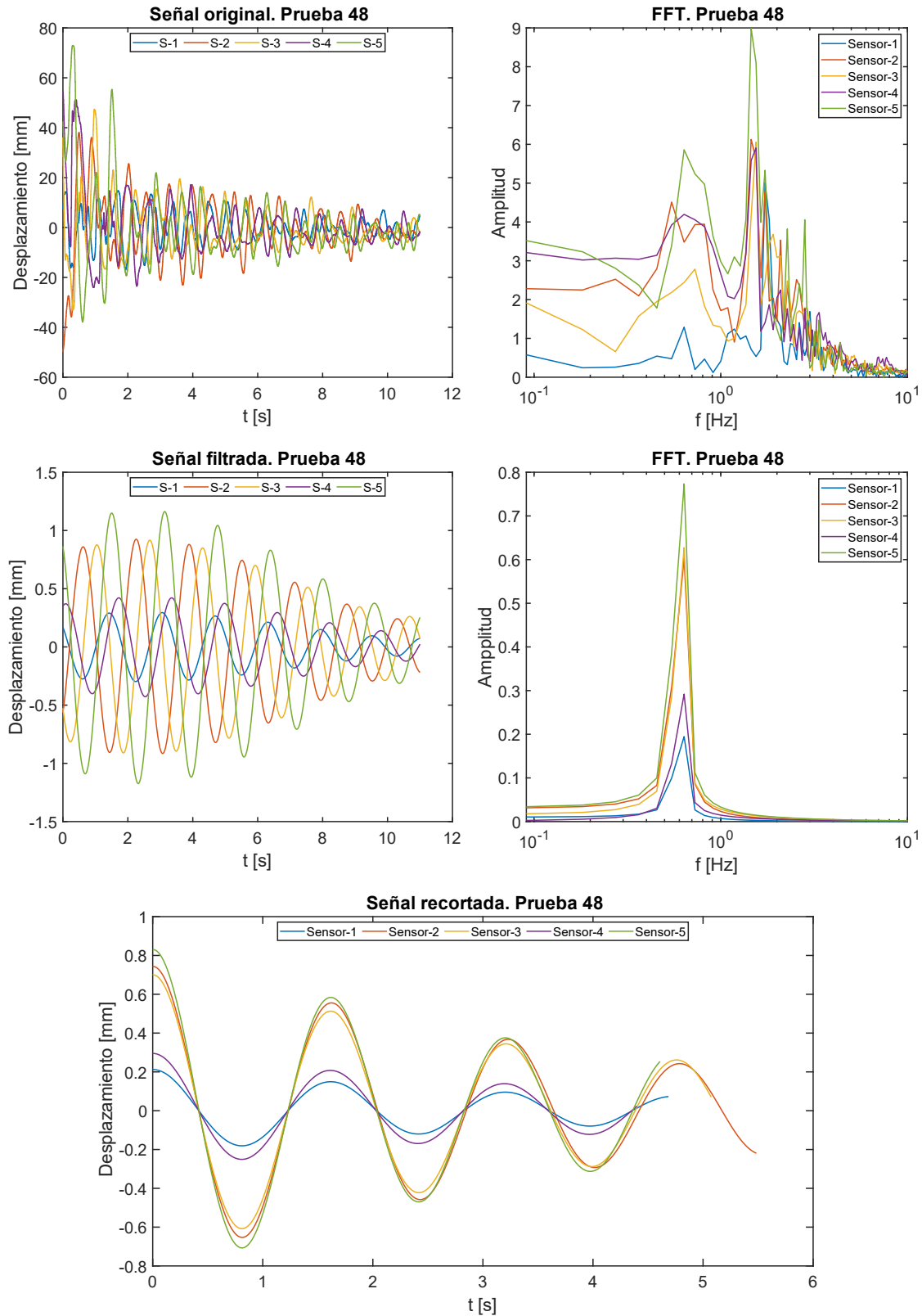


Ilustración 138. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 48, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

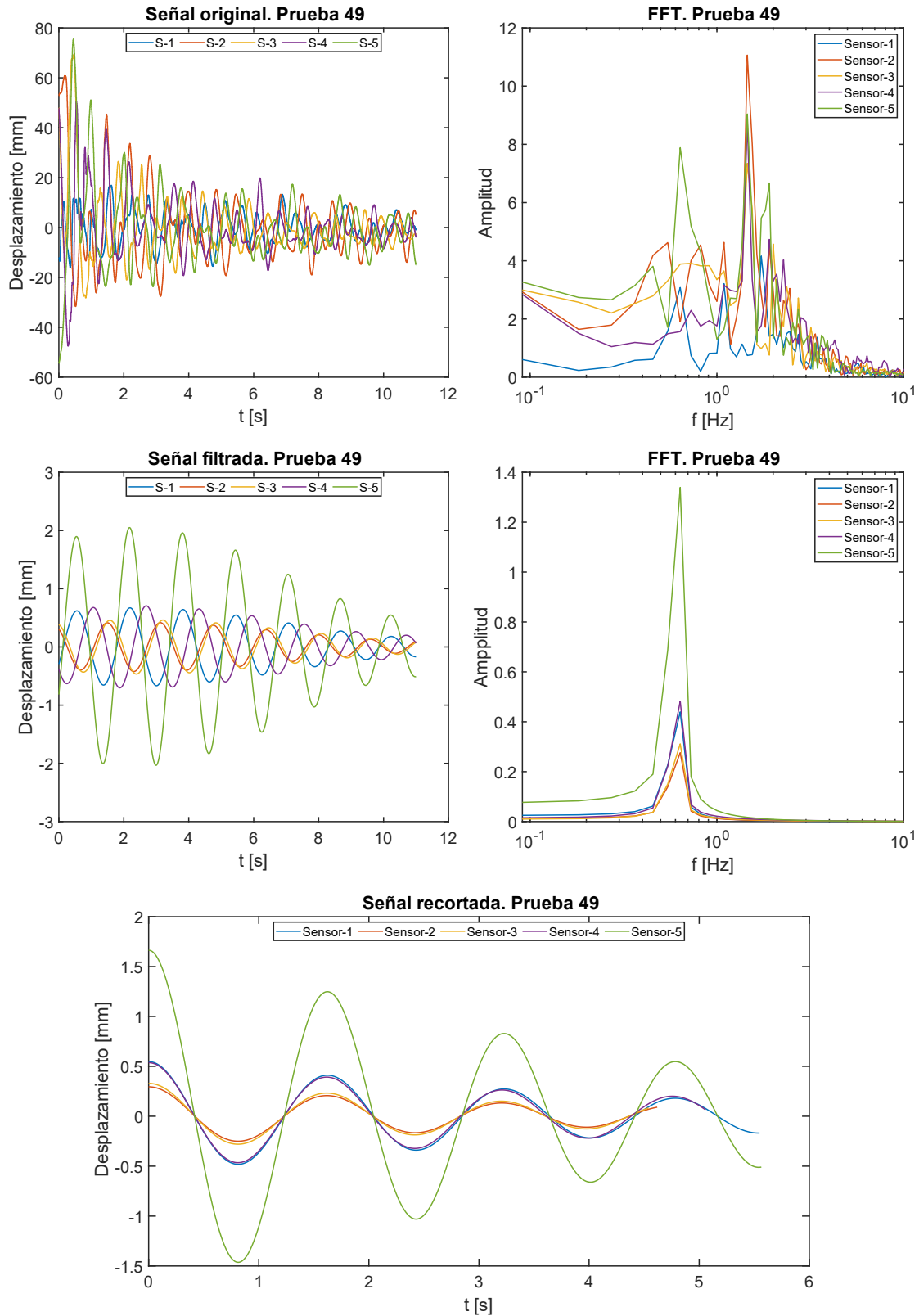


Ilustración 139. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 49, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

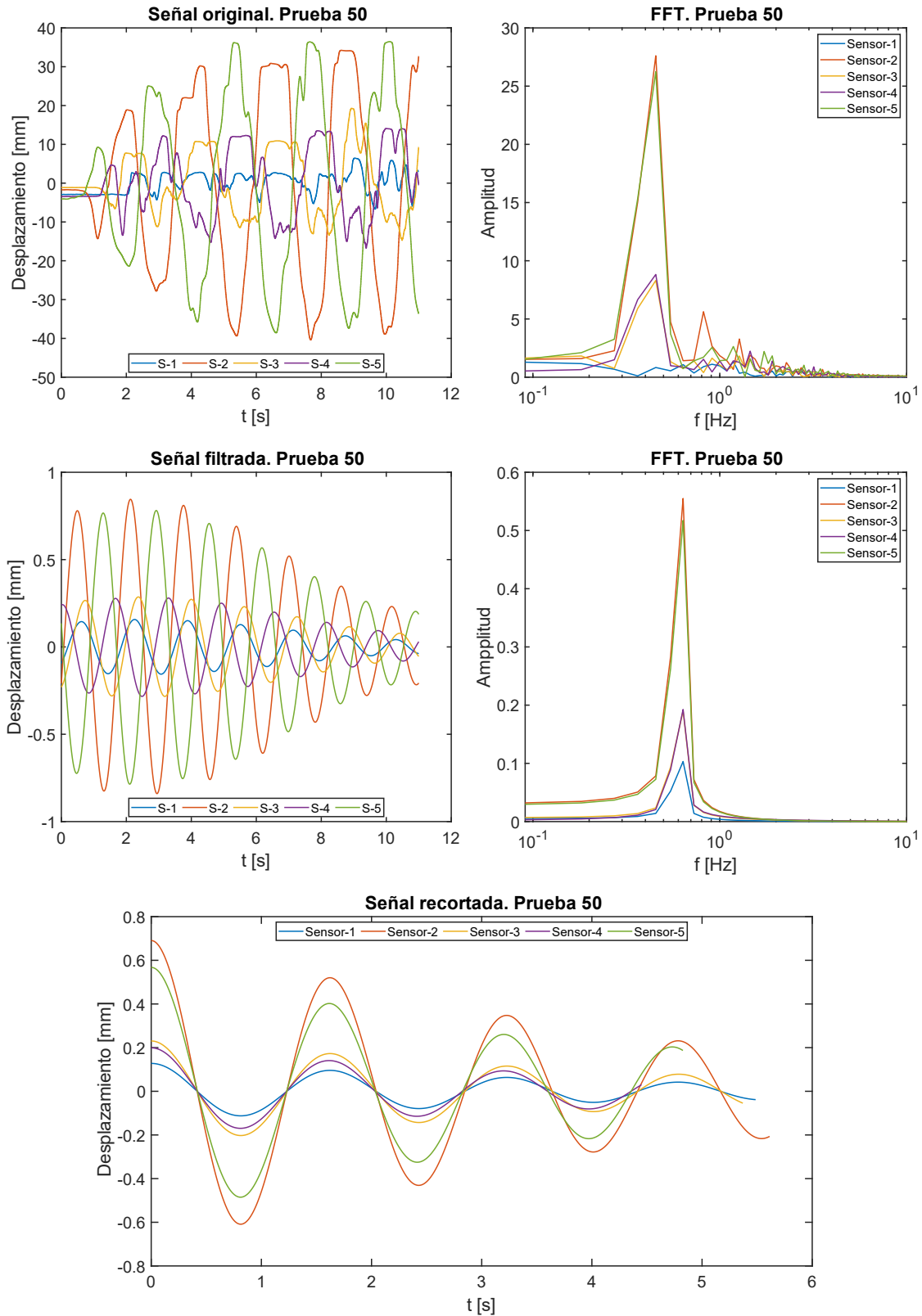


Ilustración 140. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 50, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

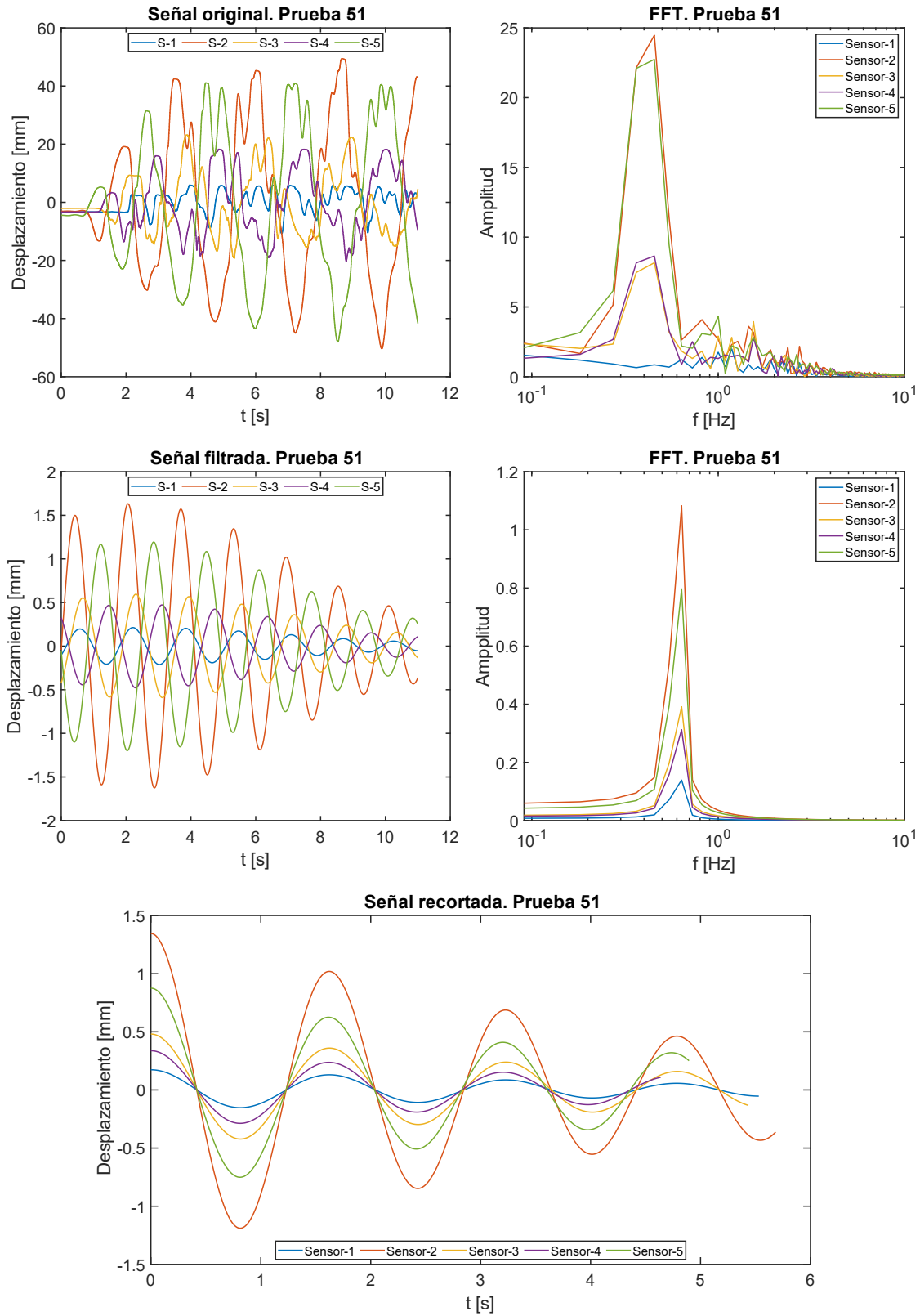


Ilustración 141. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 51, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

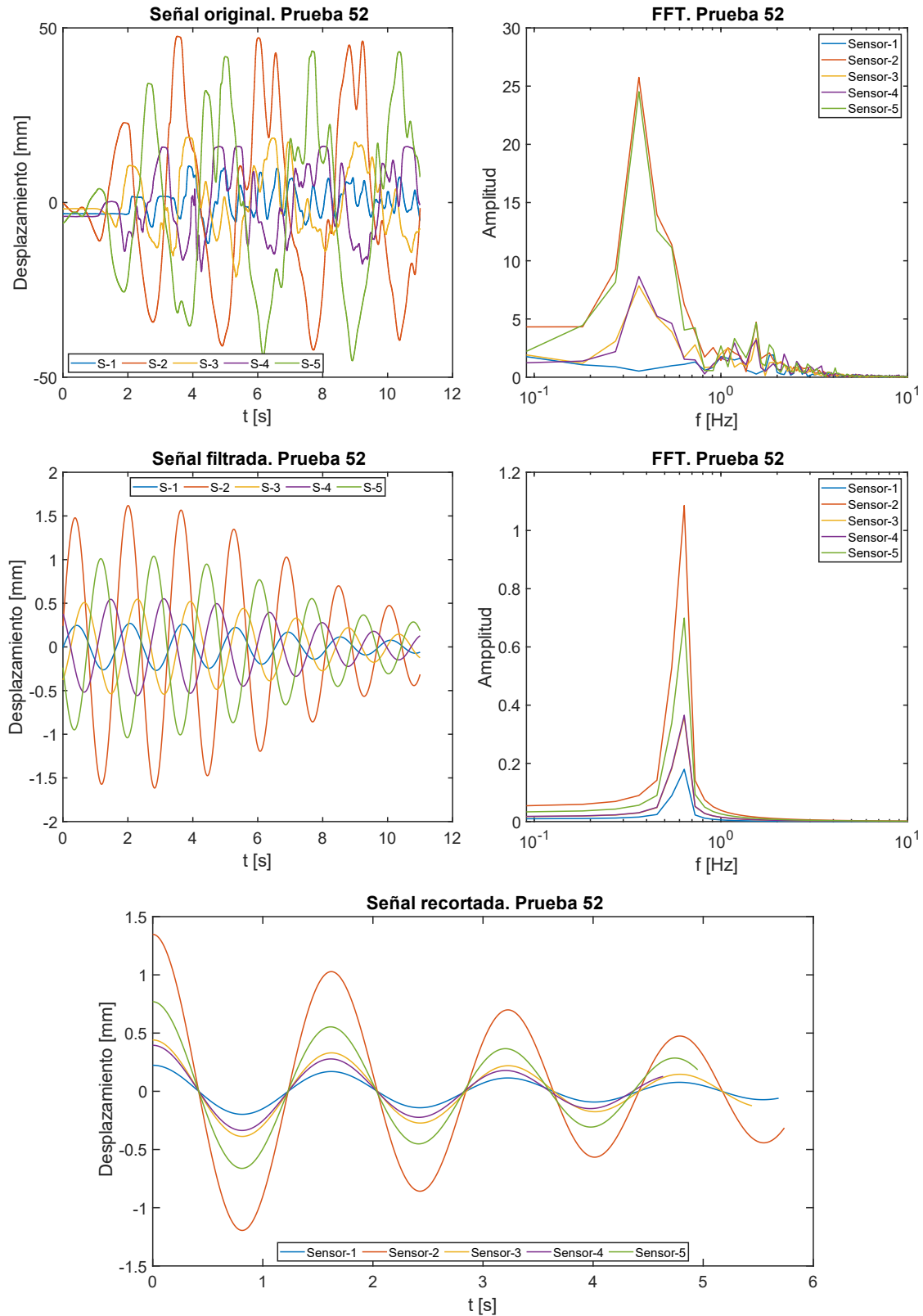


Ilustración 142. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 52, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

