

# Enseñanza

## NUEVAS TECNOLOGÍAS EN LA ENSEÑANZA

### EL PORTAL FisL@bs: UNA RED DE LABORATORIOS VIRTUALES Y REMOTOS DE FÍSICA

#### 1. INTRODUCCIÓN

Los laboratorios online son unos recursos que ya pueden considerarse bien asentados en varias disciplinas científicas y técnicas, gracias a la ayuda que ofrecen a la hora de ilustrar fenómenos científicos que pueden requerir un equipo costoso y/o difícil de montar, tal y como ocurre en [1] y [2]. La configuración ideal para estos laboratorios online es que consistan en dos partes distintas: el experimento simulado y el experimento real, controlado de forma remota.

A pesar de que las simulaciones cumplen un importante propósito, los laboratorios reales no pueden ser sustituidos únicamente con esta herramienta, especialmente en algunos campos como las ciencias físicas, donde el comportamiento y la respuesta real de los componentes que conforman un experimento son factores cruciales [3]. Por otro lado, aunque los laboratorios remotos (encargados de llevar los recursos de un laboratorio al hogar de los usuarios [4]) pueden perfilarse como un mejor sustituto o complemento de los laboratorios reales, los laboratorios virtuales tienen aún su utilidad. La simulación de los experimentos juega un papel fundamental como un recurso que se usa como primer contacto con el fenómeno que se desea estudiar.

Las simulaciones relacionadas con el campo de la física han experimentado un gran aumento tanto en número como en calidad gracias, principalmente, a la aparición de los applets de *Java*. En [5] y [6], se presentan cientos de experimentos y procesos simulados en muchos de sus campos. Sin embargo, los anteriores trabajos no consideran de manera específica el experimento real asociado. Otros trabajos recientes se centran en el uso e introducción de los ordenadores en los laboratorios de física para recoger y analizar datos ([7], [8]) pero no los usan con el objetivo de la enseñanza a distancia. Final-

mente, la mayor parte de los laboratorios remotos existentes actualmente relacionados con la física, todavía poco numerosos, son experimentos individuales ([9], [10]) o se limitan a un único campo de la misma, como la óptica ([1], [11]) o la electrónica ([12], [13]). Además, ninguno de los trabajos antes mencionados ofrecen el equivalente simulado de cada experimento ni tampoco un entorno web de experimentación que contenga un sistema de gestión de aprendizaje (LMS, por sus siglas del inglés *Learning Management System*) y sólo en [14] los experimentos se presentan de una manera similar a la que se lleva a cabo en un laboratorio convencional para estudiantes: introducción, teoría, ejercicios y problemas, actividades de laboratorio, análisis, discusión y material de referencia.

La UNED ofrece a estudiantes españoles repartidos por todo el mundo la posibilidad de realizar docenas de grados y postgrados a distancia. Por tanto, esta Universidad tiene una gran necesidad de recursos y métodos de educación a distancia y se encuentra siempre en disposición de investigar y analizar cómo mejorar estos aspectos. *FisL@bs* es un ejemplo de ello. Gracias a la colaboración del Vicerrectorado de Calidad e Innovación Docente y a varios Departamentos de la Facultad de Ciencias y de la Escuela Superior de Informática de la UNED, este proyecto nace con la intención de mejorar el servicio de enseñanza a distancia en el contexto del Espacio Europeo de Enseñanza Superior, el cual estimula el trabajo práctico individual (satisfecho en *FisL@bs* por medio de los laboratorios remotos y virtuales) sin perder de vista la importancia de pertenecer y colaborar con un grupo de trabajo (asegurado en *FisL@bs* gracias al uso de un LMS).

*FisL@bs* es una red distribuida de laboratorios, tanto remotos como virtuales, destinados a la educación superior de ciencias físicas a través de Internet. Usa un sencillo LMS (*eMersion*) a fin de ofrecer canales de comunicación entre los estudiantes y los profesores y de hacer accesible desde un mismo entorno las referencias, teoría y ejercicios necesarios. Esta red, que pretende ser distribuida entre varias universidades españolas, usa la misma estructura que *AutomatL@bs* [15], una red de laboratorios remotos y virtuales para la enseñan-

za/aprendizaje de ingeniería de control, que lleva operativa desde hace más de tres años y que ofrece experimentos tan interesantes como el sistema de tres tanques [16]. FisL@bs da a los estudiantes la posibilidad de realizar experimentos interactivos en diferentes campos de las ciencias físicas, tanto de un modo real pero remoto, como de un modo virtual y simulado. El modo de acceso a los laboratorios es un navegador web compatible con Java y con conexión a Internet, lo cual supone unos requisitos tan bajos y simples que garantiza el acceso a estos recursos a todos los estudiantes prácticamente desde cualquier sitio y en cualquier momento.

Como parte del proyecto FisL@bs, están siendo desarrollados varios laboratorios con experimentos diversos: un banco óptico motorizado para la determinación de la distancia focal de lentes delgadas, un experimento para la comprobación de las leyes de la reflexión y la refracción de la luz (ley de Snell), un péndulo rígido, una tabla XYZ (similar a una fresadora) que se usará para medir distribuciones de potencial sobre una hoja de papel resistivo con diferentes configuraciones de campos electrostáticos, un experimento sobre la ley de Hooke, etc. Como se ha mencionado anteriormente, todos estos laboratorios serán accesibles simplemente por medio de un navegador web.

Cada uno de estos laboratorios precisa de distintos materiales y herramientas para sus montajes reales y se requiere además que puedan ser controlados de forma remota. A fin de reducir costes y facilitar la fabricación e implementación de los mismos, algunos de los experimentos anteriores (por ejemplo, el relativo a la ley de Hooke y el que usa la fresadora) se han creado usando piezas de *Legó Mindstorms*. Otros se han construido con piezas de aluminio, controladoras y motores paso a paso, sensores de fuerza y de voltaje, etc. En todos los casos, el hardware es siempre controlado utilizando instrumentos virtuales de tiempo real programados en *LabVIEW*, un lenguaje de programación gráfica especialmente diseñado para desarrollar sistemas de instrumentación, análisis y adquisición de datos.

