

*Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco*

*Facultad de Ingeniería*

*Sede Trelew*

*Año 2023*

## ***Aplicaciones prácticas e ingenieriles de un Acelerómetro***



### **Carrera**

Ingeniería Civil con Orientación en Hidráulica

### **Cátedra**

Práctica Profesional Supervisada

### **Alumna**

Priscila Szathmáry

### **Tutor Externo**

Ing. Alfonso Meroño

### **Tutor Académico**

Ing. Jorge Adrián Álvarez

## **1. Resumen**

En la presente práctica profesional supervisada se propone estudiar las aplicaciones prácticas e ingenieriles con orientación hidráulica de un sensor (Acelerómetro), su desarrollo e implementación para tareas de laboratorio con fines educativos.

Se realizara un estudio de la medición indirecta de la aceleración a partir del armado del instrumento, se confeccionaran nuevas guías de laboratorio para aportar al aprendizaje de los alumnos de Ingeniería Civil con Orientación Hidráulica, las cuales implementaran el uso de programas, aplicaciones celulares y simuladores.

## **2. Introducción**

La seguridad de las presas ha cobrado una gran relevancia durante los últimos años en la gestión y explotación de infraestructuras. La presa, como tal, supone un riesgo para la sociedad, ya que su rotura es posible, aunque muy improbable. La gestión del riesgo debe ser un objetivo prioritario para las presas en servicio que se ocupan del abastecimiento de agua y de la generación de energía eléctrica.

### **2.1. Auscultación**

La auscultación de presas es una aplicación de la ingeniería que se dedica al control de la infraestructura analizando las variables externas y el efecto que producen en la misma. Esta auscultación puede ser hidráulica, piezométrica, de deformaciones y de movimientos.

### **2.2. Fallas en las presas**

Las presas pueden ser de hormigón o de materiales sueltos, básicamente. Los modos de fallo más comunes en las presas de materiales sueltos son los sobrevertidos por coronación y las filtraciones internas. En las presas de hormigón, el colapso de la estructura se produce por fallos en la cimentación y defectos en el hormigón o en el cuerpo de la estructura. Los controles de deformaciones y de movimientos son fundamentales para conocer la respuesta de la estructura a las mencionadas sollicitaciones y su evolución en el tiempo.

### **2.3. Controles**

Conocer la magnitud de los desplazamientos radiales y tangenciales del paramento de una presa es fundamental porque son la respuesta a las sollicitaciones externas a las que está sometida (carga hidrostática, temperatura ambiente, etc.) y un indicador del comportamiento de la presa.

### **2.4. Técnicas de medición**

Un medidor de vibraciones para estructuras sirve para medir oscilaciones, vibraciones y temblores en presas, edificios, puentes, torres, etc. Permite analizar las vibraciones según las normas vigentes para analizar posibles daños permanentes en las estructuras.

#### **2.4.1. Péndulos**

Es un hilo vertical dispuesto en el interior de la presa, anclado en la parte superior si es directo o en la cimentación si es invertido, que sirve como referencia vertical para controlar los desplazamientos y deformaciones horizontales que la presa experimenta. Estos elementos necesitan perforaciones verticales a lo largo de la presa cuya ejecución puede ser complicada; sobre todo, cuando la misma ya está en servicio.

Otro elemento similar es el hilo de fundación, cuyo punto de fijación se sitúa en el terreno a suficiente profundidad para que pueda admitirse que no sufre desplazamiento.

#### **2.4.2. Clinómetros, extensómetros y medidores de apertura de juntas**

Los clinómetros son aparatos de alta precisión que se emplean para medir los posibles giros que pueden verificarse en un plano, y se pueden instalar en el paramento de la presa o en el interior de las galerías de inspección. Permite conocer los desplazamientos horizontales de forma indirecta sobre la base del ángulo de inclinación registrado en el clinómetro.

Los extensómetros son unos instrumentos diseñados para medir deformaciones o desplazamientos axiales, de compresión o tracción, a lo largo de una perforación tanto en el hormigón del cuerpo de presa como en el de la cimentación, y también de alguna capa o estrato. Constan de una o más varillas metálicas ancladas a diferentes profundidades y un cabezal desde el que se toman las medidas de las deformaciones de cada varilla.

Los medidores de junta externos de LVDT son unos aparatos especialmente diseñados para su colocación externa en cualquier junta o fisura, ya sea en hormigón o en roca. Sus aplicaciones más comunes son la instalación en presas antiguas cuyas medidas de auscultación se quieren automatizar y no disponen de una red de medidores de junta internos o en los que cuentan con ella pero no funciona adecuadamente. Su diseño permite un rápido montaje y desmontaje, y se pueden cambiar de lugar en poco tiempo.

#### **2.4.3. Medidas topográficas de precisión y colimación**

Las colimaciones o alineaciones consisten en materializar las mediciones tomadas con un teodolito, al cual le corresponderá una posición fija y bien determinada por cada alineación que se quiera observar.

Midiendo el desplazamiento que las referencias instaladas experimentan respecto a dichas alineaciones, pueden estudiarse los movimientos horizontales a lo largo de la vida de la presa. Esta técnica se aplica especialmente en la coronación de la presa y en las galerías de inspección.

#### **2.4.4. DGPS**

Se basa en el empleo conjunto de dos tipos de estación GPS: referencias fijas ubicadas en puntos de coordenadas conocidas y móviles situadas lo suficientemente cerca entre sí como para asegurar que el estado de la atmósfera sea similar en ellas y puedan asumirse los mismos errores. De esta manera, la posición de cada punto móvil se refiere continuamente a la base fija o de referencia constituyendo una línea base monitorizada de forma continua. Adicionalmente, el filtrado matemático de los datos permite ajustar las posiciones a la velocidad observada de movimiento en función de los movimientos anteriores, y se alcanza una exactitud milimétrica en oscilaciones de baja frecuencia.

#### **2.4.5. Laser escáner**

El láser escáner permite obtener un modelo completo de la superficie de la presa, usando tecnología láser. De ese modo, se analiza un entorno o la presa para tomar datos sobre su forma y las propiedades de su superficie. Los datos capturados pueden emplearse para realizar reconstrucciones digitales, planos bidimensionales o modelos tridimensionales. La ventaja del láser escáner reside en que se toma una gran cantidad de puntos con alta precisión en un período de tiempo relativamente corto; es como hacer una fotografía con información de profundidad y, al igual que en la fotografía, los escáneres láser son instrumentos de línea de vista. Por tanto, es necesario realizar múltiples capturas desde diferentes estaciones para garantizar la completa cobertura de una estructura.

#### **2.4.6. Interferómetros SAR**

Es una técnica basada en el análisis de imágenes de Radar de Apertura Sintética (SAR).

