

Artículo de Investigación

Sistema de transmisión de datos a través de la radio FM aplicando técnicas de Datos sobre Sonido

Data transmission system through FM radio applying Data over Sound techniques

Leonardo Rentería^{*}, José Jínez, Klever Torres, Jéssica Ramos

Carrera de Ingeniería en Telecomunicaciones, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador, 060108; jjinez@unach.edu.ec; ktorres@unach.edu.ec; jpramos.fie@unach.edu.ec

*Correspondencia: leonardo.renteria@unach.edu.ec

Citación: Rentería, L., Jínez, J., Torres, K., & Ramos, J., (2023). Sistema de transmisión de datos a través de la radio FM aplicando técnicas de Datos sobre Sonido. *Novasinerгия*. 6(2). 129-139.

<https://doi.org/10.37135/ns.01.12.08>

Recibido: 02 mayo 2023

Aceptado: 21 junio 2023

Publicación: 14 julio 2023

Novasinerгия
ISSN: 2631-2654

Resumen: En el Ecuador, el acceso a Internet es considerado un servicio básico desde el 2015; sin embargo, apenas el 60% de su población tiene acceso al mismo. El 70% de los ecuatorianos que viven en la zona urbana cuentan con Internet mientras que en la zona rural solo el 38%. En este sentido, el objetivo de este trabajo fue diseñar e implementar un sistema de transmisión de texto e imagen a través de la radio FM tradicional basado en la tecnología data-over-sound para que pueda ser utilizado como una herramienta para reducir la brecha digital de las zonas rurales. Se construyeron un prototipo transmisor y otro receptor, se codificaron los datos aplicando la técnica de modulación BPSK y se enviaron a diferentes tasas de transmisión 4800, 9600, 19200, 76800 y 11500 bits por segundo (bps). Para evaluar el funcionamiento del dispositivo, se midió la tasa de error definida como la relación entre el número de bits transmitidos y el de recibidos. Como resultado, se obtuvo una tasa de error mínima de 58% a una velocidad de 4800 bps y máxima de 61.25% a 115200 bps, así mismo, el sistema permitió enviar imágenes de hasta 256 píxeles. A diferencia de otros trabajos relacionados, esta propuesta no solo que superará por mucho la distancia de cobertura si no que puede ser implementada sobre una infraestructura de radiodifusión existente para llegar con la información a los sectores más vulnerables.

Palabras clave: Brecha digital, BPSK, datos sobre sonido, DoS, texto a través de FM.

Abstract: In Ecuador, Internet access has been considered an essential service since 2015; however, only 60% of its population has access. 70% of Ecuadorians in urban areas have Internet access, whereas only 38% in rural areas do. In this sense, this work aimed to design and implement a text and image transmission system through traditional FM radio based on data-over-sound technology so that it can be used as a tool to reduce the digital divide in rural areas. A transmitter and a receiver prototype were built, and the data was encoded using the BPSK modulation technique and sent at different transmission rates: 4800, 9600, 19200, 76800, and 11500 bits per second (bps). The error rate was measured to evaluate the operation of the device, defined as the ratio between the number of bits transmitted and the number of bits received. As a result, a minimum error rate of 58% was obtained at a speed of 4800 bps and a maximum of 61.25% at 115200 bps; likewise, the system allowed images of up to 256 pixels to be sent. Unlike other related works, this proposal will not only exceed the coverage distance but can also be implemented on an existing broadcasting infrastructure to reach the most vulnerable.

Keywords: BPSK, Data over sound, Digital divide, DoS, Text over FM.



Copyright: 2023 derechos otorgados por los autores a Novasinerгия.

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia de Creative Commons Attribution (CC BY NC).

(<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introducción

En el Ecuador, desde el 2015 se reconoce el derecho de las personas de acceder a la información y comunicación a través de los servicios de telecomunicaciones definidos en la Ley Orgánica de Telecomunicaciones; tal es así que actualmente el Internet es considerado un servicio básico. Sin embargo, solo el 60% de la población cuenta con este servicio (Primicias, 2023) y según el Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), en la zona urbana apenas el 70% de los habitantes tienen Internet mientras que en la rural solo el 38% (INEC, s.f.).