La interfaz gráfica de usuario (GUI, por sus siglas del inglés *Graphical User Interface*) usada para experimentar de forma remota con estos laboratorios es una interfaz Java creada con *Easy Java Simulations* (EJS), un programa escrito en Java que ayuda a crear simulaciones interactivas en Java, principalmente para objetivos de enseñanza y aprendizaje [17], [18]. Los experimentos virtuales correspondientes a cada experimento remoto

también se crean usando EJS. Para alojar las interfaces de EJS y para publicarlas en Internet se usa eMersion [19], un marco de trabajo que facilita el desarrollo de escenarios pedagógicos y recursos de enseñanza para la experimentación web en educación. Finalmente, para realizar la comunicación entre los programas de EJS y los instrumentos virtuales de *LabVIEW*, se hace necesario utilizar también una herramienta basada en un software que use un servidor Java-Internet-*LabVIEW* de interconexión. Esta herramienta (que consiste en una aplicación llamada servidor JIL [20] y un fichero de librería Java) utiliza *LabVIEW* [21] en el lado del servidor (donde el experimento real está localizado), applets de Java en el lado remoto del cliente (el ordenador del estudiante) y el protocolo TCP/IP como mecanismo de comunicación entre ambos elementos. De este modo se conectan las variables definidas en Java con los controladores e indicadores establecidos en *LabVIEW*.

Uno de los experimentos que ya se encuentran operativos es el diseñado para estudiar la ley de Hooke. Los kits de robótica de *Legó*, empleados en este montaje, se han usado ya en varios proyectos de ciencia e ingeniería tales como [22] y [23], así como en cursos de enseñanza/aprendizaje ([24], [25]), pues son un recurso bastante económico a la hora de fabricar los prototipos. Otro experimento ya completado es el de la ley de Snell, el cual utiliza distintos materiales para su montaje. Este artículo ofrece un breve recorrido por la experimentación remota de ambos experimentos y una descripción detallada de sus montajes reales y de la interactividad que ofrecen sus controles remotos. Un pequeño resumen previo de la estructura de FisL@bs y la exposición final de conclusiones y comentarios relacionados con este proyecto completan el artículo.

## 2. MARCO DE EXPERIMENTACIÓN WEB PARA LABORATORIOS

Continuando con la estructura de laboratorios web utilizada para el proyecto *AutomatL@bs* [26], FisL@bs usa una arquitectura cliente-servidor en la que se utiliza el protocolo TCP/IP como medio de comunicación a cargo de realizar los intercambios de datos entre ambos. La Figura 1 muestra la arquitectura de esta comunicación. En ella, las líneas que van del remitente desde el lado del cliente al parser del lado del servidor y del remitente desde el lado del servidor al receptor del lado del cliente representan esta comunicación por TCP/IP. Los apartados

2.a y 2.b ofrecen más información acerca de la implementación de los lados cliente y servidor, respectivamente. Los apartados 3 y 4, por su parte, describen dos ejemplos específicos de la información que necesita ser comunicada por medio de los experimentos de las leyes de Snell y de Hooke.

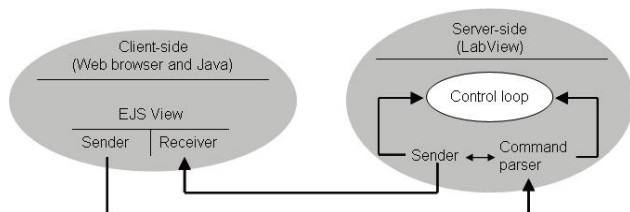


Figura 1. Arquitectura cliente-servidor. La comunicación entre las dos partes se basa en el protocolo TCP/IP. El servidor ejecuta el experimento remoto mientras que el simulado se ejecuta localmente en el lado del cliente.

### a. Implementación del lado del cliente

El lado del cliente es una applet de Java creado con el programa EJS y contenido dentro del entorno web que ofrece eMersion. Cuando un estudiante se conecta al laboratorio, el navegador abrirá tres ventanas. La Figura 2 muestra una imagen de esta situación para el caso del laboratorio virtual (simulado) de la ley de Hooke. La ventana superior sirve al estudiante para que examine la lista de actividades que debe llevar a cabo, consultar la documentación, cambiar el idioma o desconectarse del sistema. La ventana derecha muestra los ficheros que se hayan generado usando el laboratorio (simulado o remoto) que se encuentre activo, tales como ficheros de texto con datos o ficheros de imagen con gráficas. Finalmente, la ventana más grande contiene el applet que, o bien es el experimento simulado, o bien es la GUI que controla y visualiza el experimento remoto. Inicialmente, el applet muestra siempre el simulado, ofreciendo tanto la visualización como la interacción necesaria para controlarlo y experimentar con él.

Aunque toda la experiencia simulada se lleva a cabo en el lado del cliente (en el propio ordenador del estudiante), una vez que el alumno ha realizado con éxito todas las actividades del experimento virtual, se le permite el acceso a la siguiente fase: el laboratorio remoto. El applet de Java que muestra inicialmente el laboratorio simulado (Fig. 2) contiene un botón cuya función es la de conectar al laboratorio remoto. Tras pulsar dicho botón, la vista del applet cambia y muestra el laboratorio

real, momento desde el cual el usuario puede interactuar con el mismo. El estudiante realiza esta interacción por medio del applet, que cuenta con llamadas especiales (los comandos remitentes y receptores de la Figura 1, provistos por la clase JIL [20]). Estas llamadas especiales son las que se encargan de establecer una comunicación con LabVIEW (en el lado del servidor) usando las funciones y rutinas TCP. El comando receptor se usa de manera continua con el objetivo de obtener todos los datos medidos del experimento real, sin embargo, el comando remitente sólo se ejecuta cuando el estudiante cambia un valor en el applet que maneja.

