

PLANO INCLINADO

Objetivos

Determinar la aceleración de un cuerpo que cae por un plano inclinado. Medir la aceleración con el móvil y mediante captura de vídeo. Comparar ambas aceleraciones.

Material

- Plano inclinado casero
- Carrito con ruedas
- Teléfono móvil
- Sistema de captura de vídeo con sistema de sujeción
- Ordenador con hoja de cálculo y programa *Tracker*

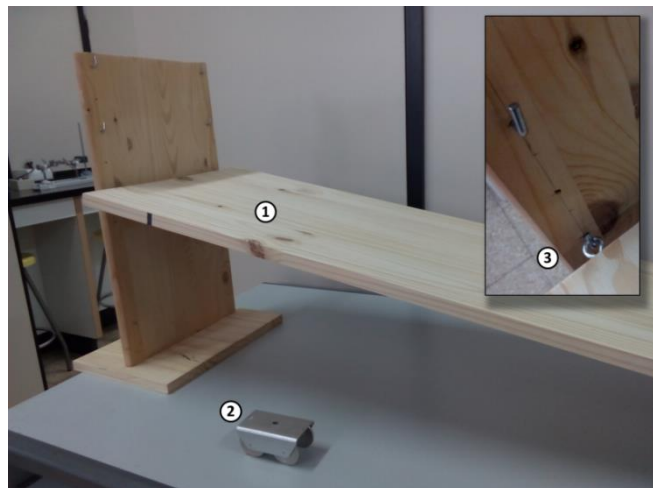
Aplicaciones recomendadas

- Para Android: *Physics Toolbox Suite*, función *G-Force Meter* o *Linear Accelerometer*
- Para iOS: *Acceleration 1.0*

Montaje y procedimiento

Como plano inclinado se puede utilizar un tablero de madera (1), de 1,5 m de longitud, aproximadamente. Unas hembrillas atornilladas en el canto del tablero se insertan (3) en alcayatas atornilladas al soporte vertical; de este modo es posible modificar cómodamente la inclinación del plano.

El teléfono móvil con el que se van a registrar las aceleraciones se fija con cinta adhesiva al carrito (2). Al mismo tiempo, el equipo de captura de vídeo



debe sujetarse firmemente (por ejemplo mediante un trípode), de modo que en pantalla se vea todo el trayecto de caída. El operario de la cámara y el del teléfono deben coordinarse de modo que la secuencia de vídeo incluya los instantes anteriores al inicio de la caída del carrito.

Los datos de aceleración capturados por el teléfono se envían por correo electrónico y se abren con una hoja de cálculo. Representando gráficamente las lecturas del acelerómetro antes y después de comenzar el movimiento se determinará la aceleración promedio durante la caída.

Por su parte, la secuencia de vídeo se procesa mediante el programa *Tracker*. La aceleración promedio obtenida a partir del estudio de la secuencia se comparará con la deducida a partir de las lecturas del acelerómetro.

LA MÁQUINA DE ATWOOD

Objetivos

Determinar la aceleración de un cuerpo que cae utilizando la máquina de Atwood. Medir la aceleración con el móvil y mediante captura de vídeo. Comparar ambas aceleraciones.

Material

- Dos pequeñas poleas
- Hilo o cuerda
- 2 Teléfonos móviles y/o cámara de vídeo
- Sistema de captura de vídeo con sistema de sujeción
- Ordenador con hoja de cálculo y programa *Tracker*
- Elementos de sujeción para teléfono
- Pesas
- Báscula

Aplicaciones recomendadas

- Para Android: *Physics Toolbox Suite*, función *G-Force Meter* o *Linear Accelerometer*
- Para iOS: *Acceleration 1.0*

Montaje y procedimiento

Tras averiguar la masa del móvil mediante la báscula, y seleccionar en el juego de pesas una masa que difiera aproximadamente en unos 20 g con la de nuestro celular, se introducirá el móvil en el espacio protegido habilitado para ello. Por otra parte el equipo de captura de vídeo debe de estar bien fijado para poder recoger la película del movimiento objeto del problema. Una vez preparado el sistema se selecciona el acelerómetro en el teléfono y se prepara la grabación de la secuencia. El operario de la cámara y el del teléfono deben coordinarse de modo que la secuencia de vídeo incluya los instantes anteriores al inicio de la caída del carrito.



Una vez finalizada la grabación y detenido el programa de toma de datos del móvil, éstos son enviados al ordenador para ser procesados mediante *Tracker* y mediante la hoja de cálculo.

Resultados

Se trata de calcular la aceleración del movimiento y comparar sus resultados por dos vías. Una de ellas a través de la hoja cálculo realizando una gráfica de la media móvil de la aceleración en el eje correspondiente en función del tiempo. La otra a partir del procesamiento de las imágenes con *Tracker*, ajustando los datos mediante las herramientas de análisis del programa *Tracker*, calculando los ajustes para la fórmula experimental del espacio recorrido y de la velocidad a lo largo de eje de movimiento.

FUERZA CENTRÍFUGA

Objetivos

Determinar la aceleración centrífuga de un móvil en un sistema de referencia en rotación. Medir la aceleración con el móvil y mediante captura de vídeo. Comparar ambas aceleraciones.

Material

- Plataforma giratoria
- Teléfono móvil con sistema de sujeción (cinta adhesiva de doble cara)
- Sistema de captura de vídeo con sistema de sujeción
- Ordenador con hoja de cálculo y programa *Tracker*

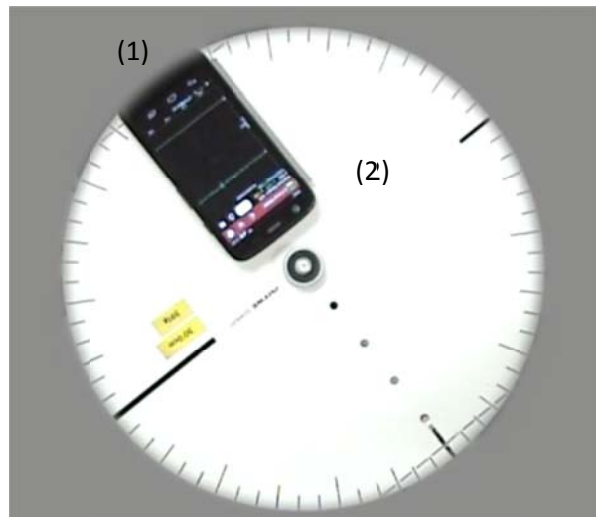
Aplicaciones recomendadas

- Para Android: Physics Toolbox Suite, función Linear Accelerometer o G-Force
- Para iPhones: Acceleration 1.0

Montaje y procedimiento

Como plataforma giratoria se puede utilizar cualquier sistema del que dispongamos (rueda de bicicleta, giradiscos, motor ...).

