

# Simulaciones como recurso didáctico para el estudio de la física de los dispositivos electrónicos

Simulations as a teaching resource for the study of the physics of electronic devices

REVISTA  
DE  
ENSEÑANZA  
DE LA  
FÍSICA

Miguel Plano<sup>1</sup>, Federico Lerro<sup>1</sup> y Susana Marchisio<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura, Universidad Nacional de Rosario, Av. Pellegrini 250, CP 2000, Rosario, Argentina.

E-mail: mplano@fceia.unr.edu.ar

## Resumen

En el presente trabajo se describen una serie de recursos didácticos basados en tecnologías informáticas diseñados para el apoyo a los procesos de enseñanza y de aprendizaje de la física de los dispositivos electrónicos en el contexto de la formación de ingenieros. Las dificultades de aprendizaje observadas al cabo de más de dos décadas de enseñanza curricular de esta temática y los antecedentes reunidos por el grupo de autores relativos al desarrollo, implementación y evaluación con resultados positivos de un conjunto de soluciones didácticas con empleo de simulaciones avalan la propuesta. La misma se sostiene en la necesidad de adecuaciones de desarrollos existentes motivados por la permanente evolución tecnológica y curricular. Los recursos desarrollados que se presentan son simulaciones diseñadas con una marcada característica de interactividad y de visualización gráfica; las mismas se presentan integradas a una estrategia didáctica compuesta de la guía de estudio correspondiente y de diversas propuestas metodológicas para su incorporación curricular. Se exponen, además, los primeros pasos que se han dado en su implementación y los próximos objetivos generales en torno a la evaluación del recurso y posibles ampliaciones.

**Palabras clave:** Simulaciones; Dispositivos electrónicos; Física; Semiconductores; Energía.

## Abstract

This paper describes a series of didactic resources based on computer technologies designed to support teaching and learning processes of the physics of electronic devices in the context of engineering education. The learning difficulties observed after more than two decades of curricular teaching on this subject and the background gathered by the group of authors regarding the development, implementation and evaluation with positive results of a set of didactic solutions using simulations endorse the proposal. It is supported by the need for adaptations of existing developments motivated by the constant technological and curricular evolution. These developed resources are simulations designed with a marked feature of interactivity and graphical visualization; that are integrated into a teaching strategy composed of the corresponding study guide and various methodological proposals for its curricular incorporation. In addition, the first steps taken in its implementation and the next general objectives around the evaluation of the resource and possible expansions are presented.

**Keywords:** Simulations; Electronics devices; Physics; Semiconductors; Energy.

## I. INTRODUCCIÓN

Con la aparición de las computadoras, en la sociedad del conocimiento, aparecieron nuevas formas de aprendizaje de las ciencias básicas, posibilitando a los alumnos acceder a ella más fácilmente. Las tecnologías de la información (TIC) aparecen como recursos didácticos a través de entornos tales como simuladores y laboratorios remotos que brindan la posibilidad de trabajar en un ambiente de enseñanza e investigación de tipo “protegido”, con prácticas de muy bajo costo a las que no se tendrían acceso de otro modo, que además se pueden reproducir las veces que fueran necesarias hasta apropiarse de los conceptos (Cabero, 2008).

Las simulaciones, realizadas en dispositivos informáticos, son programas que, modelo matemático mediante, buscan reproducir en forma ideal un fenómeno real y los diferentes estados que el mismo puede tomar, a partir del establecimiento de un conjunto de parámetros vinculados. El resultado de la simulación

puede ser presentado a través de los valores de las variables de salida o mostradas gráficamente por medio de imágenes con mayor o menor grado de dinamismo.

Permiten estudiar, analizar y evaluar situaciones que no sería posible abordar de otro modo y posibilitan responder *¿qué pasa si...?* También constituyen en una fuente de estímulos sensoriales y cognitivos para que los estudiantes pongan en juego sus ideas frente a la actividad en el simulador (Cataldi y otros, 2013); y, en el caso de que se usen en el tiempo del aula presencial, mejoran la actitud del alumnado, que en las clases magistrales suele ser pasiva (Contreras y otros, 2010).

Las simulaciones se han convertido en una herramienta indispensable para la resolución de problemas, para ingenieros, diseñadores, analistas, administradores y directivos.