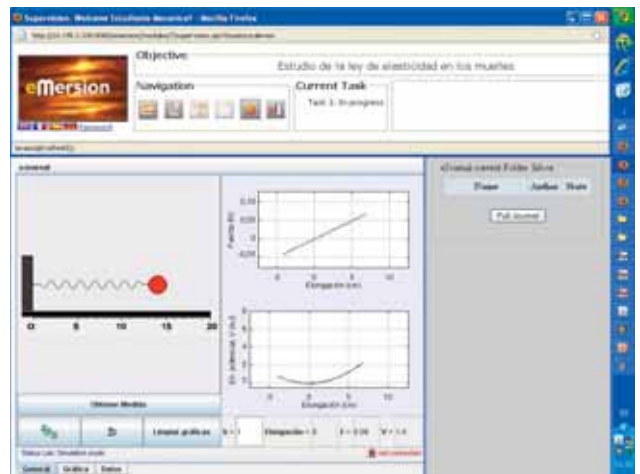


Figura 2. Entorno web de eMersion y experimento simulado de la ley de Hooke.

### b. Implementación del lado del servidor

Es el mismo ordenador el que ejecuta tanto el servidor web como el controlador del experimento en cuestión. Dicho controlador está desarrollado en LabVIEW y siempre contiene dos lazos principales de información. El primero es un lazo asíncrono que se encarga de la comunicación con el applet (recibiendo las acciones del usuario sobre éste y mandando también la información del sistema), mientras que el segundo es un lazo síncrono que controla continuamente el experimento real.

El primer lazo (el asíncrono) puede ocasionar problemas a la hora de intentar controlar un experimento debido a una posible dinámica de evolución rápida del mismo y a retrasos en la red de Internet. Sin embargo, este es un problema que debe ser analizado para cada caso en particular (teniendo en cuenta las magnitudes de tiempo de las dinámicas del proceso en cuestión) y, si las dificultades aparecen realmente, no existe una única

manera de tratarlo. Los apartados 3 y 4 presentan dos experimentos cuyo control es lo suficientemente sencillo como para evitar esta problemática.

### 3. PRIMER CASO DE ESTUDIO: LA LEY DE SNELL

La ley de Snell, o ley de la refracción de la luz, junto con la ley de la reflexión, constituyen axiomas ya enunciados por Sir Isaac Newton en su libro de *Óptica* [27] y forman parte de las leyes fundamentales de la Óptica. En particular, la ley de Snell describe la relación entre el ángulo  $\theta_i$  de incidencia de la luz sobre la superficie de separación de dos medios isótropos (por ejemplo, aire y agua) y el ángulo  $\theta_r$  de refracción. La relación entre los senos de estos dos ángulos es una constante que depende de los medios en cuestión. Matemáticamente se expresa:

$$n_1 \operatorname{sen} \theta_i = n_2 \operatorname{sen} \theta_r \Rightarrow \frac{\operatorname{sen} \theta_i}{\operatorname{sen} \theta_r} = \frac{n_2}{n_1} \equiv n \quad (1)$$

donde  $n_1$  y  $n_2$  son los índices de refracción de ambos medios. Si  $n_2 > n_1$ , ello implica que  $\theta_r < \theta_i$ , es decir, la luz se acerca a la normal. Por el contrario, cuando la luz pasa de un medio más refringente a otro menos refringente ( $n_1 > n_2$ ), se aleja de la normal.

El experimento diseñado, como se describe más adelante, permite el estudio de los ángulos de refracción en función de los ángulos de incidencia tanto para el primer caso (paso de la luz del aire al agua,  $n_2 > n_1$ ), como para el segundo (paso de la luz del agua al aire,  $n_1 > n_2$ ). En este segundo caso se puede comprobar que existe un valor del ángulo de incidencia para el cual el ángulo de refracción alcanza los 90°. Este ángulo se conoce como «ángulo límite», porque a partir de él deja de producirse la refracción de la luz y la superficie de separación agua-aire se comporta como un espejo, fenómeno conocido como «reflexión total».

El montaje experimental (Fig. 3) se hizo utilizando piezas de aluminio, una cubeta de plástico, una webcam, un puntero láser y un motor paso a paso. Las piezas de aluminio forman la estructura básica que sirve de soporte para la cubeta (rellena hasta la mitad de agua u otro líquido), el motor y el puntero láser. El láser se encuentra montado sobre un disco de aluminio que puede rotar en torno a su eje central. Dicho giro viene controlado por el motor paso a paso, de tal forma que al rotar el disco se cambia el ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ) del rayo láser sobre el líquido contenido en la cubeta. Dado

que el motor se controla mediante pasos de 0,9°, el error de esta variable es  $\delta\theta_i = \pm 0,9^\circ$ . El dispositivo cuenta con un relé para el encendido/apagado del láser cada vez que un estudiante se conecta y desconecta, respectivamente.

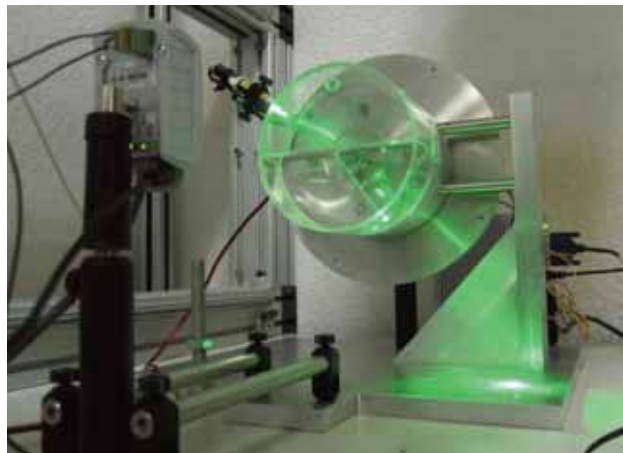


Figura 3. Montaje experimental para la práctica de la ley de Snell.

Para poder medir el ángulo de refracción ( $\theta_r$ ), la GUI del laboratorio remoto (Fig. 5) permite al usuario mover un puntero virtual superpuesto a la imagen que da la webcam. Esto se hace por medio de una barra deslizante graduada que indica el ángulo en el cual se encuentra el puntero en cada momento. De este modo, una vez que el estudiante ha posicionado el puntero haciéndolo coincidir con el rayo refractado, puede realizar la lectura del ángulo  $\theta_r$  sobre la barra deslizante graduada. El error estimado para estas medidas es  $\delta\theta_r = \pm 1^\circ$ .