El teléfono móvil con el que se van a registrar las aceleraciones (1) se fija con cinta adhesiva de doble cara a la plataforma giratoria (2) (Fig.1). Al mismo tiempo, el equipo de captura de vídeo debe colocarse firmemente, por ejemplo mediante un trípode, de modo que se obtenga una toma cenital del sistema giratorio disco-móvil.



Para teléfonos Android abrir Physics Toolbox Suite en la opción Accelerometer o G-Force. La elección de una u otra dependerá de los sensores de los que disponga el teléfono. Para iPhones abrir Acceleration 1.0. A continuación comenzar a grabar los datos a la vez que se inicia la grabación. Poner en marcha el sistema de rotación a una velocidad relativamente alta, mantenerla unos 5 segundos, frenar moderadamente y mantener otros 5 segundos. Parar el sistema y terminar ambas grabaciones, la del acelerómetro y la de captura de vídeo.

Los datos de aceleración capturados por el teléfono se envían al ordenador por correo electrónico o por Drive o por cable y se procesan mediante hoja de cálculo. La secuencia de vídeo se envía al ordenador por cualquiera de los procedimientos anteriores y se procesa mediante el programa Tracker.

Tras la elaboración de los datos obtenidos del móvil mediante una hoja de cálculo, Excell por ejemplo, se deberían obtener unas gráficas similares a las de la Fig.2.

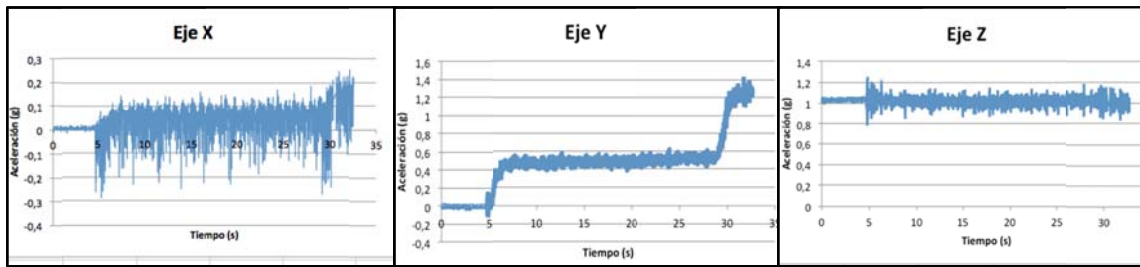


Fig. 2.- Ejemplo de las graficas obtenidas a partir de los datos del móvil.

Una vez tratada la grabación con Tracker, se obtendrá una pantalla como la mostrada en la Fig.3.

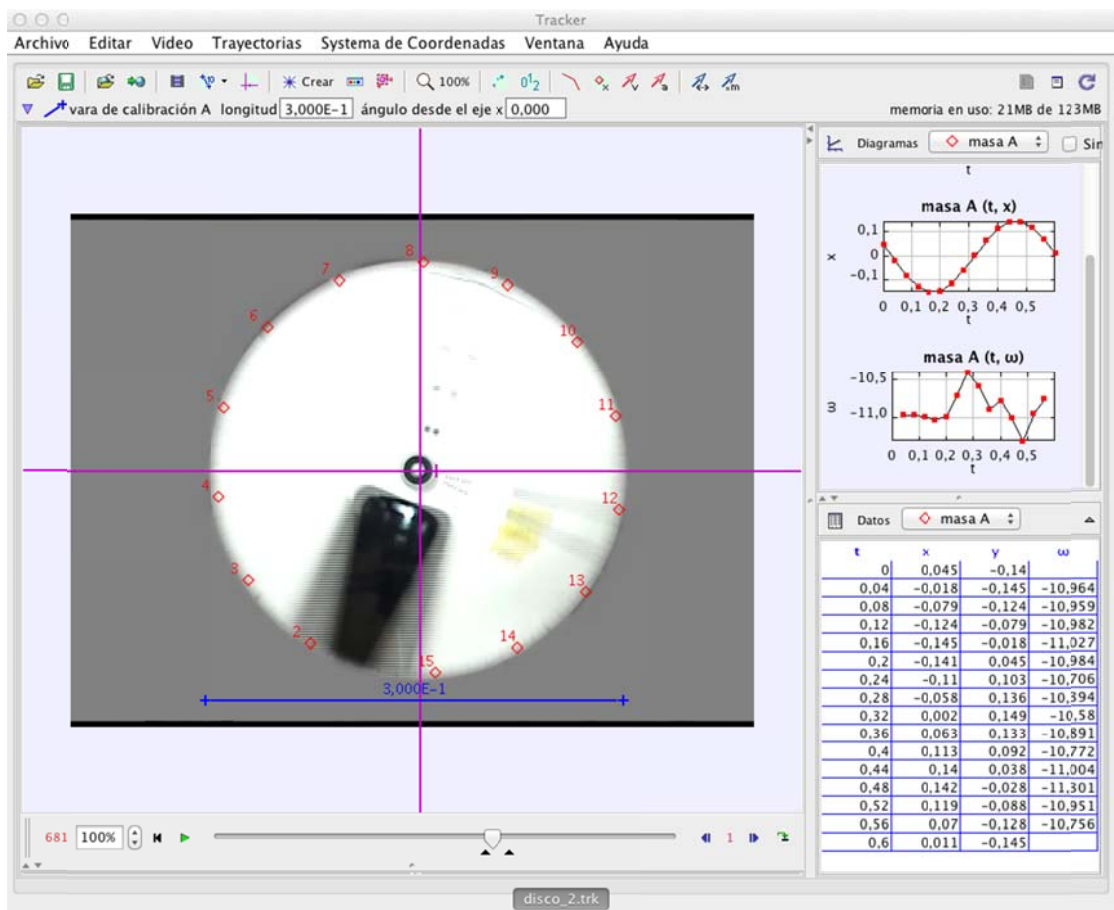


Fig. 3.- Ejemplo de tratamiento de la grabación con Tracker.