## II. JUSTIFICACIÓN

El estudio de la física de los dispositivos puede ser abordado según varios enfoques dependiendo del alumnado al cual está dirigido el curso. La asignatura, en la cual los autores del presente trabajo se desempeñan, pertenece a la carrera de Ingeniería Electrónica ubicada en el tercer año de la misma, tiene una extensión cuatrimestral y es responsable de introducir una amplia secuenciación de conceptos que van desde los orígenes de la Física Contemporánea, pasando por la física del estado sólido y los semiconductores, para llegar a la determinación del comportamiento eléctrico de los dispositivos electrónicos con sus consecuentes modelos. Esta amplitud en la temática agravada por la tendencia a la reducción de la duración de las carreras y el escaso tiempo que los estudiantes disponen para la maduración de los conceptos, requiere del diseño de estrategias didácticas en acuerdo con un enfoque que prioriza la construcción de un andamiaje conceptual explicativo de fenómenos y dispositivos por sobre el desarrollo de formalismos matemáticos específicos.

Otro aspecto a destacar son los obstáculos que en los alumnos subyace en la representación de lo no observable. Con relación a ello, distintos autores (Bunce y Gabel, 2002; Pozo, 1991) concluyen que es conveniente emplear imágenes u otro tipo de representaciones analógicas para mejorar el aprendizaje.

No menos importante es la necesidad de motivar a los alumnos para el estudio de contenidos de fundamentación científica en ciencias y tecnologías de los materiales (Gómez Antón, 2002; Jacas Rodríguez, 2002), destacándose que, por lo general, el alumno que elige estudiar ingeniería se muestra más interesado en la práctica con dispositivos que en abordar conocimientos fundamentales (Marchisio y otros, 2009). Otros autores remarcan que el interés de los estudiantes se puede incrementar realizando la metodología de *“aprender haciendo”* (Dewey, 1989) que también está presente en el significado popular del aprendizaje (Cataldi y otros, 2013), donde la teoría viene acompañada de la práctica y en este caso particular dicha práctica se realiza en un contexto de interactividad como la que supone el uso de recursos visuales adecuadamente diseñados.

El grupo de docentes que viene dictado la asignatura se ha regido con estos criterios por más de dos décadas, implementando nuevas estrategias didácticas y generando materiales, en pos de satisfacer a estas necesidades y de adaptarse a los cambios culturales y tecnológicos de la sociedad. En acuerdo con ello la didáctica es apoyada por diversos recursos, destacando aquellos que hacen uso de imágenes representativas de los fenómenos en estudio y habilitan el control del usuario sobre las variables involucradas.

Los primeros trabajos en el diseño se desarrollaron en el ámbito del laboratorio con sistemas de adquisición de datos específicos, luego se diseñó un sistema multimedia para el estudio de la física cuántica que integra texto, imágenes, videos y simulaciones. Posteriormente se comenzó a implementar, en los temas vinculados al estudio de los materiales y estructuras propias de los dispositivos electrónicos, simulaciones – de desarrollo propio y de otros autores de libre acceso a través de Internet de reconocidas instituciones internacionales- para el tratamiento de los respectivos conceptos teóricos.

Algunas de las simulaciones pertenecientes al área de la mecánica cuántica fueron realizadas por los propios docentes y aún continúan en uso (Von Pamel y otros, 2006; Marchisio y otros, 2005), otras como las ofrecidas por la Universidad de Buffalo (UB) (Wie, 1996), aplicadas durante varios años en los teóricos, ya no son usadas porque hoy es difícil ejecutarlas, debido a las herramientas de programación con las que fueron realizadas. Además, no contemplaban algunos aspectos relevantes, por ejemplo, vincular los resultados teóricos de los procesos físicos mostrados con el comportamiento eléctrico.

Esto impulsó el desarrollo de nuevas herramientas que se adaptasen mejor al contenido de la asignatura y a los nuevos dispositivos tecnológicos de pantalla para la observación y el control de las mismas. Estos recursos debían poder ser ejecutados también en aparatos móviles.