Dado que la única variable a controlar en este experimento es el ángulo de incidencia ( $\theta_i$ ) y que el ángulo refractado ( $\theta_r$ ) se mide de manera visual, sólo hay un parámetro de control ( $\theta_i$ ) que debe ser enviado desde el remitente en el lado del cliente (EJS view, Fig. 1) al controlador de LabVIEW y ninguna información que deba ser devuelta por parte del mismo.

#### a. Actividades en simulación

La simulación para el estudio de las leyes de la reflexión y la refracción de la luz está basada en el mismo dispositivo construido para las actividades remotas, por lo que la vista simulada del experimento sirve al alumno para familiarizarse con el entorno.

En la ventana principal de la simulación (Fig. 4) se muestra una figura en 2D del sistema depósito cilíndrico



-puntero láser-escala graduada. El depósito contiene, a partes iguales, dos medios isotropos que pueden elegirse previamente de una lista desplegable en el apartado «Opciones». El rayo láser, tras incidir en la línea de separación de los dos medios, se escinde en los rayos reflejado y refractado, pudiéndose medir fácilmente en la escala graduada los valores de los tres ángulos implicados: el incidente, el de reflexión y el de refracción. Actuando directamente sobre la figura (animación Java), o mediante una barra deslizadora, el estudiante puede ir variando el ángulo de incidencia y comprobar el comportamiento de los otros dos rayos. Para facilitar el registro de datos, el programa muestra en displays los valores numéricos de estos tres ángulos.

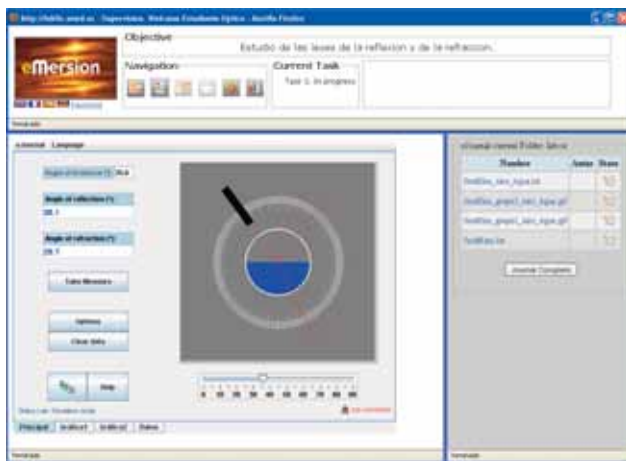


Figura 4. Experimento simulado de la ley de Snell.

Del análisis de los datos registrados en las correspondientes tablas y gráficas, el estudiante puede llevar a cabo diversas comprobaciones:

- Verificación de la ley de la reflexión: Los ángulos de incidencia y los de reflexión coinciden.
- Verificación de la ley de Snell: la representación gráfica de  $\sin \theta_i$  frente a  $\sin \theta_r$  da lugar a una recta. Si se realiza un ajuste lineal con los puntos de la gráfica es posible, además, deducir la razón  $n_2/n_1$  entre los índices de refracción de ambos medios (es la pendiente de la recta).
- Grado de validez de la aproximación de Gauss: la representación gráfica de  $\theta_i$  frente a  $\theta_r$  puede aproximarse por una recta sólo para valores pequeños de estos ángulos (hasta unos  $30^\circ$ ). En dicho dominio, la pendiente de la curva sigue siendo la razón entre índices de refracción.
- Determinación del ángulo límite (fenómeno de la reflexión total): si el medio incidente elegido es

más refringente que el segundo medio, se comprueba fácilmente que a partir de un determinado ángulo,  $\theta_c$ , el rayo de luz no atraviesa la superficie de separación de ambos medios, es decir, el rayo se refleja totalmente hacia el interior del medio incidente.

En esta simulación, para simular el error experimental que se comete al utilizar un dispositivo real (por ejemplo, el error que se puede cometer en el experimento remoto en la lectura de los ángulos sobre la escala graduada) se ha optado por generar los valores de los ángulos de refracción y de reflexión a partir de los teóricos e incrementarlos con un pequeño porcentaje de error aleatorio (positivo o negativo) generado por el ordenador. En el apartado «Opciones» el estudiante puede elegir el valor máximo (cota superior) de este porcentaje de error aleatorio, para simular medidas más o menos precisas. Si se usa la configuración por defecto, se obtiene la relación  $n_2/n_1$  con una precisión suficientemente buena en el experimento simulado (alrededor de  $\pm 0,007$  cuando se usan, por ejemplo, diez puntos para la regresión lineal). Obviamente, en el cálculo de los ángulos teóricos se hace uso, de manera oculta para el estudiante, de las leyes teóricas correspondientes y de los índices de refracción tomados de la bibliografía.

El programa incluye explicaciones, pantallas de ayuda, guión de prácticas, etc., para guiar al alumno en su trabajo en todo momento. Con el empleo de esta simulación, el estudiante adquiere la destreza suficiente para pasar a utilizar el experimento remoto optimizando al máximo el tiempo de conexión.

## b. Actividades en remoto

Una vez conectado al laboratorio remoto, el estudiante podrá verificar empíricamente la ley de Snell usando para ello el experimento real. La Figura 5 muestra la GUI en este modo de trabajo. Se muestran dos barras deslizadoras en la parte superior del applet en la ventana principal: uno controla el ángulo de incidencia de la luz del láser y el otro se usa para desplazar un puntero virtual que sirve para medir el ángulo refractado. En el lado derecho del applet se muestra el experimento en tiempo real por medio de una imagen de webcam. Finalmente, la gráfica de la izquierda se usa para que el estudiante pueda ir representando  $\sin \theta_i$  frente a  $\sin \theta_r$ .

Una casilla con el texto «Ver rayos», permite visualizar (o no) los tres rayos simulados (incidente, reflejado y

refractado) superpuestos sobre la imagen real de la webcam. De este modo, el estudiante puede comparar inmediatamente los resultados teóricos con los reales.