Los SAR son sensores que registran imágenes desde plataformas satelitales. Una apertura sintética o antena virtual es un tipo de sistema radar que procesa la información capturada por la antena, que se mueve a lo largo de un determinado recorrido de vuelo, mediante algoritmos. Busca combinar la información obtenida en varios barridos de esa antena para recrear un solo barrido virtual. Se utiliza para detectar y medir movimientos muy pequeños de la superficie. La magnitud del movimiento se calcula después de descomponer la fase obtenida. Dada la pequeña longitud de onda con que se opera, se detectan oscilaciones que podrían ser suficientes para revelar anomalías en presas de tierra.

#### **2.4.7. Ground – Based SAR**

Los sistemas de radar terrestre son similares a los de radar satélite. Están formados por un sensor que se desplaza a lo largo de un riel fijado al terreno o que permanece estático en lugar de seguir la órbita del satélite. Permite monitorizar una zona de la superficie del terreno concreta o infraestructuras civiles (presas, puentes, edificios, etc.).

#### **2.4.8. Sensor (Acelerómetro)**

Todos los instrumentos mencionados anteriormente se encargan de interpretar las oscilaciones que se producen en una presa para traducirlas en desplazamientos horizontales, entre otros datos. Un acelerómetro, como el que se desarrollara en este informe, es un sensor que permite la medición indirecta de la aceleración espacial del mismo.

### **3. Objetivos**

Los objetivos del presente informe se basan en implementar un sensor, creado en la Cátedra de Física de la Facultad de Ingeniería de la UNPSJB, en guías de laboratorio para alumnos cursantes de las materias de Física I y Física II, lo que a su vez contempla:

La implementación por parte del alumno de herramientas tales como: Programa de Excel, Teléfono Celular: App. Software de recepción de datos (Serial Bluetooth Terminal), Dispositivos diseñados por la cátedra y materiales secundarios del Laboratorio.

El correcto manejo de los datos y la interpretación física de los mismos por parte del alumno.

Y, por otro lado, estudiar la implementación del sensor para las actividades más frecuentes de la Ingeniería Civil con Orientación Hidráulica a partir de tareas de laboratorio y estudio de modelaciones físicas para la determinación de oscilaciones de elementos.

## 4. Desarrollo

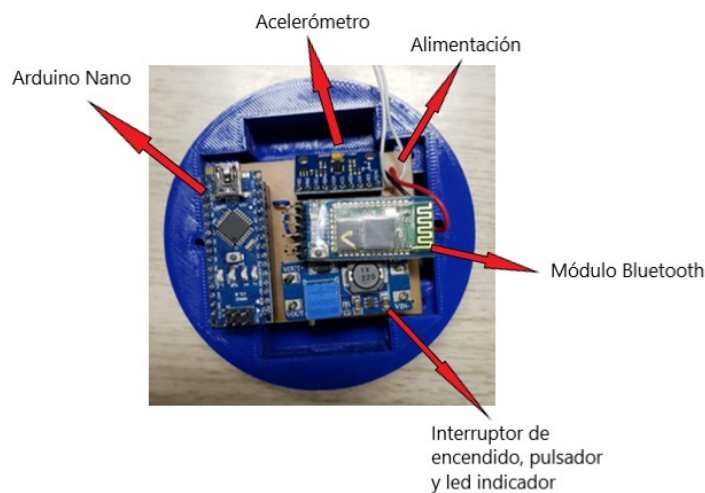
A continuación, se detalla el diseño y armado del sensor, el cual estuvo bajo la dirección y planeamiento del Ing. Prof. Alfonso Meroño.

### 4.1. Sensor (Acelerómetro)

El dispositivo (sensor) posee un hardware conformado por una Placa de interconexión (“shield”): de diseño propio. La misma integra las demás placas entre sí, permitiendo el intercambio de datos.

Los componentes que la integran son:

- Cables conectores 6 pines.
- Placa de desarrollo Arduino Nano.
- Circuito Interruptor on/off.
- Resistencias.
- Cables puente.
- Acelerómetro de 3 ejes.
- Módulo bluetooth.
- Alimentación (pilas AA).



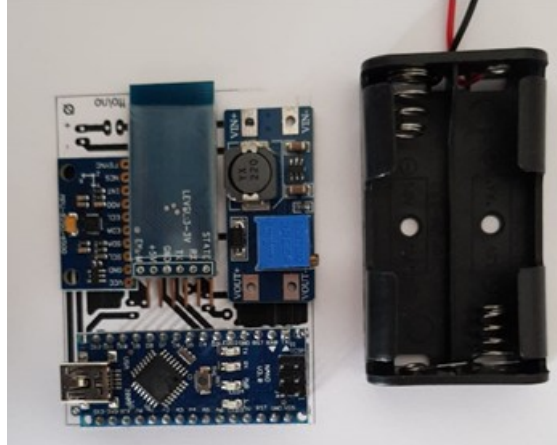
Un acelerómetro es un instrumento que mide la aceleración indirectamente a partir de un sensado de la fuerza que produce la aceleración. La fuerza realiza trabajo sobre las placas del capacitor interno, la cual se mueve en una dirección, modificando la distancia entre placas, y consecuentemente, la capacidad. El acelerómetro posee un microcontrolador que acondiciona y digitaliza la señal, y entrega la medida en unidades “mg” (milésimas de aceleración de la gravedad). Estos datos son recibidos por el microcontrolador principal (ATMEL montado en Arduino Nano) y se transmiten vía bluetooth. Mediante la aplicación Serial Bluetooth Terminal instalada en el celular, se descargan los datos para ser recibidos vía mail o drive, para ser analizados posteriormente.

### 4.2. Componentes

#### 4.2.1. Hardware

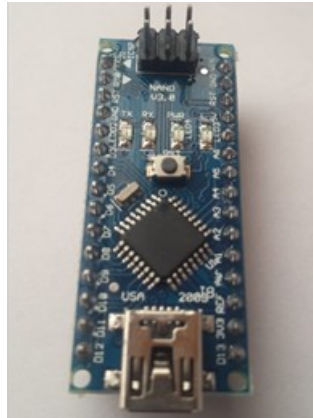
Está compuesto por bloques: **MCU** (placa principal que integra el microcontrolador, en este caso un Arduino Nano, junto con los capacitores de desacople, regulador, oscilador, BIOS de programación, control USB, y la comunicación serial de datos). Un **acelerómetro** (placa que mide la aceleración espacial, filtra y acondiciona los datos, procesándolos para enviarlos mediante una conexión en serie al CPU). **Módulo de comunicaciones** (placa de comunicación serial inalámbrica tipo “bluetooth” que

transmite los datos radioeléctricamente sin usar cables). **Alimentación y baterías** (compuesta por dos baterías fuentes de energía y una placa de regulación, y un “step up” que acondiciona la alimentación elevando el voltaje). **Placa de interconexión tipo “shiel”** (diseñada por el Tutor Externo Prof. Ing. Alfonso Meroño. Integra todas las otras placas entre sí, permitiendo el intercambio de datos).



