

En esta práctica estudiamos un análogo mecánico de movimiento oscilatorio, el péndulo. La reacción Belousov–Zhabotinsky es un ejemplo de oscilador químico. Es de importancia para la química teórica, mostrando que las reacciones químicas no tienen que estar necesariamente en equilibrio termodinámico.

## 1. Péndulo simple

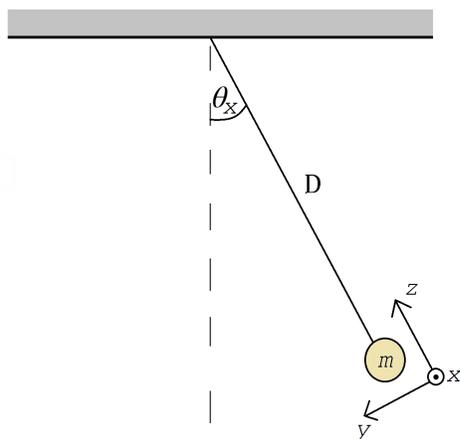


Figura 1: Esquema del péndulo simple: una masa puntual  $m$  sostenida por una cuerda de largo  $D$  en rotación alrededor de el eje  $\vec{X}$ . La aceleración lineal  $a_y$  es proporcional a  $\ddot{\theta}_x$ . Una propiedad destacable de este sistema es que periodo  $T$  del oscilación depende solamente del largo y no de la masa (ver Ecuación 2).

El péndulo simple es constituido por una masa puntual  $m$  sostenida por una cuerda de largo  $D$  en rotación alrededor de un eje ( $\vec{X}$  en nuestro esquema 1). Consideramos el movimiento del centro de masa en torno al eje  $\vec{X}$  después de soltarlo con amplitud angular  $A$  (la velocidad inicial es nula). Para pequeñas amplitudes angulares (menores de  $10^\circ$ , de manera que  $\sin \theta \approx \theta$ ) la evolución del ángulo en función del tiempo es:

$$\theta_x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia angular. La relación entre  $\omega$ , cuyas unidades son radianes por segundo (rad/s) y el período de la oscilación  $T = 2\pi/\omega$  (en segundo), que es el tiempo que le toma al sistema para realizar una oscilación completa. El periodo esta relacionado solamente con  $D$ , el largo del péndulo, y la gravedad  $g$ :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{D}{g}} \quad (2)$$

El acelerómetro mide las tres componentes de la aceleración ( $a_x$ ,  $a_y$  y  $a_z$ ) según las direcciones ( $\vec{x}$ ,  $\vec{y}$ ,  $\vec{z}$ ) de la Fig.2. La componente en la dirección  $\vec{y}$  está dada por:

$$a_y = D \cdot \ddot{\theta}_x = -DA\omega^2 \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

## 2. Oscilaciones con un *smartphone*

El montaje de la práctica se representa en la Fig. 2 donde  $(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$  es el referencial fijo. Consideremos el caso en que el péndulo oscila en torno al eje  $\vec{X}$  y despreciando el movimiento oscilatorio en torno al eje  $\vec{Y}$ . Usaremos un sensor estándar de los *smartphones*, que son los acelerómetros, para estudiar el movimiento de un péndulo constituido por el propio celular. Este mide la aceleración lineal del dispositivo en tres direcciones,  $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  es el referencial asociado al celular, ver Fig. 2. Podemos considerar este sistema como un péndulo simple si el  $D$  es por lo menos dos veces mayor que el largo del celular  $c$  a lo largo del eje  $\vec{y}$  (perturbación inferior a 1%<sup>1</sup>). En este caso se puede considerar que la masa del celular se concentra puntualmente asemejándose al péndulo simple. En este montaje  $D$  es el largo del brazo imaginario del péndulo si éste colgara desde su centro.

