

# Desarrollo de laboratorios virtuales para el aprendizaje de PAM/PCM

Ing. Silvia Patricia Fallas Monge  
*Ingeniería en Telecomunicaciones*  
*Universidad Estatal a Distancia*  
 San José, Costa Rica  
 silvia.fallas@uned.cr

Ing. José Roberto Santamaría Sandoval  
*Ingeniería en Telecomunicaciones*  
*Universidad Estatal a Distancia*  
 San José, Costa Rica  
 jsantamarias@uned.ac.cr

Ing. Esteban Chanto Sánchez  
*Ingeniería en Telecomunicaciones*  
*Universidad Estatal a Distancia*  
 San José, Costa Rica  
 echanto@uned.ac.cr

**Resumen**—Las modulaciones PAM y PCM son fundamentales en los sistemas digitales en telecomunicaciones, integrando esta temática dentro de las materias de estudio de la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones de la UNED, Costa Rica. Este trabajo muestra la investigación desarrollada para la implementación de una práctica de PAM y otra de PCM, mediante laboratorios virtuales en la asignatura Principios de Redes de Telecomunicaciones. Obteniendo resultados positivos a través del análisis de los informes de los 9 estudiantes que las han aplicado y, consecuentemente, se ha corroborado la funcionalidad de la plataforma.

**Palabras claves**—Modulación, laboratorio virtual, PAM-PCM, onda electromagnética.

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de telecomunicaciones se dividen en dos tipos de señales fundamentales: analógicas y digitales. Las señales analógicas se caracterizan por ser señales continuas que pueden tomar cualquier valor en el tiempo continuo, mientras que las señales digitales se identifican por ser discretas, o sea solo pueden tomar valores finitos, que por lo general es 0 o 1 [1].

Actualmente la mayoría de los sistemas de telecomunicaciones que iniciaron como sistemas analógicos, se han transformado en sistemas digitales, pero el origen de las señales sigue siendo analógico; por ejemplo, la señal de la voz humana y los sistemas de telefonía. Consecuentemente, se vuelve indispensable la transformación de las señales analógicas en digitales para su tratamiento, transmisión, procesamiento y reconversión mediante procesos de muestreo, cuantización y codificación [1] [2] [3].

El proceso de muestreo se fundamenta en el teorema de Nyquist, que en términos generales dispone que la frecuencia para muestrear una señal es el doble de su banda base, según se muestra en la ecuación 1 [2] [3].

$$\omega_S = \frac{2\pi}{T} \geq 2\omega_N \quad (1)$$

Donde  $\omega_S$  es la frecuencia de muestreo, T el período de la señal y  $\omega_N$  la frecuencia de Nyquist o banda base de la señal. Es precisamente en la parte de muestreo cuando se utiliza la modulación por amplitud de pulso (PAM), haciendo la observación de que la señal obtenida no corresponde a la conversión digital.

En PAM la señal portadora es un tren de pulsos que conforme muestrea la señal fuente, la amplitud de los pulsos cambia de valor. Tal y como se muestra en la figura 1 [4]. El

tren de pulsos de la imagen de la derecha es como se representa la señal muestreada aplicando la modulación PAM.

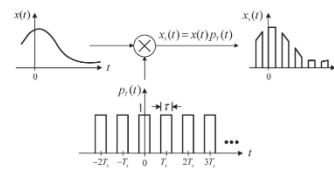


Fig. 1. Representación gráfica del funcionamiento de PAM

A partir de la obtención del tren de pulsos se procede a la etapa de cuantización y codificación, donde se obtiene la digitalización de la señal. La modulación por código de pulso (PCM) es una técnica donde la amplitud de estos pulsos se cuantifica en niveles y estos se codifican [1] [2]. Por ejemplo, se establece que la señal está constituida por un conjunto de valores desde -16 a 16 volts, estableciéndose un total de 8 niveles, que establece un rango de 32 volts dividido en 8 niveles; o sea que los rangos se forman cada 4 volts. A nivel digital 8 niveles significa usar “palabras” de 3 bits, debido a que con tres bits se pueden construir 8 niveles, convirtiéndose entonces los rangos de voltaje analógicos en palabras de 3 bits, de manera que los 8 niveles se convierten en códigos de bits. En la figura 2 se muestra una conversión (cuantificación y codificación) de una señal analógica de  $\pm 256$  volts en palabras de 8 bits [2].

