



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**EVALUACIÓN DE UNA PROPUESTA DE INSTRUMENTACIÓN PARA SHIPLOADER
MEDIANTE PROTOTIPO A ESCALA Y MODELACIÓN NUMÉRICA**

POR

Constanza Denis Cares Fernández

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

Profesor Guía
Víctor Aguilar

Profesional Supervisor
Sebastián Calderón

Abril 2025
Concepción (Chile)

© 2025 Constanza Denis Cares Fernández

© 2025 Constanza Denis Cares Fernández

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

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mis padres, por ser mi pilar fundamental durante todos estos años. A mi hermana, por estar siempre presente en cada momento importante.

A Martin, por su cariño y comprensión, que fue invaluable durante todo este proceso.

En eterna gratitud por su constante apoyo

Agradecimientos

Expreso mi sincero agradecimiento a la empresa LIND, donde realicé mi práctica profesional, por brindarme la oportunidad de profundizar y ampliar mis conocimientos en el área y tema de esta memoria. Asimismo, extiendo mi gratitud a mi profesor guía, señor Víctor Aguilar Vidal, por su constante apoyo, disposición y dedicación a lo largo de este semestre académico, así como por sus valiosos aportes e inestimable guía durante todo este proceso.

Resumen

El transporte de minerales en puertos es clave para la industria minera, y los *shiploaders* desempeñan un papel fundamental en este proceso. Sin embargo, estos equipos enfrentan cargas dinámicas y condiciones operativas que pueden causar daños estructurales con el tiempo. Este trabajo tiene como objetivo evaluar la efectividad de un sistema de instrumentación propuesto para detectar daños en un *shiploader*, utilizando un modelo a escala instrumentado y simulación numérica. Los objetivos incluyen desarrollar un prototipo a escala, instrumentarlo con sensores, y validar su comportamiento mediante modelación con elementos finitos (MEF).

En este estudio se utilizan dos enfoques de detección de daño: (1) un enfoque basado en física y (2) un enfoque basado en los datos. La metodología se basó en la construcción de un prototipo a escala con piezas *Meccano*, adaptado a partir de un diseño conceptual, e instrumentado con *strain gauges*, que registran deformaciones, y un acelerómetro, que se utiliza como inclinómetro para informar la inclinación del brazo. Se desarrolló un modelo numérico en SAP2000, que replica la condición operativa y permite comparar los resultados experimentales con los simulados. Para evaluar la efectividad de la instrumentación, se definieron tres escenarios de daño estructural simulados, los cuales son el debilitamiento en las diagonales y aflojamiento de conexiones, e impactos en el brazo y la torre. Los datos experimentales fueron procesados aplicando factores de conversión y la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para eliminar ruido. Se utilizaron modelos en Autodesk Inventor para interpretar las lecturas de deformación en términos de fuerza y momento flector.

Los resultados mostraron que, si bien los sensores detectaron daños simulados, la propuesta de instrumentación es mejorable ya que no considera instrumentar las zonas de mayor esfuerzo. El enfoque basado en los datos demostró ser más fiable y aplicable que el enfoque basado en la física, debido a las limitaciones propias de modelos numéricos. Se concluye que, aunque el modelo físico escalado presentó deficiencias, los datos obtenidos fueron valiosos para entender el comportamiento estructural de la estructura real. Se recomienda ampliar la instrumentación tal que se pueda detectar y desagregar la acción de fuerza axial y flexión fuera del plano en miembros críticos del *shiploader*.

Abstract

The transportation of minerals at ports is key for the mining industry, and shiploaders play a fundamental role in this process. However, these machines face dynamic loads and operational conditions that can cause structural damage over time. The objective of this work is to evaluate the effectiveness of a proposed instrumentation system for detecting damage in a shiploader, using an instrumented scale model and numerical simulation. The goals include developing a scale prototype, instrumenting it with sensors, and validating its behavior through finite element modeling (FEM).

This study uses two damage detection approaches: (1) a physics-based approach and (2) a data-driven approach. The methodology was based on constructing a scale prototype using Meccano parts, adapted from a conceptual design, and instrumented with strain gauges to measure deformations, and an accelerometer used as an inclinometer to report the tilt of the arm. A numerical model was developed in SAP2000, which replicates the operational condition and allows comparing experimental results with simulated ones. To assess the effectiveness of the instrumentation, three simulated structural damage scenarios were defined: weakening of the diagonals and loosening of connections, as well as impacts on the arm and tower. The experimental data were processed using conversion factors and the Fast Fourier Transform (FFT) to remove noise. Models in Autodesk Inventor were used to interpret the deformation readings in terms of force and bending moment.

The results showed that, while the sensors detected simulated damage, the proposed instrumentation can be improved, as it does not consider instrumenting areas of higher stress. The data-driven approach proved to be more reliable and applicable than the physics-based approach due to the limitations of numerical models. It is concluded that, although the scaled physical model had shortcomings, the obtained data were valuable for understanding the structural behavior of the actual structure. It is recommended to expand the instrumentation so that axial force and out-of-plane bending actions can be detected and broken down in critical members of the shiploader.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivo general	2
1.3 Objetivos específicos.....	2
1.4 Metodología de trabajo.....	2
1.5 Principales resultados y conclusiones.....	3
1.6 Organización del documento	3
CAPÍTULO 2: MONITOREO EN LA INGENIERÍA CIVIL.....	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Marco teórico.....	4
2.2.1 Principios del monitoreo estructural.....	4
2.2.2 Axiomas del monitoreo estructural.....	5
2.2.3 Sensores y sistema de adquisición de datos.....	6
2.3 Estado-del-arte.....	9
2.3.1 Enfoque basado en la física	10
2.3.2 Enfoque basado en datos	10
2.3.3 Comparación enfoques	12
2.3.4 Prototipaje en la investigación.....	12
2.3.5 SHM en entornos marinos	13
2.4 Conclusiones.....	14
CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA	15
3.1 Introducción.....	15
3.2 Construcción e instrumentación del prototipo.....	15
3.2.1 Análisis dimensional.....	15
3.2.2 Construcción del prototipo	16
3.2.3 Instrumentación del prototipo.....	18
3.3 Modelación del comportamiento del prototipo con elementos finitos	22
3.4 Evaluación de la efectividad de la instrumentación	26
3.4.1 Levantamiento de información.....	26
3.4.2 Estructura y base de datos	28
3.4.3 Filtros.....	28

3.4.4	Comparación de comportamiento de modelo de elementos finitos y prototipo	29
3.5	Conclusiones.....	30
CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES		32
4.1	Introducción.....	32
4.2	Desarrollo y validación del modelo escalado e instrumentado del shiploader.....	32
4.3	Modelación numérica del comportamiento estructural del shiploader.....	35
4.3.1	Ensayo de tracción en piezas Meccano	35
4.3.2	Fuerzas por elemento según modelo numérico	37
4.4	Evaluación de la instrumentación y análisis de resultados experimentales.....	40
4.5	Conclusiones.....	51
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....		53
ANEXO 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible.....		58
ANEXO 3.1 CÓDIGO .m PARA DEFORMACIONES.....		59
ANEXO 3.2 CÓDIGO .m PARA ACELERACIONES.....		61
ANEXO 3.3 FILTRO .m PARA DATOS DE DEFORMACIONES		63

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Resumen análisis de tensión prueba 1	36
Tabla 4.2 Resumen análisis de tensión prueba 3.....	37
Tabla 4.3 Variación fuerza axial SAP2000.....	39
Tabla 4.4 Variación momento SAP2000.....	39
Tabla 4.5 Medición de deformación en posición de carga.....	42
Tabla 4.6 Cambio en deformaciones para los distintos escenarios	47
Tabla 4.7 Deformaciones ingresadas en inventor	48
Tabla 4.8 Comparativa de fuerzas axiales para pivotes	48
Tabla 4.9 Comparativa de momentos para brazo, manivela y viga de anclaje.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1 Diagonales último nivel	16
Figura 3.2 Contrapeso	17
Figura 3.3 Refuerzo manivela	18
Figura 3.4 Refuerzo torre	18
Figura 3.5 LabJack T7 Pro	18
Figura 3.6 Bornera de conexiones	19
Figura 3.7 Fuente de poder	19
Figura 3.8 Acelerómetro y strain gauge brazo	21
Figura 3.9 Strain gauge pivote 1	21
Figura 3.10 Strain gauge manivela	21
Figura 3.11 Strain gauge polea	21
Figura 3.12 Strain gauge pivote 2	22
Figura 3.13 Strain gauge viga de anclaje	22
Figura 3.14 Propuesta de instrumentación	22
Figura 3.15 Brazo en posición de carga	23
Figura 3.16 Perfil en SAP 2000	23
Figura 3.17 Ensayo tracción	24
Figura 3.18 Modelo de Pieza Meccano en Autodesk Inventor	25
Figura 3.19 Brazo en posición de descanso	26
Figura 3.20 Brazo en posición de carga	27
Figura 4.1 Prototipo instrumentado	33
Figura 4.2 Gráfico carga desplazamiento	35
Figura 4.3 Gráficos esfuerzo deformación	36
Figura 4.4 Shiploader en posición de carga	37
Figura 4.5 Fuerza axial en descanso, combinación D+L	38
Figura 4.6 Fuerza axial en carga, combinación D+L	38
Figura 4.7 Mediciones acelerómetro escenario sin daño	40
Figura 4.8 Medición strain gauge sin filtrar	41
Figura 4.9 Mediciones strain gauges escenario sin daño	41
Figura 4.10 Mediciones acelerómetro escenario 2	42

Figura 4.11 Deformaciones filtradas en puntos instrumentados escenario 2	43
Figura 4.12 Mediciones acelerómetro escenario 3	44
Figura 4.13 Deformaciones filtradas en puntos instrumentados escenario 3	45
Figura 4.14 Medición acelerómetro escenario 4	46
Figura 4.15 Deformaciones filtradas en puntos instrumentados escenario 4	46
Figura 4.16 Análisis pieza Meccano en inventor	49
Figura 4.17 Análisis en inventor para momento	50

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En un entorno donde la eficiencia y seguridad estructural son cada vez más prioritarias, la monitorización de estructuras se ha convertido en una herramienta esencial para la gestión adecuada de infraestructuras críticas, permitiendo la detección temprana de fallas, y la optimización de estrategias de mantenimiento preventivo. Este proceso, conocido como *Structural Health Monitoring* (SHM), permite identificar, evaluar y localizar posibles daños que puedan comprometer la integridad de las estructuras, extendiendo su vida útil y mejorando la seguridad operativa.

Un ejemplo de infraestructura que requiere monitoreo constante es el *shiploader*, una máquina utilizada en la industria portuaria para cargar material a granel en barcos. En Chile, los *shiploaders* juegan un papel fundamental en el sector minero, facilitando la exportación de minerales como el cobre. En 2024, el país produjo 5.25 millones de toneladas métricas de cobre fino (Comisión Chilena del Cobre [COCHILCO], 2024)

Esta memoria de título parte de una vinculación entre una empresa y la Universidad de Concepción, establecida durante la práctica profesional. La empresa planteó la necesidad de diseñar un prototipo a escala como base para pruebas experimentales, por lo que, durante la práctica profesional, se diseñó un prototipo a escala del *shiploader*. Como parte del desarrollo, se propuso un sistema de instrumentación que incluía acelerómetros (para medir aceleraciones) y *strain gauges* (para medir deformaciones) en puntos críticos de la estructura. Este diseño serviría para evaluar la capacidad de los sensores en la detección de daños estructurales y validar la efectividad de la instrumentación mediante pruebas experimentales.

Para el desarrollo de esta memoria, se decidió utilizar el mismo contexto, pero con un enfoque complementario. Además de la construcción y la instrumentación del prototipo, se integró la modelación numérica mediante el método de elementos finitos (MEF) para simular el comportamiento del *shiploader* bajo distintos escenarios de daño. Este análisis permite comparar los datos experimentales obtenidos con los resultados numéricos y optimizar el diseño del sistema de monitoreo estructural.

La implementación de modelos a escala y tecnologías avanzadas de SHM responde a las necesidades específicas de la empresa, pero también constituye un aporte en el ámbito académico y profesional. Este trabajo busca contribuir al desarrollo y validación de metodologías que permitan mejorar la detección de fallas y evaluar el comportamiento estructural en infraestructuras críticas, avanzando hacia sistemas más seguros y eficientes para el diseño y la operación de *shiploaders* y otras estructuras similares.

1.2 Objetivo general

Evaluar la capacidad de detectar daño estructural mediante instrumentación, utilizando un arreglo de *strain gauges* y un acelerómetro, en un prototipo a escala de shiploader, complementado con modelación numérica.

1.3 Objetivos específicos

1. Construir un modelo escalado del prototipo de *shiploader* inicialmente propuesto e instrumentarlo con acelerómetros y *strain gauges*.
2. Modelar con elementos finitos el comportamiento del *shiploader* a escala en condiciones operativas.
3. Evaluar la efectividad de la instrumentación previamente propuesta para la detección de daño estructural, mediante pruebas con el modelo, análisis de gráficos y datos resultantes

1.4 Metodología de trabajo

Se comenzó con una revisión bibliográfica para establecer el marco teórico en torno al monitoreo de salud estructural (SHM), la modelación con elementos finitos, y los principios de funcionamiento de sensores como acelerómetros y *strain gauges*. Luego, se desarrolló un prototipo de *shiploader* a escala, instrumentado con un acelerómetro y *strain gauges*, para medir su comportamiento estructural bajo diversas condiciones de carga. Los datos recopilados por los sensores fueron procesados y

analizados, permitiendo la evaluación de respuestas estructurales y la validación y comparación de los modelos teóricos y prácticos.

1.5 Principales resultados y conclusiones

Los principales resultados esperados incluyen la obtención de datos experimentales sobre las deformaciones en los puntos críticos sensorizados del prototipo, registrados por los *strain gauges*, y un modelo de elementos finitos que sirva como base comparativa. Como conclusión se valida la precisión de los sensores para detectar daños estructurales bajo distintos escenarios de daño.

1.6 Organización del documento

El documento se contempla en cinco Capítulos, siendo el primero la introducción, donde se presentó la motivación de este trabajo, los objetivos generales y específicos, la metodología de trabajo, los principales resultados y la organización del documento.

En el Capítulo 2, se exploraron los fundamentos teóricos del SHM, y los principios de funcionamiento de sensores como acelerómetros y *strain gauges*. Además, se realizó una revisión del *estado-del-arte* en tecnologías de monitoreo estructural, destacando estudios relevantes en la industria.

En el Capítulo 3, se describió la metodología seguida para el desarrollo del prototipo instrumentado, incluyendo el diseño y construcción del modelo a escala, la disposición de los sensores, y el sistema de instrumentación utilizado. También se detallaron las técnicas de análisis de datos aplicadas.

En el Capítulo 4, se presentaron los resultados obtenidos a partir de las pruebas experimentales realizadas sobre el prototipo, incluyendo la interpretación de datos y la comparación con los modelos teóricos. Se evaluó la efectividad del sistema de monitoreo y se discutieron los hallazgos clave.

Finalmente, en el Capítulo 5, se resumieron las principales observaciones y conclusiones del trabajo, subrayando las contribuciones y posibles limitaciones del estudio. Asimismo, se propusieron recomendaciones para futuras investigaciones y mejoras en la implementación del sistema de monitoreo.

CAPÍTULO 2: MONITOREO EN LA INGENIERÍA CIVIL

2.1 Introducción

En este Capítulo se examina el SHM junto con las definiciones necesarias para establecer un contexto completo que destaque su importancia y aplicación en esta memoria de título. Se abordarán los aspectos fundamentales del SHM y se revisarán investigaciones previas.

2.2 Marco teórico

2.2.1 Principios del monitoreo estructural

Según Farrar *et al.* (2013), el término monitoreo de salud estructural generalmente se refiere al proceso de implementar una estrategia de detección de daño en infraestructuras pertenecientes a la ingeniería aeroespacial, civil o mecánica. Este proceso implica la observación de una estructura a lo largo del tiempo mediante mediciones periódicas de la respuesta dinámica, la extracción de características sensibles al daño a partir de estas mediciones, y el análisis estadístico de dichas características para determinar el estado actual de la salud del sistema.

Para gestionar y entender mejor el daño detectado, es esencial clasificar su severidad. En este sentido, Rytter (1993) propuso un sistema de clasificación basado en cuatro niveles que ayudan a interpretar la información obtenida del monitoreo, estos niveles son:

Nivel 1: Detección de la aparición de daño (indicación cualitativa).

Nivel 2: Información sobre la posible ubicación del daño.

Nivel 3: Cuantificación del daño.

Nivel 4: Evaluación de la vida útil restante de la estructura, considerando el estado actual de daño.

Un sistema SHM completo considera tanto la instrumentación como el procesamiento correcto de los datos. El objetivo es caracterizar el estado de la estructura, ya sea tras cargas eventuales o debido a la degradación del material con el tiempo.

Además, Ross y Matthews (1995) y Mitta (1999) identificaron diversas situaciones en las que el monitoreo estructural es crucial, tales como:

1. Modificaciones a una estructura existente.
2. Monitoreo de estructuras afectadas por obras externas.
3. Monitoreo durante la demolición.
4. Estructuras sujetas a movimientos a largo plazo o degradación de materiales.
5. Bucle de retroalimentación para mejorar diseños futuros basados en la experiencia.
6. Evaluación de fatiga.
7. Sistemas novedosos de construcción.
8. Evaluación de la integridad estructural después de un terremoto.
9. Declive en la construcción y crecimiento en las necesidades de mantenimiento.
10. Transición hacia una filosofía de diseño basada en el desempeño.

2.2.2 Axiomas del monitoreo estructural

Worden *et al.* (2007) identifican una serie de axiomas fundamentales para el monitoreo estructural en su investigación. Estos axiomas, descritos como verdades fundamentales, establecen reglas comunes que guían la práctica del SHM. En consecuencia, los axiomas son los siguientes:

Axioma I: Todos los materiales poseen de manera inherente defectos.

