

Instrumentos musicales electrónicos: herramientas para el aprendizaje activo en Ingeniería Eléctrica

Martín Tarragona, Pablo Zinemanas, Federico Davoine, Gabriel Eirea and Ignacio Irigaray
Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería
Universidad de la República, Montevideo, Uruguay
{tarragona, pzinemanas, fdavoine, geirea, irigaray}@fing.edu.uy

Resumen—Este artículo describe las experiencias que se han desarrollado en los últimos cuatro años en el Taller de Electrónica Libre (TEL) que apuntan a utilizar instrumentos musicales como herramientas pedagógicas para el aprendizaje activo de Ingeniería Eléctrica. El presente trabajo describe las experiencias acumuladas hasta el momento, así como el trabajo planteado a futuro.

I. INTRODUCCIÓN Y MOTIVACIÓN

La carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de la República enfrenta algunas dificultades: la escasa visibilidad entre los distintas carreras de Ingeniería dentro de la Universidad (Computación, Civil, Mecánica, Química), la falta de motivación de los estudiantes, la falta de integración social y la deserción tienen como resultado que el número de estudiantes de Ingeniería Eléctrica inscriptos por año bajó de 240 a 120 en los últimos siete años.

La carrera tiene una duración de 5 años y está estructurada en tres bloques consecutivos: (1) las asignaturas básicas de Matemática y Física se concentran en los dos primeros años, (2) las asignaturas tecnológicas básicas en el tercero, (3) el contenido tecnológico más específico se concentra en los dos últimos años. En particular, la enseñanza de la electrónica está focalizada en conceptos teóricos que son trabajados recién en el penúltimo año de la carrera. Eso contrasta con las expectativas de los estudiantes que ingresan a la carrera, que pretenden tener contacto directo con la electrónica desde primer año.

Para superar esto, desde el año 2013 se ofrece el curso Tallerine en el primer año de la carrera. Los principales objetivos de Tallerine son: motivar a los estudiantes, estimular su creatividad, fomentar su integración social, que los estudiantes se identifiquen con la Universidad y la carrera, e introducir los objetos, temas, metodologías y actores de la carrera Ingeniería Eléctrica [1].

Cada edición del curso consiste en varios proyectos de Ingeniería Eléctrica, entre los cuales los estudiantes pueden elegir de acuerdo a sus intereses y preferencias. Los proyectos deben cumplir con los siguientes requisitos: la construcción de un prototipo, ser representativos de aplicaciones de ingeniería eléctrica, y tener aspectos lúdicos y motivadores.

El TEL propuso en cada una de las ediciones del curso un proyecto que vincula Ingeniería y Música. En 2013 y 2014 fue el Sintetizador modular analógico [2], mientras que en 2015 el proyecto fue la construcción de un Vocoder. Trabajar

con estas aplicaciones de audio presenta varias ventajas: son modulares, los componentes y herramientas necesarias son básicas y de bajo costo. Muchos conceptos fundamentales de la Ingeniería tienen una relación directa con conceptos musicales, por ejemplo, la relación entre frecuencia y altura, o amplitud y volumen. Este artículo presenta la siguiente estructura: una descripción de la metodología utilizada, una descripción del Sintetizador, una descripción del Vocoder, los resultados y, finalmente, conclusiones y trabajo a futuro.

II. DESARROLLO

En esta sección comenzaremos describiendo la metodología general aplicada, para luego introducir los aspectos específicos a cada uno de los proyectos. Al comienzo del curso se forman grupos de seis estudiantes a fin de permitir una división razonable de tareas, así como para mejorar la integración de los estudiantes.

La primera mitad del curso trata con la introducción de los aspectos básicos de la electrónica, componentes eléctricos, procesamiento de señales y la teoría de circuitos, simplificadas de una manera que se convierten en comprensibles para los estudiantes de primer año y a su vez sean útiles para la comprensión del proyecto que se va a desarrollar. Luego se presentan los módulos que serán utilizados en el proyecto, incluyendo una explicación analítica. Los estudiantes se encargan de armar los circuitos de los módulos en protoboard, y se verifica su funcionamiento con un procedimiento de prueba y depuración desarrollado por los profesores. En esta etapa, se introducen las herramientas básicas de laboratorio tales como multímetros, osciloscopios, generadores de señales y fuentes de alimentación. Todas estas actividades son realizadas por cada grupo guiado por los profesores, lo que lleva al estímulo del aprendizaje entre iguales y el aumento de la motivación.