## III. LA REALIZACIÓN DE NUEVAS SIMULACIONES

## A. Algunas decisiones previas

Los programas fueron desarrollados a partir de una colección de herramientas diseñadas en UB que trataban con contenidos muy similares a los de la asignatura Física de los Dispositivos Electrónicos (FisDE) de la FCEIA-UNR. Esta colección incluía tanto el software de simulación como materiales de ejercicios y preguntas asociadas, dando al estudiante la posibilidad de realizar diversas interacciones a fin de analizar los principales procesos físicos. Como dato adicional las herramientas de la UB fueron programadas con *applets* de *Javae* introducidos en páginas web de libre acceso, por lo cual hasta no hace mucho estaban disponibles para cualquier usuario que se conectara con un navegador de Internet. Si bien los temas involucrados y su secuenciación eran casi los mismos que los de FisDE, la asignatura debía realizar una adaptación en la forma de uso de las simulaciones y en el contenido de los ejercicios, para lograr una implementación exitosa en el desarrollo curricular de la materia. Con el advenimiento de nuevos criterios de seguridad adoptados por los fabricantes de navegadores web, la ejecución de estos *applets* fue paulatinamente rechazada por estos. Esta conjunción de factores académicos y tecnológicos obligó al rediseño completo de las simulaciones.

Abarcar toda la temática de la asignatura con simulaciones implica un trabajo a mediano plazo por lo que se decidió comenzar a programar aquellas que contenían los conceptos neurálgicos que residen en todas las unidades temáticas. El presente trabajo presenta las tres primeras simulaciones que se realizaron y que, además por estar probadas se vienen utilizando en modo experimental, en diferentes situaciones del proceso de enseñanza-aprendizaje.

Los procesos de interacción entre el alumno y algún tipo de experiencia didáctica deben de ir acompañados de preguntas que ayuden a la reflexión: ¿qué se hace?, ¿por qué se lo hace?, ¿qué dificultades se pueden anticipar?, ¿qué está pasando?, ¿cómo está pasando?, etc. Con el uso de las simulaciones se logra que los roles de los estudiantes sean cada vez más autónomos, y que los docentes sean facilitadores orientados a la comprensión proporcionando suficientes oportunidades de experimentación (Hudson, 1998). Este pensamiento compartido generó la necesidad de crear para cada simulación su consecuente guía experimental.

## B. Los contenidos abordados

Las simulaciones realizadas hasta el momento son: Concentración de Portadores; Juntura Semiconductora; y Transistor Bijuntura en Zona Activa. Están integradas, junto a otros recursos, en un aula virtual Moodle, y, temporalmente, se puede acceder a ellas desde <<https://www.fceia.unr.edu.ar/fisica4>>. Las dos primeras basan su estudio a partir del diagrama de bandas de energías permitidas de los materiales o estructuras de uso frecuente, el estado de los portadores y la variación de ambos provocada por la modificación de las características constructivas de las mismas, como así también de las condiciones externas del medio: temperatura o polarización. La tercera, en cambio, muestra el estado de concentración de portadores en la típica estructura NPN trabajando en la zona que actúa como amplificador y su variación con los parámetros constructivos y eléctricos.

A manera de ejemplo se describirá la simulación Concentración de Portadores, que tiene un recorrido mayor en cuanto a integración curricular y resolución realizada por los alumnos.

# IV. LA SIMULACIÓN “CONCENTRACIÓN DE PORTADORES”

## A. Fundamentos que orientan el diseño

Esta simulación permite estudiar las implicancias de la estructura de bandas de energía en la generación de portadores de los materiales semiconductores en estado de equilibrio térmico.

Estudiar el comportamiento eléctrico de los materiales significa evaluar el grado de corriente eléctrica que puede fluir por ellos. Uno de los aspectos que determinan este flujo de corriente es la cantidad de carga que puede moverse a través del mismo. En los materiales semiconductores la producción de estos queda directamente relacionada con la estructura de bandas y la función de distribución de energía de las partículas (electrones y huecos) estudiados mediante la formulación estadística de Fermi-Dirac que da cuenta de la probabilidad de ocupación de los estados por parte de electrones. Las bandas de energía tienen una distribución de niveles propios modelizada matemáticamente por las funciones densidad de estados  $-g_c(E)$  para la banda de conducción y  $g_v(E)$  para la banda de valencia- obtenidas a partir de la ecuación de Schrödinger; en tanto que la estadística de Fermi queda representada por la función  $f(E)$ .

El recurso didáctico diseñado muestra gráficamente el resultado de estas funciones de acuerdo a los parámetros característicos del material y la temperatura, los cuales son controlados por los estudiantes.

Establecidas y mostradas estas funciones, el producto de ambas, devolverá al usuario las gráficas función densidad y función cantidad total de portadores –electrones y huecos- en cada banda de energía.

