

Observando la velocidad desde diferentes sistemas de referencia con una experiencia online

Observing the velocity from different reference frames with an online experiment

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Matheus G. Santos¹, Marcos L. Leite^{1,2}, Renan F. Correa¹,
Laís O. Borges¹, Vito R. Vanin¹, y Nora L. Maidana¹

¹Instituto de Física da Universidade de São Paulo. Rua do Matão, 1371
– CEP 05508-090 – São Paulo, SP. Brasil.

²Programa de Pós-Graduação Interunidades em Ensino de Ciências da
Universidade de São Paulo.

E-mail: nmaidana@if.usp.br

Resumen

La página web Mecánica Experimental con Imágenes (MEXI, <<http://fep.if.usp.br/~fisfoto>>) tiene el objetivo de complementar el enfoque teórico de la mecánica clásica dada en clase, a partir de experiencias online obtenidas de videos de cuerpos en movimiento. En este trabajo, se narra el proceso de montaje y elaboración de una experiencia que versa sobre velocidad relativa y cambio de sistemas de referencia, asuntos normalmente tratados de forma teórica y abstracta, y sobre los cuales los estudiantes suelen presentar considerables dificultades. La experiencia pretende trabajar con transformaciones de velocidades con el objetivo de internalizar el tratamiento vectorial de las velocidades. Se discuten también los resultados cuantitativos de uno de los casos experimentales filmados.

Palabras clave: Velocidad relativa; TDIC; Enseñanza de la mecánica; Contextualización; Experimentos online.

Abstract

The web page “Mecânica Experimental com Imagens” (MEXI, <<http://fep.if.usp.br/~fisfoto>>) aims to supplement the approach of classical mechanics in theoretical classes, using online experiments based on videos of bodies in motion. In this work, we present the process of developing an experiment that deals with relative velocity and change of coordinate systems, subjects usually treated in a theoretical and abstract way and on which students usually present considerable difficulties. The routing of the experiment involves transformations of velocities and the understanding of its vector character. We also discuss the quantitative results obtained with one of the recorded videos.

Keywords: Relative velocity; ICT; Mechanics teaching; Contextualization, Online experiments.

I. INTRODUCCIÓN

En general, las teorías progresistas colocan al estudiante como protagonista de su proceso de aprendizaje, papel que, dentro de la perspectiva de la enseñanza tradicional, cabe al profesor. En este escenario, surgen nuevas corrientes, por ejemplo, el llamado *learnbydoing*, que preconiza la actividad y el hacer de los alumnos como promotores de su propio aprendizaje (Gottschalk, 2007). Tomando como base esas corrientes, la experimentación como estrategia de enseñanza y los laboratorios didácticos en las escuelas pasaron a ser más valorados. Sin embargo, los laboratorios se usan con baja frecuencia, y puede ser debido a la falta de mantenimiento y reposición de materiales, (Borges, 2002).

En este contexto, laboratorios didácticos *online* se presentan como alternativas pedagógicas viables para complementar la enseñanza dada en el aula - por más que su utilización requiera que las instituciones escolares dispongan de computadoras con conexión a internet. La página web MEXI (Mecánica Experimental con Imágenes, antiguo Laboratorio Virtual de Mecánica, <<http://fep.if.usp.br/~fisfoto>>), es el producto de un proyecto que hace una década y media viene ofreciendo actividades experimentales online, principalmente para la educación superior, y más recientemente también para la educación básica. Dicha página ofrece experimentos de mecánica clásica, para cuerpos en traslación y/o rotación. Cada

actividad busca explorar aspectos cinemáticos y dinámicos de un determinado fenómeno desde puntos de vista cualitativo y cuantitativo (Fonseca y otros, 2013). Todas las experiencias del MEXI surgen de la filmación de un cuerpo en movimiento junto a un instrumento que permite la medida de su posición. Los videos de la grabación se subdividen en cuadros, y a las imágenes obtenidas se les añade un número, al que llamamos código de tiempo –especie de cronómetro– para acompañar la evolución temporal del movimiento (Fonseca y otros, 2013).