II-A. El Sintetizador

El Sintetizador es un instrumento electrónico que puede generar una gran gama de sonidos y que ha sido utilizado por artistas de todos los estilos desde su creación. Consiste en un conjunto de módulos procesadores o generadores de señales, con la particularidad de que sus entradas, sus salidas y los parámetros de control son voltajes. Esto permite que se puedan interconectar libremente, otorgando una gran flexibilidad al momento de generar distintos sonidos.

La utilización de sintetizadores musicales como herramienta pedagógica cuenta con algunos antecedentes [3], [4], [5], de los cuales solo [3] utiliza sintetizadores analógicos mientras los otros utilizan herramientas digitales. En nuestro caso, se ha optado por la electrónica analógica por su mayor vinculación con los fundamentos de la carrera. La bibliografía del curso cuenta con un libro de acceso abierto en español [6] e innumerables fuentes de circuitos que están disponibles también de forma libre en Internet.

El curso se organiza en tres etapas: en la primera, se les presentan a los estudiantes los aspectos básicos de los componentes electrónicos (resistencias, condensadores, transistores, amplificadores operacionales, compuertas lógicas, etc.) y algunos circuitos básicos necesarios para la construcción de los módulos (convertidores voltaje-corriente, disparadores Schmitt, circuitos RC, etc.).

La segunda etapa tiene por objetivo el desarrollo de los módulos que van a conformar el Sintetizador. Estos módulos son:

Oscilador controlado por voltaje (VCO): mediante este módulo se obtienen a la salida ondas triangulares y cuadradas cuyas frecuencias están dadas por el voltaje de control (CV) (a mayor voltaje mayor frecuencia).

Filtro controlado por voltaje (VCF): es un filtro pasabajos cuya frecuencia de corte está dada por el valor del CV.

Amplificador controlado por voltaje (VCA): es un amplificador cuya ganancia está determinada a partir del CV. Cuando este es nulo corresponde con ganancia cero (la señal es nula a la salida), mientras que cuando es máximo implica una ganancia unitaria.

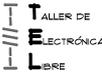
Generador de envolvente (ADgen) (Attack-Decay Generator): este módulo genera una envolvente que emula la dinámica temporal de los sonidos de los instrumentos acústicos. Tiene dos parámetros: el tiempo de ataque y el tiempo de decaimiento. Estos son definidos mediante potenciómetros ajustables por el usuario.

Oscilador de baja frecuencia (LFO): es un oscilador que trabaja a frecuencias inferiores a las audibles. Generalmente se utiliza como modulador de los parámetros de control de otros módulos.

Generador de ruido (NG): este módulo genera una señal aleatoria a partir de la amplificación de ruido térmico. Cuenta con filtros que permiten obtener ruido coloreado a la salida.

Previo a la construcción de los módulos se realiza una introducción al armado de los circuitos, desde el tratamiento de las placas de cobre, pasando por el dibujado de las pistas, hasta su inmersión en percloruro de hierro, las perforaciones de los *pads* para los componentes y su soldadura.

Con el objetivo de que los estudiantes cuenten con toda la información necesaria para la construcción de los circuitos, se les brinda una ficha por módulo -a modo de ejemplo en la Figura 1 se muestra la correspondiente al VCO- que contiene una breve descripción del mismo, su esquemático, su *layout*, un dibujo de las pistas del PCB, la lista de componentes y una reseña de su funcionamiento. Al ser grupos relativamente grandes para el trabajo práctico, los mismos son divididos



TALLER DE
ELECTRÓNICA
LIBRE

Manual de construcción de
VCA
Voltage Controlled Amplifier *

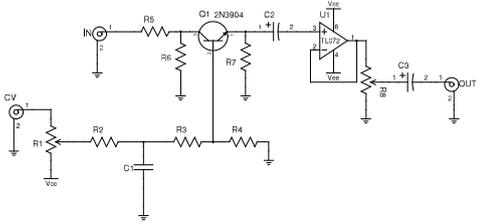
Taller de Electrónica Libre



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

El VCA es uno de los principales procesadores de señales de audio en la síntesis analógica. Por ser un procesador, se caracteriza por tener una entrada y una salida de audio, vinculadas por un amplificador cuya ganancia está dada según una señal de control dada por el voltaje de control CV.
A continuación se presenta la información relevante para una implementación sencilla de un VCA donde se puede escalar el voltaje de control que determina la ganancia del amplificador.

