

CodSim 2.0: Un Laboratorio Virtual para la Enseñanza de las Codificaciones de Datos

Guillermo P. Trabado¹, Eladio Gutiérrez Carrasco²

Resumen— Este artículo presenta la herramienta CodSim 2.0, un simulador de codificaciones de datos a nivel físico, dirigido a estudiantes de asignaturas de redes de computadores en grados en ingeniería Informática o Electrónica. El simulador se puede ejecutar en un navegador estándar, al estar basado en JavaScript y HTML5, lo que facilita su uso en cualquier laboratorio o dispositivo del estudiante. Con él se pueden ilustrar escenarios de interés en la transmisión de una señal digital usando diferentes codificaciones o modulaciones y características del canal. Se presenta así mismo una experiencia docente de su uso en una asignatura de redes industriales.

Palabras clave— Docencia en redes de computadores, nivel físico de la transmisión de datos, CodSim

I. INTRODUCCIÓN

LAS asignaturas de introducción a las redes de las titulaciones de Ingeniería Informática y de Ingeniería Electrónica incluyen en sus temarios el nivel físico de la transmisión de datos. En particular, el modelo del canal de comunicación analógico con ruido gaussiano, la frecuencia de Nyquist y el Teorema de Shannon [1]. Comprender este modelo permite entender de forma más clara y fundada el origen de las limitaciones en la transmisión de datos tanto para la tasa máxima de transmisión posible (*bit rate*) como la para la distancia máxima a la que es posible transmitir sin errores. Incluso para los Ingenieros en Informática, para los que no entra dentro de sus competencias el diseño del nivel físico de los sistemas de transmisión de datos, los beneficios de comprender sus limitaciones ayudan a tomar decisiones de diseño en proyectos donde tienen que especificar las tecnologías de los equipos de redes y medios a adquirir e instalar. También son de utilidad en la resolución de problemas (*troubleshooting*) para entender las estadísticas del nivel físico.

Sin embargo, la enseñanza de este modelo conlleva un problema de metodología pedagógica. Los planes de estudios han ido dejando de lado las herramientas matemáticas necesarias para el análisis en el dominio de la frecuencia de señales y de las perturbaciones que éstas sufren. Para tratar con los conceptos implicados en el modelo del canal los alumnos necesitan una soltura en matemáticas que la media de los estudiantes de ingeniería no tiene. Debido a estas limitaciones, el problema pedagógico no es *qué enseñar* sino *qué puede ser enseñado y comprendido* [2]. En general, el esfuerzo adicional para tratar las herramientas matemáticas de análisis no es posible tanto por el tiempo adicional que requiere, como

por el hecho de que desvían la atención del alumno de los verdaderos objetivos de la asignatura y, en algunos casos, generan una barrera de ansiedad adicional al combinarse con los problemas de aprendizaje de las matemáticas de algunos alumnos [3]. De este modo, las matemáticas se convierten en la verdadera preocupación de los alumnos en la asignatura. En consecuencia, durante las explicaciones se suele emplear un nivel matemático muy bajo que no genere demasiado estrés en los estudiantes, pero que apenas aporta beneficios demostrativos más allá del análisis sobre el papel de un pulso cuadrado o la suma de varios senos de distinta frecuencia para explicar la distribución de energía de una señal.

La alternativa del laboratorio de electrónica tampoco es mucho más viable. En algunas ingenierías la experiencia en el laboratorio de electrónica es muy reducida. Tampoco es trivial la implementación de circuitos que generen codificaciones más complejas que la NRZ y que simulen las perturbaciones del canal.

La idea de usar software para el aprendizaje no es nueva. El uso del concepto CBE (*Computer Based Education*) en el campo del análisis y procesamiento de señales está ampliamente aceptado y se ha probado desde hace mucho tiempo [4], [2]. Matlab es uno de los lenguajes favoritos para la implementación de este tipo de software debido al amplio soporte que provee para generar gráficas y las librerías de procesamiento de señal disponibles. Una búsqueda en Internet sobre señales digitales y Matlab nos mostrará bastantes ejercicios de programación basados en Matlab donde el alumno implementa el procesamiento mediante las librerías de Matlab o Simulink, y también algunas demostraciones de filtrado de señales usadas como material expositivo en las clases. Las implementaciones se limitan a algunas codificaciones básicas como NRZ, y no suelen incluir la decodificación de los datos. Incluso con experiencia en programación en Matlab, la simulación de un sistema completo con codificador, modulador, medio, demodulador y decodificador, requeriría un esfuerzo y un tiempo que no son rentables para los conceptos que se pretende ilustrar.