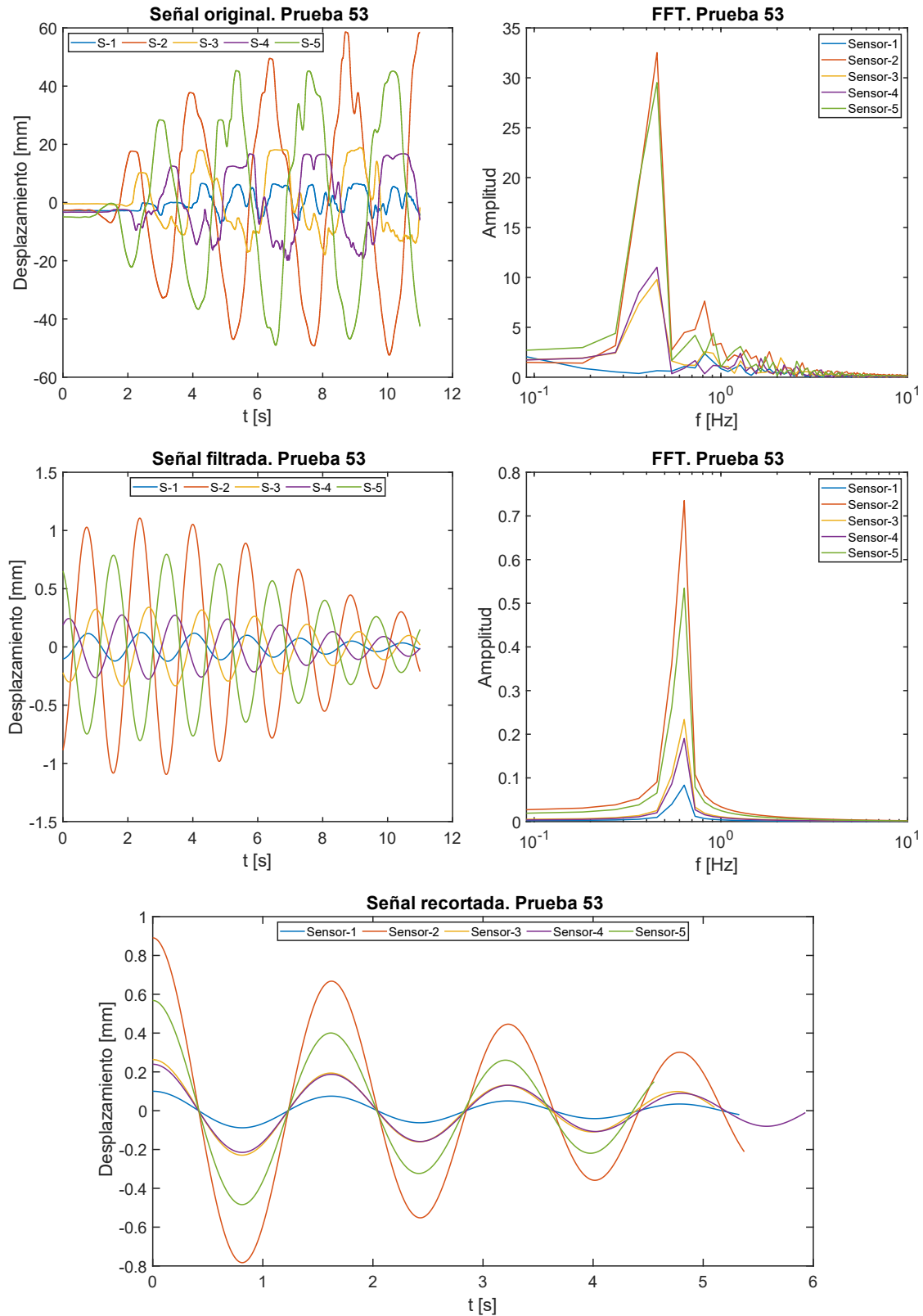


Ilustración 143. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 53, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

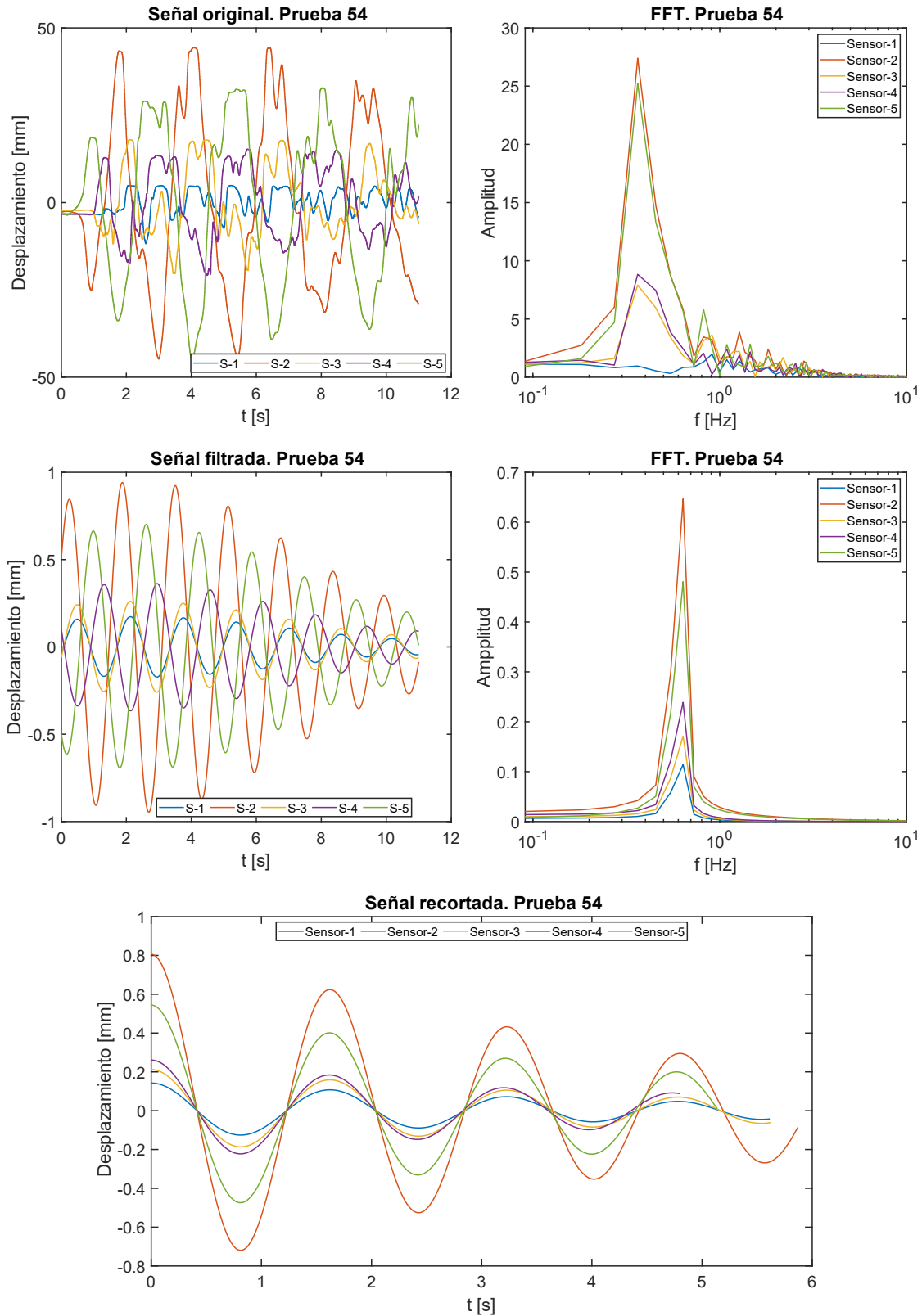


Ilustración 144. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 54, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

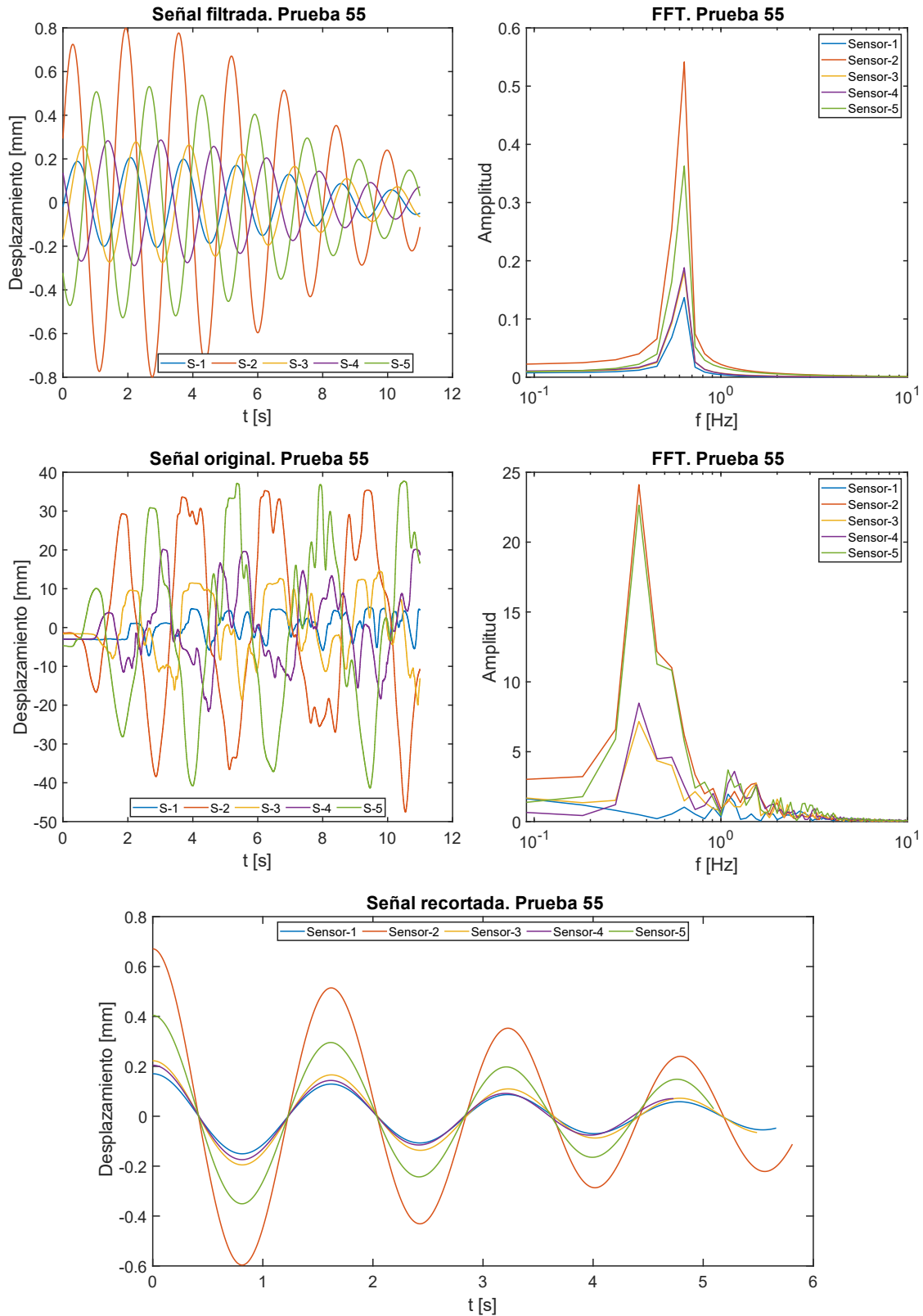


Ilustración 145. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 55, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

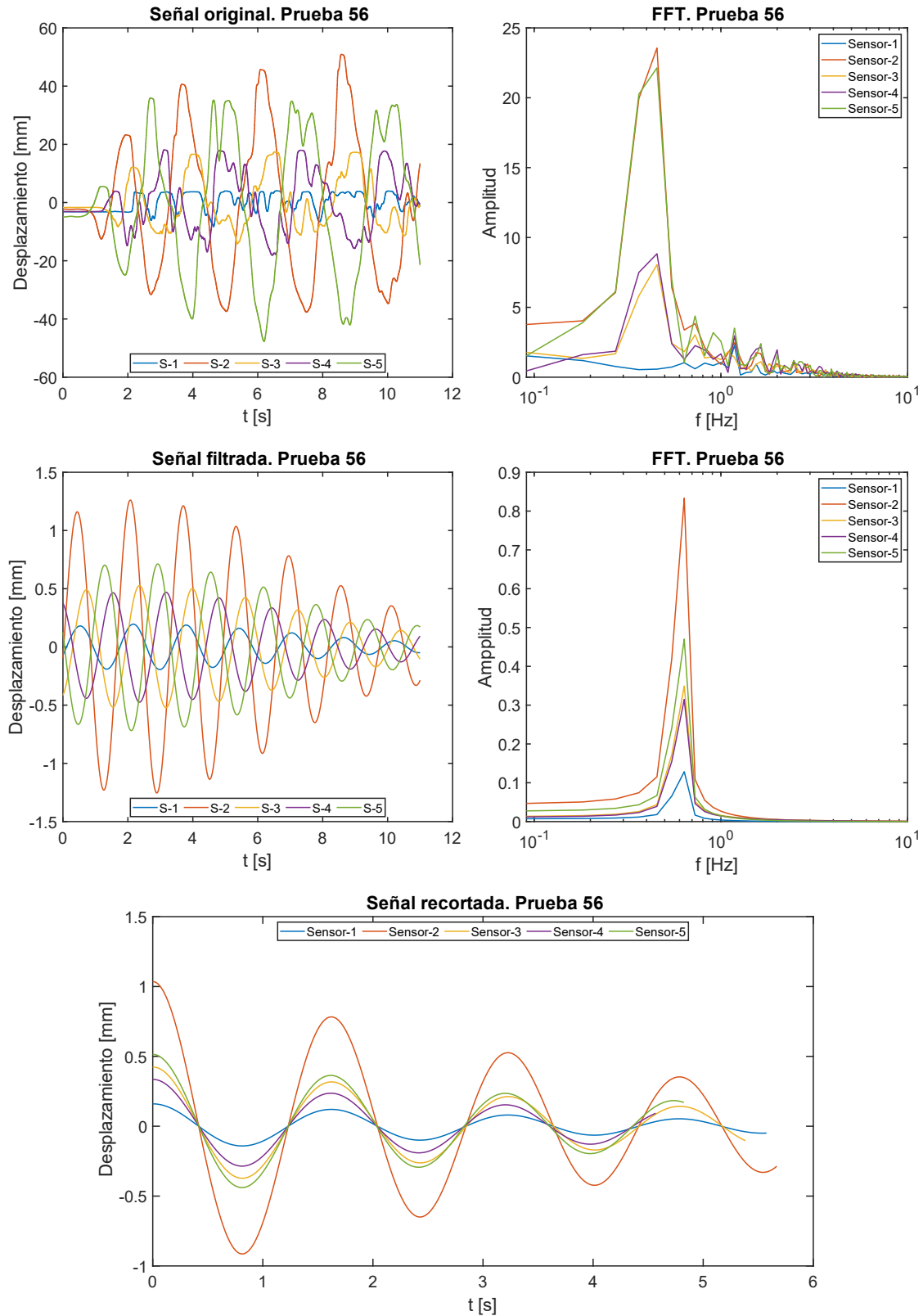


Ilustración 146. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 56, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

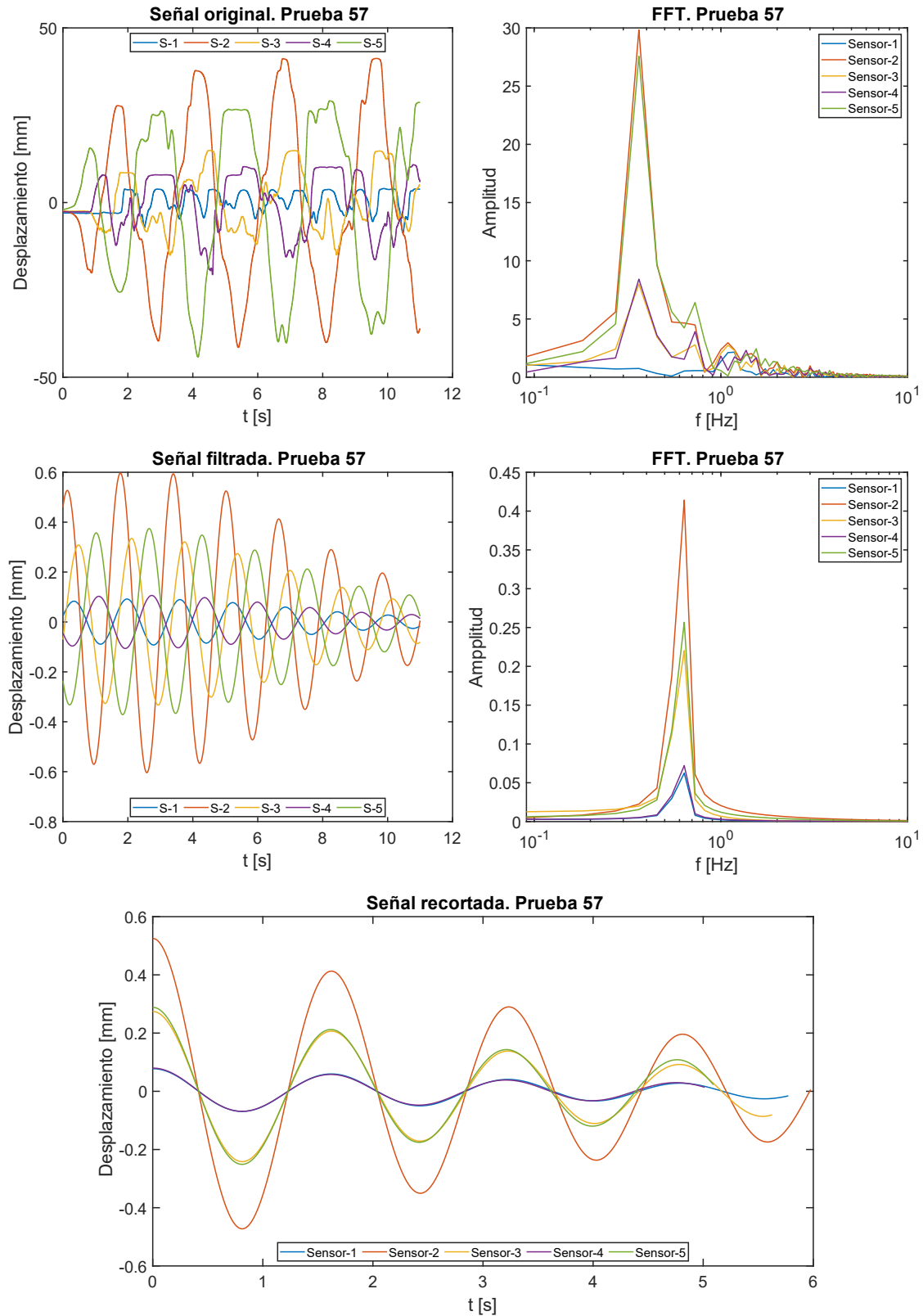


Ilustración 147. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 57, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

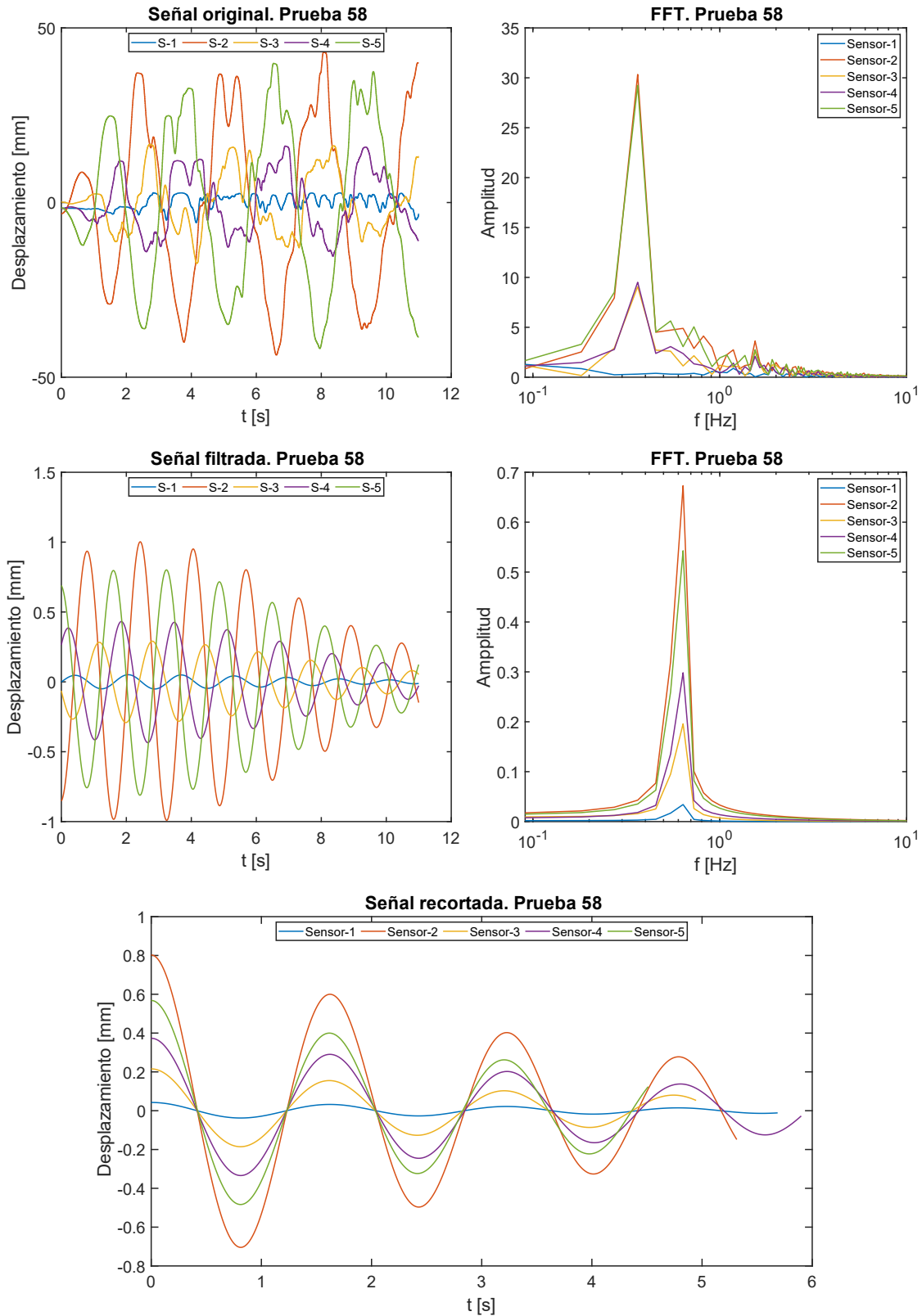


Ilustración 148. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 58, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