Una vez hecho esto podemos hacer una serie de cálculos y responder una serie de preguntas del tipo:

- Deducir la posición de los ejes X, Y y Z del teléfono a partir de la observación de los valores obtenidos.
- Teniendo en cuenta la relación entre la aceleración centrífuga a_c , la velocidad angular ω y el radio de la trayectoria del móvil, r :

$$a_c = \omega^2 r$$

¿Son compatibles los valores de la aceleración centrífuga obtenidos por ambos procedimientos?

¿Podríamos estimar la posición del sensor del acelerómetro (o G-Force en su caso)?

¿Se le ocurre cómo afianzar esta estimación?

- ¿Estarían bien empleados los términos “aceleración centrífuga” o “fuerza centrífuga” en este guión o sería mejor hablar de aceleración/fuerza centrípeta o normal, como se dice insistentemente en clase, por ser sólo éstas últimas magnitudes “reales”?

ESTUDIO DEL COEFICIENTE DE RESTITUCIÓN

Objetivos

Analizar el concepto de choque inelástico frente al principio de conservación de la energía.

Determinar el valor experimental del coeficiente de restitución de diversos cuerpos (pelota de ping-pong, pelota de golf, pelota de goma,...)

Material

- Pelotas de diferentes materiales.
- Teléfono móvil.
- Ordenador y hoja de cálculo
- Regla o cinta métrica.

Aplicaciones recomendadas

- Para Android: *Physics Toolbox Suite*, función *Sound Meter*.
- Programa de software libre *Tracker*.

Fundamentos

Un medio de medir la elasticidad de un choque, es relacionando las velocidades relativas antes del choque y después del mismo.

Las colisiones inelásticas se caracterizan por una pérdida en la energía cinética, podemos representar por e , la fracción de la velocidad relativa final entre la inicial, o sea:

$$e = -\frac{v_{1f} - v_{2f}}{v_{1i} - v_{2i}} \quad (1)$$

Donde e se conoce como el coeficiente de restitución

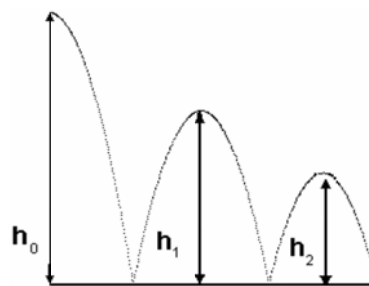
El método que usaremos para medir el coeficiente de restitución está basado en dejar caer una pelota de diferentes materiales, desde una altura inicial h_0 , siendo h_i las alturas sucesivas alcanzadas por la pelota después del choque con la superficie del suelo (figura 1).

Dado que el sistema 2 es el suelo y su velocidad es nula ($v_2 = 0$), la expresión del coeficiente de restitución se simplifica a:

$$e = -\frac{v_d}{v_a} \quad (2)$$

Donde v_a y v_d son las velocidades de la pelota antes del choque y después del choque.

Despreciando el rozamiento con el aire, se puede interpretar el movimiento como uniformemente acelerado y por tanto:



$$h_f = h_i \pm v_i t - \frac{1}{2} g t^2$$

teniendo en cuenta que $h_f = 0$ y $v_i = 0 \rightarrow h_i = \frac{1}{2} g t^2$ siendo t el tiempo de caída.

Despejando el tiempo y recordando que en este caso $v_f = -g t$

$$t_j = \sqrt{\frac{2 h_j}{g}} \text{ con } j \text{ desde } 0 \text{ hasta } n - 1 \rightarrow v_j = \sqrt{2g h_j}$$

Identificando v_j con v_{1a} y v_{j+1} con v_{1d} llegamos a la expresión del cálculo del coeficiente de restitución:

$$e = -\frac{+\sqrt{2g h_{j+1}}}{-\sqrt{2g h_j}} = \sqrt{\frac{h_{j+1}}{h_j}} \quad (3)$$

Es decir, es suficiente la medida de las diferentes alturas del rebote para el cálculo de dicho coeficiente. Pero esto no suele resultar sencillo desde el punto de vista práctico.

Otra posibilidad sería utilizar los tiempos de vuelo de la pelota entre rebotes:

$$e = \sqrt{\frac{h_{j+1}}{h_j}} = \frac{t_{j+1}}{t_j} \quad (4)$$

Y encontramos que es suficiente la medida de los tiempos de vuelo para el cálculo del coeficiente de restitución. Pero de nuevo, de forma práctica, esta medida suele ser bastante imprecisa. Así que vamos a utilizar un método indirecto, la función *Sound Meter* del paquete *Physics Toolbox* del móvil para determinar de modo sencillo estos tiempos.

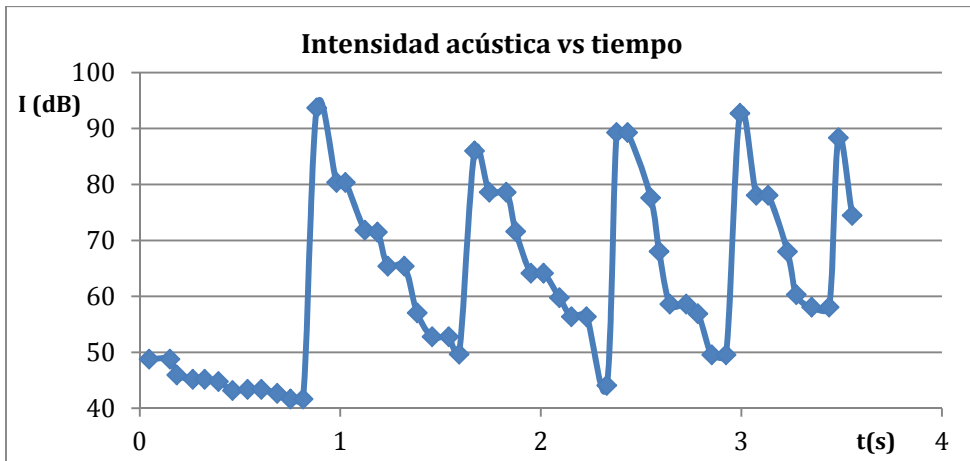
Método y resultados

1.- Utilización del Smartphone como instrumento de medida

Iniciaremos la aplicación en el smartphone y dejaremos caer verticalmente la pelota desde una altura h_0 , grabando al menos seis o siete rebotes.

La aplicación registra el sonido ambiente en función del tiempo con una precisión del orden de 0,01 s, lo que nos permitirá identificar los instantes en los que la pelota impacta con el suelo y rebota y con estos datos determinaremos los tiempos de vuelo entre rebotes con cierta precisión.