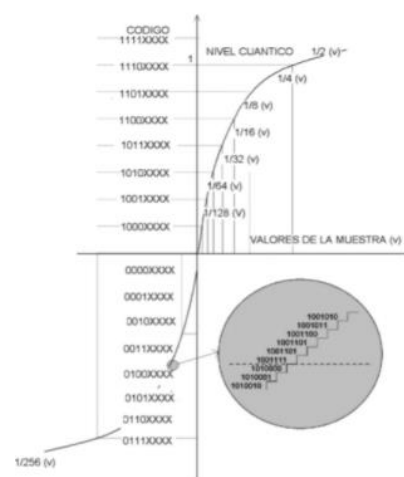


Fig. 2. Cuantización y codificación de una señal analógica con palabras de 8 bits

Como parte del proceso de formación de los ingenieros en telecomunicaciones se estudian conocimientos fundamentales como lo es la conversión de señales analógicas en señales

digitales y viceversa, debido a que estas transformaciones son el cimientado de los sistemas de telecomunicaciones. Ya existen los sistemas totalmente digitales desde el inicio hasta el fin de un proceso de comunicación, sin embargo, cuando la fuente es la voz humana o señales de sonidos naturales, donde la fuente es una señal de tipo analógica este tipo de sistemas de conversión analógica digital se vuelven preponderantes para completar el proceso de la comunicación.

La carrera de ingeniería en telecomunicaciones de la UNED, Costa Rica inició en el año 2016 mediante la modalidad de enseñanza virtual, complementando esta metodología educativa con plataformas remotas y virtuales, soporte ideal para este modelo [5][6]. Como parte de estas plataformas se cuenta con el equipamiento de laboratorio EMONA-TIMS, que es un simulador y emulador. Debido a la necesidad de ampliar la aplicación de la plataforma hacia otras asignaturas del programa, como es el caso de la asignatura 03384 Principios de Redes y Telecomunicaciones, se realiza el desarrollo de dos prácticas emuladas y simuladas, que es parte del proyecto de graduación de la Ingeniera Silvia Fallas en el año 2020 y se comienzan a aplicar en el año 2021.

## II. METODOLOGÍA

El método aplicado para el desarrollo del proyecto tuvo como fundamento la metodología *design thinking*, proceso que se conforma de tres componentes principales: un componente social donde la idea es “deseable” para algunos usuarios y, por lo tanto, busca satisfacer una necesidad particular; un componente tecnológico, donde la idea debe ser “factible” de acuerdo con la tecnología existente y disponible en el momento o en el futuro previsible; y un componente empresarial, donde la idea es “viable” desde la perspectiva del mercado, lo que conducirá a un modelo comercial sostenible [7].

Precisamente los tres aspectos anteriores contienen una afirmación que comprueba el uso de la metodología. En el primer aspecto para la carrera es “deseable” que dentro del currículum de los ingenieros integren prácticas de esta temática. Con respecto al componente tecnológico, la plataforma EMONA TIMS tiene la capacidad para la realización del laboratorio y en la parte empresarial es viable y necesario que los profesionales cuenten con este conocimiento para desempeñarse debidamente en el mercado laboral.

El método utilizado aplicó exitosamente las cinco etapas que señala el modelo [8] y que se pueden visualizar en la figura 3. El proyecto de la ingeniera contempla el prototipo y las pruebas de estrés sobre la plataforma para que, posteriormente, la Cátedra de Administración de Telecomunicaciones durante el año 2021 realice la respectiva implementación en la asignatura mencionada anteriormente.