Uno de los experimentos de traslación disponibles trata la velocidad relativa para un lanzamiento oblicuo (Maidana y otros, 2016). Exploraremos aquí una nueva experiencia didáctica que aborda ese tema, pero a partir del movimiento de traslación de un cuerpo sobre un sistema de referencia móvil que se observa desde un sistema de referencia fijo. Pretendemos presentar el proceso de construcción de esta nueva experiencia y la creación de la guía de trabajo para ser aplicada a estudiantes de física de nivel superior. Este experimento fue elaborado por un estudiante de Profesorado del Instituto de Física de la Universidad de São Paulo, en un trabajo de Iniciación Científica y pasará a formar parte del acervo de MEXI.

II. EL EXPERIMENTO

El fenómeno elegido para ser estudiado fue el movimiento de un cuerpo que, partiendo de un sistema de referencia fijo (una mesa), alcanza uno móvil (una cinta que se mueve con velocidad constante), sobre la cual continúa su traslación hasta abandonarla en la margen opuesta. Los estudiantes serán guiados a determinar la velocidad del cuerpo con relación al sistema de referencia móvil y la velocidad de ese sistema con relación al fijo, para poder deducir la velocidad del cuerpo con relación al sistema de referencia fijo a partir de la transformación de velocidades. La pregunta que guía esta actividad está relacionada al cálculo de las velocidades del cuerpo y de la cinta, y la previsión de la distancia desde el punto de entrada, en el sentido de la velocidad de la cinta, que el objeto la abandona. El razonamiento para la solución será el mismo que el usado para resolver los problemas teóricos que tratan del cruce de un río por un nadador o un barco.

La figura 1 ilustra el aparato experimental. La escala del cuadrículado por donde se traslada el cuerpo es de 0,5 cm en 0,5 cm y sirve como base para ambos sistemas (el fijo de la mesa y el móvil de la cinta), como detalla la figura 1a. La cinta de la parte móvil es accionada por los rotores de una antigua impresora, que se conectaron a una correa ligada a un motor, a su vez energizado por una fuente de tensión variable, que permite el ajuste de la velocidad de la cinta para las condiciones requeridas en el experimento (figuras 1a y 1b). El protagonista del experimento es un objeto metálico de forma cilíndrica con 2,29(2) cm de diámetro y 2,00(5) cm de longitud, con un eje central que se extiende a ambos lados, como se muestra en la figura 1c. Una cinta amarilla fue adherida a las extremidades del eje para facilitar la lectura de las posiciones del cilindro. Los demás materiales del aparato fueron: ledes de alta potencia, para iluminar; batería portátil de 12 V para energizar las lámparas, soportes para encaje del sistema de iluminación y de la cámara. Los videos fueron tomados con una cámara *Sony*, modelo *Nex-FS700RH*, capaz de registrar hasta 960 *fps* (cuadros por segundo), figura 1d.

Los videos del experimento se obtuvieron con el cilindro que, después de partir del reposo de lo alto de un pequeño plano inclinado, rodó sobre el cuadrículado de la parte fija, alcanzó la cinta y la atravesó hasta el lado opuesto. En este experimento, las filmaciones se realizaron a una tasa de 120 *fps*, con la cámara colocada verticalmente sobre la mesa, como muestra la figura 1d. El *software Edius Pro 7* fue usado para el corte de los videos, extracción de las imágenes y ajuste de brillo y color. El programa *WolframMathematica 12* fue usado para incorporar el código de tiempo a las imágenes (a partir de un conjunto de instrucciones que permitió la inserción de un cuadro de texto con el instante de tiempo demarcado, en una posición específica de las imágenes). La figura 2 muestra una de las imágenes obtenidas después de todo el proceso descrito.