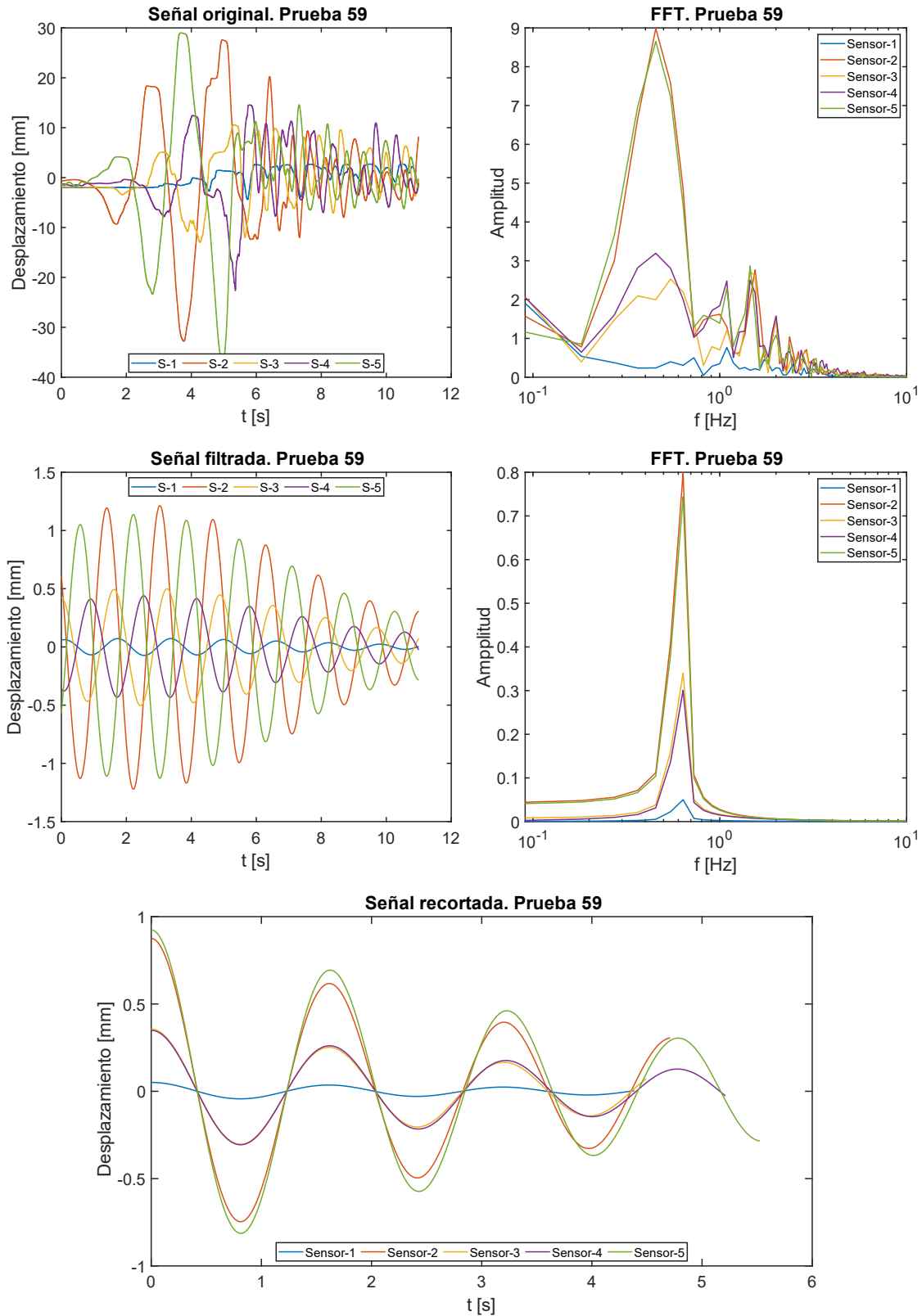


Ilustración 149. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 59, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

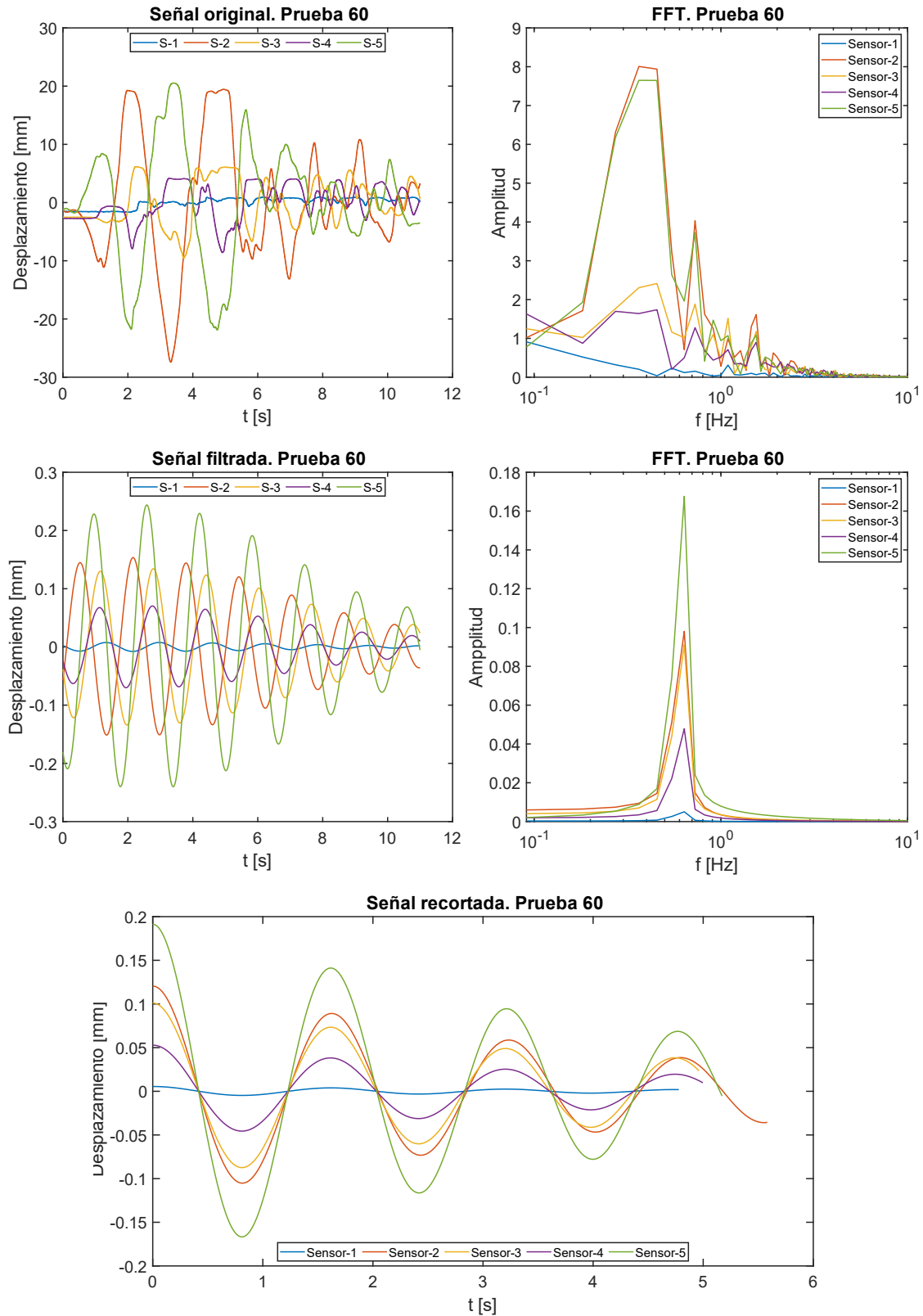


Ilustración 150. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 60, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

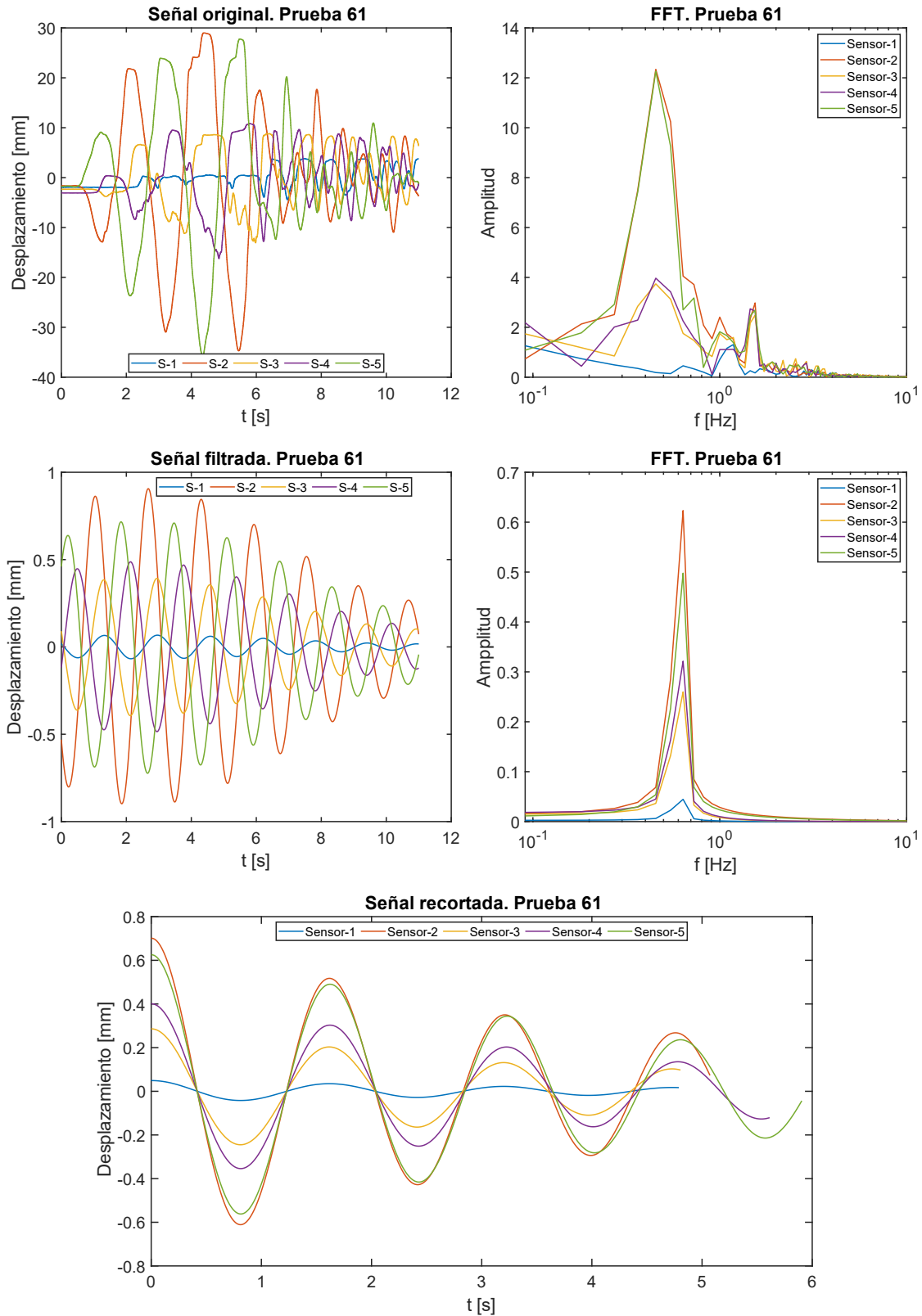


Ilustración 151. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 61, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

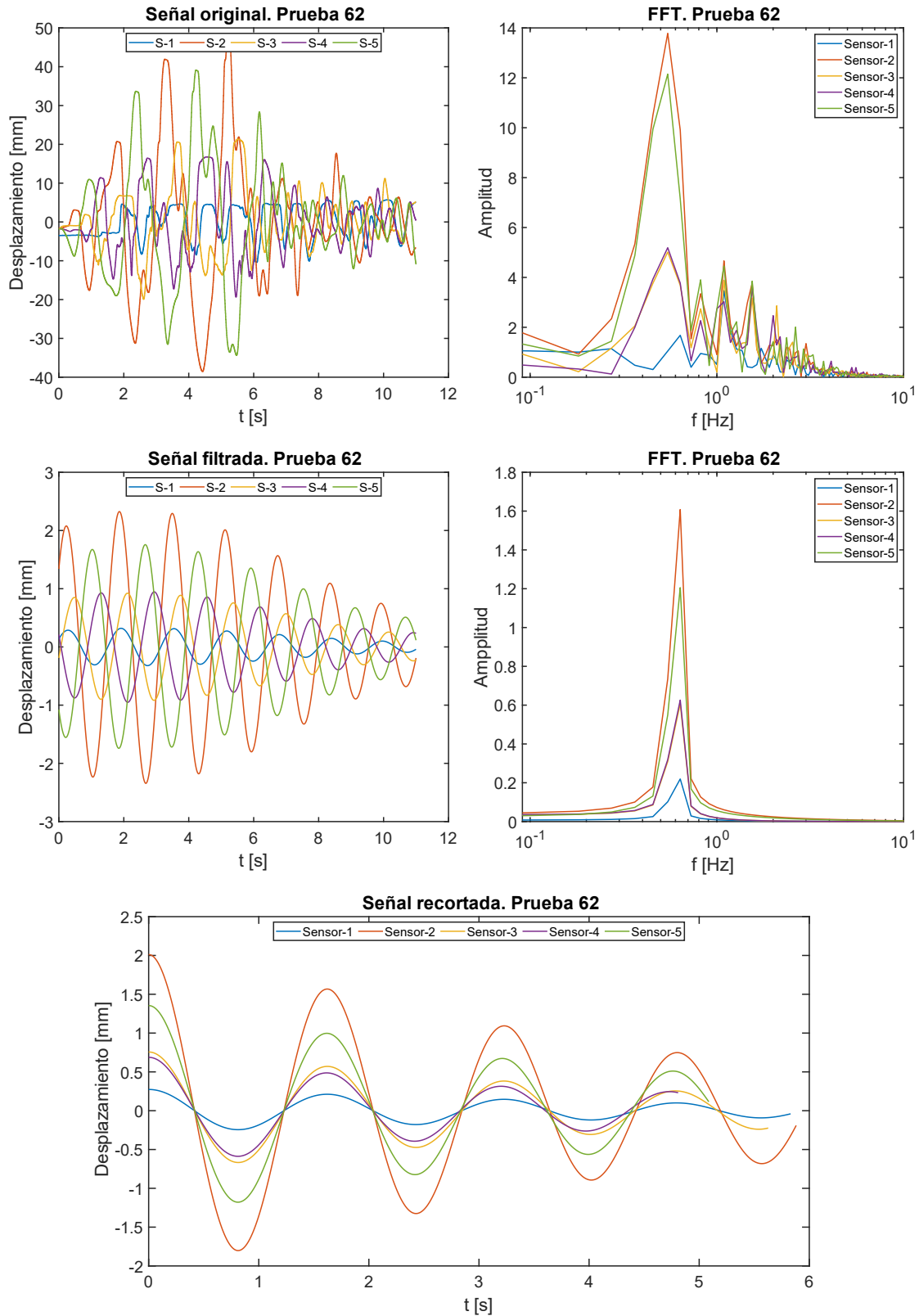


Ilustración 152. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 62, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

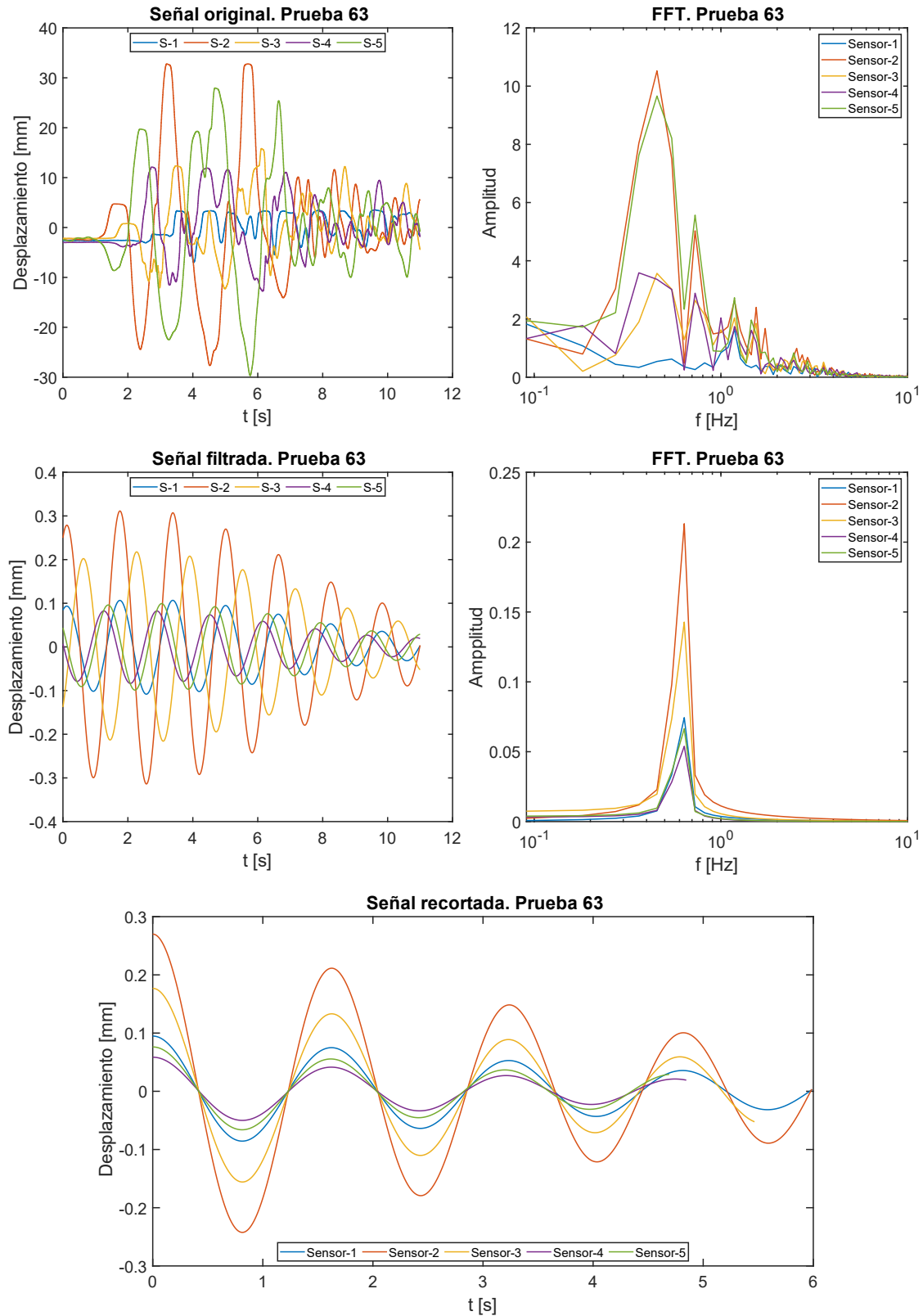


Ilustración 153. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 63, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

