



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID
ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES
Grado en Ingeniería Mecánica

**Diseño y caracterización de un móvil robótico
multiconfigurable para simular las cargas verticales
sobre una maqueta de pasarela peatonal**

AUTOR: MUÑOZ ALONSO, DIEGO

TUTOR: LORENZANA IBÁN, ANTOLÍN

SEGUNDO TUTOR: MAGDALENO GONZÁLEZ, ÁLVARO

DPTO: CONSTRUCCIONES ARQUITECTÓNICAS, INGENIERÍA DEL
TERRENO, MECÁNICA DE LOS MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE
ESTRUCTURAS

Valladolid, Julio de 2017

RESUMEN

En el pasado, en las grandes ciudades para facilitar la movilidad se optaba por construir robustos puentes de acero, con cerchas o atirantados, capaces de resistir los esfuerzos provocados por las acciones exteriores.

Debido al alto coste material, la tendencia en la actualidad cuando se precisa conectar dos puntos es recurrir a ligeras pasarelas peatonales. Con un bajo coste son capaces de asumir las cargas aplicadas, aunque las vibraciones son muy superiores y, por tanto, deben ser controladas para asegurar la integridad estructural y el confort de los transeúntes.

Para realizar los estudios y cálculos de este tipo de estructuras se recurre a programas de computación y estudios a escala.

En proyectos anteriores de este departamento se ha estudiado la posibilidad de simular a escala las acciones verticales que produce un peatón sobre la estructura mediante un robot controlado con una masa excéntrica.

Partiendo de las conclusiones obtenidas, en el presente se estudiará la viabilidad de realizar un autómatas humanoide capaz de andar sobre la estructura, y un robot rodante que simule los pasos mediante el contacto con el suelo con varios tipos de leva diseñadas con una impresora 3D.

Además del diseño, se realizará la calibración de una célula de carga, y una vez probada junto con un láser en la caracterización y modelado de un sistema masa-muelle amortiguado conocido de un grado de libertad, será utilizada para caracterizar las acciones del robot sobre la estructura.

Así pues, se obtendrá el diseño y los datos efectivos de un sistema móvil a escala controlado capaz de simular diferentes acciones verticales de uno o varios peatones a la velocidad deseada, y se realizarán los ensayos propios en una viga biapoyada que simule la pasarela peatonal.

Palabras clave: Pasarela peatonal, robot, autómatas programable, control de vibraciones, frecuencia, amortiguamiento, calibración, caracterización.

ABSTRACT

In the past, in order to ease mobility in big cities strong steel bridges with trusses or supporting cables were built which were able to resist the efforts provoked by external actions.

Due to the high material cost nowadays, when it is required to connect two points, the tendency is to use light pedestrian overpasses. Despite its low cost, these structures are capable of resisting the loads, although vibrations are more numerous, and therefore, these must be controlled for the sake of securing the structural integrity and the pedestrians' comfort.

In order to do the studies and calculations regarding this kind of structures, computer programming and studies on scale are used.

In previous projects at this department, the possibility of simulating on scale the vertical actions a pedestrian produces on the structure through a controlled robot with an eccentric mass has been investigated.

Based on the conclusions obtained, in this investigation it will be studied the viability of creating a humanoid robot capable of walking on the structure and a rolling robot who simulates the steps through the contact to the floor with several types of 3D printed cams.

Besides the design, a load cell's regulation will be done, and once tested with a laser in the tasks of characterization and modelling of a mass-spring system of a certain degree of liberty, it will be used to typify the robot's actions on the structure.

In conclusion, the design and effective data of a controlled mobile system on scale which is able to simulate different vertical actions from one or several pedestrians at a desired speed will be obtained, and the own tests will be carried out on a supported beam simulating a footbridge.

Keywords: Footbridge, robot, programmable automata, vibration control, frequency, damping, calibration, characterization.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Motivación.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodología	5
1.3.1 Lego	5
1.3.2 Célula de carga.....	7
1.3.3 Láser de posición	8
1.3.4 Adquisición de datos.....	9
1.3.5 Sistema masa-muelle amortiguado de un grado de libertad..	10
1.3.6 Plataforma de caracterización	12
1.3.7 Viga biapoyada e instrumentación auxiliar	13
2. ACCIONES SOBRE LA ESTRUCTURA	15
2.1 Clasificación de las cargas según su origen.....	15
2.2 Acciones peatonales sobre una pasarela	17
2.2.1 Modelo	21
2.3 Normativa.....	22
2.3.1 EAE.....	22
2.3.2 IAP	25
3. DISEÑO DE AUTÓMATA PROGRAMABLE	27
3.1 Autómata humanoide	27
3.1.1 Antecedentes.....	27
3.1.2 Diseño.....	28
3.2 Robot rodante con levas	31
3.2.1 Diseño.....	31
3.2.2 LDD	34

4. CALIBRACIÓN Y CARACTERIZACIÓN	35
4.1 Calibración célula de carga.....	35
4.1.1 Calibración estática.....	36
4.1.2 Calibración dinámica.....	40
4.2 Caracterización del robot.....	51
4.2.1 M1-DD-A.....	54
4.2.2 M2-DD-A.....	56
4.2.3 M1-DI-A	58
4.2.4 M2-DI-A	60
4.2.5 M1-DD-V.....	62
4.2.6 M2-DD-V.....	64
4.2.7 Velocidad.....	66
4.2.8 Conclusiones.....	67
5. ENSAYOS A ESCALA	69
5.1 Estructura	69
5.1.1 Dimensionalización.....	69
5.1.2 Análisis teórico.....	71
5.1.3 Análisis experimental.....	75
5.2 Ensayos experimentales.....	78
5.2.1 Ensayos M1-DD-A	81
5.2.2 Ensayos M2-DD-A	83
5.2.3 Ensayos M1-DI-A.....	85
5.2.4 Ensayos M2-DI-A.....	87
5.2.5 Ensayos M1-DD-V	89
5.2.6 Ensayos M2-DD-V	91
5.2.7 Conclusiones.....	93
6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS	95

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En ingeniería se busca la innovación constante para el progreso de la sociedad. En el caso de la ingeniería estructural, la tendencia es buscar nuevos materiales, y cuestionar los procedimientos clásicos, para conseguir resultados más eficientes en la construcción. Una ingeniería abierta de innovación y creatividad debe conjugarse con los métodos clásicos de ingeniería analítica y pragmática.

Es por eso que para asegurar un buen plan de movilidad de sus ciudadanos y dadas las limitaciones económicas, pero sin faltar al factor estético, las grandes ciudades han optado por recurrir ligeras pasarelas peatonales.

Las pasarelas deben cumplir una normativa de la Administración además de unos criterios estéticos, de durabilidad, constructivos, funcionales, económicos y medioambientales [1].

Puesto que estas pasarelas son destinadas únicamente al tránsito de peatones o ciclistas, los requerimientos estructurales son menos exigentes, lo que permite una mayor flexibilidad estética y material, consiguiendo estructuras ligeras y poco amortiguadas.

Poseer notables vibraciones puede llegar a dar problemas tanto para la integridad de la estructura a largo plazo como para la comodidad de los peatones al tránsito. Por tanto estas vibraciones se deben controlar y mantener en un rango fiable, mediante un diseño y cálculos previos.

La normativa es cada vez más sensible a esta cuestión, recomendando alejar la frecuencia natural de la pasarela de los rangos de frecuencia típicos de los peatones y fijando límites de confort mediante unos valores máximos de aceleración.

Cuando estas vibraciones se vuelven excesivas se recurre a instalar amortiguadores de masa sintonizados para reducir las aceleraciones verticales y amortiguadores viscosos para reducir las aceleraciones laterales [2].

En el caso de Valladolid, dos claros ejemplos son la pasarela del Museo de la Ciencia (*Ilustración 1*) o, más reciente, el Puente de Pedro Gómez Bosque.



Ilustración 1. Pasarela del Museo de la Ciencia. Valladolid. [14]

El grupo de control de estructuras y de diseño estructural del centro tecnológico CARTIF en colaboración con la Universidad de Valladolid trabaja tanto en el análisis dinámico de estructuras civiles como en el diseño de sistemas de absorción vibraciones pasivos y semiactivos para pasarelas peatonales [3].

Para caracterizar de forma experimental la estructura, se deben identificar los parámetros dinámicos y realizar medidas de respuesta dinámica frente a diferentes escenarios de carga. En un primer momento se debe identificar las frecuencias naturales, los modos de vibración, los coeficientes de amortiguamiento y las masas modales correspondientes a la vibración de la pasarela con objeto de ajustar los modelos numéricos desarrollados en la etapa de diseño y calcular los parámetros óptimos de los sistemas de absorción de vibraciones.

En general, los parámetros dinámicos se identifican a partir de los registros de aceleración en dirección vertical, lateral y longitudinal en puntos clave del tablero, pilas y otros elementos de la estructura en situaciones de respuesta ambiental, libre o forzada.

1.2 Objetivos

Para realizar los cálculos de ingeniería estructural en pasarelas peatonales se recurre a programas de computación para la modelización y cálculo mediante elementos finitos, o a la realización de estudios a escala que permitan, a un bajo coste, el análisis y caracterización de la estructura. Así se pueden realizar simulaciones de estados críticos para detectar problemas y sistemas de seguridad control activo.

El objetivo de este Trabajo de Final de Grado (TFG) es realizar el diseño y caracterización de un autómatas programable que sea capaz de simular las acciones verticales típicas de uno o varios peatones, y a diferentes velocidades, sobre una estructura a escala.

En proyectos anteriores de este departamento (*Ilustración 2*) se ha estudiado la posibilidad de simular las acciones mediante un sistema rodante móvil con una masa excéntrica [4].



Ilustración 2. Trabajo de Final de Grado de Víctor Guerra (2016). [4]

A partir de las conclusiones obtenidas, en una primera fase se contemplará la viabilidad de realizar un autómatas humanoide que simule de una forma más real y estética los pasos de un peatón. Otra opción considerada será realizar un sistema móvil rodante que provoque las reacciones sobre el tablero de uno o dos peatones con el contacto de diferentes levas (diseñadas mediante una impresora 3D).

Una vez finalizado el diseño, será necesario establecer la fuerza y vibraciones que produce el robot sobre la estructura. Para ello se utilizará una célula de carga que deberá ser calibrada de forma estática.

Con unos resultados fiables de calibración estática, y para asegurar que la caracterización posterior del autómatas es correcta, se realizará un análisis dinámico con la célula y un láser de posición de un sistema conocido de un grado de libertad masa-muelle amortiguado.

Posteriormente, se creará una estructura que albergue la célula de carga de forma que mida las acciones verticales del autómatas en todas sus diferentes posibilidades de potencia, obteniendo una relación directa entre la frecuencia producida y la potencia suministrada.

Así se conseguirá un robot diseñado y caracterizado para simular las acciones sobre una viga biapoyada, que simula una pasarela a escala, con diferentes células de carga que determinen las reacciones en los apoyos. En los ensayos se podrá aproximar la frecuencia de vibración del sistema a la frecuencia natural de la viga para observar las reacciones y consecuencias.

OBJETIVOS	
1	Diseño autómatas humanoide
2	Diseño sistema móvil rodante con anclaje a la viga y contacto de levas en diferentes posiciones
3	Calibración estática de célula de carga
4	Análisis dinámico de un sistema conocido de un grado de libertad masa-muelle amortiguado con célula de carga y láser de posición. Comparativa teórico-experimental.
5	Elaborar plataforma de caracterización con la célula de carga
6	Caracterizar de forma experimental las acciones verticales del robot con las diferentes levas y posiciones
7	Ensayos a escala sobre viga biapoyada para calcular reacciones en los apoyos y aceleraciones verticales.

Tabla 1. Objetivos

1.3 Metodología

Para la realización de este proyecto ha sido necesaria una primera parte de investigación, y otra experimental realizada en su mayor parte en el taller del departamento de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Valladolid.

Para la parte práctica se ha requerido la instrumentación detallada a continuación.

1.3.1 Lego

El robot será modelizado con el paquete de LEGO® MINDSTORMS EV3 (*Ilustración 3*) que ofrece las siguientes piezas y sensores para su desarrollo.



Ilustración 3. Paquete de piezas LEGO® MINDSTORMS EV3. [15]

- Caja programable con 4 puertos de entrada (para sensores) y cuatro puertos de salida (para actuadores), un puerto mini USB (para conectarlo a un equipo), un puerto de host USB y un puerto micro SD.
- Cables necesarios para conectar todos los sensores y equipos.

- 594 piezas de LEGO.
- Sensor de contacto.
- 2 servomotores grandes.
- 1 servomotor mediano.
- 1 sensor táctil.
- 1 sensor de color (y de detección de ausencia de color).
- 1 sensor de infrarrojos.
- 1 transmisor de infrarrojos.

Además de poder programarlo sobre la propia base, se puede utilizar un software específico (*Ilustración 4*) que ofrece mayor amplitud de posibilidades mediante una sencilla programación por bloques y conexión Bluetooth.

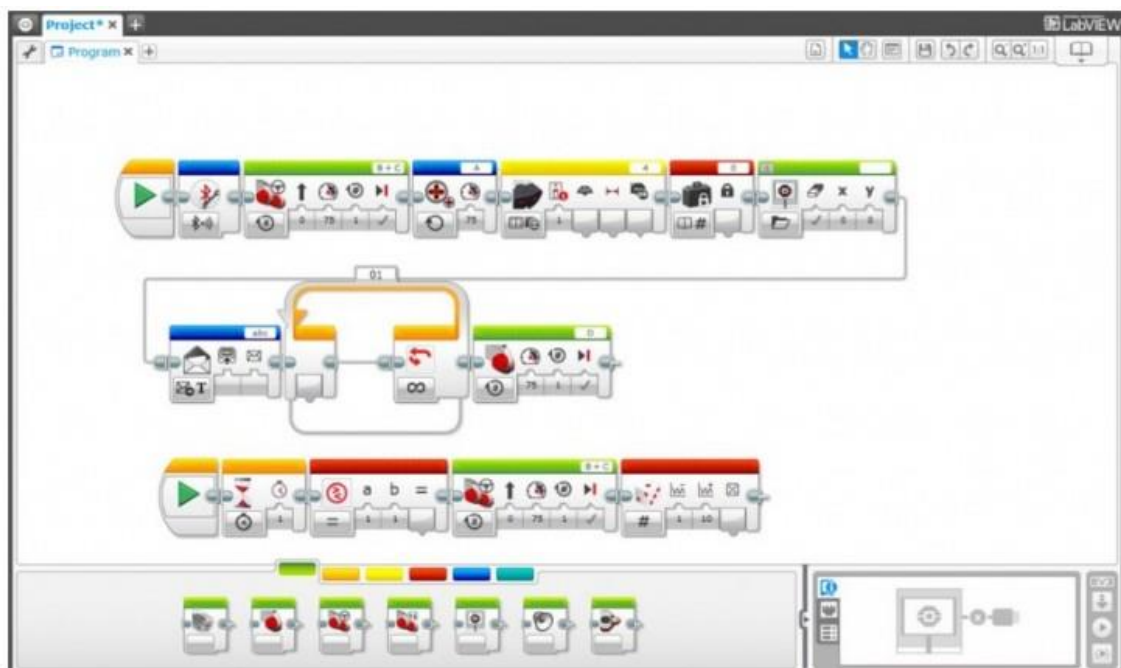


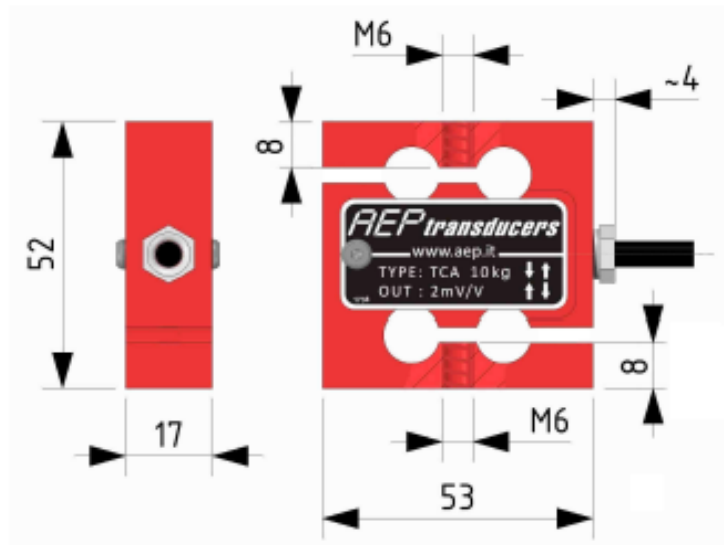
Ilustración 4. Software de programación LEGO® MINDSTORMS EV3. [15]

Para configurar el diseño final del autómatas y futuras modificaciones se empleará otro software específico (*LEGO® Digital Designer 4.3*) [15].

1.3.2 Célula de carga

Una parte fundamental de este proyecto es el análisis de la fuerza y frecuencia que realiza el autómatas sobre el tablero, para así poder caracterizar el sistema móvil y las reacciones en los apoyos.

Para ello se utilizará varias células de carga (*Ilustración 5*), con las siguientes dimensiones (para mayor detalle ver las especificaciones en el ANEXO A):



CODICE CODE	Carico nominale Nominal load	Frequenza naturale Natural frequency
CTCA1K5	1 kg	~ 0.22 kHz
CTCA2K5	2 kg	~ 0.50 kHz
CTCA5K5	5 kg	~ 0.75 kHz
CTCA10K5	10 kg	~ 1.00 kHz
CTCA25K5	25 kg	~ 1.50 kHz
CTCA50K5	50 kg	~ 2.00 kHz

Ilustración 5. Célula de carga AEP 10 Kg. [16]

Previamente a su uso, se calibrará la célula de forma estática con diferentes pesos. Posteriormente, y para asegurar una fiable caracterización de las acciones verticales del autómatas, se realizará un análisis dinámico de un sistema mecánico de un grado de libertad, comparando el modelo teórico con los resultados de fuerza medidos por la célula y un láser de posición [16].

1.3.3 Láser de posición

En el análisis del sistema masa-muelle amortiguado de un grado de libertad, además de comparar la fuerza medida experimentalmente con la teórica, se medirá con un láser la posición de la masa en cada instante.

El láser (*Ilustración 6*) contará con las siguientes especificaciones (para mayor detalle ver *ANEXO B*):

- Alta resolución: 8 μm (modo-resolución)
- Función del zoom
- Linealidad: 0,1 % (modo-resolución)
- Tiempo de reacción: < 660 μs (modo de velocidad)
- Valor de medida independiente de material, color y brillo.



Ilustración 6. Láser de posición CP08MHT80. [17]

Datos ópticos	
Rango de trabajo	30-80 mm
Rango de medición	50 mm
Resolución	8 μm
Resolución (Speed-Mode)	12 μm
Linealidad	0,1 %
Linealidad (Speed-Mode)	0,2 %
Fuente de luz	Láser (rojo)
Longitud de onda	660 nm
Vida útil ($T_u = +25\text{ }^\circ\text{C}$)	100000 h
Clase láser (EN 60825-1)	2
Luz externa máx. Admisible	10000 Lux

Tabla 2. Datos ópticos láser de posición. [17]

1.3.4 Adquisición de datos

Para la adquisición de datos a través de la célula y el láser se utilizará el hardware *SIRIUS HD-STG* (Ilustración 7) fabricado por *DEWESoft*®.



Ilustración 7. SIRIUS HD-STG.

Dispone de 16 entradas tipo *D-SUB*, donde se conectarán el láser y las células de carga simultáneamente, para registrar la señal mediante el software propio *DEWESoft X2 SP5* conectado a un ordenador con un puerto USB (para mayor detalle ver *ANEXO C*)

Configurando las entradas y salidas correctamente se puede obtener las gráficas de fuerza y posición con respecto del tiempo, así como la FFT, y exportar los datos a un formato *.txt* y *.xlsx* para su posterior procesamiento [18].

1.3.5 Sistema masa-muelle amortiguado de un grado de libertad

Antes de proceder a la caracterización del autómat, y una vez calibrada la célula de carga de forma estática, se realizará una comparativa teórico-experimental de un sistema masa-muelle amortiguado de un grado de libertad (*Ilustración 8*).

Así se asegurará un correcto uso de la célula de carga y el láser para la caracterización de cualquier sistema mecánico, y la fiabilidad de los datos obtenidos en el análisis dinámico del autómat.



Ilustración 8. Sistema masa-muelle amortiguado de un grado de libertad.

Para construir el sistema, se anclará la célula de carga de carga a una base de madera con un tornillo de apriete de husillo de forma vertical y se conectará inferiormente a un muelle de 360 mm de largo y 6 mm de diámetro, con un peso de $18,8\text{ g}$.

En el otro extremo estará ubicada una masa formada por dos tuercas y cinta de unión de doble cara (*Ilustración 9*), y una placa inferior de aluminio que asegure un contacto óptico uniforme del láser de posición. Todo ello con una masa conjunta de 420,6 g.



Ilustración 9. Instrumentación auxiliar.

En la parte inferior será fijado el láser con una pinza de sujeción, a una distancia de 55 mm de la posición de reposo (lugar intermedio entre el límite mínimo y máximo de adquisición).

Los dos sensores permanecerán conectados al hardware de adquisición *SIRIUS*, y éste a su vez al ordenador, obteniendo la señal de fuerza y posición en el tiempo de la masa desplazada de forma vertical hacia abajo, un máximo de 25 mm.

1.3.6 Plataforma de caracterización

Con el diseño final del autómat, se procederá a caracterizar las acciones verticales inducidas sobre el tablero. Para ello se fabricará una plataforma auxiliar (*Ilustración 10*), que fije el robot y permita el contacto de las levas en diferentes posiciones variando la potencia del servomotor.

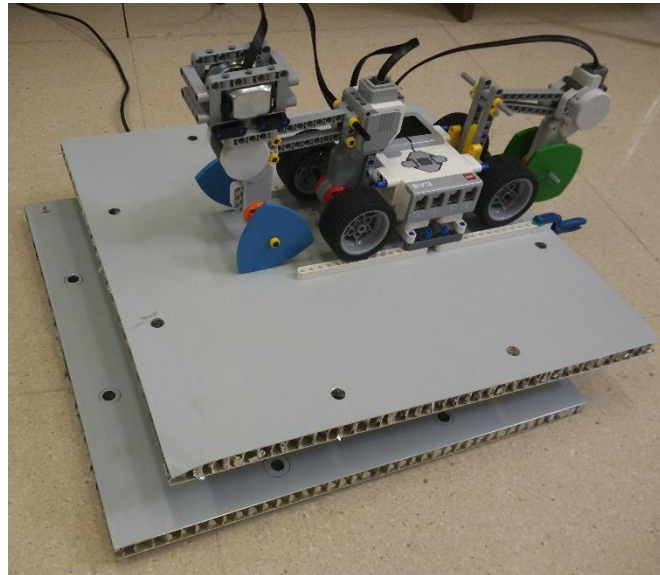


Ilustración 10. Plataforma de caracterización.

Está formada por dos placas de aluminio de $400 \times 400 \times 20$ mm separadas por la célula de carga atornillada en el centro (*Ilustración 11*). El robot será fijado con pinzas de sujeción al extremo de forma que las levas realicen el contacto sobre el tablero justo encima de la célula pero el autómat no se desplace.

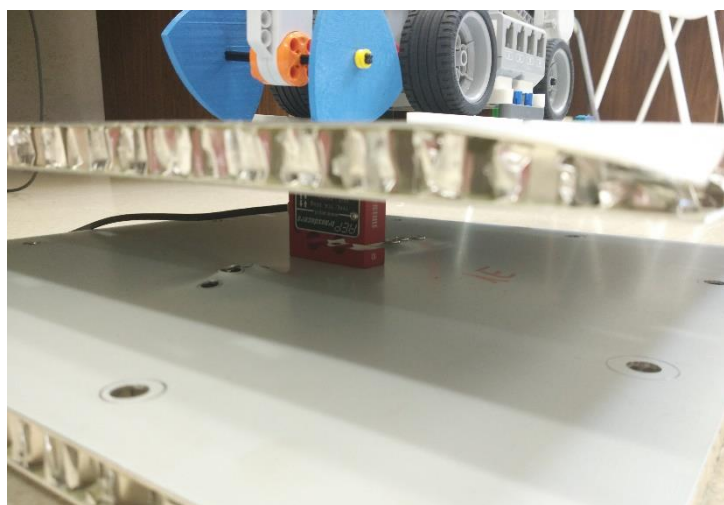


Ilustración 11. Posición de célula de carga en la plataforma de caracterización

1.3.7 Viga biapoyada e instrumentación auxiliar

Como conclusión de este proyecto, se realizarán los ensayos del autómeta ya caracterizado sobre una viga biapoyada que simule una plataforma peatonal a escala, que será puesta a prueba con varias levas y posiciones, para inducir diferentes frecuencias y observar la respuesta.

Se encuentra apoyada en dos caballetes permitiendo el giro pero no el desplazamiento, con dos células de carga en cada extremo para medir tanto reacciones en los apoyos como un posible momento torsor (*Ilustración 12*).

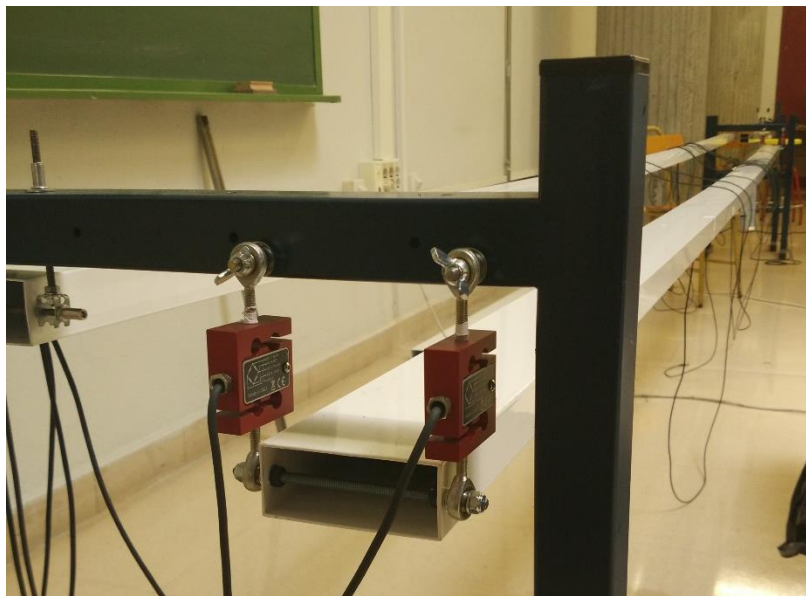


Ilustración 12. Apoyo y células de carga de la viga.

La viga está fabricada en aluminio por extrusión con un perfil $100 \times 40 \times 1,5$ mm y 6 m de longitud, lacada en blanco.

- **Densidad:** 2700 kg/m^3 .
- **Resistencia:** Resistencia máxima a la tracción de 207 MPa y un límite elástico de 110 MPa con una elongación en su longitud del 16%.
- **Elasticidad:** El Módulo de Young del aluminio se sitúa entre $6,3$ y $7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$.

Las tolerancias suministradas por el fabricante son:

- $\pm 10 \%$ en el espesor.
- $\pm 0,30 \text{ mm}$ en altura.
- $\pm 0,60 \text{ mm}$ en el ancho.

2. ACCIONES SOBRE LA ESTRUCTURA

Para conseguir reproducir correctamente las acciones de un peatón sobre la pasarela se deben tener en cuenta el tipo de cargas que debe resistir, así como la reacción que estas cargas producen sobre la estructura.

2.1 Clasificación de las cargas según su origen

Las acciones pueden clasificarse (*Tabla 3*) según:

- **Su naturaleza:**
 - Acciones directas
 - Acciones indirectas

- **Su variación en el tiempo:**
 - Acciones permanentes (G)
 - Acciones permanentes de valor no constante (G*)
 - Acciones variables (Q)
 - Acciones accidentales (A)

- **Su variación en el espacio:**
 - Acciones fijas
 - Acciones libres

Por el efecto que tienen sobre la estructura se pueden considerar:

- **Favorables (F):** Si su acción resulta positiva para la seguridad de la estructura
- **Desfavorables (D):** Si su acción resulta negativa para la seguridad de la estructura

Una misma acción puede resultar favorable o desfavorable dependiendo del contexto y condiciones en que se dé, por ejemplo el peso propio de la estructura [5].

CRITERIO	TIPO DE ACCIÓN	DEFINICIÓN	EJEMPLOS
Naturaleza	Directas	Se aplican directamente sobre la estructura	Peso propio, viento sobrecargas de uso
	Indirectas	Deformaciones o aceleraciones que inducen esfuerzos en la estructura	Temperatura, asientos, sismo, reológicas
Variación en el tiempo	Permanentes	Actúan en todo momento, constantes en magnitud	Peso propio, cargas muertas, equipamiento
	PVNC	Actúan en todo momento, pero su magnitud no es constante	Acciones reológicas, acción del pretensado
	Variables	Pueden actuar o no sobre la estructura en cada momento	Sobrecargas de uso, acciones climáticas
	Accidentales	Su posibilidad de actuación es pequeña pero de gran importancia	Sismo, explosiones, impactos
Variación en el espacio	Fijas	Se aplican siempre en la misma posición	Peso propio y cargas muertas
	Libres	Su posición es variable en la estructura	Sobrecargas de uso

Tabla 3. Clasificación tipos de acciones [5].

Estas acciones son caracterizadas a partir de un valor medio o nominal, y normalmente se produce simultáneamente una combinación de varias, haciendo más complejos los cálculos. Para ello se multiplican unos valores representativos por unos coeficientes de simultaneidad y un coeficiente parcial de seguridad, que asegure la integridad de la estructura ante Estados Límite Últimos.

Por tanto, las acciones que produce un peatón al caminar son consideradas directas, variables y libres. No tiene una gran importancia en términos de magnitud (*aprox. 800 N*) frente a otros fenómenos, pero la vibración que produce puede llegar a causar problemas si el rango se aproxima a la frecuencia de resonancia de la pasarela debido a las grandes oscilaciones.

2.2 Acciones peatonales sobre una pasarela

Al caminar un peatón produce una fuerza dinámica variable en el tiempo con tres componentes en la dirección vertical, horizontal-lateral y horizontal-longitudinal. Estos tipos de fuerzas debido al peso propio y la aceleración y desaceleración del cuerpo han sido estudiados profundamente, dando una mayor relevancia a la investigación de la componente vertical, ya que es la de mayor magnitud (*Gráfico 1*).

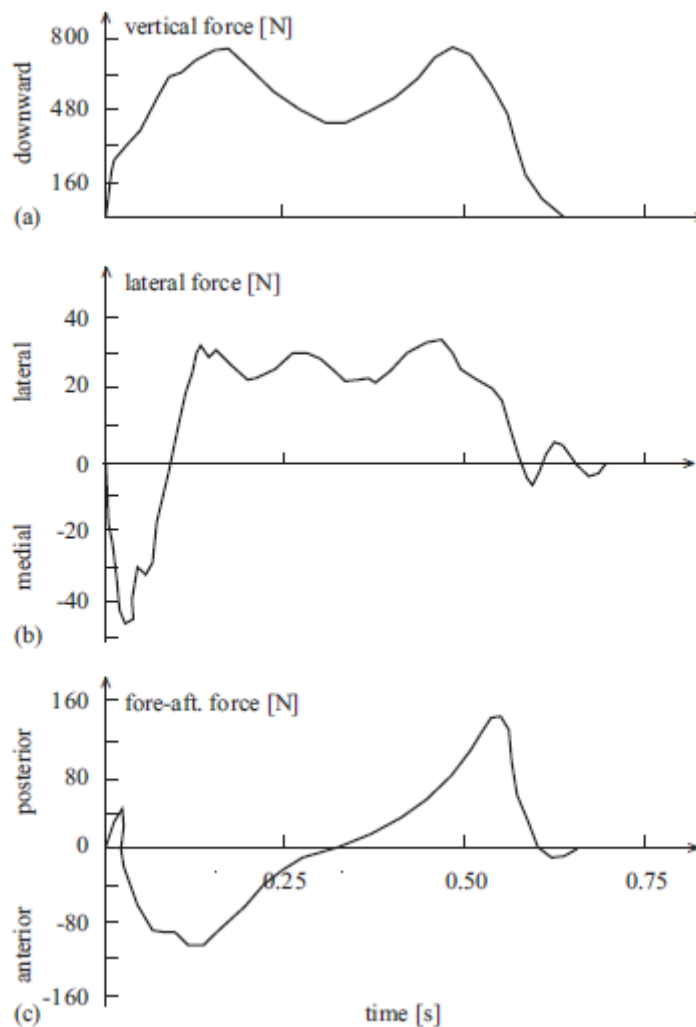


Gráfico 1. Fuerza provocada por un peatón en la dirección vertical (a), lateral (b) y longitudinal (c) [6].

Para realizar la simulación de la componente vertical en la viga biapoyada que simula la pasarela, se deben conocer los esfuerzos que aparecen en cada sección durante el desarrollo (*Ilustración 13*). Éstos serán medidos a través de un acelerómetro y células de carga en los apoyos [7].

- **El esfuerzo axial o normal:** es la componente de la fuerza interna perpendicular al plano de la sección y se indica con la letra N.
- **El esfuerzo cortante:** es la componente de la fuerza interna contenida en el plano de la sección y se indica con la letra T.
- **El momento flector:** es el nombre que recibe el momento interno de los problemas planos y se indica con la letra M. En problemas en tres dimensiones, el momento interno se puede descomponer en otros momentos.

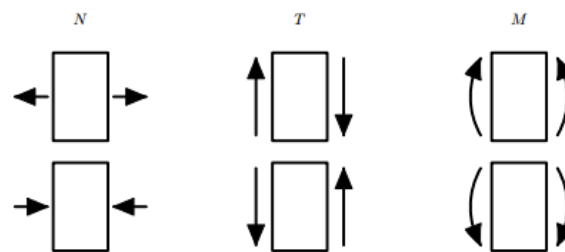


Ilustración 13. Esfuerzos en una sección rectangular. Normal (N), Cortante (T) y Flector (M) [8].

Además, la fuerza vertical producida por cada pie, se solapa con la del otro (*Gráfico 2*), por lo que se deberá considerar la resultante de una combinación de ambas en el tiempo (*Gráfico 3*).

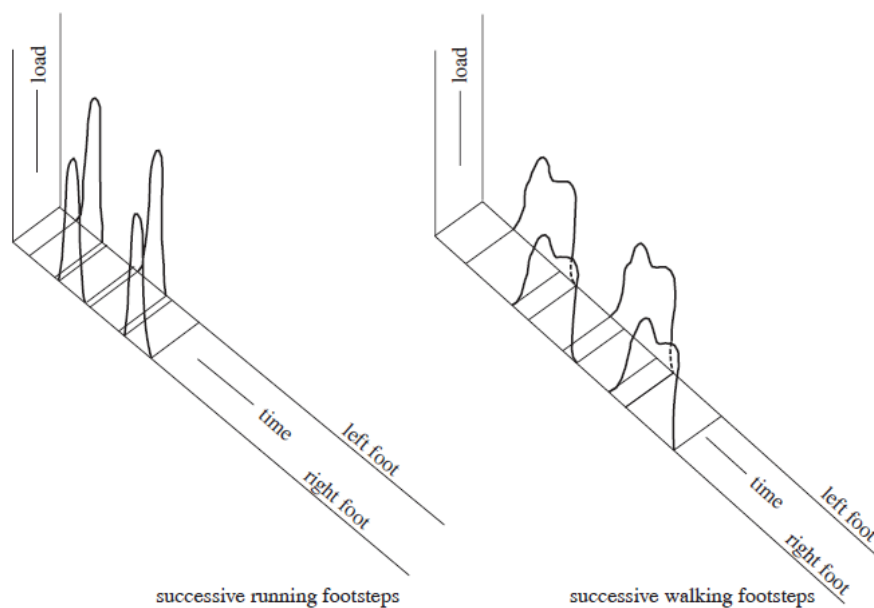


Gráfico 2. Representación del solapamiento de la fuerza vertical producida al correr (a) y al andar (b) [6].

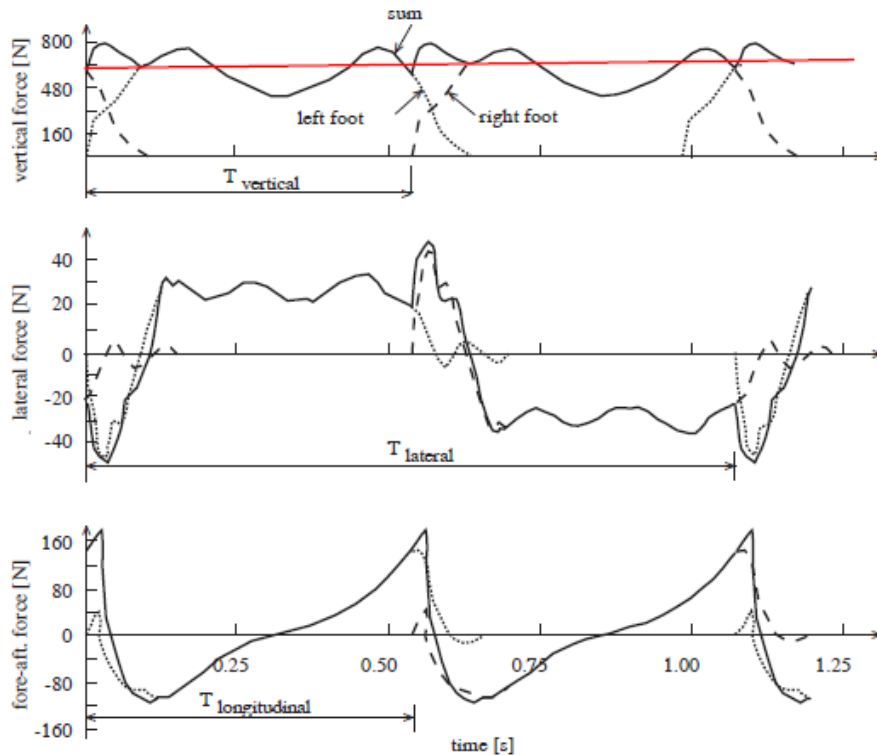


Gráfico 3. Combinación resultante de ambos pies. Fuerza vertical (a), lateral (b) y longitudinal (c) [6].

La acción vertical producida por un peatón es muy variable, ya que no sólo depende del peso propio, si no de la forma de caminar o correr de esa persona, por lo que se diferencian diferentes patrones típicos de fuerza para cada actividad (Gráfico 4).