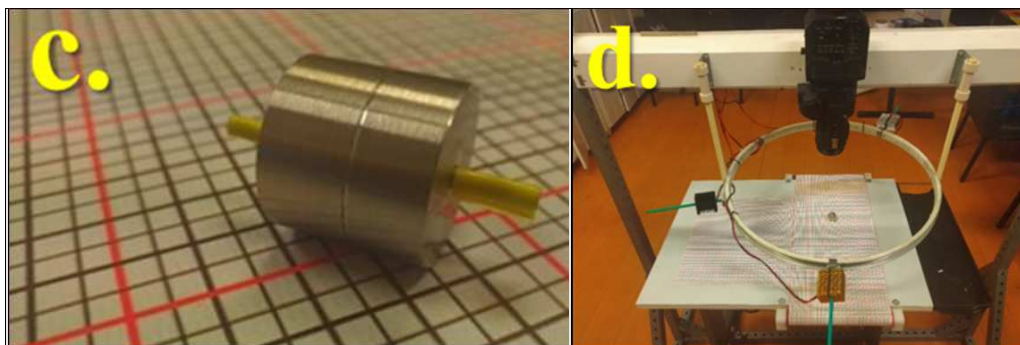


FIGURA 1. Imágenes del aparato experimental. a) Mesa sobre la se mueve el cilindro: a la izquierda, la cinta acoplada, que corresponde al sistema de referencia móvil y a la derecha, la parte que corresponde al sistema de referencia fijo. b) A la izquierda, fuente de tensión variable, que permite el ajuste de la velocidad de la cinta y a la derecha, motor responsable del movimiento de la cinta, con la correa que acciona los rotores que mueven la cinta. c) Cilindro de metal. d) Vista general del aparato experimental: mesa, soportes de ledes, cámara filmadora y cilindro sobre la cinta.

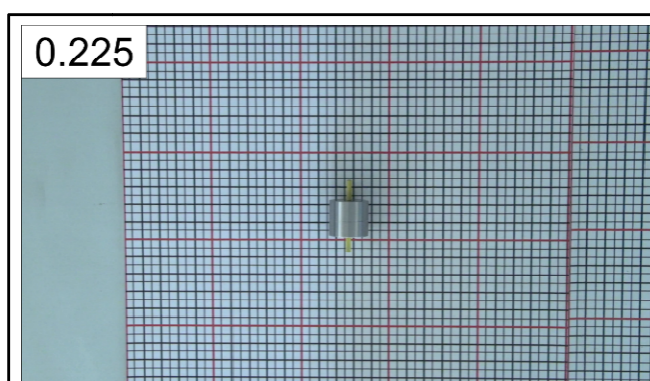


FIGURA 2. Imagen extraída de un video para medir la posición del cilindro. En ella se observa el cilindro sobre la cinta (sistema de referencia móvil) y el código de tiempo en la esquina superior izquierda.

III. MEDIDAS, CÁLCULOS Y ANÁLISIS DE DATOS

Para un dado conjunto de imágenes, se elige un punto en el cuadrículado de la cinta, preferencialmente la intersección de dos líneas rojas, como origen del sistema de referencia móvil (M) y se determinan las coordenadas de posición, $x_{C,M}$ e $y_{C,M}$, del cilindro (C). Esos valores son introducidos en una hoja de cálculo, así como el número correspondiente al código de tiempo, t . También se adopta un origen en el cuadrículado del sistema de referencia fijo (F) para medir la posición de la cinta con relación a él, $y_{M,F}$, que también se carga a la hoja de cálculo. La guía de trabajo elaborada sugiere orientar positivamente el eje Ox de izquierda a derecha, y el eje Oy de abajo hacia arriba - sentido que coincide con el del movimiento de la cinta. En las filmaciones, se realizaron lanzamientos del cilindro en dos direcciones: i) cilindro entrando en la cinta perpendicularmente al sentido de desplazamiento de ella, y ii) cilindro entrando en la cinta de forma inclinada con la dirección del desplazamiento de ella, con la intención de que la proyección Oy del vector velocidad del cilindro en relación al sistema de referencia fijo tuviese la misma intensidad que la velocidad de la cinta en relación al sistema fijo, pero con sentido opuesto. Los valores presentados en esta sección pretenden solamente ejemplificar lo comentado y pertenecen al caso (i).