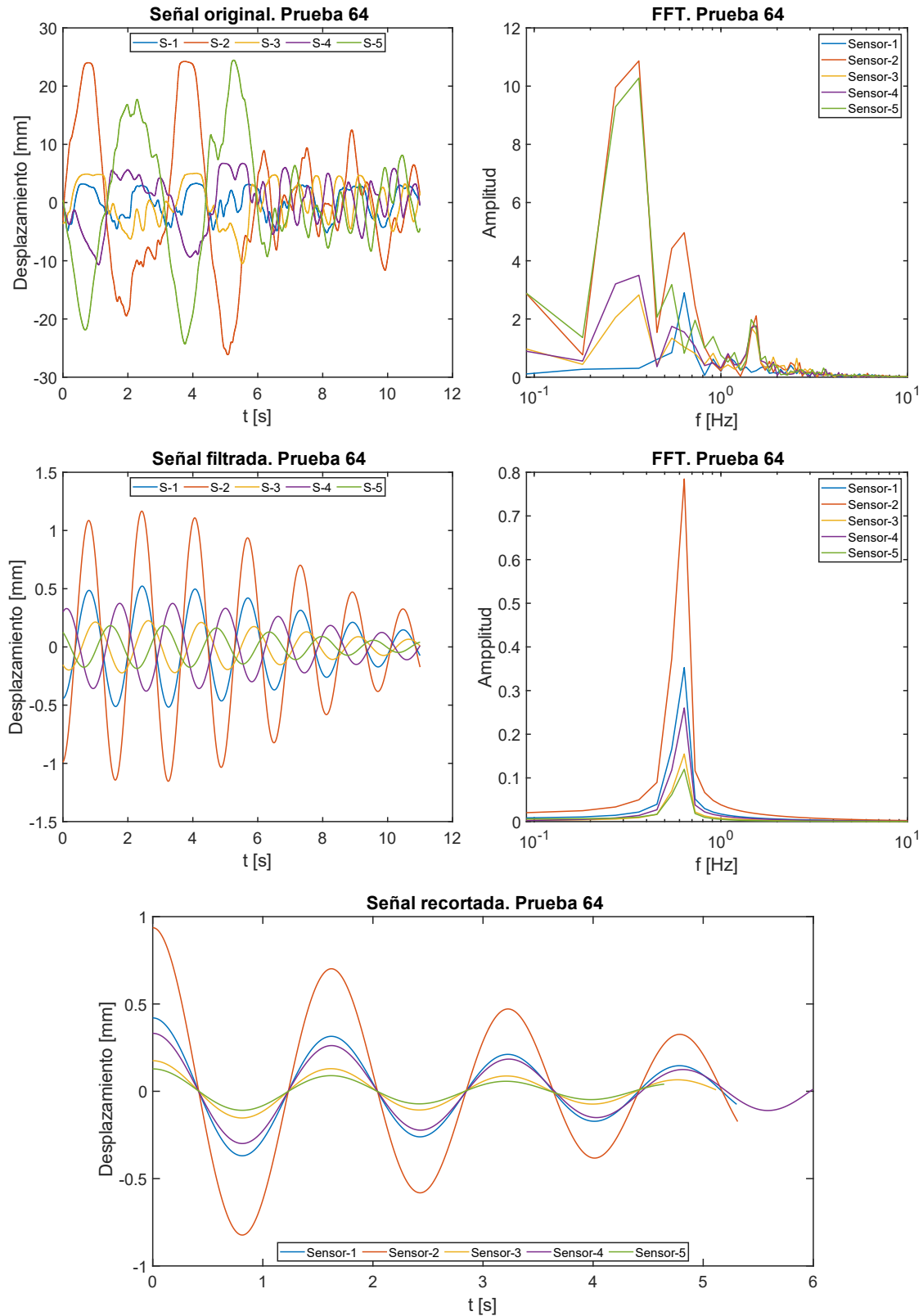


Ilustración 154. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 64, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

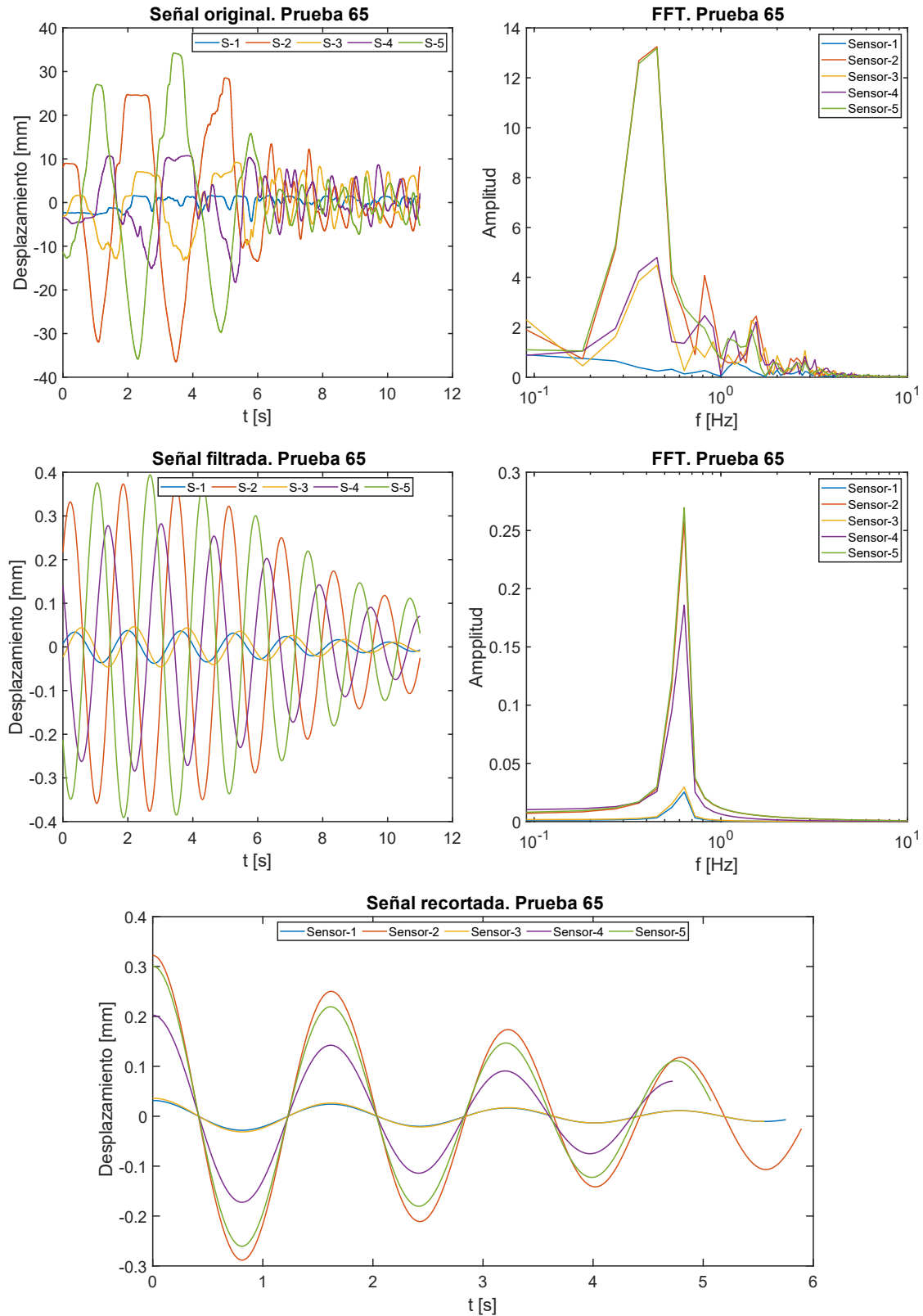


Ilustración 155. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 65, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

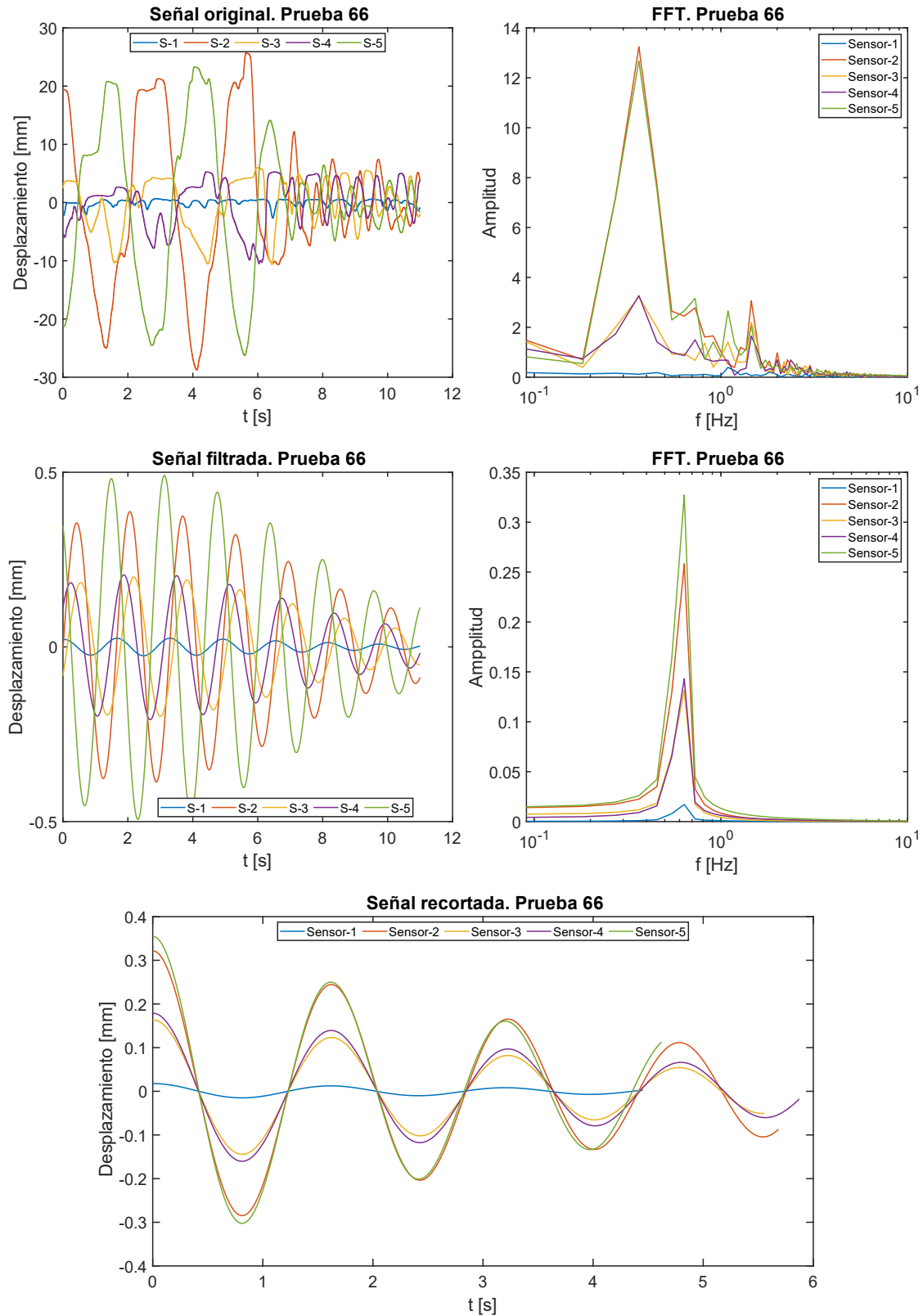


Ilustración 156. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 66, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

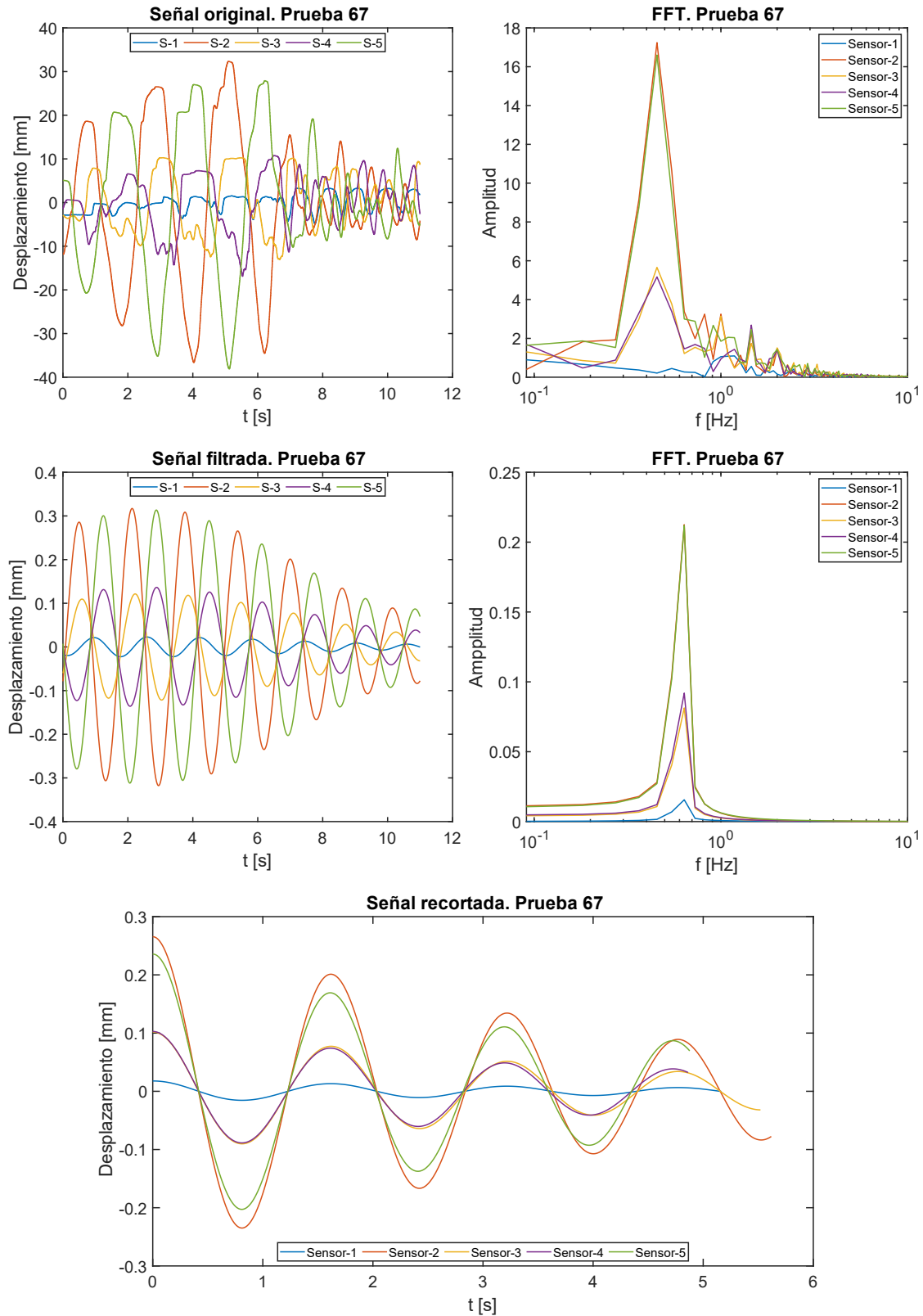


Ilustración 157. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 67, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

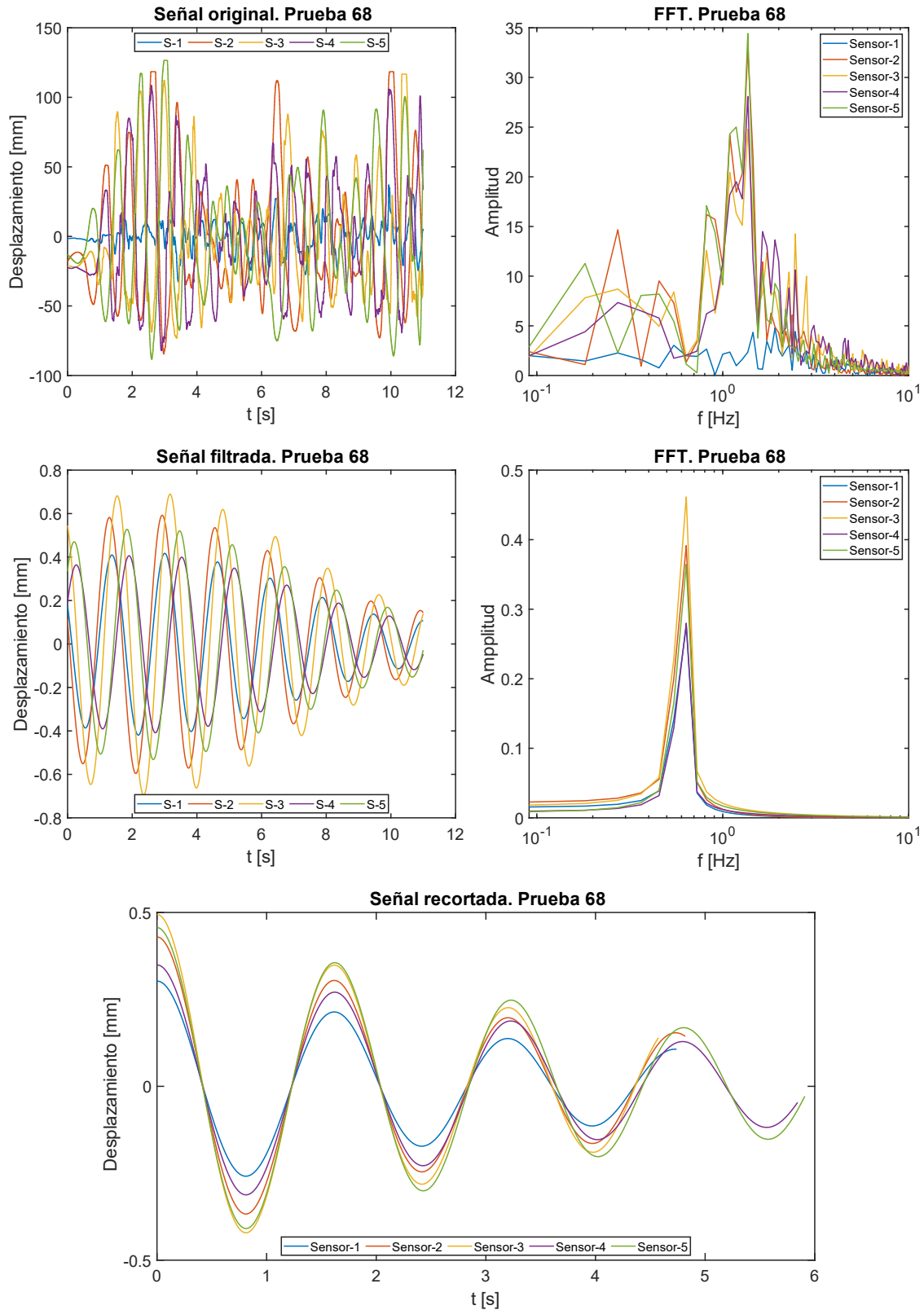


Ilustración 158. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 68, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

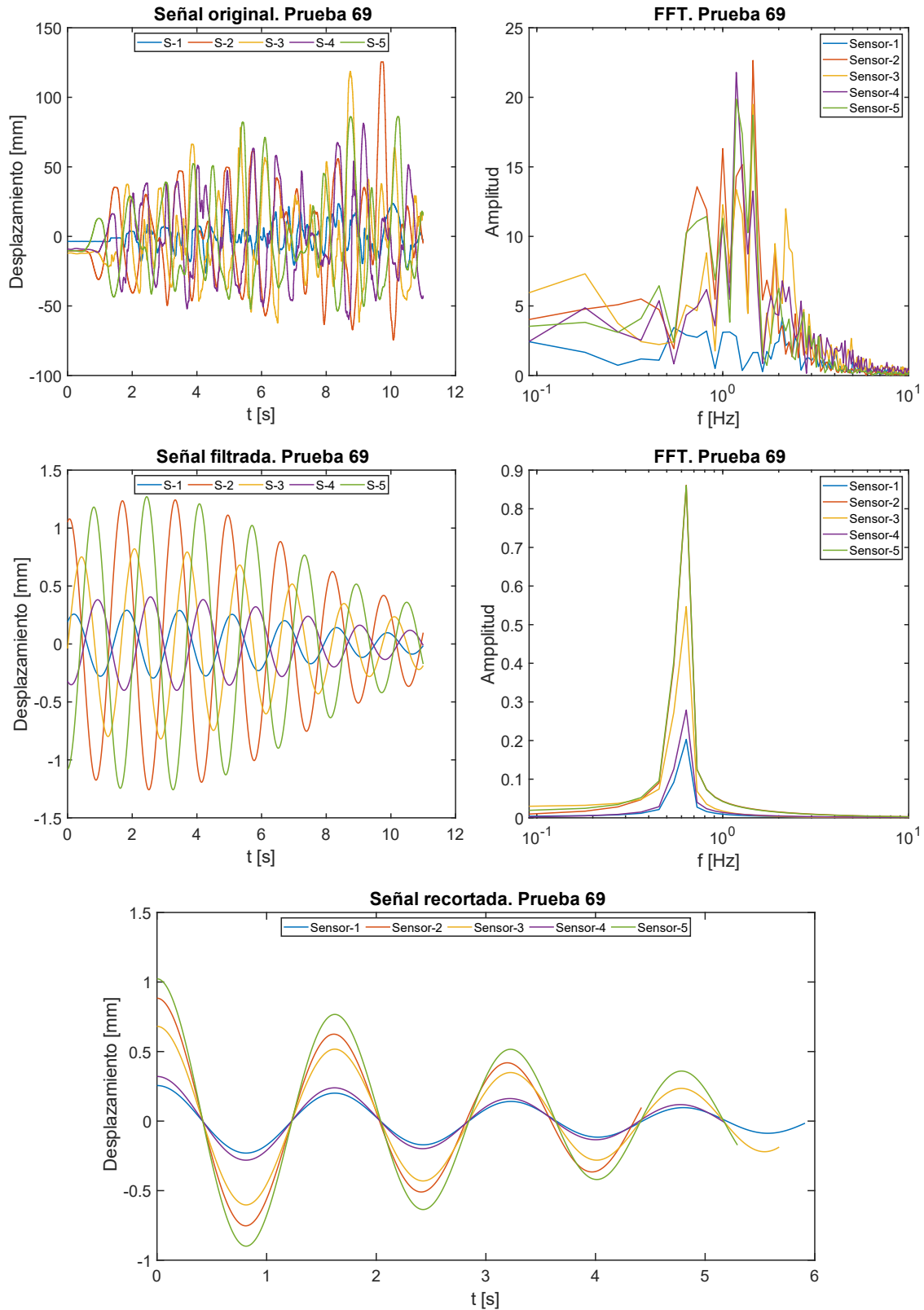


Ilustración 159. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 69, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