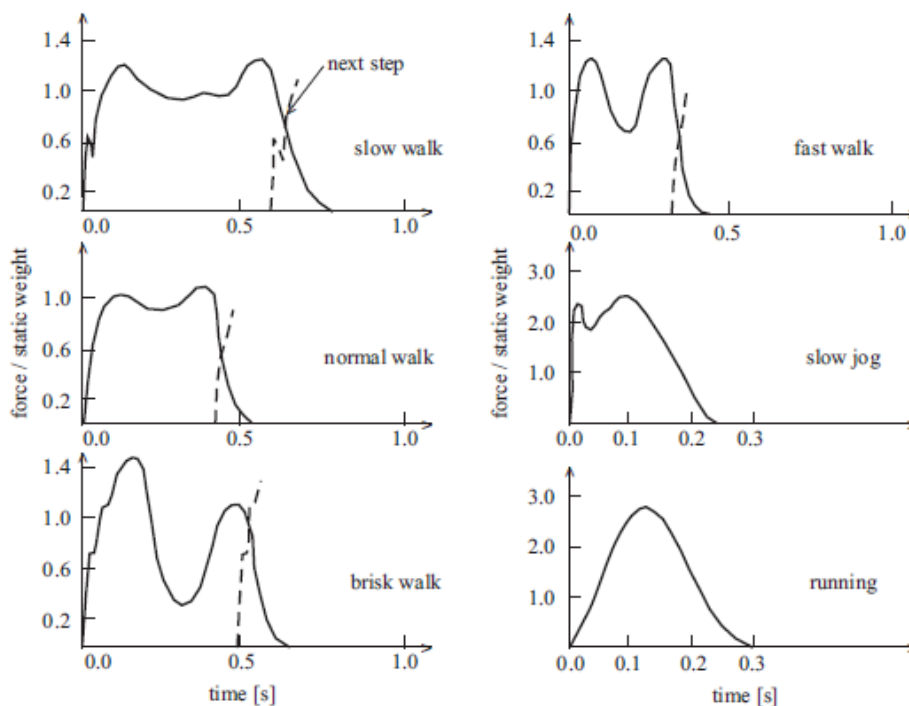


Gráfico 4. Fuerza vertical típica de un peatón en diferentes actividades [6].

A partir de estas conclusiones, se intentará reproducir en la simulación un patrón de fuerza similar al del peatón a diferentes velocidades, bien mediante los pasos reales de un autómata humanoide o mediante el contacto de diferentes levas con un perfil determinado.

Diferentes investigaciones han establecido una frecuencia media al caminar de entre 1,7-2,4 Hz (Gráfico 5), que llegan a aumentar hasta a 3,5 Hz al correr. Por tanto, será necesario poder abarcar todo ese rango con el autómata.

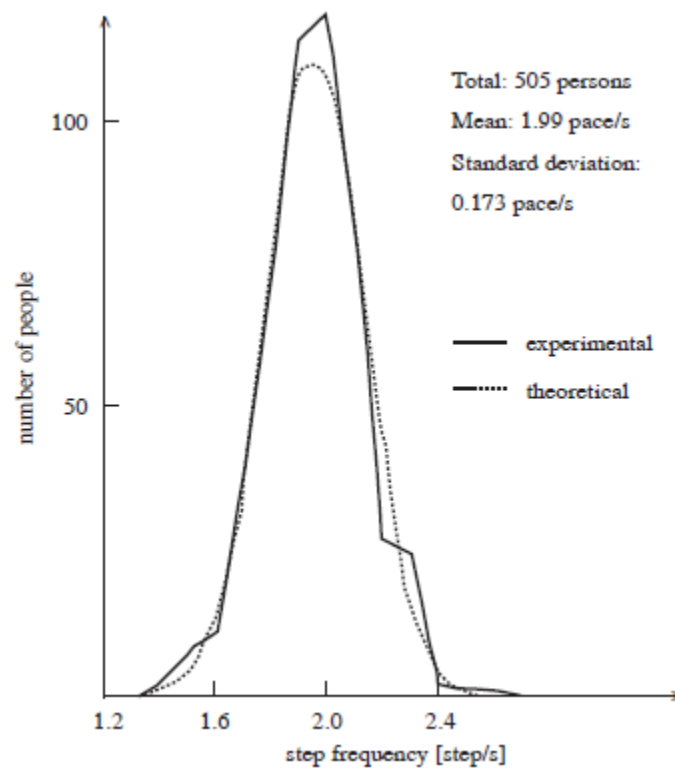


Gráfico 5. Frecuencia típica al caminar [6].

De forma teórica, la fuerza realizada se calcula con series de Fourier (Ecuación 1):

$$F_p(t) = G + \sum_{i=1}^n G \alpha_i \sin(2\pi i f_p t - \phi_i) \quad (1)$$

Donde G es el peso de la persona (N), α_i el coeficiente de Fourier para cada armónico, i.e. el factor de carga dinámico, f_p la frecuencia de la actividad (Hz), ϕ_i la fase de ese armónico, i el orden y n el número total de armónicos [6].

Para simplificar la simulación práctica, se utilizará sólo un armónico de la serie de Fourier, caracterizando fuerza y frecuencia para cada potencia del servomotor.

2.2.1 Modelo

A partir del complejo modelo teórico estudiado, se plantea un modelo simplificado para este proyecto que cumpla con los objetivos propuestos y analizar con éxito las fuerzas dinámicas medidas.

- 1) Al caminar se producen fuerzas en las tres direcciones. Por orden de magnitud se considerará más relevante la reacción vertical sobre la pasarela, y será caracterizada a través de sensores. El autómatas intentará reproducir únicamente las fuerzas en esta dirección, con factor de escala aproximado 1:10 [6].
- 2) El ser humano induce diferentes tipos de fuerzas variables, que no sólo varían en el tiempo sino también en el espacio (caminar, correr). Se establece un patrón de fuerza típico con un armónico que será representado a escala de forma aproximada y a diferentes velocidades. Esta fuerza variará en función del diseño del tipo de leva, y si ambas van sincronizadas o con un ángulo de desviación [7].
- 3) El tránsito a través de la pasarela de un peatón induce una frecuencia de entre 1,7-3,5 Hz (Gráfico 6). Será necesario que el autómatas sea capaz de simular diferentes frecuencias en todo ese rango, así como la frecuencia natural de la viga de ensayo.

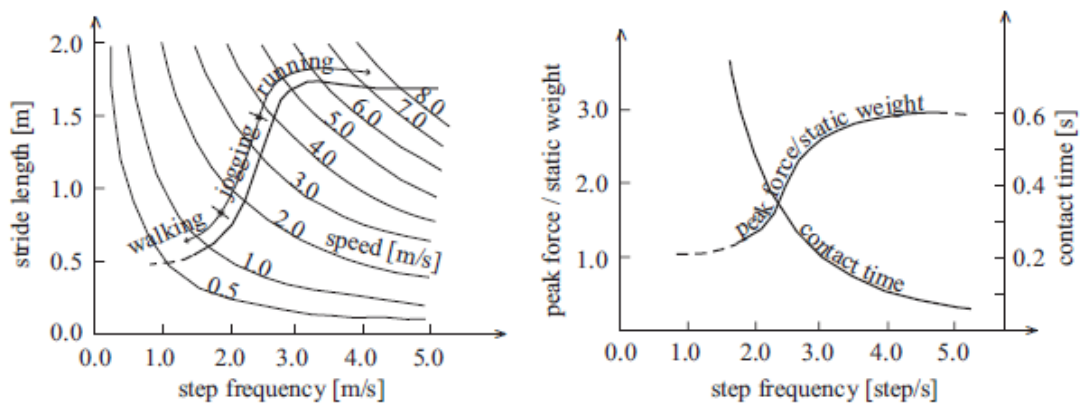


Gráfico 6. Frecuencia típica en función de la actividad [6].

2.3 Normativa

En función de las características y diseño de la pasarela existe una normativa aplicable y especificaciones de la Administración competente en la materia. En este apartado sólo se tratarán brevemente conceptos relativos a este proyecto, referentes al acero estructural y la Instrucción sobre las acciones a considerar en la pasarela. Para más información se pueden consultar las referencias en el apartado: '*Bibliografía y Referencias*'.

2.3.1 EAE

La *Instrucción de Acero Estructural del Ministerio de Fomento del Gobierno de España* establece unas consideraciones en cuanto a Estados Límite de deformaciones y vibraciones en pasarelas [9].

❖ **Artículo 37.3. Estados límite de deformaciones en puentes y pasarelas**

El control de deformaciones (desplazamientos y giros) en puentes y pasarelas debe garantizar la adecuada apariencia y funcionalidad de la obra evitando:

- Efectos dinámicos amplificados, o no deseados, debidos a impactos del tráfico circulante.
- Alteraciones en el correcto funcionamiento del sistema de drenaje.
- Impresiones visuales no adecuadas de la geometría final de la estructura.
- Sensaciones que afectan al confort de los usuarios.
- Alteraciones en las condiciones finales de la rasante (planta, alzado, peraltes) respecto de las alineaciones previstas en el proyecto.
- Afecciones al funcionamiento y durabilidad de juntas, apoyos, barandillas, instalaciones, etc., muy sensibles a quiebros o cambios bruscos de pendiente en la deformada.

El proyecto deberá definir unas contraflechas teóricas de ejecución tales que, para la totalidad de la carga permanente, y la mitad de los efectos reológicos y de la parte de sobrecargas de la combinación cuasipermanente, la rasante final de la estructura corresponda a la geometría prevista.

Los criterios específicos para la comprobación de las deformaciones en servicio de puentes de carretera y pasarelas se podrán ajustar, de conformidad con lo indicado, a lo establecido en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP).

❖ **Artículo 38.3. Estados límite de vibraciones en puentes y pasarelas**

Los puentes y pasarelas deben cumplir los requisitos de los estados límite de servicio bajo los efectos dinámicos debidos a las cargas de tráfico, ferrocarril, peatones, bicicletas y viento.

Las vibraciones en puentes y pasarelas no deben causar inquietud en los pasajeros de vehículos, circulando o detenidos sobre el tablero, ni en los peatones. También resulta conveniente limitar el nivel de emisión de ruidos a causa de las vibraciones, especialmente en puentes y pasarelas ubicados en entornos urbanos.

Tales condiciones se cumplen generalmente cuando la máxima aceleración vertical que pueda producirse, en cualquier zona o elemento transitable por peatones, no supere ciertos valores límite, función del grado de confort exigido. Este requisito afecta únicamente al caso de pasarelas y puentes con aceras transitables.

En general, aceleraciones verticales entre $0,50$ y $1,00 \text{ m/s}^2$ corresponden a medias de confort, mientras que aceleraciones verticales superiores a $2,50 \text{ m/s}^2$ suelen considerarse inaceptables.

Resulta aconsejable que, por razones de confort, las aceleraciones horizontales máximas se sitúen entre $0,1$ y $0,3 \text{ m/s}^2$, en condiciones de uso normal. Valores superiores a $0,8 \text{ m/s}^2$ suelen resultar inaceptables.

Para cálculos dinámicos en servicio de puentes de acero se adoptará, salvo justificación específica, un factor de amortiguamiento crítico del $0,2\%$ al $0,4\%$, que podría llegar a incrementarse hasta un 50% en el caso de puentes mixtos.

Las verificaciones de las limitaciones de vibraciones en pasarelas se podrán regir, de conformidad con lo indicado, por los requisitos específicos establecidos en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP).

En general, resultan susceptibles de fenómenos vibratorios que pueden afectar al confort de los peatones las pasarelas cuyas frecuencias fundamentales estén comprendidas en los siguientes rangos críticos.

- Para oscilaciones en el plano vertical: entre *1,25* y *4,60 Hz*.
- Para oscilaciones en el plano horizontal o de torsión: entre *0,50* y *1,20 Hz*.

En pasarelas cuyas frecuencias fundamentales se sitúen fuera de dichos rangos críticos no suele resultar necesario efectuar ningún análisis dinámico de vibraciones.

El rango inferior, entre *1,25* y *2,4 Hz*, corresponde a acciones dinámicas debidas a la excitación de peatones andando o corriendo suavemente sobre la plataforma.

El rango superior, entre *2,5* y *4,6 Hz* corresponde a la influencia del segundo armónico de la excitación generada por la acción de peatones, que puede afectar a pasarelas de acero con bajo amortiguamiento. Las fuerzas dinámicas ejercidas en este segundo rango son, en cualquier caso, inferiores a las del rango anterior citado y, por tanto, el riesgo de excitación no tolerable será menor.

La acción debida a peatones corriendo a cierta velocidad corresponde aproximadamente a una excitación de frecuencia entre *2* y *3,5 Hz*, aunque resulta poco susceptible de sincronizarse para grupos de *d* peatones corriendo.

Resulta difícil establecer de forma estricta los valores límite para las condiciones de confort del servicio. La dificultad para definir las hipótesis pésimas de las sollicitaciones (número de peatones, frecuencia y velocidad de paso sobre la estructura), así como los criterios, muy subjetivos, de aceptación de los niveles de percepción por los usuarios, explican las divergencias y ausencias de concreción de la mayoría de las reglamentaciones.

Si los análisis dinámicos efectuados no resultan satisfactorios, podrá recurrirse a ciertas regulaciones del uso de la pasarela o, alternativamente, a proyectar dispositivos específicos de amortiguación (amortiguadores de masas sintonizadas, por ejemplo) que, adecuadamente calibrados, puedan resultar muy eficaces.

2.3.2 IAP

La Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera del Ministerio de Fomento del Gobierno de España, en lo relativo a pasarelas peatonales, presenta unos criterios a seguir respecto a sobrecarga de acciones variables, y estados límite de vibraciones [10].

❖ **Artículo 4.1.8. Acciones variables. Sobrecarga de uso en pasarelas.**

Para la determinación de los efectos estáticos de la sobrecarga de uso debida al tráfico de peatones, se considerará la acción simultánea (*Tabla 4*) de las cargas siguientes:

- Una carga vertical uniformemente distribuida \vec{q} de valor igual a 5 kN/m^2 .
- Una fuerza horizontal longitudinal Q de valor igual al 10% del total de la carga vertical uniformemente distribuida, actuando en el eje del tablero al nivel de la superficie del pavimento.

Ambas cargas se consideran como una acción única, cuyo valor constituye el valor característico de la sobrecarga de uso cuando se combina con el resto de las acciones (cargas permanentes, viento, etc.).

La fuerza horizontal Q será en general suficiente para asegurar la estabilidad horizontal longitudinal de la pasarela; no así la estabilidad horizontal transversal, que deberá asegurarse mediante la consideración de las acciones correspondientes.

A efectos de las comprobaciones locales, se considerará una carga vertical puntual Q de valor igual a 10 kN , actuando sobre una superficie cuadrada de $0,10 \text{ m}$ de lado.

ACCIÓN		φ_0	φ_1	φ_2	
SOBRECARGA DE USO	Cargas verticales	Vehículos pesados	0,75	0,75	0
		Sobrecarga uniforme	0,4	0,4	0/0,2
		Carga en aceras	0,4	0,4	0
	Fuerzas horizontales		0	0	0
	Peatones		0	0	0
	Aglomeraciones		0	0	0
	Sobrecarga de uso en pasarelas		0,4	0,4	0

Tabla 4. Factores de simultaneidad [10].

❖ **Artículo 7.2.2. Estado Límite de vibraciones en pasarelas peatonales.**

En general, con las salvedades indicadas en este apartado, se considerará verificado el estado límite de servicio de vibraciones en pasarelas peatonales si sus frecuencias naturales se sitúan fuera de los dos rangos que figuran a continuación.

- Rango crítico para vibraciones verticales y longitudinales: 1,25 a 4,60 Hz.
- Rango crítico para vibraciones laterales: 0,50 a 1,20 Hz.

En aquellas pasarelas cuyas frecuencias naturales se encuentren dentro de estos rangos, será necesario efectuar estudios dinámicos específicos para asegurar los requisitos de confort de los peatones.

Los requisitos de confort (*Tabla 5*) se establecerán en el proyecto de forma razonada en función de la categoría de la pasarela (zona urbana con tráfico peatonal intenso, uso medio, baja utilización en zona rural, etc.) y de la situación de proyecto considerada (tipo de tráfico peatonal asociado a su probabilidad de ocurrencia). Como referencia, podrán adoptarse los valores límite de aceleraciones que figuran en la tabla siguiente:

GRADO DE CONFORT	RANGOS DE ACELERACIONES	
	VERTICALES	LATERALES
Máximo	< 0,50 m/s ²	< 0,10 m/s ²
Medio	0,50 a 1,00 m/s ²	0,10 a 0,30 m/s ²
Mínimo	1,00 a 2,50 m/s ²	0,30 a 0,80 m/s ²
No aceptable	> 2,50 m/s ²	> 0,80 m/s ²

Tabla 5. Valores de referencia de aceleraciones para el confort de los peatones [10].

Los modelos de carga dinámica considerados deberán ser representativos de las condiciones de tráfico previstas para las situaciones de proyecto analizadas, contemplando la densidad de los flujos peatonales, el ritmo de sus movimientos, la sincronización entre peatones, etc.

3. DISEÑO DE AUTÓMATA PROGRAMABLE

3.1 Autómata humanoide

A través de las conclusiones y líneas futuras de otros proyectos de este departamento, se desgranó la posibilidad de realizar un autómata que simule un peatón, no sólo de forma pragmática, sino buscando una estética y apariencia atractiva.

Para ello se debería conseguir un robot bípedo, no sólo capaz de caminar de forma autónoma a través de la viga simulando los pasos de un peatón, sino también de forma constante y simétrica para obtener unos datos fiables a nivel de análisis de ingeniería.

3.1.1 Antecedentes

En 1495, Leonardo da Vinci diseñó lo que se conoce como el primer autómata humanoide plenamente funcional. Un robot guerrero vestido con una armadura medieval germano-italiana capaz de simular varias acciones humanas tales como sentarse; mover los brazos, el cuello y la mandíbula de forma anatómicamente perfecta [19].

En lo relativo a autómatas caminantes, desde los libros de ciencia ficción Isaac Asimov, se ha intentado reproducir de la forma más real posible un robot capaz de andar como un ser humano. Esto presenta una gran dificultad ya que se deben simular las articulaciones que presenten un movimiento ágil sin comprometer la estabilidad.

En el año 2000, Honda presentó su robot ASIMO “*Advanced Step in Innovative Mobility*” (Ilustración 14), un androide capaz de andar o correr hasta a 9 km/h. Pretende ayudar a personas con movilidad reducida en la vida cotidiana [20].

En el 2013, DARPA anunció el robot de rescate ATLAS (*Ilustración 15*), un autómeta humanoide rescate que puede manejar herramientas, correr y evitar obstáculos sin ningún problema. Tiene un peso de 150 kg y 2,25 m de altura, y aun así es capaz de realizar ágiles movimientos sobre sus dos pies y mantener el equilibrio ante obstáculos imprevistos gracias a sus 28 motores hidráulicos [22].



Ilustración 14. Robot ASIMO. [21]



Ilustración 15. Robot ATLAS. [23]

3.1.2 Diseño

Para el diseño del humanoide se utilizará el paquete de *LEGO® MINDSTORMS EV3* (*apartado 1.3.1*).

En versiones anteriores (*MINDSTORMS NXT 2.0*) se presentaba un modelo catalogado como *Alpha Rex* (*Ilustración 16*), con sus planos de montaje, capaz de caminar de forma bípeda. Además de tener muy poca estabilidad, al caminar no levanta completamente los pies, arrastrando sobre el tablero la mayor parte de la superficie y avanzando a una escasa velocidad de 1 cm/s.

Por todo ello, ese diseño no podrá ser utilizado para el objetivo de este proyecto, y en versiones posteriores (*EV3*) fue sustituido por el *EV3RSTORM* (*Ilustración 17*). De estética similar pero con tracción tipo oruga, se desplaza sobre eslabones modulares consiguiendo una velocidad y estabilidad muy superiores [15]



Ilustración 16. Robot Alpha Rex. [15]



Ilustración 17. Robot EV3RSTORM [15]

En el libro “*Creating Cool MINDSTORMS NXT Robots*” de Daniele Benedettelli [13], se presentaba el *Omni-Biped* (Ilustración 18) como una versión más compacta del *Alpha Rex*. Al tener la masa distribuida más cerca del centro de gravedad, aumenta considerablemente la estabilidad al desplazarse, y con un diseño articulado de las extremidades impulsadas mediante dos servomotores, se consigue una velocidad de avance superior.



Ilustración 18. Robot Omni Biped [13]

Basado en este modelo, se intentará reproducir una versión similar para realizar los ensayos sobre la viga. Para ello se modificarán diversos anclajes y piezas para adaptarlo a la versión *EV3* (*Ilustración 19*) y hacer que las manos se muevan al ritmo de los pies conectándolas con engranajes (*Ilustración 20*).

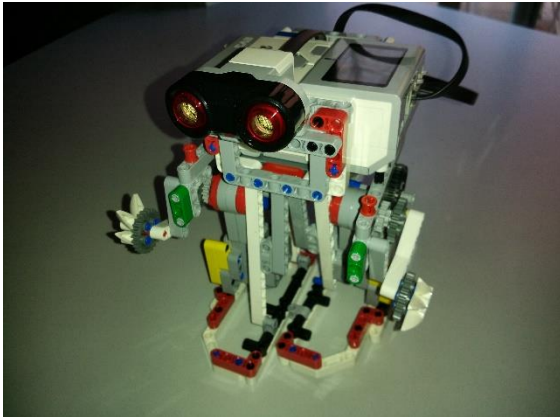


Ilustración 19. Autómata humanoide.

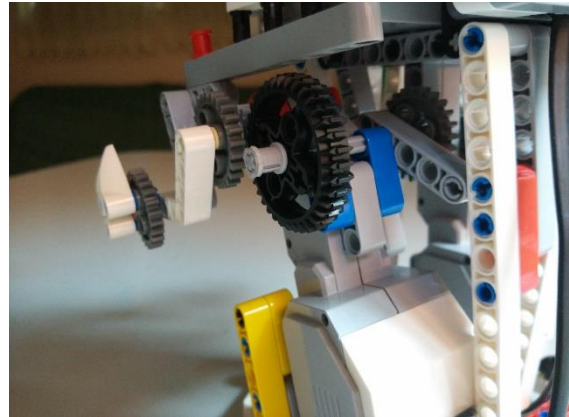


Ilustración 20. Engranajes de conexión pierna-brazo con servomotor.

El autómata es capaz de desarrollar una velocidad máxima de $3-4 \text{ cm/s}$. Además del factor estético, el sensor de infrarrojos que simula la cabeza es controlado por el computador y puede detenerse a la distancia deseada si va a chocar con algún obstáculo.

Finalmente el robot es probado en la viga de ensayo, pero el tambaleo realizado al volcar su peso a un lado para levantar cada pie le impide mantener la estabilidad y dirección en una viga tan estrecha (*Ilustración 21*).

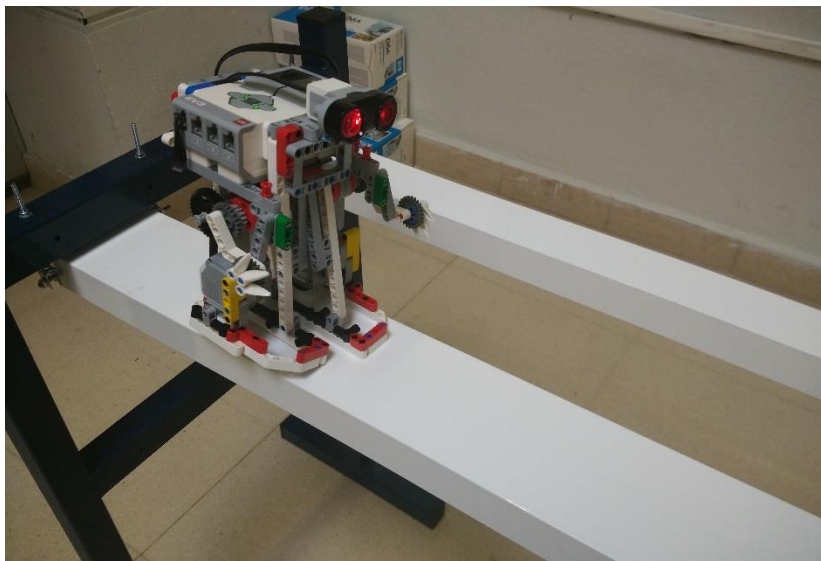


Ilustración 21. Ensayo en viga del robot bípedo.

Además, se añade una escasa velocidad de avance, y un deslizamiento en la pisada, que hace que la fuerza y desplazamiento conseguidos en cada impacto varíe con respecto del anterior.

En conclusión, se logra un diseño bípedo estéticamente mucho más atractivo, pero desde el punto de vista de la ingeniería y de los ensayos de fuerza y frecuencia objetivo de este proyecto, poco útil.

3.2 Robot rodante con levas

Renunciando al factor estético y desde un punto de vista mucho más práctico, buscando simular la fuerza típica de un peatón e inducir diferentes frecuencias sobre la viga (*apartado 2.2*), se diseñará un robot que se desplace a través de la viga con cuatro ruedas y unas guías auxiliares. La fuerza será producida mediante el contacto de varias levas fabricadas con una impresora 3D.

3.2.1 Diseño

En primer lugar se realiza el montaje de carro con cuatro ruedas impulsadas por un servomotor, y el cuadro de control (de forma compacta y a baja altura para que el centro de gravedad se encuentre más próximo al suelo). Con dos guías laterales auxiliares que aseguren el desplazamiento a través de la viga sin caerse (*Ilustración 22*).

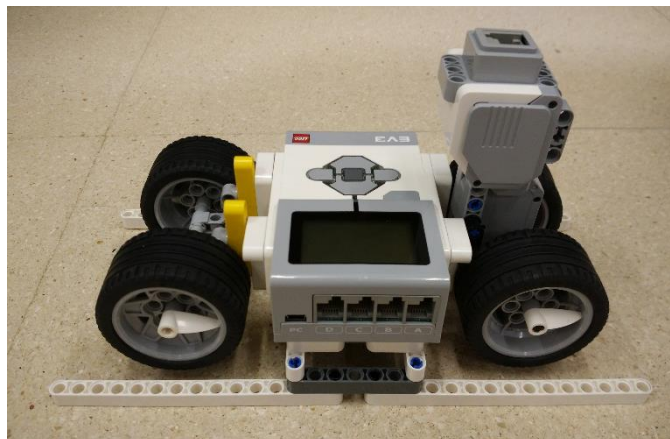


Ilustración 22. Diseño carro impulsado por servomotor.

Posteriormente, se diseñan cuatro levas de plástico PLA con una impresora 3D, con un perfil de tres vértices y otro de cuatro, y sus respectivos taladros de estrella compatibles con LEGO (*Ilustración 23*).

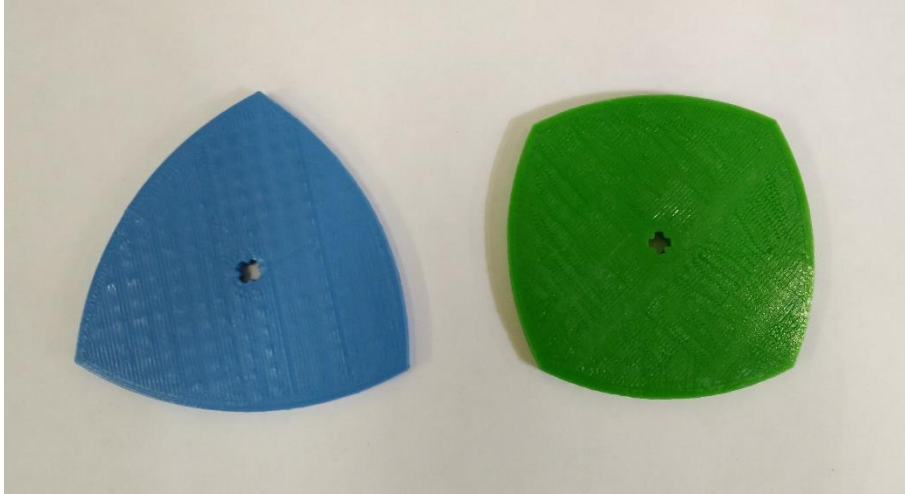


Ilustración 23. Perfiles de las levas.

Para acoplar las levas a ambos lados del carro, se ponen unos brazos levadizos de forma que contacten con el tablero por gravedad, y al rotar se elevan de forma natural. Cada par de levas girará gracias a un servomotor independiente, de forma que se pueda mover a una velocidad el carro y a otra diferente cada par (con el mismo o distinto ángulo en paralelo), ofreciendo una gran amplitud de posibilidades (*Ilustración 24*).



Ilustración 24. Carro con levas laterales.

Por último, se conectan los cables de los tres servomotores al cuadro de mando y éste a su vez al ordenador para manipularlo con el software de programación.

A mayores, se construye una plataforma con un peso adicional de 221,7 g para cuando fuera necesario aumentar la fuerza ejercida por el autómeta (*Ilustración 25*).

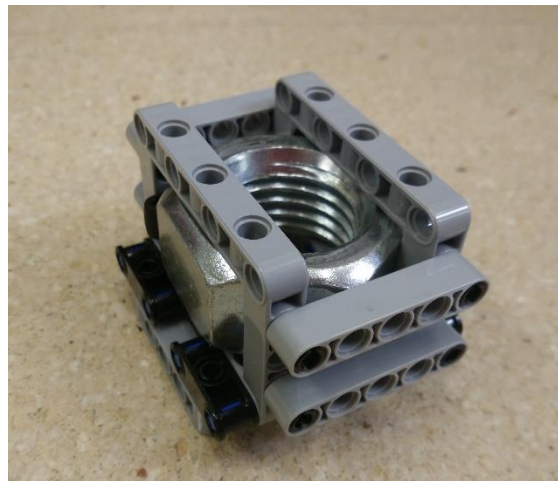


Ilustración 25. Plataforma de peso adicional

Así, el robot estará completo (*Ilustración 26*), preparado para su caracterización y posteriores ensayos en la viga.

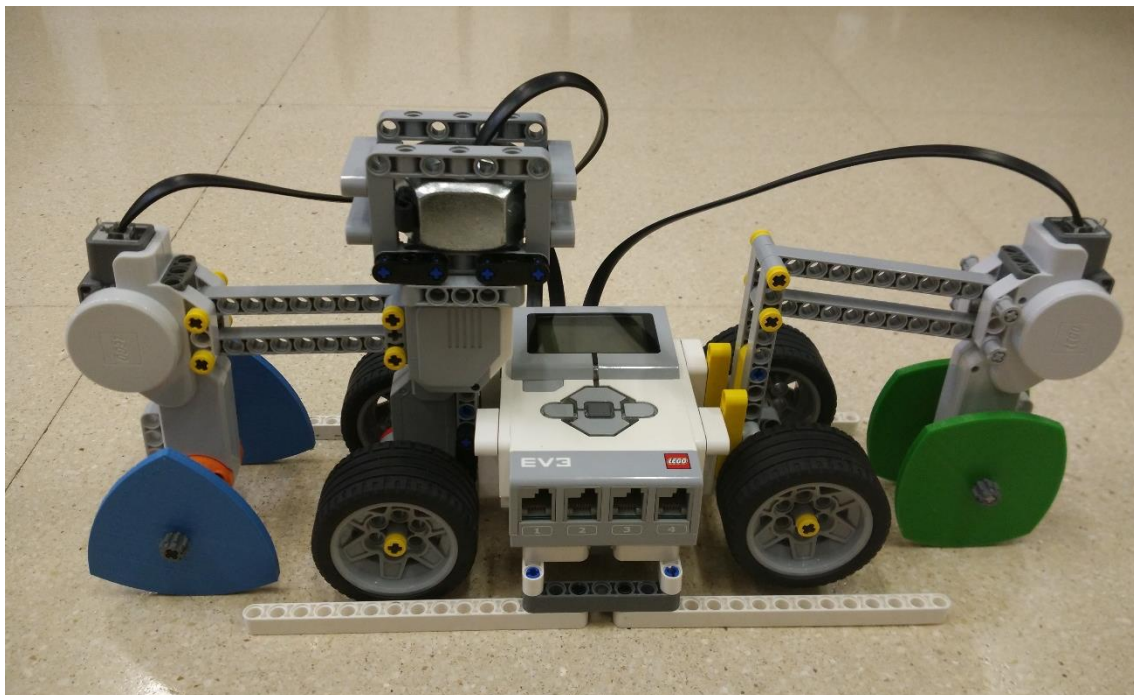


Ilustración 26. Robot final con accesorios y cableado.

3.2.2 LDD

Una vez creado el robot de forma experimental, se diseñará en el software propio “LEGO Digital Designer 4.3” (*Ilustración 27*).

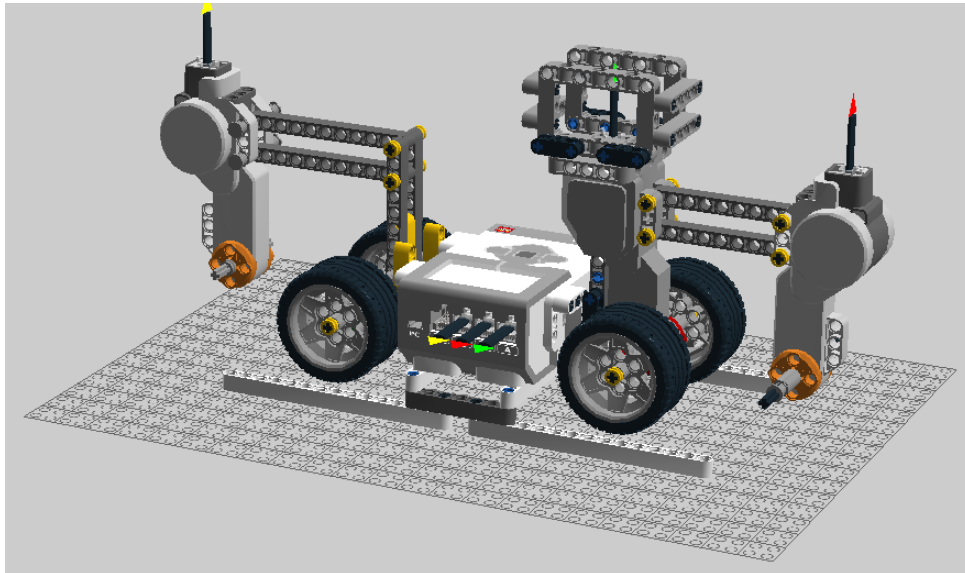


Ilustración 27. Diseño del robot en LEGO Digital.

Con este programa se puede realizar de forma sencilla el robot y exportarlo en un formato LXF para ser compartido. Además permite hacer modificaciones de piezas, listado, color, tomar capturas de pantalla para presentaciones, o una guía de montaje paso a paso (*Ilustración 28*).

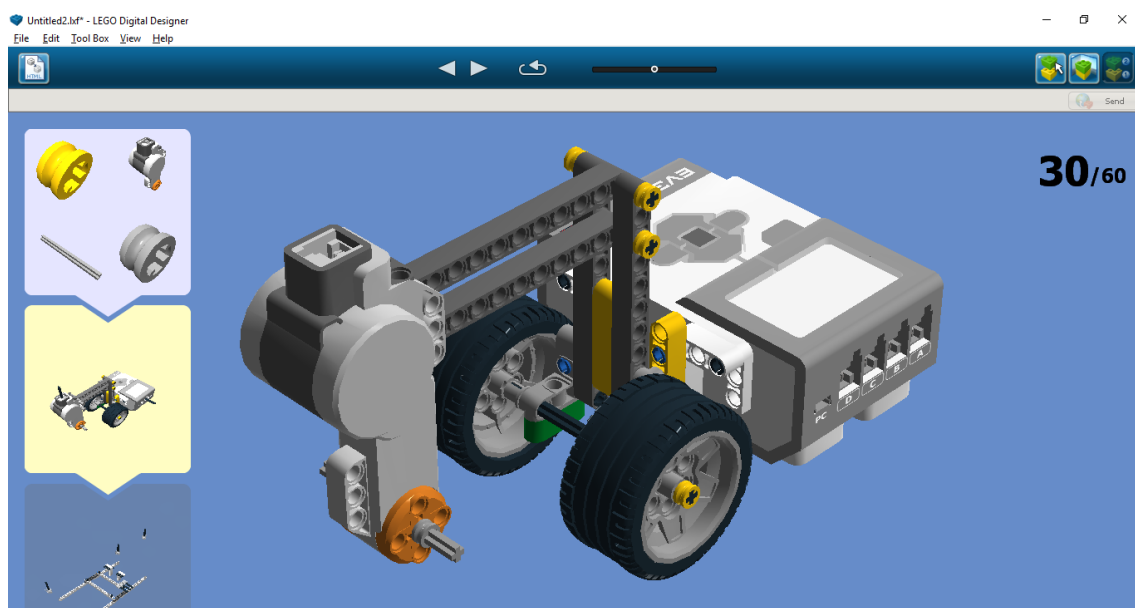


Ilustración 28. Guía de montaje paso a paso.

4. CALIBRACIÓN Y CARACTERIZACIÓN

En este capítulo se tratará la adquisición de datos, desde la calibración estática y dinámica de los sensores hasta la posterior caracterización del autómeta en la plataforma fabricada para ello.

4.1 Calibración célula de carga

En primer lugar, para conectar la célula al hardware de adquisición será necesario anclar los cuatro cables al pin de entrada (*Ilustración 29*) en el siguiente orden:

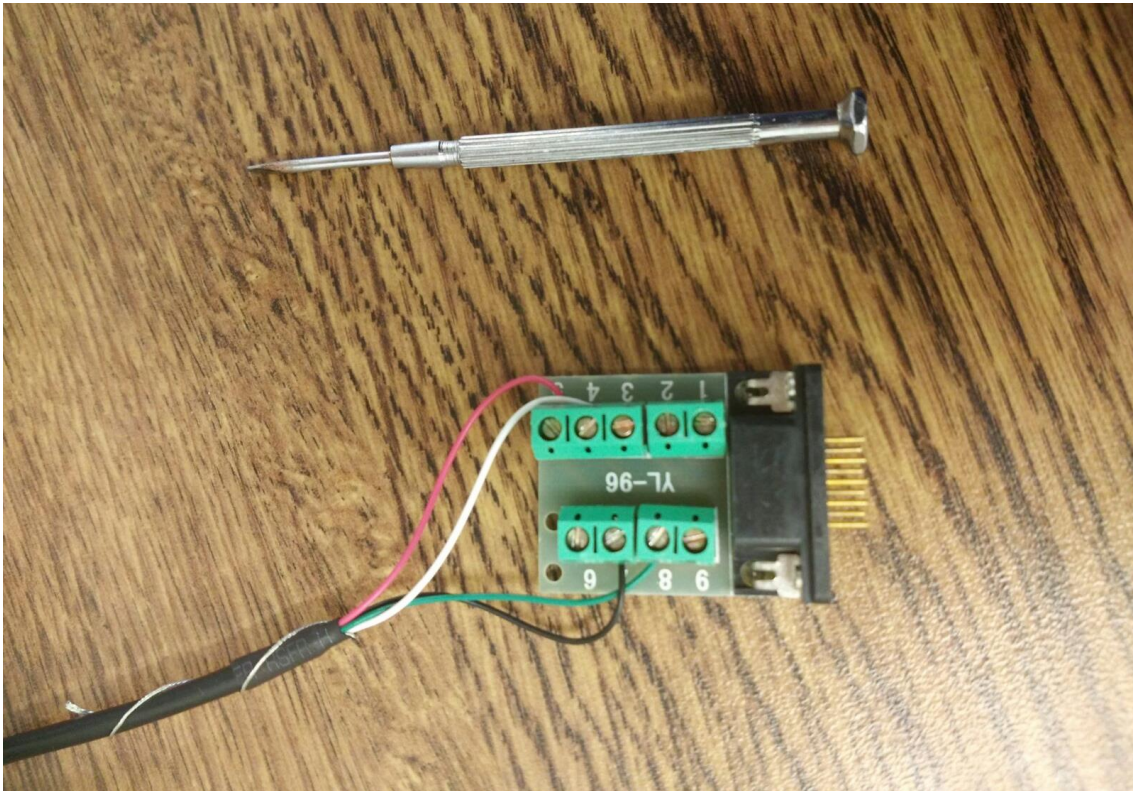


Ilustración 29. Entrada D-SUB célula de carga.