Los valores de posición medidos permiten determinar los componentes de las correspondientes velocidades por derivación numérica a partir de un método de aproximación de la primera derivada conocido como diferencia centrada, que minimiza los errores en comparación con los métodos de las diferencias progresiva o regresiva (Chapra y Canale, 2011, pp. 73-75). La calidad de esta aproximación está garantizada por el teorema del valor medio, donde la posición puede ser considerada como una función dependiente del tiempo continua y derivable. Basándose en el hecho de que el intervalo de tiempo entre imágenes sucesivas es pequeño, se puede considerar que la velocidad media en un cierto intervalo de tiempo es aproximadamente igual a la velocidad instantánea en el instante medio, como se muestra en la ecuación (1) correspondiente al componente Ox de la velocidad del cilindro para el sistema de referencia móvil:

$$v_{x_{C,M}}(t'_i) \cong \frac{x_{i+1,C,M} - x_{i-1,C,M}}{t_{i+1} - t_{i-1}} \quad (1)$$

donde x representa la posición del cilindro, t el instante de tiempo, i el índice correspondiente al número de la imagen dentro del conjunto y $v_x(t'_i)$ el componente Ox de la velocidad instantánea del cilindro en el instante medio t'_i , que corresponde a la media aritmética entre los instantes extremos del intervalo, t_{i-1} y t_{i+1} . Para estimar el componente Oy de la velocidad instantánea del cilindro, se usa el mismo razonamiento. De igual manera, se pueden calcular las aceleraciones instantáneas del cuerpo en las direcciones Ox y Oy.

El gráfico de la figura 3 presenta los valores v_x y v_y del vector velocidad del cilindro con relación al sistema de referencia móvil en función del tiempo, que corresponden al caso i) (entrada del cilindro perpendicular a la cinta). En dicho gráfico aparecen también las expresiones de las líneas de tendencia, ajustadas con la misma hoja de cálculos.

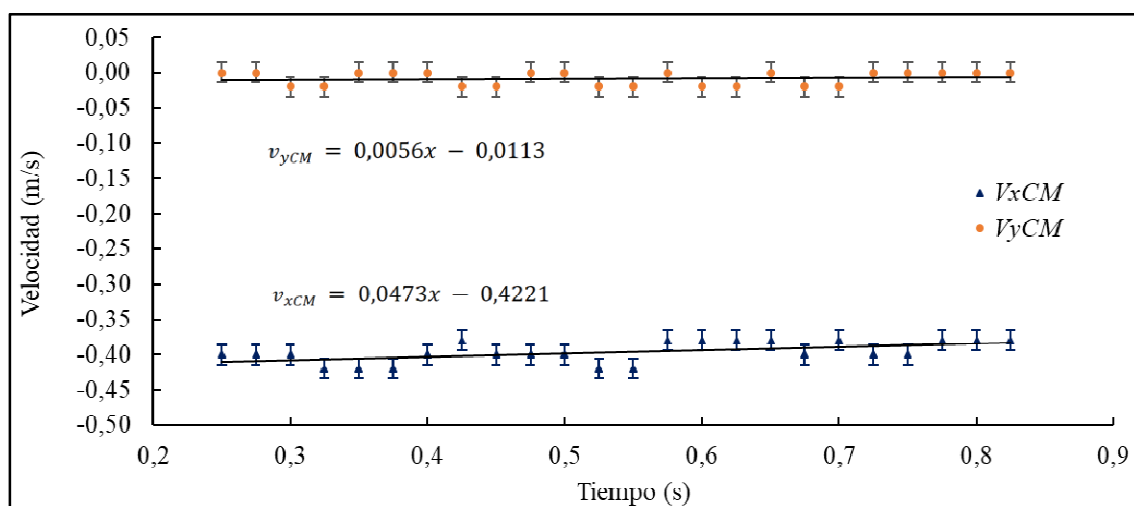


FIGURA 3. Velocidad horizontal y vertical del cilindro, con relación al sistema de referencia móvil, en función del tiempo.

La expresión para transformar la velocidad del cilindro con relación al sistema de referencia fijo es:

$$\vec{v}_{C,F} = \vec{v}_{C,M} + \vec{v}_{M,F} \quad (2)$$

donde el subíndice C corresponde al cilindro, F al sistema de referencia fijo (mesa) y M al móvil (cinta). La ecuación (2) es de naturaleza vectorial, de modo que debe ser usada una ecuación análoga para cada dirección del sistema de referencias (Ox y Oy). Por construcción, la velocidad de la cinta no posee componente Ox. A partir de las medidas de ese conjunto de imágenes, el componente Oy de la velocidad de la cinta (referencial móvil) es constante y vale $v_{y_{M,F}} = -0,1008(8)$ m/s. La figura 4, se obtuvo a partir de la suma de los respectivos componentes de las velocidades de acuerdo con las proyecciones de la ecuación (2), proporcionando los valores de los componentes de la velocidad del cilindro con relación al sistema de referencia fijo.