Axioma II: La evaluación de daño requiere una comparación entre dos estados del sistema.

Axioma III: Identificar la existencia y localización de daño se puede lograr a través del aprendizaje no supervisado, pero, para identificar el tipo de daño presente y su severidad, solo se puede realizar con aprendizaje supervisado.

Axioma IVa: Los sensores no miden daño. La extracción de características a través del procesamiento de señales, modelación física o predicción de errores, y su posterior clasificación estadística son necesarias para convertir datos del sensor en información de daño.

Axioma IVb: Sin una extracción de características de manera inteligente, mientras más sensible al daño es una medición, más sensible es a los EOVs.

Axioma V: La escala de tamaño y la escala de tiempo asociadas con la iniciación y evolución del daño, dictaminan las propiedades de los sensores requeridos por el sistema de detección del SHM.

Axioma VI: Hay una concesión mutua entre la sensibilidad al daño de un algoritmo y la capacidad de tolerancia al ruido de éste.

Axioma VII: La magnitud del daño que puede ser detectado a partir de cambios en la dinámica del sistema es inversamente proporcional al rango de la frecuencia de excitación.

Axioma VIII: El daño aumenta la complejidad de un sistema.

2.2.3 Sensores y sistema de adquisición de datos

Según Farrar y Worden (2013), el diseño de un sistema de monitoreo estructural debe equilibrar cuidadosamente la cantidad y ubicación de los sensores, logrando así un balance entre las ventajas económicas de un sistema de sensado óptimo y la mayor confiabilidad que proporciona un sistema con sensores redundantes. Tradicionalmente, los sistemas de sensado en SHM han adoptado un enfoque que utiliza relativamente pocos sensores, distribuidos en una cuadrícula uniforme sobre la estructura. Sin embargo, este enfoque presenta el riesgo de que, si un sensor falla, el sistema puede volverse inadecuado para detectar del daño.

Los sensores en un SHM pueden utilizarse para diversas aplicaciones, que incluyen la detección y seguimiento de problemas, la validación y calificación del desempeño del modelo, así como la gestión de la incertidumbre e integración en sistemas de control. Estos sensores convierten la respuesta dinámica de la estructura en una señal de voltaje analógico, que es proporcional a la cuantificación de la respuesta de interés. Esta conversión se lleva a cabo gracias a las propiedades de transducción del material del sensor, lo que permite transformar una variable de respuesta en una señal eléctrica. Posteriormente, esta señal analógica se mide de forma discreta para producir datos digitales.

La selección del tipo de sensor es un paso crucial y debe basarse en un análisis detallado de varias características, incluyendo el tipo de sensor, ancho de banda, sensibilidad, número, ubicación, estabilidad, confiabilidad, costo, alimentación y telemetría. En este contexto, Farrar y Worden (2013) destacan tres factores fundamentales para la elección de un tipo de sensor.

En primer lugar, la sensibilidad requerida y el rango son esenciales; la sensibilidad se refiere al cambio más pequeño en el parámetro medido que puede ser detectado por el sistema de sensado, mientras que el rango define el valor máximo del parámetro que el sistema puede medir. Es importante notar que la sensibilidad y el rango están interrelacionados; generalmente, al aumentar el rango del sensor, la sensibilidad disminuye.

En segundo lugar, el ancho de banda requerido y la resolución son igualmente importantes. El ancho de banda se refiere al rango de frecuencias de respuesta que el sistema de sensado puede capturar, y la resolución en frecuencia es el cambio más pequeño en frecuencia que el sistema puede detectar. Un ancho de banda amplio y una resolución adecuada son esenciales para identificar el daño, que suele manifestarse en las porciones de alta frecuencia del espectro de respuesta.

Por último, la estabilidad y confiabilidad son factores críticos. La confiabilidad se define como la capacidad del sensor para continuar funcionando de manera efectiva durante un período prolongado, mientras que la estabilidad, un componente clave de la confiabilidad, se evalúa a través de la vida útil del sensor, su capacidad para operar en ambientes extremos y su resistencia a las condiciones de carga de la estructura. Teniendo en cuenta estos aspectos, así como las posibles restricciones económicas, se puede realizar una selección adecuada del tipo de sensor para cada requerimiento específico. El resultado de este proceso de diseño puede indicar la necesidad de sensores adicionales para cuantificar los efectos de las condiciones operacionales y ambientales variables en el proceso de detección de daño.

Dentro del plan de instrumentación, uno de los sensores más utilizados es el acelerómetro, un dispositivo que mide la vibración o aceleración de una estructura. Aunque los acelerómetros no miden desplazamientos directamente, es posible estimarlos siempre que se apliquen condiciones iniciales adecuadas y se realice un filtrado apropiado para evitar el desplazamiento de baja frecuencia. Los

acelerómetros uniaxiales y triaxiales son especialmente efectivos para detectar vibraciones debido a su alta sensibilidad y excelente relación señal/ruido.

Otro sensor común e igualmente importante es el *strain gauge*, que mide microdeformaciones en la estructura detectando cambios en la resistencia eléctrica de un material sensible a la deformación cuando se somete a esfuerzos. Este principio básico se basa en la variación de la resistencia del material al estirarse o comprimirse (Wilson, 2001). Los *strain gauges* pueden fabricarse con materiales metálicos, como el aluminio, o semiconductores. Cuando el material se estira, su longitud aumenta y su sección transversal disminuye, lo que incrementa su resistencia eléctrica.

Los *strain gauges* suelen consistir en una fina lámina de alambre montado sobre un portador, que puede ser de papel, plástico o epoxi, facilitando su manejo y aplicación. Estos sensores pueden ser de tipo *bonded* o *unbonded*, siendo los primeros los más comunes debido a su mayor sensibilidad y amplio rango de aplicación (Wilson, 2001). Se clasifican en estáticos y dinámicos, los estáticos, generalmente hechos de una aleación de níquel y cobre, son menos sensibles a los cambios de temperatura, lo que los hace adecuados para mediciones prolongadas. Por otro lado, los dinámicos, hechos de aleaciones como Iso-elástico o Karma, ofrecen un mayor factor de medición, lo que los hace más sensibles, pero también más susceptibles a variaciones de temperatura. Estos últimos se utilizan principalmente para mediciones de corta duración, como impactos o vibraciones, donde los cambios de temperatura no afectan significativamente los resultados (Wilson, 2001).

La correcta instalación de los *strain gauges* es crucial para obtener resultados precisos, ya que cualquier fallo en la adhesión al material de prueba puede afectar la transmisión de la deformación al sensor, causando mediciones incorrectas. Además, es importante considerar el entorno físico en el que se aplicarán, ya que factores como temperatura, humedad, presión y la posible exposición a corrosión puede influir en la selección y protección del sensor. Para garantizar un buen rendimiento, es esencial seguir las recomendaciones del fabricante tanto en la selección del tipo de *strain gauge* como en su instalación y protección adecuada. . Un fallo en la adhesión, incluso en una pequeña área del *strain gauge*, resultará en indicaciones de deformación incorrectas. La mayor debilidad en toda la técnica de medición de deformación mediante *strain gauges* radica en la adhesión del sensor a la pieza de prueba. Generalmente, el fabricante de los *strain gauges* recomendará los cementos que sean compatibles con su uso y proporcionará instrucciones para su correcta instalación (Wilson, 2001).

Finalmente, el sistema de adquisición de datos se encarga de digitalizar las señales analógicas provenientes de los sensores, aplicar filtrado o limpieza de datos, transmitir la información y almacenarla para análisis posteriores. Generalmente, el computador que controla el hardware también realiza la extracción de datos y algunas partes del modelamiento estadístico del proceso de Monitoreo de Salud Estructural (SHM).

Otro componente esencial es la bornera de conexiones, que organiza las conexiones dentro del tablero y distribuye la alimentación de acuerdo con el tipo de sensor. Este dispositivo facilita la conexión ordenada y segura de los cables a los distintos componentes del sistema.

Para obtener los distintos voltajes requeridos, se utilizan reguladores de voltajes. La fuente de poder proporciona un único voltaje, por lo que los reguladores permiten obtener diferentes salidas de voltajes según sea necesario para el funcionamiento adecuado de los sensores.

Las consideraciones clave para el diseño del hardware incluyen, según Farrar y Worden (2013), el tipo de sensor y rango de muestreo de datos, métodos de limpieza de datos, capacidad de almacenamiento, requisitos de telemetría, interfaz de usuario, necesidades de energía, condiciones operacionales y ambientales, y velocidad de procesamiento.

2.3 Estado-del-arte

La detección de daño en estructuras es un campo de investigación en constante evolución. Figueiredo, (2022) explica que, en el pasado, los métodos de detección se basaban principalmente en inspección visual y ensayos no destructivos (NDT), como ultrasonidos o radiografías. En la actualidad, técnicas avanzadas de monitoreo estructural, como el análisis de vibraciones, análisis modal y métodos basados en inteligencia artificial y *machine learning*, han emergido como herramientas esenciales para la identificación y evaluación de daños en estructuras complejas. Figueiredo, (2022) también plantea que la detección de daño se aborda desde dos enfoques principales: basado en la física y basado en datos.

2.3.1 Enfoque basado en la física

El enfoque basado en la física correlaciona los datos medidos en las estructuras con modelos numéricos, como los modelos de elementos finitos. La actualización de modelos, conocida como *model updating*, permite identificar el daño al comparar las respuestas estructurales medidas con las predicciones de un modelo de referencia.

Un ejemplo de este enfoque es el estudio de Lee (2016), que utiliza un enfoque probabilístico para predecir la vida útil por fatiga de puentes, integrando datos de un sistema de monitoreo estructural (SHM) y la actualización de modelos de elementos finitos. El estudio se llevó a cabo en tres etapas. En primer lugar, se identificaron las propiedades modales del puente, como las formas modales y las frecuencias naturales, a partir de mediciones de vibraciones ambientales generadas por el tráfico vehicular. Luego, se ajustaron los parámetros estructurales de un modelo inicial de elementos finitos, utilizando las propiedades modales identificadas, lo que permitió reflejar con mayor precisión las condiciones operativas reales del puente. En la etapa final, se predijo la vida útil por fatiga de forma probabilística empleando el modelo de elementos finitos actualizado, aplicando métodos de confiabilidad de primer (FORM) y segundo orden (SORM), lo que evitó la necesidad de utilizar el muestreo de Monte Carlo, conocido por su alto requerimiento de simulaciones. Aunque este enfoque permite una evaluación más precisa de la vida útil del puente, la actualización de modelos tiene sus limitaciones.

La incertidumbre en los parámetros del modelo y la calidad de la malla utilizada pueden afectar los resultados, junto con supuestos como desplazamientos pequeños, isotropía y comportamiento elástico lineal (Figueiredo, 2022). Otro ejemplo es el estudio de Xu (2012), donde se propuso una estrategia de detección de daño a través de un índice de energía basado en la deformación derivada de las funciones de respuesta.

2.3.2 Enfoque basado en datos

El enfoque basado en datos utiliza algoritmos de *machine learning* para comparar el estado de referencia con el estado dañado. Un ejemplo de esto es el estudio de Ye (2012), que implementó un sistema de monitoreo estructural (SHM) en el puente Tsing Ma para evaluar la fatiga en puentes de

acero mediante datos de monitoreo dinámico a largo plazo. Este sistema, que incluía 283 sensores para medir tanto condiciones ambientales como estructurales, permitió derivar un espectro diario estándar de estrés a partir del análisis estadístico de los datos recogidos durante un año, considerando el tráfico vehicular, ferroviario y los efectos de tifones. Para transformar las series de tiempo de estrés en datos de frecuencia, se utilizó la técnica *rainflow*, que identifica picos y valles en las series temporales. Los datos de deformación dinámica se registraron a una frecuencia de muestreo de 51.2 Hz en condiciones normales y durante tifones, y se analizaron las variaciones estacionales y del tráfico para evaluar su impacto en las mediciones. A partir de estos datos, se sintetizó un espectro de estrés que representaba tanto el tráfico habitual como el inducido por tifones, lo que permitió evaluar la vida útil por fatiga de un detalle soldado crítico del puente. La evaluación basada en datos reales del SHM resultó ser más precisa que los métodos tradicionales de análisis teórico, los cuales tienden a subestimar la vida restante al sobrestimar los rangos de carga. Los datos registrados durante tifones mostraron patrones distintivos de deformación, evidenciando el impacto significativo de las condiciones extremas en la fatiga estructural. A pesar del alto tráfico vehicular y ferroviario en el puente, la vida útil por fatiga estimada mediante el espectro diario general no fue muy diferente de la obtenida bajo condiciones normales de tráfico y viento. El método propuesto demuestra ser una herramienta efectiva para la evaluación de la vida útil por fatiga de detalles soldados en puentes de acero, permitiendo a las autoridades y a los ingenieros priorizar actividades de inspección y mantenimiento basadas en datos reales de monitoreo.

Este enfoque basado en datos reales demostró ser más preciso que los métodos tradicionales, que suelen subestimar la vida útil restante al sobrestimar los rangos de carga. Sin embargo, este método no puede detectar daños existentes, solo predecir futuras fallas, y asume que la estructura está en buenas condiciones al inicio del análisis (Figueiredo, 2022).

Otros ejemplos incluyen el estudio de Catbas (2012), que analizó correlaciones entre las series de tiempo de deformaciones utilizando datos de más de 200 sensores para detectar daños, y el estudio de Phares (2013), que instaló especímenes sacrificables en ubicaciones críticas de un puente para identificar daños mediante un algoritmo estadístico. No obstante, estos métodos asumen que los *strain gauges* cubren al menos una vecindad del área dañada, lo cual puede ser problemático dado que estos sensores son puntuales y las estructuras civiles son mucho más grandes y complejas (Zhang, 2015).

2.3.3 Comparación enfoques

Ambos enfoques, tanto el basado en datos como el basado en la física, enfrentan desafíos relacionados con factores ambientales que pueden ocultar los daños estructurales. Para superar estas limitaciones, surge un enfoque híbrido que combina las ventajas de ambos métodos, permitiendo la transición de aprendizaje no supervisado a supervisado en el SHM de puentes. Este enfoque facilita la identificación de daños y la localización de estos a través de la actualización de modelos (Figueiredo, 2022).

2.3.4 Prototipaje en la investigación

En este trabajo se diseña y construye un prototipo de *shiploader*, con el objetivo de evaluar la instrumentación y comportamiento a través de un enfoque experimental. Este modelo a escala ha sido equipado con *strain gauges* y un acelerómetro, lo que permite simular y analizar distintas condiciones de daño estructural en situaciones controladas.

El estudio se inspira en investigaciones anteriores, como la de Cerda (2014), que propusieron métodos indirectos para la detección de daños en puentes evaluado en laboratorio bajo tres escenarios de daño: alteración en las condiciones de soporte, amortiguamiento adicional y la incorporación de una masa en el punto medio del puente. Cerda (2014) desarrolló un enfoque que utiliza sensores instalados en vehículos que atraviesan los puentes, en lugar de depender de inspecciones visuales periódicas. Esto representa una alternativa más accesible y económica en comparación con los métodos directos tradicionales.

En su investigación, se construyó un modelo a escala de un puente simplemente apoyado y se desarrolló un sistema experimental que incluía un vehículo con suspensión independiente, junto con equipos para el control del movimiento y la adquisición de datos. Utilizando características de frecuencia y un clasificador de máquina de vectores de soporte (SVM), se compararon los datos obtenidos desde un vehículo en movimiento con los datos medidos directamente en la estructura del puente, mostrando que la precisión en la clasificación del enfoque indirecto fue igual o superior, especialmente a bajas velocidades (1-1.75 m/s). Sin embargo, se observó una disminución del 7% en la precisión a mayores velocidades (2-2.75 m/s).

Estos hallazgos sugieren que el enfoque indirecto tiene un gran potencial como solución rentable y efectiva para el monitoreo de la salud estructural de puentes, permitiendo una cobertura más amplia sin la necesidad de instrumentar cada puente individualmente. Aunque algunos parámetros del puente, como la configuración geométrica y la ubicación, podrían ser necesarios para el procesamiento de datos a gran escala, este sistema ofrece una alternativa eficiente para el monitoreo estructural.

2.3.5 SHM en entornos marinos

Aunque muchos de los algoritmos y métodos utilizados para la detección de daños han demostrado su efectividad en el contexto de puentes, su aplicación en otras infraestructuras, como los *shiploaders*, sigue siendo limitada. En este contexto, el estudio de Chen (2023) realiza un análisis exhaustivo sobre el uso de sensores de fibra óptica (OFS) en el monitoreo de salud estructural de infraestructuras marinas. Estos sensores se clasifican en tres categorías principales: sensores de punto, cuasi-distribuidos y distribuidos, cada uno con características y aplicaciones particulares.

Los sensores de punto incluyen tecnologías como los sensores de rejilla de Bragg (FBG) y los interferómetros, que se emplean para realizar mediciones en puntos discretos específicos de la estructura. Estos sensores permiten un monitoreo puntual preciso, ideal para áreas críticas.

Por su parte, los sensores cuasi-distribuidos utilizan una red de FBGs que mide en puntos discretos a lo largo de una fibra óptica. Este sistema ofrece una mayor cobertura espacial, facilitando conseguir información detallada en múltiples zonas de la estructura.

Finalmente, los sensores distribuidos son más ventajosos al monitorear de forma continua, resultando útil para estructuras grandes y en complejas condiciones como lo es el entorno marino.

Entre los hallazgos más importantes de este estudio, se destaca que los OFS son pequeños, ligeros y altamente resistentes a las interferencias electromagnéticas, además, operar en un amplio rango de temperaturas y presiones convierte a estos sensores en una opción óptima para infraestructuras submarinas que están sometidas a ambientes marinos hostiles. Aun así, los OFS enfrentan retos importantes, como la bioincrustación y la corrosión debido a los entornos submarinos. Para

contrarrestar estos problemas, se recomienda el uso de materiales protectores, como plásticos reforzados con fibra de carbono, para mejorar la durabilidad de los sensores a lo largo del tiempo.