- *Cable Verde/Amarillo: 8*
- *Cable Azul/Negro: 7*
- *Cable Rojo: 5*
- *Cable Blanco: 4*

4.1.1 Calibración estática

Los datos obtenidos por la célula de carga deben ser procesados por el hardware de adquisición SIRIUS (*apartado 1.3.4*), configurando los canales de entrada en el software DEWEsSoft.

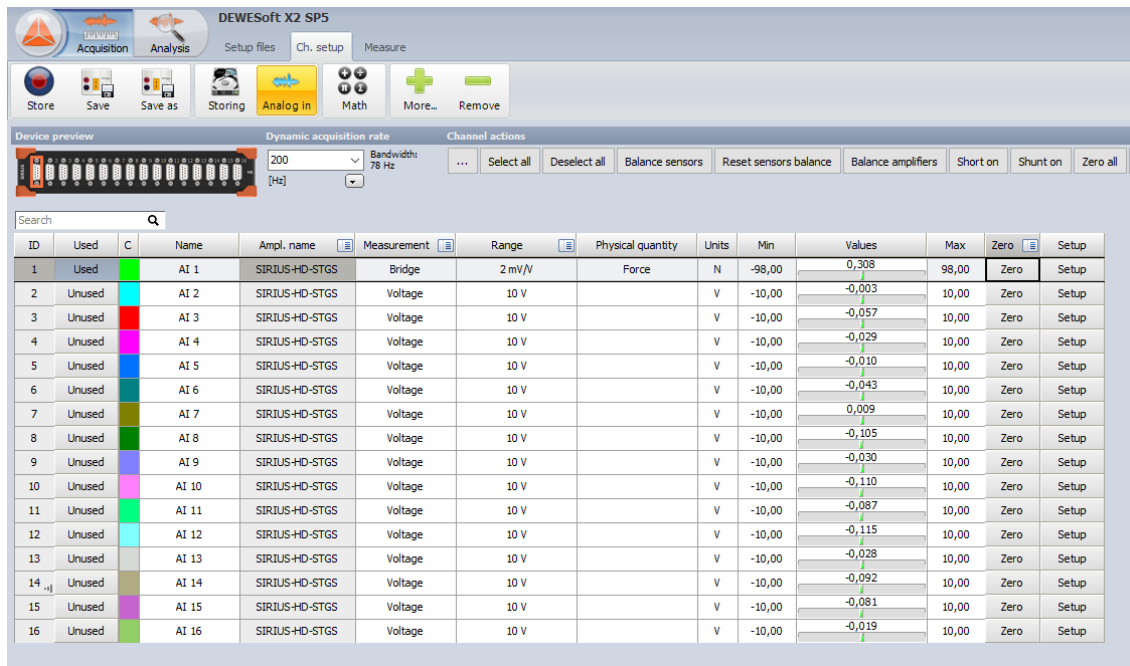


Ilustración 30. Canales de entrada a SIRIUS en DEWEsSoft.

Conectando la célula en el primer canal (*Ilustración 30*), en *Setup* se configura la salida, y pulsando *Zero* se elimina la fuerza residual producida por la masa del voladizo superior de la célula. El canal debe aparecer *Used*, en *Measurement* elegir la opción *Bridge*, y en *Dynamic Acquisition Rate* con 200 Hz será suficiente (200 medidas por segundo).

Dentro del *Channel Setup* (*Ilustración 31*) se deben modificar los siguientes parámetros:

- *Range = 2 mV/V*
- *Low-pass filter = 10 Hz*
- *Low-pass type = Butterworth 8 th order*
- *Physical quantity = Force*
- *First Point = -2 mV/V equals -98,80665 N*
- *Second Point = 2 mV/V equals 98,80665 N*

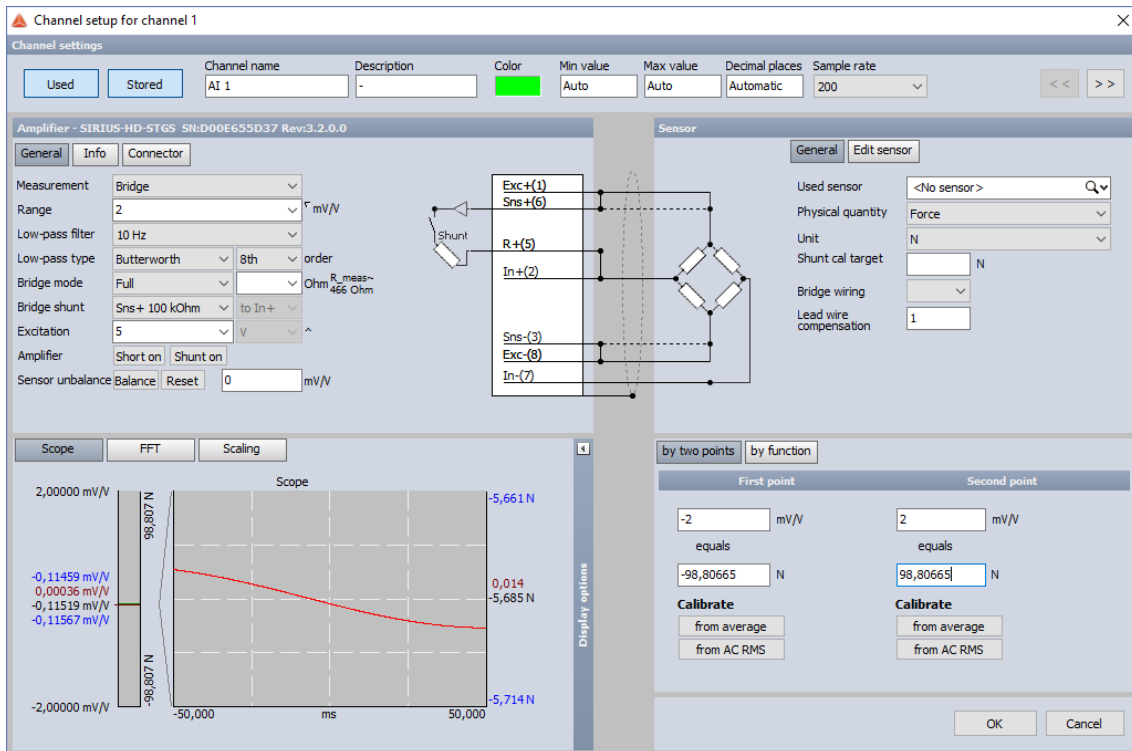


Ilustración 31. Channel Setup para célula de carga (DEWESoft)

Una vez configurada, la célula de carga está preparada para la toma de medidas. Se realizarán un total de 2 mediciones de forma estática con una masa de 193,2 g (Ilustración 32), y otras 2 con el doble de masa (386,7 g).

La masa se dispondrá en la parte superior de la célula, y después será invertida para medir en el otro sentido.



Ilustración 32. Calibración estática de célula de carga

MASA 1: 193,2 g

Peso en voladizo anulado $0,293\text{ N}$ (Zero)

Peso teórico: $0,1932 \times 9,80665 = 1,8946\text{ N}$

Medida Directa: Entre $-1,861\text{ N}$ y $-1,922\text{ N}$ -> media experimental: $1,8915\text{ N}$

Error: $0,0031\text{ N}$ ($0,16\%$)

Medida Inversa: Entre $-1,895\text{ N}$ y $-1,902\text{ N}$ -> media experimental: $1,8985\text{ N}$

Error: $0,0029\text{ N}$ ($0,15\%$)



Gráfico 7. Medida directa experimental con masa 1.

MASA 2: 386,7 g

Peso en voladizo anulado $0,310\text{ N}$ (Zero)

Peso teórico: $0,3867 \times 9,80665 = 3,7922\text{ N}$

Medida Directa: Entre $-3,759\text{ N}$ y $-3,844\text{ N}$ -> media experimental: $3,8015\text{ N}$

Error: $0,0093\text{ N}$ ($0,24\%$)

Medida Inversa: Entre $-3,763\text{ N}$ y $-3,835\text{ N}$ -> media experimental: $3,7990\text{ N}$

Error: $0,0068\text{ N}$ ($0,17\%$)

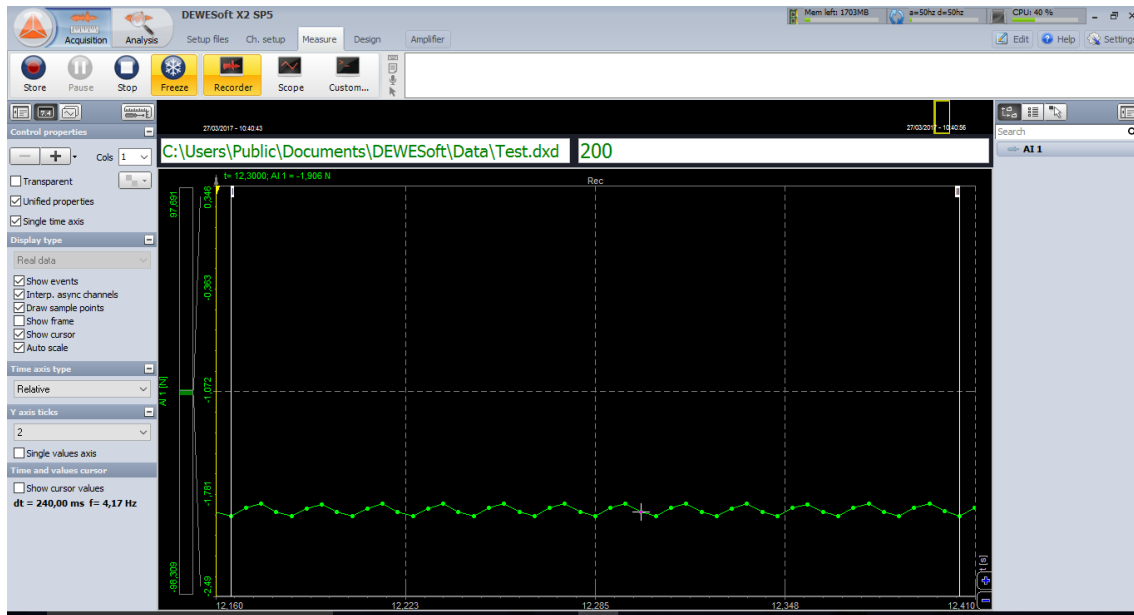


Gráfico 8. Medida directa experimental con masa 2.

Se concluye que la célula de carga está calibrada y con una configuración adecuada para la extracción de datos con un error de una magnitud en torno al 0,20%, más que suficiente para la caracterización del autómatá móvil y los ensayos posteriores en la viga.

4.1.2 Calibración dinámica

Para realizar la calibración dinámica de la célula de carga se empleará un sistema masa-muelle amortiguado de un grado de libertad con ayuda de un láser de distancia (*apartado 1.3*).

Se comparará el modelo teórico y experimental para confirmar la desviación entre ambos, y calcular los parámetros desconocidos del sistema, demostrando la capacidad de realizar un análisis adecuado de cualquier sistema dinámico con estos sensores.

4.1.2.1 Análisis teórico

Un sistema mecánico masa-muelle-amortiguador como el diseñado en el laboratorio tiene el siguiente modelo general como sistema de un grado de libertad (*Ilustración 33*).

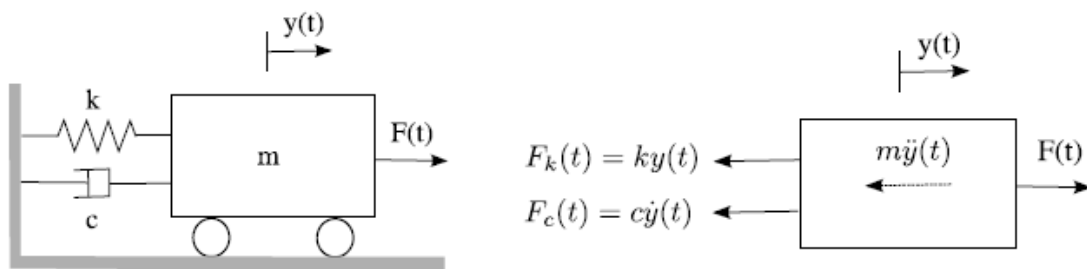


Ilustración 33. Modelo general de un sistema mecánico masa-muelle-amortiguador. [11]

Aplicando la Segunda Ley de Newton (según el principio de D'Alembert, la fuerza $m\ddot{y}(t)$ tiene sentido opuesto al movimiento):

$$\sum F(t) = m\ddot{y}(t) \Rightarrow F(t) - F_c(t) - F_k(t) = m\ddot{y}(t) \quad (2)$$

Sustituyendo cada fuerza por su valor:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F(t) \quad (3)$$

Le ecuación diferencial del sistema masa-muelle-amortiguador es:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F(t) \quad (4)$$

$$y(0) = y_0 \quad ; \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \quad (5)$$

Sólo en determinadas situaciones esta ecuación se puede resolver de forma exacta. Uno de estos casos es cuando la fuerza aplicada al sistema es constante:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = F_0 \quad (6)$$

$$y(0) = y_0 \quad ; \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \quad (7)$$

Como es bien conocido, la solución de esta ecuación es la suma de la solución de la parte homogénea más una solución particular:

$$y(t) = y_h(t) + y_p(t) \quad (8)$$

Solución de la ecuación homogénea

La ecuación homogénea correspondiente a (6) es:

$$m\ddot{y}_h(t) + c\dot{y}_h(t) + ky_h(t) = 0 \quad (9)$$

La solución de esta ecuación es de la forma:

$$y_h(t) = Ae^{st} \quad (10)$$

Sustituyendo:

$$ms^2Ae^{st} + csAe^{st} + kAe^{st} = 0 \quad (11)$$

Para $e^{st} \neq 0$, esto es, para $y_h(t) \neq 0$ se tiene:

$$ms^2 + cs + k = 0 \quad (12)$$

Cuya solución es:

$$s_1 = \frac{-c + \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m}, \quad s_2 = \frac{-c - \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} \quad (13)$$

Y la solución homogénea queda:

$$y_h(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} = A_1 e^{\frac{-c + \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} t} + A_2 e^{\frac{-c - \sqrt{c^2 - 4mk}}{2m} t} \quad (14)$$

En dinámica de estructuras es usual definir los siguientes términos:

$$\omega_n \stackrel{\text{def}}{=} \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [rad/s] \quad (15)$$

$$\zeta \stackrel{\text{def}}{=} \frac{c}{2\sqrt{mk}} \quad (0 \leq \zeta \leq 1) \quad (16)$$

Donde ω_n es la frecuencia natural de vibración y ζ es la razón de amortiguamiento.

Podemos expresar la solución de la ecuación homogénea teniendo en cuenta estas variables:

$$y_h(t) = A_1 e^{(-\zeta\omega_n + i\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})t} + A_2 e^{(-\zeta\omega_n - i\omega_n\sqrt{1-\zeta^2})t} \quad (17)$$

Donde se ha considerado que $c^2 - 4mk < 0$. En caso contrario el sistema no es estable.

Se define una nueva variable, la frecuencia natural amortiguada:

$$\omega_d \stackrel{\text{def}}{=} \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad [rad/s] \quad (18)$$

Por lo que:

$$y_h(t) = A_1 e^{(-\zeta\omega_n + i\omega_d)t} + A_2 e^{(-\zeta\omega_n - i\omega_d)t} \quad (19)$$

Solución particular

Una solución particular de (6) será:

$$y_p(t) = \frac{F_0}{k} \quad (20)$$

Solución final

Finalmente:

$$y(t) = y_h(t) + y_p(t) = A_1 e^{(-\zeta\omega_n + i\omega_d)t} + A_2 e^{(-\zeta\omega_n - i\omega_d)t} + \frac{F_0}{k} \quad (21)$$

La velocidad se obtiene derivando:

$$\dot{y}(t) = A_1(-\zeta\omega_n + i\omega_d)e^{(-\zeta\omega_n + i\omega_d)t} + A_2(-\zeta\omega_n - i\omega_d)e^{(-\zeta\omega_n - i\omega_d)t} \quad (22)$$

Sustituyendo las condiciones iniciales:

$$y(0) = A_1 + A_2 + \frac{F_0}{k} = y_0 \quad (23)$$

$$\dot{y}(0) = A_1(-\zeta\omega_n + i\omega_d) + A_2(-\zeta\omega_n - i\omega_d) = \dot{y}_0 \quad (24)$$

Sustituyendo:

$$y(t) = \left(y_0 - \frac{F_0}{k}\right) e^{-\zeta\omega_n t} \cos\omega_d t + \left(\frac{\zeta\omega_n\left(y_0 - \frac{F_0}{k}\right) + \dot{y}_0}{\omega_d}\right) e^{-\zeta\omega_n t} \sin\omega_d t + \frac{F_0}{k} \quad (25)$$

$$\dot{y}(t) = \dot{y}_0 e^{-\zeta\omega_n t} \cos\omega_d t - \left(\frac{\omega_n\left(y_0 - \frac{F_0}{k}\right) + \zeta\dot{y}_0}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) e^{-\zeta\omega_n t} \sin\omega_d t \quad (26)$$

Y la aceleración se obtiene sustituyendo en (6):

$$\ddot{y}(t) = \frac{1}{m} (F_0 - c\dot{y}(t) - ky(t)) \quad (27)$$

RESUMEN

Una vez analizadas las ecuaciones diferenciales del sistema de un grado de libertad, se identifican y simplifican las ecuaciones finales utilizadas para el sistema fabricado [11]:

$$m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) = 0 \quad (28)$$

$$y(0) = y_0 \quad ; \quad \dot{y}(0) = \dot{y}_0 \quad (29)$$

$$y(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[y_0 \cos\omega_d t + \left(\frac{\zeta\omega_n y_0 + \dot{y}_0}{\omega_d} \right) \text{sen}\omega_d t \right] \quad (30)$$

$$\dot{y}(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left[\dot{y}_0 \cos\omega_d t - \left(\frac{\omega_n y_0 + \zeta\dot{y}_0}{\sqrt{1-\zeta^2}} \right) \text{sen}\omega_d t \right] \quad (31)$$

$$\ddot{y}(t) = -\frac{1}{m} (c\dot{y}(t) + ky(t)) \quad (32)$$

Los gráficos obtenidos tendrán un desfase de 90° entre la velocidad y la posición, y de 180° entre aceleración y posición (Gráfico 9).

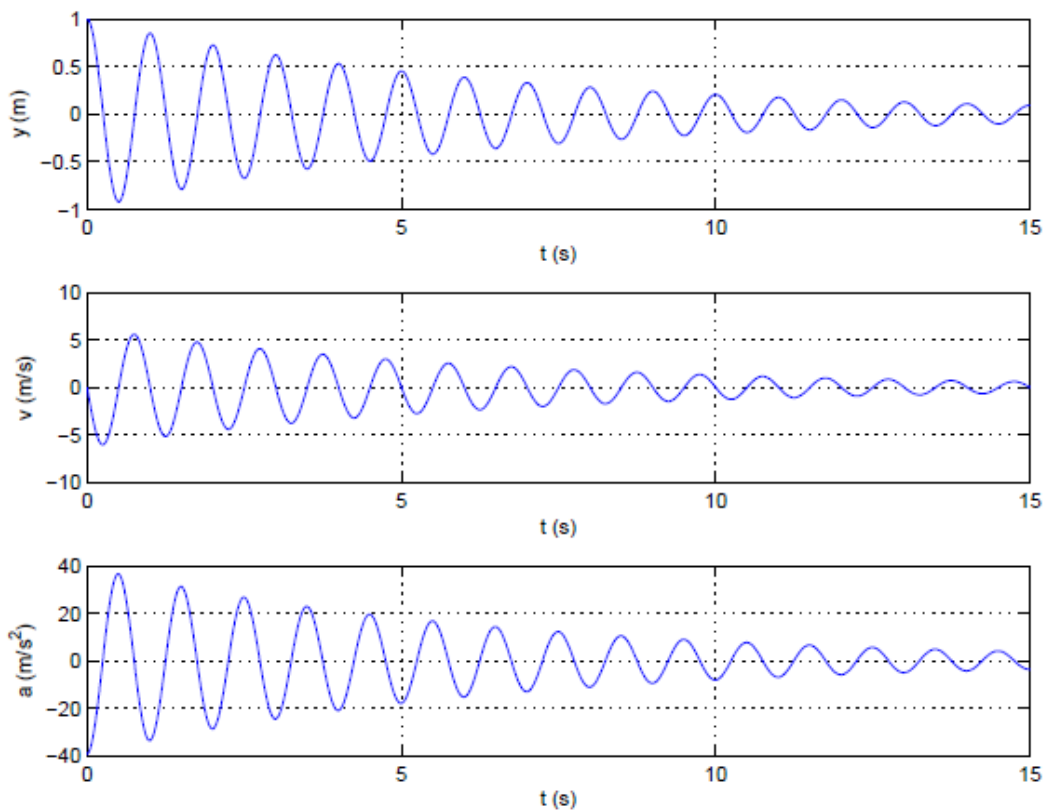


Gráfico 9. Ejemplo de gráficos de un sistema de un grado de libertad. [11]

4.1.2.2 Análisis experimental

Se realizará mediante la medición con el láser y la célula de carga de la variación de posición y fuerza ejercida al desplazar la masa de su posición de equilibrio en dirección vertical.

Previamente se deben conectar los cables al pin de entrada del hardware de adquisición, teniendo una entrada tipo *D-SUB* y dos cables directamente en la parte posterior de *SIRIUS* (Ilustración 34).

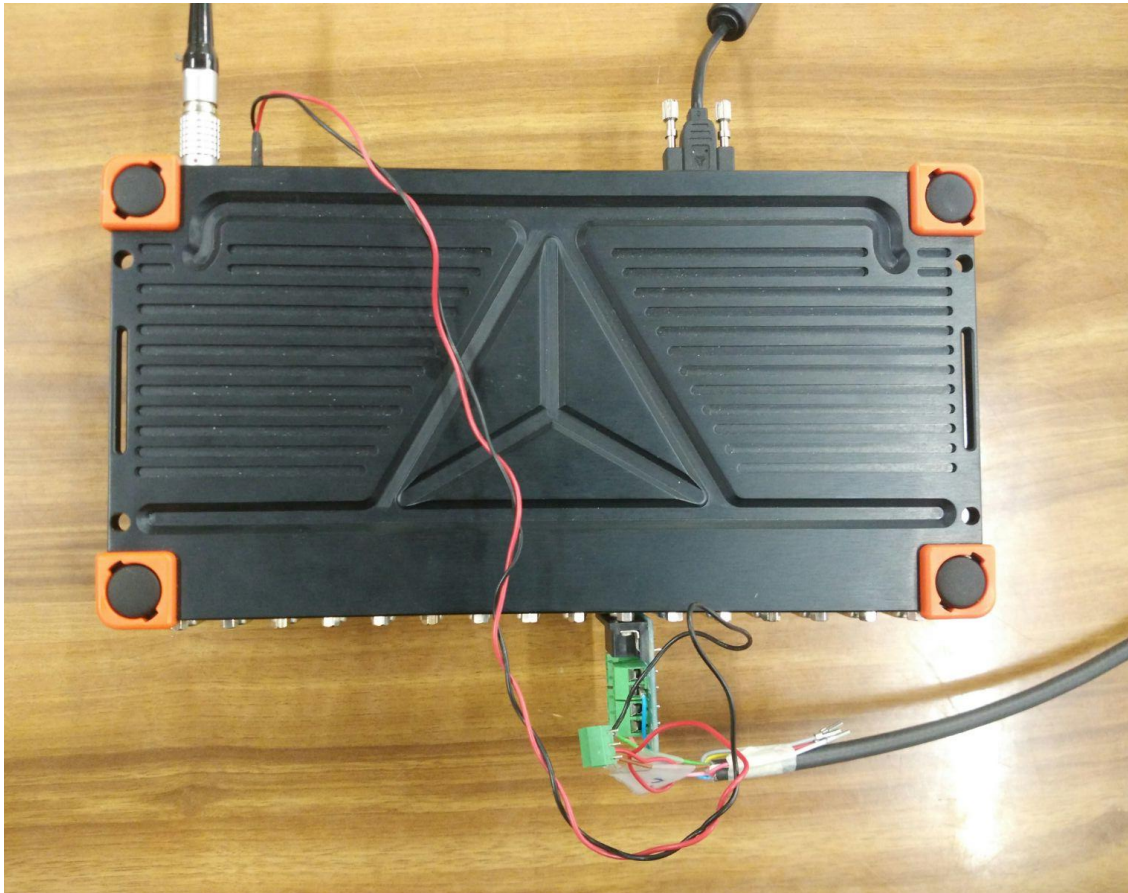


Ilustración 34. Conexión del láser al hardware de adquisición.

Entrada *D-SUB*:

- Cable Azul: 8
- Cable Rosa: 4

Salida *OUT*:

- Cable Rojo: Orificio superior
- Cable Negro: Orificio inferior

La célula será configurada en el software de adquisición *DEWESoft* de la misma forma que en el apartado 4.1.1 y el láser modificando los siguientes parámetros (Ilustración 35):

- *Range: 10 V*
- *Low-pass filter: 10 Hz*
- *Low-pass type = Butterworth 8 th order*
- *Physical quantity = Displacement/distance*
- *First Point = 0 V equals 0,03 m*
- *Second Point = 10 V equals 0,08 m*

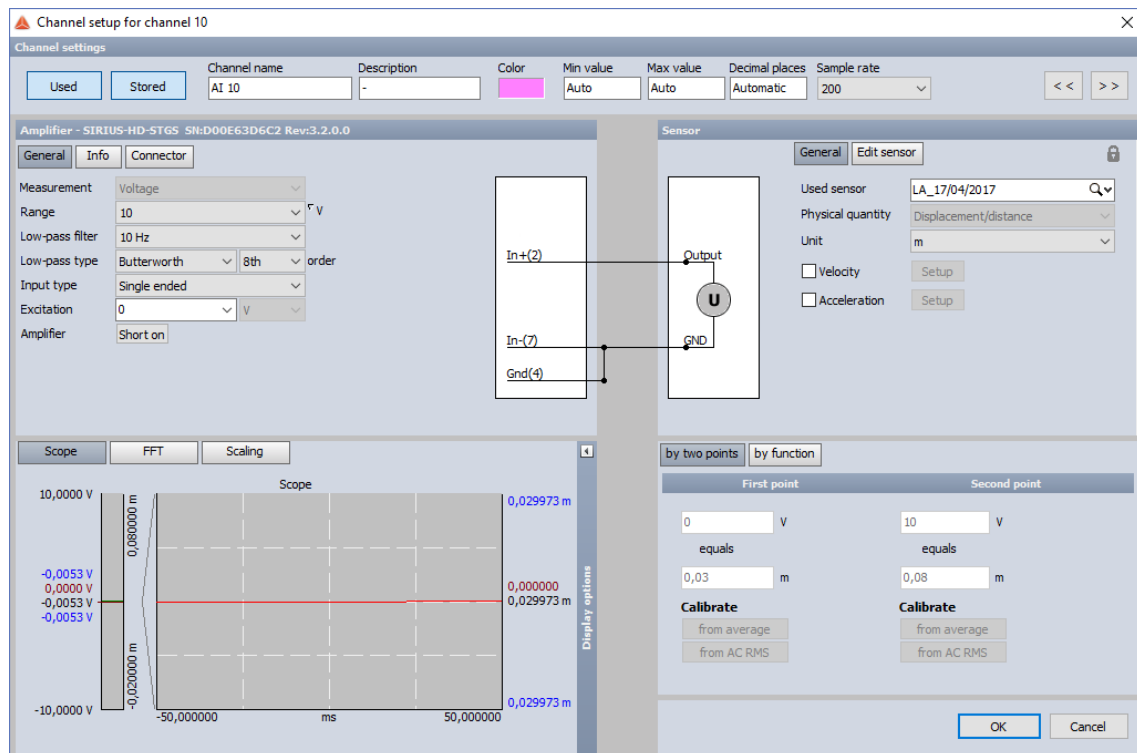


Ilustración 35. Parámetros de configuración del láser en Cannel Setup

En la pestaña *Design* se pueden mostrar las gráficas de los dos sensores simultáneamente, así como la FFT para obtener la frecuencia.

Una vez configurado el programa, se desplaza la masa de su posición de equilibrio y se graban los resultados (200 medidas por segundo) durante 30 segundos. Estos datos (*Gráfico 10*) pueden ser exportados a un formato Excel para su tratamiento.

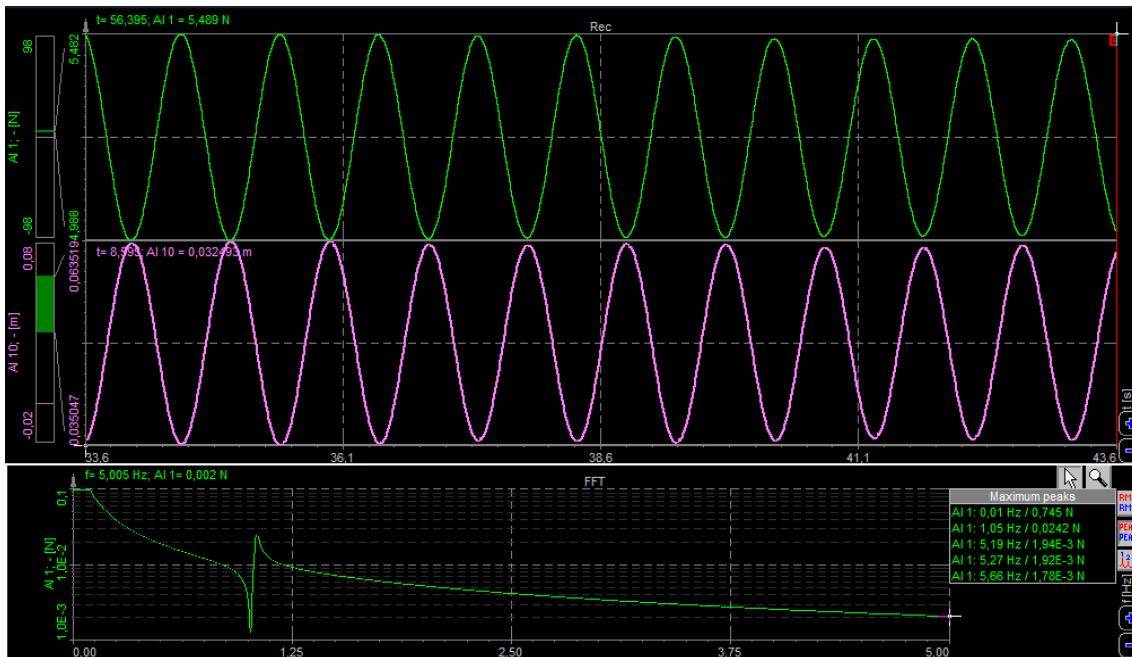


Gráfico 10. Gráficos del sistema de un grado de libertad en DEWESoft

A partir de las gráficas se pueden obtener los siguientes datos de caracterización del sistema dinámico:

- Masa: $0,4112 \text{ kg}$ (masa de carga + $\frac{1}{2}$ masa del muelle)
- Frecuencia natural: $6,547 \text{ rad/s}$ (obtenido de la FFT)
- Altura inicial $y_0 = 0,0117$ (iterando sobre el gráfico en *Excel*)
- Aceleración inicial $\dot{y}_0 = 0$ (sin aplicar aceleración)
- Desfase $\phi = 0,05$ (iterando sobre el gráfico en *Excel*)
- Las constantes c y k son calculadas con las ecuaciones vistas (15) y (16)

Por último, es necesario obtener el amortiguamiento ζ . Podría obtenerse iterando directamente sobre el gráfico en *Excel*, pero para hacerlo de forma más exacta se empleará un programa de *MATLAB* (*getDamping3*) elaborado por Álvaro Magdaleno, cotutor de este proyecto.

El programa analiza las crestas de la señal y realiza una envolvente exponencial para determinar el resultado.

Al ejecutar el programa con los datos exportados de *DEWESoft* en un formato *.txt*, muestra un resultado $ksi = 0,0011$. Además, representa los cuatro gráficos descriptivos de la señal (*Gráficos 11-14*).

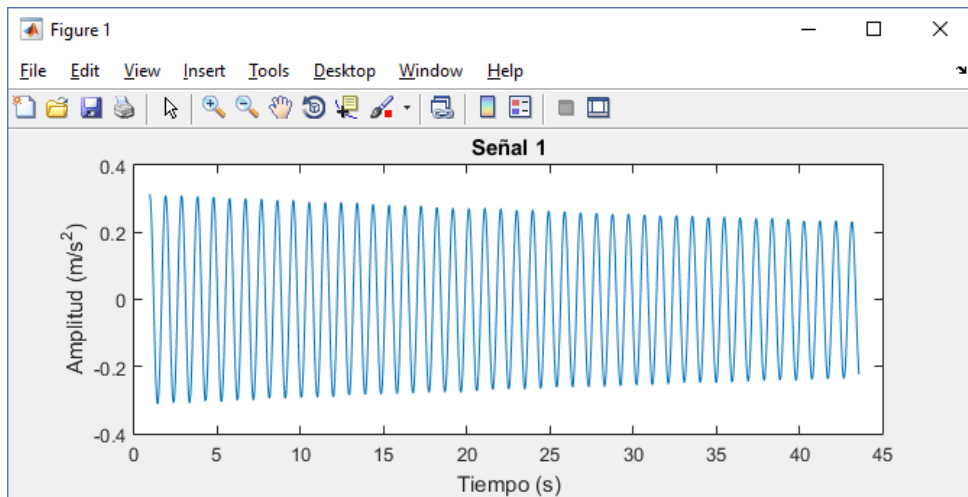


Gráfico 11. Señal 1 (getDaming3) en MATLAB

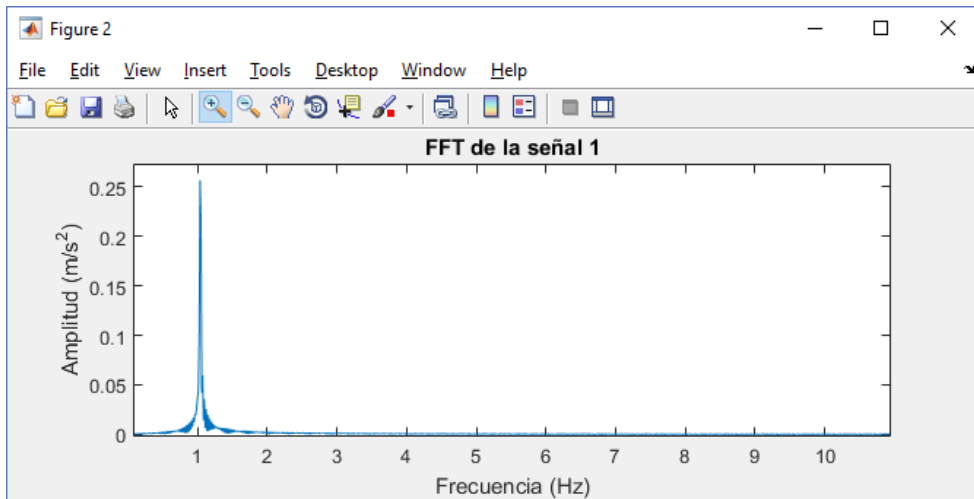


Gráfico 12. FFT de la señal 1 (getDaming3) en MATLAB

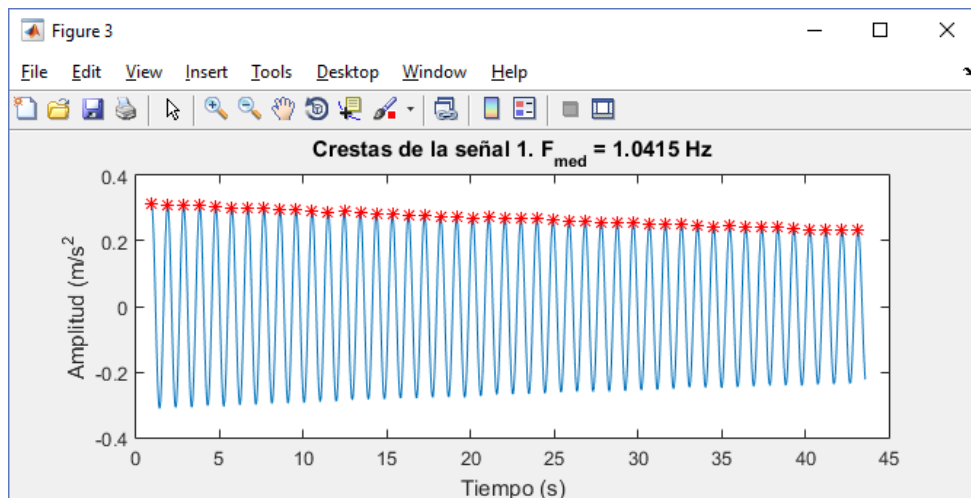


Gráfico 13. Crestas de la señal 1 (getDamping3) en MATLAB

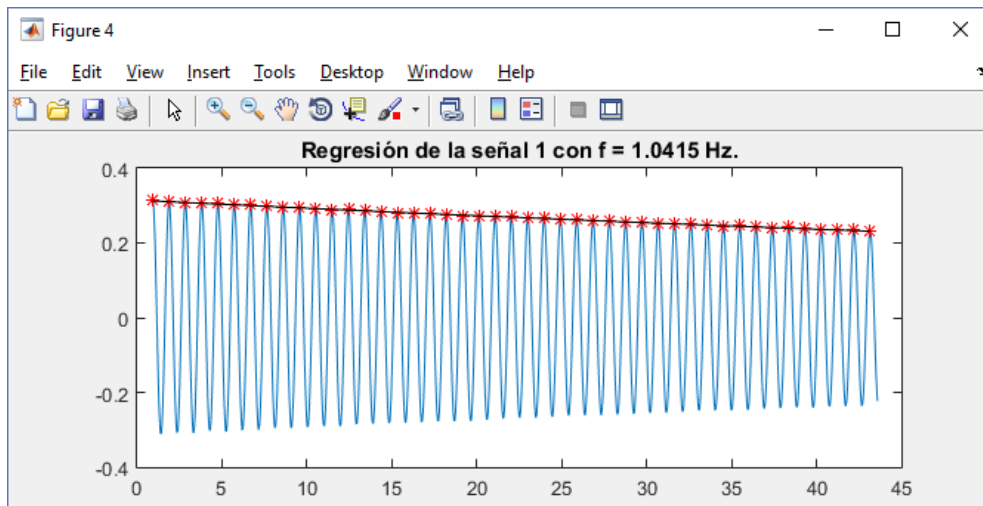


Gráfico 14. Regresión de la señal 1 (getDamping3) en MATLAB

4.1.2.3 Comparación de resultados

Con el sistema ya caracterizado, se realiza la comparativa de posición y fuerza, entre el modelo teórico y el experimental.