#### 4.2.2. Software

El software utilizado es el Arduino Software (IDE). Es una interface complete la cual permite programar las líneas de código en un lenguaje símil C, y también subirlos al microcontrolador. Dentro del entorno uno puede ir agregando las diferentes librerías o crear las propias, como en cualquier entorno de programación.



#### 4.2.3. Cuerpo físico

Se lleva a cabo una modelación del cuerpo físico para posteriormente hacer una impresión en 3D. El diseño principal es esférico, ya que se las primeras tareas de laboratorio a implementar con este sensor, están orientadas al comportamiento del mismo como un péndulo ideal.



### 4.3. Modo de uso

#### Instrucciones

1. Colocar el sensor en posición de equilibrio.
2. Encender el sensor.
3. Conectar vía bluetooth con el celular.
4. Para calibrar: siempre debe estar en posición de equilibrio.
5. En la aplicación introducir la letra “c” y esperar a que el led del sensor parpadee. El sensor esta calibrado.
6. Efectuar el movimiento del sensor requerido para realzar la experiencia. Siempre esperar hasta que el movimiento se estabilice para no tomar datos provenientes de las perturbaciones.
7. Para tomar los datos: introducir la letra “d”.

#### Link de descarga de aplicación

[https://play.google.com/store/apps/details?id=de.kai\\_morich.serial\\_bluetooth\\_terminal&hl=es\\_CO](https://play.google.com/store/apps/details?id=de.kai_morich.serial_bluetooth_terminal&hl=es_CO)

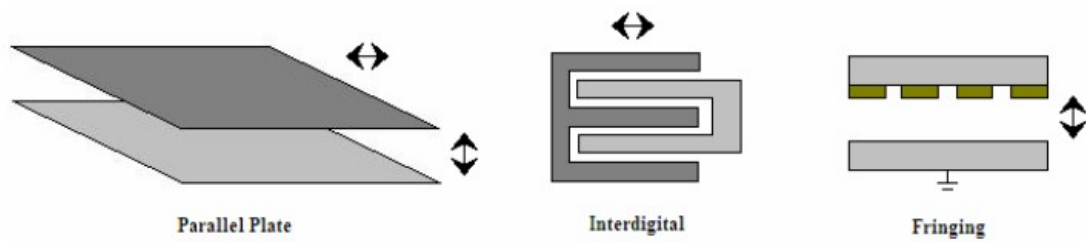
Estas instrucciones están destinadas a los estudiantes de la cátedra.

### 4.4. Funcionamiento

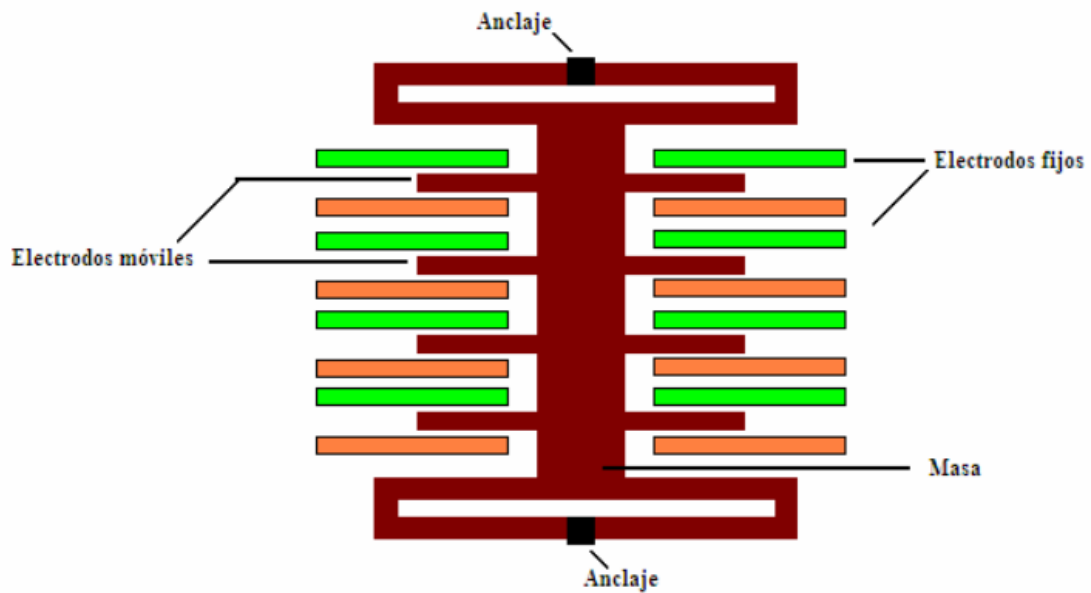
Hay distintos tipos de acelerómetros según la tecnología: mecánicos, capacitivos, piezoeléctricos, piezoresistivos y micromecanizados.

El sensor en cuestión está compuesto por un acelerómetro capacitivo:

Estos dispositivos varían la posición relativa de las placas de un microcondensador cuando se encuentra sometido a aceleraciones. Están integrados en chips de silicio, que les proporcionan soluciones a diferentes tipos problemas, por ejemplo, cuestiones de humedad, temperatura, capacidades parásitas, número total de terminales, etc.). De todos los métodos existentes para realizar medidas de posición, la medida de los cambios en el valor de una capacidad es la más versátil. Algunos tipos de condensadores de empleo común:



Estos sensores se encuentran formados por un conjunto de electrodos fijos (anclados al circuito) y una serie de placas unidas a la masa de prueba, que sólo están sujetas al sustrato por sus extremos de forma que tengan cierta libertad de movimiento.



#### Esquema de un sensor capacitivo

En reposo cada electrodo móvil se encuentra justo entre dos electrodos fijos, así todas las capacidades tienen el mismo valor. Al aplicar una fuerza externa, la masa central se moverá, desplazándose también los electrodos adheridos a ella y de manera que una de las capacidades aumente y la otra disminuya.