2.4 Conclusiones

En este Capítulo se han analizado los fundamentos teóricos del monitoreo de infraestructuras en la ingeniería civil, incluyendo los principios del monitoreo estructural, los axiomas fundamentales, y los tipos de sensores y sistemas de adquisición de datos utilizados en la práctica. Estos conceptos proporcionaron una base sólida para entender la importancia del monitoreo estructural, y establecer las herramientas y enfoques necesarios para evaluar la salud estructural de los *shiploaders*.

CAPÍTULO 3: METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En el Capítulo anterior se exploraron diversos métodos de monitoreo estructural, desde los enfoques tradicionales hasta las tecnologías más avanzadas, así como las definiciones necesarias para entender el contexto de esta memoria de título. Basado en este conocimiento, el presente Capítulo describe la metodología empleada para evaluar la capacidad de detectar daño estructural en un prototipo de *shiploader* instrumentado.

3.2 Construcción e instrumentación del prototipo

3.2.1 Análisis dimensional

Primero, se construyó el prototipo de *shiploader* utilizando piezas *Meccano*, tomando como base las dimensiones generales del modelo real. Considerando la disponibilidad de piezas *Meccano*, las escalas finales resultaron diferentes. Estas se muestran a continuación.

1. Altura: Escala 1:29
2. Longitud del brazo: Escala 1:42
3. Ancho de la base: Escala 1:26
4. Módulo de elasticidad: 1:6

Dadas estas diferencias de escala, el modelo escalado no puede ser utilizado como una herramienta predictiva para la respuesta del prototipo de *shiploader*. Sin embargo, cumple con la función de ser una herramienta cualitativa que permite analizar el comportamiento estructural general, brindando una comprensión inicial de las interacciones y deformaciones en diferentes partes del prototipo, lo que facilita la evaluación de la instrumentación y el monitoreo de posibles daños o fallos estructurales en el diseño.

3.2.2 Construcción del prototipo

La construcción del prototipo comenzó con la recolección de las piezas *Meccano* necesarias, asegurando que todas estuvieran disponibles y en buen estado. A continuación, se procedió con el ensamblaje inicial del modelo, siguiendo los diseños conceptuales que se establecieron previamente. Se realizaron montajes preliminares para verificar la compatibilidad de las piezas y evaluar el ensamblaje a grandes rasgos.

Una vez completado el ensamblaje del prototipo, se llevaron a cabo pruebas preliminares para evaluar la funcionalidad del modelo a escala. Durante estas pruebas, se identificaron desafíos en la traducción del diseño conceptual a la realidad física. Estos desafíos se abordaron mediante ajustes y modificaciones específicas para mejorar la funcionalidad y adaptabilidad del prototipo.

En primer lugar, se implementaron diagonales en el último nivel de la torre, como se observa en la Figura 3.1 Aunque esta solución es poco convencional, resultó crucial para incrementar la rigidez estructural del prototipo, estas diagonales ayudan a reducir deformaciones globales y desplazamientos laterales garantizando el correcto funcionamiento y soporte de la torre ante las deformaciones durante las pruebas.

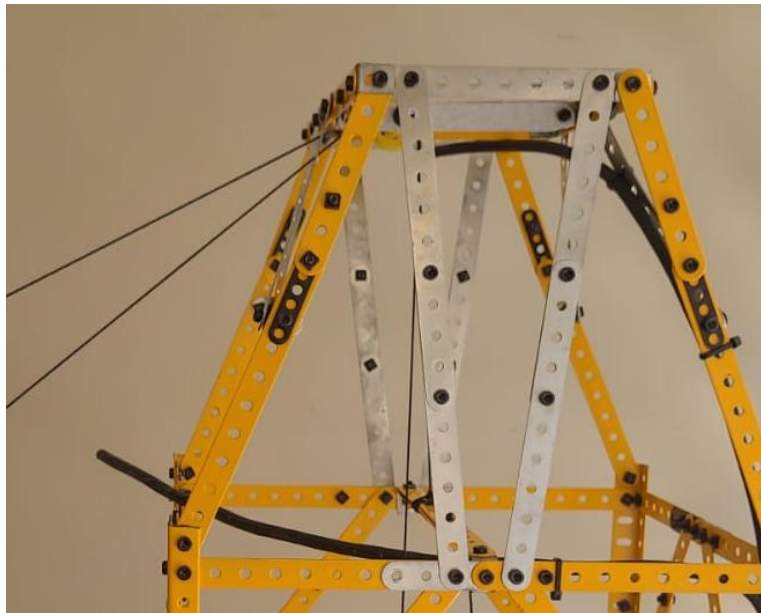


Figura 3.1 Diagonales último nivel

En la Figura 3.2 se puede apreciar el contrapeso integrado en el prototipo. Esta modificación fue esencial para garantizar la estabilidad del modelo, ya que en las pruebas preliminares se observó que el prototipo tendía a volcarse debido al peso excesivo del brazo. La incorporación del contrapeso equilibra el sistema, lo que permite que los ensayos se llevaran a cabo de forma segura y eficiente.

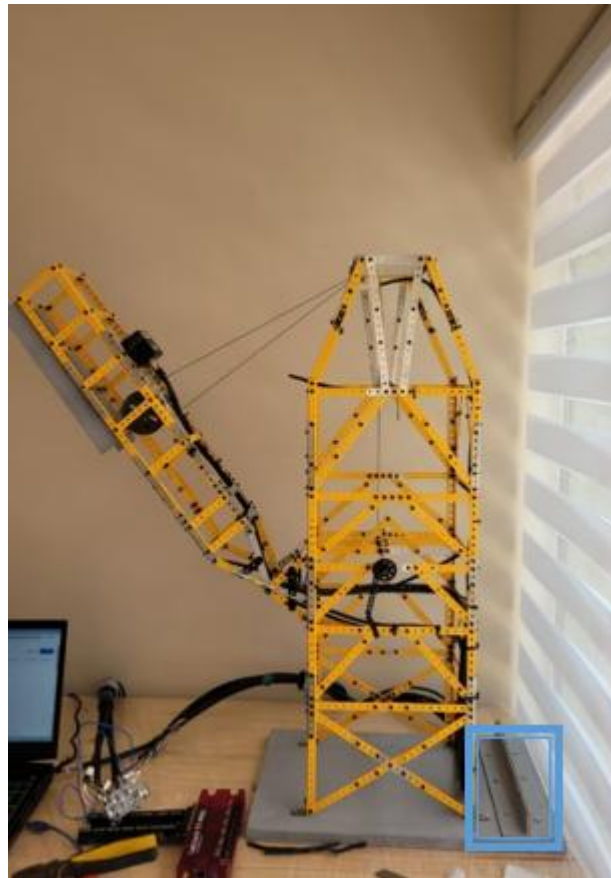


Figura 3.2 Contrapeso

Finalmente, en la Figura 3.3 y 3.4 se observan los refuerzos específicos añadidos en el mecanismo de la manivela y en la torre. En la manivela, se instaló una diagonal triangular diseñada para prevenir deformaciones excesivas durante el funcionamiento. En la torre, se colocaron diagonales con el propósito de redistribuir las fuerzas generadas por el movimiento del brazo hacia la estructura de soporte principal.

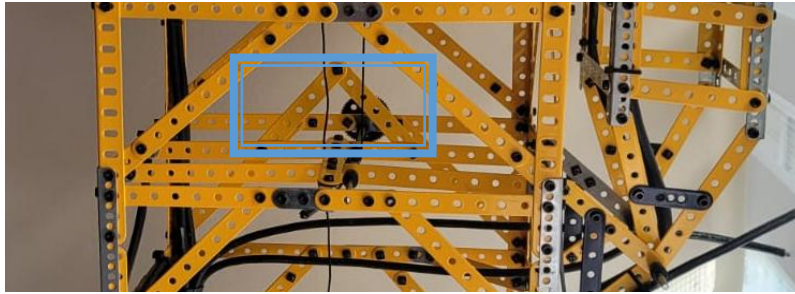


Figura 3.3 Refuerzo manivela

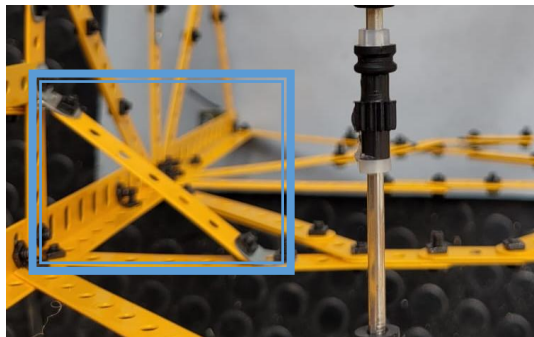


Figura 3.4 Refuerzo torre

3.2.3 Instrumentación del prototipo

Como se mencionó en el Capítulo 2, se tienen las Figuras 3.5, 3.6 y 3.7 detallando los componentes utilizados para la instrumentación.



Figura 3.5 LabJack T7 Pro

Fuente: Amazon (2016)

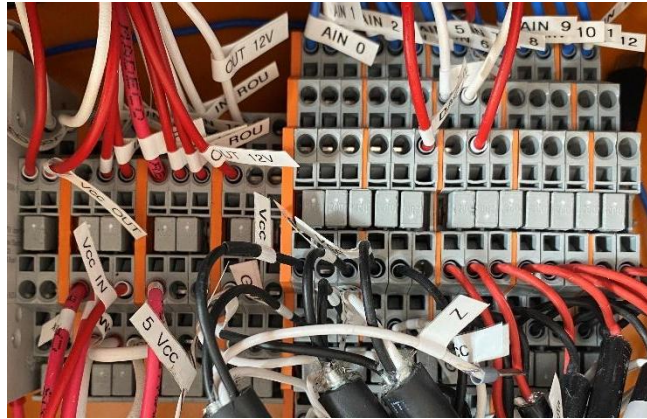


Figura 3.6 Bornera de conexiones

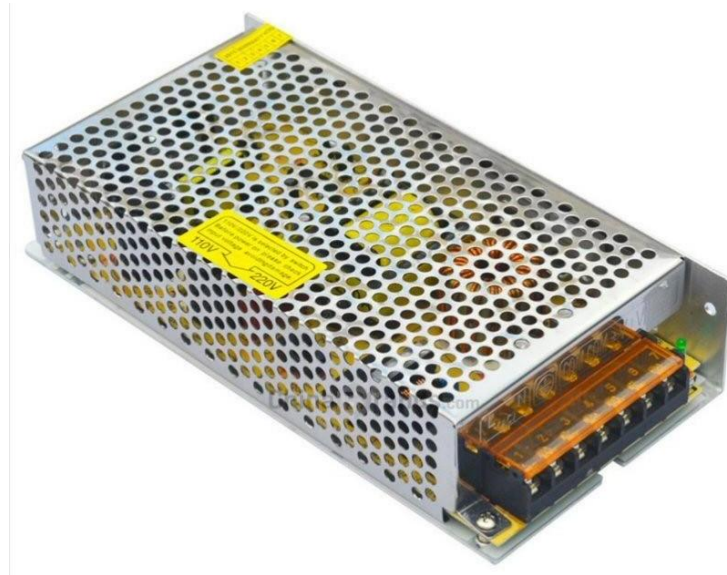


Figura 3.7 Fuente de poder

Fuente: Mercado Libre (2024)

Se elaboró un plan de instrumentación para el prototipo con el objetivo de monitorear su comportamiento estructural frente a diversas simulaciones de daño. Para su desarrollo, se realizó un análisis de la estructura construida, identificando los puntos críticos en función de su funcionamiento y las posibles fallas estructurales.

Como primer paso, se instaló un gabinete de control diseñado para coordinar y gestionar tanto el suministro de energía como la recolección de datos provenientes de los sensores.

El gabinete se alimentó con energía alterna de 220V, la cual se transformó en corriente continua para alimentar los distintos sensores, ajustando el voltaje de acuerdo con los requerimientos de cada uno. Una vez energizados, los sensores comenzaron a transmitir sus mediciones de forma independiente al gabinete, lo que permite un control preciso de cada punto de monitoreo.

En su interior, el gabinete de instrumentación cuenta con diversos componentes clave. Entre ellos, destaca el LabJack T7 Pro, un potente dispositivo de adquisición de datos que ofrece conectividad USB, TCP/IP y WiFi. Este equipo dispone de 14 entradas analógicas con resolución de 24 bits y rangos seleccionables de $\pm 10V$, $\pm 1V$, $\pm 0.1V$ y $\pm 0.01V$, y se utiliza para recibir las señales de los sensores, funcionando como interfaz principal para la medición y control de señales analógicas y digitales.

La fuente de poder interna tiene como función principal alimentar los strain gauges y el inclinómetro. Dado que el LabJack T7 Pro solo puede suministrar 3V (suficiente para los acelerómetros), se incorporó una fuente de poder adicional que proporciona voltajes de 5V y 12V, necesarios para el funcionamiento de los otros sensores.

Finalmente, todas las mediciones recogidas fueron consolidadas por el gabinete y transmitidas a un computador mediante un cable USB, donde se llevó a cabo el análisis posterior de los datos.

Análogamente, la propuesta de instrumentación consideró la instalación de un máximo de seis puntos de medición con *strain gauges* y un acelerómetro, debido a restricciones impuestas por la empresa. Además, estos datos se utilizaron posteriormente para validar el modelo en SAP 2000, transformando las deformaciones medidas en esfuerzos axiales.

Los *strain gauges* se colocaron en áreas críticas como soportes o zonas con cargas concentradas, mientras que el acelerómetro se instaló en el brazo del *shiploader*. Este último sensor tiene como objetivo monitorear la inclinación del brazo, correlacionando estos datos con las deformaciones medidas.

En las Figuras 3.8 a 3.13 se muestran imágenes de la ubicación de los sensores.

Los sensores fueron calibrados antes de su instalación. En cuanto a la conexión de los sensores al gabinete, se emplearon cables de instrumentación de 0.75 mm² con 3 o 4 hebras, según corresponda. De estas hebras, dos se utilizan para alimentación y tierra, mientras que las restantes se destinan a la recepción de señales de los sensores.

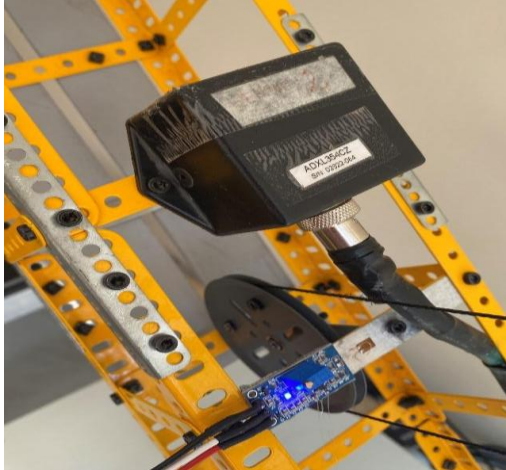


Figura 3.8 Acelerómetro y strain gauge brazo

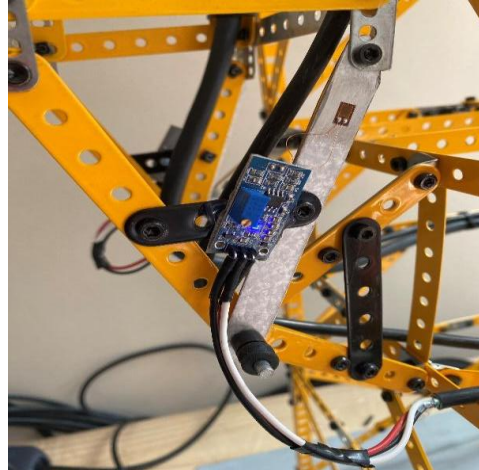


Figura 3.9 Strain gauge pivote 1

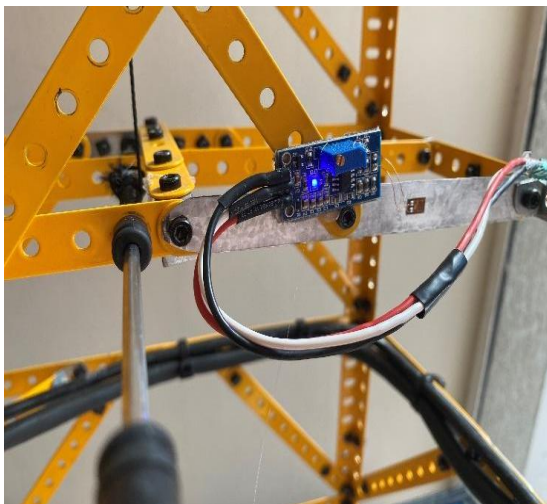


Figura 3.10 Strain gauge manivela

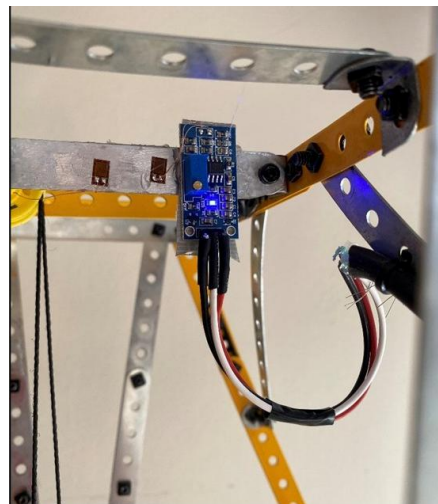


Figura 3.11 Strain gauge polea

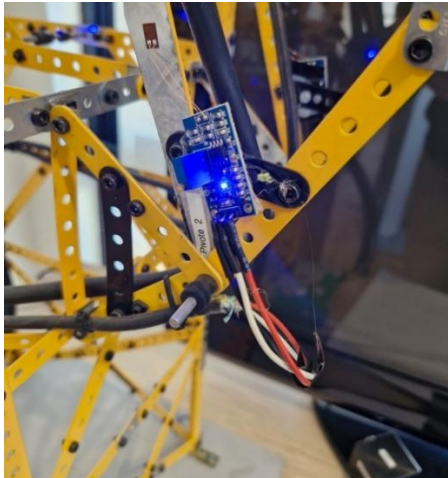


Figura 3.12 Strain gauge pivote 2

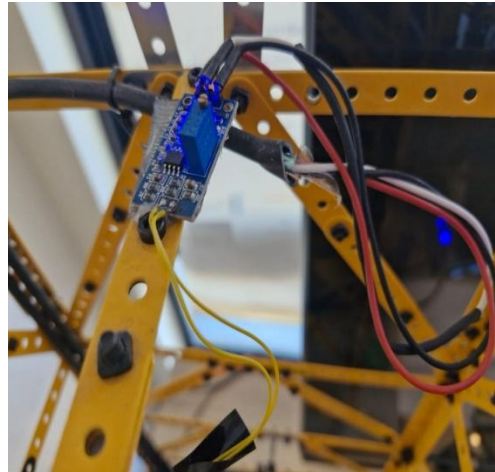


Figura 3.13 Strain gauge viga de anclaje

Finalmente, en la Figura 3.14 se observa la propuesta de instrumentación sugerida por el equipo de ingeniería de la empresa.