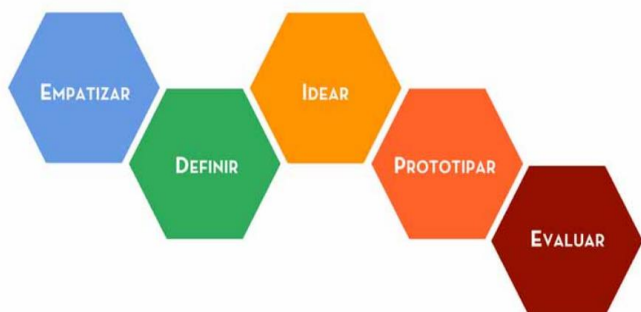


Fig. 3. Metodología Design Thinking

La etapa de implementación se encarga de la evaluación de las prácticas y de la plataforma, porque los estudiantes ejecutan el laboratorio como parte de su evaluación y gracias a la incorporación de estos recursos, se pueden valorar los resultados que fueron mostrados en las guías de laboratorio, así como evaluar el comportamiento del equipo conforme a los ingresos concurrentes y a la capacidad de la plataforma.

## III. GUÍAS DE LABORATORIO

El resultado final obtenido del proyecto de graduación de la Ingeniera Fallas plantea la incorporación de dos guías de laboratorio para la asignatura 03384. Si bien la relación PAM/PCM se puede analizar como un proceso continuo, en la realidad se trata de procesos independientes, que no necesariamente van en conjunto. Se entiende que PAM trabaja en las temáticas de modulaciones analógicas [1][3] y que PCM trabaja en los procesos de conversión de señales analógicas a digitales [2] [3].

### A. Guía de laboratorio PAM

La guía del laboratorio para la demostración de PAM está plasmado en un documento que consta de 21 páginas. La guía esta conforma por: los objetivos, la guía del acceso a la plataforma, los conocimientos previos, el marco teórico, los materiales y el procedimiento para la realización y, finalmente, concluye con un trabajo de investigación corto a partir de los resultados obtenidos.

El objetivo general de la práctica se definió como: Generar y recuperar una señal de modulación por amplitud de pulsos y acceso múltiple por división de tiempo (PAM/TDM). Esto es concordante con lo mencionado en la teoría, que enfatiza la importancia del muestreo de señales [1][3].

Por esta razón el marco teórico expone la relevancia del teorema de muestreo o teorema de Nyquist, donde se explica el cálculo y la aproximación de la frecuencia de muestreo, la descripción del proceso de construcción de la señal modulada y de la reconstrucción de esta señal manipulando un filtro paso bajo.

La guía de laboratorio incluye, como primera parte, el procedimiento para realizar la práctica del laboratorio utilizando la plataforma EMONA TIMS. Partiendo de la generación de una señal base que emula la señal a ser transmitida, siendo ésta una señal analógica, tal y como se muestra en la figura 4.

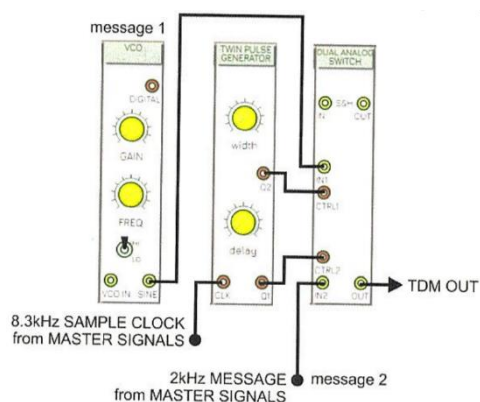


Fig. 4. Generación de señal base de transmisión.

La segunda parte, consiste en la conexión del módulo que permite realizar el muestreo. Para ello, se configura el conmutador que es la tercera tarjeta o “slot” de izquierda a

derecha, precisando el tiempo de muestreo requerido conforme a los cálculos de la señal base que se generó en la etapa anterior. Esto se observa en la figura 5.

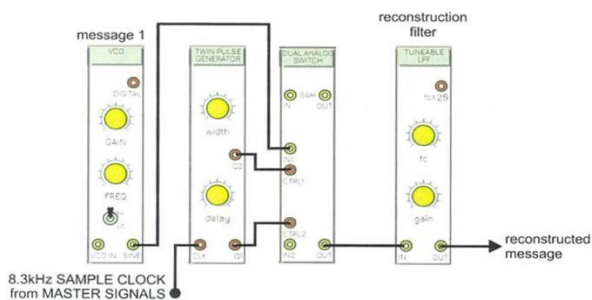


Fig. 5. Configuración de módulos para muestreo y reconstrucción del mensaje PAM

La figura 5 también muestra el módulo del filtro que permite reconstruir la señal, gracias a la incorporación del filtro paso bajo, que sería el cuarto módulo de izquierda a derecha. La señal obtenida a la salida de este filtro es la señal reconstruida.