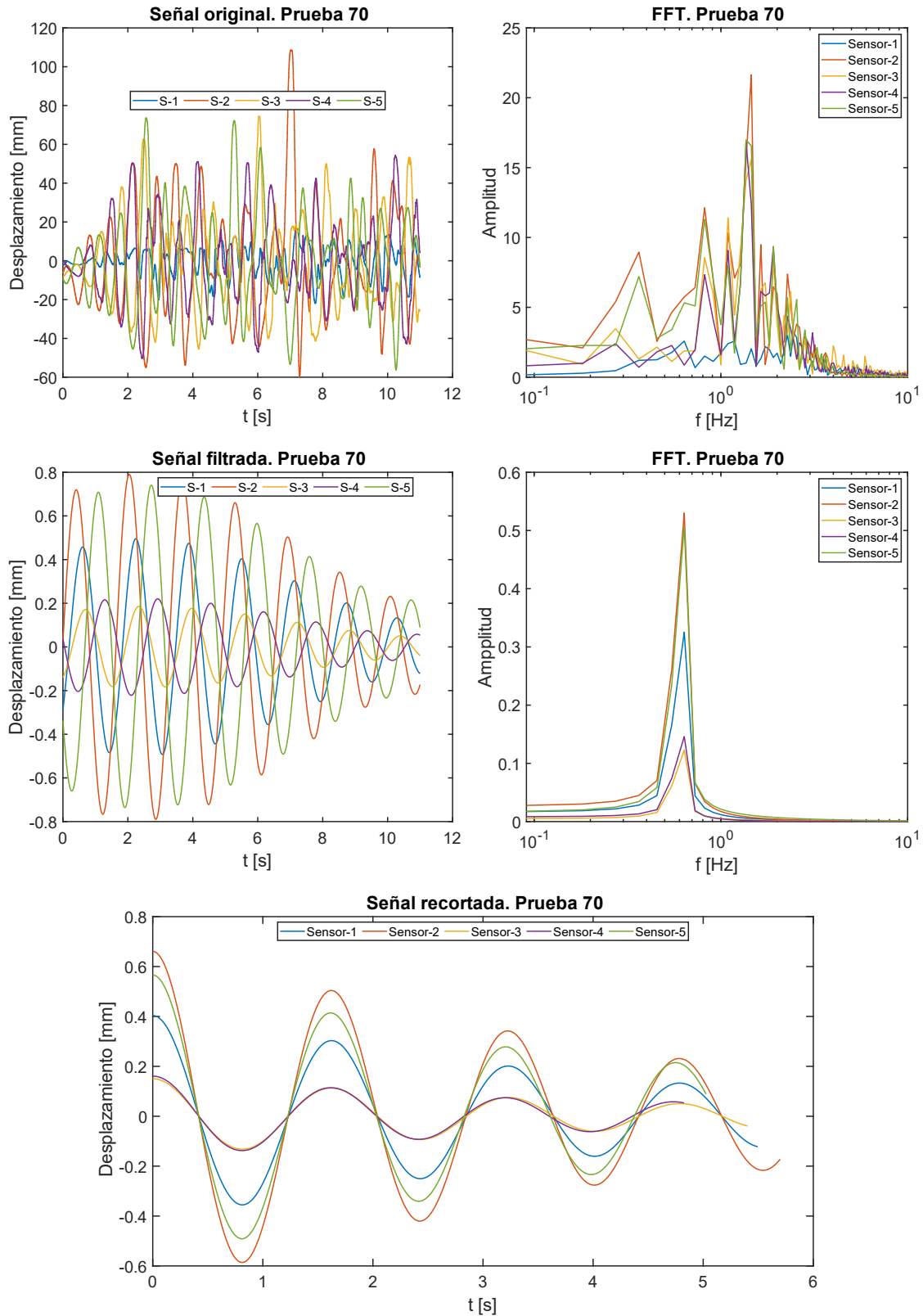


Ilustración 160. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 70, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

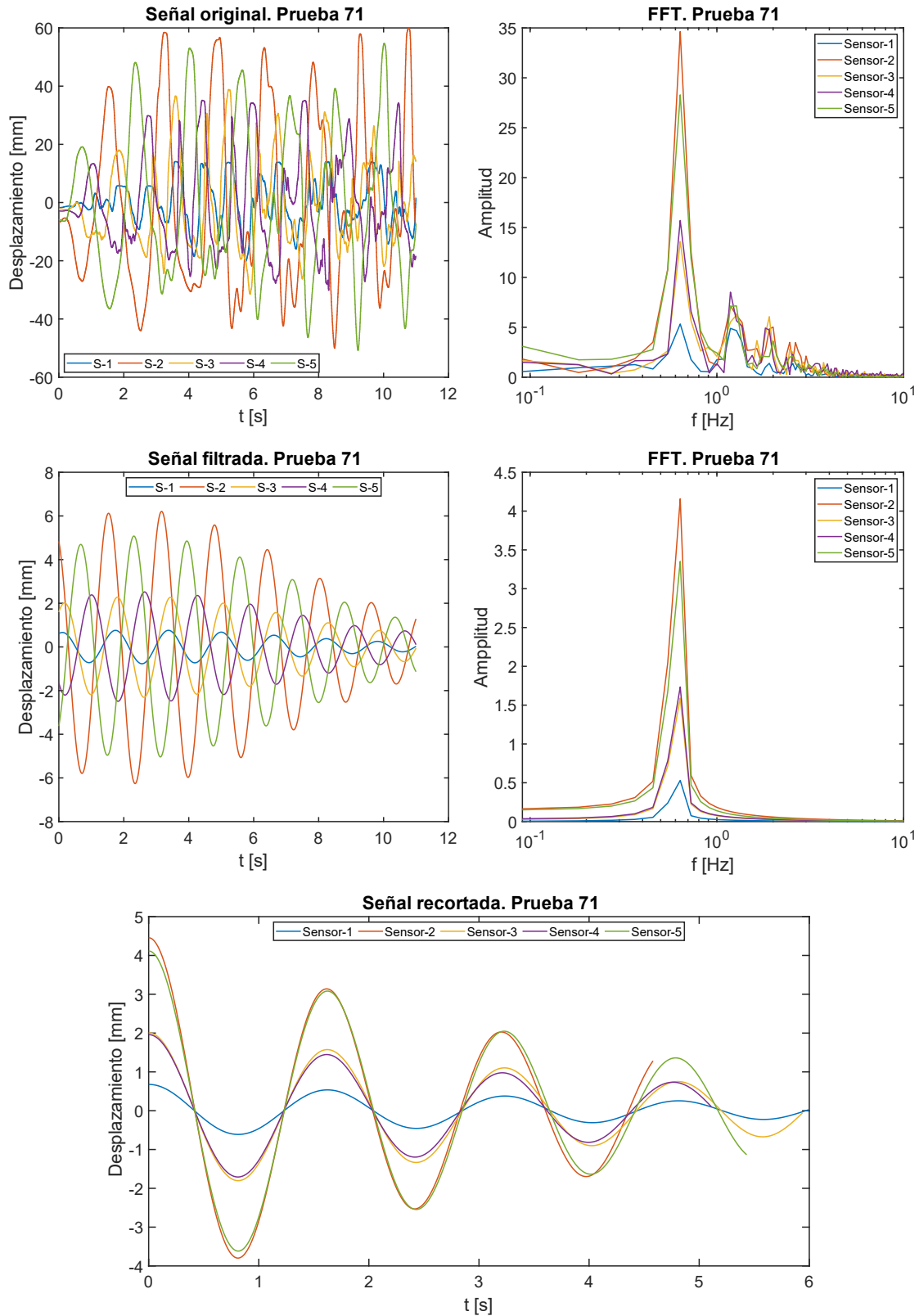


Ilustración 161. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 71, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

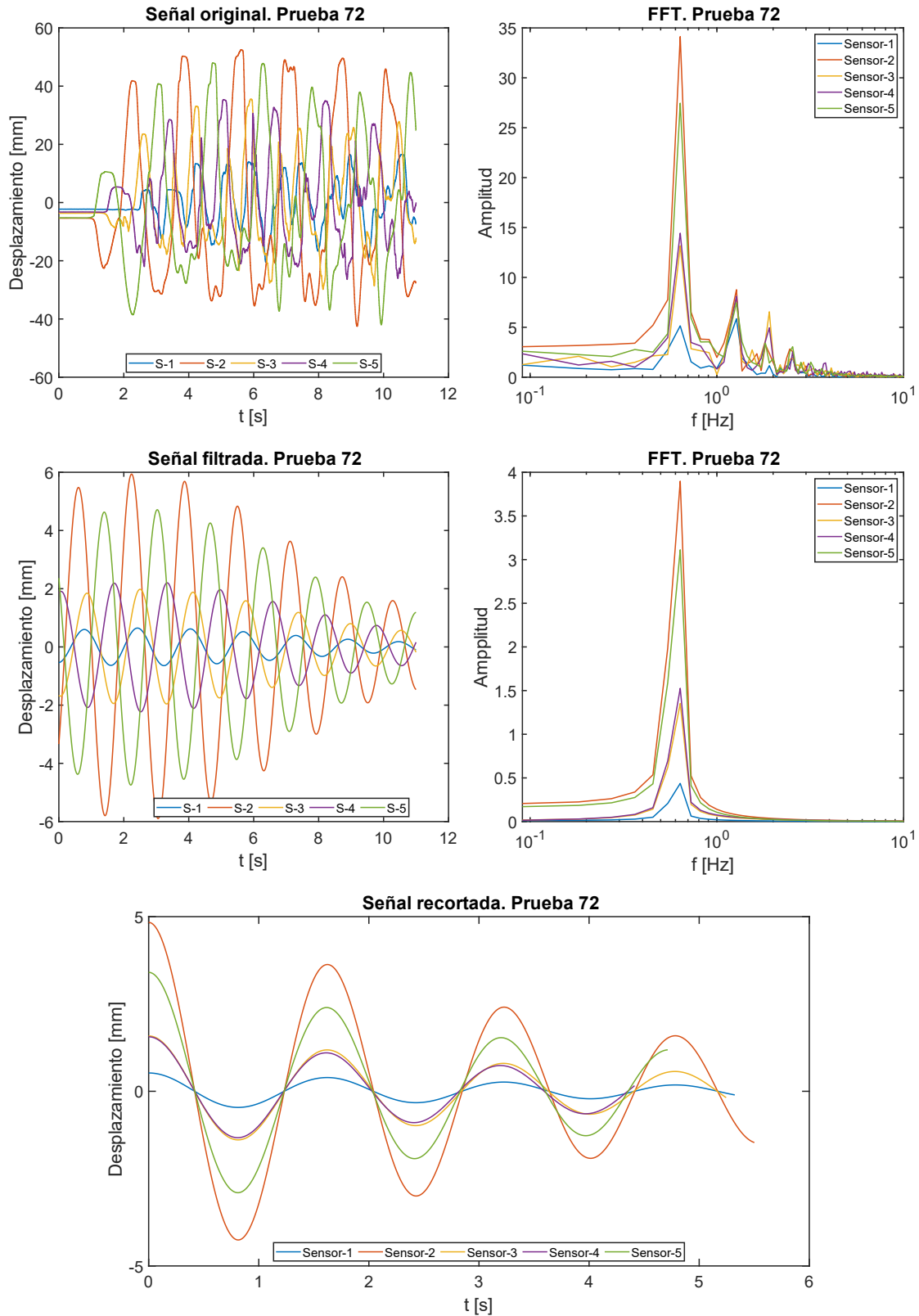


Ilustración 162. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 72, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

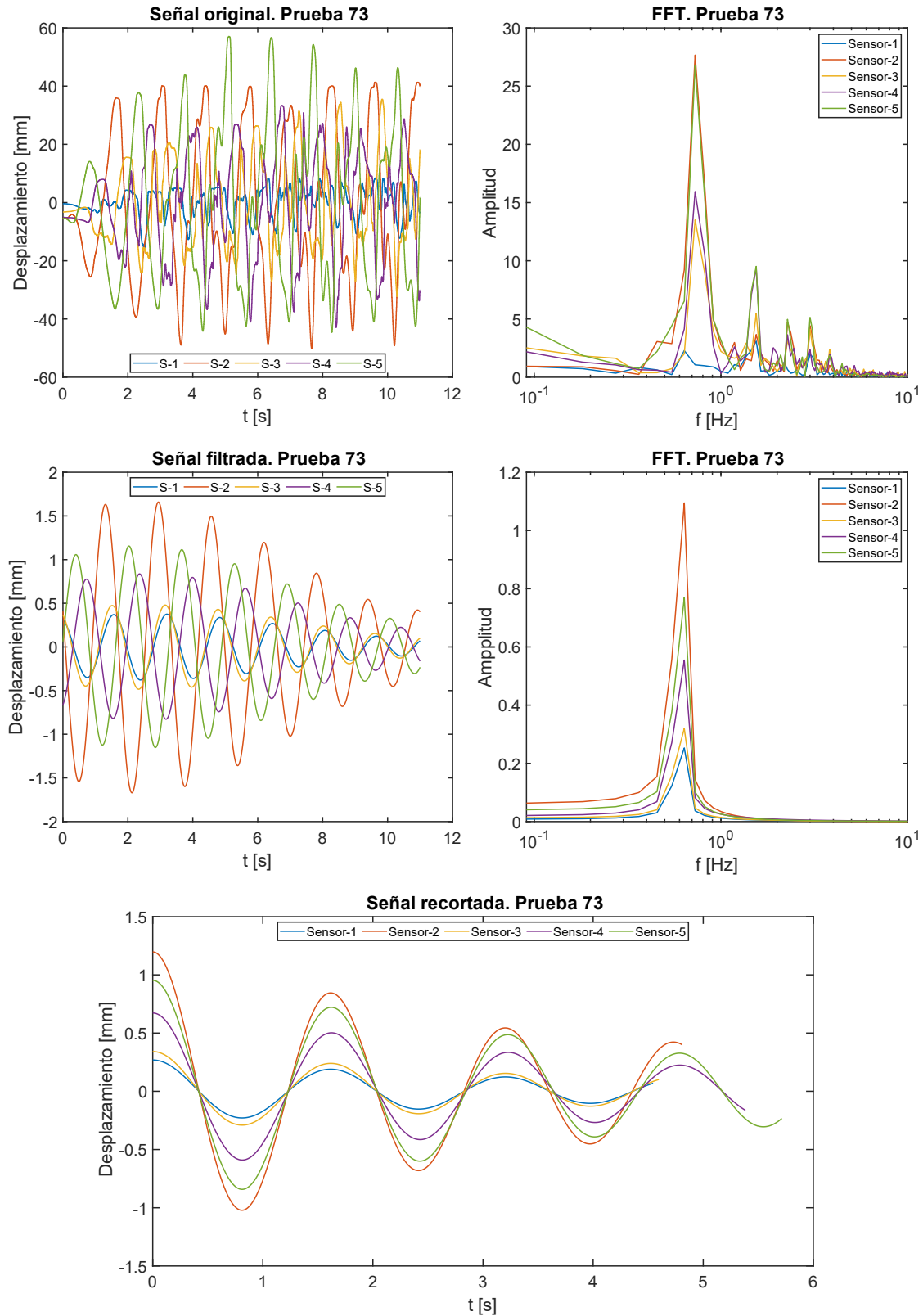


Ilustración 163. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 73, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

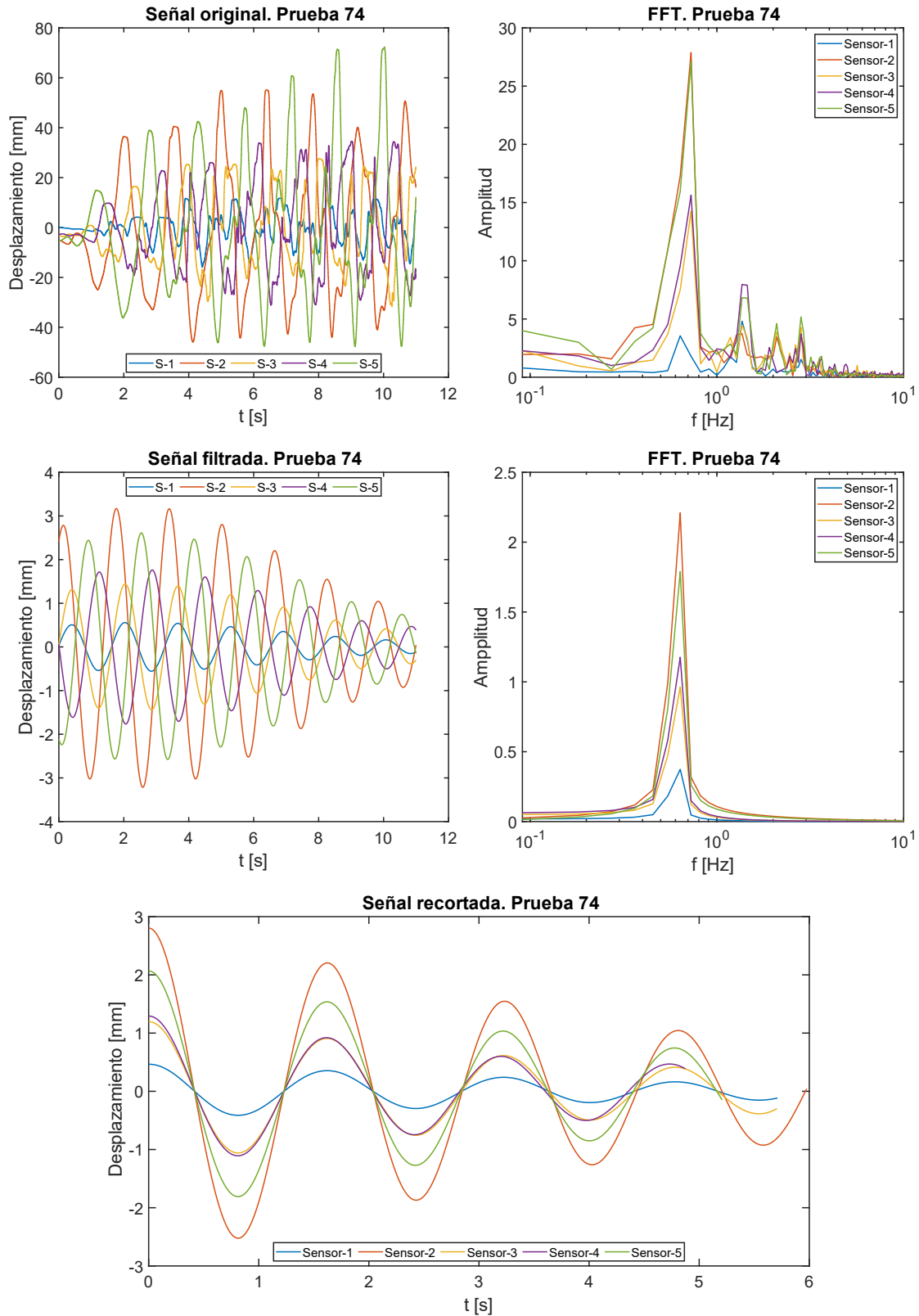


Ilustración 164. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 74, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