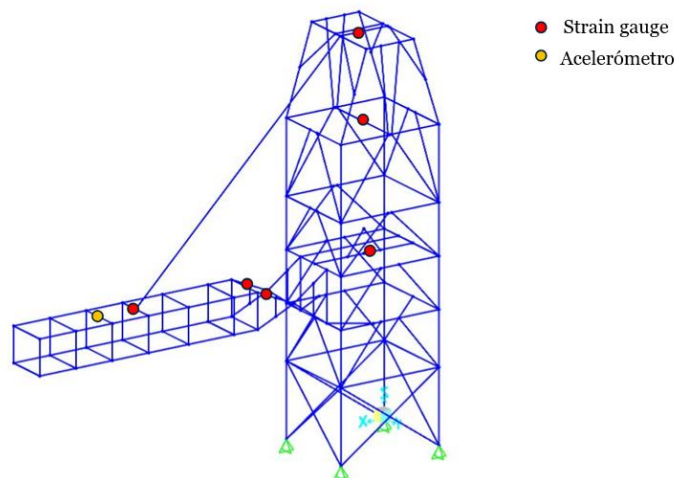


Figura 3.14 Propuesta de instrumentación

3.3 Modelación del comportamiento del prototipo con elementos finitos

Se construyó un modelo tridimensional en el *software* SAP2000, como se observa en la Figura 3.15. La estructura está conformada por elementos tipo *frame*.

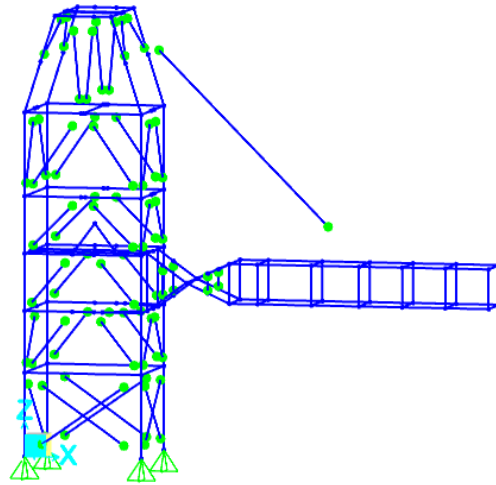


Figura 3.15 Brazo en posición de carga

3.1.1 Perfiles

En SAP 2000, se incorporó un perfil tipo rectangular que reproduce la sección bruta de la pieza *Meccano* utilizada en el prototipo, de 13.8 cm de alto, 1 cm de ancho y 0.1 cm de espesor. Esto se ilustra en la Figura 3.16.

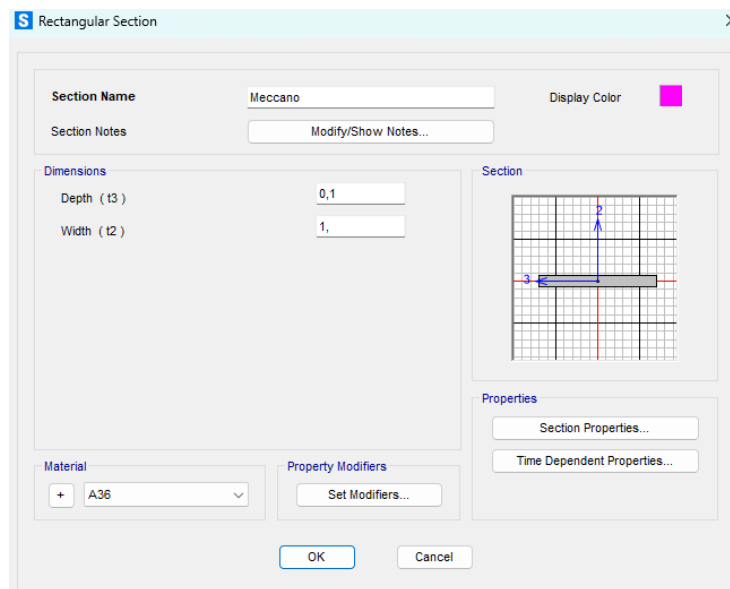


Figura 3.16 Perfil en SAP 2000

3.1.2 Ensayo tracción piezas Meccano

Se llevaron a cabo tres ensayos de tracción en piezas *Meccano* para determinar un módulo de elasticidad que represente con precisión sus propiedades. Durante el ensayo se registraron datos de tiempo, posición, carga y ciclo, los cuales permitieron calcular el esfuerzo con la fórmula 3.1:

$$\sigma = \frac{q}{A}, \quad (3.1)$$

Donde q es la carga en kilonewtons y A es el área de la sección transversal.

La deformación se calculó según la expresión 3.2:

$$\varepsilon = \frac{x_0}{L_0}, \quad (3.2)$$

Donde x_0 es la posición en milímetros y L_0 es la longitud de la pieza antes del ensayo.

Por último, se generó la curva carga-desplazamiento y la curva esfuerzo deformación.



Figura 3.17 Ensayo tracción

3.1.3 Representación de las perforaciones de la pieza

El ensayo de tracción permitió determinar el desplazamiento máximo de la pieza, utilizado posteriormente como dato base para determinar el módulo de elasticidad, a través de un modelo de elementos finitos desarrollado en Autodesk Inventor. En este *software*, se creó un modelo de la pieza *meccano*, presentado en la Figura 3.18. y se realizó un análisis lineal elástico para calcular el desplazamiento axial para una fuerza axial conocida. Se aplicó la máxima fuerza medida en el ensayo de tracción, se obtuvo desplazamiento y deformación en X y mediante iteración se encontró el módulo de elasticidad tal que los resultados del modelo coincidieran con lo medido en los ensayos de tracción. Esto se realizó para las tres pruebas. Se determinó un módulo de elasticidad promedio que se utilizó como parámetro de entrada en los modelos de SAP2000.

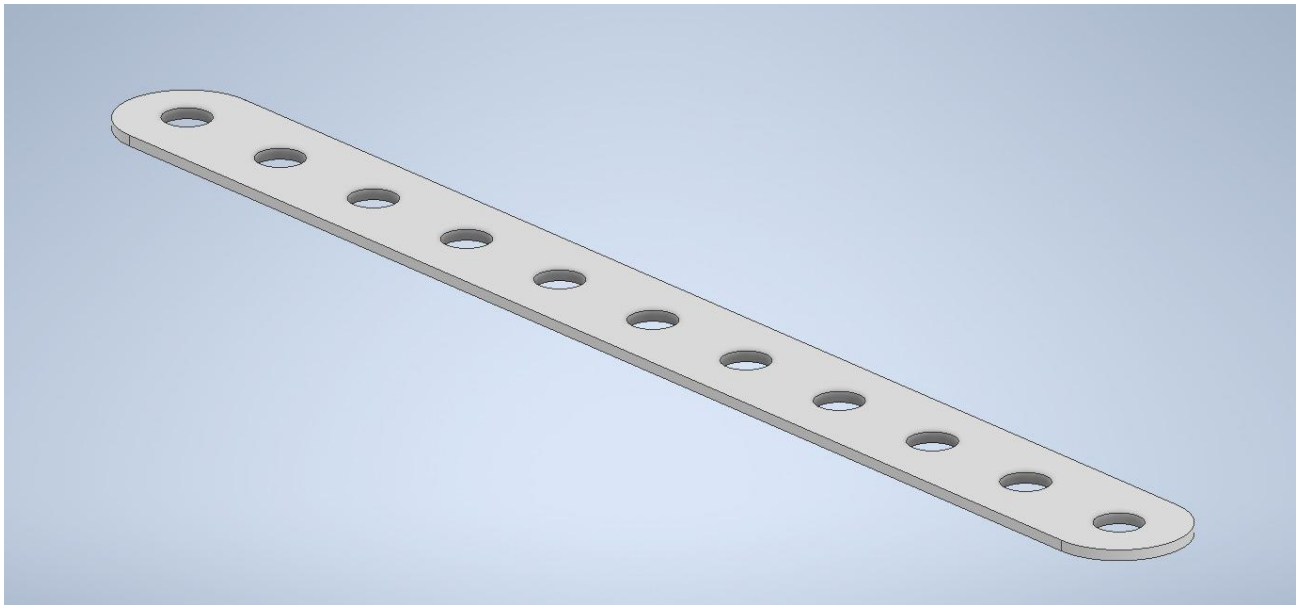


Figura 3.18 Modelo de Pieza *Meccano* en Autodesk Inventor

El ensayo de tracción fue recreado mediante simulaciones que replicaron las mismas condiciones experimentales: una sección de la pieza se fijó como soporte, mientras que en la otra se aplicó una carga axial equivalente a la máxima obtenida en cada ensayo de tracción. El *software* permitió simular el comportamiento del material bajo estas condiciones, generando datos sobre tensiones, deformaciones y desplazamientos que replican el entorno físico del ensayo.

3.4 Evaluación de la efectividad de la instrumentación

3.4.1 Levantamiento de información

El proceso de levantamiento de información se llevó a cabo mediante la instalación de los sensores de acuerdo con la propuesta del plan de instrumentación previamente definido, seguido de la ejecución de pruebas bajo diferentes escenarios de daño. Cada prueba fue diseñada para simular condiciones específicas de deterioro estructural, con el objetivo de evaluar la efectividad de la instrumentación implementada.

Para estandarizar las pruebas, se determinó el tiempo requerido para completar un ciclo de carga, que consiste en el descenso del brazo hasta la posición de carga y su posterior ascenso a la posición de descanso. Este tiempo, que resultó ser aproximadamente de 1 minuto 20 segundos de media, se utiliza como referencia temporal uniforme para todas las pruebas realizadas. Las Figuras 3.19 y 3.20 muestran las posiciones del brazo en los puntos de descanso y carga, respectivamente, ilustrando las fases del ciclo.



Figura 3.19 Brazo en posición de descanso



Figura 3.20 Brazo en posición de carga

Adicionalmente, se proponen los siguientes cinco escenarios de daño:

1. Ciclo de carga y descarga: Funcionamiento normal.
2. Eliminación de diagonales en la torre (Último Piso) y aflojamiento de conexiones: Simulación de debilitamiento estructural y simulación del efecto de cargas cíclicas.
3. Impactos repetidos en el brazo: Simulación de eventos de carga rápida.
4. Impactos repetidos en la torre: Simulación de vibraciones localizadas.

3.4.1.2 Código y software para la captura de datos

Se utilizó el *software* LJStream para obtener los datos, configurado con una salida de voltaje de 2.5V. Este *software* lee los valores de voltaje de siete canales analógicos. AIN52 a AIN57 para los *strain gauges*, y del canal AIN122 para el acelerómetro el eje Y.

Las mediciones de los sensores instalados en el prototipo se almacenaron en matrices columna, facilitando el análisis y procesamiento posterior.

Adicionalmente, se registró la marca de tiempo también en formato columna. Con esta información, se creó una Tabla de tiempo que incluye las mediciones del acelerómetro el eje Y, y las mediciones de los *strain gauges* instalados en el prototipo.

Finalmente, los datos se almacenaron en formato .dat y se procesaron mediante un código en MATLAB, que aplicó los factores de conversión necesarios para transformar las mediciones de los *strain gauges* a micrómetros por metro y las del acelerómetro a unidades de G. Estos factores de conversión son proporcionados por el fabricante en el *datasheet* de cada dispositivo, donde se especifican las equivalencias de voltaje y G para el acelerómetro, así como el voltaje y el nivel de deformación para los *strain gauges*. A partir de estas especificaciones, se realizaron pruebas que generan distintos puntos de operación, permitiendo obtener los factores de conversión requeridos. Posteriormente, los datos son procesados y graficados para su análisis. El código utilizado para el factor de conversión, y para graficar se puede consultar en el anexo (3.1 y 3.2).

3.4.2 Estructura y base de datos

Los resultados de las pruebas experimentales se almacenaron en archivos con formato .dat. Posteriormente, el código de post-procesado generó gráficos que muestran las mediciones de los *strain gauges*, organizados en seis subfiguras, cada una etiquetada de acuerdo con las diferentes partes del prototipo, como el pivote, la manivela, entre otras.

Además, se presentó una segunda Figura que muestra los datos del acelerómetro, donde se representó la relación entre la aceleración (G) y el tiempo (segundos) para la dirección Y.

3.4.3 Filtros

Para eliminar el ruido de los datos recolectados, se desarrolló un programa en Matlab que utiliza la transformada rápida de Fourier (FFT). Este programa aplicó la FFT a los datos de deformación, transformándolos en frecuencias. A continuación, se seleccionó una frecuencia de corte, la cual se consideró de 15 Hz, y se eliminaron los componentes de frecuencia superiores a este umbral, que se consideraron ruido. Finalmente, se aplicó la transformada inversa para regresar a la representación

original de la señal, conservando así las características más importantes de la señal mientras se eliminan las frecuencias no deseadas. El código utilizado para este proceso puede consultarse en el Anexo 3.3.

3.4.4 Comparación de comportamiento de modelo de elementos finitos y prototipo

Se realizó una comparación entre los esfuerzos axiales obtenidos del modelo de SAP2000 y las mediciones de la prueba de funcionamiento normal del prototipo. Esto se realizó para ambos pivotes.

En el caso del modelo de SAP2000, la diferencia de esfuerzos axiales entre dos posiciones, descanso y carga se calcula utilizando la ecuación 3.3:

$$\Delta_N = (N_{1_i} - N_{0_i}) \quad (3.3)$$

Donde N_{1_i} representa la fuerza axial en la zona sensorizada i en la posición de carga, y N_{0_i} corresponde a la fuerza axial en la zona sensorizada i en la posición de descanso.

Simultáneamente, después de aplicar los factores de conversión necesarios, se procesaron las deformaciones medidas mediante los *strain gauges*, estas se taran y se calcula un Δ , como se describe en la ecuación 3.4:

$$\Delta = \varepsilon \cdot L_0 \quad (3.4)$$

Donde ε es la deformación máxima registrada por los *strain gauges* y L_0 el largo inicial de la pieza antes de ser sometida al ensayo de tracción.

Este valor de delta se introdujo en el *software* autodesk Inventor como un desplazamiento en la dirección X. Finalmente, el valor de la fuerza de reacción de Inventor se comparó con el esfuerzo axial calculado en SAP 2000, a partir de la ecuación 3.3.

Para las mediciones correspondientes a la manivela, viga de anclaje, y el brazo, se utilizó la misma deformación ε como referencia en *Autodesk Inventor*. Se aplicó una fuerza de tracción en el centro de la pieza, mientras ambos extremos se mantienen fijos, buscando mediante el análisis de tensiones, una deformación resultante igual a la deformación máxima registrada. Con esta fuerza, se calculó el momento utilizando la ecuación 3.5:

$$M = \frac{P \cdot L_0}{8} \quad (3.5)$$

Donde P representa la carga obtenida mediante este proceso iterativo.

Este valor se comparó con los momentos calculados en SAP2000, según la ecuación 3.6, considerando el momento en el eje débil para el brazo y la viga de anclaje, y el momento en el eje fuerte para la manivela.

$$\Delta_M = (M_{1_i} - M_{0_i}) \quad (3.6)$$

Donde M_{1_i} representa el momento en la zona sensorizada i en la posición de carga, y M_{0_i} corresponde al momento en la zona sensorizada i en la posición de descanso.

3.5 Conclusiones

En este Capítulo se presentó la metodología diseñada para alcanzar los objetivos de esta memoria de título. La construcción del modelo a escala constituye la base fundamental sobre la cual se llevarán a cabo las pruebas experimentales, por lo que es esencial asegurar una construcción precisa para obtener resultados representativos y fiables. En cuanto a la instrumentación, la correcta disposición de los *strain gauges* y el acelerómetro es crucial para la recolección de datos precisos, necesarios tanto para la detección de posibles daños, como para la evaluación de la efectividad de la instrumentación.

Además, la modelación con elementos finitos complementa todo este proceso al permitir la predicción del comportamiento estructural del *shiploader*, lo que no solo aporta a la validación de la instrumentación, sino que también sirve como una herramienta comparativa clave.

El Capítulo 4, dedicado a los resultados, se basa directamente en la metodología descrita en este Capítulo. Se presentarán y analizarán los datos obtenidos durante las pruebas experimentales, así como las comparaciones con las predicciones numéricas realizadas a través de la modelación con elementos finitos.

CAPÍTULO 4: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Introducción

Este Capítulo presenta los resultados obtenidos siguiendo la metodología descrita en el Capítulo anterior. Se incluyen análisis detallados de los datos recopilados, junto con una interpretación de los hallazgos en función de los objetivos planteados. Finalmente, se comparan los resultados experimentales con las expectativas teóricas para evaluar la efectividad de la instrumentación y el modelo desarrollado.