En marzo 2019, el surgimiento de la pandemia obligó a las autoridades a tomar medidas de aislamiento total y adoptó la tele-educación como alternativa para dar continuidad a los procesos de enseñanza aprendizaje en todos los niveles educativos (Educación, 2022). Estas medidas evidenciaron con mayor claridad la brecha digital y agudizaron las desigualdades existentes entre las zonas rurales y urbanas (Velasco, Tapia, & Hurtado, 2020). Para mitigar este fenómeno, el Ministerio de Educación implementó el "Plan Educativo COVID-19" mediante el cual se utilizaron medios de comunicación masivos de radio y televisión para compartir contenidos educativos a los estudiantes que carecían de acceso a Internet.

Hoy en día, el principal aliado de la educación es el Internet, sobre todo para las familias de clase media-alta que tiene en su hogar computadoras, teléfonos inteligentes y tabletas, pero esa realidad no es igual para toda la comunidad estudiantil del Ecuador (INEC, s.f.). En este sentido, se plantea el diseño e implementación de un sistema de transmisión de datos a través de la radio FM aplicando la tecnología data-over-sound (DoS) la cual permite incluir texto o imágenes dentro de un audio. Este sistema puede ser utilizado para compartir información y recurso educativos con los estudiantes que no cuentan con acceso a Internet sobre todo en las zonas rurales.

Por otro lado, en los últimos años, se han realizado una serie de investigaciones respecto DoS (Kim, Mun, & Lee, 2019). En (Getreuer, Gnegy, & Lyon, 2017) se implementó un protocolo de comunicación casi ultrasónico en la banda de 18,5 a 20 kHz que es inaudible para la mayoría de los humanos. Este sistema usa los parlantes y micrófonos de los teléfonos inteligentes básicos para transmitir y recibir señales. Alcanzaron una tasa de transmisión de 94.5 bits por segundo (bps) a una distancia de 2 metros en un ambiente de interiores. En (Guri, Solewicz, & Elovici, 2018), se muestra como dos computadores en una habitación pueden intercambiar información usando solo los parlantes sin necesidad de un micrófono a frecuencias entre 18kHz y 24kHz. Explotaron la capacidad de un programa maligno para invertir la función de los altavoces conectados de dispositivos de salida a dispositivos de entrada y lograron tasas de transmisión de 166 bps a una distancia de 8 metros.

Igualmente, en (Ka, et al, 2016) se implementó una comunicación basada en una señal de chirrido casi ultrasónica a una frecuencia inferior a 20 kHz para los servicios de una segunda pantalla del televisor. En este trabajo pudieron establecer el servicio de una segunda pantalla con una tasa de error de trama de casi 0 a 2.7 metros con una velocidad de 15 bps. Así mismo, en (Dey, Roy, & Das, 2017) desarrollaron un modem para enviar textos, audio e imágenes en comunicaciones punto a punto y punto multipunto a una distancia de 1 metro con una frecuencia de 40kHz. Si bien, lograron una eficiencia del 100% a través de técnicas de modulación de ancho de pulso y modulación por desplazamiento de amplitud, consideran en el futuro usar la modulación por desplazamiento de fase binaria (BPSK) para incrementar la distancia. Finalmente, (Dutta, Bhattacharyya, & Kim, 2009) describe una técnica que permite ocultar datos en un archivo de audio. La técnica consiste en convertir un archivo de audio y la información en un registro codificado en hexadecimal, transformarlos en binario y concatenarlos sin que el tamaño del archivo de audio cambie.

Esta investigación tuvo como objetivo el desarrollo de un sistema de transmisión de datos basado en técnicas de data-over-sound usando señales de radio FM. Se estudiaron y analizaron las modulaciones utilizadas por la DoS, se diseñó e implementó un sistema de radio FM para transmitir texto e imágenes, así como, un dispositivo receptor FM de bajo costo compatible con la tecnología DoS. Finalmente, se evaluó el dispositivo midiendo la tasa de error de bits a diferentes velocidades de transmisión con modulación BPSK.

