

# LA SIMULACIÓN ELÉCTRICA EN EL TRABAJO ACADÉMICAMENTE DIRIGIDO COMO VEHÍCULO DOCENTE PARA LA ENSEÑANZA DE LA ELECTRÓNICA

A.J. ACOSTA, R. DEL RÍO y A. RODRÍGUEZ-VÁZQUEZ

*Departamento de Electrónica y Electromagnetismo. Universidad de Sevilla. España.  
Instituto de Microelectrónica de Sevilla, IMSE-CNM-CSIC. España*

*La Electrónica es una disciplina versátil en cuanto a las metodologías y técnicas docentes que pueden emplearse. Frente a las clases magistrales, experiencias de cátedra, tutorías y clases prácticas, el Trabajo Académicamente Dirigido (TAD) se muestra como altamente eficiente a la hora de trasvasar conocimiento al alumno. En esta comunicación se pone de manifiesto la experiencia de innovación docente puesta en funcionamiento en la Licenciatura en Física de la Universidad de Sevilla y que opera satisfactoriamente desde el curso 2002/03.*

## 1. Introducción

Con el objetivo de mostrar la simulación eléctrica al alumnado como herramienta de ayuda a la comprensión, se propuso la realización de trabajos académicamente dirigidos (TADs), convalidables por créditos de libre configuración, a alumnos de la Licenciatura en Física de la Universidad de Sevilla. El perfil de los alumnos, requerido como adecuado para la realización de estos trabajos, es el de “cursar o haber cursado la asignatura Electrónica Básica, de segundo curso de la Licenciatura en Física”. Dicha asignatura es obligatoria y constituye el primer contacto riguroso del alumno con la Electrónica, pero lamentablemente carece de créditos de laboratorio. En tal sentido, el profesorado de la asignatura se encuentra con un alumnado al que le cuesta bastante esfuerzo entender y aplicar los conceptos básicos de la disciplina. Al ofrecer un trabajo no excesivamente complejo que involucra al alumno frente al simulador, dotamos al alumno de interés por la materia, lo activa e incentiva, estimula su propia iniciativa y adquiere una visión crítica de los circuitos a través de la observación de las respuestas.

La simulación eléctrica se muestra como una herramienta de enorme importancia para la comprensión del funcionamiento de circuitos electrónicos [1]. Por un lado, la simulación permite verificar el funcionamiento de circuitos para los que, por su complejidad, es inviable su estudio teórico “a mano”. Por otro lado, el análisis de circuitos simples pero con dependencias paramétricas y elementos no lineales se ve enormemente facilitado.

La dificultad y complejidad de la tarea requerirá la consulta personalizada al profesor, el uso de bibliografía específica y por supuesto el empleo de simuladores de circuitos. Con ello se pretende que los alumnos tengan actualizados los conocimientos, les obliga a trabajar sobre materias específicas y potencia aspectos tales y como el análisis de problemas y la capacidad de síntesis, fomentando el refuerzo positivo y aumentando la motivación por sus estudios de Electrónica.

## 2. Implementación del TAD

El TAD requiere una fase de preparación y validación que involucra directamente al profesorado de la asignatura. Basándose en el programa docente, el plan de ordenación docente (habitualmente dos ó tres

profesores involucrados) y teniendo en cuenta el perfil del alumnado, se proponen dos ó tres TADs por curso, ya que la carga máxima que supone un TAD por profesor es perfectamente asumible. Una vez la Facultad realiza la oferta de TADs, los alumnos se inscriben y, en el caso de superar el número de alumnos inscritos el cupo de TADs ofertados, se procede a una selección entre los candidatos. Se da al alumno elegido la opción de escoger libremente el TAD, aunque generalmente delega en el profesor dicha elección. En cualquier caso un alumno sólo puede realizar un TAD. No se contempla inicialmente la realización en parejas.