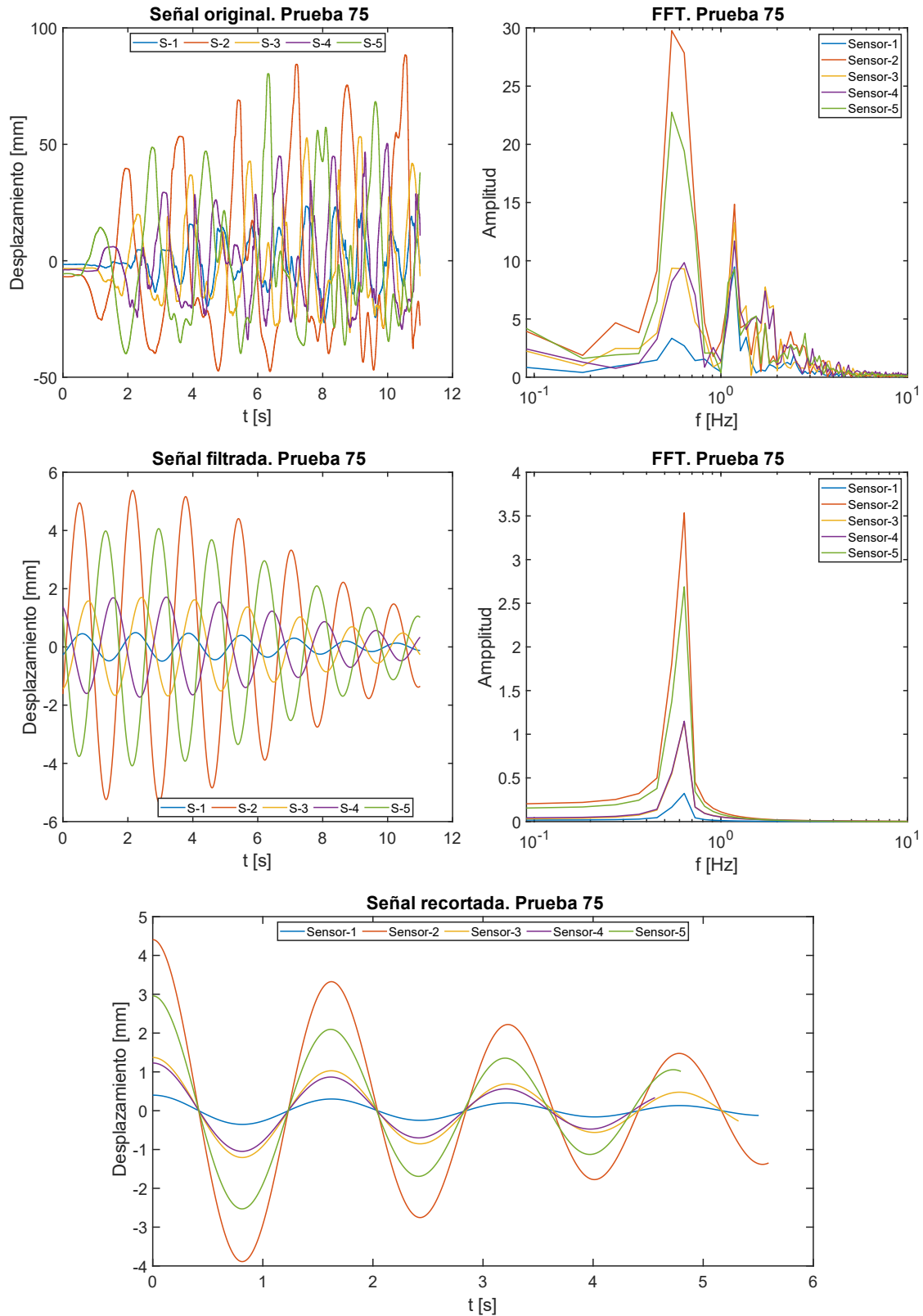


Ilustración 165. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 75, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

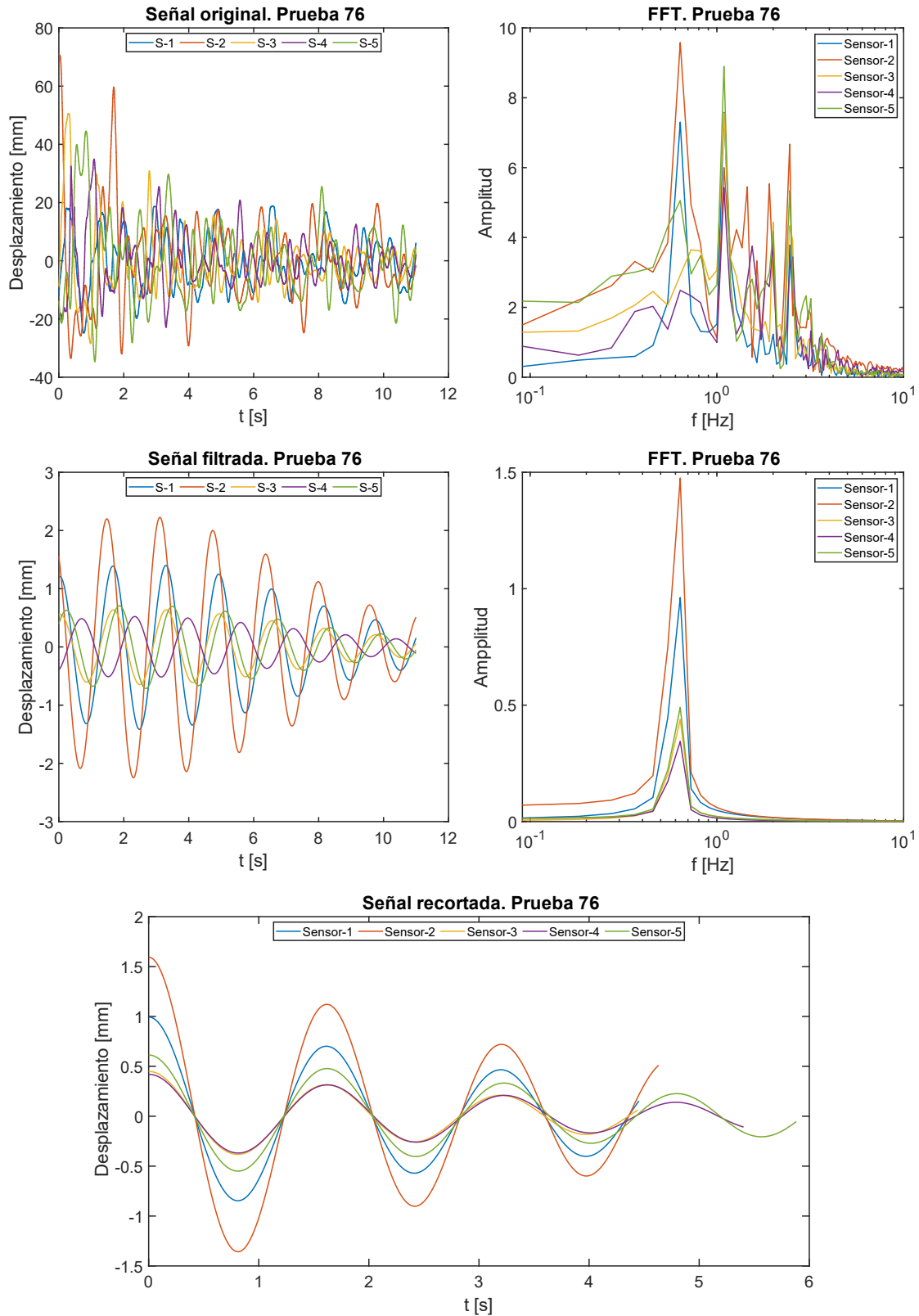


Ilustración 166. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 76, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

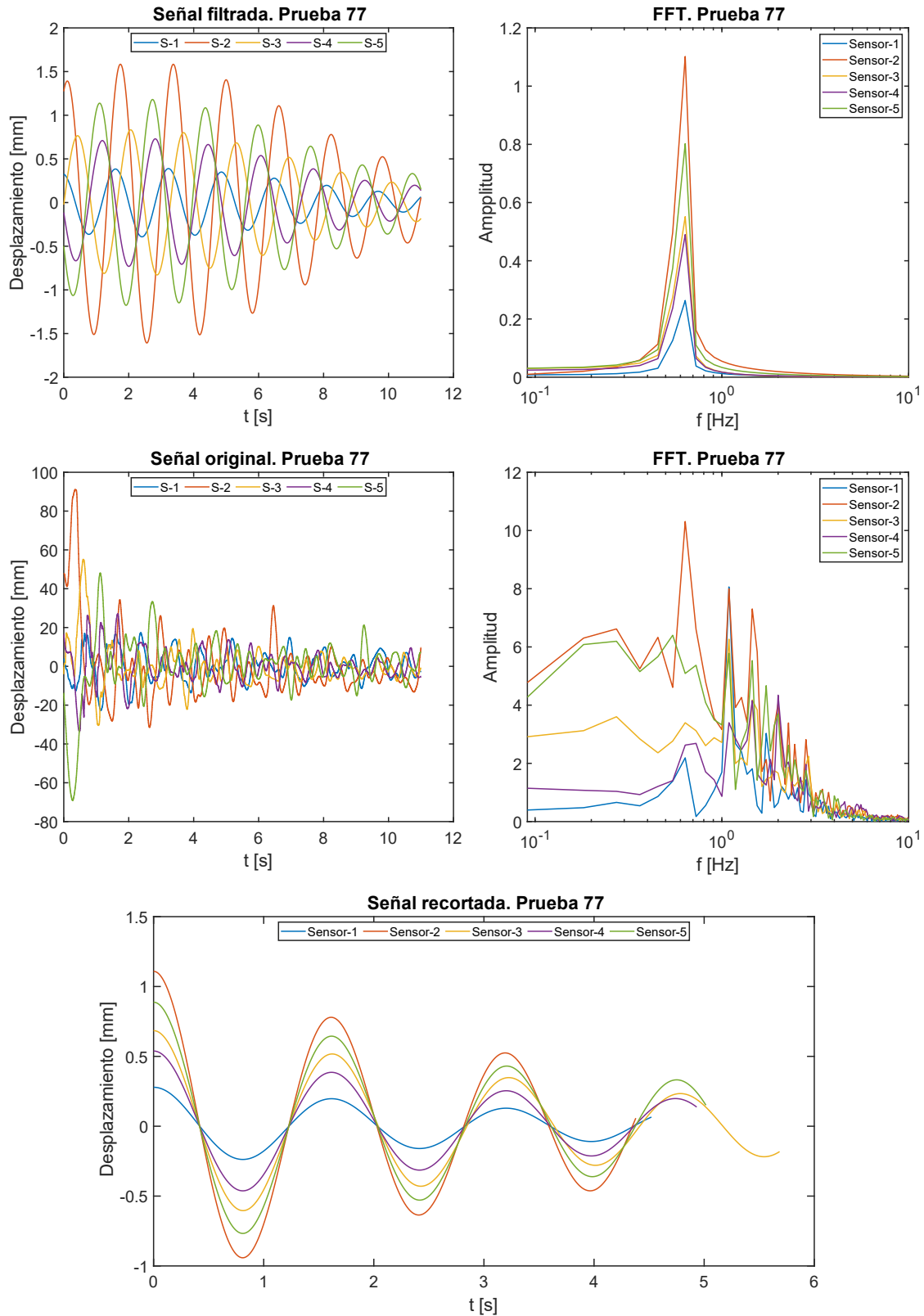


Ilustración 167. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 77, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

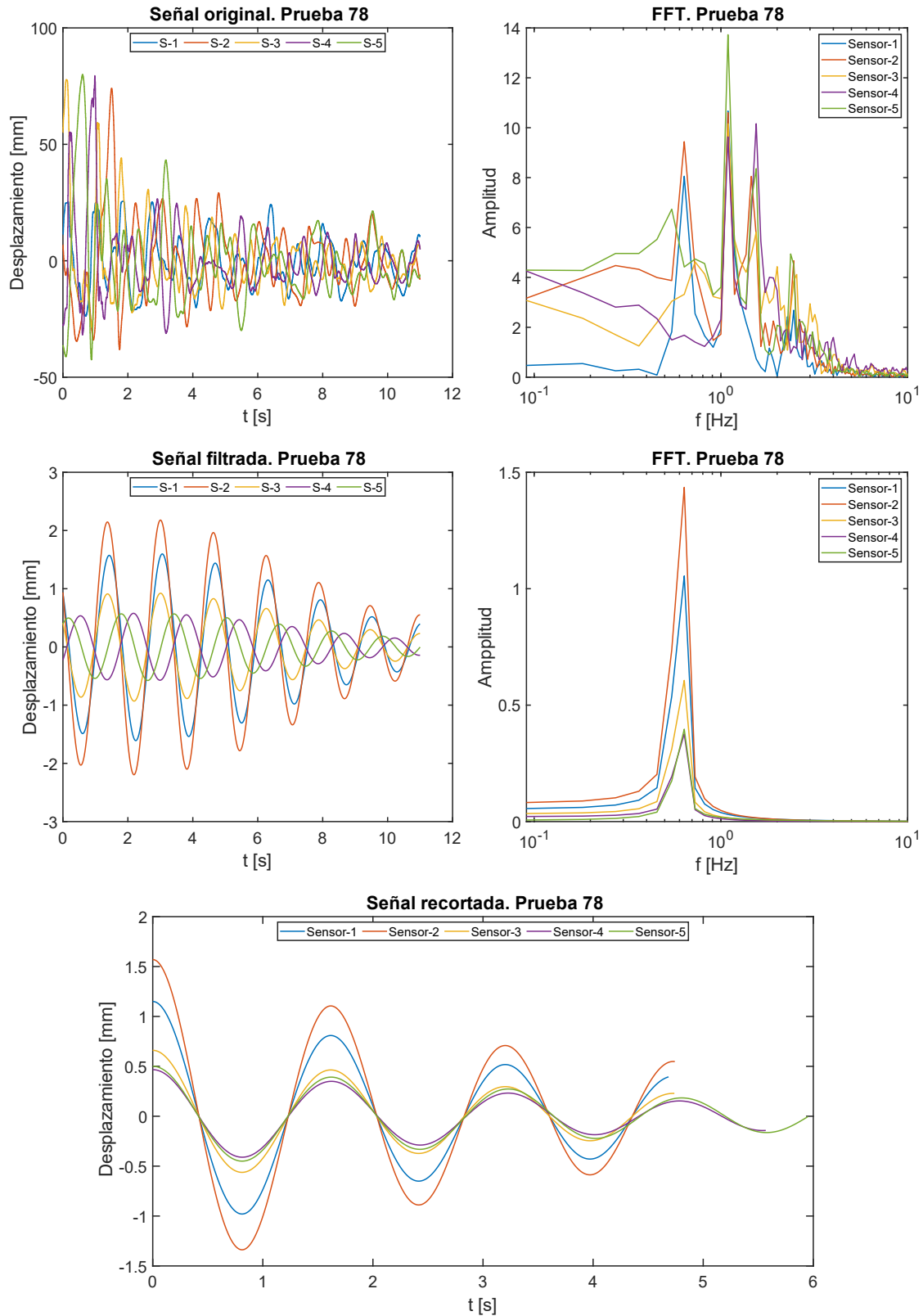


Ilustración 168. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 78, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

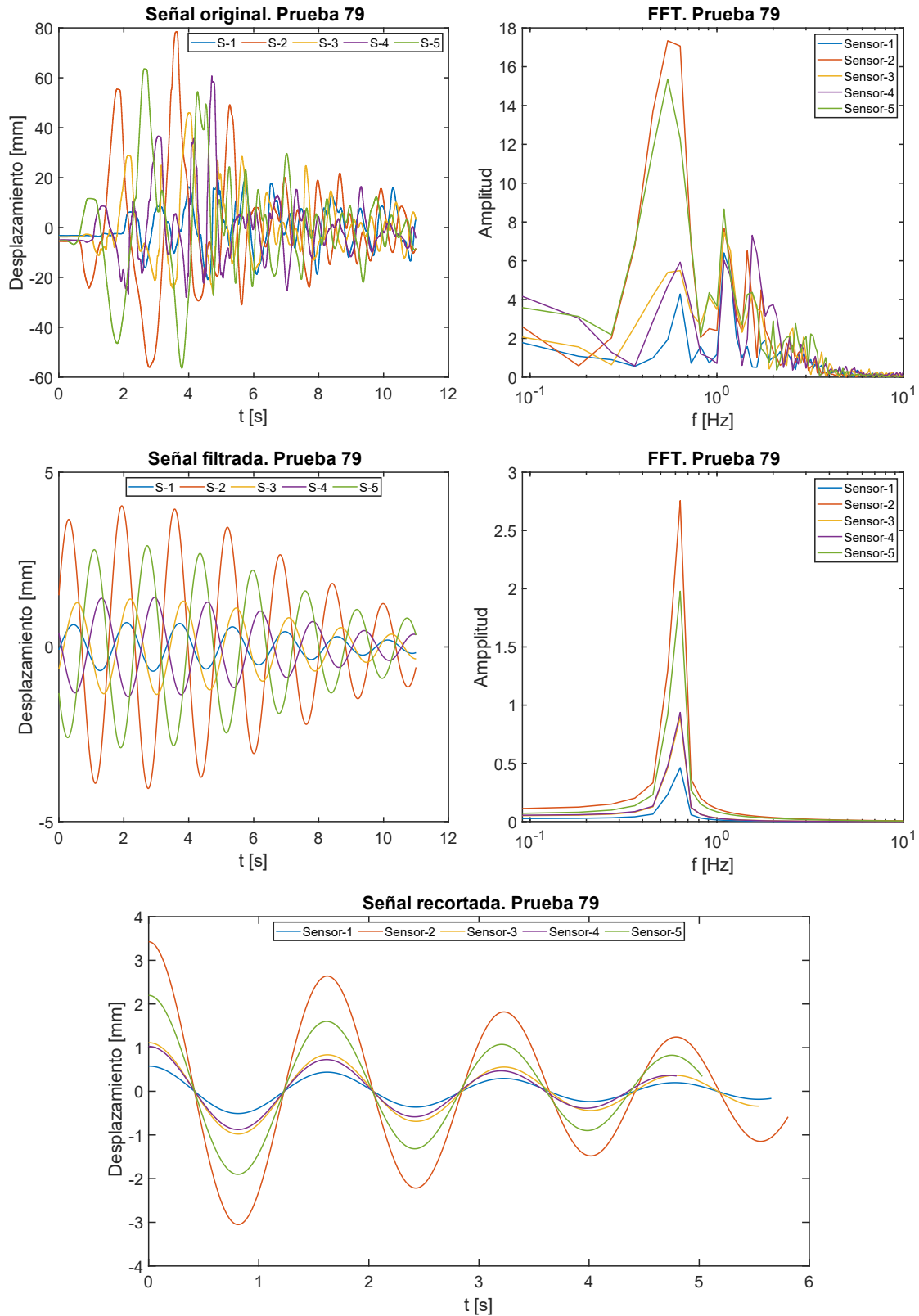


Ilustración 169. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 79, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