El experimento de la ley de Snell en su variante remota también ofrece a los estudiantes la posibilidad de efectuar regresiones lineales automáticamente con los datos recogidos. Teniendo en cuenta los errores de medición tanto en  $\theta_i$  como en  $\theta_r$  y asumiendo que el valor de uno de los medios isotrópicos (el del aire) no tiene error asociado, los estudiantes pueden determinar  $n_2/n_1$  (o  $n_1/n_2$  para los casos en los que se busca la reflexión total) con una precisión notablemente buena (alrededor de  $\pm 0,008$  cuando se utilizan, por ejemplo, 10 puntos para hacer la regresión lineal). Así pues, tanto los errores en las medidas como los resultados obtenidos a partir de ellas son similares para los dos modos de trabajo: experimento simulado y experimento remoto.

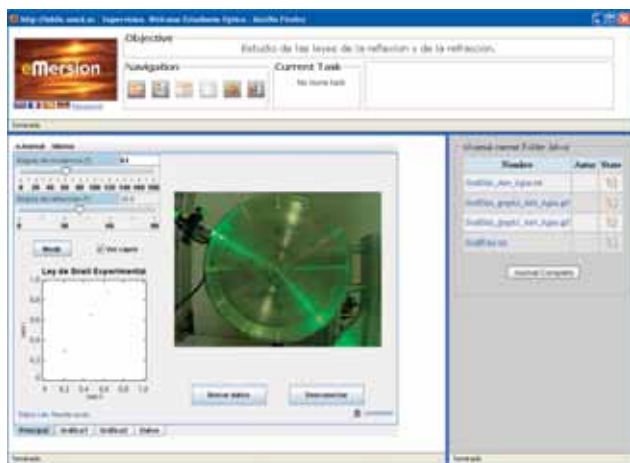


Figura 5. Experimento remoto de la ley de Snell. El puntero virtual (la flecha naranja) se usa para medir el ángulo de refracción.

#### 4. SEGUNDO CASO DE ESTUDIO: LA LEY DE HOOKE

En Mecánica, la ley de Hooke de la elasticidad enuncia que la extensión de un muelle es directamente proporcional a la fuerza aplicada sobre el mismo. Este enunciado es cierto siempre y cuando la fuerza no haga exceder el límite elástico. Matemáticamente:

$$F(t) = -k[x(t) - l] \quad (2)$$

donde  $k$  es la constante del muelle,  $l$  es su longitud natural,  $x(t)$  es la longitud del muelle en el tiempo  $t$  y  $F(t)$  es la fuerza de restauración ejercida por el muelle en ese instante de tiempo.

El experimento real de la ley de Hooke utiliza los siguientes elementos: un muelle de constante  $k = 14 \text{ N/m}$ , un motor dc NXT, un raíl de 25 cm de largo, un sensor de contacto, un sensor de fuerza Vernie, una Webcam, y una regla.

El muelle tiene uno de sus extremos fijados a una pared, mientras que el otro extremo está enganchado al motor NXT, que está montado sobre el raíl y puede desplazarse sobre él tirando del muelle en su movimiento. El sensor de contacto se usa para resetear el contador de vueltas del motor cada vez que éste llega al principio del raíl. El sensor de fuerza de Vernier tiene un rango de medidas lo suficientemente amplio para este experimento ( $[-10 \text{ N}, +10 \text{ N}]$ ) y una precisión lo bastante buena ( $\pm 0,01 \text{ N}$ ). Finalmente, la regla posee la graduación usual, con marcas 1 mm. La Figura 6 muestra una imagen del montaje real del experimento con los elementos antes descritos. En este experimento, un estudiante puede controlar la posición del motor NXT sobre el raíl y, por tanto, la extensión del muelle. El motor NXT dispone de un contador de giros o encoder que funciona con una precisión de  $\pm 1^\circ$ , lo cual se traduce en unos  $\pm 0,4 \text{ mm}$  de precisión en la medida del estiramiento del muelle para este montaje (considerando que el error asociado al valor conocido de su longitud natural,  $l$ , es cero). Esto significa entonces que el estudiante puede controlar la variable  $x$  de (2) con una precisión de  $\pm 0,4 \text{ mm}$ . Sin embargo, el estudiante también puede usar la regla para medir dicha variable, en cuyo caso obtendría una precisión de  $\pm 1 \text{ mm}$ .  $F$  es la variable medida por el sensor de fuerza y el error asociado a sus medidas es de  $\pm 0,01 \text{ N}$ . La longitud natural del muelle,  $l$ , es conocida (y el error asociado se considera nulo) y la constante del muelle,  $k$ , es la incógnita.

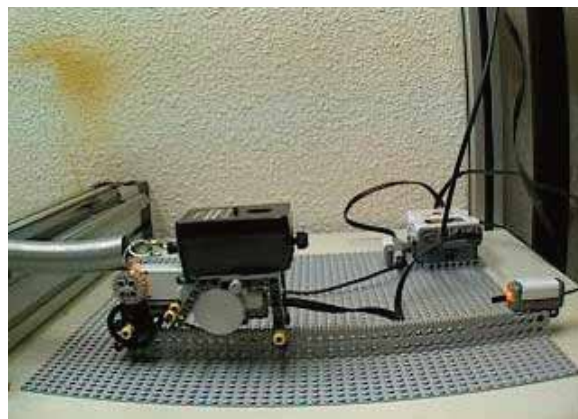


Figura 6. Montaje experimental para la práctica de la ley de Hooke.

Dado que el área de la sección transversal del muelle,  $A$ , también es conocido, es posible calcular además el módulo de elasticidad,  $E$ , usando (2) una vez se ha determinado el valor de  $k$ .

$$k = A \frac{E}{l} \quad (3)$$

Por lo tanto, en este caso hay únicamente un parámetro de control que se envíe desde el remitente en el lado del cliente (EJS view, Fig. 1) al controlador de LabVIEW: la posición del motor NXT sobre el rail ( $x$ ). La información devuelta desde el lado del servidor al receptor en el lado del cliente es la fuerza medida y la posición del motor dada por el encoder. El otro modo disponible para medir su posición (usando la regla) no requiere el envío de datos puesto que las medidas se toman visualmente a través de la imagen de la webcam.