Esquemático:



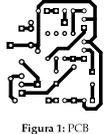


Figura 1: PCB

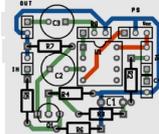


Figura 2: Layout

Lista de materiales:

Componente	Valor
R6	47kΩ
R5	39kΩ
R7	47kΩ
R2, R3	390kΩ
R4	1MΩ
R1	200kΩ Lin
R8	200kΩ Log
C1	0,1nF
C2	1nF
Q1	2N3904
U1	TL072

Lista de herramientas e insumos:
Soldador, estaño, placa de cobre, taladro con mecha de 0,8 mm, percloruro de hierro, acetona, esponja de aluminio, recipientes.

*Este circuito se basa en el VCA presente en el mini-sintetizador WP-20. Esta guía fue preparada por Martín Tarragona, y está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-CompartirIgual 3.0.

Figura 1. Primer página de la ficha de construcción del módulo VCO, con una breve descripción del mismo, su esquemático, su layout, un dibujo de las pistas del PCB y su lista de componentes.

en subgrupos de tres personas, de forma tal que entre ellos puedan completar la construcción de todos los módulos. Al finalizar la construcción de cada módulo y como forma de introducir a los estudiantes en los métodos de verificación y depuración, se intercambian las placas entre los subgrupos y son los estudiantes quienes verifican la continuidad de todas las pistas como paso previo a la soldadura.

Para la construcción se les entrega un kit de instrumentos y los materiales necesarios para cada uno de los pasos mencionados anteriormente: placas de cobre, esponja de aluminio y acetona para el tratamiento de las placas, marcadores indelebles para el dibujado de las pistas, recipientes y percloruro de hierro para la eliminación de las zonas de cobre marcadas, tornos para la perforación de los *pads* y todos los componentes electrónicos para la soldadura. Todo el proceso de construcción es acompañado por los docentes para que los estudiantes puedan finalizar los módulos a tiempo.

Se comienza construyendo el VCO que, si bien es algo complejo, se presenta como una interconexión de bloques ya trabajados (convertor voltaje-corriente, disparador Schmitt) y fenómenos electrónicos sencillos (división de tensión, carga

de condensador), utilizando analogías físicas para facilitar la comprensión (más específicamente hidráulicas, donde los condensadores son representados con tanques, las diferencias de tensión con diferencias de alturas, los conductores con tuberías, etc.).

El circuito es probado conectándolo a un amplificador de audio y observando la salida a través de un osciloscopio, lo que permite visualizar la correspondencia entre lo escuchado y lo medido, generando una instancia propicia para la discusión y consolidación de conceptos como tiempo y frecuencia. Ya con el primer módulo construido, los estudiantes tienen todas las herramientas para armar el resto de los circuitos propuestos con total autonomía.

A mediados del semestre cada grupo presenta al resto de la clase un ejemplo de operación del Sintetizador con los módulos armados, generando efectos sonoros mediante la interconexión de los diferentes módulos de forma creativa. Adicionalmente, deben presentar un informe por escrito explicando su diseño, construcción y análisis de desempeño. Esta es la primera instancia en donde realizan presentaciones orales y escritas como estudiantes universitarios, por lo que al momento de la evaluación, los docentes realizan comentarios y correcciones buscando generar una reflexión sobre la importancia de la comunicación.

Durante las clases se generan discusiones no sólo entre los integrantes del grupo sino también con los docentes. Dichos debates permiten vincular conceptos de una forma intuitiva, antes de que sean abordados en la carrera. A modo de ejemplo, la síntesis de trémolo y vibrato (cuya implementación con los módulos del Sintetizador se muestra en la Figura 2) puede ser relacionada con conceptos de transmisión de datos a través de modulación AM y FM respectivamente.

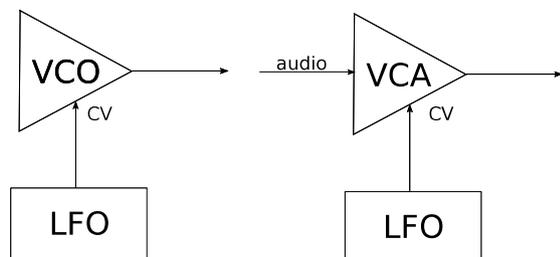


Figura 2. Interconexiones básicas de VCO, VCA y LFO. Izquierda: vibrato (modulación en frecuencia - FM). Derecha: trémolo (modulación en amplitud - AM).