Gracias a que la plataforma permite la conexión de múltiples puntos de medición, se solicita colocar una sonda a la salida de la señal, otra en el módulo de muestreo y una tercera a la salida del filtro, con la finalidad de visualizar el proceso de conversión, similar al representado en la figura 1.

### B. Guía de laboratorio PCM

La guía de laboratorio para la demostración de PCM es un documento que consta de 18 páginas. La guía se estructura de la misma forma que la práctica PAM, finalizando con un breve trabajo de investigación.

El objetivo general de esta práctica es: Crear un código de pulso multiplexado por división de tiempo modulado. Que es concordante con lo mencionado en la teoría, donde se relacionan los procesos de cuantificación y de codificación de señales, ambos procesos son posteriores a la etapa de muestreo [1][3][4].

La sección del marco teórico expone la modulación PCM, pero, tal y como se explica en la guía, el esquema que usa EMONA TIMS tiene un enfoque distinto, lo que significó un ajuste a fin de lograr su implementación. En un sistema PCM convencional, el ancho de banda del canal de transmisión aumenta conforme al ancho de banda de la señal base que lleva a un aumento de la tasa de muestreo [2].

En el enfoque del equipo EMONA TIMS se ha adoptado el enfoque opuesto. La tasa de bits de la señal PCM TDM se ha mantenido fija, independiente del ancho de banda y de la tasa de muestreo. Por configuración predeterminada, se dejó en 2, que es lo básico del teorema de muestreo. Por lo tanto, el ancho de banda del canal de transmisión puede permanecer fijo. Por esta razón, para desarrollar este laboratorio fue necesario reducir a la mitad la tasa de muestreo de mensajes cuando aumenta de 1 a 2 la tasa de muestreo [9].

La plataforma EMONA-TIMS que posee la carrera de ingeniería en Telecomunicaciones, trabaja con un flujo binario con una frecuencia de muestreo de un octavo de la frecuencia de reloj, donde la palabra codificada corresponde a 8 bits. Además, trabaja bajo un esquema de no retorno a cero-L

(NRZ-I), de tal manera que se presenta un cambio de valor en el bit cuando se obtiene un 1 en la señal cuantizada.

En la figura 6 se muestra la configuración de la plataforma para la realización del laboratorio PCM. En este caso, la tarjeta del oscilador se conecta directamente al módulo PCM *encoder* que tiene la plataforma. Debe notarse que el módulo PCM tiene dos entradas, una conectada a la salida del amplificador, que la convierte en la señal a codificar, y la segunda señal directa al generador, que corresponde con la señal de reloj de la señal portadora.

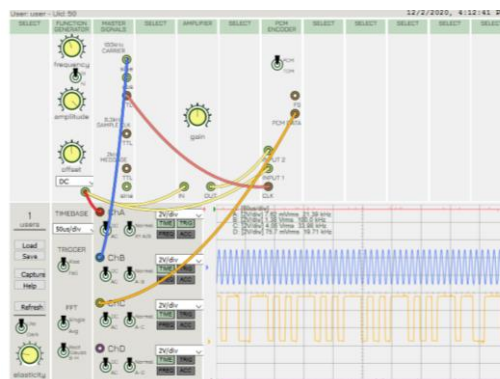


Fig. 6. Configuración de módulos para práctica PCM.

Modificando la ganancia de la señal generadora se accede a los distintos resultados que se pueden obtener de este recurso didáctico.

## IV. RESULTADOS DE LA IMPLEMENTACIÓN

### A. Prueba piloto

La asignatura 03384 Principios de Redes de Telecomunicaciones se ubica en el I bloque de la carrera de Licenciatura en Ingeniería de Telecomunicaciones. En esta asignatura se estudian los temas de funciones ejecutadas por redes de telecomunicaciones y la tecnología de telefonía como fundamentos de los sistemas de telecomunicaciones. En estas dos temáticas se deben repasar los conceptos básicos de las señales de telecomunicaciones.