Al descartar las aproximaciones anteriores para nuestras asignaturas surgió la idea de programar un laboratorio virtual que denominado CodSim 1.0. Esta primera versión fue escrita en MATLAB en 2001 y ha sido utilizada regularmente en la Universidad de Málaga hasta 2019 en asignaturas de las Ingenierías Informática y Electrónica. En la sección II presentamos los principios de diseño y funcionalidad de la aplicación. CodSim 1.0 ha tenido una larga vida útil

¹Dpto. de Arquitectura de Computadores, Universidad de Málaga, e-mail: gperez@uma.es

²Dpto. de Arquitectura de Computadores, Universidad de Málaga, e-mail: eladio@uma.es

debido a que satisfacía todas nuestras necesidades de aprendizaje, pero tiene la gran desventaja de depender del acceso a licencias de MATLAB por parte del estudiante y de requerir un ordenador con recursos suficientes para instalar y ejecutar MATLAB.

La evolución de la tecnología HTML5 y JavaScript, que actualmente permite implementar aplicaciones ejecutadas dentro del navegador sin necesidad de instalar software adicional, nos pareció la más adecuada para eliminar la dependencia respecto a MATLAB, aumentar la portabilidad a más tipos de dispositivos y garantizar el futuro de la aplicación frente a la evolución tecnológica. Esto ha dado lugar a la implementación de CodSim 2, que ha reemplazado con éxito desde 2019 a la versión anterior en MATLAB. CodSim 2 puede ser ejecutado en cualquier navegador desde la URL <https://www.ac.uma.es/~guille/codsim>. En la sección III se describen los detalles de la actual implementación de nuestro laboratorio virtual.

La sección IV describe las experiencias de uso de CodSim 2.0 en varias asignaturas de la Universidad de Málaga, mientras que la sección V presenta las conclusiones y evolución prevista para nuestro laboratorio virtual.

II. FUNCIONALIDAD DEL LABORATORIO VIRTUAL

El objetivo principal del diseño de CodSim es implementar un laboratorio virtual que proporcione el realismo e interactividad de un osciloscopio monitorizando señales en un laboratorio, sin los inconvenientes de tener que formar a los alumnos en el uso del mismo. El programa tampoco debe limitarse a una demostración sino que debe plantear una *interacción* guiada por los *contenidos* [5] que se pretende aprender.

- El modelo del canal de comunicación analógico debe guiar el diseño del laboratorio.
- La interactividad debe estar centrada en modificar los parámetros de este modelo de canal y del sistema que transmite los datos desde el origen hasta el destino.
- Los resultados de la simulación deben mostrar de forma muy clara que son consecuentes con los cálculos que el alumno debe realizar para verificar si el diseño de un sistema de transmisión de datos funciona o no. Esto es, si está dentro de los límites que marcan el Criterio de Nyquist y el teorema de Shannon para que el receptor sea capaz de recibir los bits de datos del mensaje sin errores.

A partir de estas ideas, podemos enumerar las características deseables para el laboratorio:

- Debe generar una representación gráfica de las señales muy similar a un osciloscopio, con escalas de amplitud y tiempo.
- Nos permitirá ver las señales presentes en cada etapa del sistema: mensaje a emitir, salida del DTE de origen, salida del DCE emisor, entrada del DCE receptor y mensaje decodificado por el

DTE de destino. La representación apilada en vertical de las señales debe estar sincronizada en la escala temporal para emular un *osciloscopio multi-canal*. También se representa el espectro de la señal emitida emulando un analizador de espectro.

- El interfaz debe responder instantáneamente a los cambios en los parámetros del sistema de transmisión de la misma forma en que lo hace un osciloscopio cuando se monitoriza un circuito analógico. La inmediatez contribuye a reforzar la experiencia de estar trabajando con un laboratorio real.
- Los controles solo incluirán parámetros del sistema de transmisión. Los detalles internos de la propia simulación se ocultan al alumno porque solo contribuirían a desviar su atención de los objetivos de aprendizaje.