4.2 Desarrollo y validación del modelo escalado e instrumentado del shiploader

En cuanto a las escalas geométricas, estas están entre 1 a 25 y 1 a 40, pero la escala del material fue de 1 a 6. Debido a las diferencias en las escalas, el prototipo no replica de manera completamente proporcional todas las características geométricas del *shiploader* real. Esto implica que las propiedades estructurales, como el momento de inercia y la rigidez, tampoco se escalan uniformemente, lo que puede influir en la respuesta dinámica y la distribución de esfuerzos ante cargas aplicadas. Por ejemplo, el brazo, siendo más largo en proporción, podría experimentar una mayor influencia en su respuesta a vibraciones. Mientras tanto, la torre y la base, al estar en escalas diferentes, pueden modificar la estabilidad global y la manera en que se distribuyen las deformaciones.

A pesar de estas discrepancias, la construcción del prototipo se completó exitosamente, replicando las características esenciales del modelo original en una escala adecuada para las pruebas de laboratorio. Las dimensiones y la adición de un contrapeso en la base garantizaron la estabilidad estructural necesaria para simular las condiciones operativas previstas.

Las pruebas preliminares de carga y descarga confirmaron que el prototipo podía soportar las condiciones operativas esperadas, validando su correcto funcionamiento. En la Figura 4.1 se presenta el prototipo construido e instrumentado.

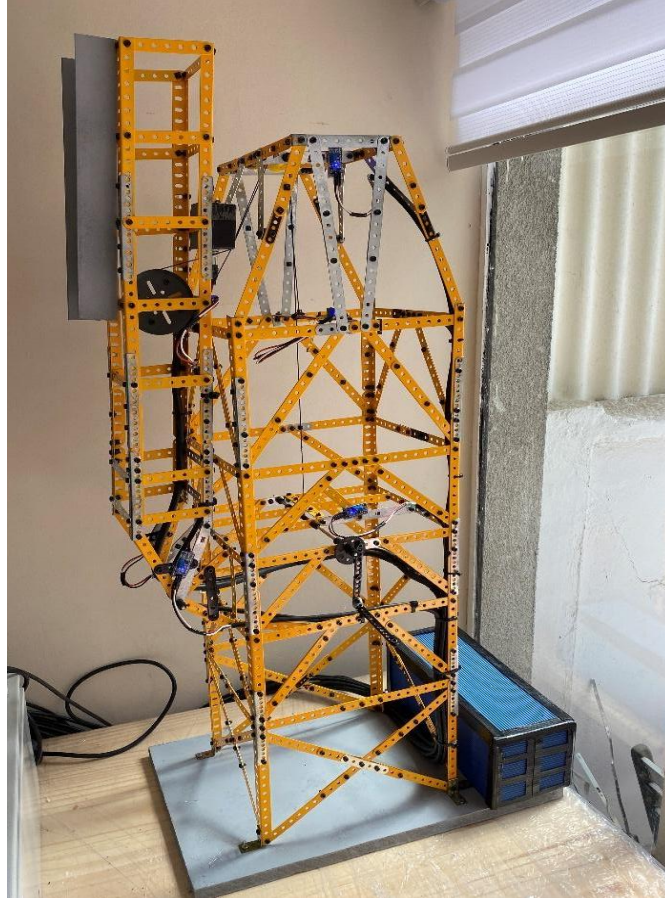


Figura 4.1 Prototipo instrumentado

El ensamblaje del prototipo se llevó a cabo utilizando piezas *Meccano*, lo que hizo que se presentaran desafíos relacionados con la resistencia y el peso del modelo. Debido a que las piezas eran más cortas de lo previsto, se realizaron modificaciones en el diseño conceptual para ajustarse a estas dimensiones. Además, fue necesario encontrar un peso lo suficientemente significativo que permitiera observar deformaciones durante los análisis. Estos cambios afectaron el alineamiento y las proporciones del prototipo, por lo que se implementaron soluciones como refuerzos en las uniones y ajustes en los ángulos de las conexiones. La distribución del peso se optimizó con un contrapeso que equilibraba la carga aplicada, previniendo el vuelco del prototipo.

Sin embargo, estas modificaciones significaron que el prototipo no replicara exactamente las condiciones del *shiploader* prototipo. En particular, la longitud del brazo resultó ser menor que en las estructuras reales, lo que podría afectar tanto la rigidez como el funcionamiento esperado. La distribución de cargas en el prototipo solo se podía proporcionar de manera estática, lo que limitaba la replicación de la carga dinámica presente en estructuras reales. Además, otro desafío importante

fue la inestabilidad del último nivel de la torre, que era demasiado flexible para soportar la carga aplicada en el brazo, por lo que se requirió la adición de diagonales en el último nivel para mejorar su rigidez.

En cuanto a la instrumentación, se colocaron *strain gauges* en las zonas propuestas. Esto permite evaluar con mayor precisión las zonas propensas a fatiga y comparar las deformaciones medidas con las obtenidas en el modelo SAP2000.

El acelerómetro y los *strain gauges* fueron seleccionados por su capacidad para proporcionar datos complementarios sobre el comportamiento estructural del prototipo. El acelerómetro se utilizó para señalar la inclinación del brazo, facilitando así la identificación de deformaciones según su posición; mientras tanto, los *strain gauges* cuantifican estas deformaciones.

Adicionalmente, durante la fase de calibración de los sensores, se realizaron pruebas para validar su correcto funcionamiento, verificando su sensibilidad ante eventos de carga estática y dinámica. A pesar de algunos problemas relacionados con interferencias eléctricas, se llevaron a cabo calibraciones periódicas y ajustes en tiempo real para corregir cualquier desviación en las lecturas, lo que permitió estabilizar los datos obtenidos.

El proceso de construcción brindó aprendizajes valiosos sobre precisión en el diseño a escala y la instrumentación. En futuras investigaciones, sería recomendable explorar la construcción de prototipos de *shiploader* a diferentes escalas para evaluar cómo las variaciones en las dimensiones influyen en el comportamiento estructural. También sería valioso incorporar tecnologías de sensores más avanzadas, como sistemas inalámbricos o sensores ópticos, y estudiar el desempeño del prototipo bajo condiciones operativas más extremas o con materiales alternativos.

4.3 Modelación numérica del comportamiento estructural del shiploader

4.3.1 Ensayo de tracción en piezas Meccano

El ensayo de tracción de la pieza *Meccano*, utilizando la metodología descrita junto con las ecuaciones 3.1 y 3.2, permitió generar curvas de carga desplazamiento y esfuerzo deformación. En la Figura 4.2 se presentan las tres curvas carga-desplazamiento, correspondiente a los tres ensayos realizados.

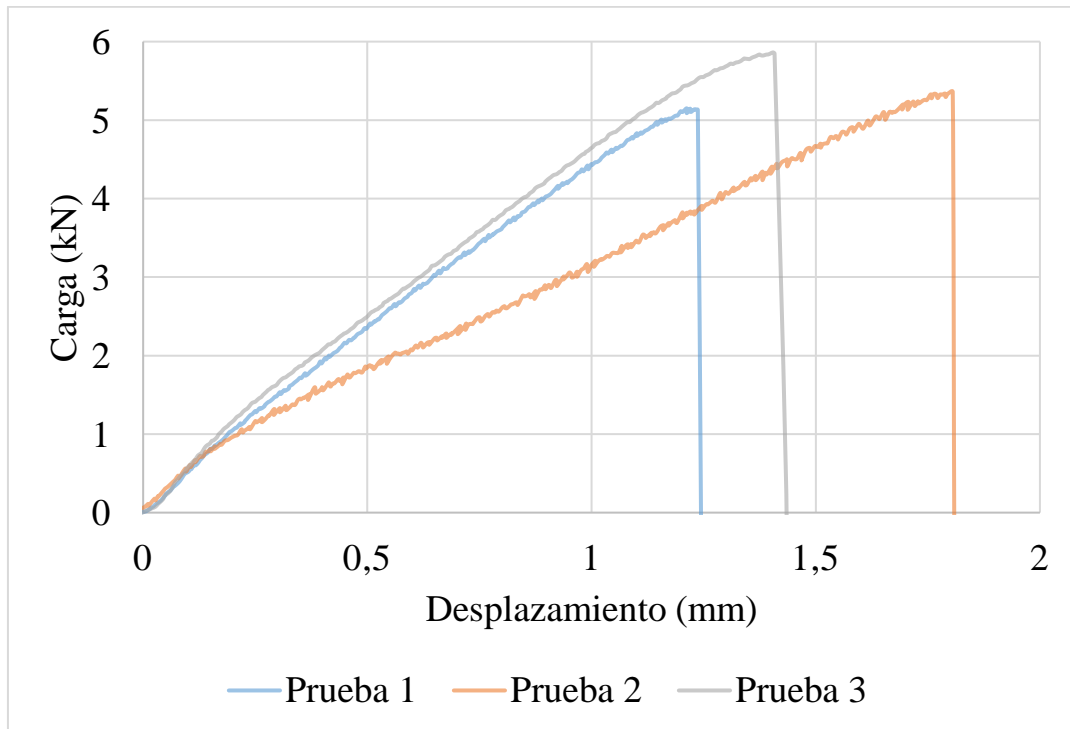


Figura 4.2 Gráfico carga desplazamiento

Al observar el gráfico, se puede notar que la prueba 2 se desvía significativamente de las curvas obtenidas en las pruebas 1 y 3. Debido a esta discrepancia, la prueba 2 fue considerada un *outlier* y, por lo tanto, no se incluyó en el cálculo del módulo de elasticidad final.

En la Figura 4.3 se presenta el gráfico esfuerzo deformación realizado, para los tres ensayos.

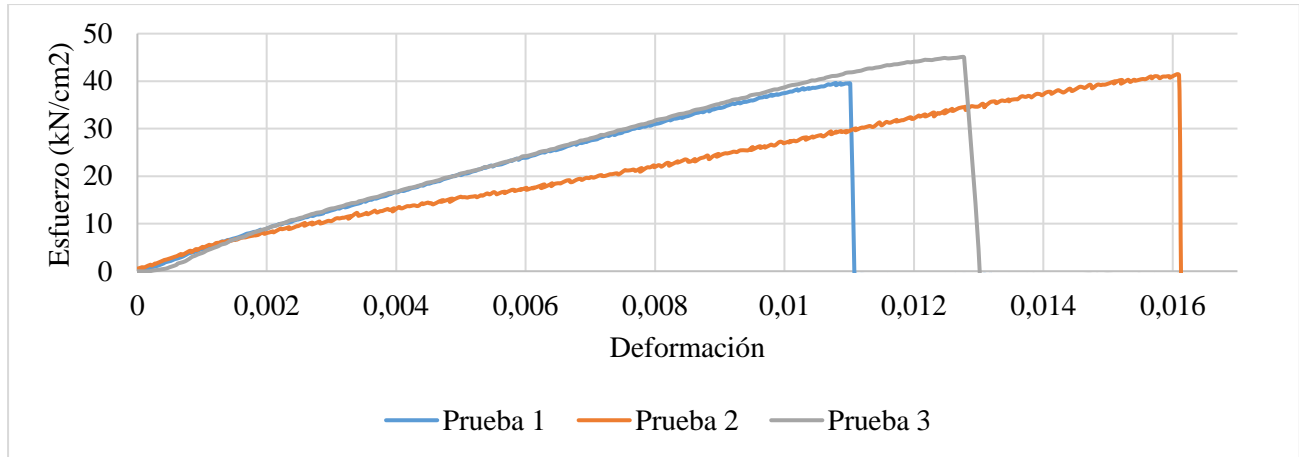


Figura 4.3 Gráficos esfuerzo deformación

En las tres pruebas, el material alcanzó niveles de esfuerzo máximo similares, aunque se observaron ligeras variaciones en las deformaciones, atribuibles a diferencias en las condiciones iniciales, o en la precisión del instrumento de medición.

Después de alcanzar el esfuerzo máximo en cada ciclo, se observó una caída abrupta del esfuerzo, lo que indica la rotura de la pieza *Meccano*, llegando a la falla. Aunque el comportamiento general es consistente, se notaron diferencias en el rango de deformación entre las pruebas. Por ejemplo, la prueba 2 mostró mayores deformaciones comparadas con la prueba 1 y la prueba 3 bajo un esfuerzo similar, posiblemente debido a variaciones en la alineación de la muestra.

Un aprendizaje de este ensayo es la importancia de realizar pruebas de tracción para obtener un módulo de elasticidad experimental que refleje con precisión las propiedades del material.

La Tabla 4.1 resume los resultados obtenidos en Autodesk Inventor mediante el análisis de tensiones para la prueba 1, y la Tabla 4.2 para la prueba 3.

Tabla 4.1 Resumen análisis de tensión prueba 1

Carga: 5150 N	Original	Prueba 1
Módulo inicial (GPa)	210	-
Desplazamiento (mm)	0.2089	1.2370
Relación	1	0.17
Módulo final (GPa)	-	35.5

Tabla 4.2 Resumen análisis de tensión prueba 3

Carga: 5862 N	Original	Prueba 3
Módulo inicial (GPa)	210	-
Desplazamiento (mm)	0.2378	1.4081
Relación	1	0.17
Módulo final (GPa)	-	35.5

Como resultado, se obtuvo un módulo de elasticidad promedio de 35 464 *MPa*.

4.3.2 Fuerzas por elemento según modelo numérico

En SAP2000 se construyó un modelo tridimensional compuesto por elementos tipo *frame* que replica la estructura del *shiploader*. Este modelo permite simular y analizar la respuesta estructural de sus componentes bajo distintos escenarios de daño. La Figura 4.4 muestra el modelo en su posición de carga.

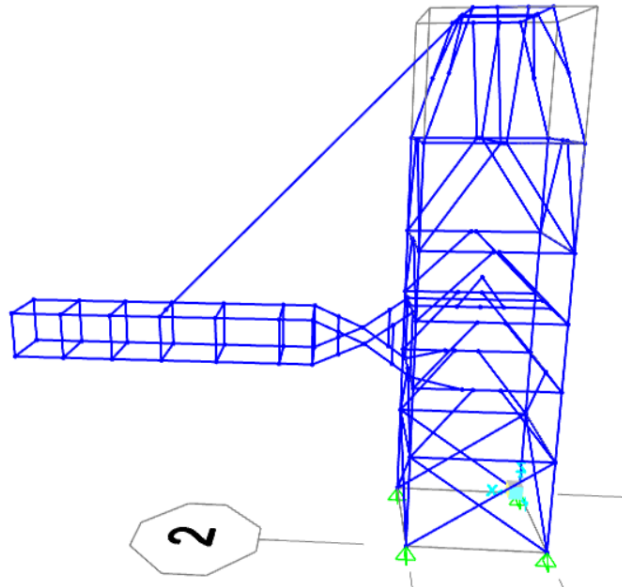


Figura 4.4 Shiploader en posición de carga

Como parte del análisis, se presentan las Figuras 4.5 y 4.6. La Figura 4.5 ilustra el diagrama de fuerza axial en la posición de descanso, la Figura 4.6 en la posición de carga.

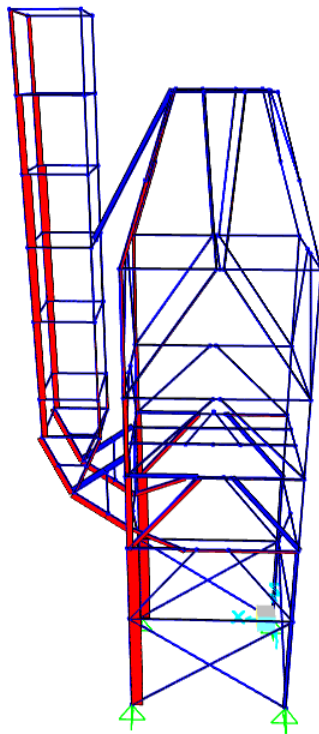


Figura 4.5 Fuerza axial en descanso, combinación D+L

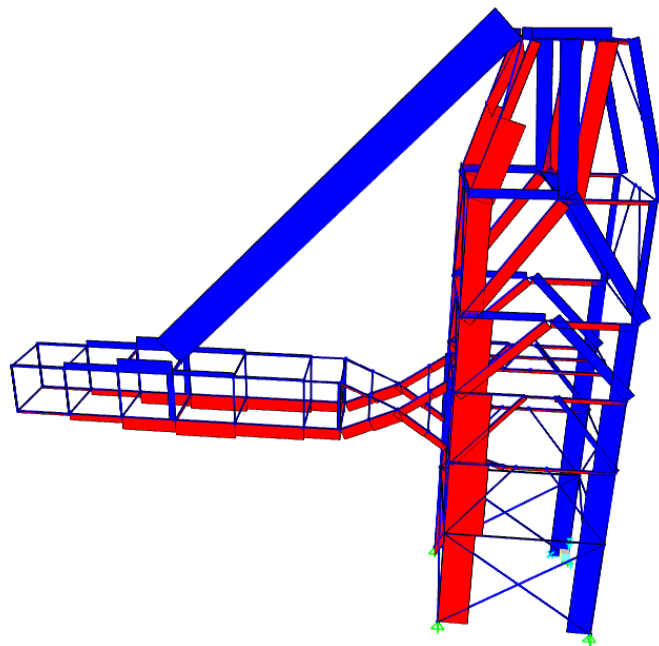


Figura 4.6 Fuerza axial en carga, combinación D+L

El cable del sistema de izaje se representa como una viga doblemente articulada en ambos extremos, lo que permite simular su función de transmisión de fuerzas hacia la torre.

En cuanto al brazo del *shiploader*, se observa una disminución en la fuerza axial a medida que el brazo se eleva: disminuye la tracción y aumenta la compresión conforme el ángulo de elevación. Esta relación directa entre la inclinación del brazo y la fuerza transmitida indica que las mayores solicitaciones se producen en la posición de carga. En cuanto a la torre, sucede el mismo fenómeno, disminuye la carga a medida que el brazo se eleva. Esto concuerda con la realidad, ya que, en la posición de carga, el brazo del *shiploader* debe soportar el peso del material transportado, que genera una fuerza adicional que no está presente en la posición de descanso. Esta fuerza hace que las tensiones en los componentes estructurales aumenten, especialmente en las zonas como los pivotes y la torre, que son puntos de apoyo principales.