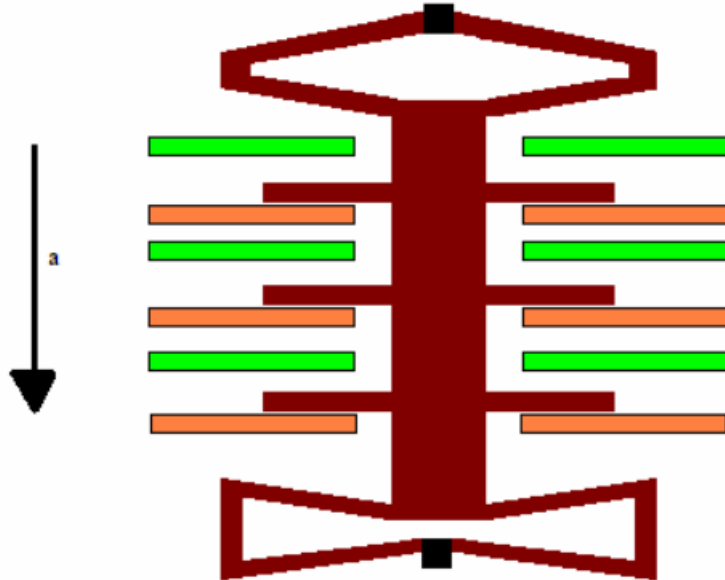


Fig. 2.11: Esquema exagerado del efecto que tendría una fuerza sobre el sensor

#### 4.5. Aplicación en tareas de laboratorio

##### 4.5.1. Cálculo del periodo de un péndulo

Un péndulo simple consiste en una pequeña esfera suspendida de un soporte rígido con una cuerda ligera. Un péndulo completa un ciclo u oscilación cuando se desplaza desde una posición de máxima reflexión y regresa a esa misma posición. El tiempo que tarda en completar un ciclo se conoce como periodo del péndulo. El periodo de un péndulo es independiente de su amplitud o el movimiento es armónico simple si el ángulo que se forma para la máxima amplitud es menor de  $15^\circ$ . Otro factor que no afecta el periodo de un péndulo es su masa. Por lo tanto, el periodo de un péndulo depende solamente de su longitud.

La ecuación del movimiento del péndulo que describe la variación del ángulo en función del tiempo se puede obtener aplicando la primera ley de Newton y se puede expresar según:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \frac{g}{l} \sin \theta = 0$$

Donde  $l$  es la longitud del péndulo y  $g$  es la constante de gravedad. Si se define la frecuencia  $\omega_0^2$  a través de la relación:

$$\omega_0^2 = \frac{g}{l}$$

La ecuación que describe el movimiento del péndulo se puede expresar según:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \omega_0^2 \sin \theta = 0$$

Este sistema no es un verdadero oscilador armónico ya que para que lo fuese, el término de derecha debería ser proporcional al ángulo. Eso significa que las oscilaciones no son perfectamente sinusoidales. Pero si la amplitud de las oscilaciones es suficientemente pequeña, la oscilación será tan próxima a una senoide como se desee:

$$\sin \theta \approx \theta \rightarrow \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + \omega_0^2 \theta = 0$$

Cuya solución es una función armónica:

$$\theta = \theta_0 \cos(\omega_0 t + \delta)$$

Donde  $\theta_0$  es la amplitud de las oscilaciones y  $\delta$  es una constante de integración que viene determinada por las condiciones iniciales, y el periodo de oscilación viene determinado por la expresión:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

El equivalente de la ley de Newton para cuerpos en rotación es:

$$J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = \tau$$

Donde J es el momento de inercia del cuerpo alrededor del eje de rotación y  $\tau$  es el momento aplicado al objeto. En este caso el momento es igual al peso del objeto multiplicado por el brazo de la palanca del peso,  $l \cdot \sin \theta$ :

$$J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = -mgl \sin \theta$$

Con el signo menos se indica que el momento trata de dirigir el objeto hacia posiciones en las que  $\theta$  tiene signo contrario. Como en el péndulo simple, esta ecuación no es lineal, luego no corresponde a las ecuaciones diferenciales de un oscilador armónico. Sin embargo, para oscilaciones muy pequeñas,  $\sin \theta \approx \theta$ , y la ecuación anterior queda como:

$$J \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} = -mgl\theta$$

Que sí corresponde a un oscilador armónico cuya frecuencia angular es:

$$\omega = \sqrt{\frac{mgl}{J}}$$

Por lo tanto, para pequeñas oscilaciones, el periodo de oscilación es:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}$$

Donde puede considerarse:

- l: longitud del cordón
- g: aceleración de la gravedad
- R: radio del péndulo
- h: altura del péndulo
- i: radio de giro del péndulo para un eje baricéntrico paralelo al eje de rotación

$$i^2 = \frac{1}{4} R^2 + \frac{1}{12} h^2 + \left( l + \frac{h}{2} \right)^2$$

Y reescribir la ecuación para un péndulo físico:

$$T_F = 2\pi \sqrt{\frac{l + \frac{i^2}{l}}{g}}$$

### Objetivo general de la práctica

Determinar:

- \* Periodo gráficamente
- \* Periodo de péndulo simple
- \* Péndulo físico

### Materiales

- \* Sensor
- \* Cordón de alambre
- \* Aplicación Serial Bluetooth Terminal

### Metodología

Contar con un móvil con la función bluetooth activa y la aplicación abierta.

Conectar el sensor al alambre de longitud “L” conocida. Calibrar el sensor. Una vez listo, soltarlo y dejarlo oscilar hasta que se establezca su movimiento, y tomar los datos con la aplicación.

Descargar los datos desde la aplicación por vía mail o drive.

Confeccionar una hoja de Excel con los siguientes requisitos:

- \* Una tabla que muestre los datos de la aceleración en los ejes x, y, z, y los valores del tiempo (recordar que las unidades de  $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$  están en “mili-g” con  $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$  y el tiempo en “mili-segundos”).
- \* Graficar para cada eje los valores de aceleración vs tiempo (en 3 gráficos separados).
- \* Considerando los valores máximos de  $a_z$  (3 valores máximos que sean gráficamente similares y consecutivos) determinar los valores correspondientes de T para dichos valores. Determinar el periodo gráficamente.
- \* Determinar el periodo para un péndulo simple y físico.

### Consignas

Desarrollar un informe de laboratorio que contenga una introducción, desarrollo, resultados, análisis de resultados y conclusión. En la entrega del informe debe adjuntarse la planilla de cálculo.

En los apartados resultados, análisis de resultados y conclusión, los alumnos deberán interpretar y responder, justificando, las siguientes cuestiones:

1. ¿Qué datos se obtienen con el acelerómetro?
2. ¿Cuál es el significado físico de los gráficos confeccionados? ¿Qué describen?
3. Desarrollo de los cálculos empleados. Incorporando las tablas y gráficos utilizados.
4. ¿A qué se debe la diferencia de valores entre  $T_s$ ,  $T_F$  y  $T_G$ ?

**Resolución**

Una vez llevada a cabo la experiencia por parte de los alumnos, los datos son enviados desde la aplicación a los dispositivos, ya sea celulares o computadoras a través del mail o drive, para que todos los alumnos cuenten con los datos.