La salida del programa permite el envío de un documento de texto con los datos registrados a una cuenta de correo que, con una leve manipulación de formato, estará listo para abrirlo en una hoja de cálculo y de este modo obtener los datos y la representación gráfica del sonido (dB) en función del tiempo.



Impacto	t_i (s)	Coef. de restitución	e_{medio}
1º			
2º			
3º			
4º			
5º			

2.- Utilización del Smartphone como grabadora de vídeo

Otra posibilidad, que requiere un poco más elaboración, pero que también permite obtener más información del experimento es utilizar el móvil para grabar un video del experimento y tratarlo con la aplicación Tracker (software libre).

En este caso podremos obtener tanto el coeficiente de restitución, como las velocidades en diferentes instantes de tiempo o las aceleraciones, junto con sus gráficas asociadas. Y, por ejemplo, interpretar si la simplificación de no tener en cuenta el efecto del aire en la caída es importante o se puede despreciar realmente.

MOVIMIENTO ARMÓNICO: ESTUDIO DINÁMICO DE UN MUELLE

Objetivos

Analizar el movimiento armónico. Evidenciar la relación existente entre las diferentes magnitudes cinemáticas en el movimiento armónico simple. Caracterizar un resorte a través de su constante.

Material

- Muelle o resorte.
- Teléfono móvil.
- Bolsa y pinza para sujeción (o clip).
- Ordenador y hoja de cálculo.
- Regla o cinta métrica.

Aplicaciones recomendadas a utilizar.

- Para Android: *Physics Toolbox Suite*, función Accelerometer.
- Para iOS: *Acceleration 1.0*
- Programa de software libre Tracker para Windows.

Fundamentos

Un ejemplo típico de movimiento armónico simple es el movimiento de una masa suspendida de un resorte oscilando alrededor de su posición de equilibrio. Su periodo de oscilación viene dado por la expresión, por todos conocida:

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

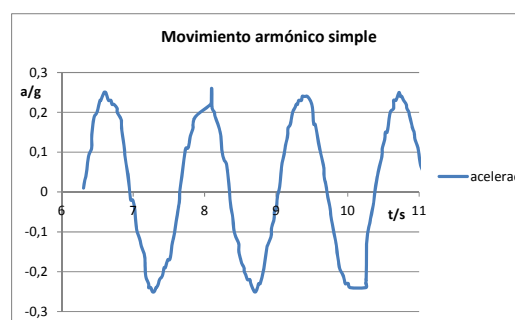
Montaje y procedimiento

Se plantea el estudio del movimiento por dos caminos: el primero a través de la aplicación *Physics Toolbox Suite*, en el que la propia masa oscilante será el móvil y, además, actuará como dispositivo de medida; en el segundo, que se puede llevar a cabo a la vez, se grabará el movimiento de oscilación del móvil o de otra masa oscilante, con un segundo móvil o con una cámara fotográfica, etc..., a fin de que el video pueda tratarse con el programa Tracker.

1.- Utilización del Smartphone como instrumento de medida: uso del acelerómetro.

Utilizaremos un resorte de constante adecuada al peso del móvil, para que la oscilación sea lo suficientemente lenta para que se puedan obtener datos, más o menos fiables, tanto por el acelerómetro como de la grabación.

El teléfono encendido, con el acelerómetro activado, lo dejaremos suspendido del muelle,



bien mediante una bolsa con una pinza, bien mediante un clip. En la posición de equilibrio activaremos la grabación de datos del acelerómetro y lo pondremos a oscilar. Una vez se hayan recogido los datos de cuatro o cinco oscilaciones se finaliza el experimento. El propio programa nos genera un archivo de texto con los valores de la aceleración en función del tiempo para distintos instantes del movimiento, el cual con un simple tratamiento de formato puede ser abierto y tratado con una hoja de cálculo.

Se puede observar cómo la aceleración en el eje vertical es de carácter sinusoidal, y determinar de modo aproximado su periodo, que junto con la masa del sistema oscilante (despreciando la masa efectiva del muelle) nos permitiría calcular la constante del muelle.

2.- Estudio del movimiento mediante el programa Tracker

A la vez, como ya se ha comentado, o simplemente como alternativa a los dispositivos de medida, se puede utilizar un segundo móvil o una cámara digital para grabar, con cierta calidad, un vídeo del movimiento y tratarlo con el programa Tracker, de modo que nos permita obtener la posición, velocidad y aceleración del movimiento en diferentes instantes de tiempo.

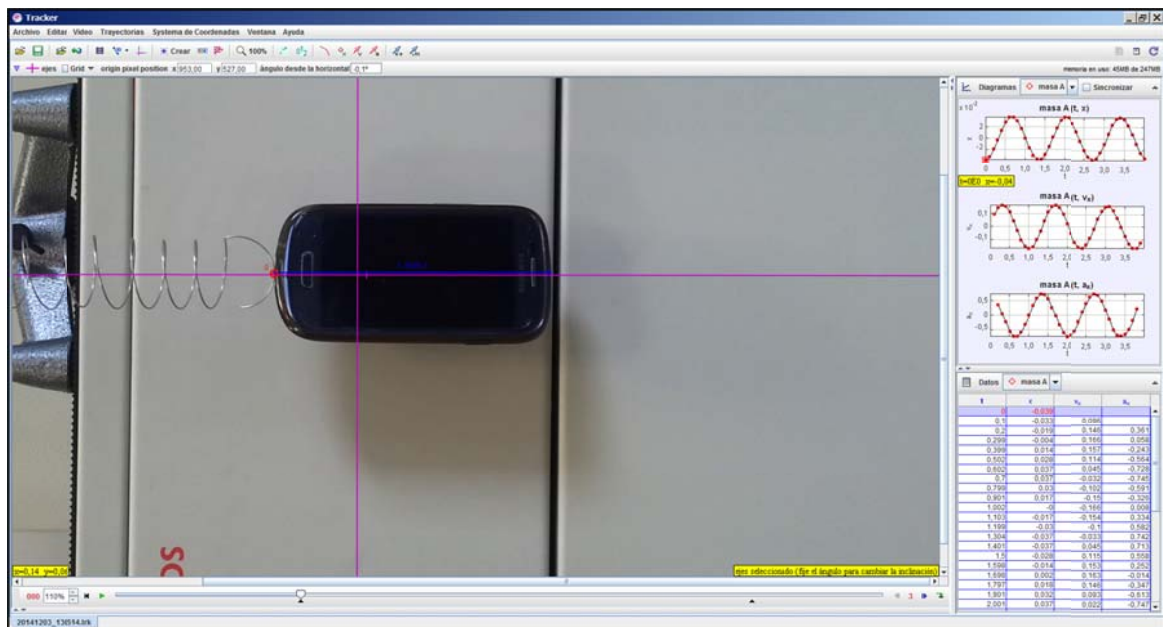


Fig. 1.- Tratamiento del video con el programa Tracker. (La imagen está girada 90°).