El objetivo de la tercera etapa del curso es que los estudiantes desarrollen un controlador para el Sintetizador. El mismo es de vital importancia ya que define la forma en que el intérprete se relacionará con el Sintetizador. Esta es la parte más desafiante del curso, ya que se les brinda a los estudiantes un alto grado de autonomía para la concepción y el diseño del controlador, siendo el tiempo de desarrollo la única limitante.

En clase se presentan varios tipos de transductores (fotorresistencias, fototransistores, motores DC, micrófonos) en conjunto con ciertos bloques básicos (detectores de impulsos, disparadores, comparadores). Con estas herramientas deberán

proponer un controlador que permita la interacción con el Sintetizador.

Las propuestas del controlador son presentadas en clase, y en base a la experiencia docente se delimita el alcance de los proyectos para lograr los plazos estimados de finalización acordes a la duración del curso.

En esta última etapa contamos con la participación de docentes de la Escuela Universitaria de Música. La colaboración docente de dicha institución logra una mejor comprensión del enfoque musical del dispositivo por parte de los estudiantes. Como ejemplo podemos mencionar el caso de un grupo que decidió trabajar con un tipo de secuenciador que generaba sonidos pero de una forma poco convencional, los cuales podrían interpretarse como carente de armonía. Hacer un rediseño para lograr un resultado más "aceptable musicalmente" hubiese sido demasiado complejo para el grupo. Sin embargo, luego de explicarle la idea al docente de Música, este introdujo conceptos basados en el dodecafonismo (una forma de música atonal basada en una técnica de composición en la que se utilizan de forma equivalente todas las notas de la escala cromática) permitiéndoles concebir su controlador bajo otro criterio musical desconocido por ellos hasta ese momento.

II-B. Vocoder

La construcción del Vocoder analógico se propone como proyecto para el curso Tallere durante el primer semestre de 2015. Los antecedentes del Vocoder aplicado a la enseñanza de Ingeniería Eléctrica se da en el contexto del procesamiento de señales para telecomunicaciones [7], [8], no existiendo antecedentes de la utilización del mismo en el contexto de las aplicaciones musicales.

Fue desarrollado como un codificador de voz para la compresión de datos de audio a principios del siglo XX, siendo utilizado durante la Segunda Guerra Mundial como parte del sistema de cifrado SIGSALY [9]. En los años sesenta y setenta reaparece en el contexto de las aplicaciones artísticas, fue ampliamente utilizado por diversos músicos como: Wendy Carlos, Kraftwerk, y Laurie Anderson [10]. Actualmente es muy utilizado en la creación de efectos sonoros para el cine, uno de los más recientes ejemplos es su utilización para la creación de la voz robótica del personaje *Eva* en la película "WALL-E"[11]. En resumen, nos brinda la posibilidad de ampliar la expresividad de un instrumento utilizando las características propias de la voz.

El Vocoder consta de dos entradas: una denominada programa, que generalmente es conectada a un micrófono para capturar la voz, y la otra denominada portadora, a la cual se conecta un instrumento, generalmente un teclado/sintetizador. El resultado obtenido a la salida es el siguiente efecto: el instrumento es capaz de imitar la voz del micrófono, o viceversa, la nota que canta la voz es la que se ejecuta en el instrumento. Este efecto se logra capturando las formantes del programa (la voz) y transfiriéndolas a la portadora (instrumento).

La información de las formantes se encuentra en la envolvente espectral. Para estimarla se descompone el programa en bandas de frecuencia mediante filtros pasa-banda (BPF)

y se mide la energía correspondiente a cada banda mediante un seguidor de envolvente (EF). Luego se transfiere la envolvente a la portadora, para ello cada sub-banda de la portadora es amplificada un factor correspondiente a la energía mencionada anteriormente. Se utiliza para este fin un amplificador controlado por voltaje (VCA) en donde el control de ganancia está dado por la salida del seguidor de envolvente. Para finalizar, todos los canales se recombinan mediante un amplificador sumador. El diagrama de bloques de la Figura 3 ilustra el proceso.

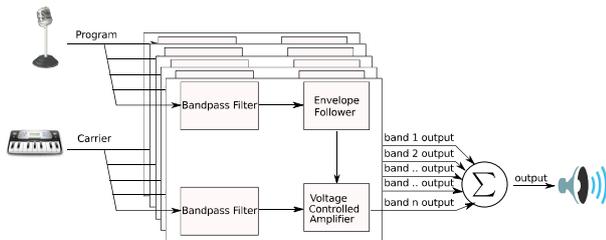


Figura 3. Diagrama de bloques del Vocoder.