El artículo está organizado de la siguiente manera. En la sección 2 se presenta la metodología y los sistemas de transmisión y recepción FM DoS. En la sección 3 se contempla de manera cuantitativa los resultados. En la sección 4, la discusión establece la diferencia que existe con relación a trabajos similares anteriores. Finalmente, la sección 5 detalla las conclusiones de la investigación.

2. Metodología

El estudio presentado en esta investigación es de carácter experimental. Se llevó a cabo en tres fases: en la primera se realizó un estudio bibliográfico de las investigaciones y trabajos similares acerca de la técnica DoS, en la segunda, se diseñó e implementó un sistema FM de transmisión y recepción de datos aplicando DoS y en la última fase se evaluó el desempeño del sistema implementado.

Las variables tasa de error y tasa de baudios (baud rate) fueron definidas como dependiente e independiente, respectivamente y se describen en la Tabla 1. La población fue conformada por 100 datos de la tasa de error (TE) calculados utilizando la ecuación 1 y medidos a diferentes tasas de baudios.

$$TE = \frac{\text{Bits perdidos}}{\text{Bits Transmitidos}} \quad (1)$$

Tabla 1: Operacionalización de variables

Variable	Tipo	Definición
Baud rate	Independiente	Velocidad de transmisión de bits.
Tasa de error	Dependiente	Relación entre los recibidos y los datos transmitidos.

2.1 Sistemas de transmisión FM DoS

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques del transmisor en el que se pueden identificar 4 elementos funcionales. El usuario selecciona el tipo de dato que desea enviar a través de la interfaz GUI, el mensaje, sea este texto o imagen, es convertido a binario, se añade un encabezado de sincronización, se codifica aplicando la modulación BPSK y se convierte en un archivo de audio el mismo que es transmitido por el sistema FM en la frecuencia de 87.5MHz.

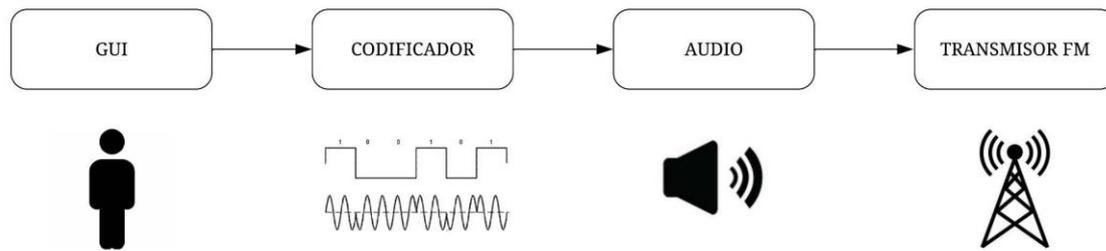


Figura 1: Diagrama de bloques del transmisor FM

Algoritmo 1 Pseudocódigo del proceso de codificación

```

BR ← 9600
Fp ← 2 * BR
Ap ← 1
Mod ← [ ]
k ← 1
C ← Ingrese el mensaje
N ← length(C)
for i ← 1 to N do
  cDec ← char2dec(Ci)
  cBin ← dec2Bin(cDec)
  for j ← 1 to 8 do
    bit ← dec2Bin(cBinj)
    if bit = 1 then
      mbit ← Ap * cos(2 * π * Fp * t + 0)
    else
      mbit ← Ap * cos(2 * π * Fp * t + π)
    end if
    Modk ← mBit
    k ← k + 1
  end for
end for
audiosave ← Mod
  
```

El proceso de codificación del texto se resume en el algoritmo 1. Los caracteres se transforman en números enteros y luego en binario, se modulan con BPSK y finalmente se graba el archivo de audio en formato ".wav". En la Figura 2 se puede observar la señal digitalizada y codificada para la letra "h". La trama de datos está compuesta por 8 bits, su duración es de 833.36 μs y el tiempo de bit es de 104.17 μs. El envío de las imágenes es muy similar; la única diferencia radica en que antes de ser

enviada, se extrae la información de los píxeles, se los convierte directamente en bytes y se los codifica uno a uno siguiendo el mismo proceso anterior.