Los resultados obtenidos en el modelo de elementos finitos, representados en las Figuras 4.5 y 4.6, sugieren que sería interesante ampliar la sensorización a otras zonas, como la torre, que parece experimentar mayores cargas axiales en comparación con las áreas inicialmente propuestas para instrumentación.

A continuación, se presenta la Tabla 4.3, que muestra los valores de la variación de fuerzas axiales en las posiciones de carga y descanso en SAP2000, para el pivote 1 y 2. Por otro lado, la Tabla 4.4 detalla los valores de la variación de momento en SAP2000, es decir, el cambio en los momentos entre las posiciones de carga y descanso, para la Manivela, la Viga de Anclaje y el Brazo.

Tabla 4.3 Variación fuerza axial SAP2000

Zona	Delta Axial (N)
Pivote 1	1,05
Pivote 2	1,67

Tabla 4.4 Variación momento SAP2000

Zona	Delta Momento (N-mm)
Brazo	-635,52
Manivela	-18,49
Viga de anclaje	19,72

4.4 Evaluación de la instrumentación y análisis de resultados experimentales

El acelerómetro instalado se utiliza como inclinómetro para monitorizar la posición del brazo del prototipo durante las pruebas, tomando como referencia el eje Y, donde 1G es la posición de descanso y 0G la de carga. Se presenta la Figura 4.7 con la medición correspondiente al acelerómetro.

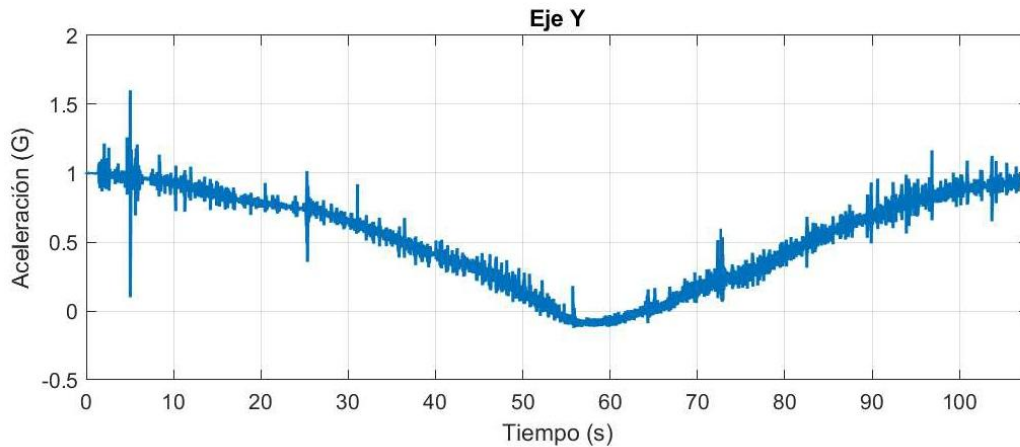


Figura 4.7 Mediciones acelerómetro escenario sin daño

Es importante mencionar que, si bien, 1G indica posición de descanso, y 0G la posición de carga, en algunos gráficos puede ocurrir que se sobrepase el 0G, indicando que el brazo queda más bajo que los 90 grados.

Se menciona la Figura 4.8 correspondiente a la medición de los *strain gauges* sin aplicarles filtro para reducir el ruido, y la Figura 4.9 con el filtro ya aplicado, correspondientes al escenario de referencia.

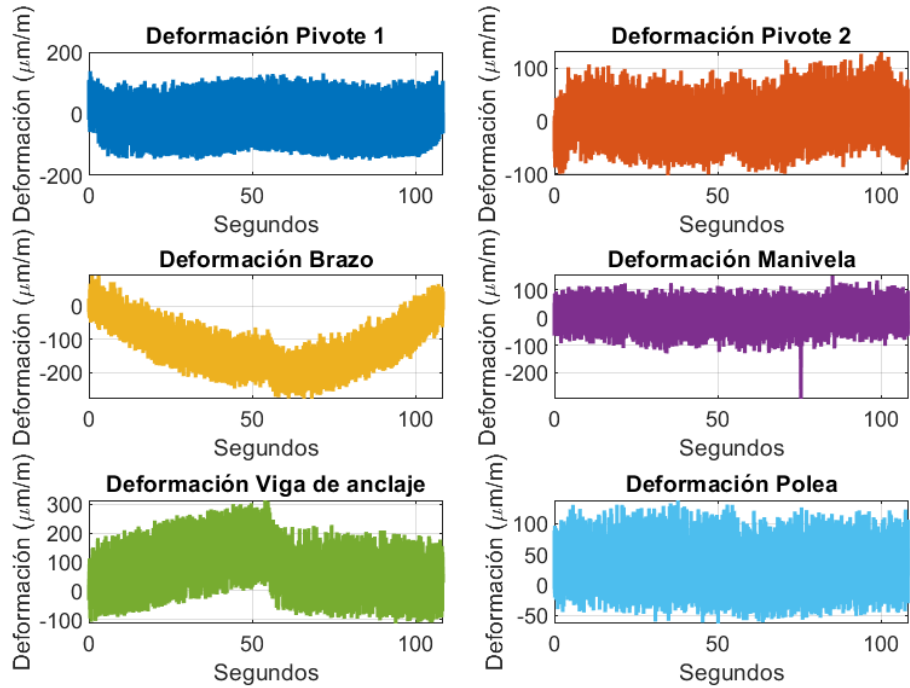


Figura 4.8 Medición strain gauge sin filtrar

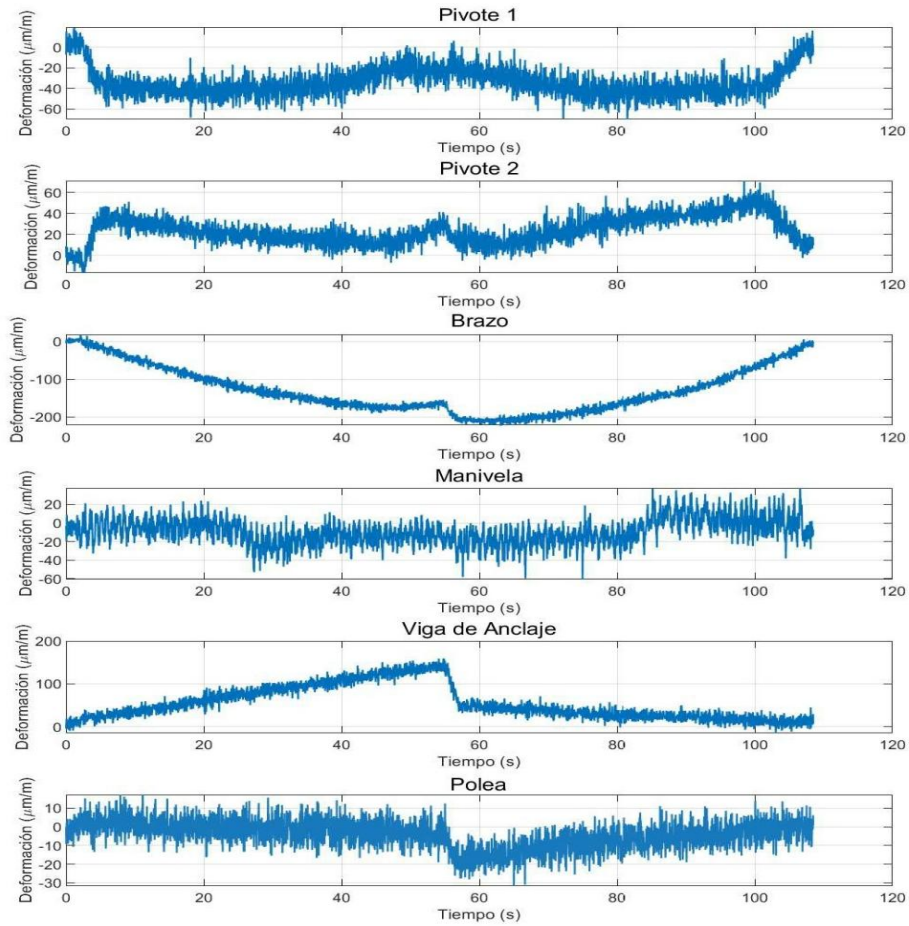


Figura 4.9 Mediciones strain gauges escenario sin daño

En el caso de los *strain gauges*, es importante mencionar que los datos correspondientes al sensor denominado “Polea” no serán analizados, ya que, aunque su grafico esté incluido en las mediciones presentadas, la instalación del sensor en una dirección incorrecta comprometió la confiabilidad de sus resultados. Esta situación se detalla en la Figura 3.11, donde se ilustra la ubicación y orientación del sensor. Además, se presenta la tabla 4.5, detallando la deformación de cada zona, en la posición de carga.

Tabla 4.5 Medición de deformación en posición de carga

Zona	Deformación $\mu\text{m/m}$
Pivote 1	-40,113
Pivote 2	-0,67
Brazo	-220,394
Manivela	-56,38
Viga de anclaje	-68,79

Adicionalmente, se tiene la Figura 4.10 detallando las mediciones del acelerómetro en el eje Y, y la Figura 4.11 detallando las mediciones de los *strain gauges* para el escenario 2.

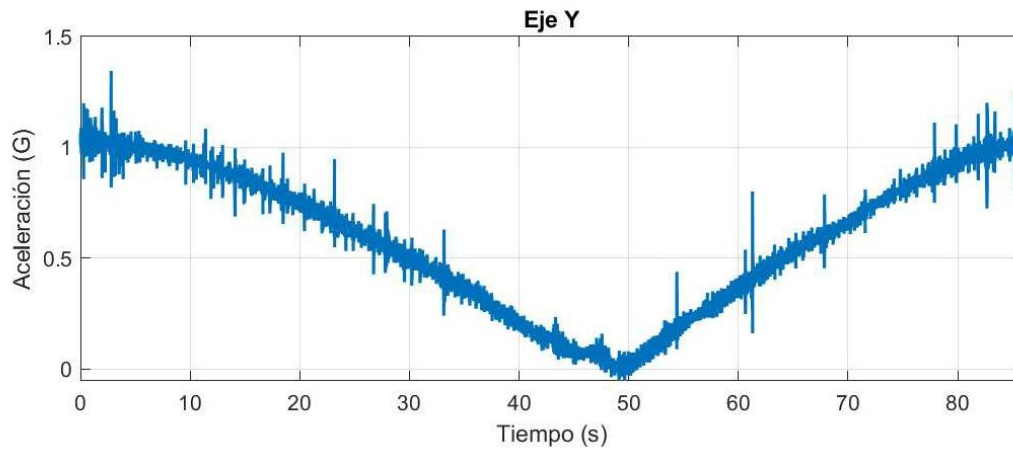


Figura 4.10 Mediciones acelerómetro escenario 2

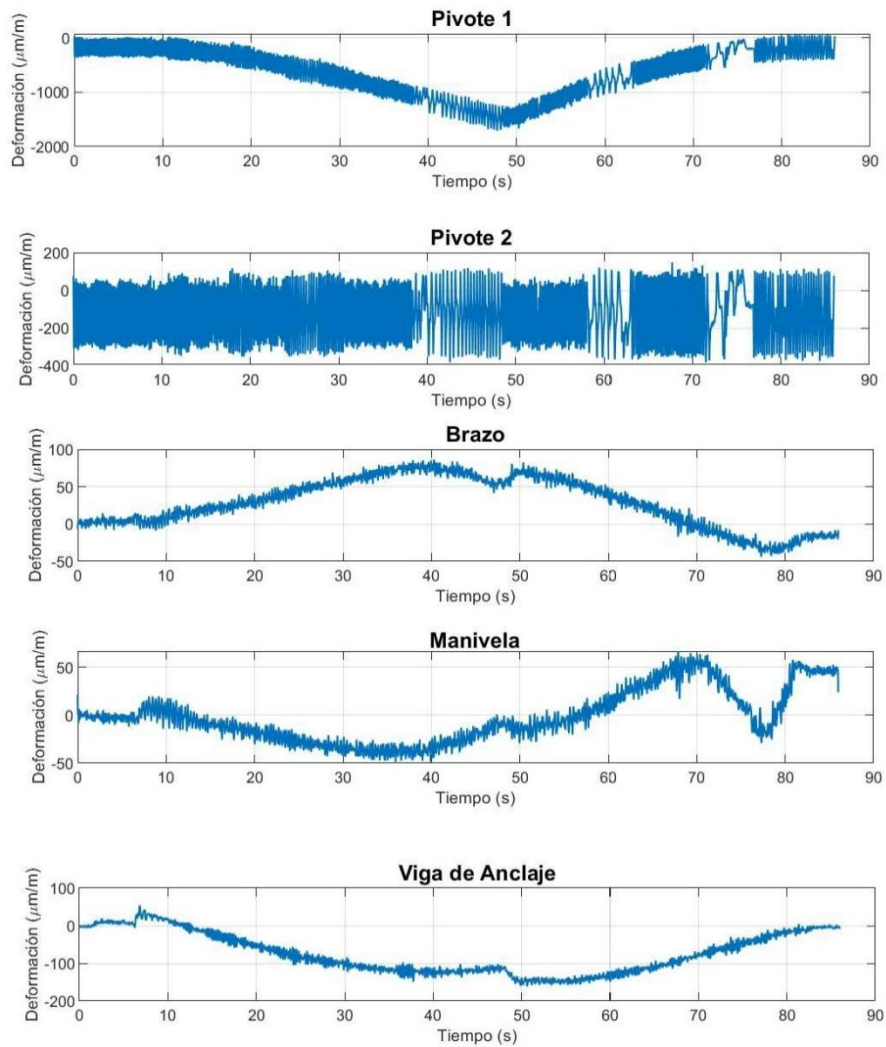


Figura 4.11 Deformaciones filtradas en puntos instrumentados escenario 2

La Figura 4.10 presenta las mediciones del acelerómetro para el escenario 2. En cuanto a la Figura 4.11, se presenta un patrón cóncavo en el pivote 1, y, además, de las seis zonas, es el que mayores deformaciones presenta. Este comportamiento es consistente con el aflojamiento de la conexión, ya que este componente está sometido a esfuerzos elevados, por su ubicación y función en el prototipo. Por otro lado, el pivote 2 mostró una señal de deformación mucho más ruidosa y con variaciones abruptas, que podrían deberse a varios motivos, por un lado, el sensor podría estar mal instalado, por lo que quizás no se detecten bien las variaciones, o por otro, sí existen variaciones, pero son muy pequeñas por lo que solo se lee ruido.

El brazo mostró baja amplitud en su señal, y la manivela, aunque con menor amplitud que el pivote 1, presentó variaciones progresivas en la amplitud, lo que podría sugerir una acumulación de tensiones durante los ensayos.

Además, la viga de anclaje mostró una deformación uniforme, reflejando su rol secundario en la transmisión de cargas.

En cuanto al escenario 3, se presentan las Figuras 4.12 y 4.13, detallando los gráficos de estos ensayos.

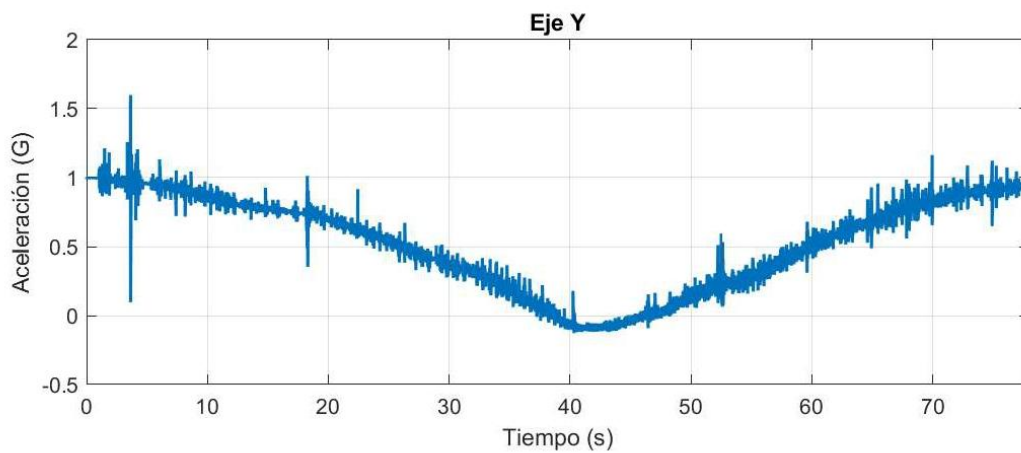


Figura 4.12 Mediciones acelerómetro escenario 3

En la Figura 4.12, que muestra las mediciones del acelerómetro, se observa un comportamiento consistente con los ensayos anteriores. La señal refleja un cambio gradual en la aceleración, con un descenso seguido de un incremento.

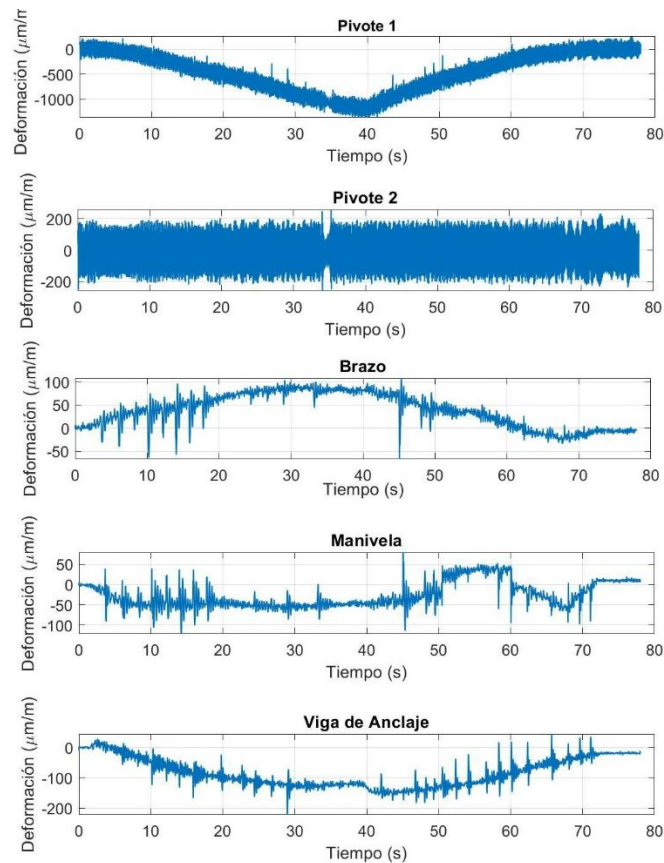


Figura 4.13 Deformaciones filtradas en puntos instrumentados escenario 3

En la Figura 4.13 la deformación en el brazo tiene una tendencia creciente, además, mantiene el mismo patrón que en el escenario 2.