### B. Diseño tecnológico e Interacción simulación – usuario

El software de la simulación (portadores.html) se encuentra en el aula virtual y, al estar programado en HTML5, corre en navegadores para PC (Chrome, Mozilla, Edge), como en dispositivos móviles con Android, iOS o Windows.

La figura 1 muestra la interface de usuario, que se encuentra dividida en dos sectores, uno de control, a la derecha, y otro de visualización y medición, a la izquierda.

El sector de control posee una serie de casillas (selectores) que permiten la visualización gráfica o textual de diferentes variables que están listadas jerárquicamente con el fin de que el estudiante incorpore los conocimientos y logre la comprensión en forma ordenada. Además, se agregan controles de forma que se puedan variar las características del material bajo simulación y su temperatura.

La zona de visualización muestra una gráfica donde se observan diferentes funciones, cuya variable independiente común es la Energía que, por comodidad, se representa sobre el eje vertical, en tanto que las variables dependientes se representan en el eje horizontal sin indicación en general de los valores, para mayor claridad. Se ha incluido un señalador de posición del mouse para realizar mediciones sobre el eje de la energía.

Los parámetros de control son:

- Temperatura de la muestra
- Posición de  $E_c$ , que depende de la afinidad ( $\chi$ ) del material
- Material intrínseco
- Concentración de impurezas donantes ( $N_D$ )
- Concentración de impurezas aceptantes ( $N_A$ )
- Supresión del efecto de variación del  $E_g$  con la temperatura

Las variables a observar son:

- Estructura de bandas
- Nivel de Fermi y nivel de impurezas
- Densidad de estados en las bandas permitidas  $g_c(E)$  y  $g_v(E)$  - selector A
- Función de distribución de probabilidad de ocupación  $f(E)$  - selector B
- Densidad de portadores en las bandas  $n(E)$  y  $p(E)$  - selector C
- Información cuantitativa de  $N_V$ ,  $N_C$ ,  $n_i$ , impurificación neta, cantidad de portadores- selector D

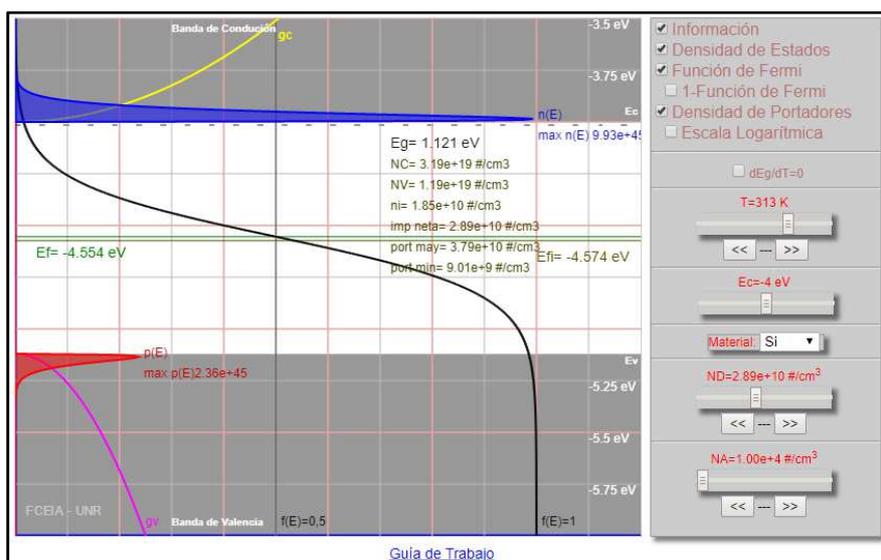


FIGURA 1. Ejemplo de interface de usuario de la simulación Concentración de Portadores.

En la parte inferior de la ventana, se observa un vínculo que lleva al estudiante a una guía de trabajo que tiene por propósitos fundamentar por qué y para qué se plantea la actividad, entre otros. También contiene consignas de prácticas –acorde a lo expresado por Hudson (1998)-, y limitaciones y advertencias del programa.