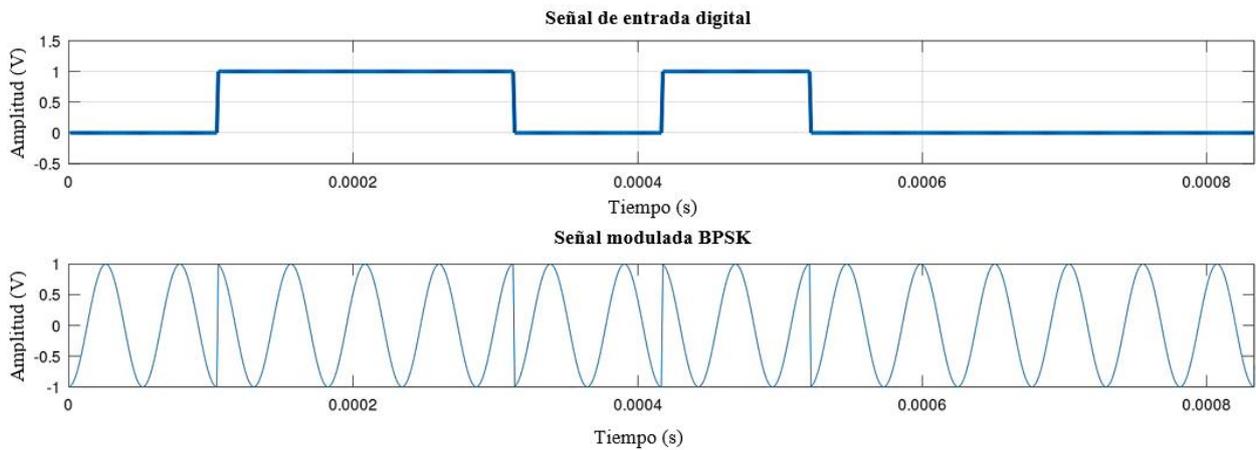


Figura 2: Señal digitalizada y codificada para la letra "h". Valor decimal: 104. Valor binario: 01101000. Baud rate: 9600. Tb: 104.17us. Fc=19.2Khz

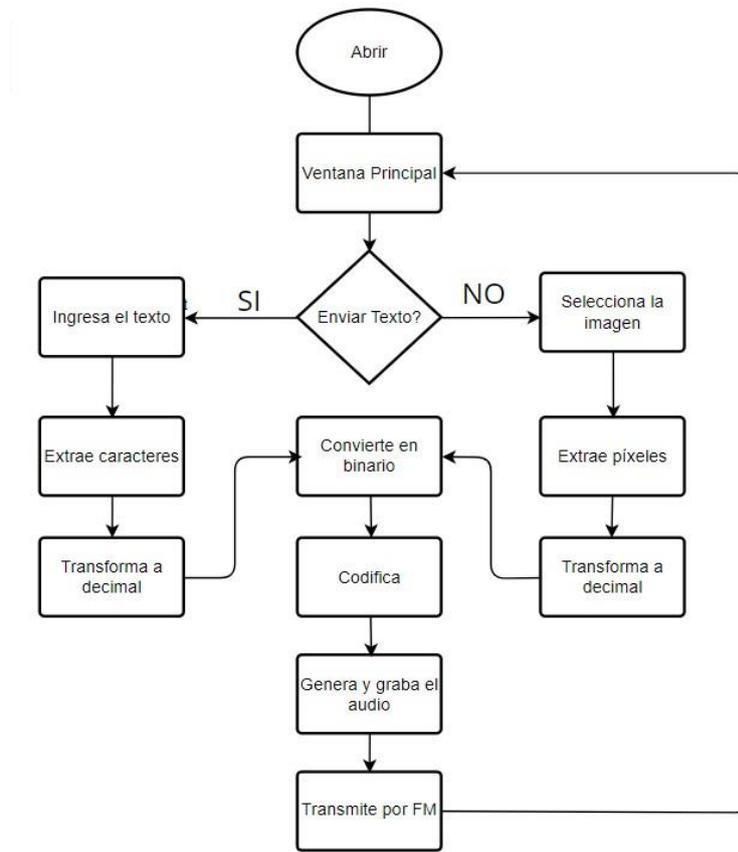


Figura 3: Diagrama de Flujo del proceso de transmisión.