Los datos son copiados y llevados a una hoja nueva Excel, donde se ordenan y se trabajan de la siguiente manera:

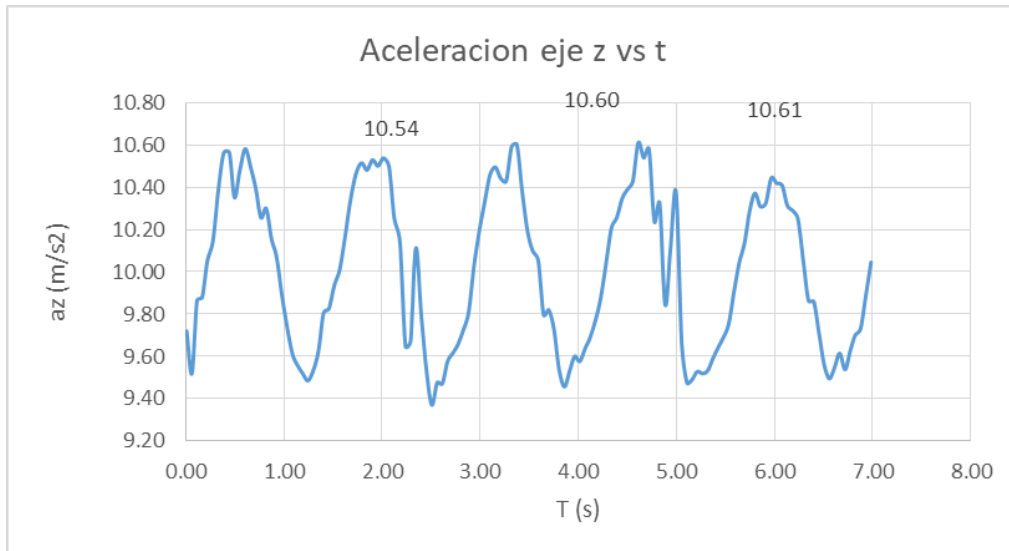
9	-4.82	14.28	990.78	2126	-1.89	15.26	1044.98	4285	2.5	11.35	1023.99
63	11.29	0.12	970.28	2183	0.06	17.21	1033.75	4339	1.04	13.79	1040.59
114	5.92	10.86	1005.43	2239	5.92	11.84	983.46	4393	0.55	11.35	1045.47
167	2.5	6.47	1006.9	2292	3.48	20.14	985.9	4448	1.53	11.84	1054.75
220	14.22	11.84	1024.48	2345	-5.31	18.19	1030.82	4503	2.99	12.33	1059.14
277	15.69	14.28	1034.24	2402	6.41	14.28	997.62	4557	4.94	12.33	1063.05
332	4.46	10.86	1058.65	2456	6.41	5.49	970.76	4612	2.99	11.35	1081.6
387	-10.19	10.38	1076.72	2508	7.39	11.84	955.14	4668	2.5	9.4	1074.28
445	3.48	5.49	1076.72	2562	5.43	9.89	965.88	4721	-3.85	14.28	1078.67
497	20.57	7.93	1055.24	2615	6.41	9.89	965.39	4776	3.97	5.98	1043.52
550	12.27	14.77	1067.93	2668	4.46	15.75	976.14	4830	3.97	13.31	1052.31
606	2.5	11.84	1078.67	2721	6.9	12.33	980.04	4886	5.43	13.31	1003.48
661	4.46	7.93	1069.89	2775	8.36	11.35	984.44	4940	-1.4	21.12	1030.33
713	1.04	10.38	1059.63	2829	8.36	7.93	991.27	4997	-2.87	12.33	1057.68
766	2.99	11.35	1045.47	2882	7.87	10.38	999.57	5055	11.29	9.4	984.92
820	5.43	8.91	1049.87	2935	7.39	13.79	1021.06	5108	2.5	1.59	965.88
874	6.9	7.45	1035.22	2990	5.92	9.89	1038.64	5160	8.85	4.52	967.35
926	2.5	12.82	1026.43	3044	2.99	11.35	1052.31	5213	7.39	8.91	971.25
979	-1.4	9.89	1008.36	3100	5.92	12.82	1065.98	5267	6.41	11.35	970.28
1033	-3.85	6.47	992.74	3154	7.39	13.31	1069.89	5320	0.55	11.35	971.74
1088	0.55	7.93	979.55	3209	12.76	4.52	1064.51	5373	3.97	13.31	977.6
1140	1.04	7.45	974.18	3265	10.8	14.28	1063.05	5427	1.04	9.4	982.97
1192	2.01	7.93	970.28	3321	6.41	3.54	1079.65	5481	6.41	12.33	987.85
1245	1.04	6.47	966.86	3375	0.55	18.68	1080.63	5534	4.46	8.42	994.2
1299	-0.43	8.91	971.74	3431	2.99	4.03	1057.19	5586	3.97	8.42	1009.34
1352	-1.89	7.93	981.02	3484	4.94	5.49	1038.64	5640	5.92	9.89	1023.5
1405	-3.85	9.4	999.57	3537	2.99	10.38	1029.36	5695	4.46	8.91	1033.26
1459	-0.92	7.45	1001.53	3592	2.01	6.47	1024.96	5748	4.46	8.42	1048.89
1514	2.01	10.38	1012.76	3647	4.94	8.91	998.6	5801	6.9	11.84	1057.19
1570	4.94	7.45	1020.57	3699	1.53	7.45	1001.04	5856	7.87	7.93	1050.84
1624	2.5	8.42	1036.19	3752	0.55	7.93	991.76	5911	12.76	10.86	1052.31
1678	-0.92	10.86	1053.77	3805	4.46	3.54	972.23	5967	6.9	18.68	1064.51
1734	-0.43	10.86	1066.47	3859	4.46	7.93	963.93	6022	8.36	14.28	1062.07
1791	1.53	11.35	1071.84	3911	0.06	6.47	971.25	6078	4.46	5.49	1061.1
1847	3.97	11.84	1068.42	3963	1.04	7.93	978.58	6131	8.85	10.86	1051.33
1903	10.8	10.38	1073.3	4016	-0.92	6.47	976.14	6185	7.39	9.89	1048.89
1959	11.29	5.49	1070.37	4071	0.55	7.93	982.48	6239	2.01	9.4	1044.98
2015	-0.43	13.31	1074.28	4123	-0.92	10.86	987.85	6294	3.97	9.4	1024.48
2071	-4.33	13.79	1070.37	4177	0.55	9.4	996.15	6347	6.41	5.98	1005.43
				4230	2.5	9.4	1006.9	6401	4.94	7.93	1004.94

En la primera columna se representan los valores de tiempo acumulado en milisegundos, en las siguientes columnas, los valores de aceleración en los ejes x,y,z respectivamente, en “mili-g”, considerando un valor de 9,8 m/s<sup>2</sup>.