### C. Las actividades

Las actividades concretas propuestas a los estudiantes son, actualmente, alrededor de veinte preguntas, ejercicios y elaboración de conclusiones, similares a las siguientes:

1. Buscar en la bibliografía la definición de afinidad ( $\chi$ ) y los valores que adopta para cada material. Configurar el valor de  $E_c$  en la simulación al valor más cercano que la misma permita.
2. Determinar el  $E_g$  de cada material a  $T=300K$ ,  $1K$ ,  $450K$ . Realizar una gráfica.
3. Configurar un material intrínseco de Si a  $300K$ ; registrar la posición del nivel de Fermi respecto del centro de la banda prohibida comparando en forma cualitativa con los valores teóricos esperados.
4. En un material de Si, simular el agregado de una impureza donora; variar gradualmente la misma. Registrar y comentar la/s modificación/es que se producen en la banda prohibida.
5. Determinar la función trabajo del silicio intrínseco y el correspondiente a  $N_A=1.10^{16} \text{ #/cm}^3$ , ambos a temperatura ambiente y a  $400K$ .

En la actualidad esta guía tiene una estructura de consignas correlativas, aun así, pueden diferenciarse agrupamientos que se corresponden con un objetivo o concepto particular. De esta manera, la práctica destinada a un estudiante puede direccionarse en función de las necesidades, errores o falencias que el docente haya detectado. Dichas actividades didácticas buscan, entre otras, que el estudiante llegue a:

- Asumir que cada material tiene una banda prohibida ( $E_g$ ) particular
- Detectar como influye la temperatura en el  $E_g$  del material
- Identificar como se distribuyen los niveles energéticos en las bandas permitidas.
- Reconocer el efecto que provoca el agregado de impurezas en un material semiconductor
- Evaluar la interacción entre los distintos tipos de impurezas
- Determinar la afectación del nivel de Fermi con la temperatura y la impurificación en un material.
- Reconocer el estado de ocupación de las bandas en función de la impurificación y la temperatura
- Reconocer la función trabajo dentro de la estructura de bandas

## V. PROPUESTAS PARA LA INCORPORACIÓN EN EL ESPACIO ÁULICO

Cuando las simulaciones se usan antes de la instrucción formal, desarrollan la intuición y ayudan al desarrollo natural del proceso de aprendizaje; y, cuando se utilizan después, dan la oportunidad de aplicar lo aprendido o bien de comprenderlo mejor. Así, independientemente del momento en el que se usen los simuladores, es importante que se analice su propósito y cómo se va a orientar el proceso de interacción con los estudiantes (Gokhale, 1991).

Las propuestas de inserción del recurso pueden ser varias en función de la disponibilidad de las herramientas informáticas que posea la institución, de la carga horaria para la temática y de la metodología de evaluación general del curso.

En cuanto al primer aspecto, dada la compatibilidad que tiene el software con la mayoría de los navegadores web, si bien es ideal su ejecución en ordenador de mesa por su resolución, en caso de no poseer dicho recurso, puede ser ejecutado en cualquier dispositivo móvil de gama media, lo que facilitaría su uso en un aula común.

Si la carga horaria frente alumnos asignada es baja, puede promoverse el uso de la herramienta como tarea del hogar, previa introducción de la temática en forma presencial.

También se sugiere su aplicación a estudiantes que presentan dificultades en la comprensión de texto o que hayan fracasado en el estudio con los recursos tradicionales. En este sentido puede ser una herramienta eficaz para complementar una evaluación escrita.

## VI. DESTINATARIOS

El recurso está diseñado para ser aplicado en cursos universitarios de carreras vinculadas a la ingeniería electrónica o eléctrica, o carreras terciarias que incluyan en su currículum la física del estado sólido.

## VII. CONCLUSIONES

En un contexto de formación profesional y científico de ingenieros se presentaron las posibilidades que surgen, a partir del aprovechamiento de la informática con fines educativos, de generar y utilizar nuevos recursos virtuales, particularmente en el desarrollo y capacidades de las simulaciones. Se expusieron, además las necesidades de adecuar las metodologías y materiales ante cambios de paradigma en las carreras, como culturales de los estudiantes. A partir de estas premisas se presentó como propuesta el diseño y construcción de un conjunto de herramientas de carácter integral, en tanto que las mismas poseen no solo su componente principal, esto es el programa informático, sino también y como muchos autores afirman de vital importancia, la estrategia didáctica. Esta última se la supone compuesta por una guía de trabajo y los posibles modos de inserción, de tal forma que habilite a la reflexión exhaustiva por parte de los estudiantes y a la mayor eficiencia del recurso. Las herramientas desarrolladas con fines didácticos fueron implementadas a partir del segundo cuatrimestre del año 2018 y se comenzó a evaluar su diseño e implementación en forma exploratoria a través del pedido de opinión sobre la misma al reducido número de estudiantes que la emplearon. Asimismo, se observó la actividad desplegada por los estudiantes, siendo valorados positivamente por el equipo docente los logros cognitivos.