Una gran ventaja de este tratamiento es que permite visualizar, no solamente que tanto la elongación, la velocidad y la aceleración poseen carácter sinusoidal, sino que además cuando la aceleración y la elongación alcanzan sus valores máximos el valor de la velocidad se anula y a la inversa, la velocidad se hace máxima cuando la elongación es nula.

Además, los datos obtenidos se pueden copiar a una hoja de cálculo, pudiéndose inferir las relaciones que guardan entre sí estas magnitudes y caracterizar el resorte a través de su constante si se conoce la masa del cuerpo oscilante y se desprecia la masa efectiva del resorte.

Por ejemplo, se puede obtener la relación entre la aceleración y la elongación, observándose que su cociente es prácticamente constante (se pueden producir pequeños errores cuando los datos están en torno a la posición de equilibrio).

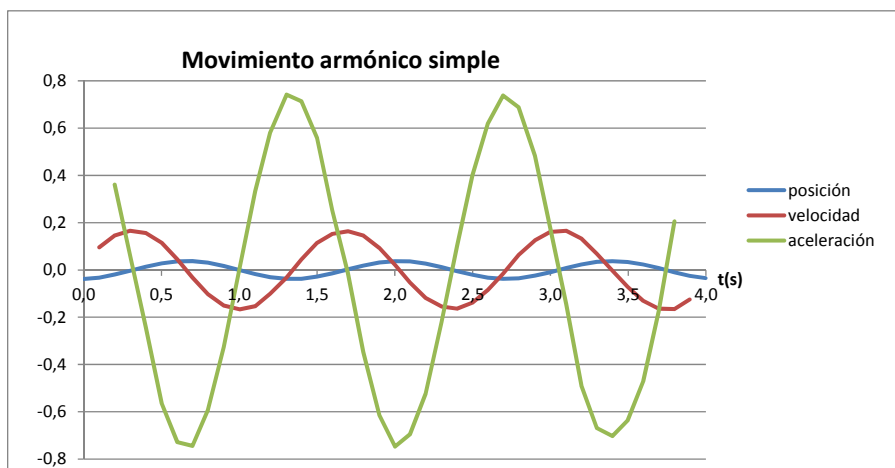


Fig. 2.- Magnitudes cinemáticas de un MAS.

Ejemplo de datos:

t (s)	y (m)	v _y (m/s)	a _y (m/s ²)	a _y / y [$\sim\omega^2$] (s ⁻²)
2,00	0,0372	0,0218	-0,747	-20,1
2,10	0,0359	-0,0533	-0,695	-19,3
2,20	0,0267	-0,1180	-0,523	-19,6
2,30	0,0121	-0,1546	-0,222	-18,3
2,40	-0,0047	-0,1640	0,102	-21,7
2,50	-0,0206	-0,1381	0,401	-19,4
2,60	-0,0321	-0,0843	0,620	-19,3

Recordando la ecuación del movimiento armónico:

$$y = A \text{ sen}(\omega t + \varphi_0)$$

$$a_y = -A\omega^2 \text{ sen}(\omega t + \varphi_0)$$

Su cociente nos permite calcular la pulsación ω , a partir de ella, la constante del muelle si es conocida la masa del cuerpo oscilante:

$$\frac{a_y}{y} = -\omega^2 \rightarrow k = -m \frac{a_y}{y}$$

Valor que podemos comparar con el obtenido a partir del acelerómetro.

En la tabla puede observarse cómo la relación a_y/y es prácticamente constante, lo que es un indicativo de la consonancia teoría-experimento.

Esta experiencia, sobre todo con este segundo tratamiento, permite caracterizar completamente el movimiento armónico a partir de sus magnitudes cinemáticas: posición, velocidad y aceleración. Comprobar cómo varían éstas con el tiempo, evidenciar de forma experimental sus relaciones y su concordancia con las ecuaciones teóricas; es decir, verificar el acuerdo entre el modelo teórico y el comportamiento experimental.

PÉNDULO

Objetivos

Determinar la aceleración de un cuerpo que oscila bajo la acción de la gravedad. Medir la aceleración con el móvil y mediante captura de vídeo. Comparar ambas aceleraciones.

Material

- Barra oscilante. (Péndulo físico o péndulo reversible)
- Sistema de sujeción del móvil
- Teléfono móvil
- Sistema de captura de vídeo con sistema de sujeción
- Ordenador con hoja de cálculo y programa *Tracker*

Aplicaciones recomendadas

- Para Android: Physics Toolbox Suite,
- Para iOS: Acceleration 1.0

Montaje y procedimiento

El teléfono móvil con el que se van a registrar las aceleraciones se sujeta a la barra mediante cinta de doble cara y una brida que permita el acceso a los controles de encendido/apagado y a la pantalla. Al mismo tiempo, el equipo de captura de vídeo debe sujetarse firmemente o apoyarse, de modo que en pantalla se vea todo el trayecto de la oscilación. (Fig.1)



Se separa el móvil de su posición de equilibrio, se abre la aplicación Physics Toolbox Suite en la función Linear Accelerometer o G_Force para Androids y Acceleration 1.0 para iPhones y se inicia la grabación de los datos. Se comienza la grabación de vídeo y se suelta el teléfono. Una vez que se hayan completado 2 o 3 oscilaciones se para el móvil y se interrumpe la grabación de vídeo. Estas actuaciones deben ser lo más simultáneas posible.

Los datos de aceleración capturados por el teléfono se envían al ordenador por correo electrónico, por Drive o por cable y se procesan mediante hoja de cálculo. La secuencia de vídeo se envía al ordenador por cualquiera de los procedimientos anteriores y se procesa mediante el programa *Tracker*.