Para conseguir que estos principios de diseño queden claros al usuario desde el principio, el interfaz de la aplicación está dividido en dos zonas (Fig.1): a la izquierda un panel estrecho de configuración con los parámetros de la simulación y, a la derecha, un panel ancho de análisis de las señales generadas apiladas verticalmente y sincronizadas en el tiempo. En la parte superior del panel de señales encontramos el esquema del modelo de un sistema de transmisión de datos. Al pasar el ratón por las sondas (círculos rojos) del modelo, se resalta la señal correspondiente a dicho punto, lo que refuerza la idea de estar monitorizando las señales presentes en distintos puntos de un sistema. A diferencia de otros programas de simulación de procesamiento de señales, en CodSim se pretende que quede claro que el objetivo final de este laboratorio es transmitir datos binarios. Por tanto, el sistema no procesa simples ejemplos de señales, sino que nos permite introducir la cadena de bits de un mensaje binario cualquiera. La simulación nos permite escoger la *codificación de canal* a usar de una lista de codificaciones digitales en banda base (NRZ, Manchester, Diff. Manchester, Bipolar, B8Zs, MLT-3 y multinivel a 4 niveles) o de una lista de modulaciones analógicas (ASK, FSK y DPSK). El software calcula y muestra la señal entre DTE y DCE, así como la señal generada a la salida del DCE y su espectro frecuencial. Además de seleccionar el tipo de codificación, también podemos cambiar otros parámetros básicos como el *bit rate* y la *frecuencia portadora* de las modulaciones analógicas.

El laboratorio también simula las perturbaciones que sufre la señal al atravesar el medio de transmisión. El modelo simplificado del canal permite especificar los límites del ancho de banda fuera de los cuales la atenuación es ∞ , la atenuación del medio en dB/Km y su longitud, y la relación S/N para el ruido gaussiano. Estas perturbaciones pueden desactivarse independientemente. El ancho de banda del medio aparece como una región sombreada sobre el espectro de la señal emitida para ayudar a visualizar el efecto que tendrá la propagación de la misma a través del medio.

cionalidad avanzada que restrinja el número y versiones de los navegadores que son capaces de ejecutar la aplicación. Esto permite usar nuestro entorno virtual en la mayoría de dispositivos con un gasto muy pequeño de memoria aparte del necesario para calcular el procesamiento de las señales.

Las únicas librerías usadas actualmente son Filii [6], una librería con licencia MIT que incluye FFTs y filtros FIR, y algunas funciones de jQuery [7]. Las ventajas de esta simplicidad son:

- Todo el cálculo tiene lugar en el navegador del usuario. De esta forma, no se necesita un servidor con recursos computacionales por parte de la institución que lo emplea. La institución no necesita siquiera mantener un servidor web ya que basta acceder a la URL de CodSim.
- Las actualizaciones del interfaz y el cálculo de los gráficos son locales al navegador una vez cargada la página, por lo que puede funcionar con una red muy lenta. En caso de no disponer de una red, el alumno puede cargar CodSim 2.0 desde una carpeta local.
- No requiere instalación en el dispositivo del usuario, lo que permite usarlo en dispositivos muy básicos (como una tableta o móvil) con pocos recursos.

Por último, hay que resaltar que CodSim 2.0 tiene una licencia *Creative Commons, Non Commercial, Share Alike*, que permite a cualquier institución usarlo gratuitamente, lo que unido a las características anteriores lo hace ideal para instituciones con grandes limitaciones en el presupuesto.

IV. USO DOCENTE Y RESULTADOS OBTENIDOS

En esta sección se describe la experiencia de uso de CodSim2.0 en la asignatura *Redes Industriales*, optativa de mención impartida en cuarto curso del grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica en la Universidad de Málaga.

Se trata de una asignatura de 45 créditos ECTS de los que más de un tercio están definidos como créditos prácticos. Este grado forma parte del campus de excelencia internacional *Andalucía TECH* [8], en el que colaboran las universidades de Sevilla y Málaga.

A la llegada a esta asignatura, el estudiante debe haber cursado previamente la asignatura *Arquitecturas de Redes*, impartida en el curso anterior. En ella se ofrece una visión descendente de las redes [9], en la que partiendo del nivel de aplicación se desciende hasta el nivel de red.

La asignatura *Redes Industriales* retoma el contenido en este punto, completando la parte inferior de la pila OSI, con el nivel de enlace y el nivel físico. Estos niveles forman el ámbito de aplicación donde se desarrollan las denominadas redes industriales, como es el caso de los buses de campo (CAN, LIN, ...).

En este contexto, en la parte de nivel físico, se presentan los diferentes tipos de codificación y modulaciones básicas, en los que la señal se adapta al medio de transmisión, junto con resultados teóricos

de interés que nos determinan las limitaciones del canal como son los teoremas de Shannon y Nyquist.