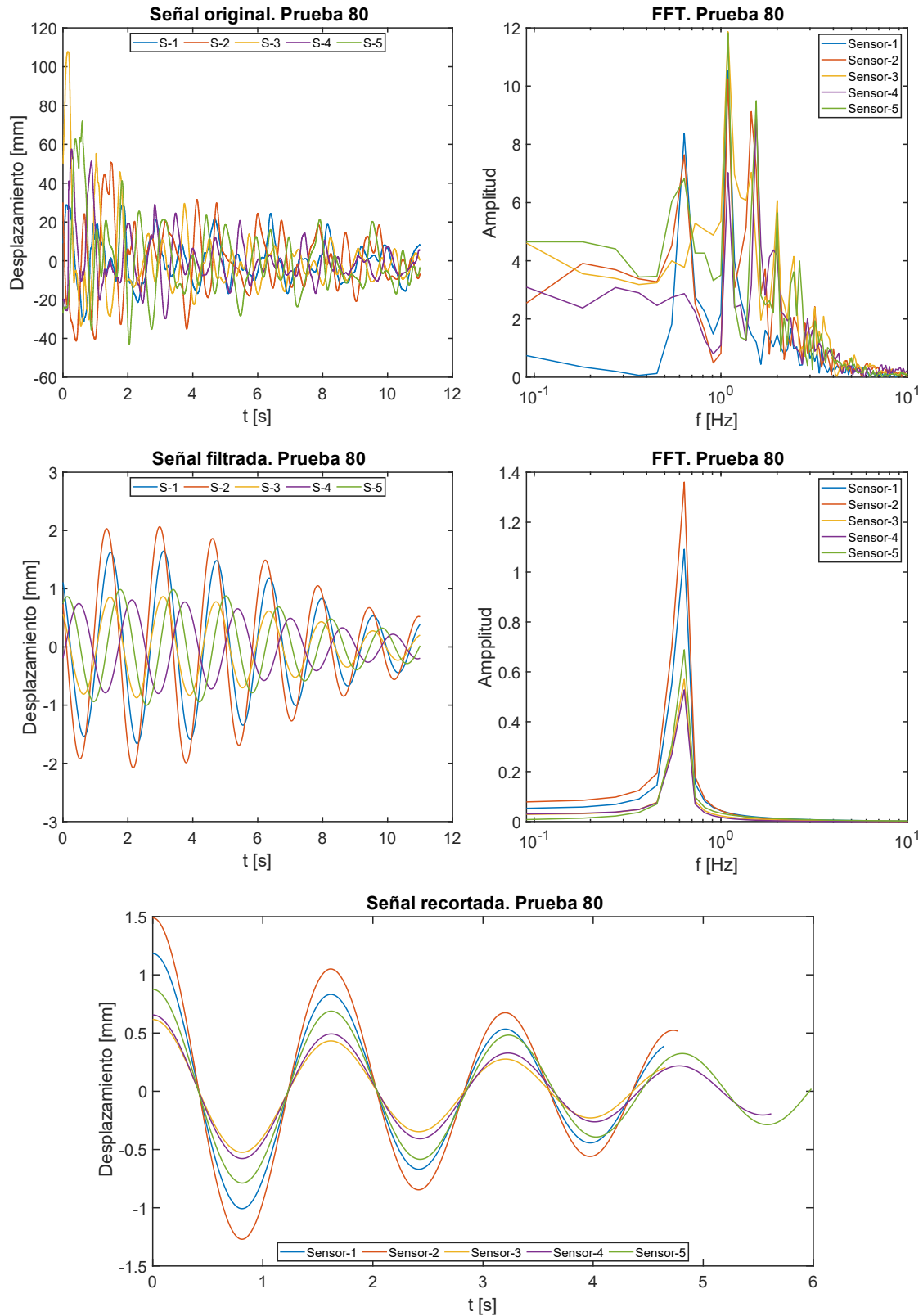


Ilustración 170. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 80, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

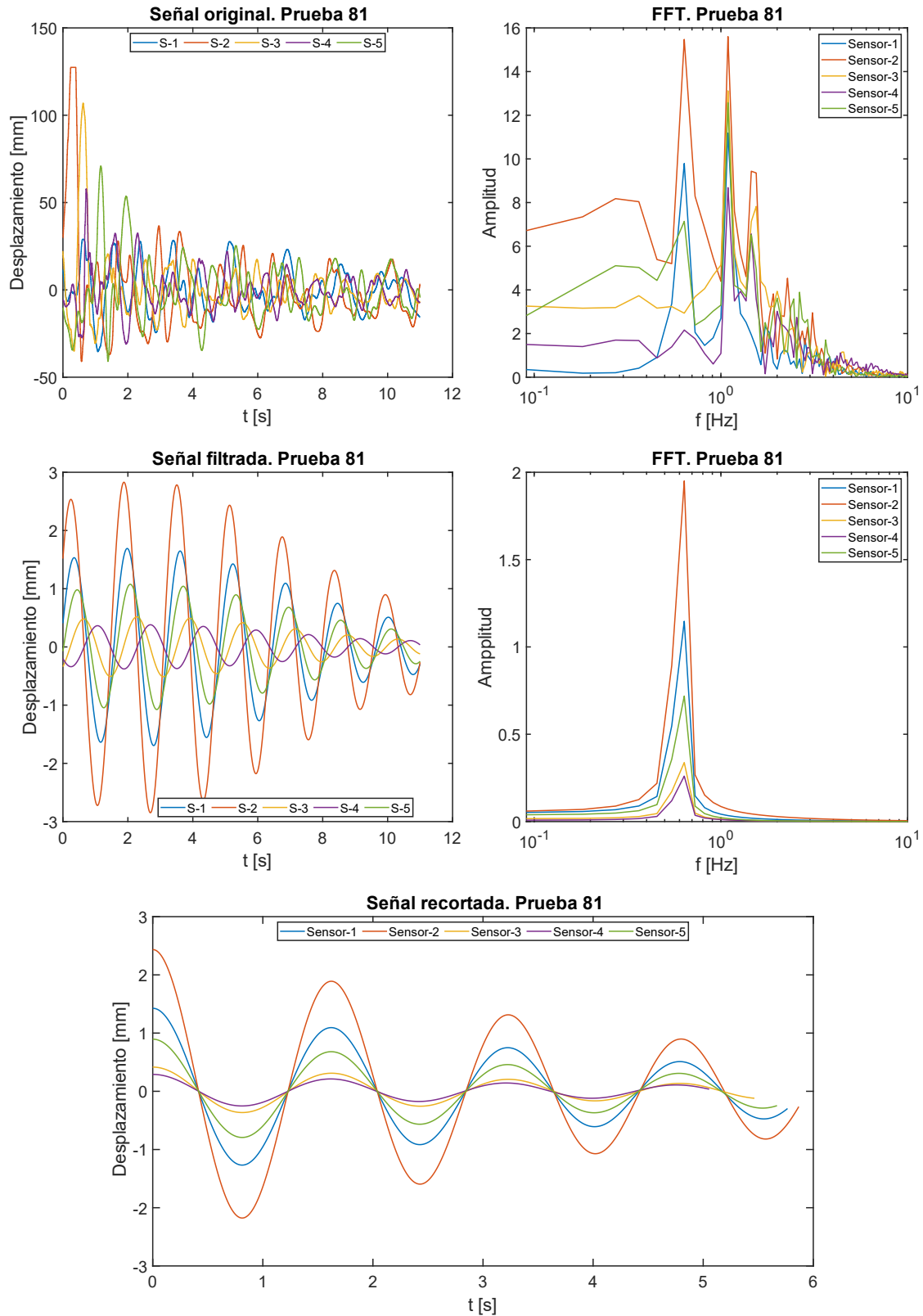


Ilustración 171. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 81, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

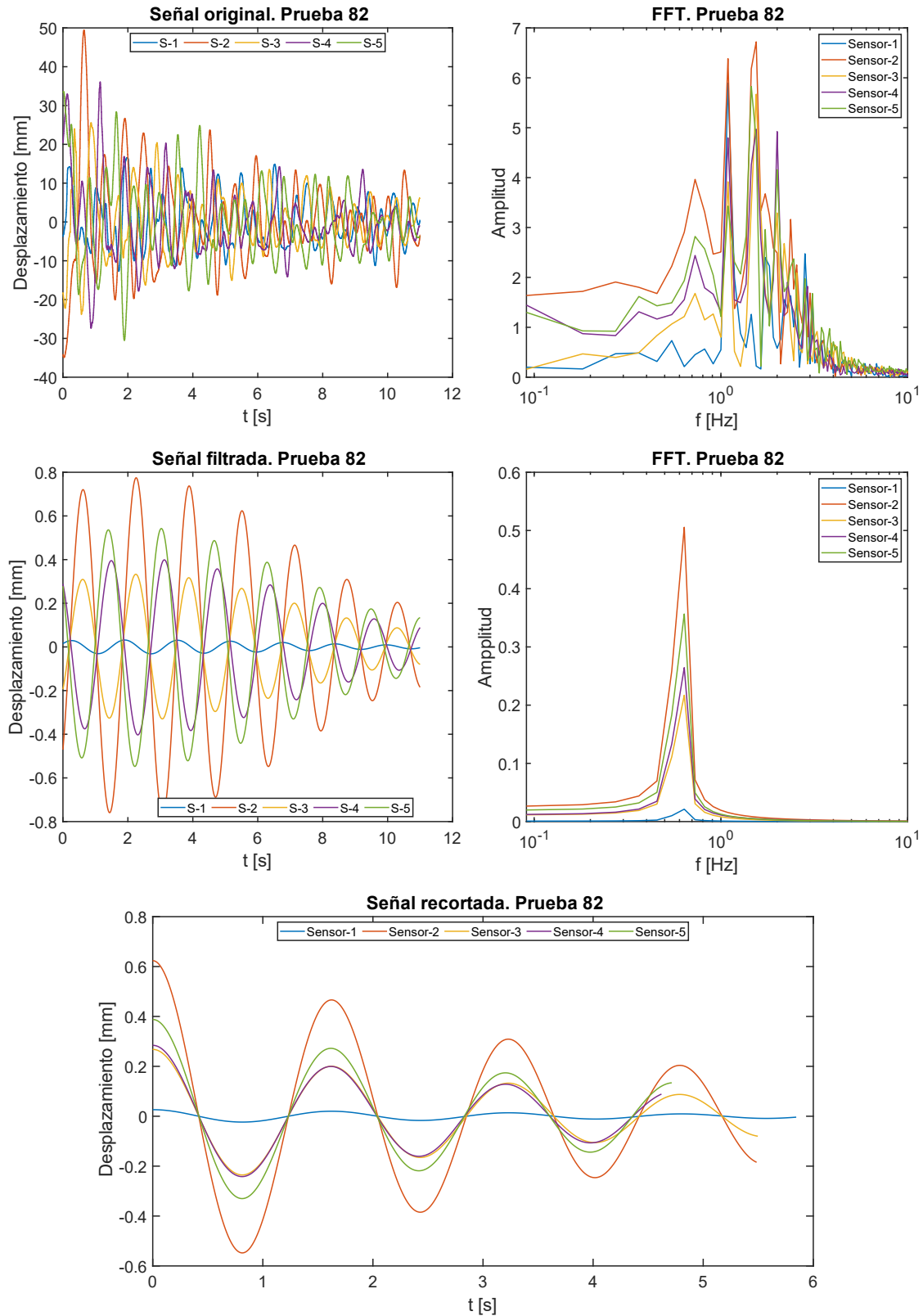


Ilustración 172. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 82, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

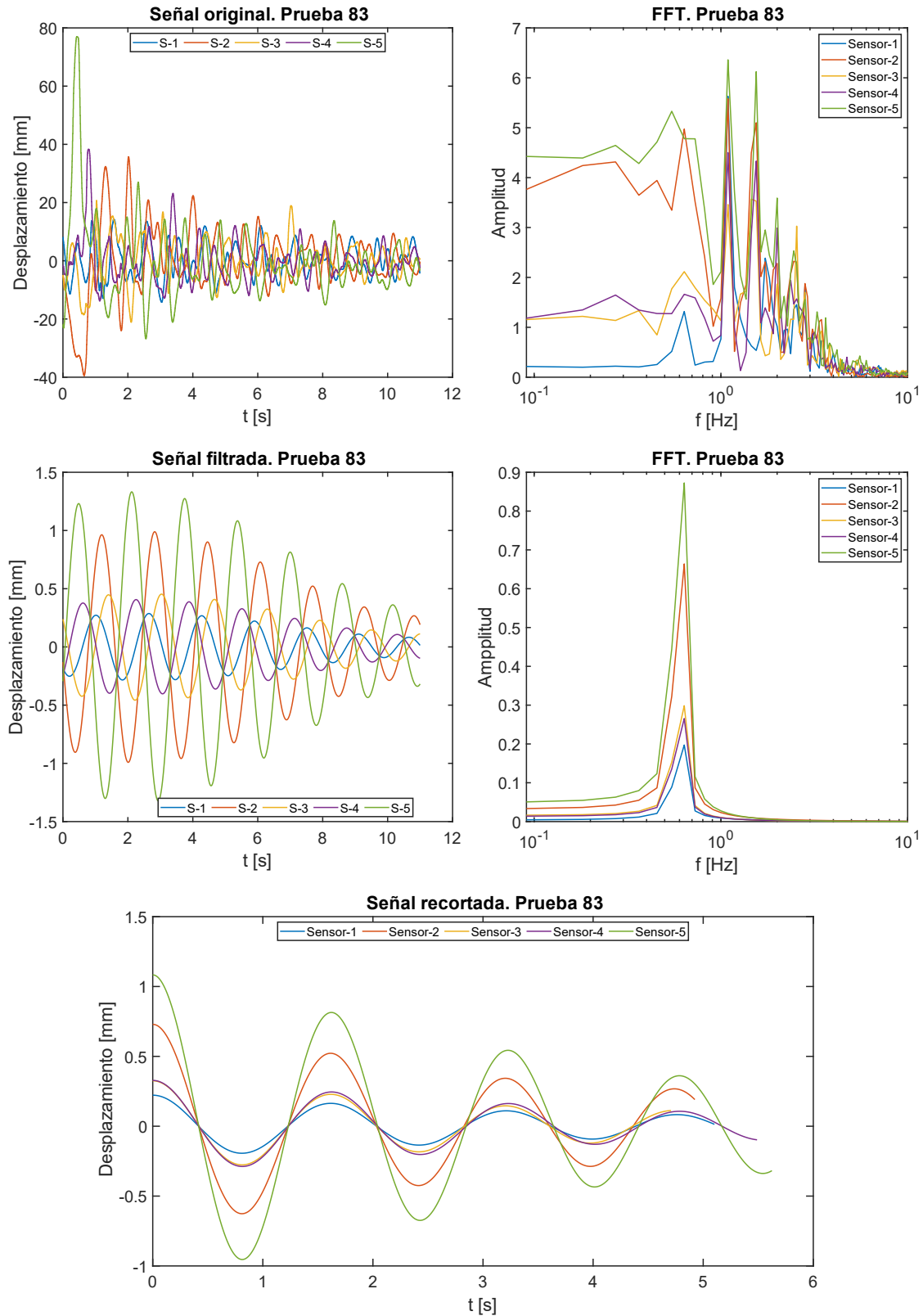


Ilustración 173. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 83, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

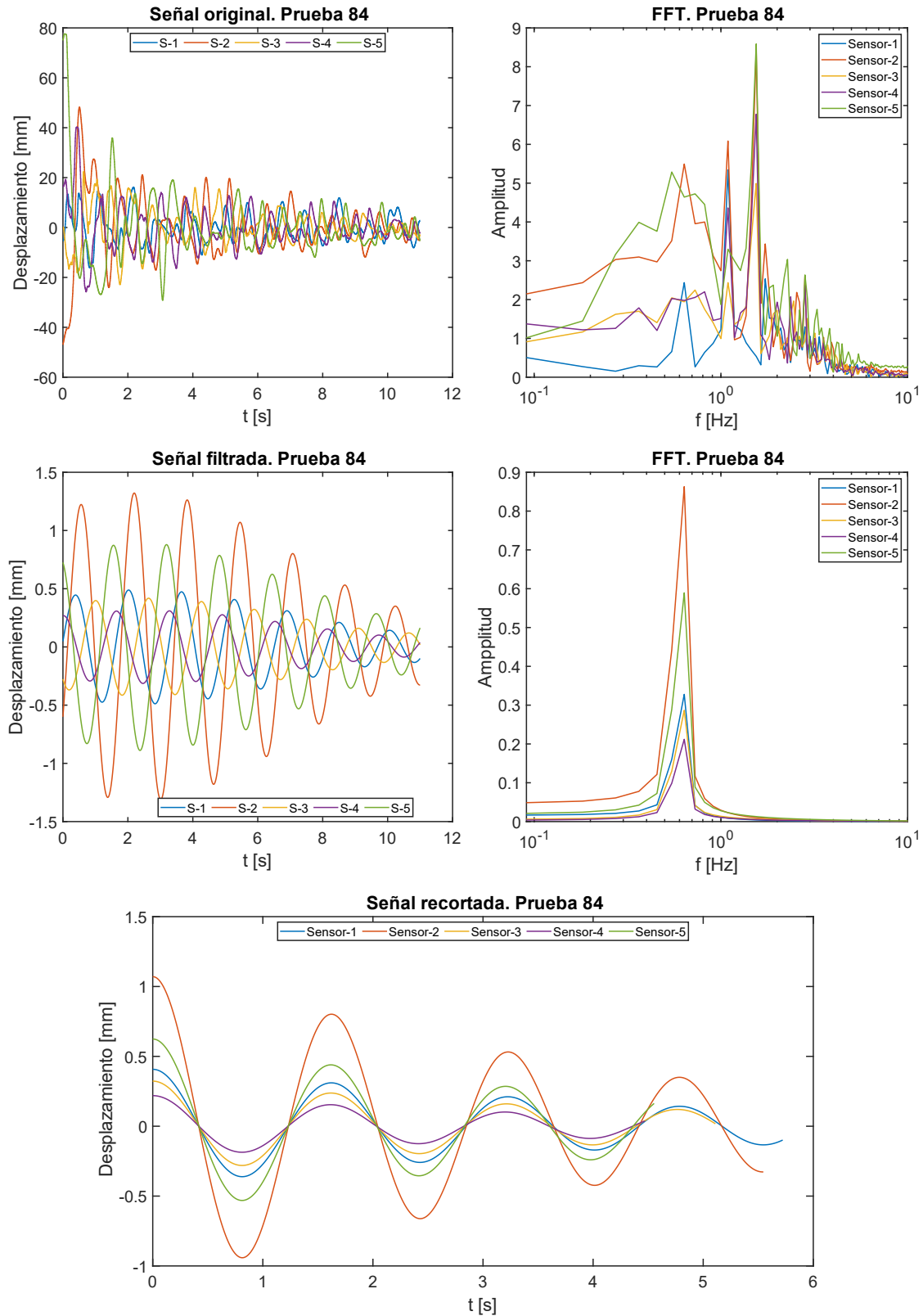


Ilustración 174. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 84, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

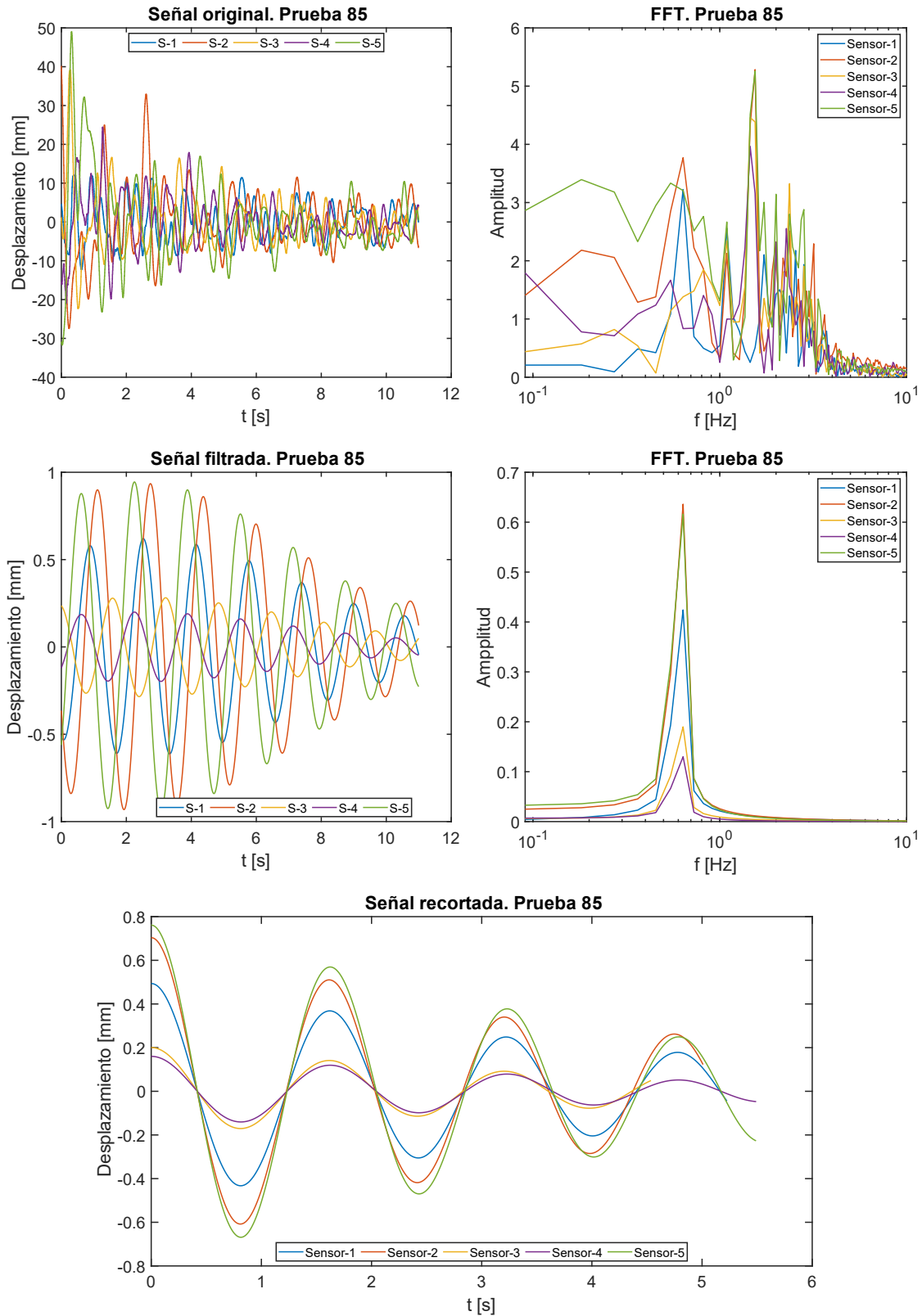


Ilustración 175. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 85, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