### a. Actividades en simulación

El experimento simulado sirve para que el estudiante descubra la ley de Hooke y vea cómo varía la energía potencial ( $V$ ) cuando se estira o comprime el muelle. La gráfica superior de la Figura 2 muestra la ley de Hooke (la relación lineal entre  $F$  y  $x$ ) mientras que la inferior representa el valor de  $V$  frente al estiramiento o compresión del muelle. Ambas gráficas se actualizan de forma dinámica cuando el estudiante mueve la bola unida al muelle (pinchando en ella con el ratón y arrastrando). Se usa un valor por defecto para la constante del muelle ( $k = 1$ ), pero éste puede ser cambiado en cualquier momento usando la interfaz del experimento simulado. Los datos recogidos tanto durante la realización del experimento real como del simulado se pueden grabar en ficheros de texto de tal modo que el estudiante puede comparar los resultados teóricos con los reales y analizar las posibles diferencias.

### b. Actividades en remoto

La Figura 7 muestra la GUI cuando el estudiante se conecta al laboratorio remoto. Aparecen entonces dos displays en la esquina superior izquierda de la ventana principal: uno para mostrar la fuerza medida y otro para indicar el estiramiento del muelle. La barra deslizante se usa para cambiar la posición del motor sobre el rail y, por tanto, el estiramiento del muelle. Al igual que en el experimento de la ley de Snell, una webcam muestra la imagen del experimento en la parte derecha de la vent-

na, mientras que en la parte izquierda hay una gráfica que cambia dinámicamente a fin de representar la fuerza frente a la elongación del muelle, mostrando así la ley de Hooke.

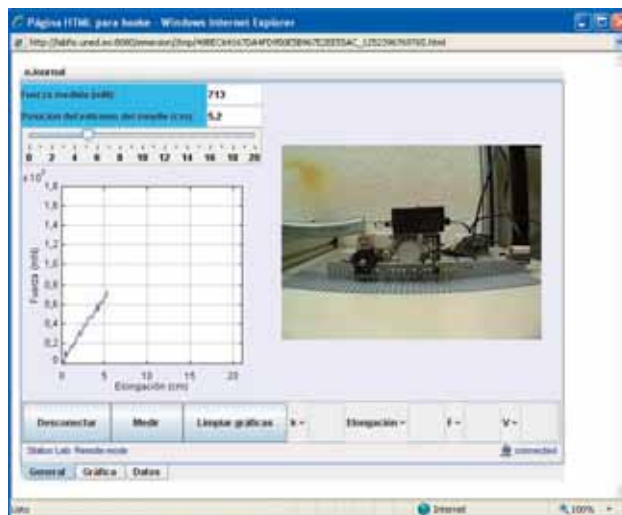


Figura 7. Experimento remoto de la ley de Hooke.

Aunque el fenómeno físico que se estudia en este experimento es sencillo, sigue habiendo muchas otras actividades importantes relacionadas con la metrología que se pueden realizar a través de este laboratorio. Por ejemplo, las incertidumbres en las medidas son algo que el estudiante debe tener en cuenta. Tal y como ya se mencionó las incertidumbres en las medidas para este experimento son:  $\delta x = \{\pm 0,4 \text{ mm}, \pm 1 \text{ mm}\}$  (dependiendo de cómo se mida el estiramiento del muelle, si por medio del encoder del motor o usando la regla),  $\delta l \approx 0$  para la longitud natural del muelle y  $\delta F = \pm 0,01 \text{ N}$  para las medidas de la fuerza de recuperación del mismo. Considerando el último valor y la constante elástica del muelle utilizado ( $14 \text{ N/m}$ ), los estudiantes deberían entender que necesitan tomar medidas con al menos  $0,7 \text{ mm}$  de diferencia entre cada estiramiento del muelle a fin de ser capaces de medir diferencias en la fuerza.

La gráfica de la Figura 7 muestra mucho ruido debido al movimiento del motor (que no es perfectamente suave) y a la limitada precisión del sensor de fuerza. Sin embargo, los estudiantes pueden tomar pares de medidas individuales de  $F-x$  y representar dichos puntos en otra gráfica distinta. Todo esto se hace por medio de la GUI de la Figura 7. El botón «Medir» dibuja el par  $F-x$  que se tenga en ese instante sobre dicha gráfica, la cual puede verse pulsando en la pestaña inferior llamada

«Gráfica». La Figura 8 muestra un ejemplo de esta gráfica representando una regresión lineal usando unos pocos puntos, que son medidas particulares reales de este experimento.

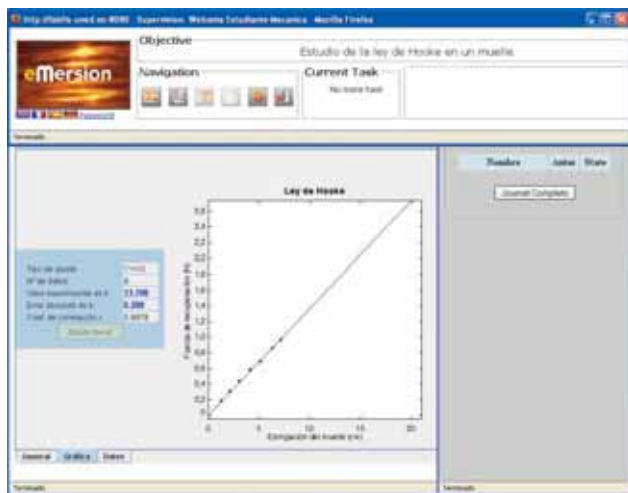


Figura 8. Regresión lineal efectuada con los datos recogidos en el experimento remoto.

Al representar los datos de esta manera, el ruido que aparecía en la Figura 7 parece desaparecer (aunque la incertidumbre sigue afectando a las medidas, de modo que, en efecto, el coeficiente de correlación de la regresión no es exactamente 1). En este caso, la regresión lineal da un resultado de  $k = 13,7 \pm 0,2$  (N/m), lo que se aproxima bastante al valor real de la constante elástica del muelle (14 N/m) y el error relativo es pequeño (cerca del 1,5%).