Estos conceptos básicos incluyen características de las señales analógicas y digitales, conversión de las señales analógicas a digitales y viceversa, técnicas de modulación y multiplexación, funciones de muestreo y de cuantización y codificación de señales. Por esta razón durante el desarrollo del proyecto de graduación de la ingeniera Fallas, al plantear la matriz de relación entre prácticas posibles y asignaturas, se determinó la aplicación de estas dos prácticas específicamente.

El proyecto finalizó con las pruebas de estrés y pilotaje en diciembre del año 2020, con la presentación de la ingeniera Fallas al comité de la carrera. El pilotaje, considerado la primera parte del proceso de implementación, incluyó pruebas de estrés al acceso a la plataforma, no precisamente sobre cada práctica, pero si se corroboraron los resultados esperados para cada laboratorio.

La primera prueba consistió en el ingreso de 72 usuarios desde la misma máquina virtual (VDI), donde se comprobó la capacidad de soporte que tiene la VDI y el rendimiento de la plataforma, porque ninguno de los usuarios sufrió ningún retardo o pérdida de rendimientos o errores en los resultados obtenidos. De esta forma se demostró que la capacidad de la

plataforma puede cubrir la totalidad de los estudiantes activos en el programa y utilizando un mismo recurso.

En la segunda prueba, considerando que se cuenta con un licenciamiento de hasta 20 accesos simultáneos de la VDI por parte de distintos usuarios, se llegó a un 80% de VDI concurrentes en el servidor. La experiencia demostró que bajo dicha prueba de estrés el servidor no modificó sus prestaciones y los resultados de las pruebas fueron congruentes con lo esperado a nivel de documentación de la plataforma.

**B. Resultados de aplicación en asignatura**

En la asignatura 03384 Principios de Redes de Telecomunicaciones se aplicaron los laboratorios propuestos durante el año 2021 y, actualmente, se espera aplicar en el I cuatrimestre del año 2022. La asignatura tiene una apertura de dos cuatrimestres al año, solo tiene oferta durante el I cuatrimestre y III cuatrimestre del año.

Para el año 2021 durante el I cuatrimestre se aplicó la guía de laboratorio de PAM y en el III cuatrimestre se aplicó la guía PCM, para, de esta manera obtener resultados de la aplicación de ambas guías de laboratorio.

En la tabla 1 se muestra la cantidad de estudiantes que matricularon la asignatura tanto en el primer cuatrimestre del 2021 como en el tercer cuatrimestre. Se incluye en la tabla la cantidad actual de estudiantes matriculados, pero que al momento de entrega de la ponencia no han realizado el laboratorio.

TABLE I. CANTIDAD DE ESTUDIANTES POR CUATRIMESTRE DESDE EL AÑO 2021 AL I CUATRIMESTRE DEL 2022

Asignatura	I cuatrimestre 2021	III cuatrimestre 2021	I cuatrimestre 2022
03384	4	5	5

En total los estudiantes del I cuatrimestre 2021 realizaron un total de 16 ingresos a la plataforma, lo que significa en promedio 4 ingresos por estudiantes. Para el III cuatrimestre se tuvieron en total 25 ingresos a la plataforma, dando como resultado un promedio de 5 ingresos por estudiante.

En el caso de los laboratorios de PAM y en revisión del entorno y los informes, no se determina ninguna consulta por parte de los estudiantes. Además, los informes presentan una adquisición de razonamiento crítico y es interesante destacar los conocimientos adquiridos por el alumnado. El laboratorio utiliza una señal de reloj cuadrada como señal portadora y la señal que se modula es una sinusoidal, como se observa en la figura 7.