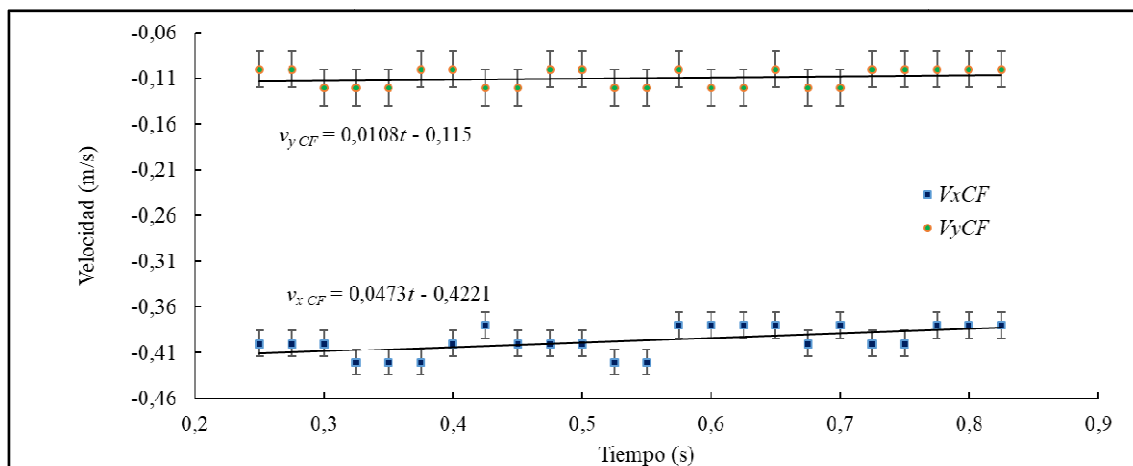


FIGURA 4. Componentes de la velocidad del cilindro, con relación al sistema de referencia fijo, en función del tiempo.

Con los valores v_{xCM} (velocidad horizontal del cilindro con relación a la cinta en función del tiempo), se puede obtener la función horaria de la posición y, siendo conocido el ancho de la cinta, es posible calcular el tiempo que el cilindro tarda para atravesarla. Con ese dato, y conocido v_{yCF} (velocidad vertical del cilindro con relación al sistema de referencia fijo), se puede obtener su desplazamiento en esa dirección, tomando como origen el punto de entrada en la cinta. La idea es proporcionar a los estudiantes un conjunto de varias imágenes de la salida del cilindro de la cinta, de modo que, para los datos computados, ellos puedan elegir cuál corresponde a su conjunto de imágenes. El análisis de las producciones escritas de los alumnos, una vez aplicada la propuesta, permitirá verificar en qué grado se alcanzó el objetivo de la experiencia y si hay necesidad de modificar la propuesta.

IV. APLICACIÓN DE LA EXPERIENCIA

Cada experimento de la página MEXI posee una guía de trabajo, que orienta la obtención de los datos primarios y los cálculos para alcanzar los objetivos propuestos.

La modalidad presencial de las actividades se inicia con la presentación de la experiencia, las guías y la observación de algunos videos demostrativos de la página. Antes de comenzar el proceso de medida de posiciones se solicita a los participantes que expliquen cómo son las trayectorias del cilindro cuando observado desde cada sistema de referencia y si pueden establecer la posición del punto donde el cilindro abandona la cinta después de atravesarla. Esa etapa pretende rescatar los conocimientos previos de los estudiantes, así como algunas de sus intuiciones, con el objetivo de investigar si sus respuestas se acercan a una relacionada al sentido común o al de un formalismo teórico.