Pasando los datos a las unidades correspondientes:

T (s)	ax (m/s <sup>2</sup> )	ay (m/s <sup>2</sup> )	az (m/s <sup>2</sup> )	T (s)	ax (m/s <sup>2</sup> )	ay (m/s <sup>2</sup> )	az (m/s <sup>2</sup> )	T (s)	ax (m/s <sup>2</sup> )	ay (m/s <sup>2</sup> )	az (m/s <sup>2</sup> )
0.01	0.00	0.01	9.72	2.13	0.00	0.02	10.25	4.23	0.00	0.01	9.88
0.06	0.01	0.00	9.52	2.18	0.00	0.02	10.14	4.29	0.00	0.01	10.05
0.11	0.01	0.01	9.86	2.24	0.01	0.01	9.65	4.34	0.00	0.01	10.21
0.17	0.00	0.01	9.88	2.29	0.00	0.02	9.67	4.39	0.00	0.01	10.26
0.22	0.01	0.01	10.05	2.35	-0.01	0.02	10.11	4.45	0.00	0.01	10.35
0.28	0.02	0.01	10.15	2.40	0.01	0.01	9.79	4.50	0.00	0.01	10.39
0.33	0.00	0.01	10.39	2.46	0.01	0.01	9.52	4.56	0.00	0.01	10.43
0.39	-0.01	0.01	10.56	2.51	0.01	0.01	9.37	4.61	0.00	0.01	10.61
0.45	0.00	0.01	10.56	2.56	0.01	0.01	9.48	4.67	0.00	0.01	10.54
0.50	0.02	0.01	10.35	2.62	0.01	0.01	9.47	4.72	0.00	0.01	10.58
0.55	0.01	0.01	10.48	2.67	0.00	0.02	9.58	4.78	0.00	0.01	10.24
0.61	0.00	0.01	10.58	2.72	0.01	0.01	9.61	4.83	0.00	0.01	10.32
0.66	0.00	0.01	10.50	2.78	0.01	0.01	9.66	4.89	0.01	0.01	9.84
0.71	0.00	0.01	10.39	2.83	0.01	0.01	9.72	4.94	0.00	0.02	10.11
0.77	0.00	0.01	10.26	2.88	0.01	0.01	9.81	5.00	0.00	0.01	10.38
0.82	0.01	0.01	10.30	2.94	0.01	0.01	10.02	5.06	0.01	0.01	9.66
0.87	0.01	0.01	10.16	2.99	0.01	0.01	10.19	5.11	0.00	0.00	9.48
0.93	0.00	0.01	10.07	3.04	0.00	0.01	10.32	5.16	0.01	0.00	9.49
0.98	0.00	0.01	9.89	3.10	0.01	0.01	10.46	5.21	0.01	0.01	9.53
1.03	0.00	0.01	9.74	3.15	0.01	0.01	10.50	5.27	0.01	0.01	9.52
1.09	0.00	0.01	9.61	3.21	0.01	0.00	10.44	5.32	0.00	0.01	9.53
1.14	0.00	0.01	9.56	3.27	0.01	0.01	10.43	5.37	0.00	0.01	9.59
1.19	0.00	0.01	9.52	3.32	0.01	0.00	10.59	5.43	0.00	0.01	9.64
1.25	0.00	0.01	9.48	3.38	0.00	0.02	10.60	5.48	0.01	0.01	9.69
1.30	0.00	0.01	9.53	3.43	0.00	0.00	10.37	5.53	0.00	0.01	9.75
1.35	0.00	0.01	9.62	3.48	0.00	0.01	10.19	5.59	0.00	0.01	9.90
1.41	0.00	0.01	9.81	3.54	0.00	0.01	10.10	5.64	0.01	0.01	10.04
1.46	0.00	0.01	9.83	3.59	0.00	0.01	10.05	5.70	0.00	0.01	10.14
1.51	0.00	0.01	9.94	3.65	0.00	0.01	9.80	5.75	0.00	0.01	10.29
1.57	0.00	0.01	10.01	3.70	0.00	0.01	9.82	5.80	0.01	0.01	10.37
1.62	0.00	0.01	10.17	3.75	0.00	0.01	9.73	5.86	0.01	0.01	10.31
1.68	0.00	0.01	10.34	3.81	0.00	0.00	9.54	5.91	0.01	0.01	10.32
1.73	0.00	0.01	10.46	3.86	0.00	0.01	9.46	5.97	0.01	0.02	10.44
1.79	0.00	0.01	10.51	3.91	0.00	0.01	9.53	6.02	0.01	0.01	10.42
1.85	0.00	0.01	10.48	3.96	0.00	0.01	9.60	6.08	0.00	0.01	10.41
1.90	0.01	0.01	10.53	4.02	0.00	0.01	9.58	6.13	0.01	0.01	10.31
1.96	0.01	0.01	10.50	4.07	0.00	0.01	9.64	6.19	0.01	0.01	10.29
2.02	0.00	0.01	10.54	4.12	0.00	0.01	9.69	6.24	0.00	0.01	10.25
2.07	0.00	0.01	10.50	4.18	0.00	0.01	9.77	6.29	0.00	0.01	10.05
								6.35	0.01	0.01	9.86
								6.40	0.00	0.01	9.86
								6.46	0.00	0.01	9.71

Al estar estudiando el movimiento del sensor como un péndulo, se representa la variación de la aceleración solo en el eje z:



Se indican los valores máximos de “ $a_z$ ” consecutivos que corresponden al momento en el cual el péndulo alcanza la máxima aceleración en una oscilación.

Gráficamente, pueden obtenerse los valores de tiempo acumulado para cada máximo de “ $a_z$ ”, cuya diferencia corresponde a los periodos de cada oscilación:

	Max 1	Max 2	Max 3	Dif1	Dif2
az	10.54	10.60	10.61		
T (s)	2.02	3.38	4.61	1.36	1.24

Los alumnos determinan los valores del periodo de manera gráfica, considerando el promedio entre los periodos, como señal de haz:

$$T_{\text{Grafico}} = \frac{Dif_1 + Dif_2}{2}$$

Ese valor es corregido, ya que debe considerarse el doble de ese valor.

Se toman las mediciones de longitud del cordón, altura del péndulo, masa, radio, y se calcula el radio de giro:

Longitud del cordón L	1.90	m
Altura del péndulo h	0.10	m
Aceleración de la gravedad g	9.81	m/s <sup>2</sup>
Masa m	0.22	kg
Radio del péndulo R	0.02	m
Radio de giro i <sup>2</sup>	3.80	m <sup>2</sup>

Se calcula el periodo gráficamente, simple y físico, obteniéndose los resultados:

Periodos	T	
Graficamente	1.30	s
Péndulo corregido	2.60	s
Péndulo simple	2.77	s
Péndulo físico	3.96	s

Los valores de T para el péndulo corregido y simple son similares, esto muestra la exactitud del sensor, ya que el T para un péndulo simple depende de la longitud del cordón "l". El T para un péndulo físico es mayor porque además de considerar "l" se toma en cuenta el radio de giro "i" del péndulo, es decir, es más exacto.