En las señales registradas en los pivotes, se evidencia que, en el escenario 3, el pivote 1 presenta una curva similar al escenario 2, lo que indica un comportamiento coherente en esta zona bajo los distintos escenarios. Sin embargo, en el escenario 3 no se observan diferencias significativas en cuanto a las magnitudes de las deformaciones, lo que sugiere que este escenario tiene un impacto marginal en esta área.

En el caso de la manivela, se observa una amplitud menor en las deformaciones registradas, indicando que esta zona experimenta deformaciones menos críticas en términos generales. Sin embargo, durante los picos de deformación, como los ocurridos en los segundos 10 y 20, y en el segundo 45 aproximadamente, se registran variaciones coincidentes con los impactos aplicados al brazo. Este

comportamiento confirma que el *strain gauge* instalado en la manivela es capaz de detectar las variaciones inducidas por eventos de mayor intensidad, validando su sensibilidad y efectividad para monitorear deformaciones dinámicas.

La Figura 4.14 y 4.15 ilustran los gráficos correspondientes a la aceleración y las deformaciones obtenidas para el escenario 4, respectivamente.

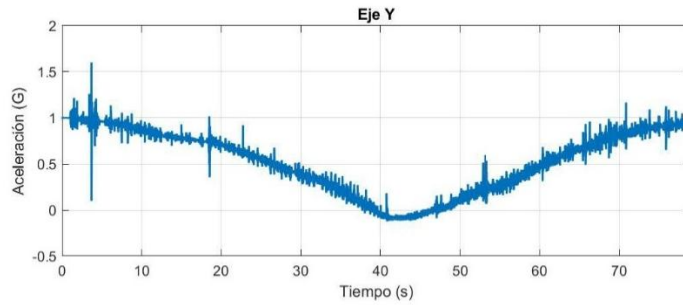


Figura 4.14 Medición acelerómetro escenario 4

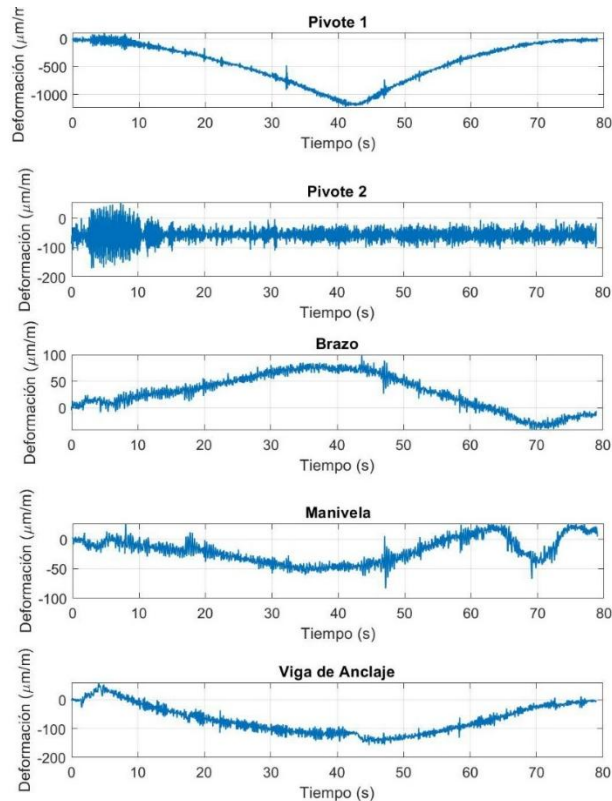


Figura 4.15 Deformaciones filtradas en puntos instrumentados escenario 4

En el escenario 4, las curvas de deformación muestran, en términos generales, tendencias similares a las observadas en los escenarios anteriores. Sin embargo, se aprecia una excepción en el pivote 2, donde se identifican comportamientos distintos, que podrían estar asociados a distribuciones desiguales en las cargas de ambos pivotes, o efectos de flexiones fuera del plano principal. Por otro lado, los impactos aplicados en la torre no se reflejan de manera significativa en las mediciones del *strain gauge*, ya que los *peaks* detectados son escasos y de baja intensidad. Este resultado sugiere que los impactos en la torre tienen una influencia mínima en las deformaciones estructurales captadas, en contraste con los golpes aplicados al brazo, que generan picos mucho más evidentes. Dicho comportamiento refuerza la idea de que el brazo es más susceptible a los eventos de daño localizados.

Con base en los análisis realizados, se concluye que las zonas más afectadas por los eventos de daño fueron el pivote 1, principalmente debido al aflojamiento de la conexión, que generó una deformación base para los demás escenarios.

Por otro lado, se identifica que el escenario 2 tuvo el mayor impacto a nivel global en las deformaciones registradas, evidenciando la sensibilidad de la estructura a este tipo de condición. En cambio, los escenarios 3 y 4 presentaron efectos más localizados, como se observa en las Figuras 4.13 y 4.15. Estos resultados demuestran que el aflojamiento de conexiones tiene un impacto más significativo en el comportamiento global del sistema estructural. Por su parte, los impactos repetidos en el brazo generan picos localizados que pueden ser útiles para análisis específicos, mientras que los impactos en la torre tienen una influencia limitada en las mediciones.

De manera adicional, en la Tabla 4.6 se presentan los resultados del análisis de deformaciones medidas en el prototipo bajo los distintos escenarios de daño utilizando los *strain gauges*.

Tabla 4.6 Cambio en deformaciones para los distintos escenarios

Zona	Escenario 1 (Base)	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Pivote 1	-70,13	-1711,23	-1343,82	-1165,73
Pivote 2	71,23	NI	NI	NI
Brazo	-221,224	86,38	104,49	95,26
Manivela	-60,92	63,09	-113,57	-83,29
Viga de anclaje	159,369	50,92	-219,33	-135,05

En relación con la Tabla 4.6, las deformaciones para las cinco zonas sensorizadas reflejan la evolución de las deformaciones desde el escenario base (Escenario 1), hasta el escenario 4. Se observa que las deformaciones en el escenario base son significativamente menores, confirmando que los sensores son capaces de detectar alteraciones inducidas en el prototipo.

Más específicamente, en el pivote 1, las deformaciones aumentaron significativamente en los escenarios 2, 3 y 4, debido al aflojamiento de la conexión en esta zona. El mayor incremento se observó en el paso del escenario 1 al 2, mientras que los escenarios 3 y 4 generaron aumentos menores. Este comportamiento destaca la sensibilidad de esta zona al aflojamiento. En contraste, el pivote 2 como se ve en las Figuras 4.11, 4.13 y 4.15 presenta ruido, por lo que no será de interés analizar su comportamiento.

Las deformaciones en el brazo, manivela y viga de anclaje permanecieron relativamente constantes a través de los escenarios.

Los *peaks* en los escenarios 3 y 4 corresponden con los impactos inducidos tanto en el brazo con la torre, que se ven reflejados especialmente en el brazo, manivela y viga de anclaje.

Se menciona la Tabla 4.7 con las deformaciones utilizadas en Inventor, y en la Tabla 4.8 se presentan los valores de fuerza axial obtenidos mediante SAP2000 y el análisis estructural realizado en *Autodesk Inventor* para ambos pivotes del prototipo, a partir de los datos experimentales levantados.

Tabla 4.7 Deformaciones ingresadas en inventor

Zona	Deformación ($\mu\text{m}/\text{m}$)
Pivote 1	-70,13
Pivote 2	71,23
Brazo	-221,224
Manivela	-60,92
Viga de anclaje	159,369

Tabla 4.8 Comparativa de fuerzas axiales para pivotes

Zona	Delta Axial SAP2000 (N)	Delta Axial Experimental (N)
Pivote 1	1.05	27.07
Pivote 2	1.67	27.42

En la Figura 4.16, se muestra un ejemplo del análisis realizado en Inventor, donde se ve la fuerza aplicada.

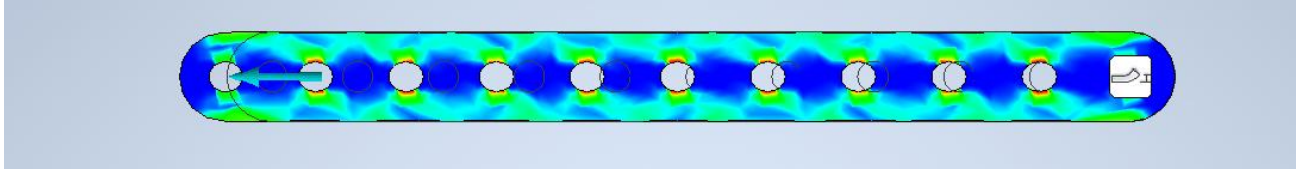


Figura 4.16 Análisis pieza Meccano en inventor

Se observa una diferencia significativa entre los valores obtenidos con SAP2000 y los del análisis de tensión. Esto puede deberse a que las piezas *Meccano*, por ser esbeltas, son propensas a efectos de segundo orden y a la flexión fuera del plano principal, lo que genera mayores deformaciones reales en comparación con las calculadas en el modelo de SAP2000, que simplifica las condiciones estructurales, omitiendo efectos como el pandeo o las imperfecciones geométricas, lo que subestima la carga efectiva en las piezas.

Además, el análisis de tensión tiene en cuenta las imperfecciones reales del prototipo, como la desviación del eje de carga respecto al centroide de la sección, lo que genera un brazo de palanca responsable de momentos adicionales. Estas imperfecciones se identifican a partir de las mediciones directas realizadas por los sensores instalados en el prototipo. Además, al combinarse con los efectos de momentos de segundo orden, estas condiciones incrementan la fuerza axial aparente, aunque gran parte de esta corresponda en realidad a efectos de momento y no exclusivamente a esfuerzos axiales puros.

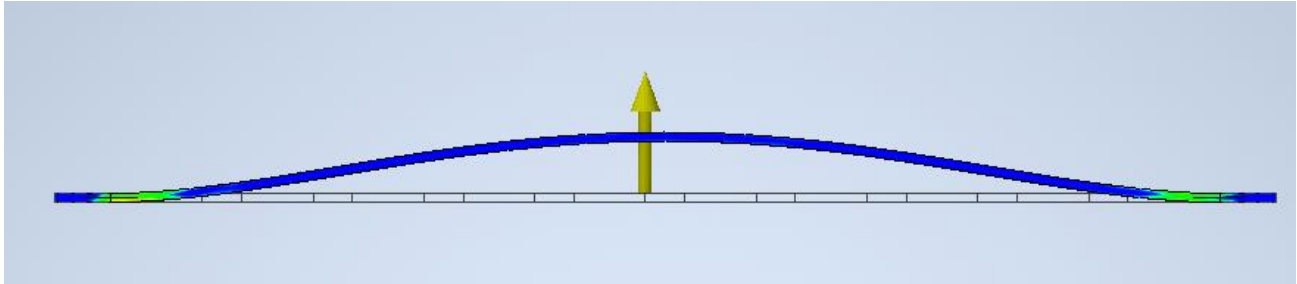
En la vida real, las piezas tienden a comportarse de manera más cercana al análisis experimental, ya que este incluye factores adicionales no modelados en SAP2000, como las deformaciones por flexión y las perforaciones.

A continuación, se presenta la Tabla 4.9, que muestra los valores de momento obtenidos mediante SAP2000 y el análisis de tensión realizado en *Autodesk Inventor* para las zonas restantes instrumentadas del prototipo: brazo, manivela y viga de anclaje.

Tabla 4.9 Comparativa de momentos para brazo, manivela y viga de anclaje.

Zona	Delta Momento SAP2000 (N-mm)	Delta Momento Experimental (N-mm)
Brazo	-635.52	23.80
Manivela	-18.49	6.04
Viga de anclaje	19.72	15.53

Adicionalmente, se observa en la Figura 4.17 la fuerza implementada.

**Figura 4.17 Análisis en inventar para momento**

Se observa que los valores de momento para la manivela y la viga de anclaje son relativamente similares entre ambos análisis. Esto indica que el modelo numérico es más representativo en estas zonas, posiblemente debido a que presentan menor influencia de imperfecciones geométricas, y otros factores no considerados en el modelo de elementos finitos.

Sin embargo, en el caso del brazo, los valores muestran una discrepancia significativa. Esto puede deberse a un mal punto de instrumentación, un fallo en la medición, o la aplicación de un factor de escala incorrecto. Estas diferencias también podrían ser atribuibles a las limitaciones del modelo en SAP2000, que, como se dijo anteriormente, simplifica las condiciones reales al excluir efectos como el pandeo, imperfecciones geométricas, y flexión fuera del plano principal. Por otra parte, el ensayo de tracción realizado para caracterizar las piezas *Meccano* podría no ser el más adecuado, considerando las particularidades geométricas de estas piezas, lo que introduce incertidumbre en los parámetros de entrada utilizados en los modelos numéricos.

Para abordar estas discrepancias, sería interesante realizar un análisis no lineal en SAP2000 que incorpore estos efectos, o bien llevar a cabo pruebas experimentales específicas en el prototipo, enfocándose particularmente en los pivotes y el brazo, para confirmar la distribución real de tensiones y momentos. Además, se recomienda revisar la calibración de los *strain gauges* para garantizar que

los datos obtenidos reflejen de manera precisa las deformaciones en las zonas instrumentadas. La medición directa de deformaciones en el prototipo mediante sensores es fundamental para validar y ajustar los modelos numéricos. Comparar los resultados experimentales con los obtenidos en el software permite identificar si las diferencias se deben a simplificaciones del modelo, propiedades materiales no consideradas o problemas en la instrumentación.

El desarrollo de este estudio enfrentó varias limitaciones que afectaron la interpretación y alcance de los resultados. Las piezas *Meccano* presentaron restricciones en rigidez estructural y respuesta dinámica debido a sus perforaciones, dificultando la representatividad en el MEF. Además, el modelo en SAP2000 omitió efectos de segundo orden derivados de imperfecciones geométricas y uniones, afectando la correlación entre datos experimentales y resultados numéricos. Aunque los sensores mostraron estabilidad en su desempeño, se presentaron problemas específicos, como la incorrecta instalación del strain gauge en la polea y ruido excesivo en el pivote 2, imposible de eliminar mediante filtros. El uso de un modelo a escala implicó simplificaciones constructivas que generaron diferencias con el prototipo real, afectando la representatividad de los datos recolectados. Además, el ensayo de tracción realizado no incluyó mordazas, por lo que el módulo de elasticidad determinado experimentalmente debe considerarse solo una estimación.

Finalmente, los *strain gauges* han demostrado ser herramientas eficaces para detectar variaciones en las deformaciones, incluso bajo diferentes escenarios de daño. Su capacidad para registrar tanto variaciones globales como locales en la estructura valida su uso como un componente clave en el monitoreo continuo de la salud estructural. Además, los resultados obtenidos destacan la importancia de identificar las zonas críticas, como el pivote 1, para implementar estrategias de mantenimiento y reparación más eficaces.

4.5 Conclusiones

En este Capítulo se presentaron y analizaron los resultados obtenidos mediante las pruebas experimentales realizadas en el prototipo a escala del *shiploader*, junto con las comparaciones de las predicciones numéricas generadas a través del MEF. Los datos recolectados por los *strain gauges* y el acelerómetro permitieron evaluar el comportamiento estructural del prototipo bajo diversas

condiciones de carga, identificando discrepancias entre los resultados experimentales y los valores predichos por el *software*.

El análisis aquí presente destaca la importancia de una instrumentación adecuada y bien calibrada, ya que cualquier error existente en la disposición o configuración de los sensores puede afectar la precisión de los datos recolectados, y, en consecuencia, la validez de las conclusiones obtenidas. Asimismo, las diferencias observadas entre las mediciones experimentales y las simulaciones numéricas subrayan las limitaciones inherentes a los modelos simplificados y la necesidad de considerar efectos como las imperfecciones geométricas y la flexión fuera del plano principal.

Finalmente, este Capítulo resalta la relevancia de integrar pruebas experimentales con modelaciones numéricas como una estrategia para validar y mejorar la precisión de ambos enfoques. Los resultados obtenidos no solo cumplen con los objetivos planteados en esta memoria, sino que también proporcionan una base sólida para futuras investigaciones y aplicaciones prácticas en el monitoreo y evaluación de estructuras similares.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

El presente proyecto tuvo como propósito evaluar la capacidad de detectar daño estructural a través de instrumentación en un prototipo de *shiploader*, mediante la integración de un modelo a escala instrumentado y modelación numérica. El prototipo de *shiploader* corresponde al diseño de un tercero y la propuesta de instrumentación fue realizada por un equipo de ingeniería privado.

En este estudio se utilizan dos enfoques de detección de daño: (1) un enfoque basado en física y (2) un enfoque basado en los datos.

