

# Codificación y Modulación para la Transmisión de Señales de Audio sobre Enlaces Inalámbricos

First A. Edison Fabian Mora Casas, Second B. Cristian Camilo Fajardo Rodríguez, Third C. Wilinton Jair Chindoy

**Resumen**— Este informe presenta el desarrollo práctico de un sistema básico de transmisión de señales de audio mediante codificación y modulación digital sobre un enlace inalámbrico. Se emplea la codificación PCM (Pulse Code Modulation) para digitalizar la señal de audio y se utiliza un módulo Bluetooth HC-05 como medio de transmisión inalámbrica, basado en modulación FSK (Frequency Shift Keying). La señal es muestreada, cuantificada y enviada en tiempo real desde un microcontrolador Arduino hacia un receptor, donde se reconstruye la señal para su reproducción en donde los resultados demuestran que es posible transmitir voz de manera eficiente en tiempo real, aunque con ciertas limitaciones de calidad debido a la baja tasa de muestreo y la sencillez del canal. Se concluye que el uso de técnicas más avanzadas de codificación y modulación permitiría mejorar significativamente la fidelidad y robustez de la transmisión en aplicaciones de mayor complejidad.

**Palabras clave**— Codificación de audio, modulación digital, transmisión inalámbrica, FSK, señales de audio, enlaces inalámbricos, comunicación digital

## I. INTRODUCCIÓN

En las telecomunicaciones, la transmisión eficiente de señales de audio a través de medios inalámbricos es algo fundamental para una amplia gama de aplicaciones, que van desde telefonía móvil hasta sistemas embebidos, IoT y radiofrecuencia. Estas transmisiones requieren de señales analógicas, como lo es una voz o una canción, y sean adecuadamente transformadas en un formato digital, codificadas y finalmente moduladas para su envío a través del canal de comunicación inalámbrico.

En el presente informe se desarrolla un experimento práctico que simula la transmisión de señales de audio mediante codificación y modulación, utilizando herramientas como Arduino, módulos Bluetooth (HC-05), y software de análisis digital. Además, se analizan los fundamentos teóricos y las técnicas utilizadas [4].

## II. MARCO TEORICO

### II.I Codificación de audio

La codificación de audio convierte señales analógicas en digitales mediante muestreo, cuantificación y codificación binaria. Según el Teorema de Nyquist, una señal de audio debe muestrearse al menos al doble de su frecuencia máxima para conservar su integridad [2]

- **PCM (Pulse Code Modulation)**: método común en el que la señal se representa como una serie de pulsos digitales.
- **ADPCM (Adaptive Differential PCM)**: mejora la eficiencia reduciendo la redundancia en las muestras sucesivas.
- **MP3 (MPEG-1 Audio Layer III)**: Utiliza compresión con pérdida para reducir significativamente el tamaño de los archivos de audio mientras mantiene una calidad aceptable. Esta técnica es ampliamente utilizada en aplicaciones de streaming y almacenamiento de música.
- **AAC (Advanced Audio Coding)**: Ofrece mejor calidad que MP3 a la misma tasa de bits, gracias a técnicas más eficientes de compresión. Es común en plataformas como YouTube y Apple Music.
- **Opus**: Un códec versátil que combina baja latencia con alta calidad, ideal para aplicaciones de comunicación en tiempo real como VoIP.

### II.II Modulación digital

La modulación permite adaptar la señal digital al medio físico de transmisión. Algunas técnicas comunes incluyen:

- **ASK (Amplitude Shift Keying)**: modula la amplitud de una onda portadora.
- **FSK (Frequency Shift Keying)**: cambia la frecuencia de la portadora según los bits transmitidos.
- **PSK (Phase Shift Keying)**: altera la fase para representar bits o símbolos.
- **QAM (Quadrature Amplitude Modulation)**: combina ASK y PSK para aumentar la densidad de información [1]

En comparación con la modulación PSK, que ofrece mayor robustez frente a interferencias y mejor eficiencia espectral, FSK es más sencilla de implementar, pero presenta una mayor ocupación de ancho de banda. Por otro lado, QAM combina tanto ASK como PSK, permitiendo una mayor densidad de información, pero con un incremento en la complejidad del sistema.

### II.III Enlaces inalámbricos

Un enlace inalámbrico es una conexión que permite transmitir señales sin necesidad de cables. Este tipo de conexión usa menos energía que una con cables, puede ser más confiable, necesita menos calidad en la señal para funcionar bien y permite comunicarte a mayores distancias además de realizar su transmisión por frecuencias 2.4 GHz o 5 GHz.

### II.IV GFSK

La modulación por desplazamiento de frecuencia Gaussiana (GFSK) es una versión mejorada de la modulación FSK, en esta versión mejorada la frecuencia de la señal no cambia de golpe cuando se transmite un nuevo bit si no por el contrario lo hace de forma más suave, esto con el fin de que la señal tenga menos cambios bruscos en su forma y logre ser más estable, por otro lado la FSK usa osciladores que cambian la frecuencia de manera muy repentina en cada bit lo cual genera señales con un ancho de banda muy amplio y partes laterales las cuales generan interferencias. Entonces la GFSK logra reducir ese problema, haciendo una transmisión más eficiente y sin tanto ruido [5]

## III. OBJETIVOS

- Implementar la transmisión de audio digitalizado mediante un enlace Bluetooth.
- Evaluar la calidad de la codificación y modulación digital sobre un canal inalámbrico.
- Analizar las pérdidas y distorsiones que ocurren durante la transmisión.