Tras la elaboración de los datos obtenidos por el móvil mediante una hoja de cálculo, Excel por ejemplo, se deberían obtener unas gráficas similares a las de la Fig.2. A la izquierda la representación de los datos directos del móvil correspondientes a tres oscilaciones y a la

derecha solamente los correspondientes a las componentes X e Y de la aceleración, ya en ms^{-2} y filtrados.

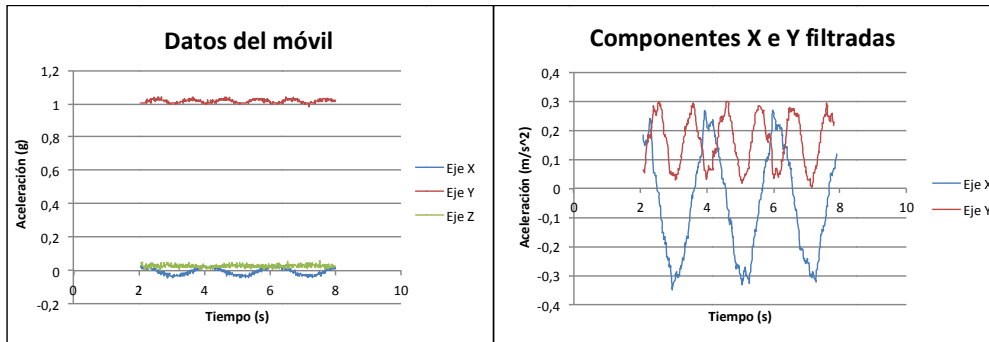


Fig. 2.- Ejemplo de las gráficas obtenidas a partir de los datos del móvil.

Una vez tratada la grabación con *Tracker*, se obtendrá una pantalla similar a la mostrada en la Fig.3.

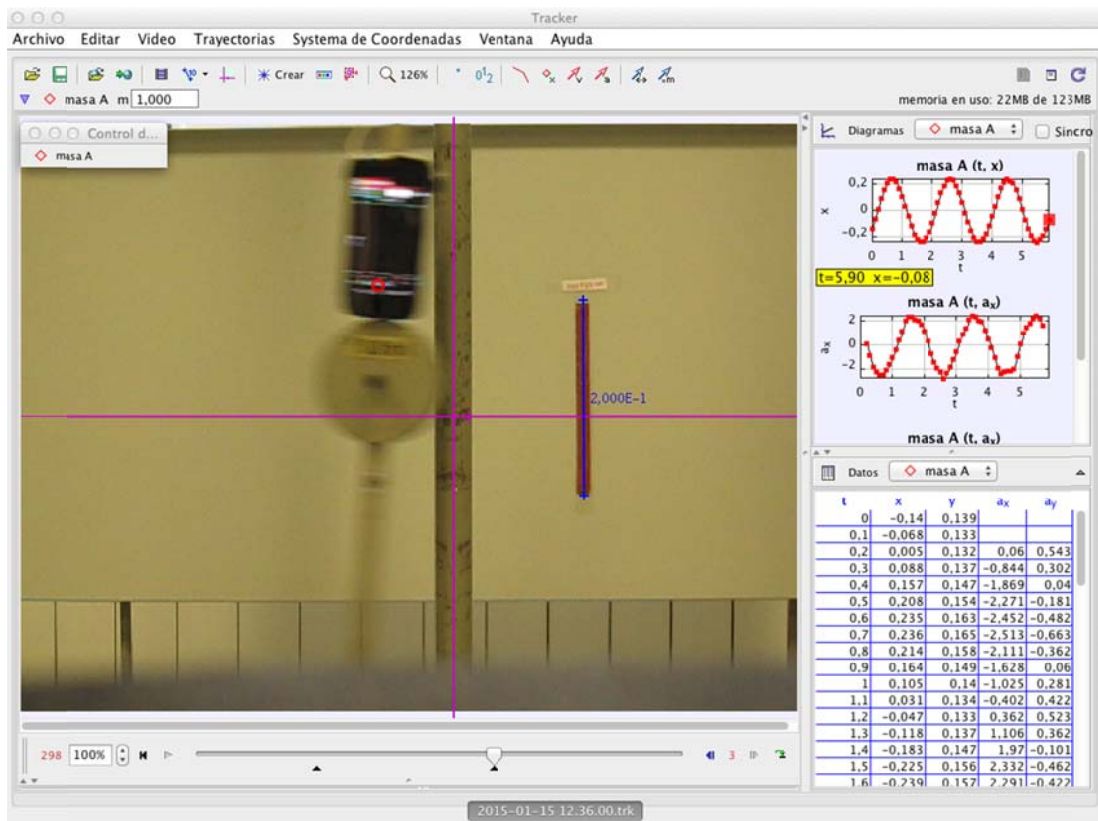


Fig. 3.- Pantalla de *Tracker*.

A la vista de los resultados obtenidos se pueden razonar sobre ellos y plantear algunas cuestiones:

¿Qué representa cada una de las componentes de la aceleración?

¿Son compatibles los resultados obtenidos por ambos procedimientos? Si no es así, ¿a qué puede ser debido?

ESTUDIO DE VIBRACIÓN DE LAS CUERDAS DE UNA GUITARRA

Objetivos

Determinar la densidad lineal de una cuerda de guitarra.

Determinar el valor experimental del semitono

MATERIAL

- Guitarra española modificada
- Teléfono móvil
- Ordenador y hoja de cálculo
- Pesas
- Cazoletas para cargar pesas
- Cinta métrica

Aplicaciones recomendadas

- Para Android: *Spectrum Analyser*
- Para iOS: *Frequency Counter* (pago), *AKLite* (gratis)

Fundamentos

Cuando se aplica una perturbación transversal a una cuerda tensa se produce una onda transversal que viaja a una velocidad:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (1)$$

Donde μ es la densidad lineal de la cuerda, es decir la masa por unidad de longitud y T es la tensión a la que se halla sometida. Cuando una cuerda es pulsada se producen ondas transversales que rebotan en los dos extremos fijos y se forma un patrón de ondas estacionarias. La cuerda vibra formando modos de vibración de orden n como los de la figura 1 que tienen frecuencias:

$$f_n = n \frac{v}{2L} \quad (2)$$

donde v es la velocidad de propagación de la onda transversal dada por (1), n es el modo de vibración y L es la distancia entre los puntos fijos de la cuerda.