Se representa conjuntamente (*Ilustración 36*) las columnas exportadas desde el software *DEWESoft* a formato *.xlsx* y las columnas del análisis teórico, calculadas con las fórmulas vistas (*apartado 4.1.2.1*) y los datos característicos del sistema (*apartado 4.1.2.2*).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Parámetros	ζ (cte)	ω_n (rad/s)	ω_d (rad/s)	y_0 (m)	y_0' (m/s)	m (kg)	c (cte)	k (rad/s)	ϕ (s)
2		0,0011	6,547	6,547	0,0177	0	0,4112	0,009	43,275	0,050
3	200									
4	Time	AI 1	y(t)	y'(t)	y''(t)	F(t)_{teor}				
5	s	N	m	m/s	m/s ²	N				
6	0	-0,28177	0,01676	-0,03725	-0,72496	-0,29810				
7	0,005	-0,27765	0,01657	-0,04082	-0,71648	-0,29462				
8	0,01	-0,27322	0,01635	-0,04434	-0,70724	-0,29082				
9	0,015	-0,26849	0,01612	-0,04782	-0,69723	-0,28670				
10	0,02	-0,26344	0,01587	-0,05124	-0,68648	-0,28228				
11	0,025	-0,25808	0,01561	-0,05461	-0,67500	-0,27756				
12	0,03	-0,25241	0,01533	-0,05793	-0,66279	-0,27254				
13	0,035	-0,24645	0,01503	-0,06117	-0,64988	-0,26723				
14	0,04	-0,24020	0,01472	-0,06436	-0,63626	-0,26163				
15	0,045	-0,23368	0,01439	-0,06747	-0,62197	-0,25575				
16	0,05	-0,22693	0,01404	-0,07051	-0,60701	-0,24960				
17	0,055	-0,21994	0,01368	-0,07348	-0,59141	-0,24319				
18	0,06	-0,21274	0,01331	-0,07637	-0,57517	-0,23651				
19	0,065	-0,20536	0,01292	-0,07917	-0,55831	-0,22958				
20	0,07	-0,19780	0,01252	-0,08189	-0,54086	-0,22240				
21	0,075	-0,19005	0,01210	-0,08452	-0,52283	-0,21499				
22	0,08	-0,18215	0,01167	-0,08706	-0,50424	-0,20734				
23	0,085	-0,17409	0,01123	-0,08951	-0,48511	-0,19948				

Ilustración 36. Comparativa datos teórico-experimentales del sistema de 1gdl.

Por último, se representan las columnas de posición (*Gráfico 15*) y fuerza (*Gráfico 16*) tanto del análisis teórico como del experimental de forma combinada para comparar los resultados.

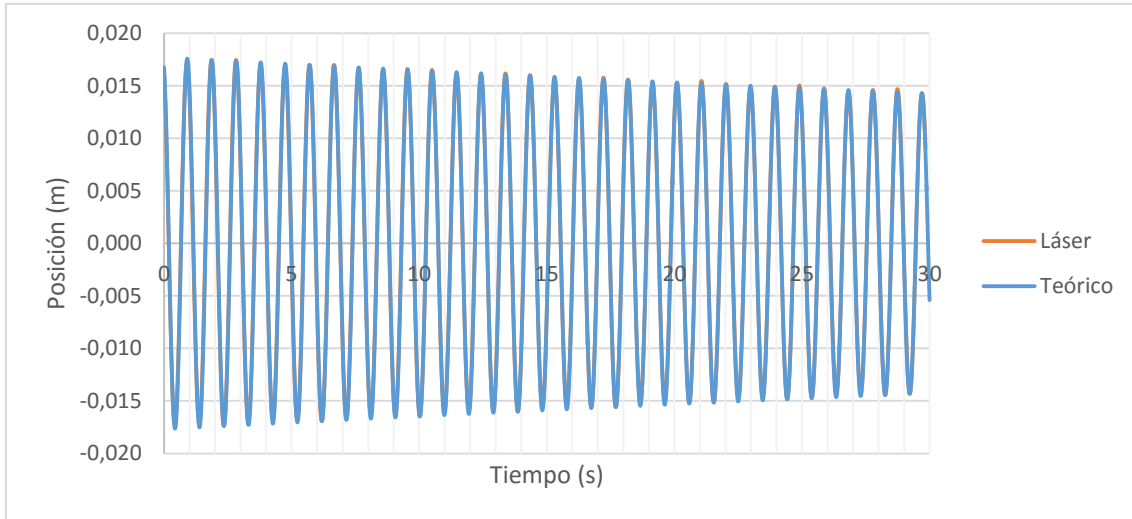


Gráfico 15. Comparativa señales teórico-experimental de posición

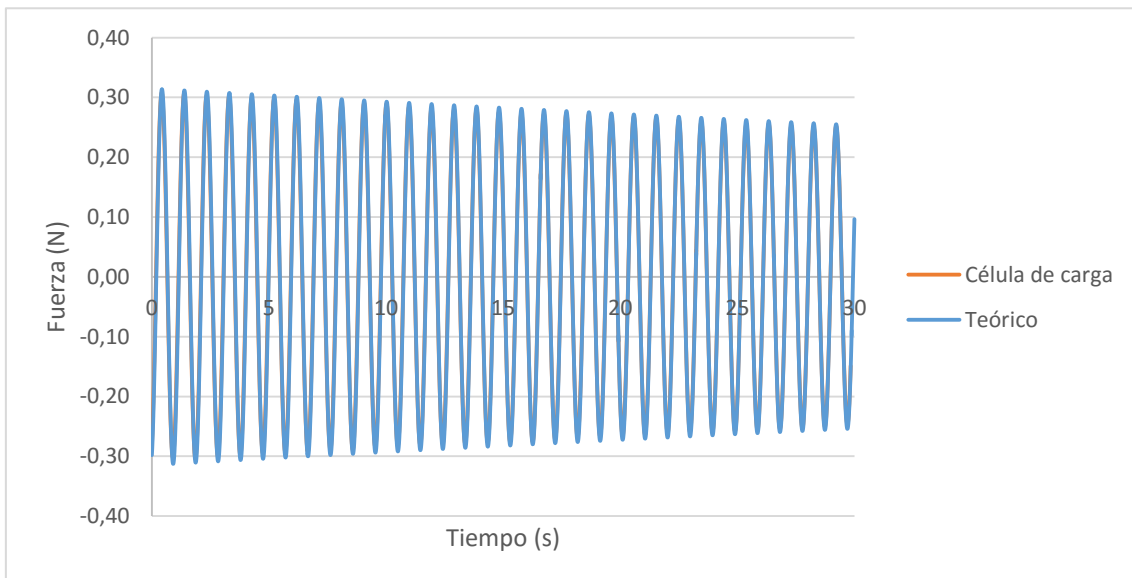


Gráfico 16. Comparativa señales teórico-experimental de fuerza

Como se puede apreciar, apenas se diferencian las gráficas teórica de la experimental ya que se encuentran totalmente superpuestas. Por tanto se concluye la caracterización de forma correcta de un sistema dinámico de un grado de libertad con una célula de carga y un láser de posición.

4.2 Caracterización del robot

Una vez realizada la calibración y configuración de la célula de carga, y demostrada la capacidad de caracterizar con ella un sistema dinámico de forma precisa, se procede a la caracterización del autómatas móvil diseñado (*apartado 3.2*).

Se realizarán un total de 54 ensayos (*Ilustración 37*) en la plataforma de caracterización (*apartado 1.3.6*). Para cada potencia del servomotor (nueve magnitudes), con cada tipo de leva (dos diferentes), ambas en la misma posición o con un ángulo de desviación (dos variaciones), y con peso propio o peso adicional.

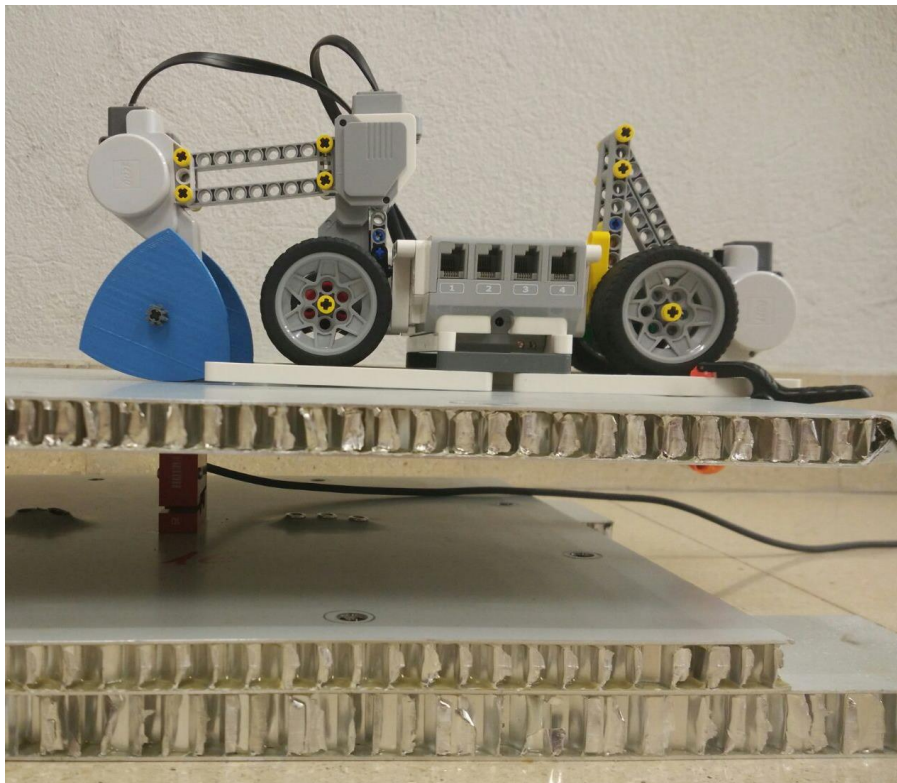


Ilustración 37. Robot preparado para caracterización.

El objetivo es describir el patrón de fuerza producido en cada ensayo, su intervalo de actuación, y la frecuencia generada para cada potencia. Así se podrá conseguir los datos y gráficos necesarios para ejercer con el robot la frecuencia y fuerzas deseadas en la viga, y observar sus reacciones.

El servomotor posee la potencia suficiente para mantener la rotación constante a pesar del rozamiento y el peso adicional. Por tanto, este peso de 221,7 g (*Ilustración 38*) mantendrá la misma frecuencia pero aumentando la fuerza y la inercia del robot.

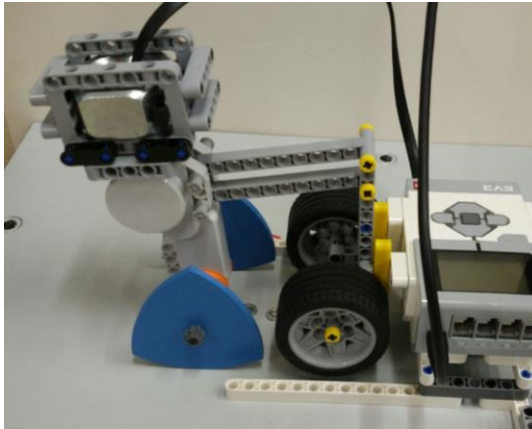


Ilustración 38. Peso adicional en robot para caracterización.

Se diferenciarán seis casos:

- **M1-DD-A:** Levas azules (tres picos), misma posición (derecha-derecha) sin masa adicional.
- **M2-DD-A:** Levas azules (tres picos), misma posición (derecha-derecha) con masa adicional.
- **M1-DI-A** (*Ilustración 39*): Levas azules (tres picos), posición desfasada (derecha-izquierda) sin masa adicional.
- **M2-DI-A:** Levas azules (tres picos), posición desfasada (derecha-izquierda) con masa adicional.
- **M1-DD-V:** Levas verdes (cuatro picos), misma posición (derecha-derecha) sin masa adicional.
- **M2-DD-V:** Levas azules (cuatro picos), misma posición (derecha-derecha) con masa adicional.

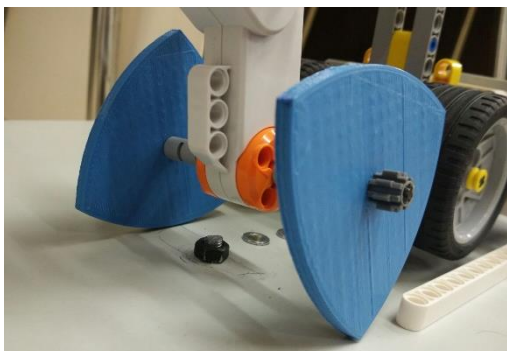


Ilustración 39. Levas azules con desfase

Para realizar la configuración del *LEGO* se empleará el software *LEGO MINDSTORMS EV3 Home Edition*. Es un software sencillo de programación por bloques, donde se pueden controlar todos los sensores (*apartado 1.3.1*).

Para caracterizar la acción de las levas sobre el tablero sólo será necesario modificar la potencia del servomotor y trasladarlo al robot a través de bluetooth o USB (*Ilustración 40*).

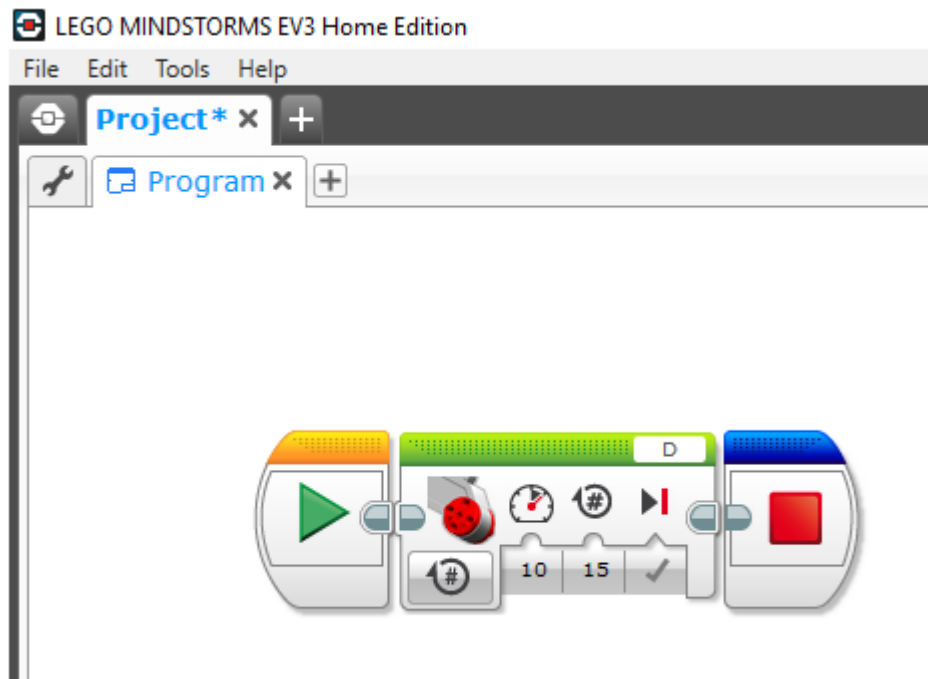


Ilustración 40. Programación del autómeta para caracterización

Para la caracterización únicamente será necesario conectar el servomotor de trabajo al puerto D, y la caja al ordenador.

- **Modo:** Se puede activar el servomotor por tiempo, grados o rotaciones. Para caracterizar la frecuencia será más sencillo por revoluciones completas.
- **Potencia:** Permite un rango entre 0-100 de potencia. Para la caracterización sólo se utilizará entre 10-50 en intervalos de 5, ya que al aumentar más pierde estabilidad y las levas no contactan con todo su perímetro produciéndose saltos inapropiados.
- **Rotaciones:** Se definen 15 rotaciones en cada ensayo para que, a máxima potencia, se registren al menos 10 segundos.

4.2.1 M1-DD-A

Patrón de fuerza (3 rev)

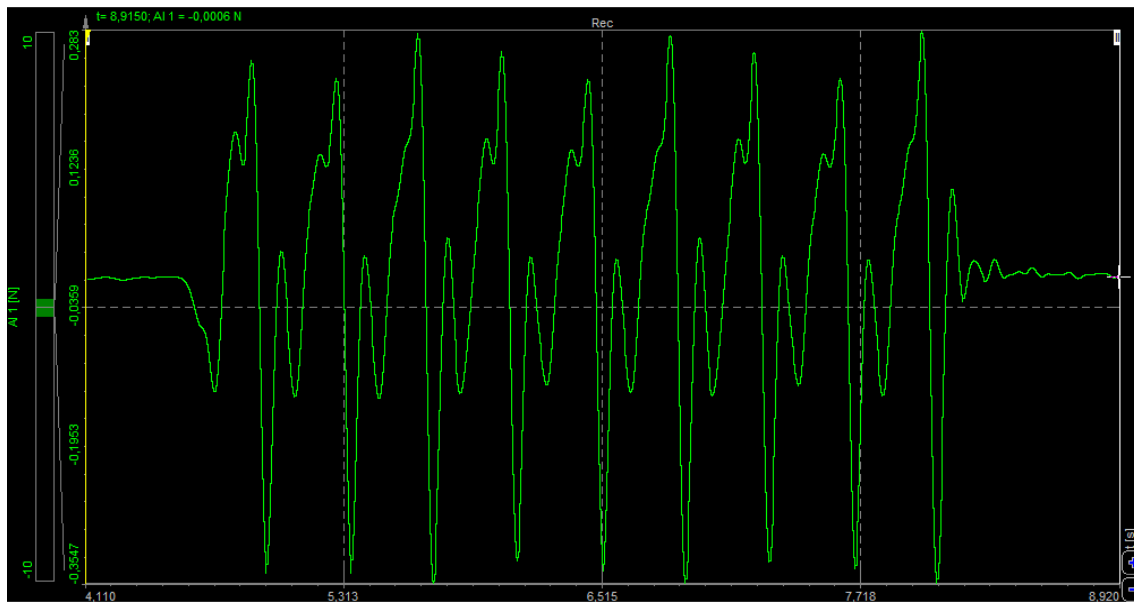


Gráfico 17. M1-DD-A DEWESoft. Patrón de fuerza en tres revoluciones (seis impactos).

Tabla de datos

Potencia LEGO	rpm	Frecuencia (Hz)	Amplitud Fuerza (N)	Tiempo 15 rev (s)
10	17,66	0,88	0,33	50,98
15	25,96	1,30	0,43	34,67
20	34,35	1,72	0,49	26,20
25	42,76	2,14	0,56	21,05
30	51,31	2,57	0,64	17,54
35	59,60	2,98	0,75	15,10
40	68,18	3,41	0,82	13,20
45	76,66	3,83	0,96	11,74
50	85,07	4,25	1,10	10,58

Tabla 6. Datos M1-DD-A

Gráficas

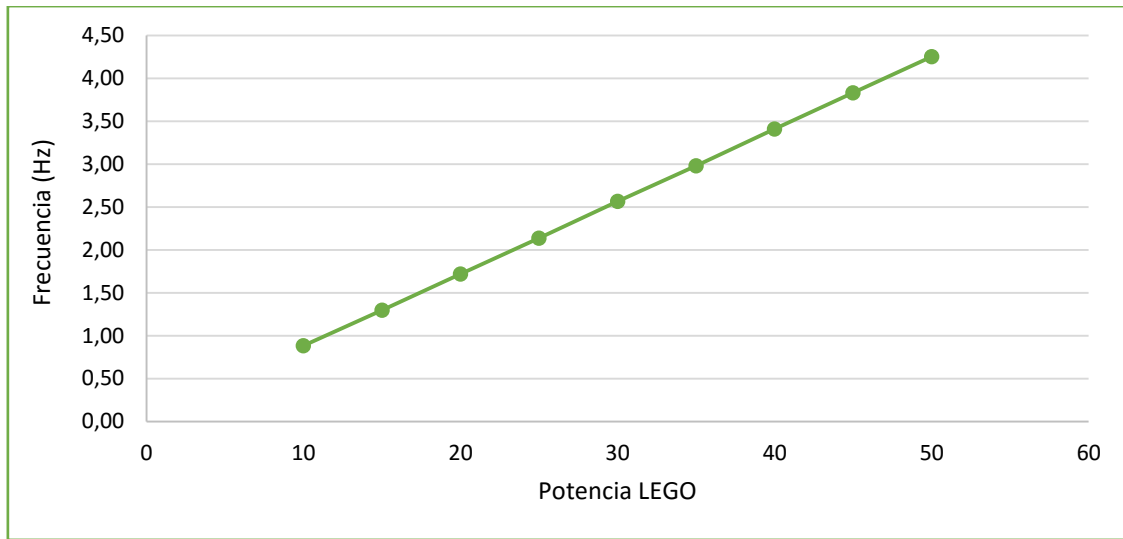


Gráfico 18. Frecuencia-Potencia M1-DD-A

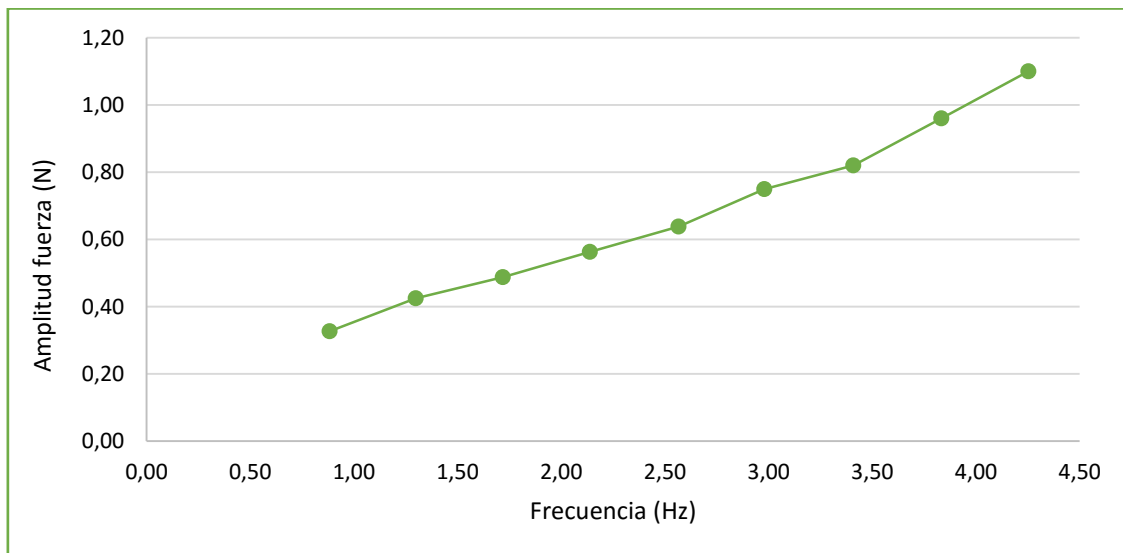


Gráfico 19. Amplitud Fuerza-Frecuencia M1-DD-A

Conclusiones:

El patrón de fuerza es estable con un pico alto y uno bajo en cada impacto y dos leves oscilaciones en la transición. La frecuencia sigue una regresión lineal casi perfecta por lo que el servomotor cumple su cometido de forma eficiente. La amplitud de fuerza es pequeña pero sigue también una regresión lineal aumentando de forma constante a mayores frecuencias.

4.2.2 M2-DD-A

Patrón de fuerza (3 rev)

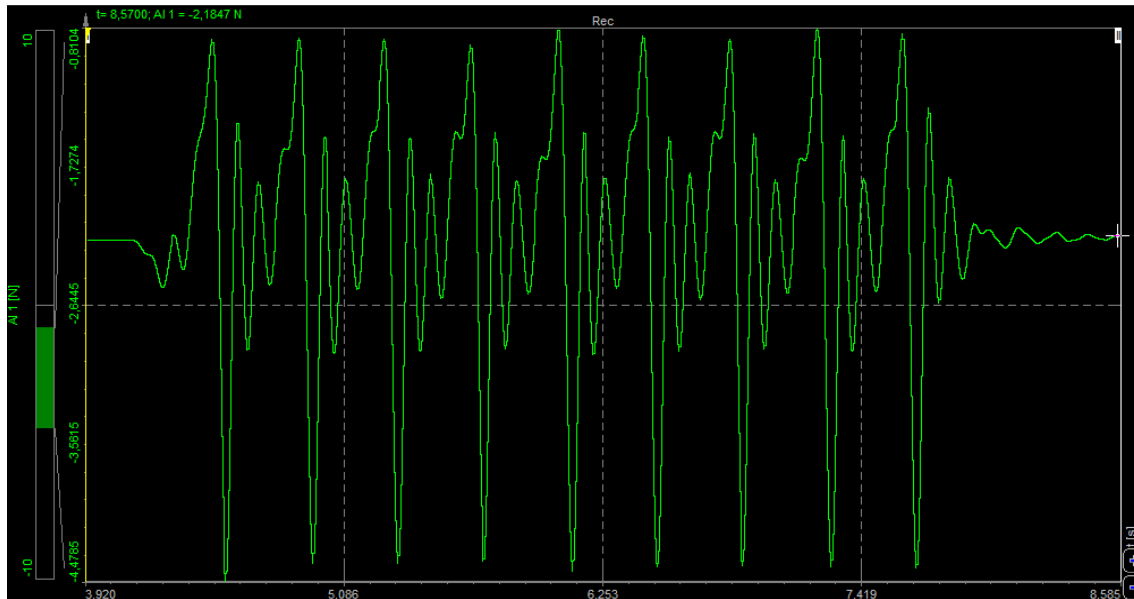


Gráfico 20. M2-DD-A DEWESoft. Patrón de fuerza en tres revoluciones (seis impactos)

Tabla de datos

Potencia LEGO	rpm	Frecuencia (Hz)	Amplitud Fuerza (N)	Tiempo 15 rev (s)
10	16,67	0,83	2,08	54,00
15	25,08	1,25	2,27	35,88
20	33,76	1,69	2,65	26,66
25	42,39	2,12	2,95	21,23
30	51,46	2,57	3,33	17,49
35	59,84	2,99	3,68	15,04
40	68,34	3,42	4,09	13,17
45	76,66	3,83	4,32	11,74
50	85,55	4,28	4,65	10,52

Tabla 7. Datos M2-DD-A

Gráficas

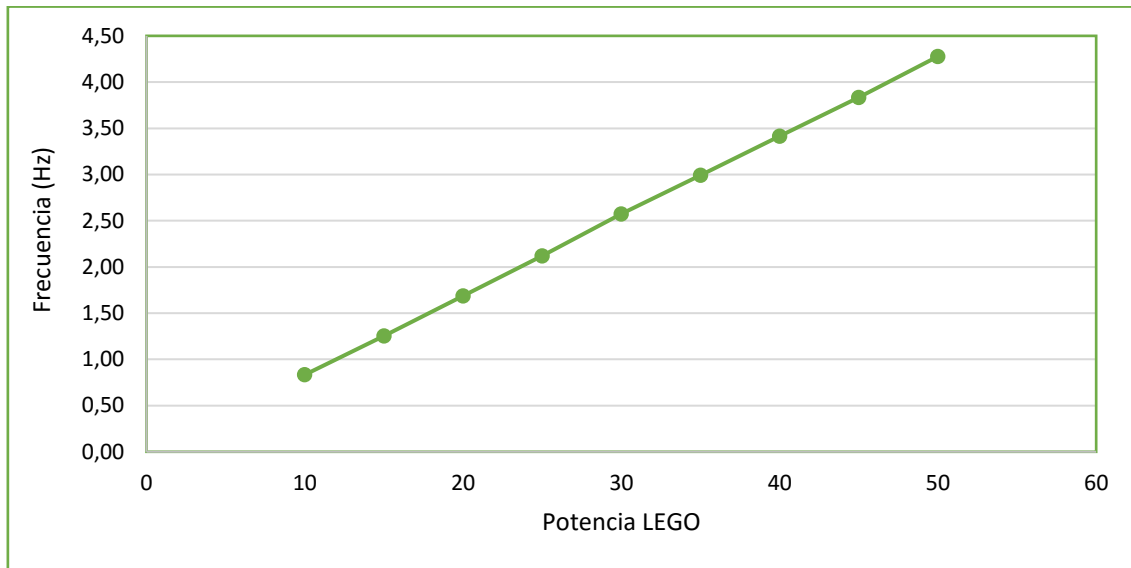


Gráfico 21. Frecuencia-Potencia M2-DD-A

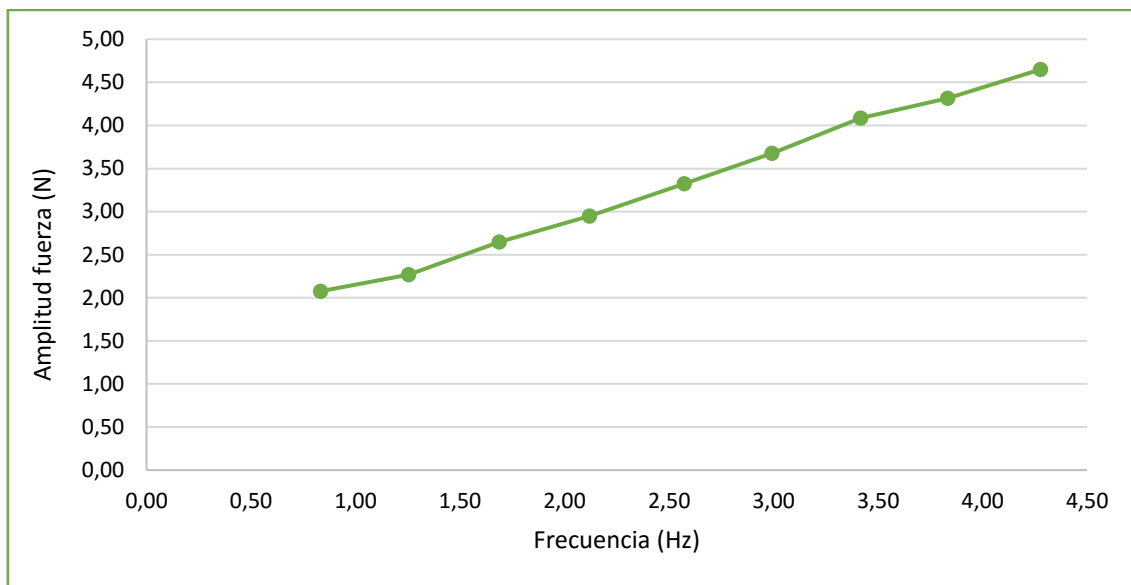


Gráfico 22. Amplitud Fuerza-Frecuencia M2-DD-A

Conclusiones:

El patrón de fuerza es estable y similar al anterior, aunque con una amplitud mucho mayor. La frecuencia en función de la potencia es equivalente (el servomotor mantiene el régimen de giro con una carga mayor). La amplitud de la fuerza en función de la frecuencia ha aumentado considerablemente, como era de esperar al añadir peso adicional.

4.2.3 M1-DI-A

Patrón de fuerza (3 rev)

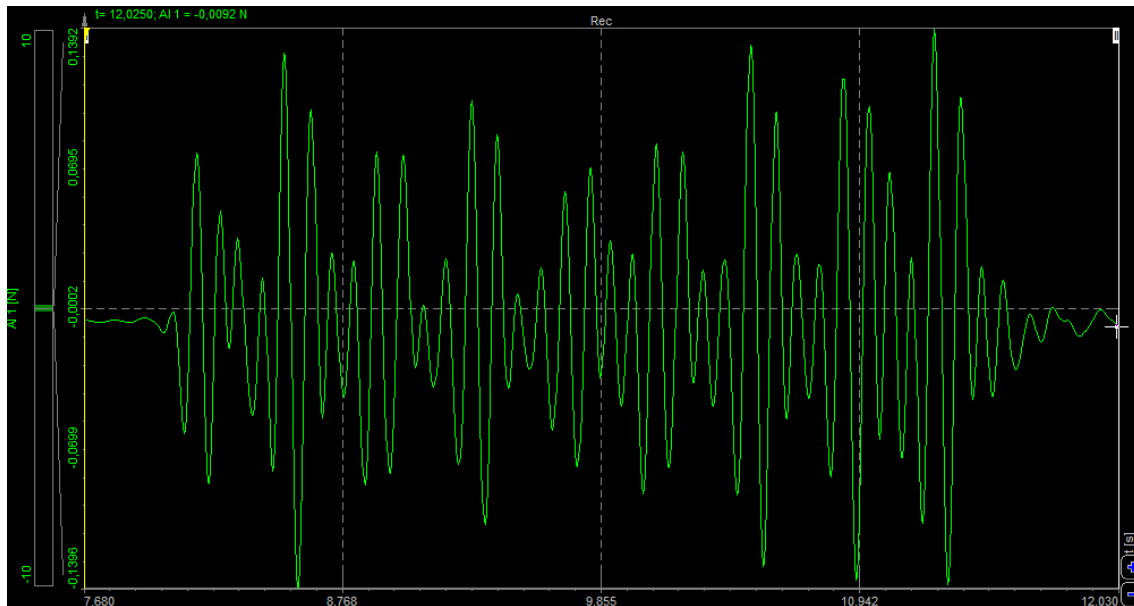


Gráfico 23. M1-DI-A DEWESoft. Patrón de fuerza en tres revoluciones (doce impactos)

Tabla de datos

Potencia LEGO	rpm	Frecuencia (Hz)	Amplitud Fuerza (N)	Tiempo 15 rev (s)
10	17,66	1,77	0,22	50,96
15	26,00	2,60	0,30	34,61
20	34,52	3,45	0,35	26,07
25	42,84	4,28	0,46	21,01
30	50,28	5,03	0,53	17,90
35	59,80	5,98	0,60	15,05
40	68,13	6,81	0,67	13,21
45	76,60	7,66	0,73	11,75
50	84,91	8,49	0,82	10,60

Tabla 8. Datos M1-DI-A

Gráficas

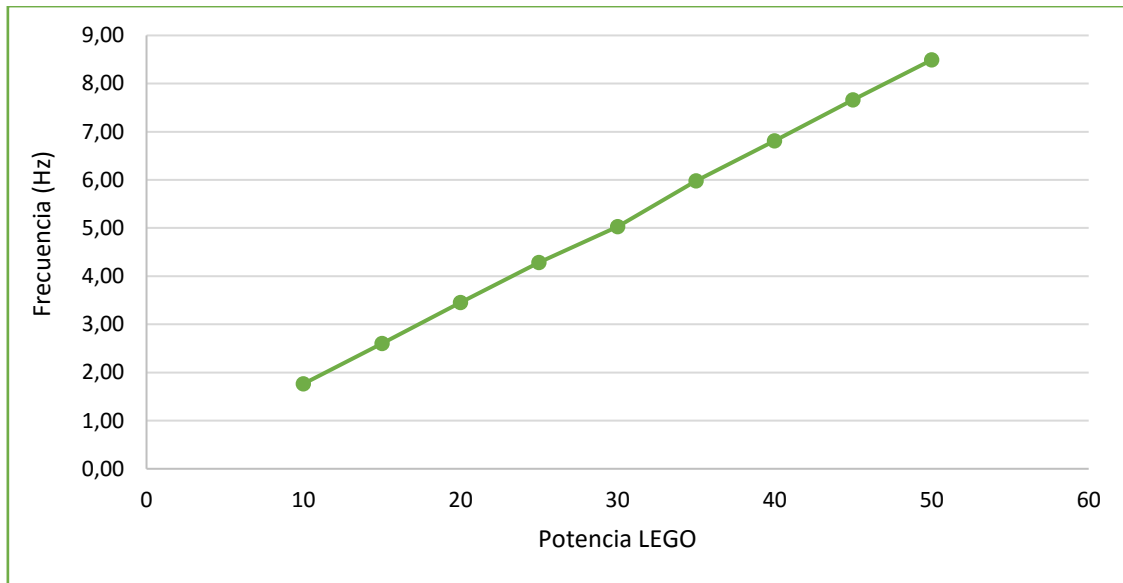


Gráfico 24. Frecuencia-Potencia M1-DI-A

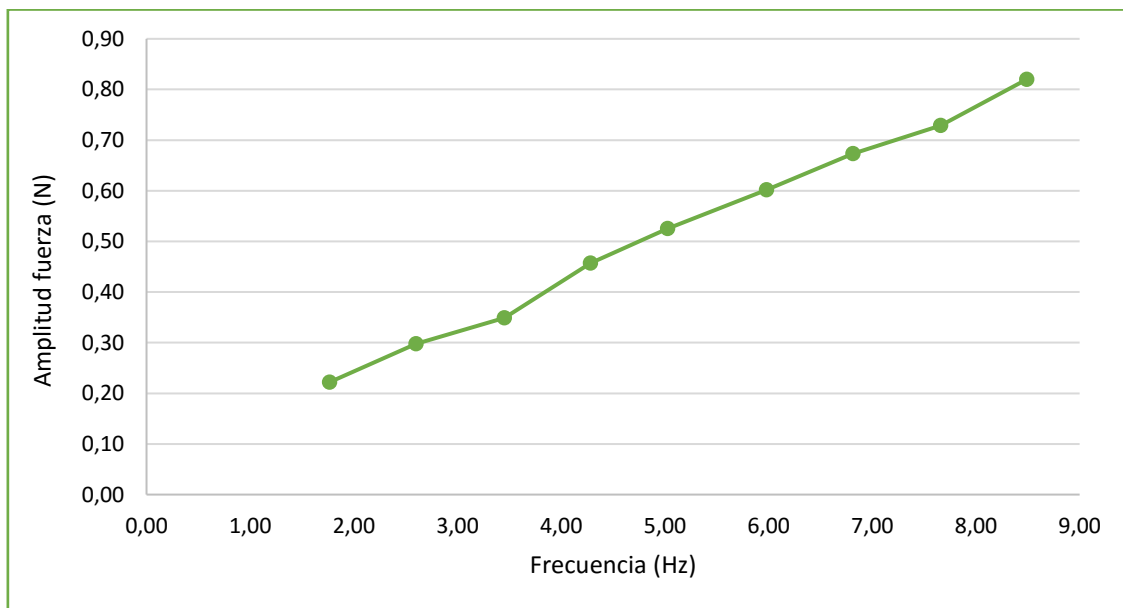


Gráfico 25. Amplitud Fuerza-Frecuencia M1-DI-A

Conclusiones:

El patrón es estable pero difuso. Al haber 12 impactos por revolución y movimiento lateral los picos de fuerza verticales varían entre rotaciones y la leva no contacta con todo su perfil permaneciendo en el aire en algunos tramos. La frecuencia, como cabe esperar, es el doble que en el apartado 4.2.1 (M1-DD-A), la amplitud de fuerza similar aunque más variable en el tiempo.