También se puede practicar el cálculo de incertidumbres, ya que los alumnos deberían dar sus resultados (el valor de la constante del muelle y el del módulo de elasticidad) con las incertidumbres asociadas. Siguiendo estas ideas, este experimento puede así mismo servir para que los alumnos reflexionen acerca de la importancia de utilizar herramientas y dispositivos equilibrados. En este caso, por ejemplo, la gran precisión para las medidas del estiramiento del muelle (usando el encoder del motor) no sirve de mucho y se desperdicia en parte a la hora de determinar la constante del muelle debido a la peor precisión del sensor de fuerza.

Finalmente, a fin de obtener  $k$ , los estudiantes deben realizar regresiones lineales con los datos recogidos tanto para el experimento simulado como para el remoto y deben también comparar los resultados de las gráficas mostradas en las Figuras 2 y 7. Por tanto, los ajustes por

mínimos cuadrados (manuales y/o computerizados) y la comparación de resultados teóricos y experimentales son aspectos que también se practican por medio de este experimento.

## 5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

FisL@bs continua el trabajo iniciado con el proyecto AutomatL@bs, extendiendo su utilidad desde la educación en Ingeniería de Control a la educación en Ciencias Físicas. FisL@bs hereda la sólida estructura de su exitoso homólogo y cambia únicamente los experimentos remotos y simulados para apropiarlos a un curso de Física. Se pretende que FisL@bs comience a funcionar como experiencia piloto durante el curso 2010-2011, con un repertorio inicial de unos 5 ó 6 experimentos (típicos todos de cursos introductorios) de diferentes campos de la Física. Los planes a largo plazo son mantener este portal y desarrollar y añadir nuevos experimentos remotos y virtuales a la red para cursos más avanzados.

Para los dos ejemplos aquí presentados, los experimentos simulados sirven a los estudiantes como un primer contacto con el fenómeno que se estudia: descubrir las leyes de Snell y de Hooke y analizar la variación de la energía potencial de un muelle. Continuando el estudio de estos mismos ejemplos, la experimentación remota permite a los estudiantes comprobar empíricamente las leyes de Snell y de Hooke con un experimento real. Aunque estos experimentos (y los fenómenos que tratan) son relativamente sencillos, los estudiantes no sólo aprenderán acerca de asuntos como la refracción, la reflexión, los índices de refracción, los muelles y la ley de Hooke, sino que también lo harán sobre temas como la medida de incertidumbres, cálculo de errores y regresiones lineales, etc. Los datos recogidos durante las experimentaciones reales y simuladas pueden ser guardados, de modo que los estudiantes pueden comparar y contrastar los resultados teóricos con los empíricos, lo que constituye uno de los pasos fundamentales del método científico. Dado que tanto el control remoto de la elongación del muelle como el del posicionamiento del láser se hace con una precisión alta (comparable con la utilizada en la realización de estos experimentos en el laboratorio presencial), los estudiantes obtienen medidas suficientemente buenas con las que poder trabajar.

Hay otros experimentos que se encuentran en proceso de desarrollo, como el péndulo rígido, el banco óptico, la fresadora, etc. Todos estos experimentos (tanto en



versión simulada como remota) serán integrados en la red de laboratorios de física que constituyen FisL@bs. Todos usarán la misma estructura y las mismas herramientas de software, aunque los materiales para sus montajes difieran. La fresadora, por ejemplo, está construida también con piezas de Lego y su diseño está basado en el que se muestra en [27]. Emplea tres motores NXT, un sensor de contacto, un par de pistones neumáticos, el brick inteligente NXT, un sensor de voltaje, una fuente de alimentación y muchas otras piezas de Lego. Dos de los motores NXT controlan la posición en las coordenadas «x» e «y» del sensor de voltaje mientras que el tercero se encarga de los pistones neumáticos, permitiendo que el sensor baje o suba para estar (o no) en contacto con la hoja de papel resistivo e iniciar (o cesar) la medición. La Figura 9 muestra una imagen del montaje para este experimento de electrostática. Aunque dicho montaje está terminado, el experimento virtual y algunos detalles del control remoto aún están siendo perfilados.

## BIBLIOGRAFÍA

1. Chang, G.W., Yeh, Z.M., Chang, H.M. and Pan, S.Y., «Teaching Photonics Laboratory Using Remote-Control Web Technologies», *IEEE Trans. Edu.*, **48**, 642-651 (November 2005).
2. S.C. Sivakumar, W. Robertson, M. Artimy and Aslam, N., «A Web-Based Remote Interactive Laboratory for Internetworking Education», *IEEE Trans. Edu.*, **48**, 586-598 (November 2005).
3. Alhalabi, B. et al. «Remote Labs: An innovative Leap in the World of Distance Education», *Proc. of the 4th Multi Conf. on Systemic, Cybern. and Informatics, and the 6th Int. Conf. on Information Syst., Anal. and Synthesis*, Orlando, Florida, 303-307 (July 2000).
4. Gorrel, J., «Outcomes of Using Computer Simulations», *J. of Research on Comp. Educ.*, **24-3**, 359-366 (1992).
5. Hwang, F.K., «NTNU Virtual Physics Laboratory: Java Simulations in Physics», *Multimedia in Physics Teaching and Learning Conference*, Udine, Italia (2009).
6. Christian, W. and Belloni, M., *Physlet Physics*, Prentice Hall, EE.UU. (2004).
7. Kocijancic, S., «Online Experiments in Physics and Technology Teaching», *IEEE Trans. Edu.*, **45**, 26-32 (February 2002).
8. Schauer, F., Kuritka, I. and Lustig, F., «Creative Laboratory Experiments for Basic Physics using Computer Data Collection and Evaluation Exemplified on the Intelligent School Experimental System (ISES)», *iNEER Special Volume: Innovations 2006*, 305-312 (2006).
9. Park, S.T., Lee, H., Yuk, K.C. and Lee, H., «Web-Based Nuclear Physics Laboratory», *Recent Research Developments in Learning Technologies*, 1165-1169 (2005).