En general, cuando se pulsa una cuerda de guitarra por su centro se produce una vibración con $n=1$, que se denomina modo fundamental de vibración. Así, sustituyendo la ecuación (1) en la (2) obtenemos la frecuencia de la vibración fundamental.

$$f = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}} \quad (3)$$

Método y resultados

Para la realización de la práctica se dispone de una guitarra modificada de modo que permite

medir todas las magnitudes involucradas en la ecuación (1) que da la frecuencia de vibración del modo fundamental de una cuerda de guitarra.



Las cuerdas no se conectan al clavijero sino que están sueltas de modo que pueden colgarse de ellas una serie de pesas de 1 kg cada una. De este modo podemos seleccionar la tensión que identificamos con el peso colgado de la cuerda.

Para medir la frecuencia se situará el teléfono con la aplicación de recogida de frecuencias correspondientes sobre el cuerpo de la guitarra. (Ver foto adjunta)

El dispositivo dispone de las 3 cuerdas más agudas de una guitarra española (sol, si, mi). En la siguiente tabla se indican las densidades lineales de masa (masa por unidad de longitud) de las tres cuerdas:

CUERDA	GROSOR	DENSIDAD LINEAL μ (Kg/m)
3ª SOL	mayor	$0,921 \times 10^{-3}$
2ª SI	intermedio	$0,602 \times 10^{-3}$
1ª MI	menor	$0,446 \times 10^{-3}$

Tabla 1: Densidad lineal de cada cuerda.

1.- Relación entre frecuencia y tensión.

Esta parte se realizará con la cuerda más gruesa (3ª SOL). Se colgarán de la cuerda masas sucesivas progresivamente de entre 2 kg y 8 kg y se medirán las frecuencias f correspondientes a las tensiones T correspondientes con los distintos pesos. Tomados los datos, completar la siguiente tabla.

f (Hz)	T (kp)	T (N)	f^2 (Hz ²)

Si elevamos al cuadrado la ecuación (3),

$$f^2 = \frac{1}{4L^2} \frac{T}{\mu}$$

de modo que debe de haber una relación lineal entre f^2 y T . Con ayuda de la hoja de cálculo se

ajusta el cuadrado de la frecuencia frente al período. La pendiente del ajuste por mínimos cuadrados es

$$f^2 = \frac{1}{4L^2 \mu}$$

A partir de esta pendiente se calcula el valor experimental de la densidad lineal y la discrepancia en % entre el valor experimental y el proporcionado en la tabla (obtenido pesando la cuerda).

2-. Relación entre frecuencia f y longitud L

Para cambiar la nota musical y por tanto la frecuencia en la guitarra se presiona la cuerda de forma que se fuerza un nuevo nodo que coincide con el traste más próximo (las barras metálicas sobre el mástil). Para realizar este apartado se pondrá una tensión $T = 7$ kg en la cuerda más gruesa (3ª SOL). Se irán pulsando los trastes sucesivos hasta el traste nº 12 y nuestro móvil recogerá de nuevo la frecuencia emitida por la cuerda.

El intervalo (cociente entre la frecuencia superior y la inferior,

$$\frac{f(\text{traste } n)}{f(\text{traste } (n-1))}$$

entre dos trastes consecutivos se denomina semitono. Una octava está dividida en 12 semitonos. Se trata de calcular de forma experimental el valor del semitono obtenido por el cociente anterior y compararlo con el resultado teórico,

$$\sqrt[12]{2} = 1,0595$$

calculando nuevamente la discrepancia en %. Como resultado experimental tomaremos la media de los cocientes entre las frecuencias

EFEECTO DOPPLER ACÚSTICO

Objetivos

Comprobar la variación que el receptor de un sonido experimenta en la frecuencia cuando se mueve en relación con la fuente

Material

- Dos teléfonos móviles, uno como emisor y otro como receptor
- Cronómetro

Aplicaciones recomendadas

- Para Android:
 - Emisión: Physics Toolbox Suite, función *Tone Generator*
 - Recepción: Spectrum Analyser
- Para iOS:
 - Emisión: Generator
 - Recepción: AKLite o bien Feedback Detector

Fundamentos

Cuando una fuente emite un sonido de frecuencia f_0 la frecuencia f percibida por el receptor depende de la velocidad relativa v entre emisor y receptor. Aproximadamente:

$$f \approx f_0 \left(1 \pm \frac{v}{c}\right)$$

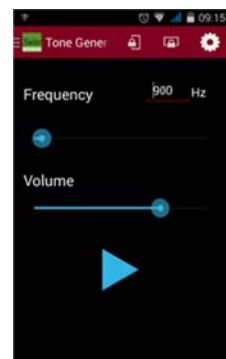
En esta ecuación c es la velocidad del sonido, que en el aire es del orden de 340 m/s. El signo (+) se aplica cuando fuente y receptor se aproximan el uno al otro; en este caso la frecuencia percibida es mayor (tono más agudo) que la emitida. Se aplica el signo (-) cuando se alejan, y en este caso el tono recibido es más grave que el emitido.

La diferencia entre f y f_0 es tanto más perceptible cuanto mayor es la relación entre v y c . A título de ejemplo, si conseguimos que v sea aproximadamente el 1% de c , la diferencia entre f y f_0 también será del 1%, de modo que con una frecuencia emitida de unos 1000 Hz podremos registrar unos 10 Hz adicionales en el sonido recibido.

Aplicaciones de emisión y recepción

Emisión

En Android la aplicación recomendada para la emisión es *Physics Toolbox Suite*, en la función *Tone Generator* (generador de tonos). Esta función permite generar un sonido de frecuencia pura. En la pantalla de la aplicación todo lo que hay que hacer es teclear la frecuencia deseada, elegir el volumen y pulsar el botón "Play". Se recomienda elegir una



frecuencia en torno a los 900 - 1000 Hz, como en el ejemplo del apartado anterior.

Recepción

Como aplicación de recepción es preciso descargar un analizador de espectro del sonido registrado por el micrófono. Para Android se recomienda "Spectrum Analyser". Conviene entender bien lo que mide la aplicación y cómo lo mide; para ello, pasen en este momento al apéndice, donde se explica lo más básico para que el experimento tenga éxito.

Procedimiento

Como medida preliminar sitúen próximos pero inmóviles el emisor y el receptor, para comprobar que las frecuencias emitida y registrada son consistentes. Una vez resuelto este punto y de acuerdo con las indicaciones dadas en el apéndice sitúense en el pasillo a suficiente distancia como para que el acercamiento entre el emisor y el receptor dure más de tres o cuatro segundos.