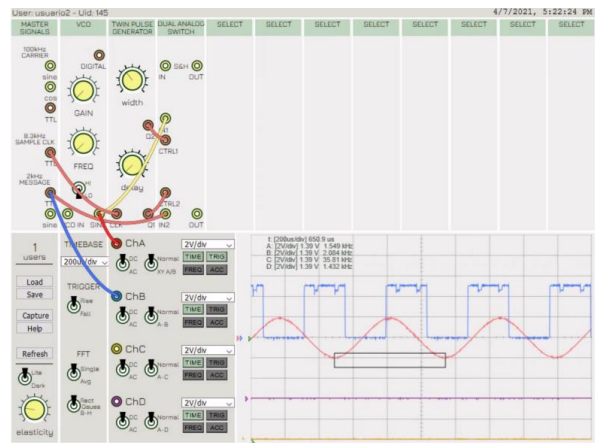


Fig. 7. Señal de reloj para portadora y señal senoidal de información.

El laboratorio solicita la adquisición secuencial de muestras de la generación de la señal PAM, entonces los estudiantes pueden notar como se conforman las distintas señales, como estas señales se multiplexan mediante TDM y al aplicar el muestreo y la combinación de ambas señales, se obtiene la señal PAM, tal y como se observa en la figura 8.

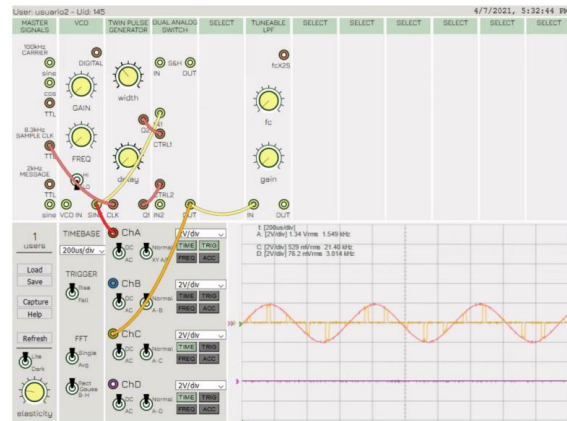


Fig. 8. Señal reconstruida de salida en superposición a la señal PAM obtenida.

El laboratorio de PCM aplicado en el III cuatrimestre, tiene la particularidad de que incluye, aparte de lo mencionado anteriormente, el PCM *decoder*, que corresponde al proceso de transformación de una señal analógica a digital, sea que esta señal posteriormente se tenga que volver a convertir en analógica o se transforme en una señal digital para utilizar en un sistema específico, por ejemplo, para el caso de gestión de las redes de telecomunicaciones.

De igual manera, en el caso de la modulación PCM, al revisar el entorno virtual de enseñanza no se presentaron consultas por parte de los estudiantes con respecto a la realización del laboratorio. Posteriormente, gracias a la revisión de los informes se revela una clara aplicación de los conceptos teóricos expuestos y que los resultados obtenidos son los que la guía de laboratorio precisamente estimaba iban a obtener.

En la figura 9 se observa la reconstrucción de la señal de manera cuantizada una vez que se pasó por el proceso de conversión digital y un paso antes de convertirla nuevamente en la señal senoidal base.

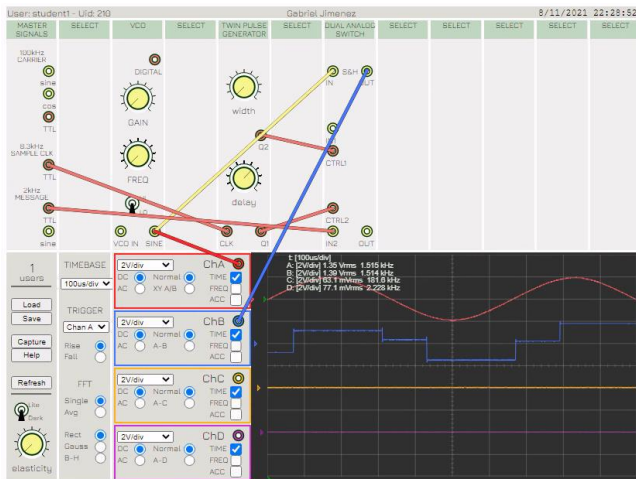


Fig. 9. Señal reconstruida de salida cuantizada antes de ser regenerada como señal en PCM.

## V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De la investigación y trabajo realizado se concluye la importancia que tiene la implementación de laboratorios prácticos en la formación de los ingenieros en el campo de las telecomunicaciones. Esto como un medio de aplicación de conocimiento teórico en experiencias reales o del campo profesional, que, si bien es con módulos de una plataforma, como es EMONA TIMS, estos generan la simulación y emulación para referenciarlos a situaciones reales.