### 2.1. Requerimiento al alumnado

El grado de compromiso necesario que se requiere del alumnado, así como la carga docente del alumno en el curso, hace que los alumnos que optan al TAD están por encima de la media en cuanto a motivación y conocimientos, presentando por lo general suficientes garantías de éxito para su realización. Los alumnos con muy poca iniciativa o con bajo perfil académico son rechazados en el proceso de selección. La razón no es discriminarlos *a priori* sino redirigirlos hacia otros niveles de motivación. Basándonos en nuestra experiencia, el alumno de “perfil bajo” suele dedicar al principio muchos recursos propios al TAD, involucrando al profesor y abandonando incluso la atención a otras asignaturas regladas. Más tarde, si no consiguen avances significativos en el TAD, lo abandonan, con el consiguiente aumento en el grado de frustración. Por ese motivo se seleccionan, entre los candidatos que lo soliciten, aquellos que aúnan compromiso, motivación, conocimientos, autoexigencia y tesón. Adicionalmente se valorarán la capacidad de autoaprendizaje y los conocimientos informáticos.

### 2.2. Ambito de aplicación y condiciones de contorno

Dado el carácter anual de la asignatura Electrónica Básica, se ha pensado que la realización idónea de los TADs sea en el 2º cuatrimestre, ya que para entonces los conceptos y habilidades propias del análisis de circuitos han sido asimilados por los alumnos. Aunque no se impone el requisito primordial de estar matriculado o haber cursado la asignatura de Electrónica Básica, se da preferencia a los matriculados en ésta, ya que el aprovechamiento será mayor. La justificación reside en que, si no se ha cursado aún la asignatura, es difícil abordar con garantías de éxito el TAD. Si, por otro lado, ya se ha aprobado la asignatura y se está matriculado en otras asignaturas relacionadas con la Electrónica, dado que éstas se sitúan en los últimos cursos de carrera, los conocimientos en Electrónica Básica ya deben estar suficientemente afianzados.

Los conocimientos previos del alumno en el ámbito de la Electrónica son: teoría de circuitos básica, técnicas de análisis de circuitos y dispositivos electrónicos básicos.

### 2.3. Objetivos

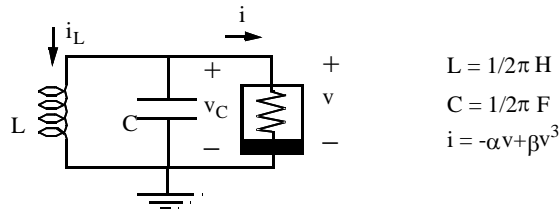
Los objetivos generalistas son involucrar al alumno frente al simulador, dotar al alumno de interés por la materia, activarlo e incentivarlo, estimular su propia iniciativa y adquirir una visión crítica de los circuitos a través de la observación de las respuestas. Los objetivos específicos dependen en gran medida del TAD asignado al alumno. En el apartado siguiente se muestra un resumen de las propuestas de TADs.

## 3. Propuestas de TADs

Se ha propuesto la realización de tres TADs por curso académico. Los objetivos, contenidos y metodologías específicas se resumen a continuación.

### 3.1. Simulación de osciladores RLC no lineales

El objetivo particular de la propuesta es el análisis y estudio mediante simulación eléctrica con PSPICE (MicroSim v. 8.0) [2] de la fenomenología asociada a circuitos RLC implementados con una bobina, un condensador y un resistor no lineal [3], tal y como se muestra en la Fig. 1.



**Figura 1.** Circuito RLC no lineal.

El TAD está orientado hacia el estudio de la no-linealidad introducida por los términos  $-\alpha$  y  $\beta$  de la ecuación del resistor, así como el hecho de tratarse de un sistema con dinámica de segundo orden. La realización se divide en cuatro módulos diferentes, cuya descripción se resume a continuación:

- i) Descripción del resistor no lineal mediante el uso de una fuente no lineal de intensidad controlada por tensión. Empleo del elemento GPOLY desde la captura de esquemáticos. Este elemento permite la implementación de fuentes controladas con dependencia polinomial de una o más variables. El objetivo a cubrir es la representación de  $i$  frente a  $v$  para distintos valores de  $\alpha$  y  $\beta$  mostrando la influencia de las no linealidades.
- ii) Representación del espacio de las fases del oscilador RLC para diversos valores de los parámetros del resistor no lineal, considerando distintas condiciones iniciales en la bobina y en el condensador. El objetivo es determinar la ruta dinámica en presencia de no linealidades débiles y fuertes, así como la comparación con el caso puramente lineal.
- iii) Obtención de la representación espectral de las señales a partir de los datos del análisis transitorio, a través del módulo de FFT del editor gráfico.
- iv) Repetición del análisis considerando un valor de capacidad en el condensador mucho menor, extrapolando por paso al límite a una dinámica de primer orden no lineal y comprobación del postulado de salto.