Las medidas comienzan con la elección de la posición del origen O de los sistemas de referencia en movimiento y fijo, así como la orientación de los ejes Ox y Oy . Los valores medidos de posición del cilindro y del instante de tiempo asociado a cada posición deben ser introducidos en una hoja de cálculo para obtener los componentes de las velocidades del cilindro en relación a la cinta (móvil) y de la cinta en relación al sistema fijo (suelo), de acuerdo a la ecuación (1). La guía (disponible en <http://www.fep.if.usp.br/~fisfoto/translacao/velocidadeRelativaTravessia/index.php>) sugiere calcular las velocidades medias de cada proyección.

El análisis de los resultados orienta al cálculo de la velocidad del cilindro en relación al sistema de referencia fijo y los estudiantes deben deducir y registrar la expresión utilizada para ese cálculo, así como la ilustración de la composición vectorial de las velocidades del cilindro y de la cinta. Se solicita también el cálculo de: (i) el ángulo que forma el vector velocidad del cilindro con la dirección Ox en cada uno de los sistemas de referencia, (ii) el tiempo necesario para que el cilindro atravesara la cinta y (iii) el punto de salida del cilindro (desplazamiento en el sentido de movimiento de la cinta). Para finalizar, los estudiantes deben reconocer la imagen que corresponde a su conjunto, de un conjunto de imágenes donde aparece el cilindro saliendo de la cinta, deducido del valor de desplazamiento en la dirección Oy encontrado.

Los pasos aquí descritos y el uso de la guía son apenas una sugerencia de uso del material de la experiencia ya que la modalidad de trabajo puede variar de acuerdo al objetivo que proponga el profesor al aplicar el experimento y al nivel de enseñanza aplicado.

V. CONCLUSIÓN

Este trabajo presentó una experiencia que proporciona una herramienta de estudio para un movimiento visto desde diferentes sistemas de referencia, y sirve como modelo directo para situaciones de cruce de ríos por nadadores o barcos. La base del experimento está en la determinación del vector velocidad del cuerpo en el sistema de referencia fijo, que sólo es posible a partir de la determinación previa de la velocidad del objeto en el sistema móvil y de la velocidad de éste con relación al fijo. Como estos movimientos se dan en dos direcciones, el tratamiento vectorial del problema es uno de los requisitos para su resolución. El alumno deberá operar con la transformación de velocidades. Además de esta determinación, corresponde a los alumnos llegar a una interpretación cualitativa del significado de los resultados cuantitativos, para poder correlacionar tales resultados con imágenes de cuando el cilindro abandona el sistema de referencia móvil.

Este experimento contribuye para ilustrar y profundizar el estudio del cambio de sistemas de referencia y del tratamiento de magnitudes vectoriales, asuntos que los alumnos ingresantes en cursos de física normalmente presentan dificultad, dado el grado de abstracción del formalismo vectorial. La metodología de trabajo propuesta en los experimentos del MEXI apuntan a su aplicación directa en sala de aula.

AGRADECIMIENTOS

Al Programa Unificado de Becas (PUB) de la USP, por la beca de iniciación científica, al personal del Laboratorio Didáctico y del Laboratorio del Acelerador Lineal, del IF-USP, por producir los materiales esenciales para la confección del experimento criado, y a la Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), por el auxilio económico de los proyectos 2014/08206-0 y 19/11569-0.

REFERENCIAS

Borges, A. T. (2002). Novos rumos para o laboratório escolar de ciências. *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, 19(3), 294

Chapra, S. C., Canale, R. P. (2011). *Métodos Numéricos para Engenharia*. Porto Alegre: McGraw-Hill.

Fonseca, M., Maidana, N. L., Severino, E., Barros, S., Senhora, G., Vanin, V. R. (2013). O laboratório virtual: Uma atividade baseada em experimentos para o ensino de mecânica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35(4), 4503.

Gottschalk, C. M. C. (2007). Uma concepção pragmática de ensino e aprendizagem. *Educação e Pesquisa*, 33(3), 459-470.

Maidana, N. L., Fonseca, M., Leite, M. L., Bertelli, L. J., Vanin, V. R. (2016). La velocidad relativa: nuevas contribuciones del laboratorio virtual. *Revista de Enseñanza de la Física*, 28(extra), 101-108.