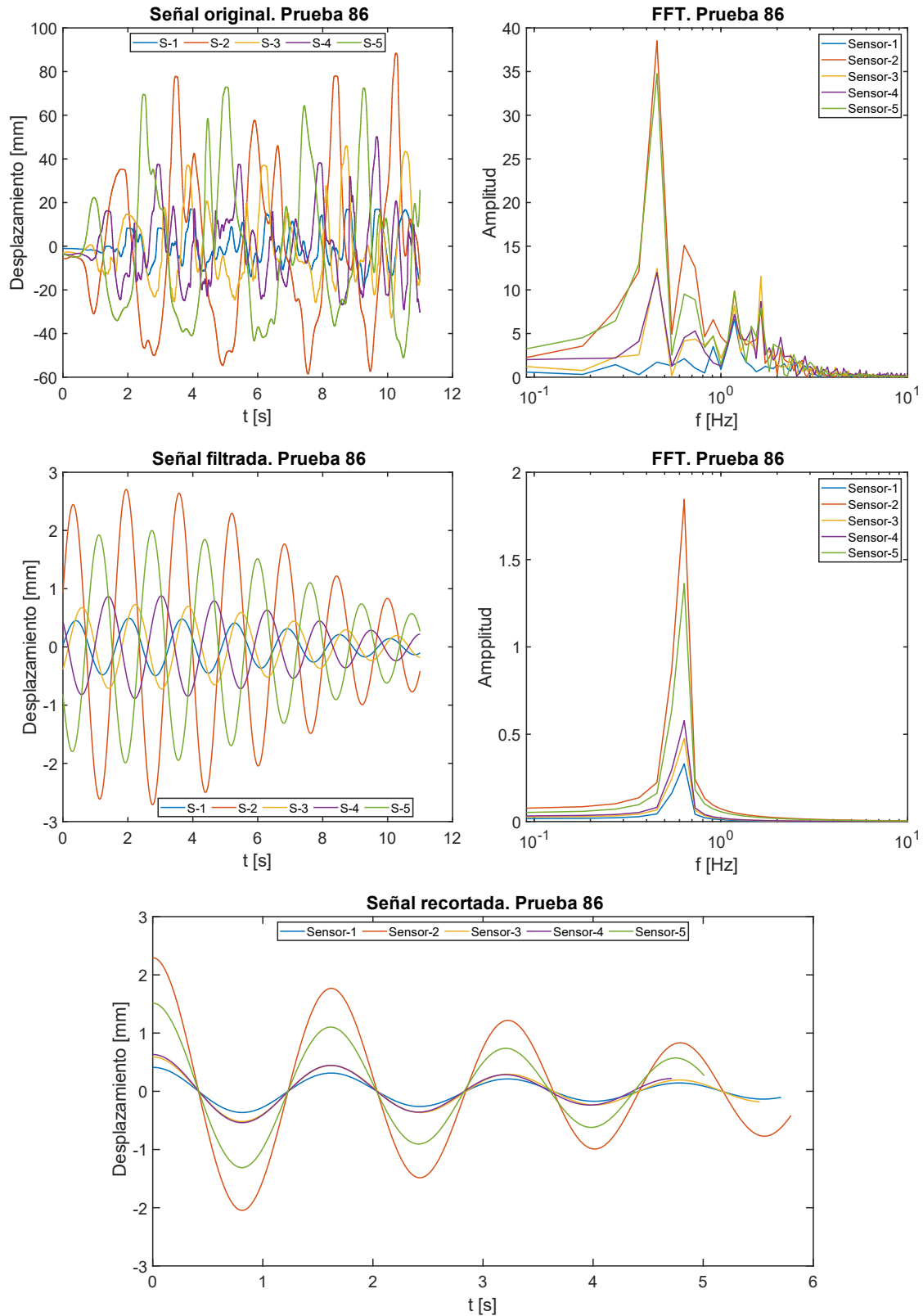


Ilustración 176. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 86, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

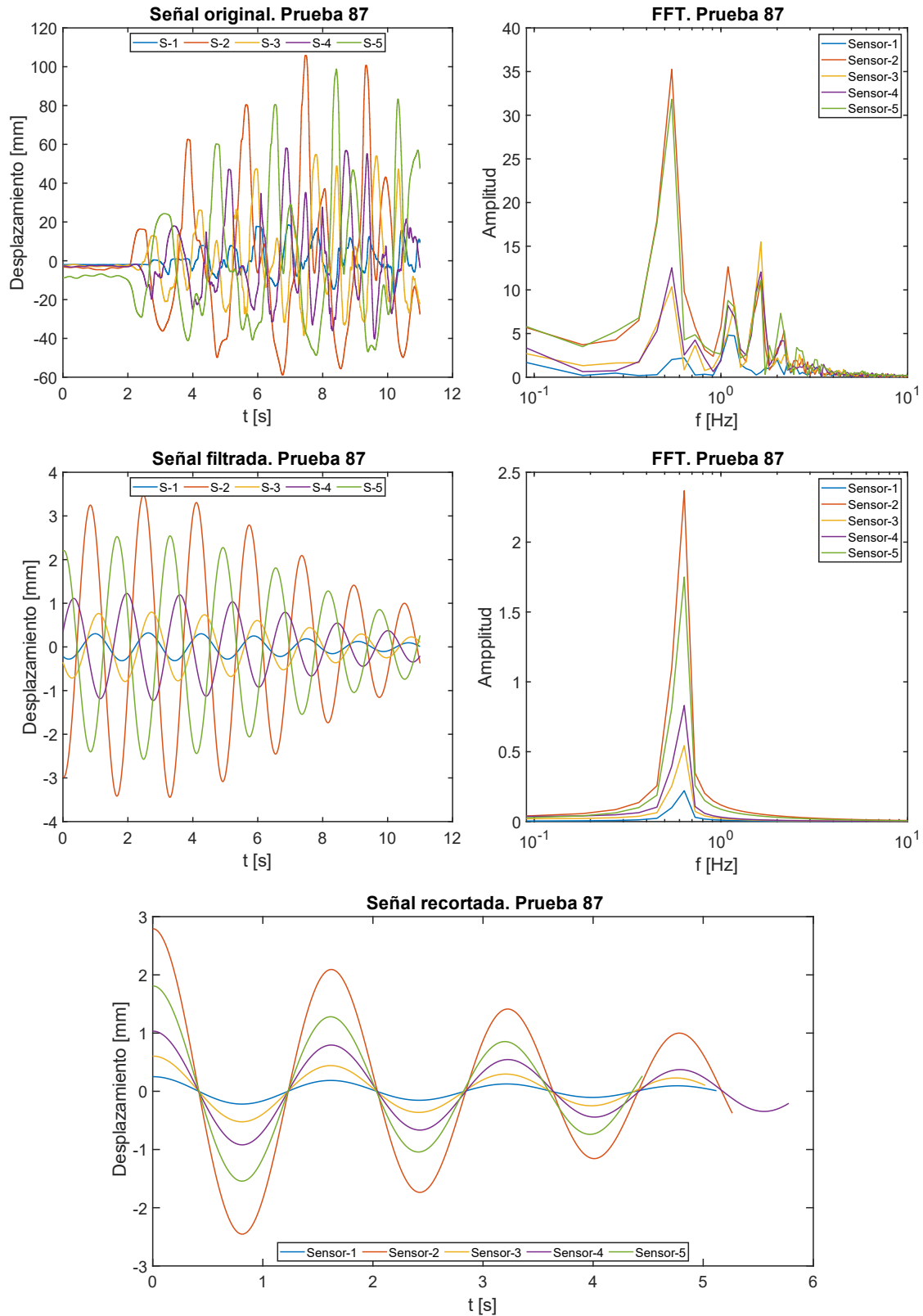


Ilustración 177. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 87, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

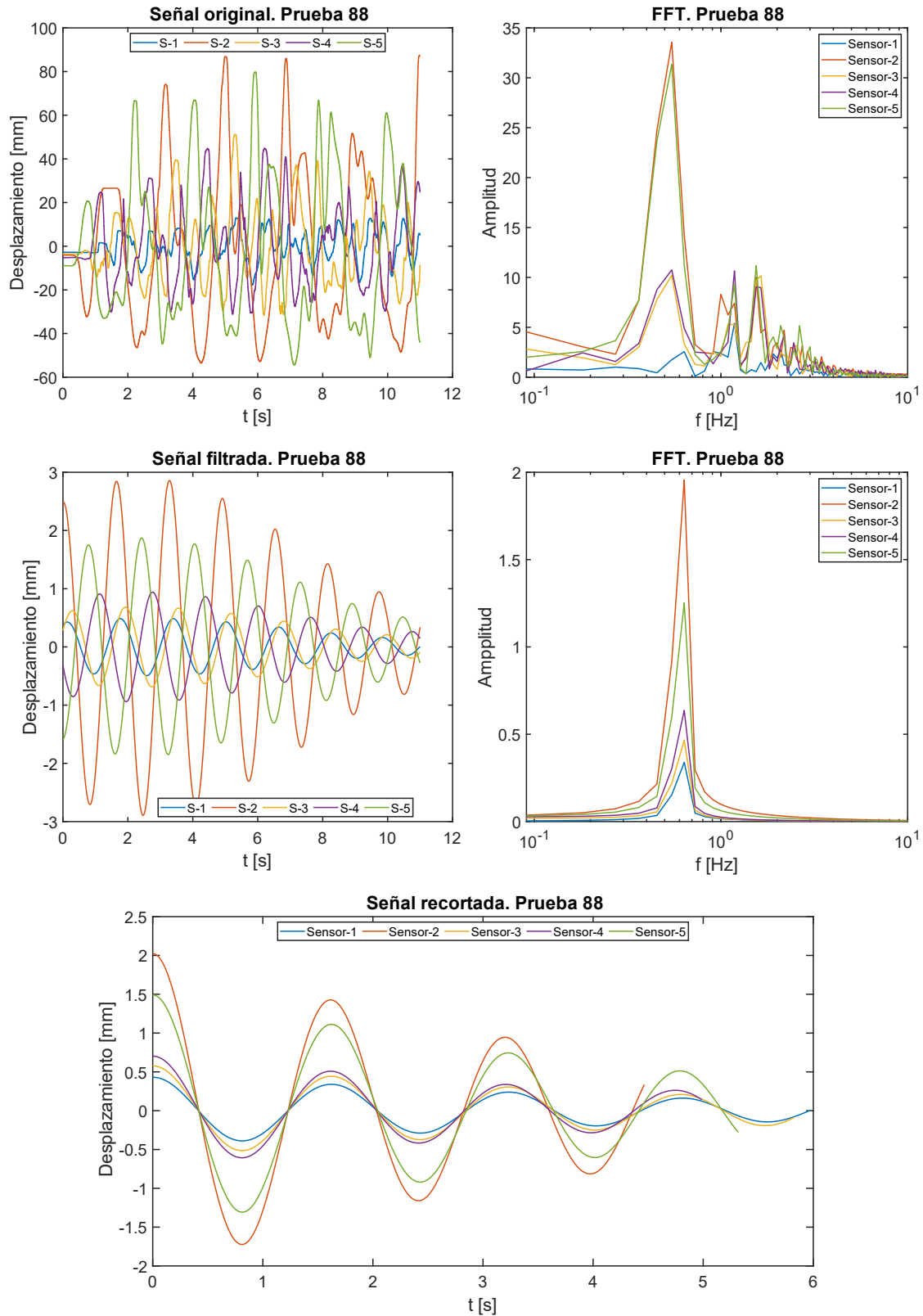


Ilustración 178. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 88, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

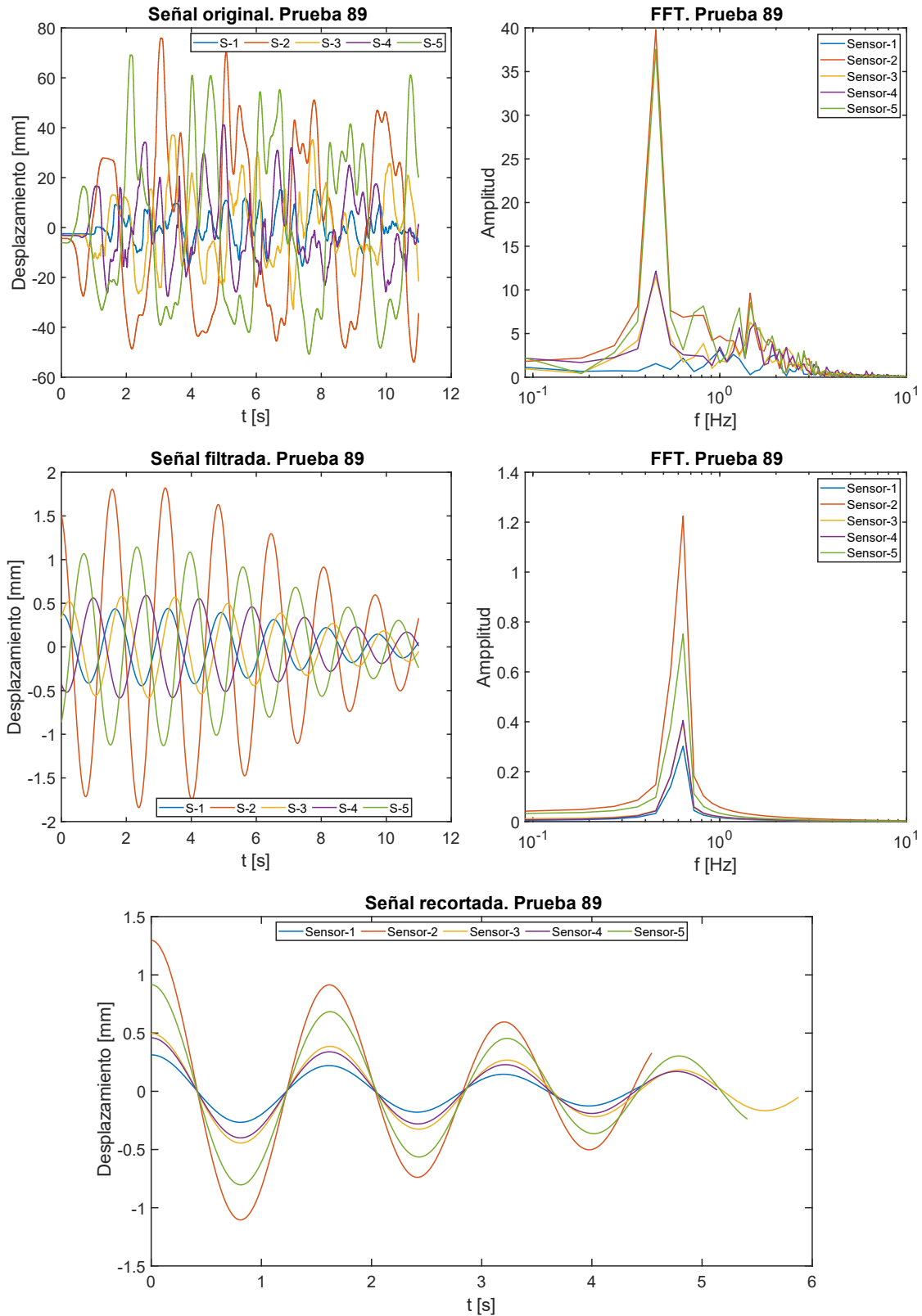


Ilustración 179. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 89, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.

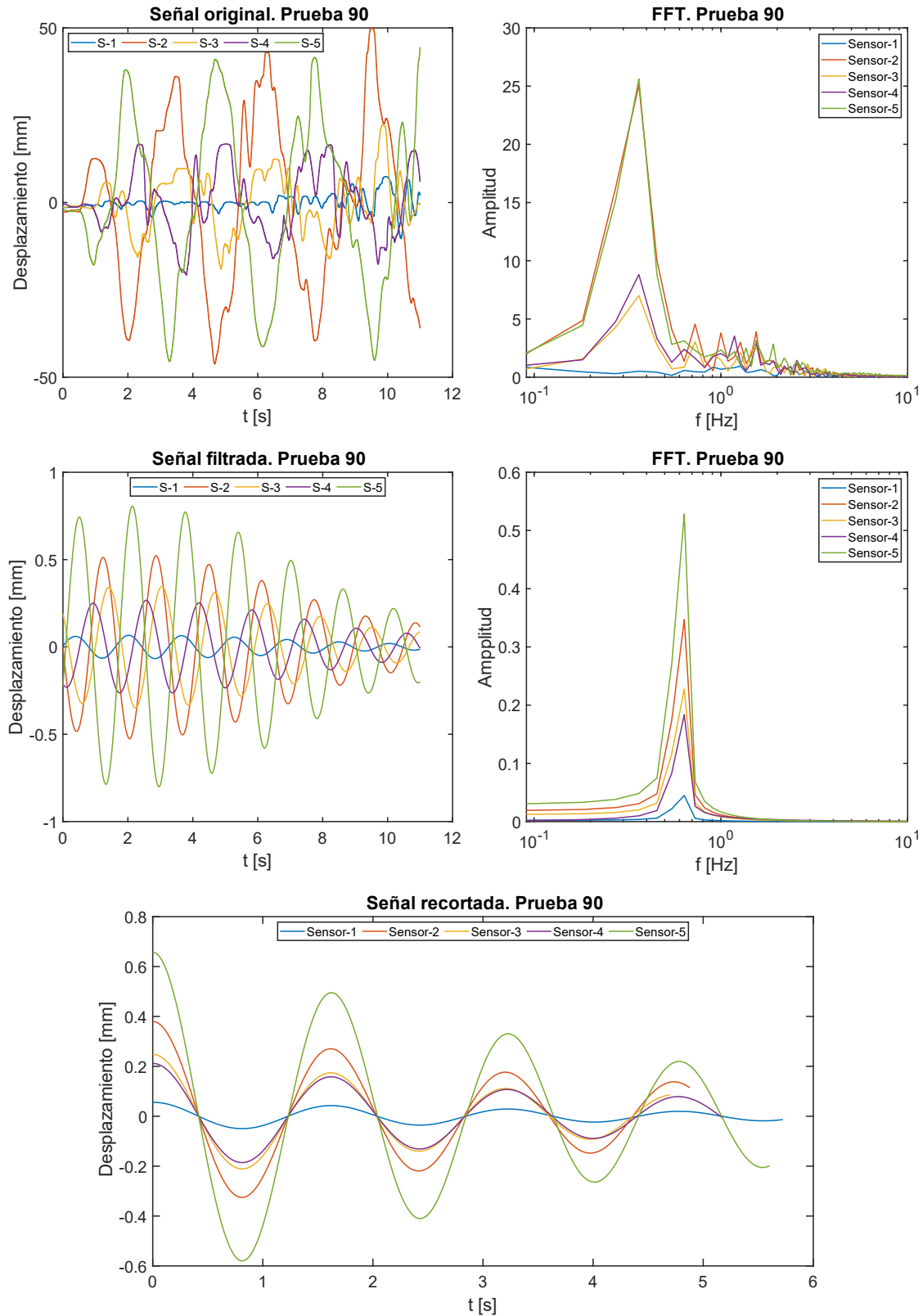


Ilustración 180. Gráficas obtenidas a través del procesamiento de las señales para la prueba 90, mediante el método de sensores de medición de tirante de agua.