La metodología utilizada durante el curso fue similar a la ya descrita para el curso del Sintetizador. Al igual que en los años anteriores se formaron 6 grupos de estudiantes. El curso consta de tres etapas: en la primera etapa se les presenta cada bloque del Vocoder, incluyendo nociones sobre su funcionamiento, luego se les entrega una ficha de armado y los componentes necesarios. Los estudiantes se encargan de armar el circuito en el protoboard y finalmente de verificar su correcto funcionamiento. En la etapa de verificación son acompañados por los docentes, quienes reafirman los conceptos manejados en clase haciendo, a su vez, referencia a otras asignaturas de la carrera. Conceptos matemáticos, como derivadas e integrales, físicos, como la carga de un condensador, e ingenieriles, como el filtrado son presentados en un contexto aplicado.



Figura 4. Vocoder construido durante el curso 2015.

Durante la segunda etapa es presentado el proceso de fabricación de un circuito impreso. Cada grupo es responsable

de construir y probar dos canales completos del Vocoder. Esto permite contar con 12 bandas de frecuencia, suficientes para capturar razonablemente las formantes de la voz. En la figura 4 se puede apreciar el Vocoder construido por los estudiantes.

En la última etapa del proyecto los estudiantes generan un material audiovisual original utilizando el Vocoder. Este, en conjunto con los módulos confeccionados forman el entregable final del curso. El resultado obtenido fue muy diverso, encontrándose grupos que se centraron en lo técnico, mientras que otros se centraron en aspectos más artísticos

III. RESULTADOS

Algunos de los controladores desarrollados por los estudiantes en el marco del curso del Sintetizador fueron:

Arpa de láser: basada en pares de láseres y fototransistores acoplados, a partir de lo cual se activan las distintas notas de la escala bien temperada cuando alguno de los haces es interrumpido con la mano (Figura 5).

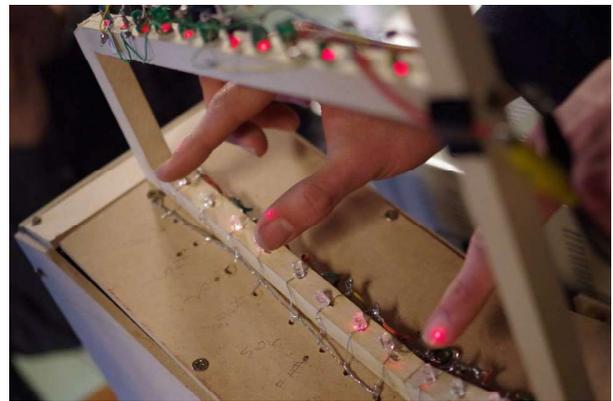


Figura 5. Arpa de láseres.

Ribbon: Mediante una cuerda de acero (de guitarra eléctrica) ubicada por encima de una cinta con características resistivas (extraída de un VHS) se controla la altura de la nota. Se impone un voltaje entre los extremos de la cinta y cuando el ejecutante presiona la cuerda se generan dos voltajes de control. Uno proporcional a la distancia al extremo, el cual es conectado al VCO para controlar la frecuencia, mientras que el segundo es ingresado al generador de envolvente.

Secuenciador "carrusel": Dicho instrumento utiliza un arreglo de fototransistores uniformemente distribuidos en una circunferencia fija, los cuales son activados por tres leds también igualmente distribuidos en otra circunferencia rotatoria en una base que es girada por un motor DC. Dicha rotación va activando los fototransistores secuencialmente, generando distintas notas que son determinadas por un banco de osciladores. A su vez, la rotación del motor es controlada por un generador de envolvente disparado por un detector de palmas de mano, creando una secuencia de sonidos cada vez que se hacen palmas (Figura 7).

Teclado de teléfono: el clásico controlador de teclado es implementado a través de un teclado de teléfono reciclado, donde los botones correspondientes toman el lugar de las teclas



Figura 6. Controlador Ribbon.