El dispositivo transmisor utiliza una tarjeta de desarrollo Raspberry PI. Aprovecha el sistema de supresión de EMI (interferencia electromagnética) que se realiza mediante una señal llamada señal de reloj de espectro ensanchado o SSCS. La frecuencia de esta señal puede variar de 1MHz a 250MHz dentro de la cual se encuentra la banda FM. El diagrama de flujo del proceso de transmisión se muestra en la Figura 3.

Algoritmo 2 Pseudocódigo del proceso de decodificación

```

Mod ← audioread
BR ← 9600
Tb ← 1/BR
Ap ← 1
Fp ← 2 * BR
bin ← [ ]
N = length(Mod)
k ← 1
for i ← 1 to N do
    c ← cos(2 * π * Fp * t)
    sc ← conv(c, Mod)
    si ← integra(sc)
    rsi ← round(2 * si/Tb)
    if rsi > Ap/2 then
        bit ← 1
    else
        bit ← 0
    end if
    bink ← bit
    if k = 8 then
        cBin ← num2str(bin)
        cDec ← bin2dec(cBin)
        c ← char(cDec)
        k ← 0
    end if
    k ← k + 1
end for

```

3. Resultados

En esta sección se presentan los resultados luego de medir la tasa de error del sistema. El experimento consistió en el envío de 20 caracteres a diferentes velocidades de transmisión: 4800, 9600, 19200, 76800 y 115200; para cada una de ellas se llevaron a cabo un total de 20 repeticiones. Los datos obtenidos sin procesar se muestran en la Tabla 2, mientras que en la Figura 6 se pueden apreciar los promedios de las tasas de error.

Tabla 2: Valores de la tasa de error medidos para varias velocidades de transmisión de bits.

No	4800	9600	19200	76800	115200
1	0.00	0.50	0.70	0.20	0.15
2	0.50	0.70	1.00	0.25	0.70
3	0.85	0.45	0.85	0.25	0.00
4	0.55	0.40	0.45	1.00	0.75
5	0.00	1.00	0.85	1.00	0.40
6	0.55	0.50	0.75	0.05	1.00
7	0.50	1.00	0.55	0.30	0.30
8	0.45	0.00	1.00	0.30	1.00
9	0.60	0.30	0.25	1.00	0.95
10	0.75	0.45	0.05	1.00	0.15
11	0.85	0.20	0.45	1.00	0.00
12	0.45	1.00	0.25	1.00	0.85
13	0.85	1.00	1.00	0.75	1.00
14	1.00	0.25	0.25	0.75	0.55
15	0.15	1.00	0.15	0.15	1.00
16	1.00	0.25	0.15	0.60	0.95
17	0.65	0.75	1.00	0.10	0.85
18	1.00	1.00	0.85	0.80	0.30
19	0.15	0.15	1.00	0.75	0.60
20	0.75	0.85	0.30	0.35	0.75