4.2.4 M2-DI-A

Patrón de fuerza (3 rev)

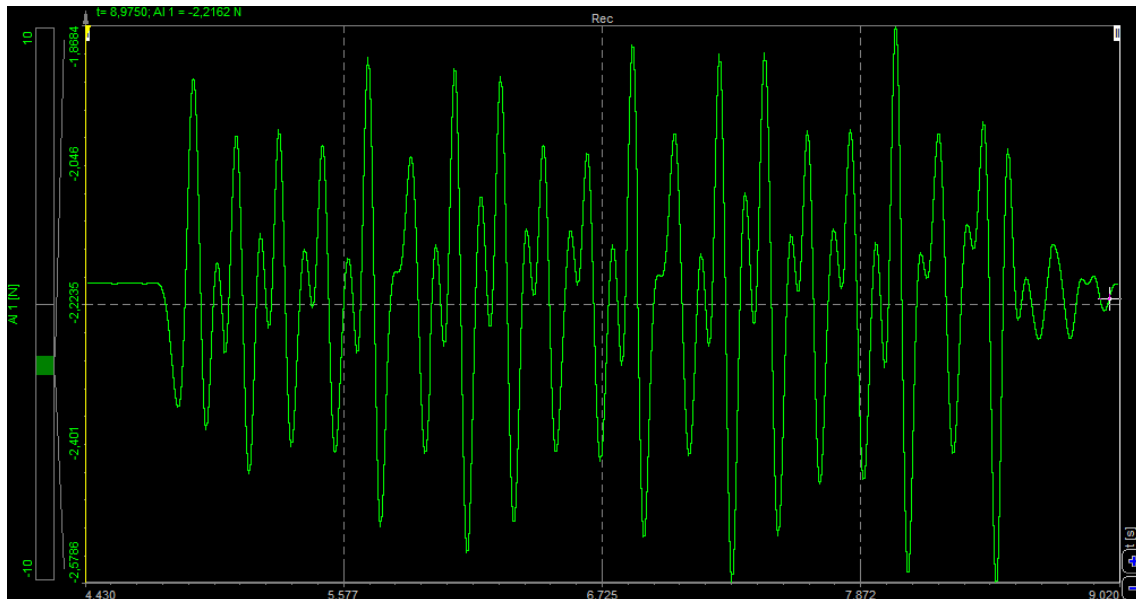


Gráfico 26. M2-DI-A DEWESoft. Patrón de fuerza en tres revoluciones (doce impactos)

Tabla de datos

Potencia LEGO	rpm	Frecuencia (Hz)	Amplitud Fuerza (N)	Tiempo 15 rev (s)
10	17,25	1,72	2,10	52,18
15	24,66	2,47	2,33	36,50
20	31,01	3,10	2,65	29,02
25	38,22	3,82	2,95	23,55
30	48,65	4,86	3,33	18,50
35	56,07	5,61	3,55	16,05
40	63,74	6,37	3,78	14,12
45	74,88	7,49	4,15	12,02
50	84,91	8,49	4,44	10,65

Tabla 9. Datos M2-DI-A

Gráficas

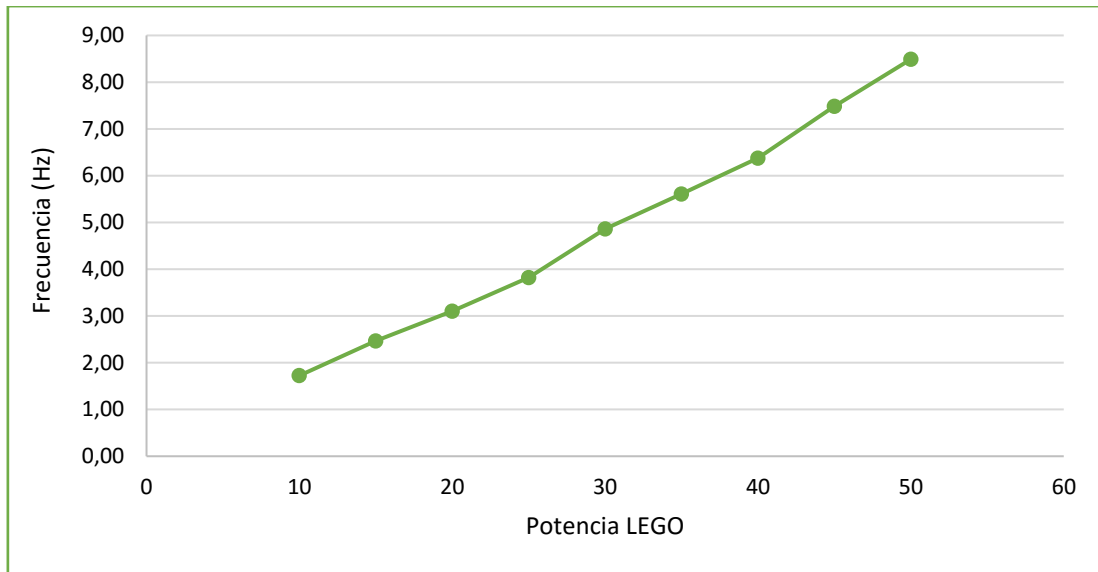


Gráfico 27. Frecuencia-Potencia M2-DI-A

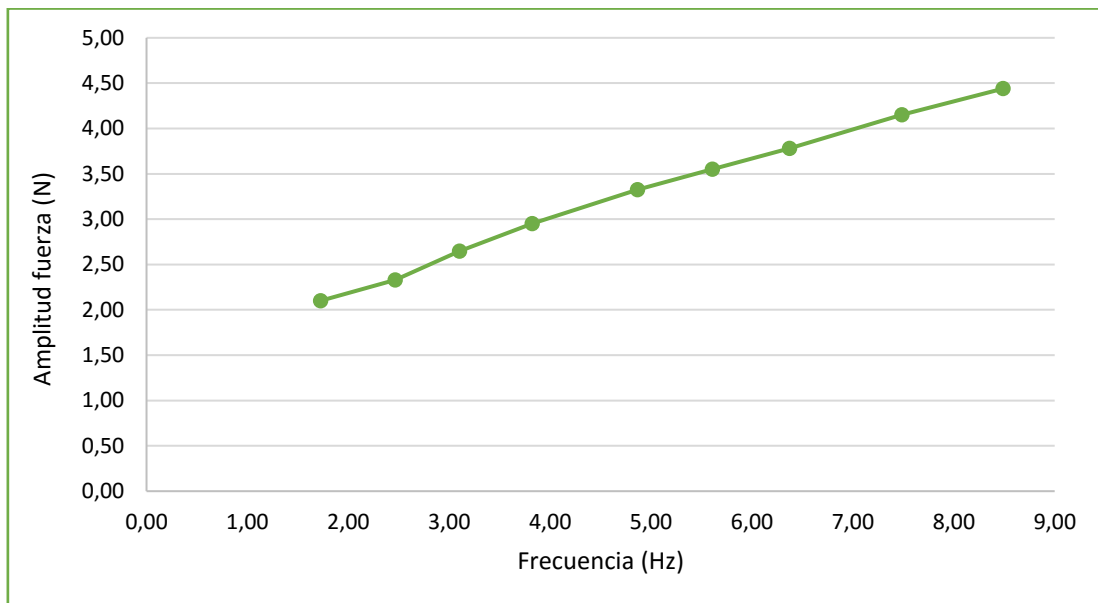


Gráfico 28. Amplitud Fuerza-Frecuencia M2-DI-A

Conclusiones:

El patrón de fuerza es difuso debido a la gran cantidad de impactos y la inercia de la masa adicional hacia los lados. La amplitud es equivalente al ensayo previo y la amplitud de fuerza, como cabía esperar, mucho mayor.

Ambas siguen una regresión lineal pero los picos de máxima y mínima fuerza no se repiten de forma constante.

4.2.5 M1-DD-V

Patrón de fuerza (3 rev)

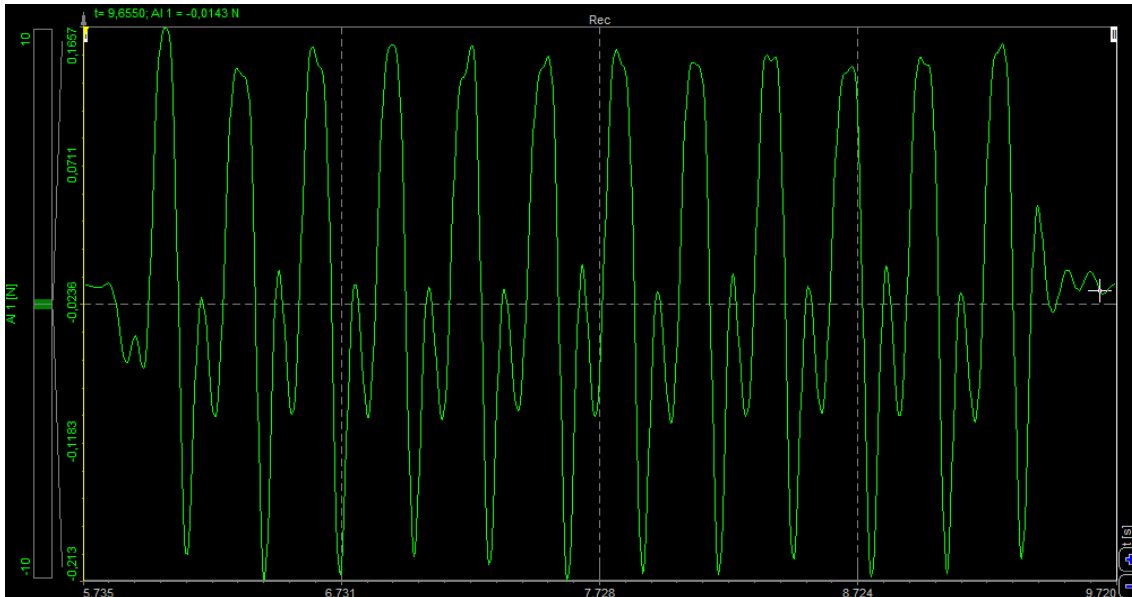


Gráfico 29. M1-DD-V DEWESoft. Patrón de fuerza en tres revoluciones (doce impactos)

Tabla de datos

Potencia LEGO	rpm	Frecuencia (Hz)	Amplitud Fuerza (N)	Tiempo 15 rev (s)
10	17,61	1,17	0,23	51,12
15	25,55	1,70	0,31	35,22
20	32,97	2,20	0,37	27,30
25	40,80	2,72	0,48	22,06
30	49,10	3,27	0,53	18,33
35	56,18	3,75	0,61	16,02
40	67,92	4,53	0,68	13,25
45	76,47	5,10	0,79	11,77
50	84,91	5,66	0,92	10,58

Tabla 10. Datos M1-DD-V

Gráficas

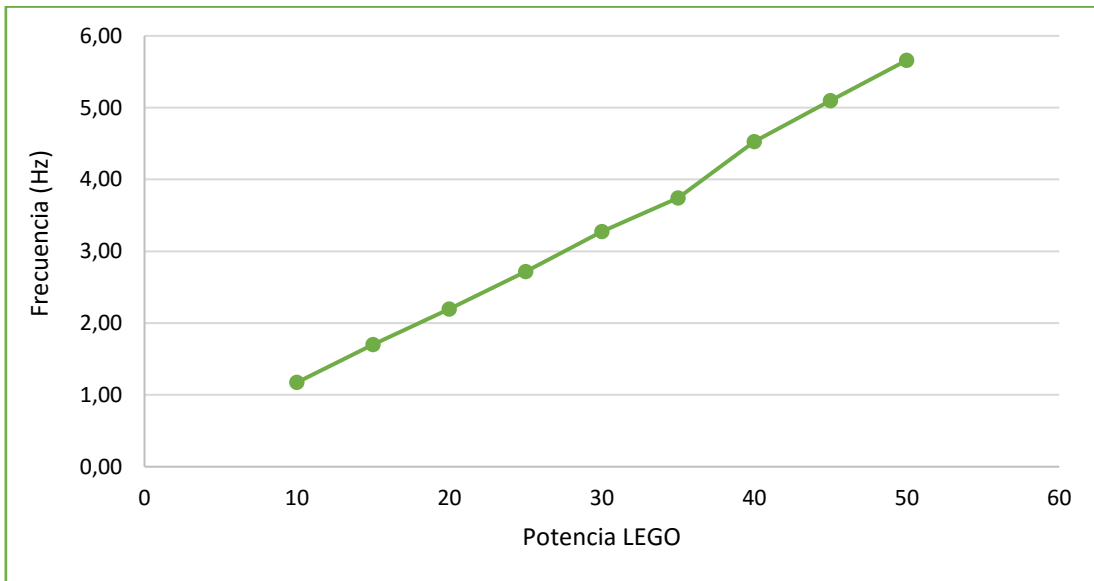


Gráfico 30. Frecuencia-Potencia M1-DD-V

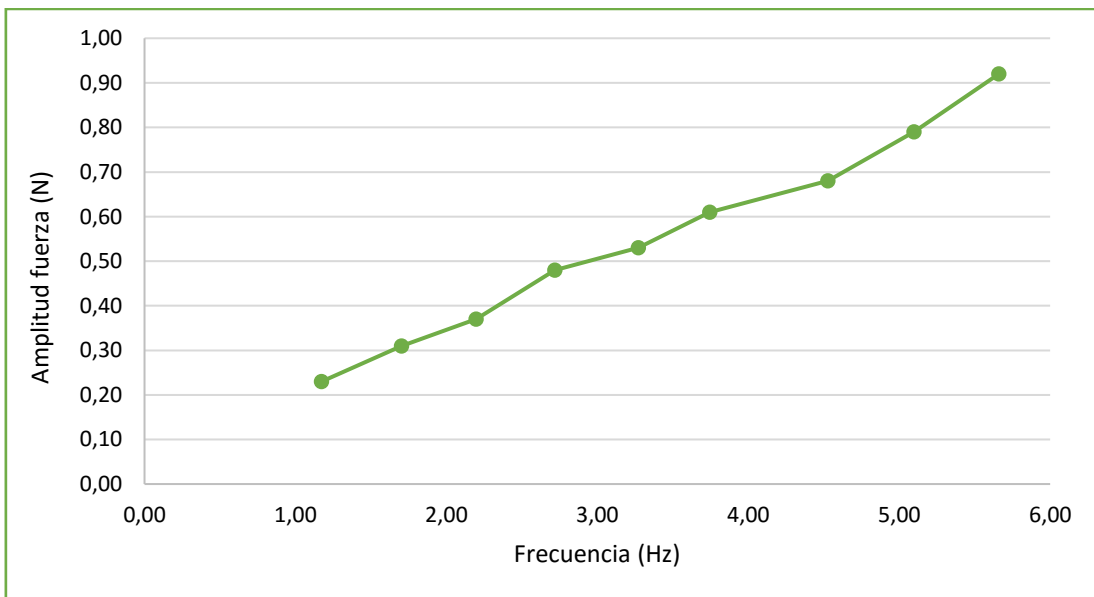


Gráfico 31. Amplitud Fuerza-Frecuencia M1-DD-V

Conclusiones:

El patrón de fuerza es constante y sencillo. Los picos máximos y mínimos se repiten con la misma frecuencia, con una oscilación intermedia en la transición. Esta frecuencia es superior a la de la leva de tres picos al producirse un impacto más por revolución. La fuerza ejercida es similar a la otra leva y con una regresión lineal.

4.2.6 M2-DD-V

Patrón de fuerza (3 rev)

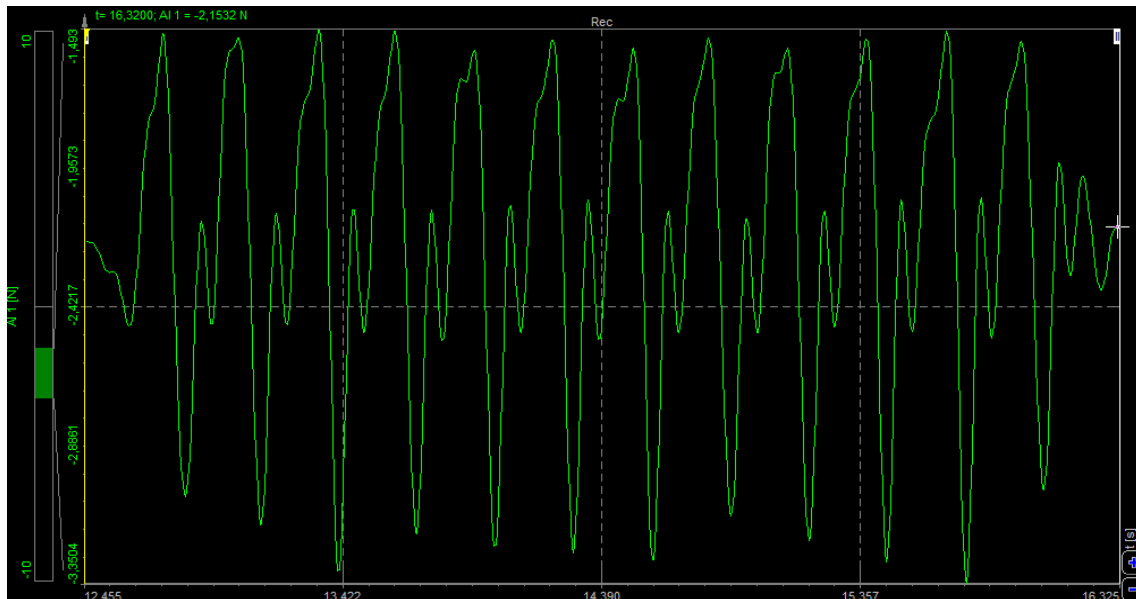


Gráfico 32. M2-DD-V DEWESoft. Patrón de fuerza en tres revoluciones (doce impactos)

Tabla de datos

Potencia LEGO	rpm	Frecuencia (Hz)	Amplitud Fuerza (N)	Tiempo 15 rev (s)
10	15,46	1,03	2,13	58,23
15	25,55	1,70	2,42	35,22
20	31,73	2,12	2,71	28,36
25	39,03	2,60	3,03	23,06
30	47,95	3,20	3,35	18,77
35	56,68	3,78	3,77	15,88
40	64,52	4,30	4,12	13,95
45	74,81	4,99	4,41	12,03
50	82,95	5,53	4,72	10,85

Tabla 11. Datos M2-DD-V

Gráficas

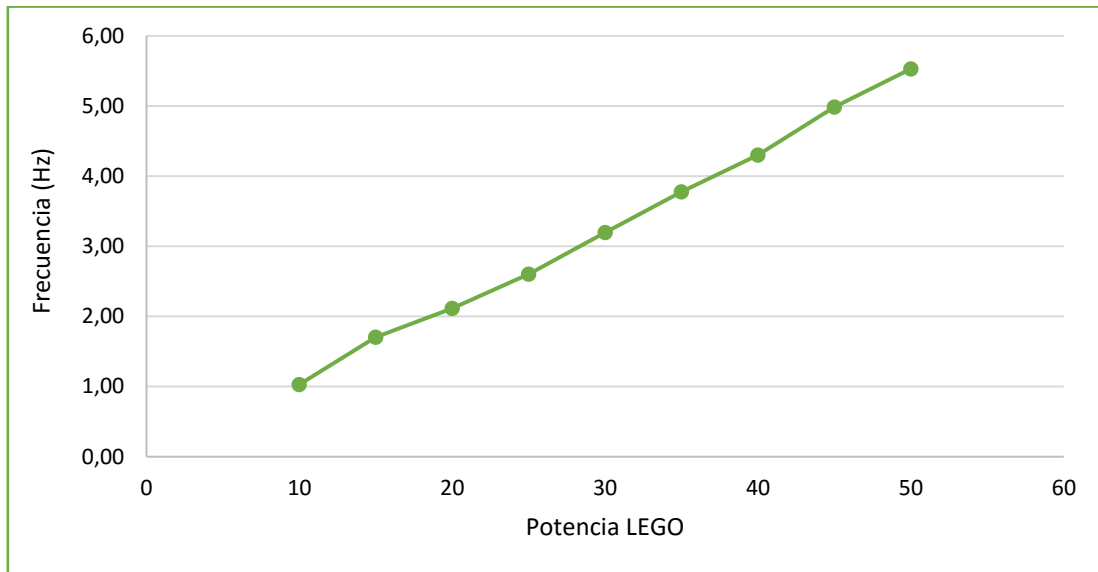


Gráfico 33. Frecuencia-Potencia M2-DD-V

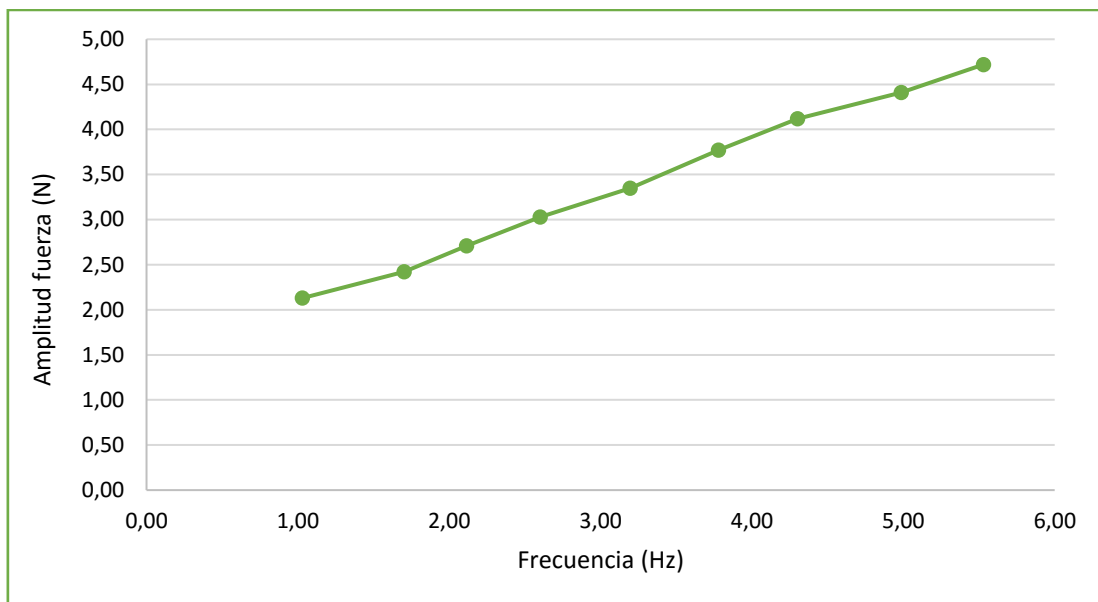


Gráfico 34. Amplitud Fuerza-Frecuencia M2-DD-V

Conclusiones:

Con un patrón claro y constante similar al anterior y manteniendo la frecuencia, de nuevo una amplitud de fuerza ejercida sobre el tablero mucho mayor por el paso adicional.

Ambas regresiones se pueden aproximar a una lineal y el contacto de la leva con la plataforma durante el desarrollo es pleno.

4.2.7 Velocidad

A continuación se procede a caracterizar la velocidad de avance del robot en función de la potencia suministrada al servomotor, totalmente independiente de los otros dos servomotores de giro.

Para ello se medirá con un cronómetro el tiempo necesario para recorrer cinco metros a través de la viga de ensayo. El peso adicional no afectará ya que, como se ha comprobado en capítulos previos, el servomotor cuenta con la capacidad suficiente para mantener el régimen de giro pese a una resistencia mayor.

Potencia LEGO	Velocidad robot (m/s)	Velocidad a escala real (m/s)
10	0,050	0,5
15	0,075	0,75
20	0,100	1
25	0,125	1,25
30	0,150	1,5
35	0,175	1,75
40	0,200	2
45	0,225	2,25
50	0,250	2,5
55	0,275	2,75
60	0,300	3
65	0,325	3,25
70	0,350	3,5
75	0,375	3,75
80	0,400	4
85	0,425	4,25
90	0,450	4,5
95	0,475	4,75
100	0,500	5

Tabla 12. Caracterización de la velocidad

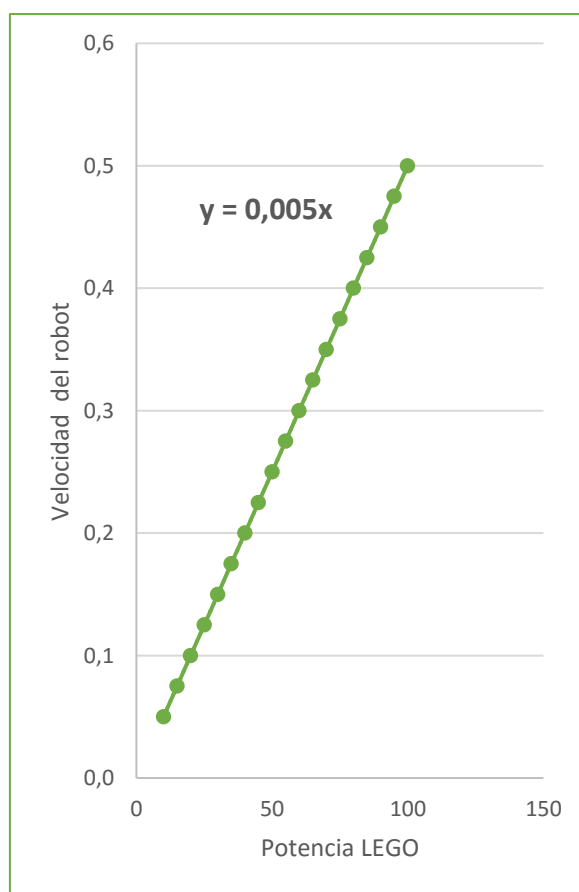


Gráfico 35. Velocidad del robot en función de la potencia

En el Gráfico 35 se puede apreciar se aprecia una regresión constante, para lo cual es necesario que la batería esté completamente cargada. Aplicando un factor escala 1:10 (Tabla 12) se comprueba que se abarca la velocidad real de un peatón (entre 3 y 4,5 m/s).

4.2.8 Conclusiones

Se da por finalizada la caracterización del robot tanto en fuerza como velocidad de tránsito, con todos los datos útiles para simular las acciones pertinentes en la viga. Dependiendo de la frecuencia buscada o la fuerza requerida de un peatón al caminar, se podrá configurar de forma rápida el autómatas con una potencia en el servomotor de avance y otra en el de giro.

En cuanto a los patrones de fuerza vistos, no se aproximan al modelo simplificado de un armónico estudiado (*apartado 2.2*), debido al perfil de las levas utilizadas, pero sí se podrá simular las frecuencias y fuerzas máximas a escala 1:10.

Para simular una frecuencia y fuerzas que se puedan abarcar con los dos tipos de levas y/o posiciones, será preferente el uso de las levas verdes (cuadrangulares), ya que producen un patrón constante sin desviaciones laterales y con un contacto pleno con el tablero (*Ilustración 41*).

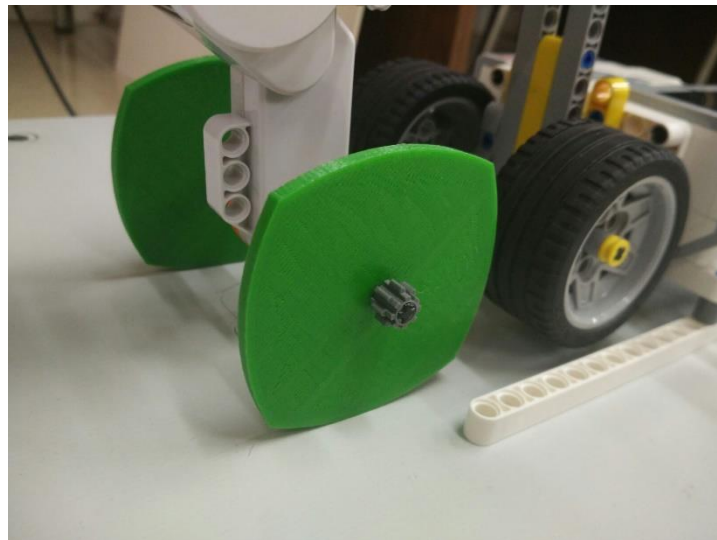


Ilustración 41. Levas verdes cuadrangulares.

Por último, se muestran las ecuaciones de las regresiones lineales de cada configuración obtenidas de los datos experimentales para calcular de forma directa los valores de frecuencia, potencia o amplitud de fuerza que se necesiten sin necesidad de interpolar en el gráfico.

Regresiones lineales

❖ M1-DD-A

- Frecuencia (Hz) -> $y = 0,0844x + 0,033$ (33)
- Amplitud Fuerza (N) -> $y = 0,2192x + 0,1125$ (34)

❖ M2-DD-A

- Frecuencia (Hz) -> $y = 0,0861x - 0,0302$ (35)
- Amplitud Fuerza (N) -> $y = 0,7754x + 1,3528$ (36)

❖ M1-DI-A

- Frecuencia (Hz) -> $y = 0,1683x + 0,07$ (37)
- Amplitud Fuerza (N) -> $y = 0,0886x + 0,0656$ (38)

❖ M2-DI-A

- Frecuencia (Hz) -> $y = 0,1682x - 0,164$ (39)
- Amplitud Fuerza (N) -> $y = 0,349x + 1,5487$ (40)

❖ M1-DD-V

- Frecuencia (Hz) -> $y = 0,1127x - 0,0371$ (41)
- Amplitud Fuerza (N) -> $y = 0,1463x + 0,0575$ (42)

❖ M2-DD-V

- Frecuencia (Hz) -> $y = 0,1113x - 0,0903$ (43)
- Amplitud Fuerza (N) -> $y = 0,5946x + 1,4746$ (44)

❖ Velocidad

- Velocidad del robot (m/s) -> $y = 0,005x$ (45)

5. ENSAYOS A ESCALA

5.1 Estructura

Antes de realizar los ensayos en la viga que simula la pasarela peatonal, se debe conocer y caracterizar la estructura. Para ello se tomarán medidas directas para conocer las dimensiones y características del material (*apartado 1.3.7*), y se realizará el análisis teórico de una viga biapoyada.

5.1.1 Dimensionalización

Con un calibre electrónico de fibra (*Ilustración 43*) con una resolución de 0,1 mm se toman medidas de las dimensiones de la viga (*Ilustración 42*). Se alejarán de las dadas por el fabricante debido al lacado posterior.

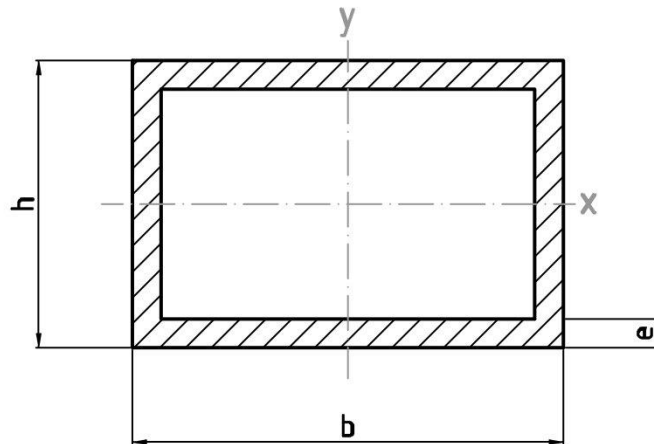


Ilustración 42. Dimensiones del perfil de la viga

- $h = 40,5 \text{ mm}$
- $b = 100,3 \text{ mm}$
- $e = 1,55 \text{ mm}$
- $L = 6 \text{ m}$

- $I_x = \frac{bh^3}{12} - \frac{(b-2e)(h-2e)^3}{12} = 13,150 \text{ cm}^4$
- $I_y = \frac{hb^3}{12} - \frac{(h-2e)(b-2e)^3}{12} = 54,334 \text{ cm}^4$

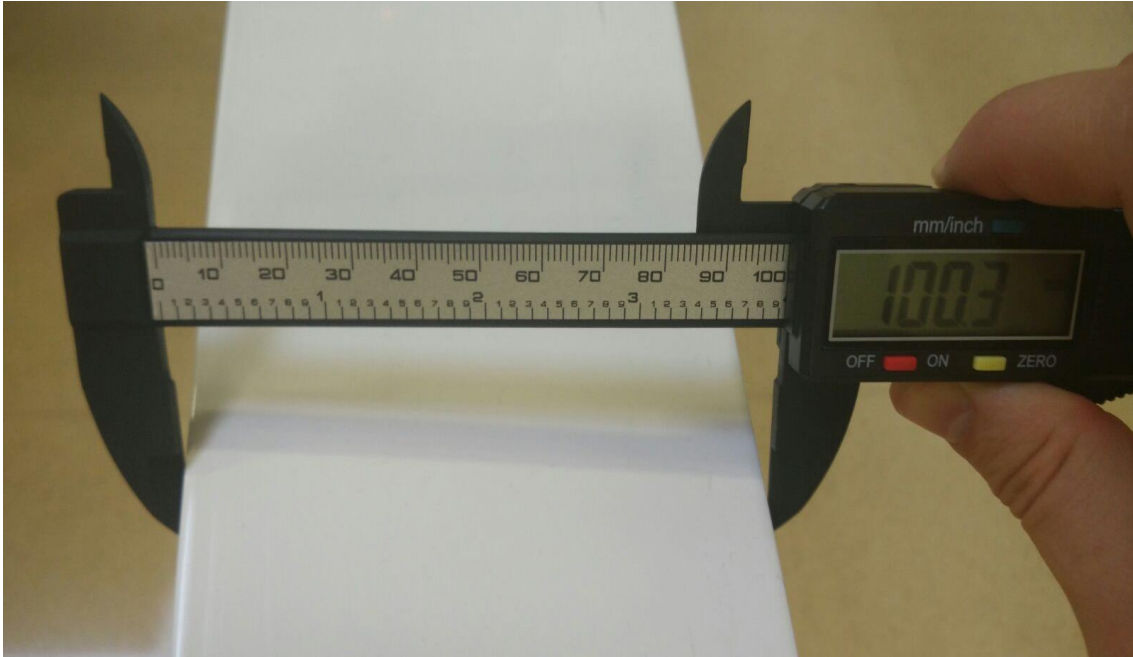


Ilustración 43. Calibre electrónico de fibra.

Para calcular la masa de la estructura se emplean dos dinamómetros con una resolución de hasta 5 g (Ilustración 44), uno en cada lado, de forma que sostengan la viga en el aire para tomar la medida.

La masa resultante será la suma de ambas:

- Dinamómetro 1: 3,23 kg
- Dinamómetro 2: 3,27 kg
- Masa total: **6,50 kg**



Ilustración 44. Dinamómetro.

5.1.2 Análisis teórico

Se realizará un breve análisis teórico para saber la reacción de la viga tanto por su peso propio como por una carga estática o móvil. El objetivo es conocer cómo se comportará la estructura en los posteriores ensayos experimentales a efectos de fuerzas y vibraciones, para ampliar información se pueden consultar las referencias de la *Bibliografía*.

Se estudiarán las reacciones de una viga isostática biapoyada sometida a esfuerzos y sus posibles desplazamientos o deformaciones, centrándose en la componente vertical que será la más solicitada en los ensayos.

En el centro de la viga existirá una flecha máxima debida al peso propio:

$$\delta = \frac{5qL^3}{384EI_x} \quad (46)$$

Además, si existiese una masa puntual centrada en la viga el desplazamiento máximo aumentaría:

$$\delta = \frac{mL^3}{48EI_x} \quad (47)$$

Donde A es el área de la viga, L la longitud, g la aceleración de la gravedad, m la masa puntual, E el módulo de elasticidad de Young (70.000 MPa), e I_x el momento de inercia en el eje X (visto con anterioridad).

La carga uniforme q será producida por el peso de la propia viga:

$$q = \rho Ag \quad (48)$$

La flecha debida al peso propio será por tanto $21,0 \text{ mm}$, difícil de comprobar experimentalmente.

Además se pueden calcular las reacciones y deformaciones debidas a una carga puntual en cualquier punto de la viga (Ilustración 45) y a una carga uniformemente distribuida (Ilustración 46), los casos que se ensayarán posteriormente [12].