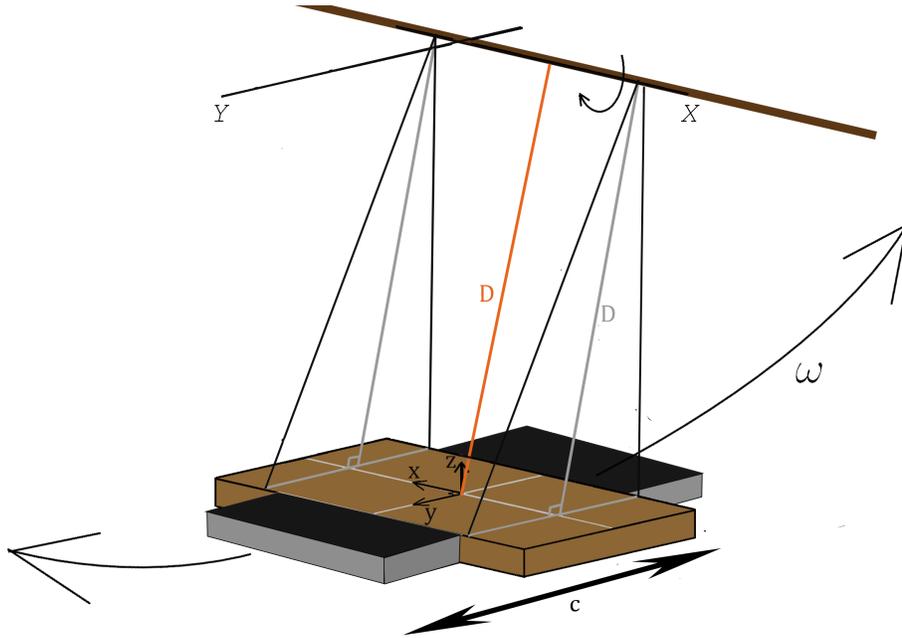


Figura 2: Esquema del montaje experimental con el celular (negro) y su referencial asociado  $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ , de largo  $c$  a lo largo del eje  $\vec{y}$ . Las 4 cuerdas dan 4 puntos de agarre del rollo de papel (marón) y permiten limitar el movimiento en un solo eje (rotación alrededor de  $\vec{X}$ ).  $(\vec{X}, \vec{Y}, \vec{Z})$  es el referencial fijo. Se puede medir la pulsación  $\omega$  del péndulo de largo  $D$  analizando la aceleración  $a_y$  según la dirección  $\vec{y}$

<sup>1</sup>Comparando al periodo  $T$  del péndulo de masa puntual, el periodo  $T'$  del sistema tomando en cuenta la geometría del celular es  $T' = T \sqrt{1 + \frac{(c/D)^2}{12}}$ , dando una variación relativa de  $\frac{T'-T}{T} \approx \frac{(c/D)^2}{24}$

### 3. Guía experimental para la medición del período y el largo de la cuerda

El objetivo de esta experiencia es calcular el período de oscilación de un péndulo y la incertidumbre asociada a esta medida indirecta utilizando propagación de errores. Para eso vas a necesitar armar un péndulo con tu celular como se especifica en el vídeo de la Actividad 2: Péndulo.

- Una vez que tengas armado el dispositivo, encuentra la actividad *Aceleración con g / Acceleration with g*, en la sección Sensores de phyphox.
- Cuelga tu celular de lugar seguro y suéltalo, desde el reposo, desde un ángulo pequeño, déjalo oscilar hasta que se detenga.
- Exporta tus datos<sup>2</sup> y pon atención en que dirección se movía tu celular, así sabrás cuál de las 3 aceleraciones registradas usarás.
- Representa gráficamente tus datos, cuenta las oscilaciones  $N$  en la figura y estima los tiempos  $t_N$  y  $t_0$  donde la aceleración es máxima durante la oscilación  $N$  y de la oscilación 0. Si seleccionas la gráfica, y posicionas el *mouse* arriba del punto de interés, puedes leer el tiempo. Calcula el período

$$T = \frac{t_N - t_0}{N} \quad (4)$$

- ¿Como puedes estimar la incertidumbre  $\Delta t$  asociada a  $t_N$  y  $t_0$ ?
- Calcula la incertidumbre  $\Delta T$  asociada a  $T$  por propagación de incertidumbre.
- Ahora con el período calcula el largo del péndulo usando la fórmula

$$D = g \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 \quad (5)$$

- Usando de nuevo propagación de incertidumbres calcula la incertidumbre  $\Delta D$  asociada a  $D$ .
- Calcula el error relativo porcentual de  $D$  comparando la medición indirecta hecha (a través del periodo) con una medición directa (mide  $D$  con una cinta métrica, por ejemplo).

---

<sup>2</sup>De la misma forma que los datos de tiempo entre rebotes con el cronometro acústico: *exportar Data/Excel/Sheets/Saveas Google Sheets*, luego copiar la primera hoja hacia el documento compartido.