Los portadores de ambos móviles se acercarán el uno al otro a paso vivo (en torno a 2 m/s) pero tan uniforme como sea posible. De este modo se genera una velocidad relativa de unos 4 m/s, que es del orden del 1% de la velocidad del sonido, como en el ejemplo del apartado de fundamentos.

Durante el acercamiento el emisor se limitará a mantener el teléfono emitiendo y con el altavoz orientado hacia el receptor. El receptor deberá ejecutar la aplicación de recepción, también con el micrófono apuntando hacia el emisor. Ambos deberán acercarse a ritmo vivo y uniforme; cuando ambos estén a punto de cruzarse el receptor pulsará el botón Pause. El espectro instantáneo (gráfica de color azul) quedará congelado y el pico de recepción (Peak) se podrá leer bajo el gráfico.

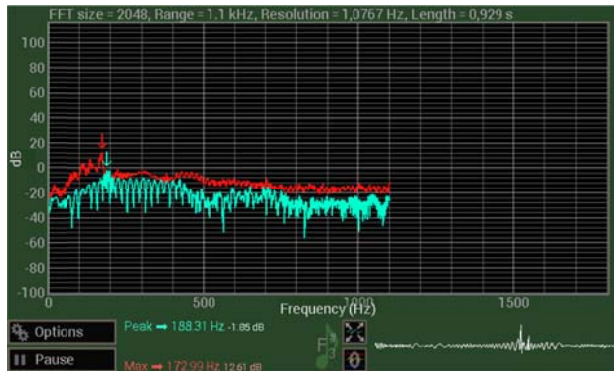
Si todo va bien la frecuencia de pico deberá superar en aproximadamente un 10% a la que se registró cuando emisor y receptor se encontraban inmóviles.

NOTA: La incertidumbres asociadas a la velocidad de acercamiento y más aún a la evaluación de la Transformada Rápida de Fourier hacen prácticamente imposible que los resultados sean de muy alta precisión. Deberían darse por satisfechos si las frecuencias difieren en una cantidad próxima al 1%.

APÉNDICE. LA APLICACIÓN *Spectrum Analyser* (ANDROID)

La pantalla principal de la aplicación tiene el aspecto de la figura adjunta. En ella se representa el espectro, es decir, se determina qué frecuencias componen el sonido que está llegando en cada momento al micrófono y en qué proporciones relativas aparecen dichas frecuencias. Una forma natural de representar el espectro es como en la gráfica de la pantalla, en la que se representa la intensidad en decibelios en función de la frecuencia. En la aplicación se puede hacer zoom con los dedos sobre el área de la gráfica a fin de seleccionar las escalas más cómodas para visualizar ambos ejes.

En esta aplicación se representan dos curvas. La curva de color azul es el espectro en tiempo real, es decir, el espectro del sonido que está llegando al micrófono en el momento presente. La curva roja une los máximos

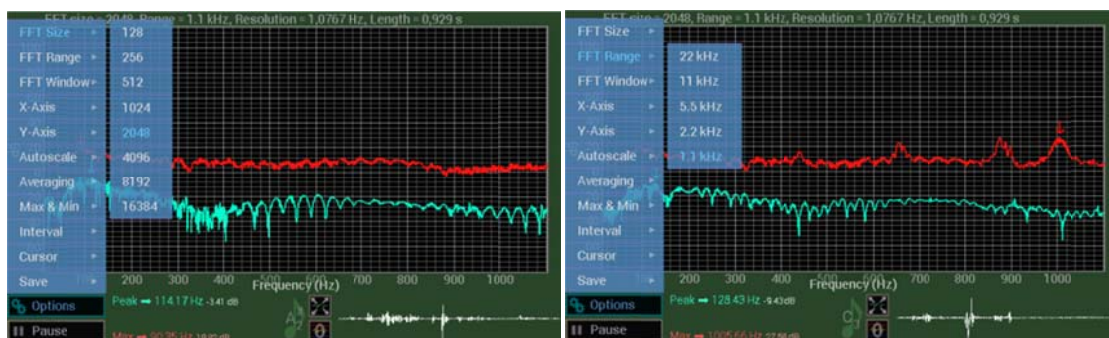


registrados para cada frecuencia durante el intervalo completo que el micrófono lleva registrando datos. Un sonido ambiente natural presenta un espectro sensiblemente “plano”, como el de la figura, porque las distintas frecuencias están mezcladas en proporciones más o menos iguales. Sin embargo, cuando la aplicación registre un sonido puro como el generado por el teléfono emisor, el espectro mostrará un pico mucho más acusado que en la figura. En la parte inferior de la pantalla se señala en color azul el pico (*Peak*) del espectro, es decir,

la frecuencia más significativa en el sonido actual. El valor “*Max*” representa el pico más alto desde que la aplicación lleva registrando datos.

En segundo lugar es preciso saber que para calcular el espectro de un sonido, esta aplicación (y todas las demás) llevan a cabo con la señal recibida por el micrófono una operación conocida como Transformada Rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT). La FFT es una operación se debe configurar correctamente a fin de que las medidas sean significativas. Al pulsar el botón de Opciones aparece un menú emergente:

- La primera opción, FFT size (Tamaño de la Transformada) consiste en una serie de valores. Elegir los más altos da lugar a un espectro más “preciso”, pero a cambio exige que el micrófono esté más tiempo muestreando el sonido.
- La segunda opción, FFT range (Rango de la Transformada) permite decidir qué intervalo de frecuencias serán exploradas en el espectro



Para los propósitos de este experimento, si el emisor va a emitir a, digamos, 900 Hz, es suficiente limitar el Rango hasta 1,1 kHz en el menú de rango. Y para el tamaño se recomienda un valor de 2048 muestras. Cuando validen ambas opciones y regresen a la pantalla principal verán en la parte superior la siguiente información (o similar):

FFT size = 2048 - Range = 1,1 kHz - Resolution = 1,0767 Hz - Length = 0,929 s

El tercer valor indica que el espectro que van a llevar a cabo permite distinguir entre sí frecuencias separadas por 1 Hz, aproximadamente. Es razonable si el desplazamiento Doppler esperado es de unos 10 Hz. El cuarto valor indica que el micrófono debe muestrear el sonido durante 0,9 s para generar un espectro fiable. Este es el tiempo mínimo que el emisor debe estar emitiendo y el receptor recibiendo. Si es posible triplicar o más esta cifra, mucho mejor.