### Conclusión

Con esta experiencia, los alumnos de Física I (primer año de Ing. Civil con Or. Hid.) pudieron reforzar los conceptos teóricos y prácticos en el laboratorio, usando por primera vez en la carrera un sensor hecho por la cátedra y el celular con una aplicación, además de trabajar con Excel. Además, se comentó sobre las aplicaciones prácticas a la ingeniería de estos elementos y todos los usos que posee, pidiéndose una breve investigación, por parte de los alumnos, orientada al uso de sensores en obras civiles e hidráulicas, a modo de acercarlos a problemáticas reales de la ingeniería.

#### 4.5.2. Cálculo de la constante de un resorte

El objetivo de esta experiencia es la determinación de la constante elástica de un resorte usando el sensor y comparando los resultados con los obtenidos a partir de los conceptos de energía.

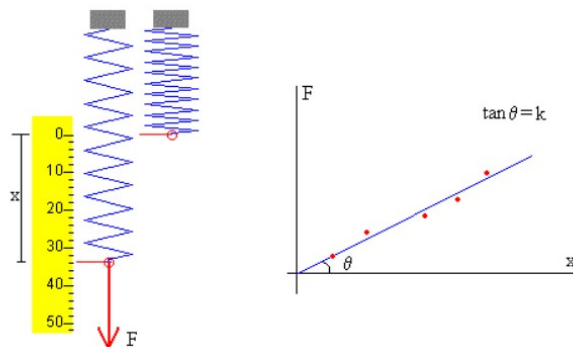
Si sobre un resorte, colocado verticalmente, y atado del extremo superior, se colocan diferentes cantidades de masa de su extremo libre, se irán produciendo distintos alargamientos que serán proporcionales a los pesos de dichas masas.

La relación entre los alargamientos producidos en el resorte y las fuerzas aplicadas, viene dada por la ley de Hooke, a través de la constante de elástica del resorte ( $k$ ).

Para esta experiencia se dispone de un resorte metálico, de constante elástica desconocida, un juego de masas con forma de disco, de 10 gramos cada una y un soporte, también de 10 gramos, en el que se colocan las distintas masas. Este soporte se cuelga del extremo libre del resorte. También se dispone de un soporte vertical con base para poder fijar el resorte, y así mismo, una regla graduada con dos marcadores para poder medir los diferentes alargamientos.

Al colocar el soporte en el resorte se produce el primer alargamiento, y se coloca en dicha altura el marcador superior de la regla, tomándolo como posición inicial. Las masas se irán incrementando en 10 g y se irán produciendo distintos alargamientos que pueden medirse con el marcador inferior de la regla graduada. El incremento en el peso de las masas es igual al peso de cada masa menos el peso de la masa inicial.

Se representan las fuerzas aplicadas en función de los alargamientos producidos, y éstos se pueden ajustar una recta por el método de los mínimos cuadrados. A partir de la pendiente de la recta de ajuste se obtiene la constante elástica del resorte,  $k$ , con su error.



El periodo de oscilación de un sistema masa – resorte puede determinarse a partir de la fórmula:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Siendo:

- $m$ : masa
- $k$ : constante de hook para el resorte

### Objetivo general

Determinar la constante de  $k$  de un resorte confeccionando un sistema masa – resorte con el sensor y un resorte metálico.

### Materiales

- \* Sensor
- \* Resorte metálico
- \* Aplicación Serial Bluetooth Terminal

### Metodología

Contar con un móvil con la función bluetooth activa y la aplicación abierta.

Conectar el acelerómetro al resorte. Encender el dispositivo y conectarlo por bluetooth a la aplicación. Poner el sensor en posición de equilibrio y calibrarlo. Una vez listo, soltarlo y dejarlo oscilar hasta que se establezca su movimiento, y tomar los datos con la aplicación.

Descargar los datos desde la aplicación por vía mail o drive.

Confeccionar una hoja de Excel con los siguientes requisitos:

- \* Una tabla que muestre los datos de la aceleración en los ejes x, y, z, y los valores del tiempo (recordar que las unidades de  $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$  están en “mg” con  $g = 9,8 \frac{m}{s^2}$  y el tiempo en “ms”).
- \* Graficar para el eje z los valores de aceleración vs tiempo.
- \* Determinar 2 valores de  $a_z$  máximos y consecutivos. Determinar gráficamente el periodo de oscilación del resorte.
- \* Calcular el valor de la constante del resorte “k”.

### Consignas

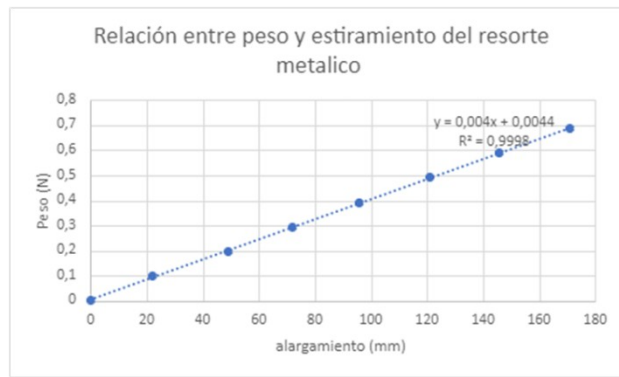
Desarrollar un informe de laboratorio que contenga una introducción, desarrollo, resultados, análisis de resultados y conclusión.

En los apartados resultados, análisis de resultados y conclusión, los alumnos deberán interpretar y responder, justificando, las siguientes cuestiones:

1. ¿Qué datos se obtienen con el sensor?
2. ¿Cuál es el significado físico de los gráficos confeccionados? ¿Qué describen?
3. Desarrollo de los cálculos empleados. Incorporando las tablas y gráficos utilizados.
4. Comparar el valor obtenido de “k” en esta experiencia con el obtenido por energía ( $k = 4,40 \text{ N/m}$ ).

Los alumnos llegaron a los siguientes resultados utilizando los conceptos energéticos:

Resorte Metálico			
Medición	Carga (N)	Alargamiento ( $X_i - X_0$ ) (mm)	$K = N / (X_i - X_0)$
0	0		0
1	0,0981	22	0,0045
2	0,1962	49	0,0040
3	0,2943	72	0,0041
4	0,3924	96	0,0041
5	0,4905	121	0,0041
6	0,5886	146	0,0040
7	0,6867	171	0,0040
		Promedio	0,0044