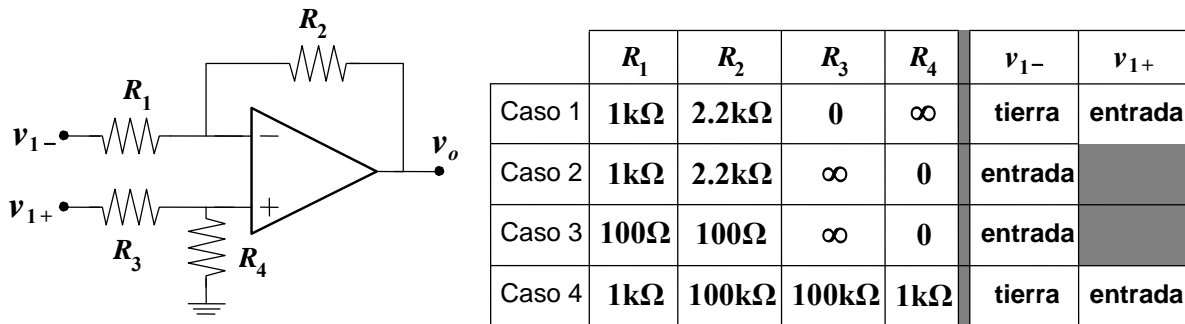
Con estos cuatro módulos se pretende que el alumno tome contacto con la dinámica no lineal asociada a circuitos de segundo orden. Además se pretende que extraiga el máximo beneficio ya que, por un lado, el alumno conoce previamente la teoría de circuitos dinámicos de segundo orden lineales, así como circuitos de primer orden con dinámica no lineal. Además de todos los aspectos reseñados anteriormente, el alumno puede entender aspectos interesantes, como por ejemplo fenómenos de saltos en las características, que de otra forma difícilmente podría entender y que se han postulado durante las clases teóricas.

### 3.2. Aplicaciones lineales del Amplificador Operacional

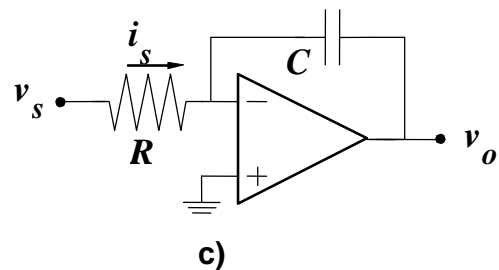
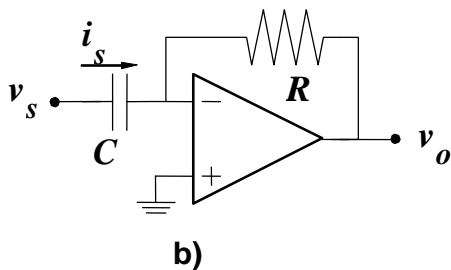
Este Trabajo permite un primer contacto con el uso del amplificador operacional de tensión como bloque básico para el diseño de circuitos analógicos. Para ello se simulan varios circuitos con un amplificador operacional de propósito general en el rango de audio-frecuencias.

El TAD pretende mostrar cómo, mediante la simulación, se consiguen resultados más cercanos a la realidad que los obtenidos mediante análisis ideal, porque el uso del ordenador permite trabajar con modelos más complejos del amplificador operacional. En concreto, utiliza el modelo de amplificador operacional 741 que incluye MicroSim en sus librerías [2]. La realización contempla la verificación cualitativa y cuantitativa del comportamiento de diferentes circuitos de procesamiento de señal basados en el amplificador operacional de tensión. En concreto:

- i) sumadores/escaladores (Fig. 2a),
- ii) diferenciadores (Fig. 2b) e integradores (Fig. 2c).



a)