La aplicación de estos resultados a escenarios de canal, codificaciones y modulaciones, dan lugar a los ejercicios clásicos que encontramos en textos como [10] y [11]. En ellos se plantea un escenario de transmisión a resolver con *lápiz y papel*, que ponen en juego parámetros como ancho de banda, potencia de ruido, velocidad de transmisión etc.

Proponer a los estudiantes el desarrollo de programas para simular la transmisión a través de un canal no perfecto con diferentes codificaciones y modulaciones, excede el objetivo de la asignatura. Pero ciertamente, el docente observa que una visualización gráfica de lo que ocurre sería de gran ayuda para comprender mejor la información numérica que se calcula.

Es precisamente este espacio en el proceso de aprendizaje el que cubre el simulador CodSim, que permite una comprensión visual de los escenarios de transmisión, pero sin la necesidad de un desarrollo software por parte del estudiante.

En la figura 3 se muestran dos ejemplos de ejercicios propuestos. En ellos se analiza un escenario de transmisión de interés de una información digital a través de un canal ruidoso. Obsérvese que el enunciado incluye las dos vertientes del ejercicio: la aplicación de los resultados teóricos y su comprobación experimental con CodSim.

Este enfoque de los enunciados, usando el simulador, confiere un aspecto más práctico a los ejercicios, que podrían incluso enfocarse, desde el punto de vista pedagógico, como sesiones de laboratorio. Por otro lado la visualización del escenario y la posibilidad de su manipulación interactiva (qué pasaría si se pone más ruido, o tal otra cosa) ayuda a afianzar los conceptos que hay tras las ecuaciones.

Hay que resaltar que el uso del simulador no desplaza por completo la resolución teórica de los problemas planteados. Hay conceptos como las unidades de las magnitudes, la manipulación en decibelios de las potencias, etc. que necesitan ser practicados.

También cabe mencionar, que aunque no es un objetivo fundamental, un aspecto que ha surgido durante el uso de la herramienta, es darse cuenta de que los simuladores no son perfectos y que las simulaciones numéricas introducen fuentes de errores (como el tamaño de la FFT o el orden de los filtros) y que también éstos puede tener su efecto en el resultado que se visualiza.

El simulador CodSim 2.0 lleva tres cursos en uso en la asignatura desde su primer prototipo. En la tabla I, se muestra los resultados de opinión de los estudiantes acumulados a lo largo de estos años de experiencia. La población muestral es de 37 estudiantes, correspondientes a los cursos 2017-18, 18-19 y 20-21, de los cuales el 68 % respondió a la encuesta. Los ítems de las dos primeras secuencias están formulados con una escala de Likert de 1 a 5. En la tabla se muestra el valor promedio de las respuestas. La última pregunta, con la valoración global del simulador,

Consideramos una codificación FSK con portadora de 75Hz y amplitud 1 para transmitir una señal a 48 bps. Considera un medio con las siguientes características: ancho de banda de 0 a 150 Hz y sin ruido ni atenuación. Observa el escenario de la figura ajunta.



- Parte teórica (resolver numéricamente): ¿A qué fenómeno se deben los errores producidos? Pista: observa la distribución del espectro alrededor de las dos frecuencias usadas en FSK
¿Están bien elegidas dichas dos frecuencias? ¿hay alguna relación entre el ancho de banda de la señal banda base y la separación de frecuencias requerida?.
- Parte práctica (probar con el simulador): Corrige el parámetro erróneo y verifica cuál es el límite a partir del cual se producen errores. Mensajes especialmente sensibles a algunos errores en este ejercicio: 0101011101111010101

Observamos el siguiente estado de la wifi de un portátil en un momento dado que se encuentra situado a unos 5m. del punto de acceso inalámbrico (router).



- Busca información sobre el nivel físico (PHY) del estándar wifi en uso, 802.11ac. ¿Qué tipo de modulación emplea? ¿Cuál es el número de bps por hercio de ancho de banda que permite alcanzar?
- Determina la SNR en el receptor. En función del teorema de Shannon, ¿podemos alcanzar la máxima velocidad de transmisión indicada en la figura para dicha condición de ruido?
- Realizando un escalado de frecuencias de los datos de la figura, para que sea simulable, utiliza el simulador para estimar la potencia en milivatios de ruido a partir del cual se observan errores en el mensaje recibido (prueba tandas de mensajes aleatorios). Puesto que la modulación empleada por 802.11ac no está disponible, emplea modulación PSK en su lugar. Compara el resultado con la cota del apartado anterior; ¿era esta una cota optimista o pesimista? ¿por qué?