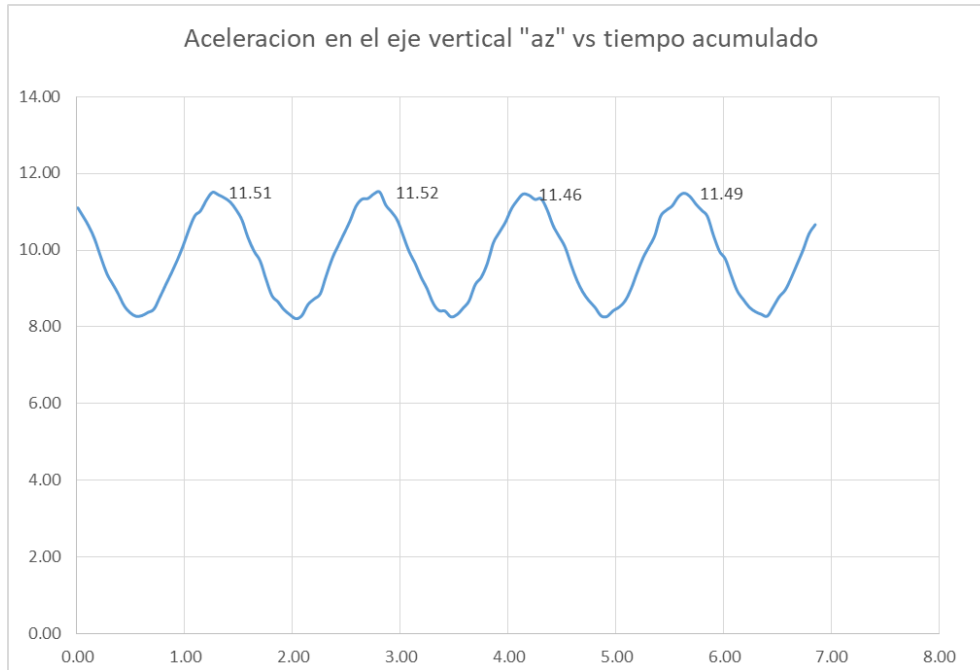


El valor de la constante elástica “k” calculado y el determinado gráficamente como la pendiente de la recta son similares, aproximadamente de 4,44 N/m.

Usando el sensor, se obtienen los valores de “a<sub>z</sub>”, aceleración en el eje vertical, los cuales se reciben vía mail gracias a la aplicación y se trabajan en una hoja de Excel.

T (s)	az (m/s <sup>2</sup> )				
0.01	11.10	2.14	8.58	4.36	11.06
0.06	10.87	2.20	8.73	4.42	10.64
0.11	10.61	2.26	8.87	4.47	10.36
0.17	10.28	2.31	9.34	4.53	10.07
0.22	9.82	2.37	9.80	4.59	9.60
0.28	9.39	2.42	10.12	4.64	9.21
0.33	9.13	2.48	10.43	4.69	8.91
0.38	8.87	2.53	10.76	4.75	8.69
0.44	8.55	2.59	11.14	4.81	8.51
0.49	8.37	2.64	11.33	4.86	8.29
0.55	8.28	2.70	11.35	4.92	8.27
0.60	8.30	2.75	11.47	4.97	8.42
0.66	8.38	2.81	11.52	5.03	8.52
0.71	8.46	2.86	11.18	5.09	8.68
0.77	8.76	2.92	10.99	5.14	9.00
0.82	9.09	2.97	10.77	5.20	9.42
0.88	9.41	3.03	10.37	5.25	9.80
0.93	9.75	3.08	9.96	5.30	10.08
0.98	10.10	3.14	9.64	5.36	10.38
1.04	10.51	3.19	9.30	5.41	10.89
1.09	10.89	3.25	9.01	5.47	11.05
1.15	11.03	3.30	8.62	5.52	11.16
1.20	11.32	3.36	8.43	5.58	11.39
1.26	11.51	3.41	8.42	5.63	11.49
1.31	11.44	3.47	8.26	5.69	11.40
1.37	11.37	3.53	8.33	5.74	11.20
1.42	11.25	3.58	8.49	5.80	11.04
1.48	11.05	3.64	8.68	5.85	10.88
1.53	10.78	3.69	9.10	5.91	10.38
1.59	10.33	3.75	9.30	5.96	9.97
1.64	9.97	3.81	9.66	6.01	9.77
1.70	9.72	3.86	10.19	6.07	9.35
1.76	9.23	3.92	10.47	6.12	8.94
1.81	8.81	3.98	10.73	6.18	8.72
1.86	8.66	4.03	11.07	6.24	8.52
1.92	8.45	4.08	11.30	6.29	8.40
1.98	8.32	4.14	11.46	6.35	8.33
2.03	8.21	4.19	11.43	6.40	8.28
2.09	8.30	4.25	11.32	6.46	8.52
		4.31	11.34	6.51	8.78

Se grafican los valores de “a<sub>z</sub>” en función del tiempo acumulado, y de esa forma pueden obtenerse los valores máximos de la aceleración, los cuales corresponden a la máxima extensión del resorte y los valores de tiempo acumulado asociados:



Haciendo la diferencia de valores de tiempo se conoce el periodo de oscilación y usando la fórmula del periodo:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

Se determina la constante “k” del resorte:

	T (s)	az (m/s <sup>2</sup> )
1	2.81	11.52
2	4.14	11.46
Diferencia T	1.33	
Calculo de k	4.47	

Si bien, el valor de “k” obtenido por el método energético de 4,44 N/m difiere de 4,47 N/m obtenido con el sensor aplicando el método oscilatorio, los valores son bastante cercanos, por lo que la diferencia puede deberse a inexactitudes en las mediciones.

### Conclusión

En este caso, los alumnos además de incorporar nuevos elementos, aplicaciones y programas, pudieron comparar los resultados obtenidos entre una experiencia con el método energético y la misma experiencia, pero aplicando el método oscilatorio y el sensor.

## 5. Conclusiones y Recomendaciones

- Modificando el cuerpo físico del sensor, este podría ser apto para la medición de oscilaciones y desplazamientos horizontales, tanto en obras civiles, como en estructuras emplazadas en zonas sísmicas y en obras hidráulicas, como una presa. Este tipo de herramienta es muy utilizado en la actualidad.
- La utilización de los sensores para la medición de vibraciones es de fundamental importancia a la hora de comprobar el estado de una obra y asegurar su permanencia, y alertar la presencia de esfuerzos que pueden poner en riesgo la estructura in-situ.
- Se puede implementar el sensor para todas las experiencias de laboratorio de Física I.
- Las experiencias de laboratorio acercaron a los alumnos de primer y segundo año de la carrera de Ingeniería Civil a las prácticas cotidianas que puede desempeñar un profesional, además de promover el uso de aplicaciones, celular y Excel.
- Se propone la implementación del sensor en prácticas de laboratorio de Física II para el estudio de la composición y armado del prototipo a modo de complementar el aprendizaje y aportar a la relación de contenidos.

## 6. Bibliografía

- Resnick – Halliday. Física. Parte 1.
- Resnick – Halliday. Física. Parte 2.
- David Galán Martín. Sensores. Implementación.
- Apuntes de cátedra. Ing. Prof. Alfonso Meroño.
- Apuntes de cátedra. Ing. Lorena León.
- Apuntes de cátedra. Ing. Prof. Alejandro Rosales.
- Instituto tecnológico de colima. Departamento de ingeniería mecatronica. Ing. Raúl Ignacio García Adame.
- Determinación de características dinámicas de estructuras. Carlos Blanco Fernández.