## VIII. FUTUROS DESARROLLOS

Los próximos objetivos que se plantean son el análisis de la incorporación del recurso en el dictado y la búsqueda de los métodos más adecuados de evaluación del mismo. A medida que se recogen datos de las evaluaciones, los docentes prevén detectarlas falencias y dificultades cognitivas y de integración de las herramientas. Paralelamente, se buscará identificar qué conceptos, dentro del currículo de la asignatura u otros vinculados al contenido previo, pueden requerir el desarrollo de recursos similares.

## REFERENCIAS

- Bunce, D. y Gabel, D. (2002). Differential effects on the achievement of males and females of teaching the particulate nature of chemistry, *J. Res. Sci. Teach.* 39(10), 911-927.
- Cabero, J. (2008). Las TICs en la enseñanza de la química: aportaciones desde la Tecnología Educativa. En Bodalo, A. y otros (Eds), *Química: vida y progreso*, Murcia: Asociación de químicos de Murcia.
- Cataldi, Z., Lage, F. J. y Dominighini, C. (2013). Fundamentos para el uso de simulaciones en la enseñanza. *Revista de Informática Educativa y Medios Audiovisuales*, 10(17), 8-16.
- Contreras Gelves, G., García Torres, R. y Ramírez Montoya, M. (2010). Uso de simuladores como recurso digital para la transferencia de conocimiento. *Apertura Revista de innovación educativa*, 2(1), <http://www.udgvirtual.udg.mx/apertura/index.php/apertura/article/view/22> Sitio consultado en noviembre de 2018.
- Dewey, J. (1989). *Cómo pensamos*. Barcelona: Paidós.
- Gokhale, A. (1991). Effectiveness of computer simulation versus lab and sequencing of instruction, in teaching logic circuits. *Journal of Industrial Teacher Education*, 29(1), 1-12.
- Gómez Antón, A. (2002). Pero, ¿y las bandas existen en los materiales? motivando el aprendizaje de la Física del Estado Sólido. *Memorias del III Taller iberoamericano sobre educación en ciencias de los materiales TIECIM'02*, 03-05 de julio 2002, Madrid.
- Hudson, D. (1998). Is this really what scientists do? Seeking a more authentic science in and beyond the school laboratory. En Wellington, Jerry. *Practical work in school science. Which way now?* London y New York: Routledge.
- Jacas Rodríguez, A., Liria Calderón, A., Torres Aguiar, A. y Rosales Bosch, J. (2002). La educación en ciencias e ingeniería de los materiales a través de problemas experimentales: una experiencia pedagógica en la Universidad Enrique José Varona. *Memorias del III Taller iberoamericano sobre educación en ciencias de los materiales TIECIM'02*, 03-05 de julio 2002, Madrid.

Marchisio, S., Von Pamel, O., Ronco, J. y Plano, M. (2005). Combinación de estrategias didácticas e integración de TIC's en la enseñanza de de fundamentos de física cuántica para ingenieros. *V Congreso Internacional Virtual de Educación CIVE2005*, 7-27 de febrero 2005, Universidad de Islas Baleares

Marchisio, S., Von Pamel, O., Ronco, J. y Plano, M. (2009), Estrategias didácticas con simulaciones interactivas sobre temas de Física de materiales para la formación de ingenieros. *Memorias del Congreso Nacional Información y comunicación para la sociedad del conocimiento CNIT2009*, 16-18 de junio 2009, Córdoba Argentina.

Pozo, J., Gómez Crespo, M., Limón, M. y Sanz, A. (1991). *Procesos cognitivos en la comprensión de la ciencia*. Madrid: Ministerio de Educación y Ciencia.

VonPamel, O., Marchisio, S., Plano, M. y Ronco, J. (2006). Del átomo a la materia en el laboratorio virtual. *Memorias de la IX Conferencia Interamericana de la Educación en la Física CIAEF2006*, 3-7 de julio 2006, San José de Costa Rica.

Wie, C.-R. (1996). The Semiconductor Applet Services. Recuperado de Professor Wie's Lab Website: <http://jas.eng.buffalo.edu/>