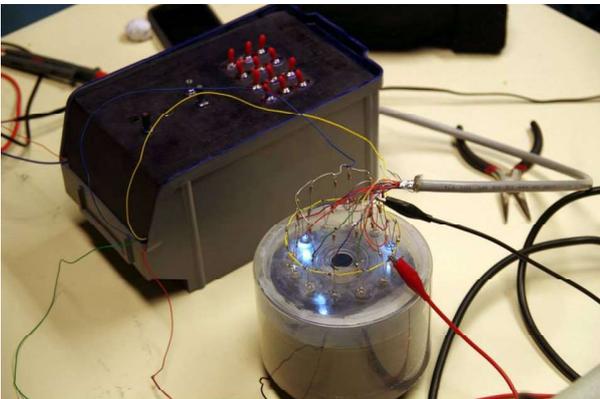


Figura 7. Secuenciador "Carrusel".

convencionales. Esto resulta en una especie de bandoneón debido a la característica distribución de teclas.

Ruteador de señales: pares de láseres y fototransistores son montados en una superficie (con forma de guitarra), de forma que se distribuyen distintas señales según se corten los haces de luz. De esta forma, se pueden configurar diferentes parámetros de módulos utilizando pares con distintos seteos (Figura 8).

Secuenciadores acoplados Dicho proyecto utiliza dos secuenciadores acoplados, cada uno de los cuales genera un conjunto independiente de voltajes de control, los cuales son



Figura 8. Ruteador de señales.

sumados para modular la frecuencia en un VCO. Al estar configurados como maestro-esclavo, se generan interesantes secuencias de arpeggios transpuestas.

Para cuantificar el alcance de los objetivos del curso al finalizar la edición 2015 se realizó una encuesta en donde los estudiantes evaluaban el curso. Los resultados de la encuesta final muestra que se han alcanzado los objetivos principales. En resumen:

1. El 90,5 % de los estudiantes respondió afirmativamente a la pregunta "¿ha participado con entusiasmo del curso?".
2. El 81 % de los estudiantes respondió afirmativamente a la pregunta "¿encontró la metodología utilizada apropiada?".
3. El 71,4 % de los estudiantes respondió afirmativamente a la pregunta "¿el curso ha mejorado su percepción inicial sobre los métodos y contenidos de la carrera?".

La encuesta fue completada por los 21 estudiantes que terminaron el curso. El curso comenzó con 24 estudiantes, por lo que solo 3 personas no lo finalizaron. Al ser un curso opcional dentro de la carrera se puede decir que el objetivo de motivar a los estudiantes se cumple.

Dicho curso permitió que los estudiantes se familiarizaran no sólo con aspectos teóricos básicos (leyes de Ohm y Kirchoff, carga y descarga de condensadores en circuitos RC, convertidores de voltaje-corriente, disparadores Schmitt, compuertas lógicas) en el marco de ciertos bloques de síntesis básicos (Voltage Controlled Oscillators, Voltage Controlled Filters, Voltage Controlled Amplifiers, Envelope Generators, Low Frequency Oscillators, Noise Generators), sino también en los aspectos prácticos de la construcción de circuitos electrónicos (elaboración del circuito impreso, soldado de componentes, pruebas y depuración).

CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

Tanto el Sintetizador como el Vocoder mostraron ser herramienta pedagógicas interesantes debido a:

Modularidad: los estudiantes pueden construir, comprender y testear cada una de las etapas. A su vez, se pueden construir circuitos adicionales que agreguen nuevas características.

Estudiantes más involucrados pueden incluso diseñar módulos más complejos.

Ausencia de requisitos previos: los conocimientos y herramientas necesarias para construir y testear cada módulo son muy básicas, no requiriéndose experiencia previa.

Alto alcance: si bien es posible crear un instrumento musical interesante con módulos básicos, no existen límites en cuanto a la mejora mediante el agregado de módulos más complejos que requieran conocimientos electrónicos más avanzados, por lo que los estudiantes pueden continuar con el desarrollo conforme avanzan en la carrera.

Bajo costo: son necesarios sólo componentes electrónicos, instrumentos y materiales básicos, por lo que no se requiere de un espacio de trabajo específico. Los estudiantes pueden, incluso, trabajar en sus casas (tomando las precauciones necesarias).

Interdisciplinariedad: los estudiantes interactúan con docentes de música que participan en algunas instancias del curso, generando así nuevos enfoques e ideas de interconexiones y posibles controladores. Adicionalmente, vinculan conceptos musicales con sus correspondientes concepciones en el campo de la Ingeniería.



Figura 9. Taller con la participación de docentes de la Escuela Universitaria de Música.