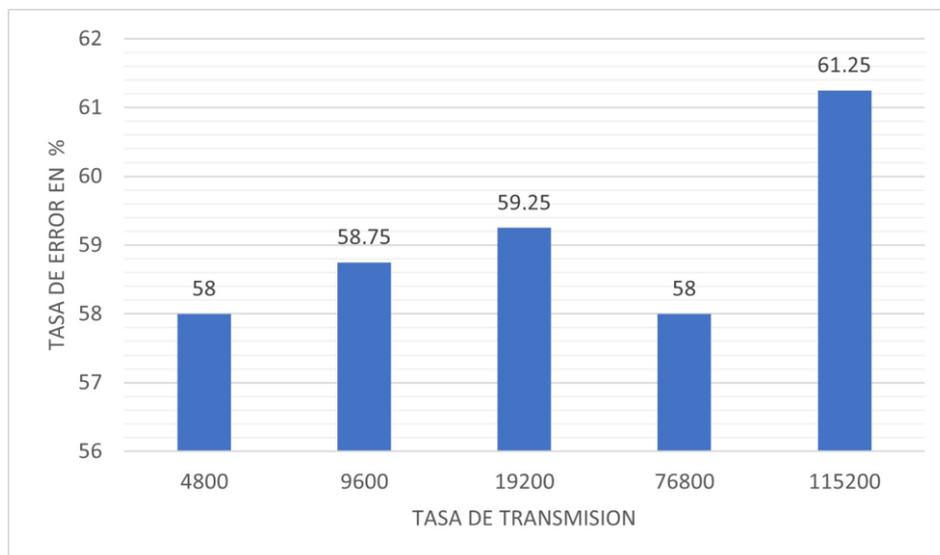


Figura 6: Diagrama de barras de las tasas de error promedio a diferentes velocidades de transmisión.

A primera vista, se puede apreciar una diferencia de 3.25% entre la tasa de error máxima y mínima a 115200 y 4800 bps, respectivamente; sin embargo, es necesario comprobar si esta diferencia es suficiente como para concluir que los promedios son estadísticamente diferentes. En este sentido, se realizó un análisis de varianza de un factor (ANOVA) cuyo resultado se puede visualizar en la Tabla 3. El **valor F** encontrado es menor que el **Valor crítico para F** lo que determina que no existe una

diferencia significativa en las medias y las tasas de error se pueden considerar iguales para todas las velocidades.

Tabla 3: Análisis de varianza de un factor.

RESUMEN							
Grupos	Cuenta	Suma	Promedio	Varianza			
4800	20.00	11.60	0.58	0.10			
9600	20.00	11.75	0.58	0.12			
19200	20.00	11.85	0.59	0.12			
76800	20.00	11.60	0.58	0.13			
115200	20.00	12.25	0.61	0.13			
ANÁLISIS DE VARIANZA							
Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	de Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F	
Entre grupos		4.00	0.00	0.03			
Dentro de los grupos	0.01	95.00	0.12		0.10	2.47	
	11.21						
Total		99.00					
	11.23						

4. Discusión

En este trabajo se propuso el diseño e implementación de un sistema de transmisión de texto e imágenes a través de las ondas de radio FM usando técnicas de DoS. Aunque de manera preliminar; esta investigación contribuye a la creciente literatura sobre sistemas de transmisión de datos sobre el sonido DoS (Dutta, Bhattacharyya, & Kim, 2009), (Getreuer, Gnegy, & Lyon, 2017), (Guri, Solewicz, & Elovici, 2018). El diseño y la evaluación inicial de este prototipo muestran la viabilidad del sistema y resaltan cuestiones técnicas importantes que se deben tener en cuenta. Adicionalmente, el enfoque presentado difiere totalmente de los trabajos similares expuestos anteriormente y permitiría no solo alcanzar distancias considerablemente mayores en función de la cobertura de la radio FM, sino que, es una técnica que puede ser implementada sobre la infraestructura de radio difusión existente.

Como era de esperar, el error en el envío de los datos aumenta con el aumento de la tasa de transmisión, tal es así que, con 4800bps se tiene una tasa de error de 58% y con 115200 aumenta a 61.25%. Sin embargo, aplicando una prueba ANOVA se pudo determinar que la tasa de error no se vio afectada por la velocidad de transmisión en los rangos utilizados en este proyecto.

El error en el envío de los datos puede en principio parecer demasiado alto, 59.05% en promedio y con un tamaño de imagen máximo de 16x16 píxeles; sin embargo, deja un amplio margen para la mejora. Esto, obviamente es debido a que las tasas de transmisión son excesivamente altas en

comparación con las utilizadas en otros trabajos similares y además la modulación BPSK quizás no es la más adecuada ya que es muy susceptible al ruido. Por lo tanto, en un futuro se espera disminuir las velocidades de transmisión e investigar otro tipo de modulaciones que puedan brindar mejores prestaciones con el fin aumentar el rendimiento del sistema.