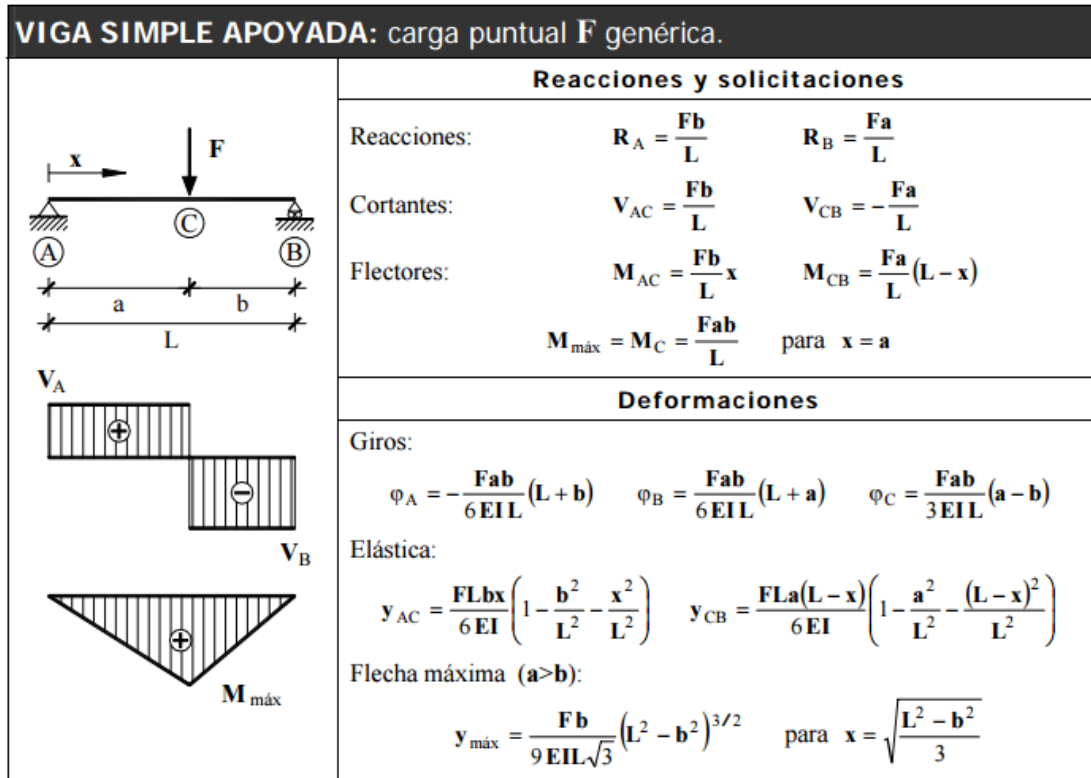


Ilustración 45. Reacciones y deformaciones debidas a una carga puntual F genérica. [12]

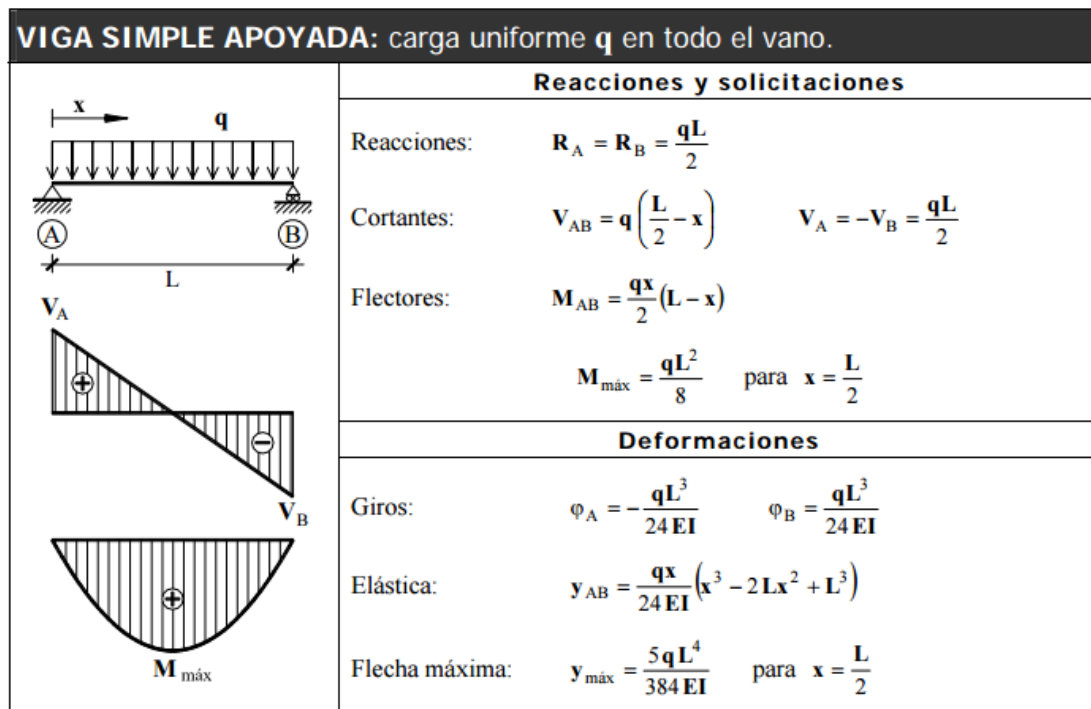


Ilustración 46. Reacciones y deformaciones debidas a una carga uniforme en todo el vano. [12]

Con las fórmulas vistas se calculan las reacciones teóricas en los apoyos cuando el robot está a 1 m de cada extremo y en el centro de la viga.

I. Robot a 1 m de apoyo 1:

- $R_1 = 5,32\text{ N}$
- $R_2 = 1,06\text{ N}$

II. Robot a 1 m de apoyo 2:

- $R_1 = 1,06\text{ N}$
- $R_2 = 5,32\text{ N}$

III. Robot en el centro de la viga:

- $R_1 = 3,19\text{ N}$
- $R_2 = 3,19\text{ N}$

Análisis modal

A continuación, se realizará un análisis modal teórico de la viga para conocer las frecuencias propias y modos de vibración de la misma. Estos valores son inherentes a la estructura y sus propiedades físicas, e independientes de las cargas solicitadas en cada instante, pero pueden variar en función del peso adicional.

Es importante conocer la frecuencia propia de la pasarela para realizar posteriormente los ensayos críticos, ahora que ya se conocen las frecuencias de vibración aceptables para el confort del peatón (*apartado 2.3*). Los modos de vibración del sistema serán los posibles movimientos armónicos que pueden darse bajo una excitación nula.

Dado que es un sistema continuo, teóricamente presentaría infinitos modos de vibración, pero en la práctica sólo podrán detectarse los primeros. El sistema mecánico oscila armónicamente en torno a la posición de equilibrio siendo la posición adoptada la resultante de multiplicar el modo natural por un escalar.

Las frecuencias naturales de la viga se obtienen a partir de la ecuación:

$$\omega_i \text{ (Hz)} = \frac{(i\pi)^2}{2\pi L^2} \sqrt{\frac{EI_z}{\rho}} \quad (49)$$

Donde i representa cada modo y ρ es la densidad del aluminio (2700 kg/m^3).

Con esta fórmula se pueden calcular los primeros modos de la viga en cuestión:

- $\omega_1 = 3,8 \text{ Hz}$
- $\omega_2 = 15,4 \text{ Hz}$

Estas son las frecuencias con el peso único de la viga. Dado que en los ensayos existirá un incremento de peso añadido debido al robot, no despreciable, además del peso de los cinco acelerómetros dispuestos a lo largo de la viga. El robot con un par de levas tendrá un peso de $651,5 \text{ g}$ (el peso suplementario serían $221,7 \text{ g}$ adicionales).

En este caso, se debe emplear la ecuación:

$$\omega \text{ (Hz)} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3EI_z}{L^3(M_i + 0,4857m_b)}} \quad (50)$$

Donde M_i es la masa concentrada en el centro de la viga y m_b la masa de la viga.

Se diferencian tres casos específicos:

- $\omega_1' = 3,68 \text{ Hz}$ - Viga con 5 acelerómetros
- $\omega_2' = 3,38 \text{ Hz}$ - Viga con 5 acelerómetros y robot en el centro
- $\omega_3' = 3,32 \text{ Hz}$ - Viga con 5 acelerómetros y robot en el centro con masa adicional

5.1.3 Análisis experimental

Una vez conocidas las reacciones y modos de vibración teóricos de la estructura, se realizan medidas en la estructura real para comparar los resultados (*Ilustración 47*).

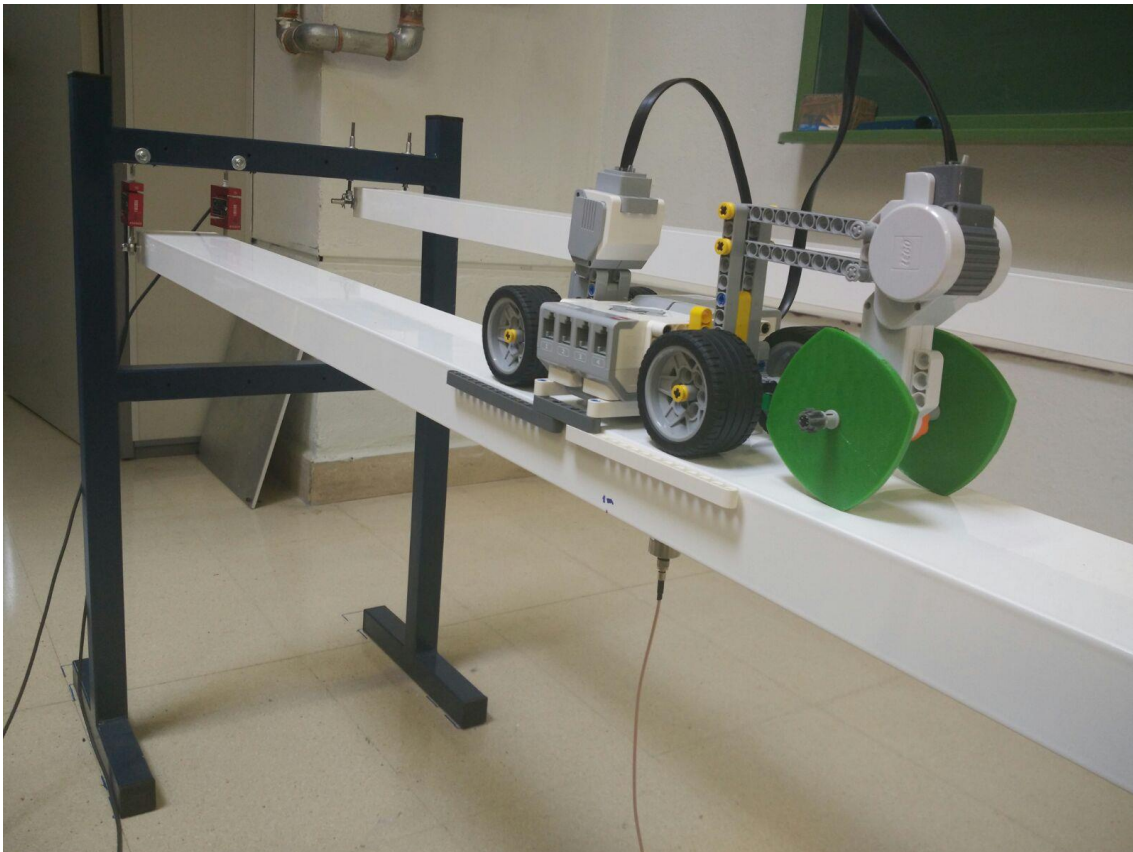


Ilustración 47. Robot dispuesto a 1 m del apoyo izquierdo (I) para el cálculo de las reacciones.

Reacciones en los apoyos

I. Robot a 1 m de apoyo 1:

- $R_1 \text{ real} = 5,34 \text{ N}$ --- $R_1 \text{ teórico} = 5,32 \text{ N}$
- $R_2 \text{ real} = 1,04 \text{ N}$ --- $R_2 \text{ teórico} = 1,06 \text{ N}$

II. Robot a 1 m de apoyo 2:

- $R_1 \text{ real} = 1,07 \text{ N}$ --- $R_1 \text{ teórico} = 1,06 \text{ N}$
- $R_2 \text{ real} = 5,30 \text{ N}$ --- $R_2 \text{ teórico} = 5,32 \text{ N}$

III. Robot en el centro de la viga:

- $R_1 \text{ real} = 3,22 \text{ N}$ --- $R_1 \text{ teórico} = 3,19 \text{ N}$
- $R_2 \text{ real} = 3,18 \text{ N}$ --- $R_2 \text{ teórico} = 3,19 \text{ N}$

Frecuencia de vibración natural

1. Frecuencia con viga y acelerómetros:

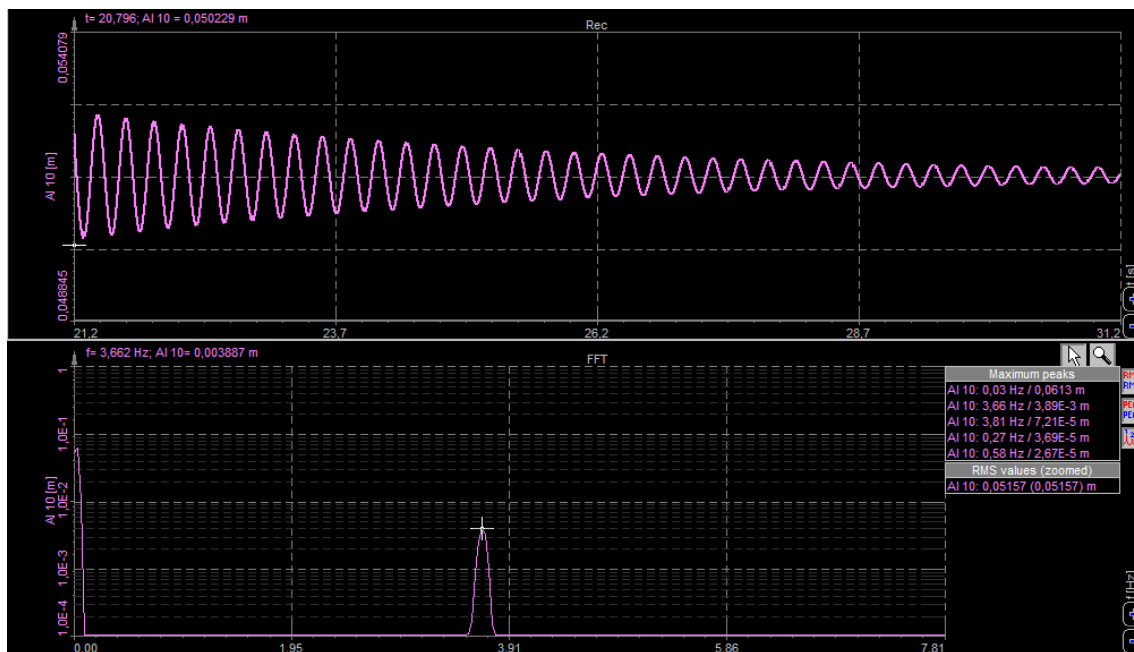


Gráfico 36. Frecuencia natural de la viga con acelerómetros.

- $\omega'_1 \text{ real} = 3,662 \text{ Hz}$
- $\omega'_1 \text{ teórico} = 3,68 \text{ Hz}$

2. Frecuencia con viga y acelerómetros + robot centrado:

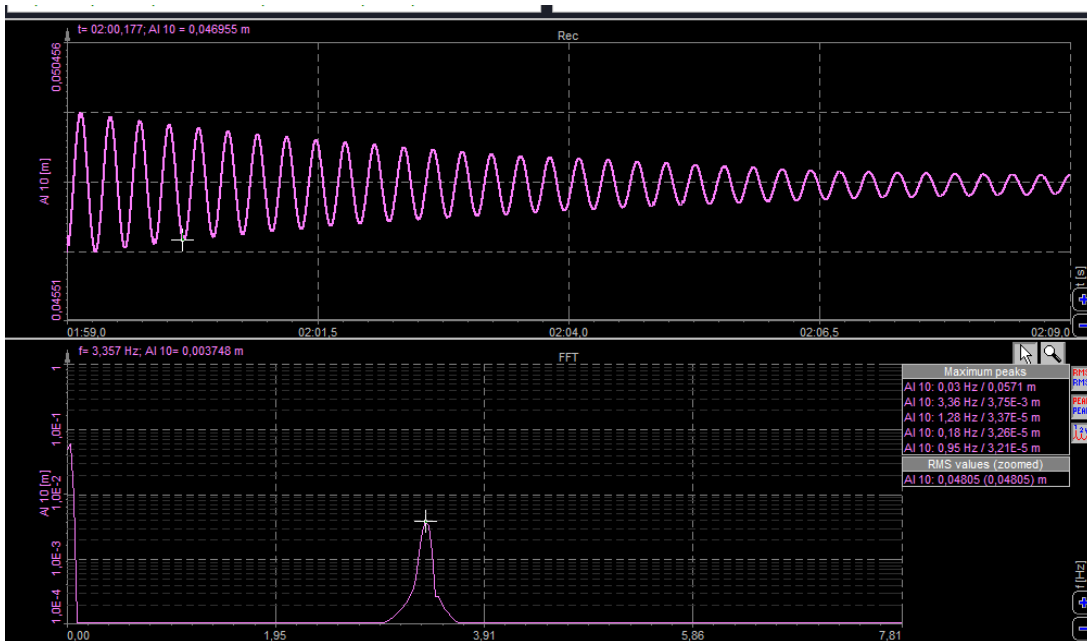


Gráfico 37. Frecuencia natural de la viga con acelerómetros y robot centrado.

- $\omega'_2 \text{ real} = 3,357 \text{ Hz}$
- $\omega'_2 \text{ teórico} = 3,38 \text{ Hz}$

3. Frecuencia con viga y acelerómetros + robot centrado con masa adicional:

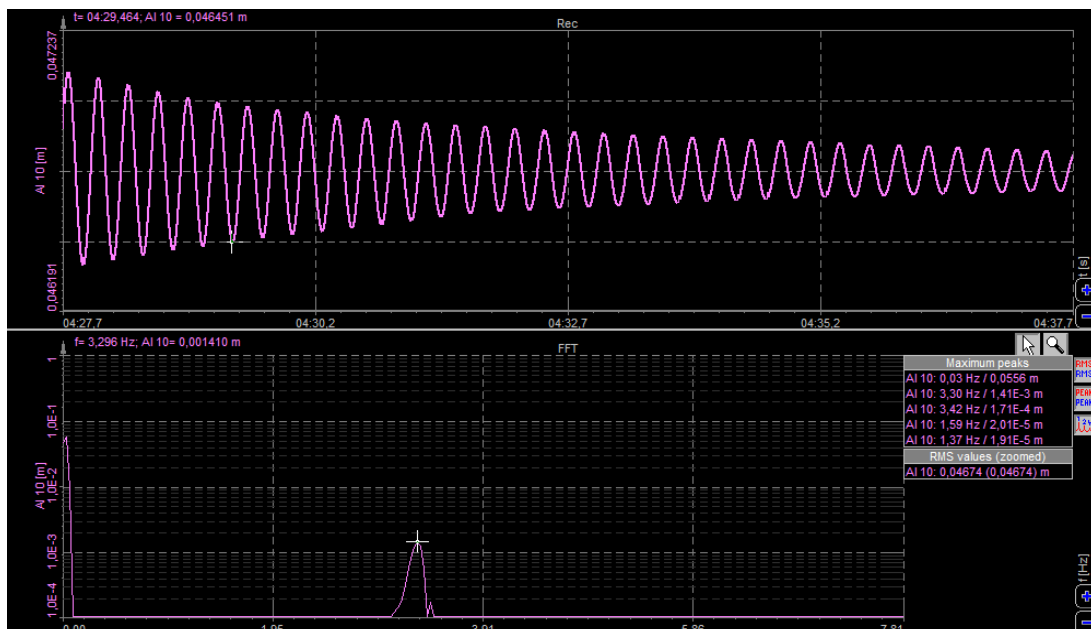


Gráfico 38. Frecuencia natural de la viga con acelerómetros y robot centrado con masa adicional.

- $\omega'_3 \text{ real} = 3,296 \text{ Hz}$
- $\omega'_3 \text{ teórico} = 3,32 \text{ Hz}$

5.2 Ensayos experimentales

Una vez conocida la frecuencia natural del sistema en cada caso se pueden realizar los ensayos experimentales se simulación sobre la pasarela (*Ilustración 48*). Para ello se utilizarán cuatro células de carga (dos en cada extremo de la viga) y un láser de posición (como los configurados y utilizados en el *capítulo 4*).

Existe un número muy amplio de posibilidades de simulación a partir del diseño realizado en función del tipo de leva; sincronizadas o desfasadas; peso total; potencia de cada servomotor; uno o los dos pares de levas de forma simultánea; velocidad de avance...

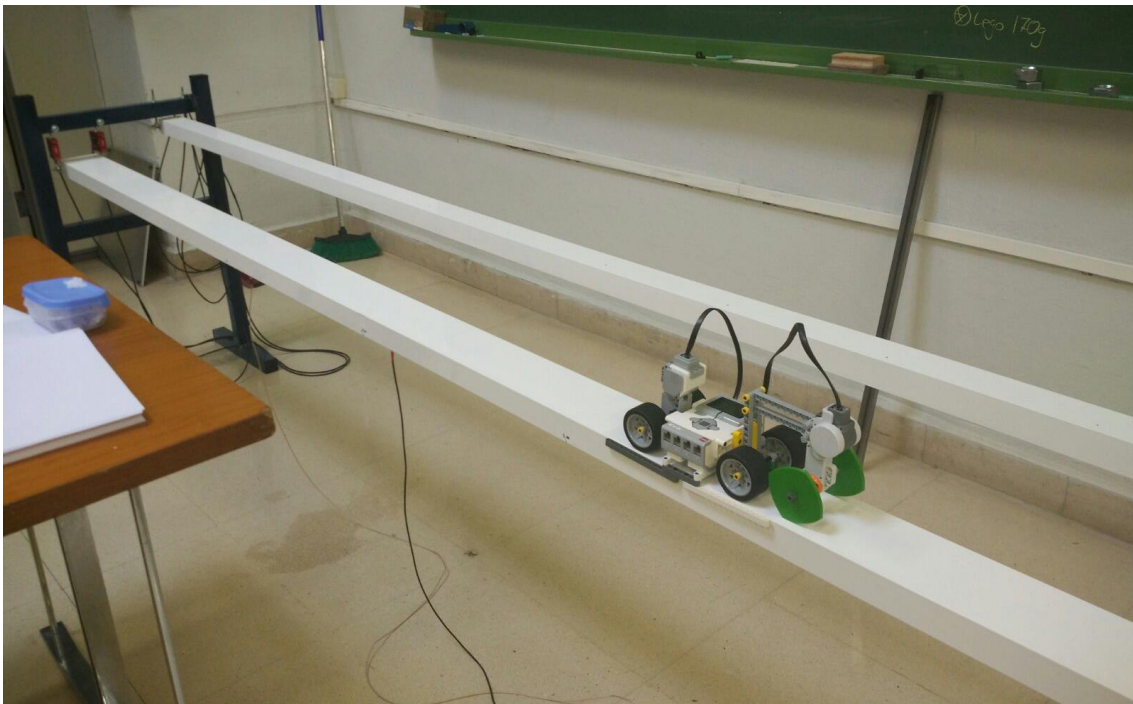


Ilustración 48. Robot en tránsito durante ensayos en la viga.

Para completar con éxito los objetivos de este proyecto se procederá a simular para cada caso diferenciado en la caracterización del autómatas en el *apartado 4.2* y a una velocidad media de $0,2 \text{ m/s}$ dos ensayos (2 m/s un peatón):

- **Ensayo normal:** Simular con una potencia de servomotor de giro de las levas tal que la frecuencia generada en el tránsito sea leve ($1\text{-}2 \text{ Hz}$).
- **Ensayo crítico:** Simular con una potencia de servomotor tal que genere una frecuencia cercana a la frecuencia natural del sistema.

Para realizar las mediciones se conectan las cuatro células de carga a *SIRIUS* (*Ilustración 49*), a la vez que el láser de posición (*apartado 1.3*), teniendo cinco entradas y gráficos simultáneos (*Gráfico 39*) al tránsito del peatón a través de la viga.

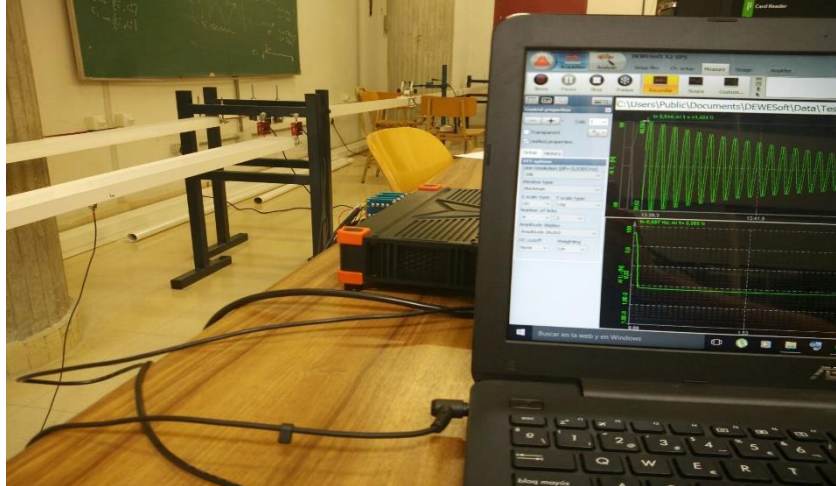


Ilustración 49. Instrumentación de medida para ensayos.

Se tomaran como referencia los valores máximos y mínimos de reacciones en los apoyos; el desplazamiento máximo debido a las vibraciones, que se dará en el centro de la viga; y la frecuencia inducida estimada a través de la FFT del desplazamiento vertical del punto medio (medido con el láser).

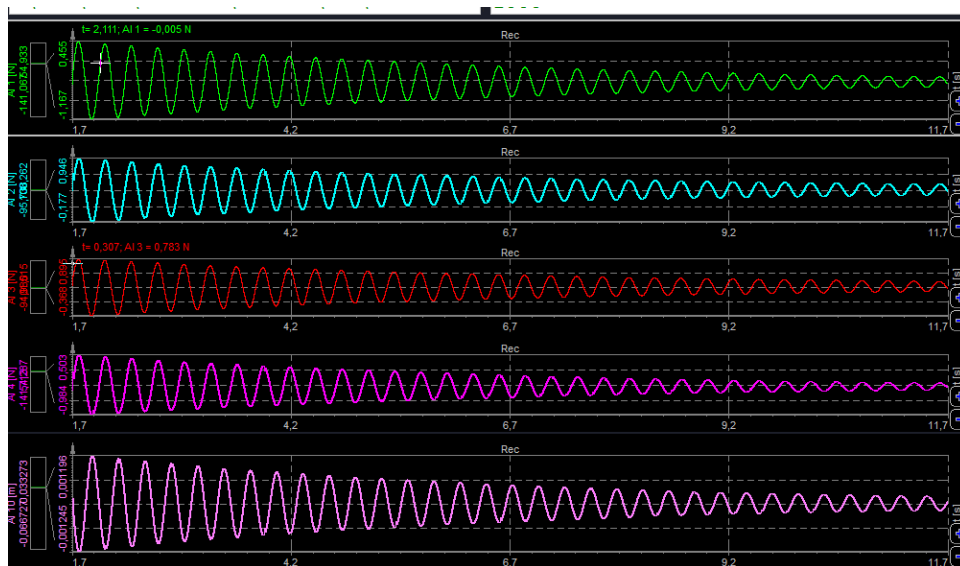


Gráfico 39. Cinco señales simultáneas de las células de carga y el láser.

La diferencia de fuerzas entre cada par de células de cada extremo puede dar una idea de la torsión existente, pero dado que el objetivo de este proyecto es la simulación de fuerzas verticales, no será tenido en cuenta.

Como sólo se realiza un análisis bidimensional no será necesario conocer las reacciones en cada una de las cuatro células, si no la suma de cada par en los extremos, y sin considerar la fuerza por el peso propio del autómatas. Esto se puede hacer con el software *DEWESoft* desde la configuración de los canales (*Ilustración 50*).

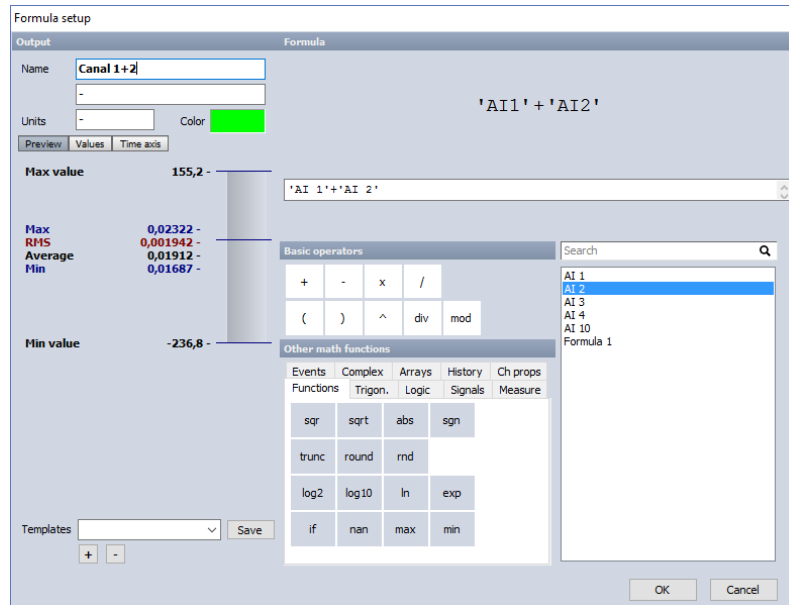


Ilustración 50. Suma de canales en la configuración de DEWESoft.

Para programar el robot (*Ilustración 51*) se utilizará el software de programación por bloques ya visto (*apartado 1.3.1*). El servomotor de avance siempre a una potencia de 40 y variando la del servomotor de las levas en función de estado normal o crítico con las potencias vistas en la caracterización para cada modelo (*apartado 4.2*).

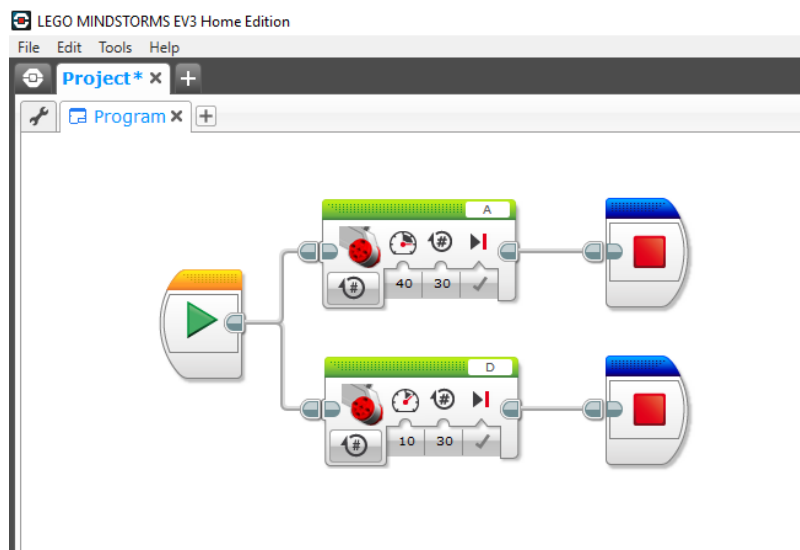


Ilustración 51. Programación del robot para ensayos.

5.2.1 Ensayos M1-DD-A

ENSAYO NORMAL

Reacciones en los apoyos

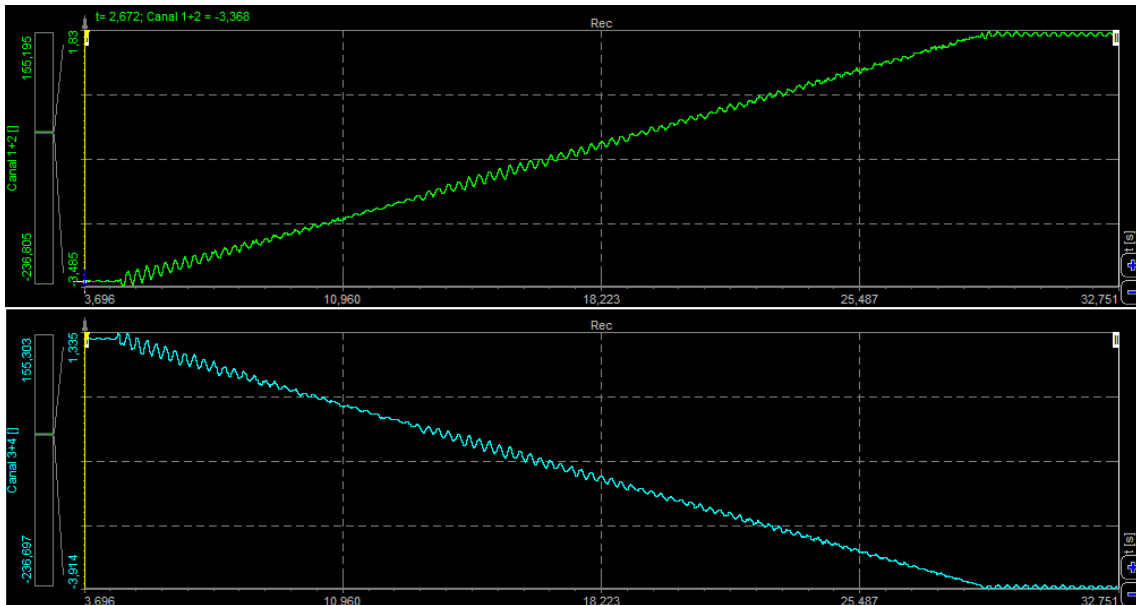


Gráfico 40. Reacciones en los apoyos ensayo normal M1-DD-A.

Variación de fuerza máxima: 0,24 N

Desplazamiento en el centro de la viga

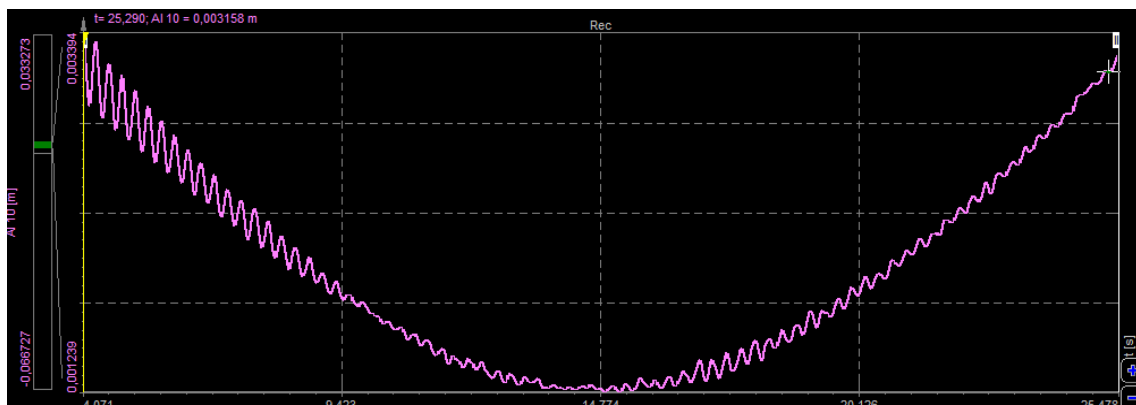


Gráfico 41. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo normal M1-DD-A.

Variación de desplazamiento máximo: 6,22 mm

ENSAYO CRÍTICO

Reacciones en los apoyos

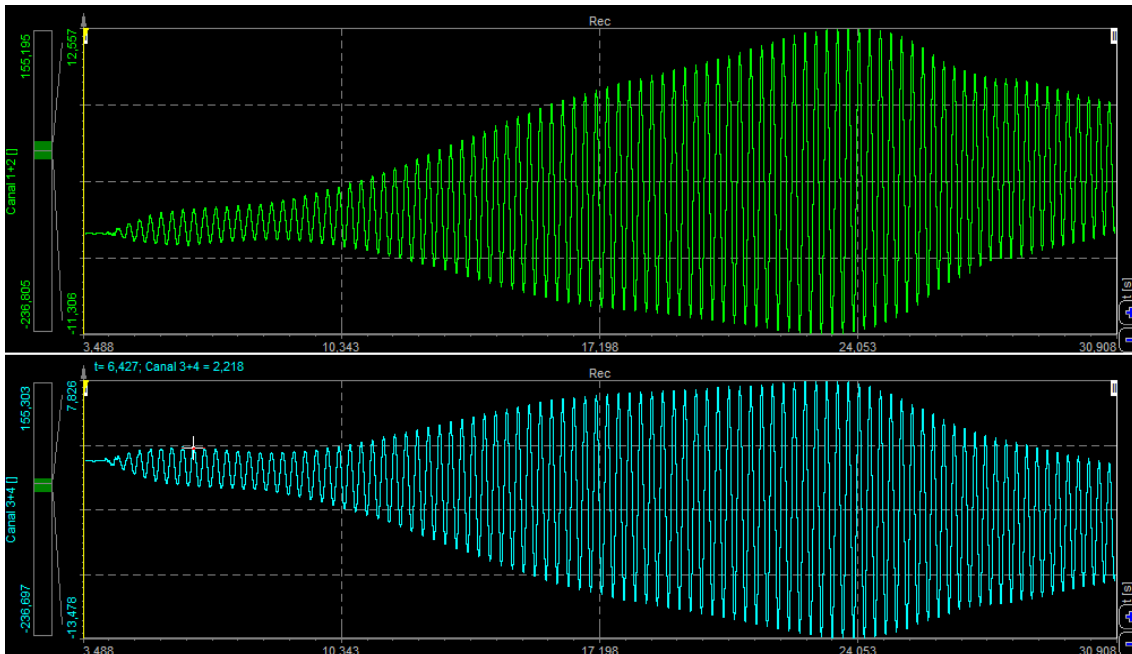


Gráfico 42. Reacciones en los apoyos ensayo crítico M1-DD-A.

Variación de fuerza máxima: 23,86 N

Desplazamiento en el centro de la viga

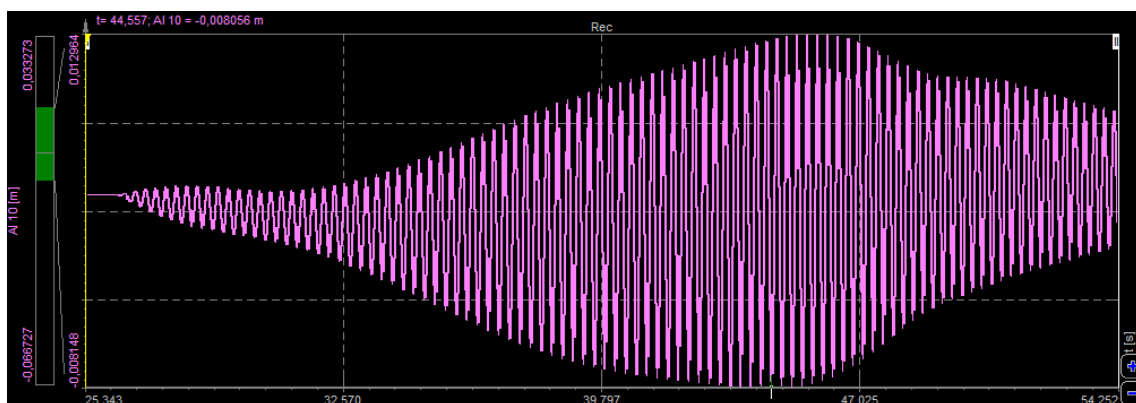


Gráfico 43. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo crítico M1-DD-A.