Fig. 3: Ejemplo de ejercicios solicitados a los alumnos.

se expresa en una escala de 4 niveles, mostrándose el porcentaje de respuestas para cada nivel.

En líneas generales la realimentación recibida, tanto *in situ* durante las clases como a través de las encuestas, indica un alto grado de satisfacción, animando por tanto al uso del simulador como complemento del enfoque clásico de los problemas.

Se observa, no obstante, que hay una demanda de mejor documentación, a pesar de que la herramienta viene acompañada de un completo manual. En conversaciones con los estudiantes esta demanda, es más de tener una fuente única de documentación (en lugar de consultar apuntes, libro de texto y ayuda del simulador), más que de la documentación del simulador en sí. En cualquier caso, el estudiante siempre tiene a su disposición las sesiones docentes y tutoría para resolver sus dudas.

Habría que decir, así mismo, que hay un no despreciable número de estudiantes que no simpatizan con la realización de encuestas. Aunque probablemente la saturación de encuestas a las que se somete al estudiantado no ayuda en este particular, es un aspecto que requiere un mayor esfuerzo de motivación.

Por último debe mencionarse que el curso 2019-20 fue un curso singular, cuyo desarrollo quedó marcado por la pandemia de Covid-19. En esta situación, resultaron especialmente útiles todas aquellas herramientas orientadas a enseñanza virtual; y el simulador CodSim también ha aportado su granito de arena en este sentido.

V. CONCLUSIONES

CodSim 2.0 provee un entorno de experimentación para entender de forma intuitiva los fenómenos que limitan la transmisión de datos a través de un medio físico, y cómo el diseño de nuevas codificaciones de canal puede mejorar la velocidad de transmisión dentro de los límites que marca la capacidad del canal. El entorno obtenido es mucho más eficiente en cuanto al tiempo requerido para el aprendizaje que un laboratorio de electrónica o un laboratorio de programación en Matlab. Sin embargo, está lejos de ser un aburrido programa demostrador, ya que el alumno puede interactuar con el mismo y visualizar de forma instantánea e intuitiva la configuración de cualquier ejercicio teórico planteado por el profesor. Finalmente, la implementación en HTML5 y JavaScript lo hace barato, muy accesible y sencillo de usar por parte de profesores y alumnos, sobre todo en instituciones sin recursos financieros para comprar licencias de programas como Matlab y máquinas con gran capacidad de cálculo.

Respecto al futuro, la primera versión de CodSim ha durado unos 18 años en uso continuo, demostrando que una funcionalidad básica y bien implementada es suficiente para los contenidos de las asignaturas que se imparten actualmente. La reescritura de CodSim 2.0 con una nueva tecnología anima a incluir muchas otras funciones que podrían ser implementadas fácilmente. Sin embargo, tal como se comentó en el apartado I, ciertos fenómenos más complejos (por ejemplo la distorsión de fase) solo se tratan en otras

Valora los siguientes aspectos de la aplicación (1=deficiente / 5=excelente)	
Facilidad de uso	4.8
Aspecto visual	4.5
Amigabilidad del interfaz	4.0
Velocidad de respuesta (rapidez de los cálculos)	4.2
Calidad de la ayuda	3.5
Compatibilidad con mi navegador	4.8
Valora tu grado de acuerdo (1=en desacuerdo / 5=completamente de acuerdo) con las siguientes afirmaciones sobre los aspectos didácticos de la aplicación	
Me ha aclarado conceptos básicos y propiedades sobre codificaciones y modulaciones digitales	4.2
Me ha ayudado a ver la relación entre los diferentes segmentos del canal y la señal en ese punto	4.0
Me ha ayudado a afianzar conceptos sobre las propiedades espectrales de las señales digitales (Fourier)	4.0
Me ha ayudado a comprender los aspectos del canal que pueden limitar una comunicación eficaz	4.3
Me ha ayudado a entender como las codificaciones influyen en la eficacia de la comunicación	4.5
Considero que es una buena herramienta didáctica en la docencia del nivel físico	4.7
Valoro positivamente que la aplicación se ejecute en un navegador (javascript)	4.7
Prefiero ejercicios interactivos con el simulador a ejercicios para hacer sólo a "lápiz y papel"	4.7
Valoración global de la aplicación (elegir una)	
Es genial, me ha gustado mucho	33%
Me parece una buena aplicación	67%
Valoración indiferente	0%
Mi valoración no es buena	0%

Tabla I: Encuestas de opinión sobre el uso de la herramienta CodSim.

ingenierías donde tiene más interés la aproximación matemática al fenómeno, y no tanto la comprensión intuitiva. Por tanto, hemos descartado ampliar los fenómenos simulados, aunque podría ser interesante incluirlos como demostrador para las lecciones de teoría de otras asignaturas más avanzadas.