5. Conclusiones

En este trabajo se diseñó e implementó un sistema de transmisión de datos aplicando la tecnología DoS a través de las ondas de radio FM. La novedad de esta propuesta radica en que el sistema puede coexistir con la infraestructura de radio difusión existente y podría ser utilizada como una herramienta de acceso a la información para los sectores más vulnerables de la población ya que la distancia de cobertura no es una limitante.

El sistema fue sometido a pruebas con diferentes tasas de transmisión y se obtuvo una tasa de error promedio de 59.5% usando la modulación BPSK. Se estima que esta tasa mejore reduciendo la velocidad de transmisión y aplicado otra técnica de modulación como por ejemplo la FSK o QPSK.

Para la puesta en marcha del sistema, se construyeron dos prototipos, un transmisor FM y un receptor. En ambos prototipos se utilizó plataformas de hardware abierto como es la *raspberrypi*. En un futuro se espera implementar esta técnica sobre una infraestructura de radiodifusión real.

Contribuciones de los autores

En concordancia con la taxonomía establecida internacionalmente para la asignación de créditos a autores de artículos científicos (<https://casrai.org/credit/>). Los autores declaran sus aportes en la siguiente matriz de contribuciones:

	Rentería, L.	Jínez, J.	Torres, K.	Ramos, J.
Conceptualización				
Análisis formal				
Investigación				
Metodología				
Recursos				
Validación				
Redacción - revisión y edición				

Conflicto de Interés

Los autores confirman que no hay ningún tipo de conflictos de intereses con respecto a la investigación presentada.

Referencias

- Dey, S., Roy, A., & Das, S. (2017). Point to point and multipoint to point acoustic modem for ultrasonic data communication. *4th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN)*, 10-14, <https://doi.org/10.1109/SPIN.2017.8049906>
- Dutta, P., Bhattacharyya, D., & Kim, T.-h. (2009). Data hiding in audio signal: a review. *International journal of database theory and application*, 1-8. Recuperado de <https://acortar.link/ZUiBUw>

- Educación, M. d. (2022). *Plan-educativo-covid-19*. Ministerio de Educación. Recuperado de <https://educacion.gob.ec/plan-de-continuidad-educativa/>
- Getreuer, P., Gnegy, C., & Lyon, R. (2017). Ultrasonic communication using consumer hardware. *IEEE Transactions on Multimedia*, 1277-1290, <https://doi.org/10.1109/TMM.2017.2766049>
- Guri, M., Solewicz, Y., & Elovici, Y. (2018). Mosquito: Covert ultrasonic transmissions between two air-gapped computers using speaker-to-speaker communication. *IEEE Conference on Dependable and Secure Computing (DSC)*, 1-8, <https://doi.org/10.1109/DESEC.2018.8625124>
- INEC. (s.f.). *Tecnologías de la Información y comunicación-TIC*. Instituto Nacional de Estadística y Censos. Recuperado de <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/tecnologias-de-la-informacion-y-comunicacion-tic/>
- Ka, S., Kim, T. H., Ha, J. Y., Lim, S. H., Shin, S. C., Choi, J. W., . . . Choi, S. (2016). Near-ultrasound communication for tv's 2nd screen services. *Proceedings of the 22nd Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 42-54, <https://doi.org/10.1145/2973750.2973774>.
- Kim, S., Mun, H., & Lee, Y. (2019). A Data-Over-Sound Application: Attendance Book. *20th Asia-Pacific Network Operations and Management Symposium (APNOMS)*, 1-4, <https://doi.org/10.23919/APNOMS.2019.8892996>.
- Primicias. (Enero de 2023). *Precio, baja calidad y cortes de electricidad reducen el acceso a internet*. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/internet-precio,calidad-electricidad-ecuador>
- Velasco, M., Tapia, J., & Hurtado, F. (2020). Estaba el sistema educativo del Ecuador preparado para enfrentar la pandemia de covid-19. *Observatorio Social del Ecuador*.