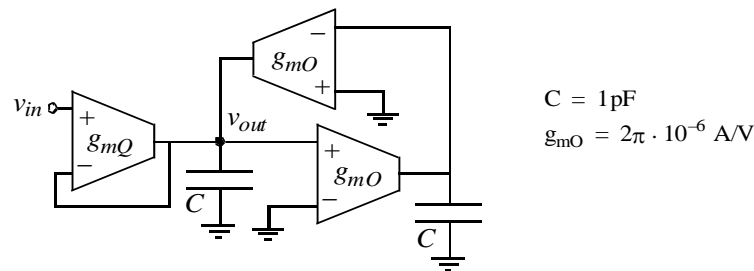


**Figura 2.** a) Esquema del sumador/escalador y casos contemplados. b) Esquema del diferenciador. c) Esquema del integrador.

Con la realización de estos módulos, a través de la observación del comportamiento de los circuitos, así como la comparación de éstas con las previsiones de los modelos teóricos, se pretende que el alumno desarrolle cierta intuición sobre las condiciones necesarias para reducir los errores en circuitos con amplificadores operacionales. En concreto se analizarán y cuantificarán parámetros significativos del amplificador, como son el ancho de banda, la saturación en tensión y corriente, el *slew-rate* y el *offset*, entre otras [1].

### 3.3. Simulación de filtros paso-banda basados en amplificadores de transconductancia

El objetivo particular de la propuesta es el análisis y estudio mediante simulación eléctrica de la fenomenología asociada a filtros activos tipo paso de banda, implementados con amplificadores de transconductancia (OTAs).



$$\frac{v_{out}(s)}{v_{in}(s)} = \frac{s \frac{\omega_0}{Q}}{s^2 + s \frac{\omega_0}{Q} + \omega_0^2} = \frac{s \frac{2\pi f_0}{Q}}{s^2 + s \frac{2\pi f_0}{Q} + (2\pi f_0)^2}$$

**Figura 3.** Filtro paso de banda basado en OTAs.

La Fig.3 muestra la implementación de un filtro paso de banda usando amplificadores de transconductancia y condensadores (*técnica Gm-C*) [4]. El trabajo está orientado al estudio en el dominio del tiempo y de la frecuencia de las características entrada/salida de este filtro, así como su operación considerando señales de entrada multi-tonales. La realización del trabajo se divide en 5 módulos, cuya descripción se muestra a continuación:

- i) Determinación, a partir de un análisis en AC, de la función de transferencia del filtro (máximo de la función de transferencia, frecuencia central, ancho de banda y factor de calidad) a partir de modelos ideales para los OTAs. Análisis transitorio para determinación del comportamiento entrada-salida para señales multitono y obtención del espectro a partir de la utilidad FFT.
- ii) Se repite el apartado i), considerando modelos de ganancia finita para los OTAs. Se analiza el efecto de ganancia finita de los OTAs sobre los parámetros del filtro.
- iii) Se repite el apartado i), considerando modelos de ganancia dependiente de la frecuencia para los OTAs. Se analiza el efecto del ancho de banda de los OTAs sobre los parámetros del filtro.
- iv) Se repite el apartado i), considerando modelos no lineales para los OTAs, basándose en fuentes no lineales de intensidad controladas por tensión.
- v) Se repite el apartado i), considerando modelos no lineales para los OTAs, incluyendo el efecto de ganancia finita dependiente de la frecuencia.

Con estos cinco módulos se pretende que el alumno observe la influencia de los comportamientos no-ideales de los OTAs usados para construir el filtro, empleando para ello distintos modelos para los OTAs. Mediante análisis temporales y espectrales, se tratará de determinar los errores de fase y amplitud, la distorsión y la intermodulación, efectos que difícilmente se podrían calcular analíticamente.

#### 4. Resumen de resultados

Desde el curso 2002/03 se vienen ofertando TADs en la Licenciatura en Física en todas las áreas de conocimiento, uniéndose desde entonces a la oferta los presentados en esta comunicación. En la Tabla 1 se muestra un resumen de las actividades relacionadas.