Variación de desplazamiento máximo: 21,08 mm

5.2.2 Ensayos M2-DD-A

ENSAYO NORMAL

Reacciones en los apoyos

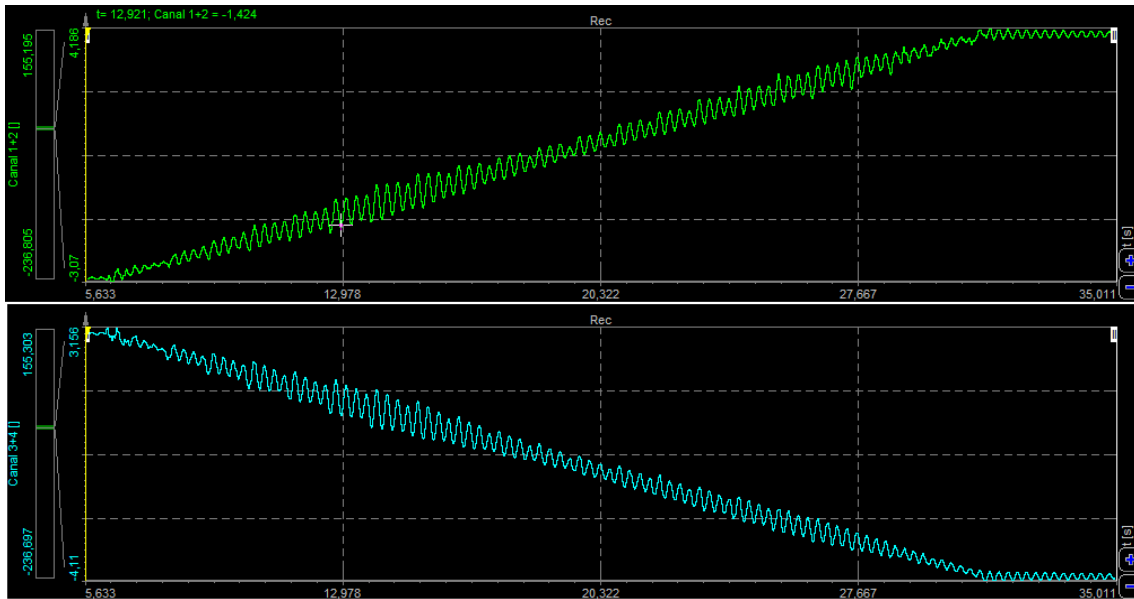


Gráfico 44. Reacciones en los apoyos ensayo normal M2-DD-A.

Variación de fuerza máxima: 1,03 N

Desplazamiento en el centro de la viga

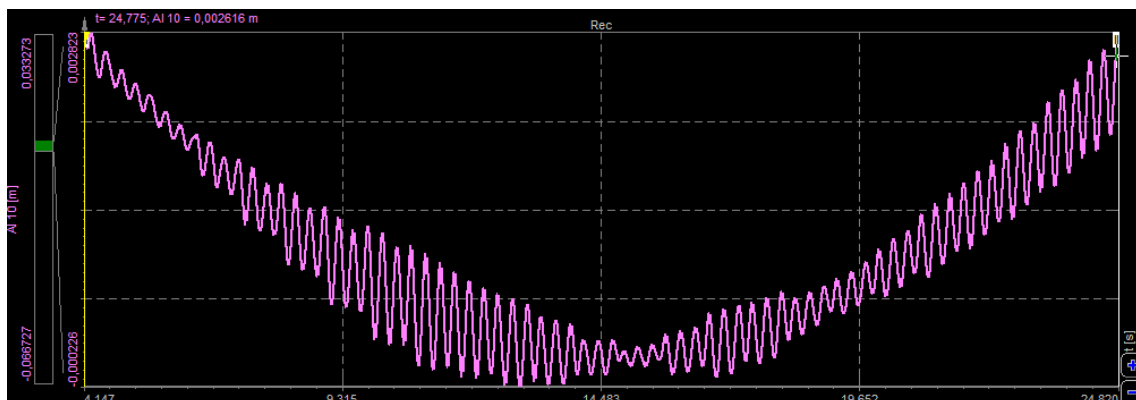


Gráfico 45. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo normal M2-DD-A.

Variación de desplazamiento máximo: 8,23 mm

ENSAYO CRÍTICO

Reacciones en los apoyos

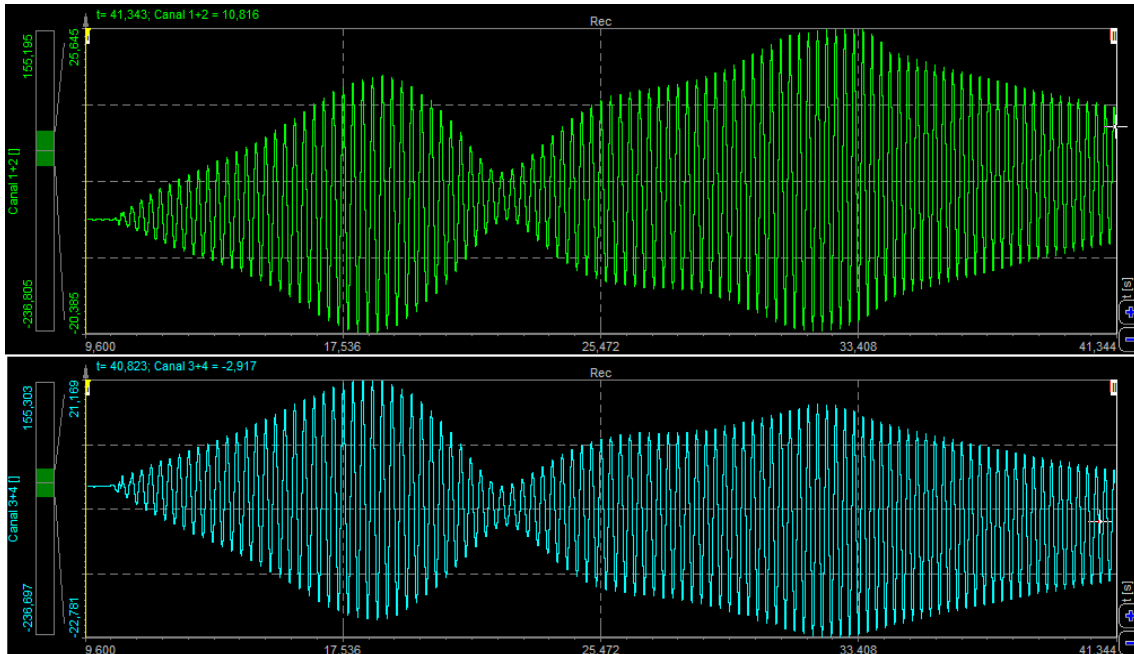


Gráfico 46. Reacciones en los apoyos ensayo crítico M2-DD-A.

Variación de fuerza máxima: 46,03 N

Desplazamiento en el centro de la viga

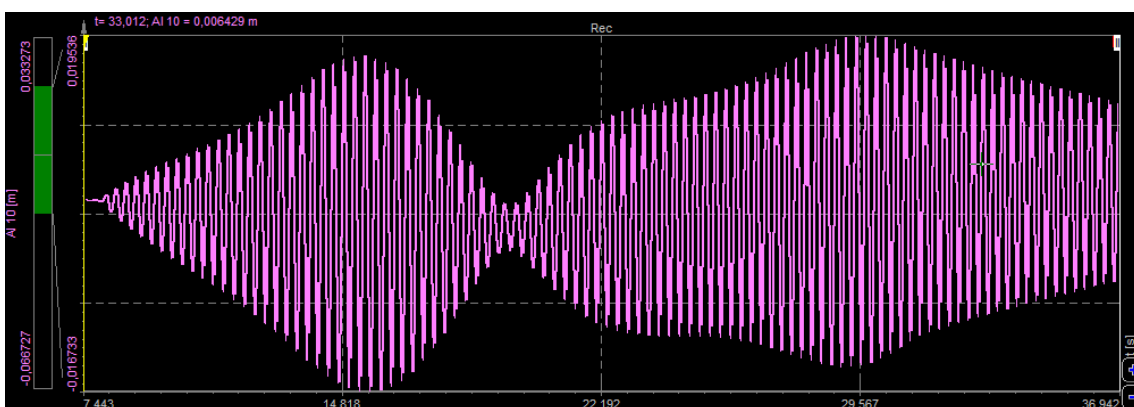


Gráfico 47. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo crítico M2-DD-A.

Variación de desplazamiento máximo: 34,1 mm

5.2.3 Ensayos M1-DI-A

ENSAYO NORMAL

Reacciones en los apoyos

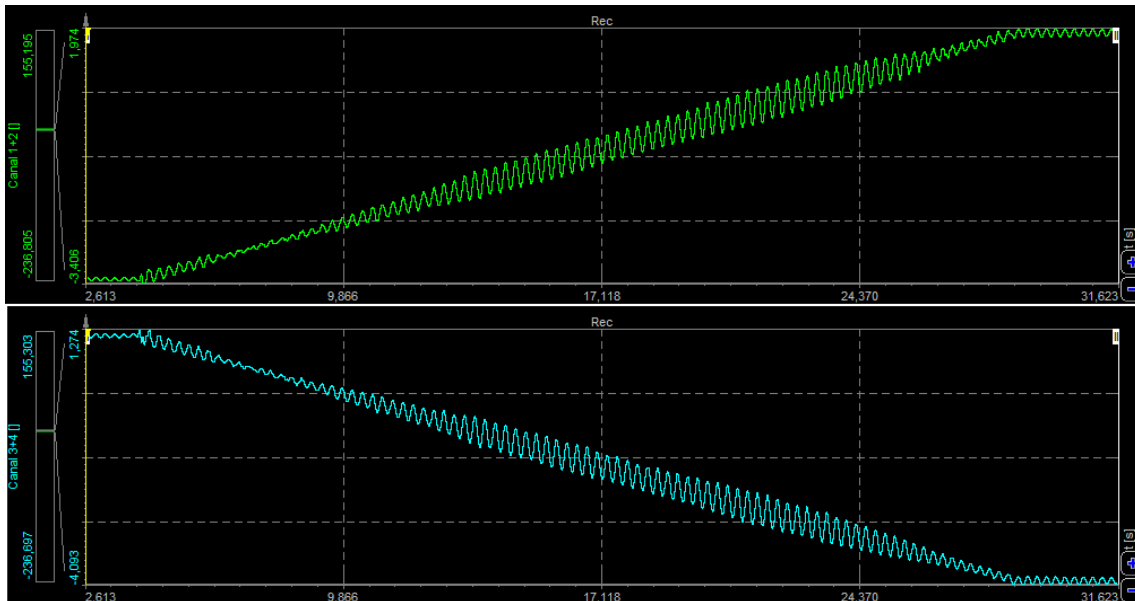


Gráfico 48. Reacciones en los apoyos ensayo normal M1-DI-A.

Variación de fuerza máxima: 0,66 N

Desplazamiento en el centro de la viga

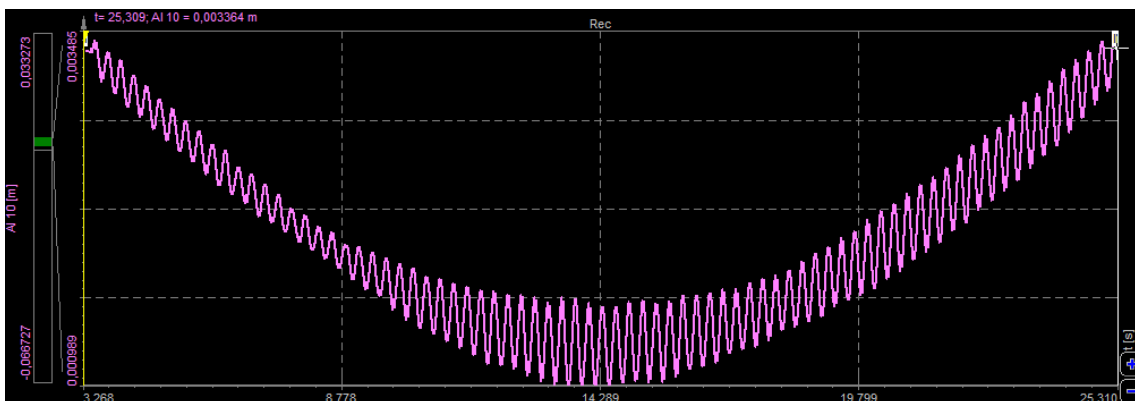


Gráfico 49. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo normal M1-DI-A.

Variación de desplazamiento máximo: 0,6 mm

ENSAYO CRÍTICO

Reacciones en los apoyos

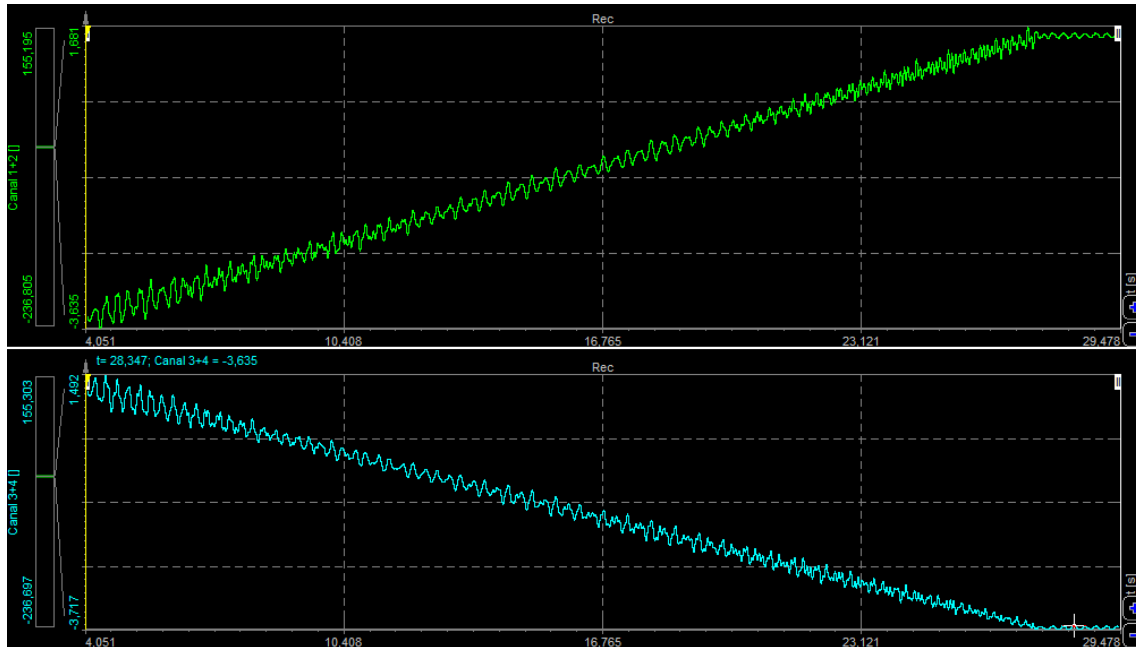


Gráfico 50. Reacciones en los apoyos ensayo crítico M1-DI-A.

Variación de fuerza máxima: 0,716 N

Desplazamiento en el centro de la viga

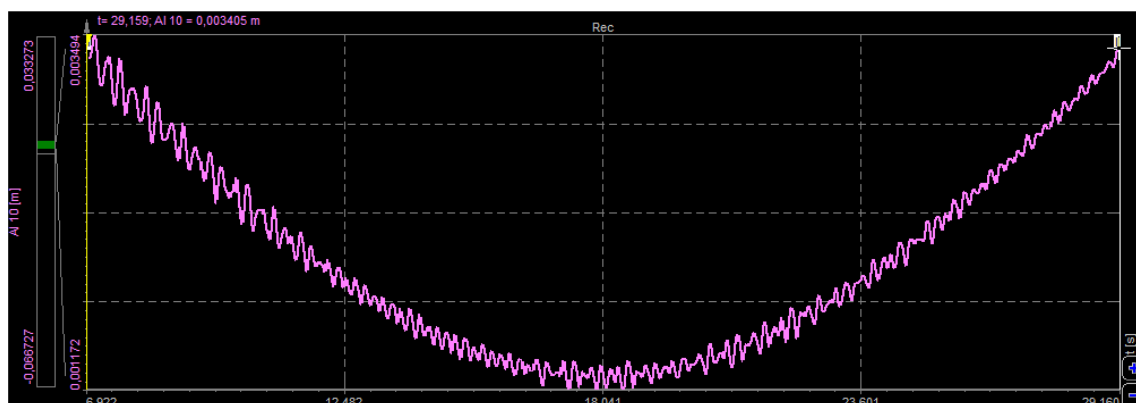


Gráfico 51. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo crítico M1-DI-A.

Variación de desplazamiento máximo: 0,75 mm

5.2.4 Ensayos M2-DI-A

ENSAYO NORMAL

Reacciones en los apoyos

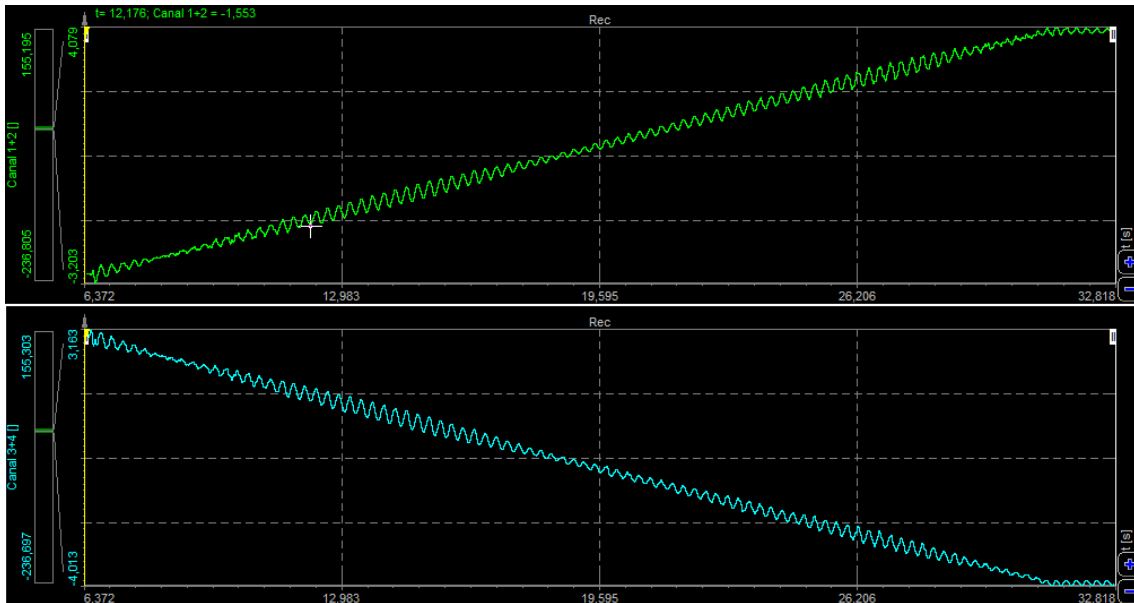


Gráfico 52. Reacciones en los apoyos ensayo normal M2-DI-A.

Variación de fuerza máxima: 0,818 N

Desplazamiento en el centro de la viga

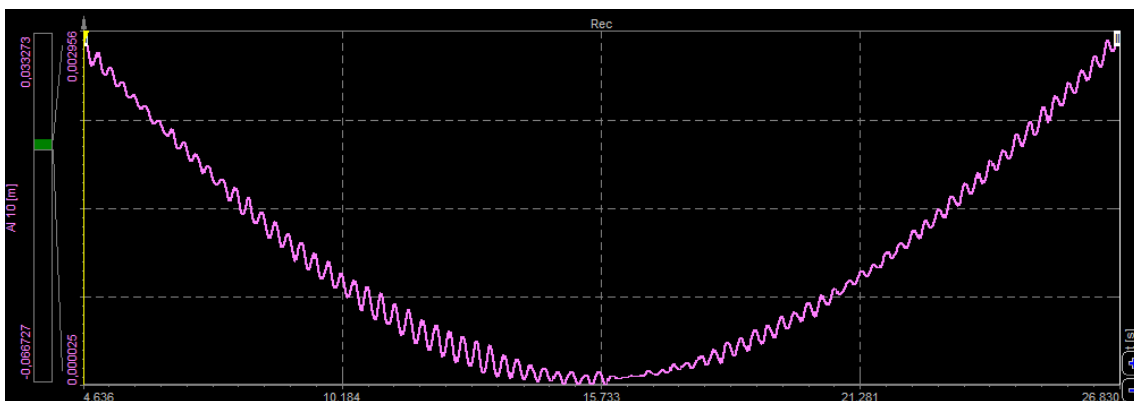


Gráfico 53. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo normal M2-DI-A.

Variación de desplazamiento máximo: 0,82 mm

ENSAYO CRÍTICO

Reacciones en los apoyos

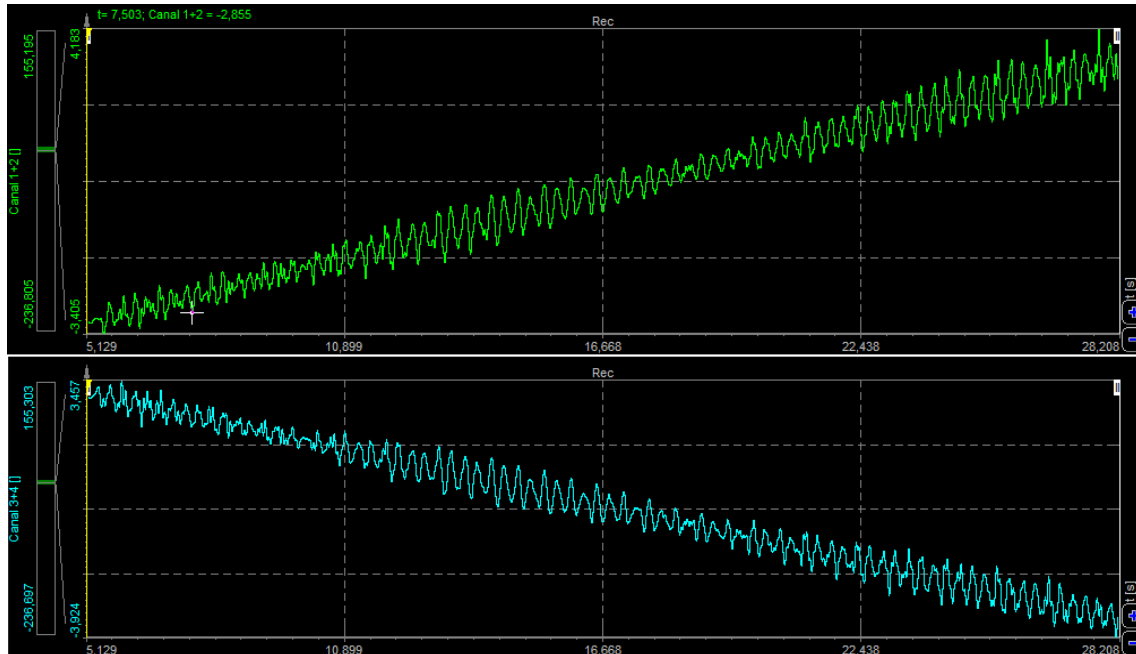


Gráfico 54. Reacciones en los apoyos ensayo crítico M2-DI-A.

Variación de fuerza máxima: 1,63 N

Desplazamiento en el centro de la viga

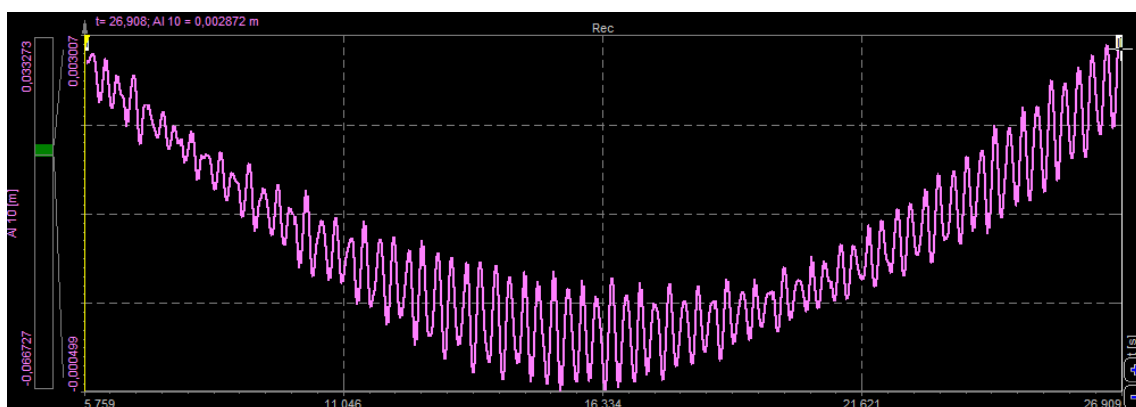


Gráfico 55. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo crítico M2-DI-A.

Variación de desplazamiento máximo: 0,94 mm

5.2.5 Ensayos M1-DD-V

ENSAYO NORMAL

Reacciones en los apoyos

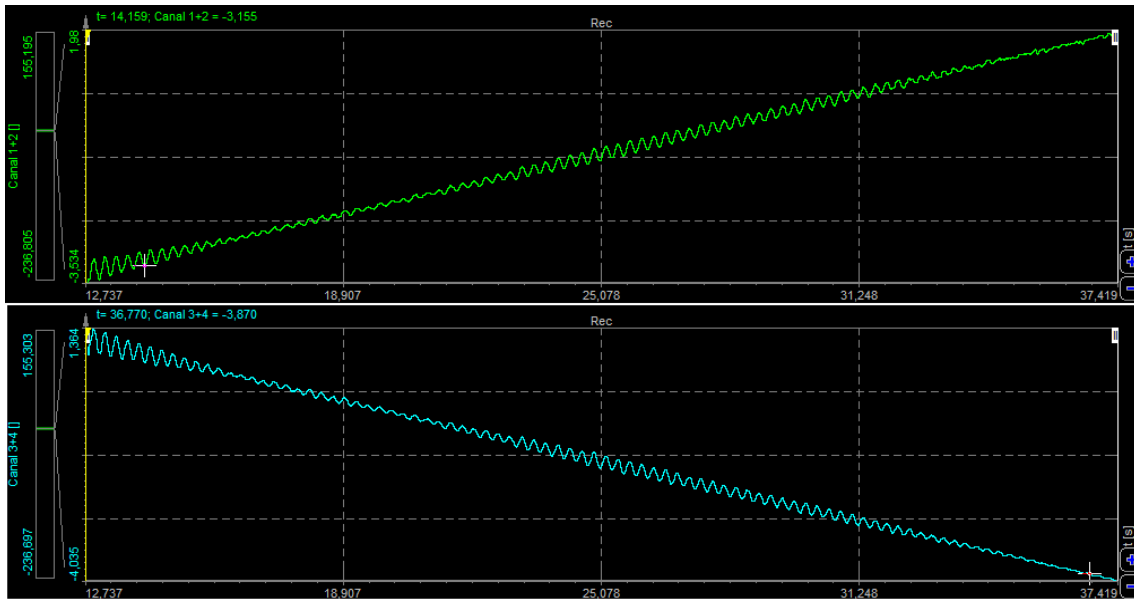


Gráfico 56. Reacciones en los apoyos ensayo normal M1-DD-V.

Variación de fuerza máxima: 0,48 N

Desplazamiento en el centro de la viga

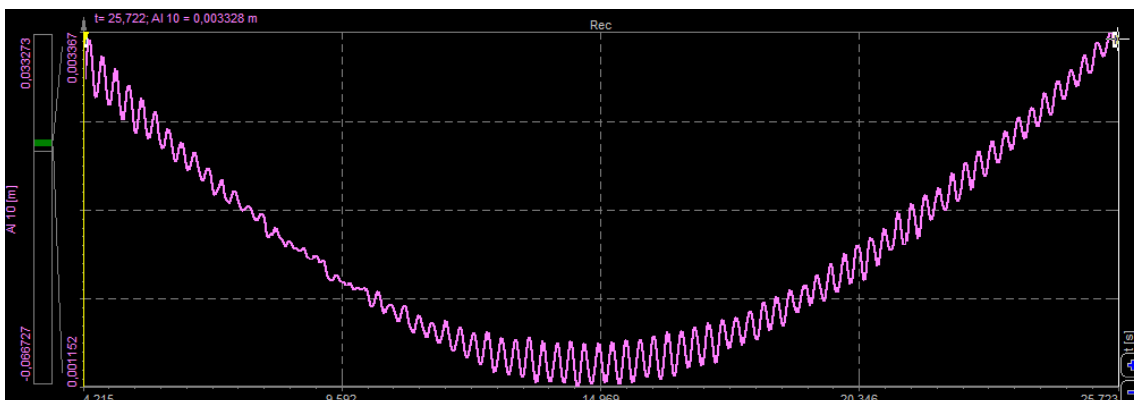


Gráfico 57. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo normal M1-DD-V.

Variación de desplazamiento máximo: 0,3 mm

ENSAYO CRÍTICO

Reacciones en los apoyos

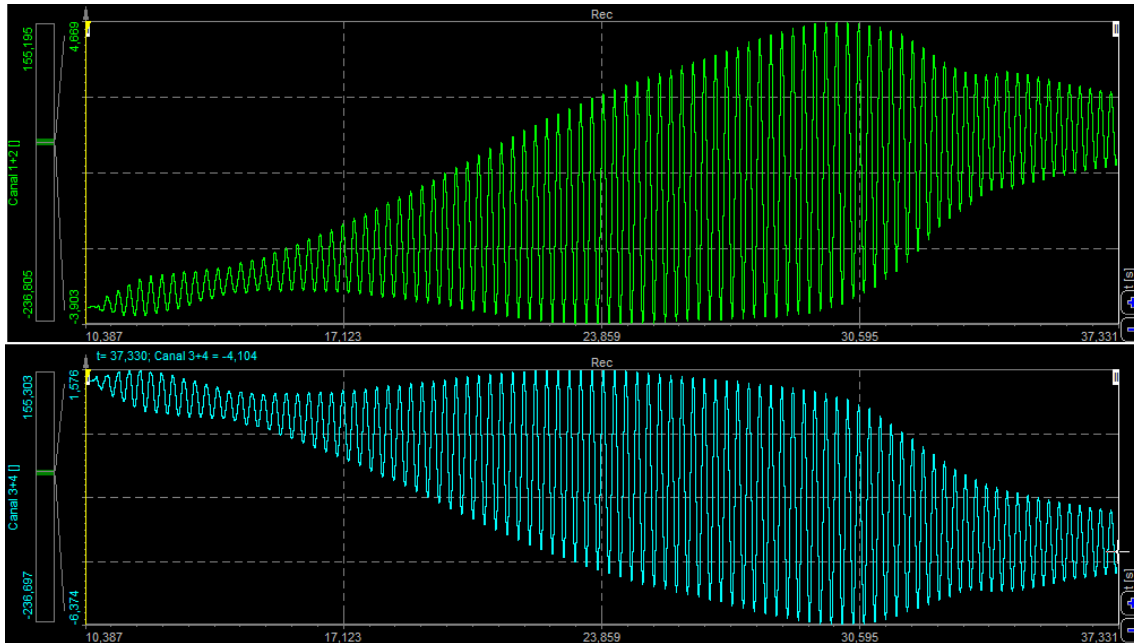


Gráfico 58. Reacciones en los apoyos ensayo crítico M1-DD-V.

Variación de fuerza máxima: 8,59 N

Desplazamiento en el centro de la viga

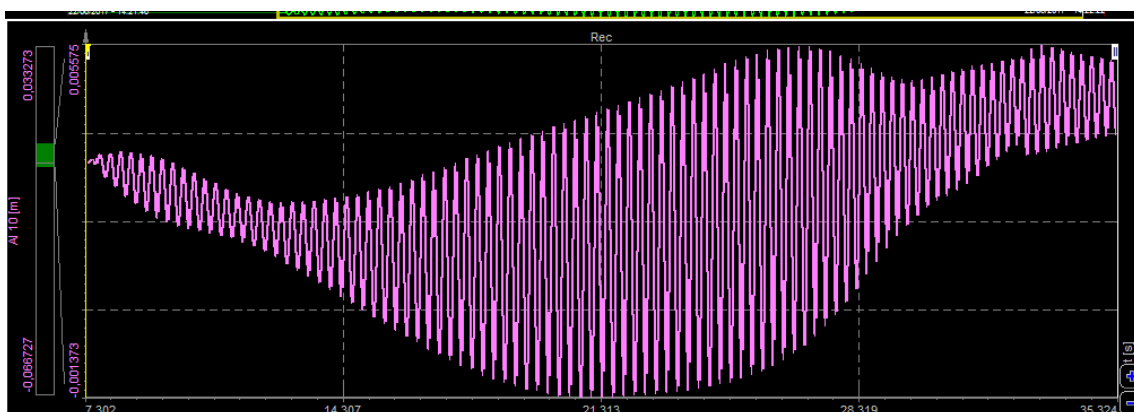


Gráfico 59. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo crítico M1-DD-V.

Variación de desplazamiento máximo: 6,15 mm

5.2.6 Ensayos M2-DD-V

ENSAYO NORMAL

Reacciones en los apoyos

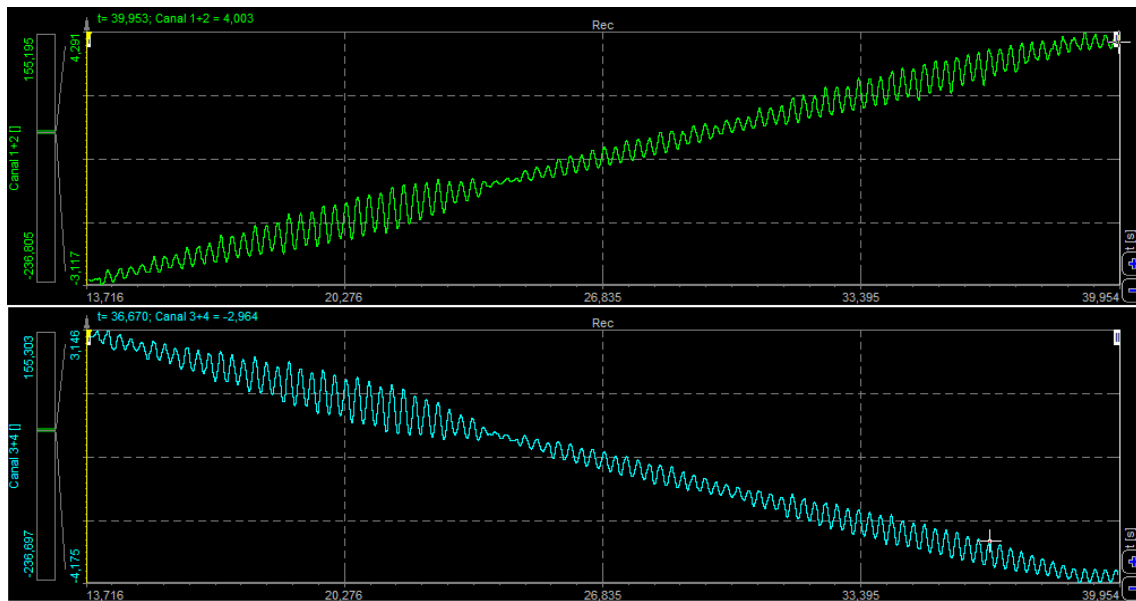


Gráfico 60. Reacciones en los apoyos ensayo normal M2-DD-V.

Variación de fuerza máxima: 1,18 N

Desplazamiento en el centro de la viga

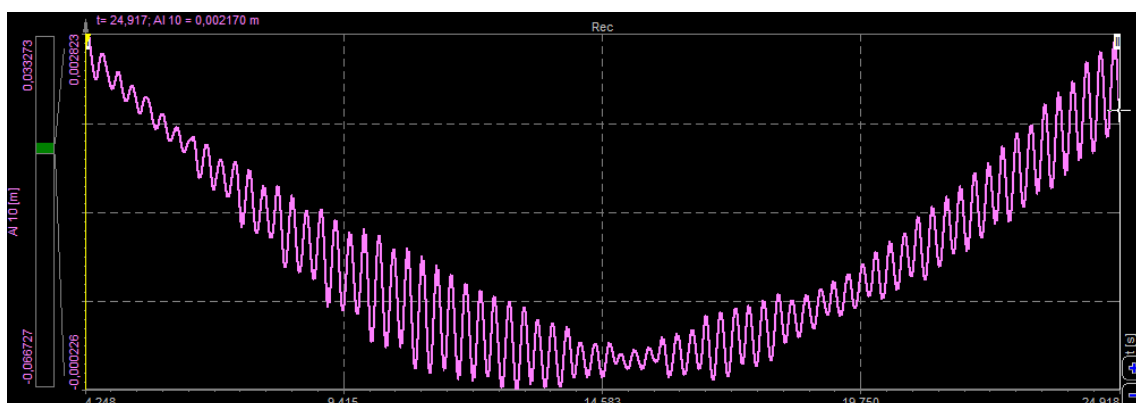


Gráfico 61. Desplazamiento en el centro de la viga ensayo normal M2-DD-V.

Variación de desplazamiento máximo: 1,02 mm

ENSAYO CRÍTICO

Reacciones en los apoyos

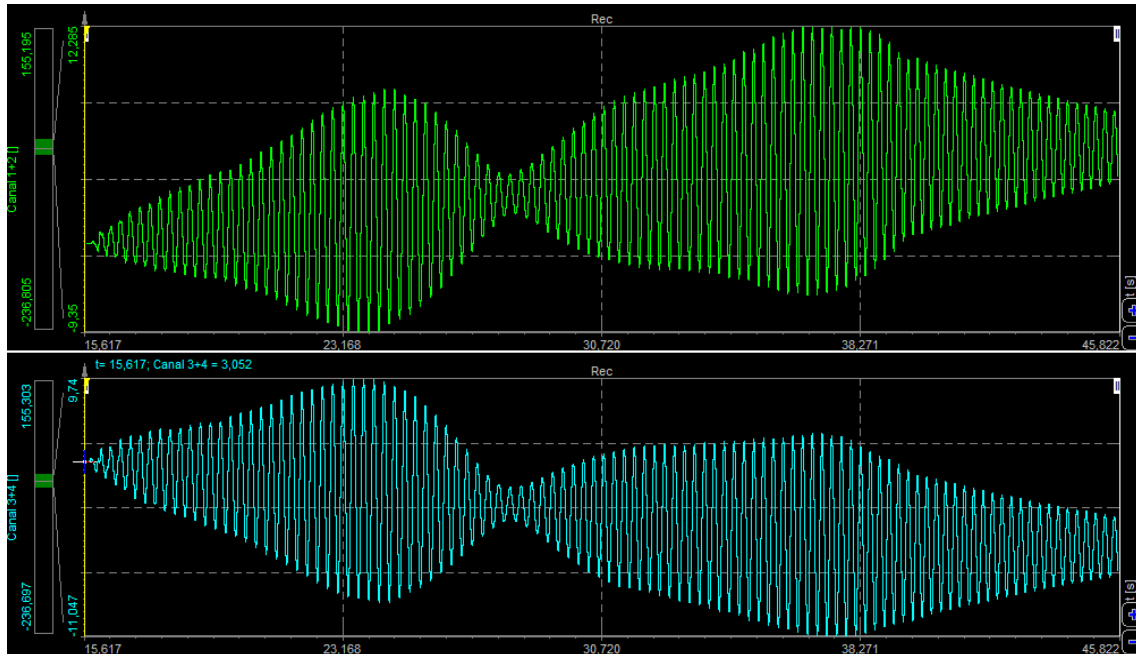


Gráfico 62. Reacciones en los apoyos ensayo crítico M2-DD-V.