Respecto del primer enfoque—basado en la física—en este estudio, se construyó un modelo físico a escala utilizando piezas *Meccano*, con escalas geométricas desde 1:20 a 1:40 tratando de emular en lo posible el prototipo real. Las piezas se ensayaron a tracción directa para obtener una estimación del módulo de elasticidad del material constituyente. El modelo escalado permitió detectar excesiva flexibilidad del último nivel de la torre, por lo que se requirió la adición de diagonales en el último nivel para mejorar su rigidez. Se recomienda al equipo de diseño implementar este cambio. El plan de instrumentación propuesto por externos a la investigación incluyó un acelerómetro, que monitorea la inclinación del brazo en función del tiempo, y seis *strain gauges* ubicados en: los pivotes, polea, manivela, viga de anclaje y brazo. Dicha propuesta inicial de instrumentación no consideró las zonas de mayor esfuerzo. Se recomienda al equipo de monitoreo incluir sensores en los miembros con mayor carga axial, puesto que estos son los más propensos a un eventual daño.

El comportamiento del *shiploader* a escala fue modelado utilizando dos softwares de elementos finitos: SAP2000 y Autodesk Inventor. En SAP2000, se analizaron los cambios en las fuerzas axiales y momentos flectores en los puntos instrumentados bajo una condición operativa. Esta involucró bajar y subir el brazo con una carga de servicio significativa (3 kg) para inducir deformaciones observables con los *strain gauges* en el prototipo físico escalado. El modelo en SAP2000 omitió los efectos de segundo orden producto de imperfecciones geométricas de las piezas *meccano* y sus uniones. La aparición de flexión en el eje débil de las piezas fue sólo detectada mediante los resultados de la instrumentación. Dado que las piezas *meccano* incluyen perforaciones a lo largo de ellas, fue necesario desarrollar además modelos numéricos más complejos. Los modelos desarrollados en Inventor permitieron interpretar las deformaciones medidas por los sensores en términos de fuerzas y

momentos. Se encontraron discrepancias notables entre las predicciones del modelo numérico con los resultados experimentales en algunos de los elementos estructurales del *shiploader*. Se halló una razón predicción/experimental de hasta 27 (brazo). En el mejor de los casos, esta razón fue de 1.25 (viga de anclaje). Estas discrepancias se atribuyeron principalmente a que el modelo en SAP2000 no incluyó los efectos de segundo orden producidos por las imperfecciones geométricas en el modelo a escala (holgura de las conexiones). La aparición de momentos flectores en el eje débil de las piezas, dadas las excentricidades locales en las conexiones, modifican las deformaciones longitudinales de la pieza (interacción flexión y axial). Estas discrepancias resaltaron las limitaciones del enfoque de detección de daño basado en la física del problema.

Respecto del segundo enfoque—basado en los datos—en este estudio, para evaluar la efectividad de la instrumentación propuesta, se diseñaron distintos escenarios de daño: (1) la eliminación de diagonales en la torre y el aflojamiento de conexiones; (2) la inducción de impactos repetidos en zonas específicas del brazo; y, (3) la inducción de impactos repetidos en zonas específicas de la torre. Estos escenarios evidenciaron que el aflojamiento de las conexiones aumentó significativamente las deformaciones en el pivote 1, lo que lo destacó como el escenario más crítico. Las limitaciones detectadas en la aplicación de este enfoque de detección de daño basado en los datos obtenidos desde sensores fueron: posibilidad de incorrecta instalación de algún sensor (incorrecta la orientación, posicionamiento inadecuado, necesidad de placa adicional adherida); posibilidad de escalado incorrecto de algún sensor; y, ruido excesivo de sensor que impide la interpretación de los resultados.

El enfoque basado en los datos demostró ser más fiable y aplicable debido a las limitaciones propias de modelos numéricos que deben siempre incluir simplificaciones (e.g., geometría, propiedades mecánicas). Este trabajo puso de manifiesto que, aunque el modelo físico escalado presentó deficiencias, los datos obtenidos fueron valiosos para entender el comportamiento estructural de la estructura real. No obstante, la falta de instrumentación en zonas críticas limita la efectividad de la propuesta inicial de instrumentación. Los resultados y su análisis mostraron la necesidad de ampliar la instrumentación tal que se pueda detectar y desagregar la acción concomitante de fuerza axial y momento fuera del plano (*strain gauges* ubicadas en dos caras opuestas de una misma pieza) en miembros críticos del sistema estructural, como por ejemplo los pivotes.

Para dar continuidad a este trabajo, se propone desarrollar modelos numéricos más avanzados que incorporen análisis no lineales, con el objetivo de mejorar la precisión en la representación del comportamiento estructural. Asimismo, se plantea construir prototipos más representativos utilizando materiales con propiedades similares a las estructuras reales. También se sugiere explorar tecnologías de sensorización inalámbrica y óptica, que podrían mejorar la precisión de las mediciones y reducir las interferencias observadas. Además, sería relevante evaluar la instrumentación bajo condiciones de carga más complejas, incluyendo escenarios dinámicos y eventos extremos, e investigar cómo las diferencias en escala geométrica y material afectan la respuesta estructural y el diseño de estrategias de monitoreo. Finalmente, se recomienda realizar distintos ensayos a las piezas *Meccano* y replantear las zonas de instrumentación, priorizando las de mayor esfuerzo para obtener datos más representativos.

REFERENCIAS

Catbas, F. N., Gokce, H. B., & Gul, M. (2012). Nonparametric analysis of structural health monitoring data for identification and localization of changes: Concept, lab, and real-life studies. **Structural Health Monitoring**, **11**(5), 613–626.

Cerda, F., Chen, S., Bielak, J., Garrett, J. H., Rizzo, P., & Kovacevic, J. (2014). Indirect structural health monitoring of a simplified laboratory-scale bridge model. **Smart Structures and Systems**, **13**(5), 849–868.

Chen, S., Wang, J., Zhang, C., Li, M., Li, N., Wu, H., Zhang, Y., & Song, Y. (2023). Marine structural health monitoring with optical fiber sensors: A review. **Sensors**, **23**(4), 1877.

Comisión Chilena del Cobre. (2023). *Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2004–2023*. Recuperado de <https://www.cochilco.cl>

Farrar, C. R., Doebling, S. W., & Nix, D. A. (2013). Introduction to structural health monitoring. **Structural Health Monitoring**, **1**(3), 1–17.

Farrar, C. R., & Worden, K. (2013). *Structural health monitoring: A machine learning perspective*. **John Wiley & Sons**, Chichester.

Figueiredo, E., & Brownjohn, J. (2022). Three decades of statistical pattern recognition paradigm for SHM of bridges. **Structural Health Monitoring**, **21**(6), 3018–3054.

Lee, Y. J., & Cho, S. (2016). SHM-based probabilistic fatigue life prediction for bridges based on FE model updating. **Sensors**, **16**(3), 317.

Liu, Y., & Nayak, S. (2012). Structural health monitoring: State of the art and perspectives. **JOM**, **64**(7), 789–792.

Mitta, S. (1999). Structural monitoring in seismic areas. **Structural Engineering International**, **9**(3), 217–220.

Phares, B., Lu, P., Wipf, T., Greimann, L., & Seo, J. (2013). Field validation of a statistical-based bridge damage-detection algorithm. **Journal of Bridge Engineering**, **18**(11), 1227–1238.

Ross, C., & Matthews, S. (1995). Structural monitoring in construction and post construction. In *Proceedings of the International Conference on Structural Monitoring in Construction*.

Rytter, A. (1993). *Vibrational based inspection of civil engineering structures* (PhD Dissertation). **Department of Building Technology and Structural Engineering, Aalborg University**.

Wilson, E. J. (2001). Chapter 17 Strain-gage instrumentation.

Worden, K., Farrar, C. R., Manson, G., & Park, G. (2007). The fundamental axioms of structural health monitoring. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science**, **463**(2082), 1639–1664.

Ye, X. W., Ni, Y. Q., Wong, K. Y., & Ko, J. M. (2012). Statistical analysis of stress spectra for fatigue life assessment of steel bridges with structural health monitoring data. **Engineering Structures**, **45**, 166–176.

Zhang, J., Guo, S. L., Wu, Z. S., & Zhang, Q. Q. (2015). Structural identification and damage detection through long-gauge strain measurements. **Engineering Structures**, **99**, 173–183.

ANEXO 1.1 Contribución a los objetivos de desarrollo sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál o cuáles de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10 : Reducción de las desigualdades.
- ODS-11 : Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12 : Producción y consumo responsables.
- ODS-13 : Acción por el clima.
- ODS-14 : Vida Submarina.
- ODS-15 : Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16 : Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17 : Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
<p>El desarrollo y aplicación de un sistema de instrumentación y modelación numérica para shiploaders presentado en este trabajo contribuye a los objetivos de desarrollo sostenible (ODS), en particular, al ODS-9 y ODS-11.</p> <p>Para el ODS-9, Industria, innovación e infraestructura, este trabajo promueve la innovación al integrar tecnologías de monitoreo estructural utilizando strain gauges. Además, se complementan estas mediciones con la modelación numérica, permitiendo predecir el comportamiento estructural bajo diversas condiciones.</p> <p>Respecto al ODS-11, Ciudades y comunidades sostenibles, el proyecto contribuye a crear infraestructura más segura y sostenible mediante la implementación de sistemas de monitoreo estructural que son capaces de detectar daño de forma temprana. Esto permite optimizar el mantenimiento, prolongar la vida útil de los equipos y asegurar el funcionamiento continuo de infraestructuras críticas como los shiploaders, que son esenciales para el comercio y la logística en entornos portuarios.</p>

ANEXO 3.1 CÓDIGO .m PARA DEFORMACIONES

```
clc;
clear;
close all;
% Tiempo de prueba (Depende de cada prueba)
tiempo_de_muestreo = 78.99800;
nombreArchivo = 'data_7.dat';
data = readtable(nombreArchivo, 'Delimiter', '\t', 'ReadVariableNames', true);
archivoNumero = regexp(nombreArchivo, '\d+', 'match');
archivoNumero = archivoNumero{1};
% Eliminar columnas correspondientes al acelerómetro
data(:, contains(data.Properties.VariableNames, {'v0', 'v1', 'v2', 'v3', 'v4', 'v5', 'v6', 'v7', 'y6', 'y7'})) =
[];
nombreSalida = sprintf('data_%s_corregido.xlsx', archivoNumero);
writetable(data, nombreSalida);
% Factores de conversión
offsets = [970, 1025, 805, 817, 855, 910];
scale_y0_y5 = 6.384972217581014e+02;
offset_base = -2.588817366394680e+03;
for i = 0:5
    colName = sprintf('y%d', i);
    data.(colName) = (data.(colName) * scale_y0_y5) + offset_base + offsets(i+1);
end
% Tarar deformaciones
for i = 0:5
    colName = sprintf('y%d', i);
    data.(colName) = data.(colName) - data.(colName)(1); % Restar el primer valor
end
nombreSalida = sprintf('data_%s_corregido.xlsx', archivoNumero);
writetable(data, nombreSalida);
```

```
% Parámetros de muestreo
Fs = length(data.y0) / tiempo_de_muestreo;
Ts = 1 / Fs;
L = length(data.y0);
t = (0:L-1) * Ts;
% Deformaciones medidas
figure(1)
colorMap = lines(6);
etiquetas = {'Pivote 1', 'Pivote 2', 'Brazo', 'Manivela', 'Viga de anclaje', 'Polea'};
for i = 0:5
    subplot(3, 2, i+1);
    colName = sprintf('y%d', i);
    plot(t, data.(colName), 'Color', colorMap(i+1,:), 'LineWidth', 1.5);
    title(['Deformación ', etiquetas{i+1}]);
    xlabel('Segundos');
    ylabel('Deformación (\mum/m)');
    xlim([0, tiempo_de_muestreo]);
    grid on;
end
sgtitle('Deformaciones medidas en los puntos críticos');
saveas(figure(1), sprintf('figura_deformaciones_data_%s.png', archivoNumero));
savefig(figure(1), sprintf('figura_deformaciones_data_%s.fig', archivoNumero));
```

ANEXO 3.2 CÓDIGO .m PARA ACELERACIONES

```
clc;
clear;
close all;
% Tiempo de prueba (Depende de cada prueba)
tiempo_de_muestreo = 85.998000; % En segundos
nombreArchivo = 'data_5.dat';
data = readtable(nombreArchivo, 'Delimiter', '\t', 'ReadVariableNames', true);
archivoNumero = regexp(nombreArchivo, '\d+', 'match');
archivoNumero = archivoNumero{1};
% Filtrar solo las columnas correspondientes al acelerómetro
data = data(:, {'y0', 'y1', 'y2'});
% Aplicar factores de conversión
data.y0 = (0.2976* data.y0) - 1.0387; % Conversión para X
data.y1 = (0.8801 * data.y1) - 5.003; % Conversión para Y
data.y2 = (0.2939 * data.y2) - 1.03; % Conversión para Z
% Guardar datos corregidos
nombreSalida = sprintf('data_%s_acelerometro.xlsx', archivoNumero);
writetable(data, nombreSalida);
% Parámetros de muestreo
Fs = height(data) / tiempo_de_muestreo; % Frecuencia de muestreo
Ts = 1 / Fs; % Periodo de muestreo
L = height(data); % Longitud de la señal
t = (0:L-1)' * Ts; % Vector de tiempo

% Figura: Señales del acelerómetro
figure;
subplot(3, 1, 2);
plot(t, data.y1, 'LineWidth', 1.5);
title('Señal del Acelerómetro - Eje Y (y1)');
xlabel('Tiempo (s)');
ylabel('Aceleración (G)');
```

```
xlim([0, tiempo_de_muestreo]);  
grid on;  
  
subplot(3, 1, 3);  
plot(t, data.y2, 'LineWidth', 1.5);  
title('Señal del Acelerómetro - Eje Z (y2)');  
xlabel('Tiempo (s)');  
ylabel('Aceleración (G)');  
xlim([0, tiempo_de_muestreo]);  
grid on;  
  
saveas(gcf, sprintf('figura_acelerometro_data_%s.png', archivoNumero));  
savefig(gcf, sprintf('figura_acelerometro_data_%s.fig', archivoNumero));
```

ANEXO 3.3 FILTRO .m PARA DATOS DE DEFORMACIONES

```
clc;
clear;
close all;
figFilename1 = 'figura_deformaciones_data_6.fig';
subplotTitles = {'Pivote 1', 'Pivote 2', 'Brazo', 'Manivela', 'Viga de Anclaje', 'Polea'};
[~, baseFileName, ~] = fileparts(figFilename1);
outputFilename = ['datos_suavizados_', baseFileName, '.xlsx'];
h1 = openfig(figFilename1, 'invisible');
axesObjs1 = findall(h1, 'type', 'axes'); % Encontrar los ejes de los subgráficos
axesObjs1 = flipud(axesObjs1); % Alinear el orden con la disposición original de los subgráficos
figure('Name', 'Deformaciones Filtradas', 'NumberTitle', 'off');
% Iterar sobre todos los ejes
for i = 1:length(axesObjs1)
    ax = axesObjs1(i);
    lines = findall(ax, 'type', 'line');
    if isempty(lines)
        warning('No se encontraron datos en el subgráfico %d (%s).', i, subplotTitles{i});
        continue;
    end
    xData = get(lines(1), 'XData');
    yData = get(lines(1), 'YData');
    % Tare (usando promedio de los primeros 10 puntos)
    yData = yData - mean(yData(1:10));
    % Filtrar la señal con FFT
    dataRange = max(xData) - min(xData); % Rango de tiempo
    Y = fft(yData);
    f = (0:length(Y)-1) * (1 / dataRange); % Frecuencia correspondiente
    cutoff_freq = 15; % Frecuencia de corte para deformaciones (Hz)
    Y(f > cutoff_freq) = 0; % Eliminar componentes de alta frecuencia
    yData_filtered = ifft(Y, 'symmetric'); % Transformada inversa para obtener la señal filtrada
```

```
subplot(length(axesObjs1), 1, i);
plot(xData, yData_filtered, 'LineWidth', 1); % Líneas más delgadas
title(['Deformación Filtrada (' , subPlotTitles{i}, ')']);
ylabel('Deformación (\mum/m)');
xlabel('Tiempo (s)');
grid on;

T = table(xData', yData_filtered', 'VariableNames', {'Tiempo', 'Deformacion'});
sheetName = subPlotTitles{i};
if i == 1
    writetable(T, outputFilename, 'Sheet', sheetName, 'WriteMode', 'overwrite');
else
    writetable(T, outputFilename, 'Sheet', sheetName, 'WriteMode', 'append');
end
end

sgtitle('Deformaciones Filtradas en Puntos Críticos');
disp(['Datos filtrados guardados en: ', outputFilename]);
```

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Constanza Denis Cares Fernández
Título de la memoria : Evaluación de una propuesta de instrumentación para shiploader mediante prototipo a escala y modelación numérica.
Fecha de la presentación oral: 01/04/2025

Profesor(es) Guía : Víctor Aguilar
Profesor(es) Revisor(es) : Sebastián Calderón
Concepto :
Calificación :

Resumen (máximo 200 palabras)

El transporte de minerales en puertos es esencial para la industria minera, con los shiploaders desempeñando un rol clave. Estos equipos están sujetos a cargas dinámicas y condiciones operativas que generan daños estructurales con el tiempo. Este estudio evaluó la efectividad de un sistema de instrumentación propuesto para detectar daños en un shiploader, mediante un modelo a escala instrumentado y simulación numérica. Los objetivos incluyeron construir un prototipo a escala con piezas Meccano, instrumentarlo con strain gauges y un acelerómetro, y validar su comportamiento mediante modelación con elementos finitos (MEF).

La metodología consideró tres escenarios de daño estructural simulados: debilitamiento de diagonales y conexiones, impactos en el brazo y la torre. Los datos experimentales fueron procesados utilizando la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para eliminar ruido y analizar las respuestas estructurales comparando MEF con resultados experimentales.

Los resultados mostraron que, aunque los sensores detectaron daños simulados, la instrumentación no fue adecuada para zonas de mayor esfuerzo, lo que sugiere mejorar su ubicación. Además, el enfoque basado en datos fue más fiable que el modelo numérico, limitado por simplificaciones y discrepancias geométricas y materiales entre el prototipo y el modelo. Este trabajo combina experimentación y simulación, ofreciendo una base para mejorar estrategias de monitoreo en equipos reales.