El número de alumnos que han cursado los TADs ha variado cada año, habiendo cursos en los que hubo hasta seis solicitudes y hubo que descartar candidatos, hasta cursos en los que sólo hubo dos candidatos, quedando vacante un trabajo. El número promedio de horas que dedicó cada alumno al TAD fue de treinta horas de trabajo, excluyendo el tiempo de familiarización con la aplicación y la redacción de la memoria. En la mayoría de los casos, la motivación del alumno fue extraordinaria y colmó con creces las expectativas creadas. La tasa de abandonos fue reducida (20%, dos casos) y siempre motivada por causas ajenas a la dificultad del trabajo.

Las calificaciones obtenidas fueron sobresalientes (9 ó 10) en una gran mayoría de casos (70%, siete casos) y únicamente hubo un caso suspenso (10%). Únicamente se dejaron de ofertar en el curso 2004/05, motivado en gran medida por el cambio de profesorado en la asignatura y por los discretos resultados del curso anterior.

En cuanto a los TADs, el de “Aplicaciones Lineales del Amplificador Operacional” no ha tenido ningún abandono, con calificaciones altas, mientras que los dos restantes han tenido sólo un abandono. Las puntuaciones están en general distribuidas homogéneamente. Más información sobre material didáctico y prácticas guiadas puede encontrarse en [5].

|   |                 | Curso 2002/03 | Curso 2003/04 | Curso 2005/06 | Curso 2006/07 |
|---|-----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| RLC no lineal   | Nº matriculados | 1             | 0             | 1             | 1             |
|   | Nº abandonos    | 0             | 0             | 1             | 0             |
|   | Calificación    | 10            | -             | -             | 9             |
| Amplif. Oper.   | Nº matriculados | 1             | 1             | 0             | 1             |
|   | Nº abandonos    | 0             | 0             | 0             | 0             |
|   | Calificación    | 10            | 9             | -             | 9             |
| Filtro GmC  | Nº matriculados | 2             | 1             | 1             | 0             |
|   | Nº abandonos    | 0             | 1             | 0             | 0             |
|   | Calificación    | 10 - 4        | -             | 10            | -             |
| Nº solicitudes / Nº plazas ofertadas/ Nº plazas cubiertas |                 | 4 / 4 / 4     | 2 / 4 / 2     | 4 / 2 / 2     | 6 / 2 / 2     |

**Tabla 1.** Resumen de actividades y resultados.

## 5. Conclusiones

Con el objetivo de mostrar la simulación eléctrica al alumnado como herramienta de ayuda a la comprensión, se propuso la realización de trabajos académicamente dirigidos (TADs), convalidables por créditos de libre configuración, a alumnos de la Licenciatura en Física de la Universidad de Sevilla. La simulación eléctrica se muestra como una herramienta de enorme importancia para la comprensión del funcionamiento de circuitos electrónicos. Se ha propuesto la realización de tres TADs por curso académico: “Simulación de osciladores RLC no lineales”, “Aplicaciones lineales del amplificador operacional” y “Simulación de filtros paso-banda basados en amplificadores de transconductancia”.

La experiencia de implantación de la técnica durante cuatro cursos académicos ha demostrado la validez de la misma en cuanto a i) la aceptación por parte del alumnado, ii) alto grado de satisfacción del alumno tras su realización e iii) los resultados obtenidos en cuanto a motivación generada y adquisición de conocimientos de la disciplina.

## 6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente subvencionado por el Ministerio de Educación y Ciencia a través del proyecto TICOCO TEC2007/65105

## Referencias

- [1] R. W. Goody. *OrCAD PSpice para Windows, Vols. I, II y III*. Pearson Education (2003).
- [2] URL: <http://www.microsim.com>
- [3] L.O. Chua, C.A. Desoer and E.S. Kuh. *Linear and Nonlinear Circuits*. Mc Graw-Hill (1987)
- [4] E. Sánchez-Sinencio, R. L.Geiger and H. Nevárez-Lozano. *Generation of Continuous-Time Two Integrator Loop OTA-C Filter Structures*, *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, 35-6, 936-946 (1988)
- [5] URL: <http://www.imse.cnm.es/~rocio/EBAS>, apartado Simulación de Circuitos Electrónicos en “Enlaces”