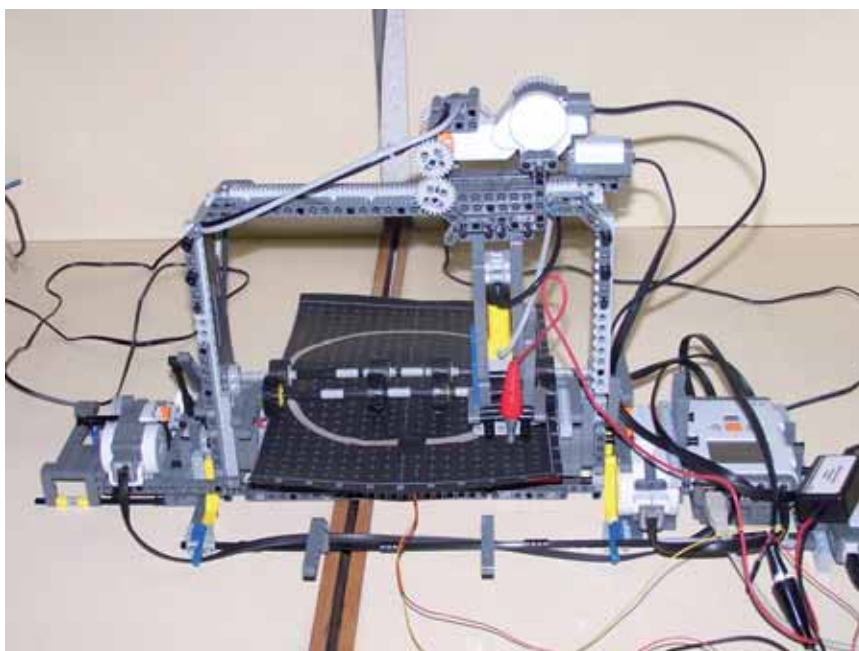


Figura 9. Fresadora para el experimento de electrostática.

10. Schauer, F., Lustig, F. and Ozvoldova, M., «Remote Scientific Experiments Across Internet: Photovoltaic Cell Characterization», *Interactive Aided Comput. Learning*, Villach, Austria (September 2006).
11. Gurkan, D., Mickelson, A., and Benhaddou, D., «Remote Laboratories for Optical Circuits», *IEEE Trans. Edu.*, 51, 53-60 (February 2008).
12. Macías, M.E. and Méndez, I., «Lab - Remote Electronics Lab in Real Time», *IEEE Frontiers in Educ. Conf. - Global Eng.: Knowledge Without Borders, Opportunities Without Passports*, S3G-12-S3G-17 (October 2007).
13. Moon, I., Han, S., Choi, K., Kim, D., Jeon, C., Lee, S. and Woo, S., «A Remote Laboratory for Electric Circuit using Passive Devices Controlled», *Proc. of the Int. Conf. on Engineering Educ.*, Budapest, Hungria (July 2008).
14. Gröber, S., Vetter, M., Eckert, B. and Jodl, H.J., «Remotely Controlled Laboratories: Aims, Examples and Exercises», *American J. of Physics*, 76-4, 374-378 (2008).
15. Vargas, H. *et al.*, «The Spanish University Network of Web-based Laboratories for Control Engineering Education: The AutomatL@bs Project», *European Control Conf.*, Budapest, Hungria (2009).
16. Dormido, R., Vargas, H., Duro, N., Sánchez, J., Dormido-Canto, S., Farias, G., Esquembre, F. and Dormido, S., «Development of a Web-Based Control Laboratory for Automation Technicians: The Three-Tank System», *IEEE Trans. Edu.*, 51, 35-43 (February 2008).
17. Esquembre, F., «Easy Java Simulations: A Software Tool to Create Scientific Simulations in Java», *Comput. Physics Commun.*, 156-2, 199-204 (2004).
18. Christian, W. and Esquembre, F., «Modelling Physics with Easy Java Simulations», *The Physics Teacher*, 45-8, 475-480 (November 2007).
19. Gillet, D., Nguyen Ngoc, A.V. and Reik, Y., «Collaborative Web-based Experimentation in Flexible Engineering Education», *IEEE Trans. Edu.*, 48, 696-704 (November 2005).
20. Vargas, H., Sánchez, J., Dormido, S., Salzmänn, C., Gillet, D. and Esquembre, F., «Web-Enabled Remote Scientific Environments», *Comp. Sci. and Eng.*, 11-3, 36-46 (2009).
21. Travis, J. «Using Java with LabVIEW», *Internet Applications in LabVIEW*, Prentice-Hall, EE.UU. (2000).
22. Iversen, T.K. *et al.* «Model-checking real-time control programs: verifying LEGO(R) MINDSTORMS™ systems using UPPAAL», *12th Euromicro Conf. on Real-Time Syst.*, Estocolmo, Suecia, 147-155 (June 2000).
23. Trung, P. *et al.*, «Development of Vision Service in Robotics Studio for Road Signs Recognition and Control of LEGO MINDSTORMS ROBOT», *IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics*, Bangkok, Tailandia, 1176-1181 (February 2008).
24. Kim, S.H. and Jeon, J.W., «Introduction for Freshmen to Embedded Systems Using LEGO Mindstorms», *IEEE Trans. Edu.*, 52, 99-08 (February 2009).
25. García-Cerezo, A. *et al.*, «Using LEGO Robots with LabVIEW for a Summer School on Mechatronics», *Proc. 2009 IEEE Int. Conf. on Mechatronics*, Málaga, España, 1-6 (April 2009).
26. Dormido, S. *et al.*, «Developing and Implementing Virtual and Remote Labs for Control Education: The UNED pilot experience», *17th Int. Federation of Automat. Control World Congr.*, 8159-8164 (July 2008).
27. I. Newton, *Opticks or a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light*. London (1704).
28. A. Søborg, Anders' Mindstorms Page [Online]. Disponible en: <http://www.norgesgade14.dk/index.php>.

Luis de la Torre Cubillo  
Dpto. de Informática y Automática  
ETS de Ingeniería Informática

Juan Pedro Sánchez Fernández  
Dpto. de Física de los Materiales