Variación de fuerza máxima: 18,94 N

Desplazamiento en el centro de la viga

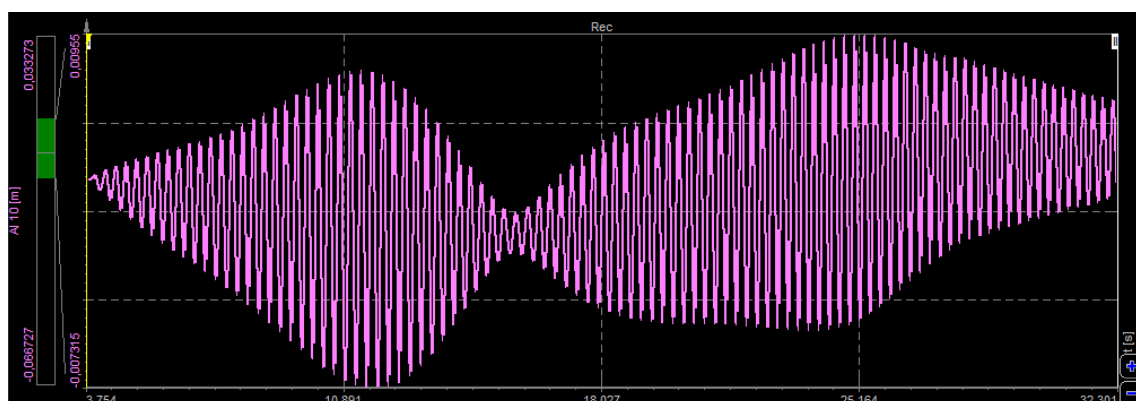


Gráfico 63. Desplazamiento en el centro de la viga M2-DD-V.

Variación de desplazamiento máximo: 14,88 mm

5.2.7 Conclusiones

Una vez realizados los doce ensayos de fuerza y vibración en la viga se han extraído valores muy variados en función del tipo de leva utilizado y potencia. Cuando se induce en la viga grandes desplazamientos las oscilaciones producidas hace que aumenten las reacciones en los apoyos hasta en diez veces en los casos más críticos.

El caso de levas azules sin desfase con diferentes masas, se logra excitar la viga hasta 1 N y 8 mm a baja potencia en el ensayo normal, y hasta 46 N y 34 mm en el caso más crítico. Esto es debido a que la caída de la leva es más fuerte a altas potencias, e incrementado por la masa adicional, produce grandes impactos que junto con una frecuencia cercana a la natural del sistema hace que los desplazamientos adquieran valores máximos.

En la situación de levas desfasadas (izquierda-derecha) tanto las fuerzas como los desplazamientos medidos son muy inferiores, pero el patrón es más aproximado al buscado. Es decir, para simular situaciones críticas en la viga no sería una buena opción, pero como simulación de un peatón caminando por una pasarela es la más real estudiada.

Por último, en el ensayo de levas verdes síncronas se logran valores intermedios a los dos anteriores. Se percibe nítidamente en los gráficos la diferencia entre los ensayos normales y críticos debido a la variación en la vibración de la viga, quedando incluso una vez finalizado el tránsito del peatón una vibración residual que sigue ejerciendo reacciones variables en los apoyos.

Como resultado, se dispone de diferentes alternativas de diseño para simular tanto la frecuencia deseada, como las variaciones de fuerza y desplazamiento en un amplio rango.

6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este capítulo se analizarán todos los objetivos planteados al inicio de este proyecto y los resultados obtenidos en cada apartado, en vista a las líneas futuras a seguir.

Partiendo de las conclusiones de trabajos previos, se ha intentado reproducir un autómatas humanoide que además de poder realizar una simulación físicamente aproximada de los pasos de una persona real, tuviese un alto valor estético.

Tras un arduo trabajo de investigación y experimentación se ha logrado un robot bípedo con una velocidad aceptable y visualmente atractivo. El problema es que debido a las limitaciones de LEGO y las dimensiones de la viga, se compromete la estabilidad al andar (*Ilustración 52*). Además, desde el punto de vista de la ingeniería y los ensayos objetivo de este proyecto, los pasos no son simétricos y repetitivos. El deslizamiento tanto lateral como longitudinal en el avance describen una velocidad y fuerza inducida variables en el tiempo, que impiden realizar unos ensayos de simulación coherentes y fiables.

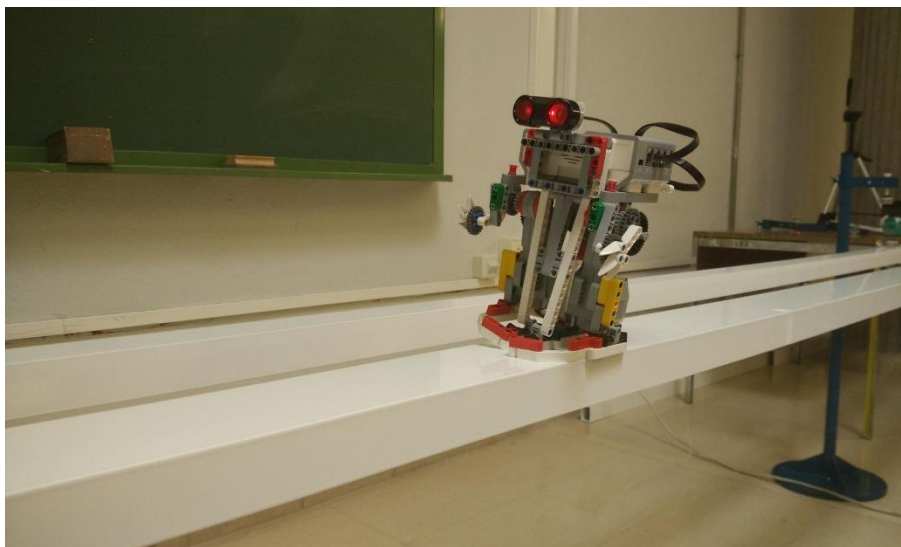


Ilustración 52. Prueba de tránsito del autómatas humanoide por la viga.

En futuros proyectos se podría intentar reproducir el autómatas con otras piezas mecánicas que permitan más posibilidades en las articulaciones de las piernas, o en una viga más ancha o con sujeciones laterales que impidan la caída y favorezcan una pisada firme.

Una vez descartada la posibilidad del autómatas móvil se ha realizado un robot rodante con levas que, renunciando al factor estético, pueda simular las acciones verticales de una forma eficiente. Posee tres servomotores de forma que se pueda variar la velocidad o las revoluciones por minuto de cada par de levas de forma independiente. Las levas utilizadas han sido fabricadas con un perfil de tres y cuatro puntas, pudiendo las primeras conectarse de forma síncrona o desfasadas (pie izquierdo – pie derecho).

En siguientes trabajos se podría investigar, a partir de los estudios vistos de las fuerzas ejercidas por un peatón, un perfil de leva determinado que reproduzca fielmente los gráficos de fuerza en la pisada, e implementarse en el robot diseñado (*Ilustración 53*).



Ilustración 53. Diferentes perfiles de leva para el robot.

Posteriormente, y de forma previa a la caracterización del robot, se ha realizado un estudio y calibración de los aparatos de medida (láser y célula de carga). En primer lugar mediante la calibración estática, cargando un peso conocido en la célula, y después de forma dinámica con un sistema mecánico de un grado de libertad de parámetros teóricos conocidos y su comparación teórico-experimental.

El resultado ha sido muy satisfactorio consiguiendo un error en la calibración estática en torno al 0,20% y una superposición perfecta de fuerza y posición en los gráficos, certificando una correcta calibración de los sistemas de medida y la capacidad de caracterizar un sistema mecánico cualquiera de forma correcta con ambos sensores.

En futuros trabajos se pueden utilizar los parámetros de configuración aquí vistos para medir con el láser o la célula de carga, o realizar alguno de los métodos de calibración para asegurar la precisión requerida.

Más tarde y con estos resultados, se realiza la caracterización del robot diseñado en una plataforma creada para tal efecto. Se consiguen unos patrones de fuerza y frecuencia para cada uno de los seis modelos propuestos, y sus respectivos gráficos y regresiones que faciliten la simulación de los ensayos posteriores con los valores buscados.

Se han conseguido unos patrones de fuerza variables pero estables. Permiten diferentes simulaciones, aunque ninguna se aproxima lo suficiente al patrón buscado de la pisada de un peatón debido a la complejidad de este, pero se podría conseguir con otro diseño de leva. La plataforma empleada así como el método operatorio, podrían ser empleados en futuros diseños con un mismo objetivo.

Por último, este proyecto concluye con los ensayos en la viga que simula la pasarela a escala. Se han realizado dos variantes para cada uno de los seis modelos vistos, una normal a bajas revoluciones y otra crítica con los valores de caracterización conseguidos, para aproximar la frecuencia inducida a la natural de la estructura para conseguir resonancia.

Se puede ver la amplitud de posibilidades tanto para comprometer la integridad de la viga buscando grandes desplazamientos o fuerzas sobre el tablero, como para una simulación a escala más real de un peatón sin grandes deformaciones pero con frecuencias críticas.

En futuras líneas a seguir, se pueden utilizar además de las cuatro células de carga y láser de este proyecto, los cinco acelerómetros dispuestos en la viga. Además el robot permite la posibilidad de utilizar de forma simultánea dos pares de levas a diferentes revoluciones.

Otra opción sería comprobar la influencia de la presencia de un TMD en la viga realizando los mismos ensayos de grandes desplazamientos aquí vistos y realizar la comparativa.

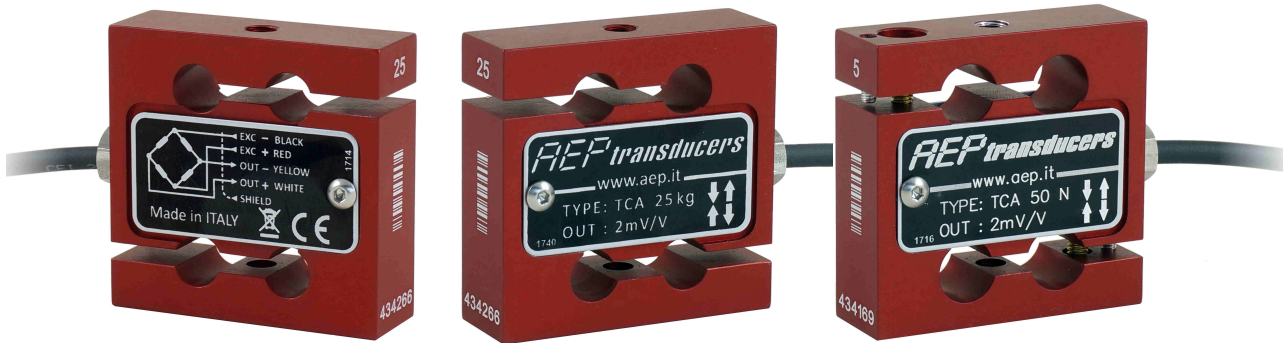
BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

LIBROS Y ENSAYOS

- [1] - Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente, Gobierno de España: «Pasarelas Naturales», 2011.
- [2] - M. Vasilica Istrate, A. Lorenzana Ibán, N. Ibán Lorenzana, A. Vasallo Belver: «Cuantificación de la percepción de la vibración en pasarelas peatonales», 2012. Valladolid.
- [3] - C. M. Casado Sánchez, J. de Sebastián Sanz, I. Muñoz Díaz, A. Poncela Méndez, A. Lorenzana Ibán: «Control de Vibraciones en Pasarelas Peatonales», 2011. Valladolid
- [4] - V. Guerra Pajares: «Diseño de un sistema móvil a escala para simular las acciones verticales de los peatones sobre las estructuras.», 2016. Universidad de Valladolid.
- [5] - L. Bañón Vázquez: «Acciones», 2011. Universidad de Alicante.
- [6] - S. Živanović, A. Pavic, P. Reynolds: «Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation», 2004. University of Sheffield.
- [7] - L. Moyá Guindo: «Comportamiento dinámico de pasarelas peatonales», 2015. Universidad Politécnica de Madrid.
- [8] - I. Romero: «Esfuerzos en vigas: definición, leyes y diagramas», 2015. Universidad Politécnica de Madrid.
- [9] - Ministerio de Fomento, Gobierno de España: «EAE Instrucción de Acero Estructural», 2011.
- [10] - Ministerio de Fomento, Gobierno de España: «IAP-11 Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera», 2012.
- [11] - F. J. Cara: «Respuesta de sistemas dinámicos con un grado de libertad», 2014. Universidad Politécnica de Madrid.
- [12] - L. Bañón: «Prontuario básico de estructuras simples», 2009. Universidad de Alicante.
- [13] - D. Benedettelli: «Creating Cool MINDSTORMS NXT Robots », 2008. 1st Edition, Apress.

WEBS Y REFERENCIAS

- [14] - <https://www.foro3d.com>
(Última consulta 15/05/2017)
- [15] - <https://www.lego.com/es-es/mindstorms>
(Última consulta 17/05/2017)
- [16] - <http://www.aep.it/celle-di-carico/209-tca-r.html>
(Última consulta 19/05/2017)
- [17] - <https://www.wenglor.com/index.php?id=855&L=4>
(Última consulta 19/05/2017)
- [18] - <https://www.dewesoft.com>
(Última consulta 19/05/2017)
- [19] - <http://www.leonardo3.net>
(Última consulta 19/05/2017)
- [20] - <https://www.honda.mx/asimo/>
(Última consulta 23/05/2017)
- [21] - <http://www.disenio-art.com/encyclopedia/archive/ASIMO.html>
(Última consulta 23/05/2017)
- [22] - <http://www.darpa.mil/about-us/timeline/debut-atlas-robot>
(Última consulta 23/05/2017)
- [23] - <https://www.neostuff.net/conoce-a-atlas-el-mejor-robot-humanoide/>
(Última consulta 23/05/2017)



Linearità - Isteresi
 $\leq \pm 0.03\%$
 Linearity - Hysteresis

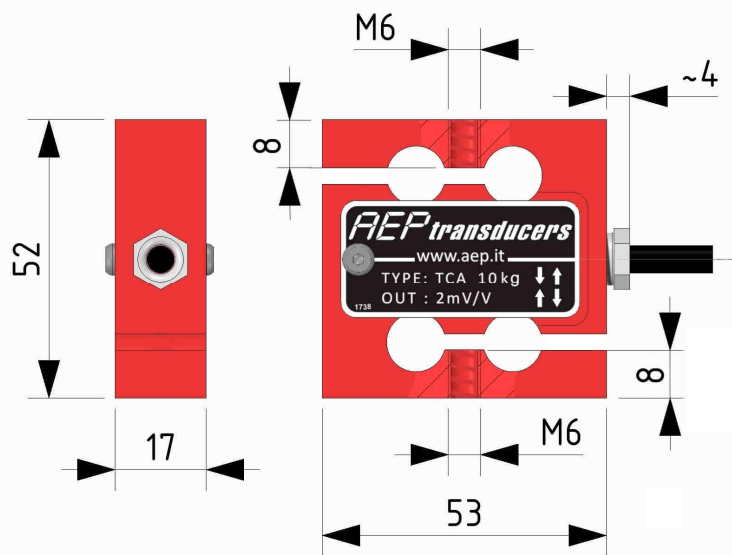
STOP PROTEZIONE CONTRO I SOVRACCARICHI
 OVERLOAD PROTECTION

FACILE APPLICAZIONE
 EASY APPLICATION

Download on www.aep.it
 CE RoHS

Cella di carico estensimetrica in ALLUMINIO per la misura di carichi statici e dinamici in **COMPRESSIONE** e **TRAZIONE**
 ALUMINIUM strain gages Load cell for the measurement of static and dynamic loads in **COMPRESSION** and **TENSION**

Dimensioni *Dimensions* [mm]



CODICE <i>CODE</i>	Carico nominale <i>Nominal load</i>	Frequenza naturale <i>Natural frequency</i>
CTCA1K5	1 kg	~ 0.22 kHz
CTCA2K5	2 kg	~ 0.50 kHz
CTCA5K5	5 kg	~ 0.75 kHz
CTCA10K5	10 kg	~ 1.00 kHz
CTCA25K5	25 kg	~ 1.50 kHz
CTCA50K5	50 kg	~ 2.00 kHz

Dati Tecnici

Technical Data

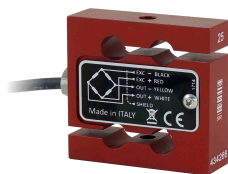


CARICO NOMINALE	NOMINAL LOAD	1 ⁽¹⁾ - 2 ⁽¹⁾ - 5 ⁽¹⁾ kg ⁽²⁾ 10 - 25 - 50 kg ⁽²⁾
SENSIBILITA' NOMINALE	NOMINAL SENSITIVITY	2 mV/V
TOLLERANZA DI CALIBRAZIONE	SENSITIVITY TOLERANCE	≤ ± 0.1%
EFFETTO TEMPERATURA (10 °C)	TEMPERATURE EFFECT (10 °C)	
a) sullo zero	a) on zero	≤ ± 0.025 %
b) sulla sensibilità	b) on sensitivity	≤ ± 0.021 %
LINEARITA'	LINEARITY	≤ ± 0.03 %
ISTERESI	HYSTERESIS	≤ ± 0.03 %
RIPETIBILITA'	REPEATABILITY	≤ ± 0.01 %
RESISTENZA DI INGRESSO	INPUT RESISTANCE	440 ± 20 Ω
RESISTENZA DI USCITA	OUTPUT RESISTANCE	350 ± 2 Ω
RESISTENZA DI ISOLAMENTO	INSULATION RESISTANCE	>5 GΩ
BILANCIAMENTO DI ZERO	ZERO BALANCE	≤ ± 1 %
ALIMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	RECOMMENDED SUPPLY VOLTAGE	10 V
ALIMENTAZIONE NOMINALE	NOMINAL SUPPLY VOLTAGE	1-15 V
ALIMENTAZIONE MAX.	MAXIMUM SUPPLY VOLTAGE	18 V
VALORI MECCANICI LIMITE RIFERITI AL CARICO NOMINALE:	MECHANICAL LIMIT VALUES REFERRED TO NOMINAL LOAD:	
a) carico di servizio	a) service load	120 %
b) carico limite	b) max permissible load	150 %
c) carico di rottura	c) breaking load	>300 %
d) massimo carico trasversale	d) max transverse load	50 %
e) carico dinamico limite	e) max permissible dynamic load	50 %
FRECCIA MAX. AL CARICO NOMINALE	DISPLACEMENT AT NOMINAL LOAD	~ 0.3 mm
TEMPERATURA DI RIFERIMENTO	REFERENCE TEMPERATURE	+23 °C
CAMPO NOMINALE DI TEMPERATURA	TEMPERATURE NOMINAL RANGE	-10 / +40 °C
TEMPERATURA DI ESERCIZIO	SERVICE TEMPERATURE	-20 / +70 °C
TEMPERATURA DI STOCCAGGIO	STORAGE TEMPERATURE	-20 / +80 °C
PESO	WEIGHT	~ 0.3 kg
CLASSE DI PROTEZIONE (EN 60529)	PROTECTION CLASS (EN 60529)	IP20
MATERIALE DELLA CELLA	EXECUTION MATERIAL	Alluminio / Aluminium
LUNGHEZZA CAVO	CABLE LENGTH	3 m
TESTE A SNODO SFERICO CONSIGLIATE	RECOMMENDED KNUCKLE JOINTS	DURBAL EM6

⁽¹⁾ Complete di protezione contro i sovraccarichi in TRAZIONE e COMPRESSIONE (Max. 500% F.S.).
Supplied with overload protection TENSION and COMPRESSION (Max. 500% F.S.).

⁽²⁾ A richiesta calibrazioni in N.
N calibrations on request

Collegamenti Elettrici Electrical Connections



Load Cell	OUTPUT	CABLE	CAVO
	EXCITATION+ EXCITATION - OUTPUT+ OUTPUT-	Red Black White Yellow Shield ⁽³⁾	Rosso Nero Bianco Giallo Schermo ⁽³⁾

⁽³⁾ Collegato al corpo della cella di carico
Connected to the body of the load cell.

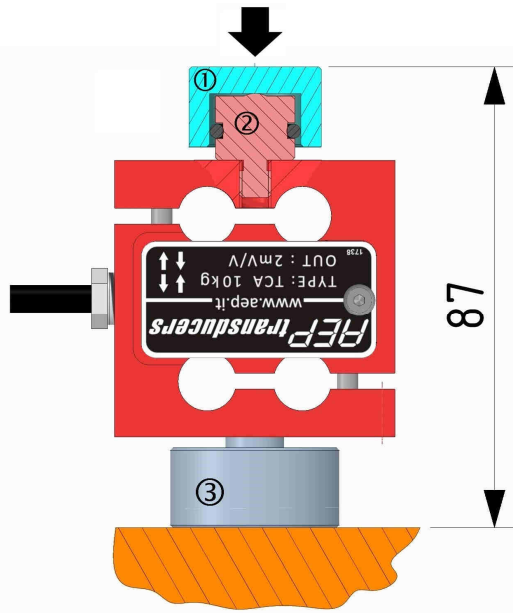
Cavo schermato PVC 70°C, Ø 4.2mm a 4 conduttori stagnati

PVC 70°C shielded cable, \varnothing 4.2mm with 4 tinned conductors.

Applicazioni

Applications

COMPRESSIONE COMPRESSION

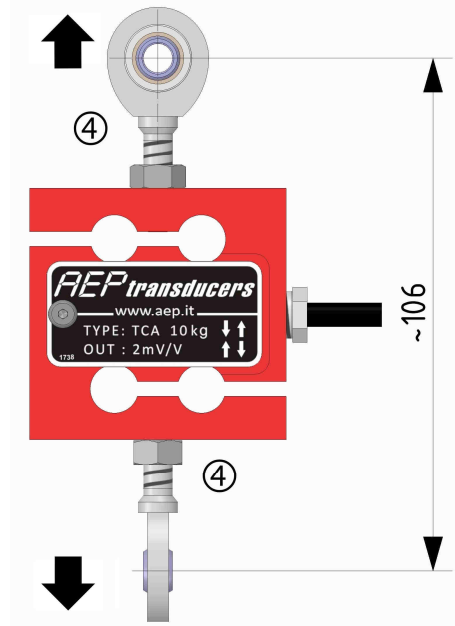


ATTENZIONE

Verificare che la forza generata durante il montaggio degli accessori non superi il carico nominale.

Il peso del cavo può influire sulla misura, è pertanto consigliabile posizionarlo nella zona fissa, dalla parte opposta al carico.

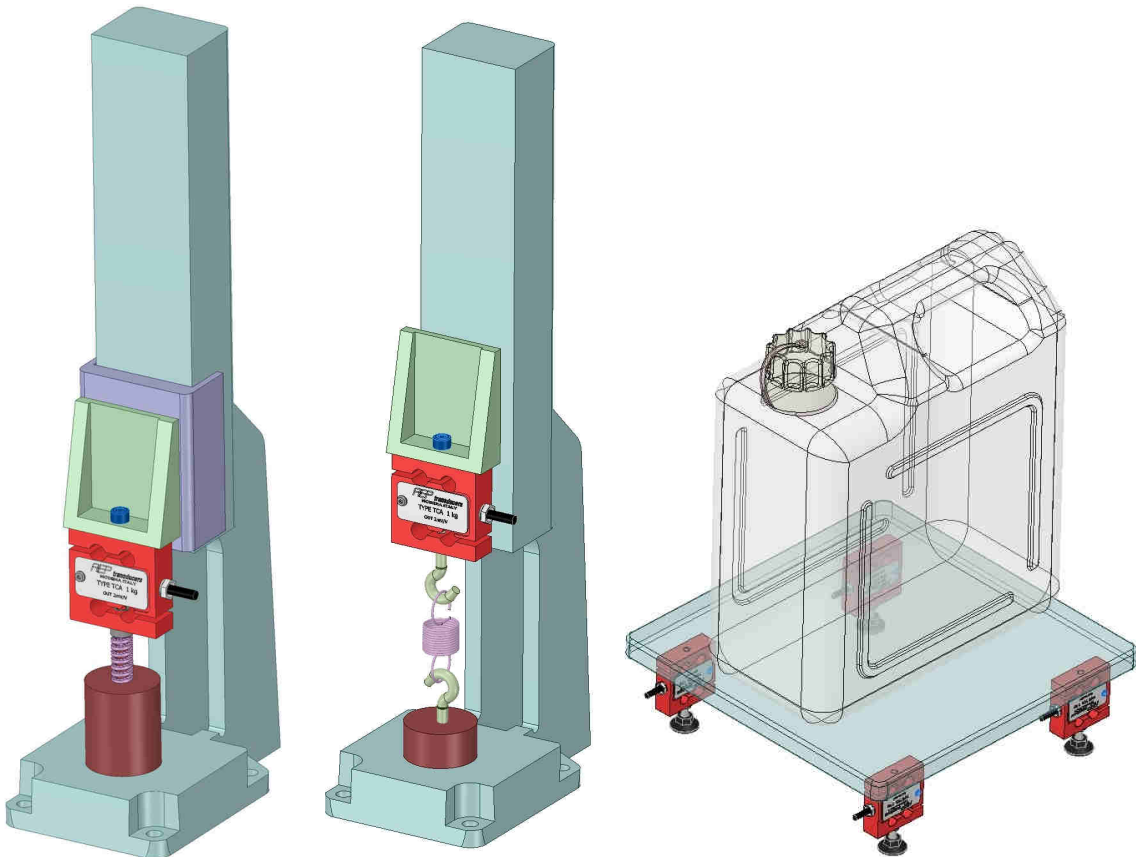
TRAZIONE TENSION



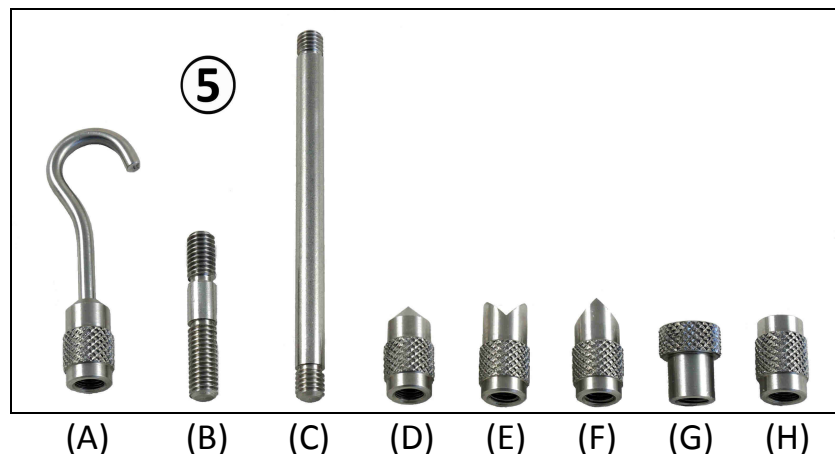
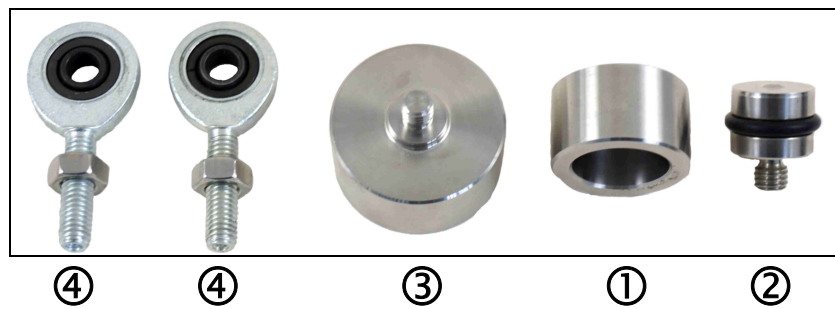
WARNING

Be sure that the force exerted when assembling accessories does not exceed nominal load.

Cable weight can influence measurement, it is therefore recommended to place it at the opposite site of the load.



CODE:		ACCESSORI (opzionali)	ACCESSORIES (optional)
CTIC13	①	Testa di carico.	Loading head.
CTS18M6	②	Testa di carico sferica.	Spherical loading head.
CBC32M6	③	Base di carico.	Mounting plate.
CACCEM6	④	Teste a snodo sferico.	Knuckle joints.
KITCT	⑤	KIT di accessori per eseguire prove in COMPRESSIONE e TRAZIONE sui materiali. (A) Gancio per prove a trazione. (B) Prolunga filettata corta. (C) Prolunga filettata lunga. (D) Punta conica per prove a compressione. (E) Punta dentata per prove a compressione. (F) Punta a scalpello per prove a compressione. (G) Punta piana per prove a compressione. (H) Bussola filettata.	Accessory KIT for TENSION and COMPRESSION test of materials. (A) Hook for tension test. (B) Short extension threaded. (C) Long extension threaded. (D) Conical tip for compression test. (E) Notched tip for compression test. (F) Chisel tip for compression test. (G) Flat Tip for compression test. (H) threaded sleeve.



CP08MHT80 LASER

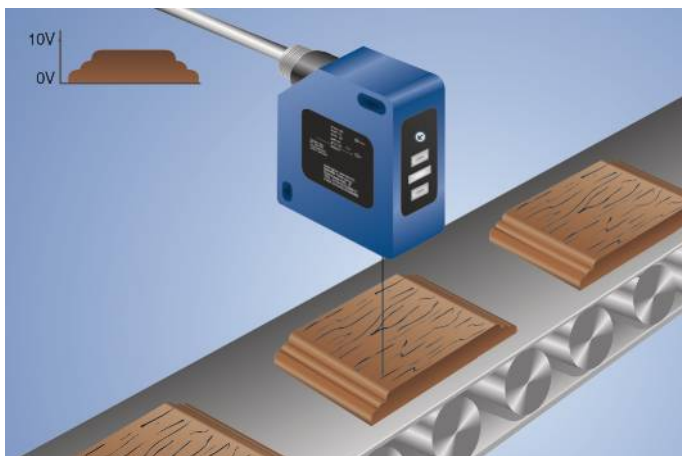
Part Number



- High resolution: 8 μm (resolution-mode)
- Linearity: 0,1 % (resolution-mode)
- Measured value independent of material, color and brightness
- Response time: < 660 μs (speed-mode)
- Zoom function

These sensors work with a high-resolution CMOS line and DSP technology and determine distance using angular measurement. As a result, material, color and brightness related measurement differences are virtually eliminated.

Integrated analogue output can be configured for voltage 0...10 V (10...0 V) or current 4...20 mA (20...4 mA).

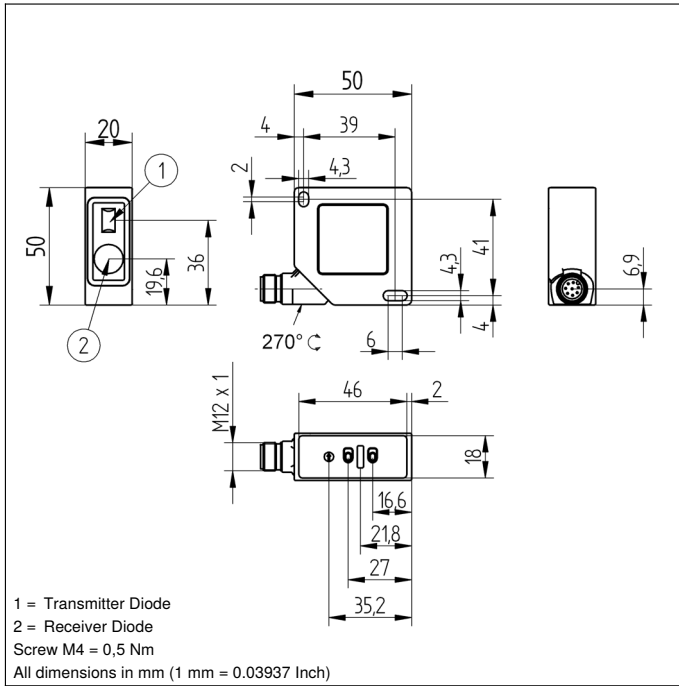


Technical Data

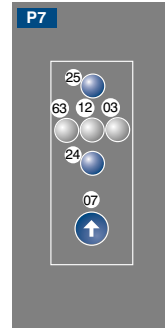
Optical Data	
Working Range	30...80 mm
Measuring Range	50 mm
Resolution	8 μm
Resolution (Speed-Mode)	12 μm
Linearity	0,1 %
Linearity (Speed-Mode)	0,2 %
Light Source	Laser (red)
Wave Length	660 nm
Service Life (T = +25 °C)	100000 h
Laser Class (EN 60825-1)	2
Max. Ambient Light	10000 Lux
Spot Diameter	see Table 1
Electrical Data	
Supply Voltage	18...30 V DC
Current Consumption (U _b = 24 V)	< 80 mA
Measuring Rate	1500 /s
Measuring Rate (Resolution-Mode)	600 /s
Response Time	< 660 μs
Response Time (Resolution Mode)	< 1660 μs
Temperature Drift	< 5 $\mu\text{m/K}$
Temperature Range	-25...50 °C
Analog Output	0...10 V/4...20 mA
Current Load Voltage Output	< 1 mA
Current Output Load Resistance	< 500 Ohm
Interface	RS-232
Baud Rate	38400 Bd
Protection Class	III
FDA Accession Number	0820588-000
Mechanical Data	
Setting Method	Teach-In
Housing Material	Plastic
Degree of Protection	IP67
Connection	M12 \times 1; 8-pin
Error Output	●
Analog Output	●
RS-232 Interface	●
Connection Diagram No.	529
Control Panel No.	P7
Suitable Connection Technology No.	80
Suitable Mounting Technology No.	380

Complementary Products

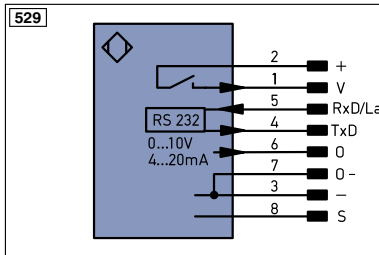
Analog Evaluation Unit AW02
Feldbus Gateways ZAGxxxN01, EPGG001
Interface Cable S232W3
Protection Housing Set ZSP-NN-02
Protection Housing ZSV-0x-01
wTeach2 software DNNF005



Ctrl. Panel



- 03 = Error Indicator
- 07 = Selector Switch
- 12 = Analog Output Indicator
- 24 = Plus Button
- 25 = Minus Button
- 63 = Analog Output Current Indicator

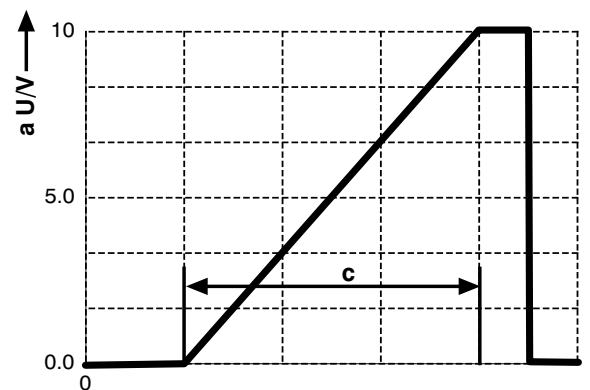


Legend		Wire Colors according to DIN IEC 757	
+	Supply Voltage +	BK	Black
-	Supply Voltage 0 V	BN	Brown
~	Supply Voltage (AC Voltage)	RD	Red
A	Switching Output (NO)	OG	Orange
Ā	Switching Output (NC)	YE	Yellow
V	Contamination/Error Output (NO)	GN	Green
ṽ	Contamination/Error Output (NC)	BU	Blue
E	Input (analog or digital)	VT	Violet
T	Teach Input	GY	Grey
Z	Time Delay (activation)	WH	White
S	Shielding	PK	Pink
RxD	Interface Receive Path	GNYE	Green/Yellow
TxD	Interface Send Path		
RDY	Ready		
GND	Ground		
CL	Clock		
E/A	Output/Input programmable		
	IO-Link		
PoE	Power over Ethernet		
IN	Safety Input		
OSSD	Safety Output		
Signal	Signal Output		
Bl..D +/-	Ethernet Gigabit bidirect. data line (A-D)		
EN0..5422	Encoder 0-pulse 0-0 (TTL)		
PT	Platinum measuring resistor		
nc	not connected		
U	Test Input		
Ū	Test Input inverted		
W	Trigger Input		
O	Analog Output		
O-	Ground for the Analog Output		
BZ	Block Discharge		
AWV	Valve Output		
a	Valve Control Output +		
b	Valve Control Output 0 V		
SY	Synchronization		
E+	Receiver-Line		
S+	Emitter-Line		
≡	Grounding		
SnR	Switching Distance Reduction		
Rx +/-	Ethernet Receive Path		
Tx +/-	Ethernet Send Path		
Bus	Interfaces-Bus A(+)/B(-)		
La	Emitted Light disengageable		
Mag	Magnet activation		
RES	Input confirmation		
EDM	Contactur Monitoring		
ENAR5422	Encoder A/Ā (TTL)		
ENBR5422	Encoder B/B̄ (TTL)		

Table 1

Working Distance	30 mm	80 mm
Spot Size	0,5 × 1 mm	1 × 2 mm

Output Graph



c = Measuring Range

a = Analog Voltage Output



ANEXO C

SIRIUS HD-STG



ADC type	24 bit sigma delta dual core with anti-aliasing filter
Data rate	Simultaneous 200kS/s
Isolation voltage [V]	1000 V (non-isolated version available)
Power consumption	max 4 W
Connectors	DB9
Direct inputs	Voltage, full/half/quarter bridge strain, potentiometer, RTD, resistance, IEPE (with MSI), thermocouple (with MSI), charge (with MSI)
Dual core ranges	+/-50 V, +/-10 V, +/-1 V, +/- 100 mV
Bridge ranges	+/-500 mV/V, +/-200 mV/V, +/- 20 mV/V, +/-2 mV/V
Dynamic range @ 10 kS	152dB (dual core)
Input coupling	DC
Excitation voltage	SW programmable 0 to 20V (100mW)
Excitation current	SW programmable 0 to 45mA (100mW)
Bridge connection type	3,4,5,6 wire connection
Internal bridge completion	half bridge 1kOhm, quarter bridge 120 and 350 Ohm, SW selectable
Short	SW selectable
Shunt	SW selectable (59.88kOhm, 175kOhm)
TEDS support	yes
TEDS chip	DS2406, DS2430A, DS2432, DS2433
Overvoltage protection	In+ to In-: 50 V continuous, 200 V peak (10 msec)
Input impedance	10 MOhm for 50 V range, all other ranges 1 GOhm