Vínculo directo con la carrera: desde la primera clase los estudiantes están en contacto con distintos componentes electrónicos. De esta forma, aprenden a manipular y relacionar lo que estudian (y estudiarán) teóricamente en clases de Física y asignaturas específicas de Electrónica.

Alta satisfacción: tanto el Sintetizador como el Vocoder tienen aplicaciones musicales reales y pueden ser ejecutados por los estudiantes. También pueden compartir su experiencia con un público no técnico -como familiares y amigos- incrementando su motivación.

Desde la experiencia del dictado de estos cursos se elaboró un texto de materiales didácticos para ingeniería eléctrica. El libro se encuentra en proceso de revisión y se espera su edición para el 2016. El objetivo es contar con un manual de electrónica básica, dirigido a todos los estudiantes de la



Figura 10. Estudiantes luego de la presentación final.

carrera Ingeniería Eléctrica: desde los ingresantes hasta los de años más avanzados. En él se exponen diversos conceptos impartidos a lo largo de la carrera, mediante aplicaciones del procesamiento de señales de audio.

Asimismo, el TEL se encuentra preparando el material didáctico para un nuevo curso destinado a estudiantes de tercer año de la carrera. Este curso se dictará por primera vez en el segundo semestre del 2016 y se utilizará la construcción de un Theremin [12] como recurso didáctico. Dado que los estudiantes contarán con una amplia base teórica, es de esperar que en este curso se puedan abordar los conceptos de forma más profunda. Se espera que el estudiante trabaje de forma proactiva e independiente en la búsqueda de soluciones a los problemas que puedan surgir durante el desarrollo del proyecto.

Finalmente, de acuerdo a nuestra experiencia, los instrumentos musicales electrónicos pueden ser utilizados como una herramienta de aprendizaje activo. Los estudiantes adquieren conocimientos de electrónica práctica y teórica mediante la construcción de módulos básicos y controladores, desarrollando además habilidades transversales como ser la gestión de proyectos, el trabajo en equipo y la creatividad. Se destaca también el carácter altamente motivador de esta actividad, permitiendo al estudiante establecer un vínculo entre los aprendizajes teóricos y la creación de objetos tecnológicos concretos con aplicación en la música.

REFERENCIAS

- [1] A. Giusto, "Tallerine: a hands-on course for motivating freshmen for electrical engineering," *Attracting young people to engineering*, pp. 191–202, 2014.
- [2] M. Tarragona, F. Davoine, and G. Eirea, "The synthesizer: a versatile active learning tool for electrical engineering," *Attracting young people to engineering*, pp. 218–226, 2014.
- [3] S. Billis, N. Anid, and S. Giordano, "Work in progress-music synthesizers: A tool in engineering education," in *Frontiers in Education Conference (FIE), 2011*. IEEE, 2011.
- [4] S. C. Douglas, "The infinity project: digital signal processing and digital music in high school engineering education," in *Workshop on the Applications of Signal Processing to Audio and Acoustics*. IEEE, 2001, pp. 1–6.

- [5] J. Marpaung, L. Johnson, S. Sohoni, and S. Lakkakula, "Music synthesizer for digital logic design course," *Microelectronic Systems Education (MSE), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 76–79, 2011.
- [6] J. Bermúdez Costa, *Nueva generación de instrumentos musicales electrónicos*. Marcombo, 1977.
- [7] M. G. Morrow, C. H. Wright, and T. B. Welch, "Old tricks for a new dog: An innovative software tool for teaching real-time dsp on a new hardware platform," *Computers in Education Journal*, 2011.
- [8] T. Ogunfunmi, "Multimedia systems education innovations: Part 1 (speech)," in *American Society for Engineering Education*. American Society for Engineering Education, 2012.
- [9] J. Boone and R. Peterson, *The Start of the Digital Revolution, SIGSALY: Secure Digital Voice Communications in World War II*. Center for Cryptologic History, National Security Agency, 2000.
- [10] S. McClary, "This is not a story my people tell: musical time and space according to laurie anderson," *Discourse*, vol. 12, no. 1, pp. 104–128, 1989.
- [11] J. Mullennix, *Computer Synthesized Speech Technologies: Tools for Aiding Impairment: Tools for Aiding Impairment*. IGI Global, 2010.
- [12] R. Moog, "Build the em theremin," *Electronic Musician*, vol. 12, no. 2, pp. 86–100, 1996.