A nivel pedagógico, sin embargo, la tecnología HTML abre la puerta a funciones muy interesantes relacionadas con la integración con otras herramientas. Actualmente existe una nueva versión en fase de depuración (CodSim 2.5), que añade nueva funcionalidad para la facilitar la docencia: todos los parámetros del laboratorio virtual se pueden codificar en la URL. De esta forma, una URL incluida en un documento de texto puede iniciar con un solo click el laboratorio virtual con una configuración concreta para que el alumno la analice. Otra posibilidad derivada es que permite que el alumno pueda entregar una configuración que ha generado como resultado de un ejercicio en su navegador, copiando la URL y pegándola como una simple cadena de texto en un formulario. El profesor también podría escribir un programa muy sencillo que analice la URL entregada por el alumno y corrija el ejercicio automáticamente.

Adicionalmente, también está en desarrollo la versión CodSim 3.0. En ella se ha reestructurado el código JavaScript para permitir una mayor modularidad a la hora de incluir nuevas características en la simulación. El código de cada fase es un *callback* que puede ser añadido a una lista que es aplicada a la señal secuencialmente durante la simulación. Esto permite ampliar con mucha facilidad la funcionalidad del laboratorio virtual sin tener un conocimiento profundo de su estructura y genera la posibilidad de crear ejercicios de programación en los que los alumnos escriban módulos que simulan perturbaciones en la señal, nuevas codificaciones o nuevos algoritmos de decodificación. Aunque este tipo de ejercicios se realizan con frecuencia en MATLAB, la ventaja de esta aproximación es que disponemos de un entorno

de procesamiento y visualización de señales de bajo costo y código abierto para centros educativos con recursos económicos limitados.

AGRADECIMIENTOS

A Sergio Romero por prestar su oído paciente a los soliloquios que han permitido mejorar la implementación de CodSim día a día.

REFERENCIAS

- [1] Claude Elwood Shannon, *The mathematical theory of communication*, University of Illinois Press, 1949.
- [2] B.L. Sturm and J.D. Gibson, "Signals and systems using MATLAB: an integrated suite of applications for exploring and teaching media signal processing," in *Proceedings Frontiers in Education 35th Annual Conference*, 2005, pp. F2E–21.
- [3] Ikram E Khuda, Haider Abbas Naqvi, and Ali Ahmed Siddiqui, "Improved teaching pedagogy for convolution of continuous time signals," in *2019 4th International Conference on Emerging Trends in Engineering, Sciences and Technology (ICEEST)*, 2019, pp. 1–6.
- [4] A. Clausen and A. Spanias, "An internet-based computer laboratory for DSP courses," in *FIE '98. 28th Annual Frontiers in Education Conference. Moving from 'Teacher-Centered' to 'Learner-Centered' Education. Conference Proceedings (Cat. No.98CH36214)*, 1998, vol. 1, pp. 206–210 vol.1.
- [5] M. Rahkila and M. Karjalainen, "Considerations of computer based education in acoustics and signal processing," in *FIE '98. 28th Annual Frontiers in Education Conference. Moving from 'Teacher-Centered' to 'Learner-Centered' Education. Conference Proceedings (Cat. No.98CH36214)*, 1998, vol. 2, pp. 679–684.
- [6] Florian Markert, "A digital filter library for JavaScript," <https://github.com/markert/fili.js> (accedido el 30 de mayo de 2021).
- [7] jQuery Foundation, "jquery javascript library," <https://jquery.com> (accedido el 30 de mayo de 2021).
- [8] "Campus de Excelencia Internacional Andalucía TECH," <http://andaluciatech.org/> (accedido el 1 de mayo de 2021).
- [9] F. James, R. Kurose, and W. Keith, *Redes de computadores: un enfoque descendente*, Pearson Education, 2010.
- [10] W. Stallings, *Comunicaciones y Redes de Computadores, 7ª edición*, Prentice-Hall, 2004.
- [11] A.S. Tanenbaum, *Redes de computadoras*, Pearson educación, 2003.