En lo que respecta a PAM y PCM, se determina que son fundamentos básicos para la formación de un ingeniero en telecomunicaciones. Es de suma importancia comprender la transformación de las señales analógicas a digitales y viceversa, para la transmisión de datos y funcionamiento de los sistemas de comunicaciones [1][3].

Un tercer aspecto a destacar, es lo referente a las prestaciones de las plataformas. No es el primer estudio que evaluó la operación de la plataforma EMONA TIMS en el programa [5], pero si el primero en obtener resultados de un experimento específico y explicando el proceso de prototipado que se debe seguir en un caso como este.

Es importante señalar, como conclusión, que un método como *design thinking* es aplicable en el campo de la ingeniería. Si bien el método nace para la innovación en los negocios [8] su aplicación es genérica, lo que da pie a su aplicación en otros campos. Este estudio demostró ser una metodología viable y de aplicación en la generación de prácticas de laboratorio. Gracias a la libertad otorgada a la investigadora de la metodología utilizada en este proceso permitió generar la posibilidad de incluir pruebas piloto, con lo cual no solo se evalúan los resultados técnicos, sino también de rendimiento de las plataformas.

Además, con este estudio se comprueba que la educación 100% virtual es un método de enseñanza válido para carreras de ingeniería, y consecuentemente, un proyecto de graduación se convierte en un recurso didáctico de aplicación directa en el programa. La estudiante que tuvo a su cargo este estudio generó un documento de gran valor para la aplicación en la carrera.

## VI. RECONOCIMIENTO

Los autores del artículo desean agradecer a la carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones la información y la oportunidad de realizar el presente estudio, fundamentalmente contar con el acceso a la información utilizada durante la realización de este trabajo.

Los autores agradecen, de esta manera, a la UNED por ser una institución visionaria en el campo de la enseñanza superior, específicamente de la Ingeniería en Telecomunicaciones mediante un modelo virtual de enseñanza que es pionero en el mundo.

## REFERENCES

- [1] D. E. Comer, "Redes de Computadoras e Internet", Pearson, México, 2015.
- [2] J. C. Clark, G. Villarreal & F. Miralles, "Comunicaciones digitales", Universitas Editorial Científica Universitaria, Córdoba, Argentina, 2020.
- [3] E. Vera de Prayer, "Teoría de Señales", Universitas Editorial Científica Universitaria, Córdoba, Argentina, 2020.
- [4] J. P. Tello Portillo, "Introducción a las señales y sistemas", Editorial Universidad del Norte, Barranquilla, Colombia, 2017.
- [5] J. R. Santamaría-Sandoval and E. Chanto-Sánchez, "Application of the EMONA TIMS platform for the Telecommunications Engineering career at UNED Costa Rica," 2020 XIV Technologies Applied to Electronics Teaching Conference (TAEE), 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/TAEE46915.2020.9163778.
- [6] I. Gustavsson, "On Objectives of Instructional Laboratories, Individual Assessment, and Use of Collaborative Remote Laboratories", IEEE Transactions on learning technologies, vol. 2, no. 4, pp. 263-274.
- [7] T. Brown, "Change by Design: How Design Thinking Transforms Organizations and Inspires Innovation", 2009. [https://www.academia.edu/39175605/Pdf\\_Change\\_by\\_Design\\_How\\_Design\\_Thinking\\_Transforms\\_Organizations\\_and\\_Inspires\\_Innovation\\_by\\_Tim\\_Brown](https://www.academia.edu/39175605/Pdf_Change_by_Design_How_Design_Thinking_Transforms_Organizations_and_Inspires_Innovation_by_Tim_Brown)
- [8] Institute of Design at Stanford, "Mini guía: una introducción al Design Thinking + Bootcamp bootleg", <https://repositorio.uesiglo21.edu.ar/bitstream/handle/ues21/14439/GU%c3%8dA%20DEL%20PROCESO%20CREATIVO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [9] Emona-Tims, Documentación técnica plataforma EMONA-TIMS.