## IV. DISCUSIÓN

La modulación y codificación implementadas resultan efectivas para una prueba básica de transmisión de audio. Sin embargo, se evidencian las limitaciones de ancho de banda y tasa de bits del módulo HC-05. Para transmisiones de alta calidad, se requieren técnicas como compresión MP3, modulación QAM o PSK y protocolos robustos como Wi-Fi (802.11) o Bluetooth A2DP.

Según Stallings (2013), las técnicas de modulación digital avanzadas permiten mayor eficiencia espectral y tolerancia al ruido, claves en comunicaciones modernas [3].

El grupo para este caso escoge los siguientes algoritmos para realizar una comunicación fiable, en la cual si se pierden datos, se pueda detectar o incluso arreglar el bit que no es correcto.

Algoritmo 1 -> CRC: es un algoritmo ampliamente utilizado para la detección de errores en sistemas de comunicación digital y almacenamiento. Su funcionamiento se basa en la teoría de polinomios en aritmética binaria, donde los datos se interpretan como coeficientes de un polinomio binario que es dividido por otro polinomio fijo conocido como *polinomio generador*. Este proceso genera un residuo o *firma digital* que es añadido al mensaje y enviado junto con los datos. En el

receptor, se repite la operación de división: si el residuo es cero, se asume que el mensaje fue recibido sin errores; de lo contrario, se detecta una corrupción en los datos. El pseudocódigo del crc es:

```

TRANSMITIR(Datos, Polinomio):
    r ← grado del Polinomio
    DatosExtendidos ← Datos concatenado con r ceros
    Residuo ← DIVISION_BINARIA(DatosExtendidos, Polinomio)
    CRC ← últimos r bits del Residuo
    Mensaje ← Datos concatenado con CRC
    return Mensaje

RECIBIR(Mensaje, Polinomio):
    Residuo ← DIVISION_BINARIA(Mensaje, Polinomio)
    if Residuo == 0:
        return "Mensaje válido"
    else:
        return "Error detectado"

DIVISION_BINARIA(Dividendo, Divisor):

    mientras longitud del Dividendo ≥ longitud del Divisor:

        si el bit más significativo del Dividendo es 1:

            Dividendo ← Dividendo XOR (Divisor alineado a la izquierda)

        eliminar el bit más significativo del Dividendo

    return Dividendo

```

Algoritmo 2-> checksum: es un método simple pero eficaz para detectar errores en la transmisión o almacenamiento de datos. Su principio se basa en la suma de bloques de datos, generalmente de tamaño fijo (como palabras de 8, 16 o 32 bits). La idea es que al sumar todos los bloques, se genera un valor único que actúa como “huella” o firma de integridad. Este valor se adjunta al mensaje original.

Cuando el receptor recibe el mensaje, realiza la misma suma sobre los bloques (incluyendo el checksum recibido) y espera obtener un resultado predefinido —generalmente cero (en complemento a uno) o un valor fijo—. Si el resultado no coincide, se detecta que ocurrió un error durante la transmisión. El pseudocódigo el checksum es:

```

TRANSMITIR(Datos, TamañoPalabra):
    dividir Datos en bloques de TamañoPalabra bits
    Suma ← 0
    para cada Bloque en Datos:
        Suma ← Suma + Bloque
        si hay desbordamiento:
            Suma ← (Suma & Máscara) + 1 // Suma circular
    Checksum ← complemento a uno de Suma

    Mensaje ← Datos concatenado con Checksum

    return Mensaje

RECIBIR(Mensaje, TamañoPalabra):
    dividir Mensaje en bloques de TamañoPalabra bits

    Suma ← 0

    para cada Bloque en Mensaje:
        Suma ← Suma + Bloque
        si hay desbordamiento:
            Suma ← (Suma & Máscara) + 1
    if complemento a uno de Suma == 0:
        return "Mensaje válido"
    else:
        return "Error detectado"

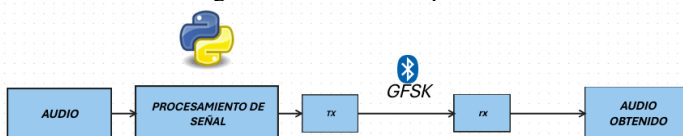
```

El mensaje que se tiene planteado enviar es:

MENSAJE	CRC-8-BIT	CHECKSUM
---------	-----------	----------

CRC-8-BIT solo aplica al mensaje mientras que el checksum se aplica al mensaje y al CRC, el receptor debe aplicar el código hamming y esta trama se envía dos veces para que pueda realizar el respectivo código, en la figura 1 se puede visualizar el sistema completo.

Figura 1. Sistema completo



Fuente: autor

#### a. Etapas del sistema

- Se obtiene una señal de audio digitalizada la cual será la fuente de información a transmitir
- Se realiza el procesamiento de la señal con lenguaje Python en donde se incluye la compresión y reducción de la resolución de la señal de audio
- Se aplica CRC de 8 bits al mensaje original para así obtener una detección de errores
- Se calcula el checksum sobre el mensaje y el CRC

- Se aplica el código hamming con el fin de corregir errores en el receptor
- El mensaje completo se transmite dos veces con el fin de aumentar la fiabilidad en la detección y corrección de errores

Entre otras etapas principales están:

- La transmisión inalámbrica con el módulo bluetooth que emplea GFSK
- La recepción y decodificación del mensaje en donde el receptor reconstruye la señal a partir de las tramas recibidas
- Reproducción de la señal de audio

## V CONCLUSIONES

El sistema implementado demostró que es posible transmitir señales de audio en tiempo real utilizando técnicas de modulación digital básicas, lo que demuestra la viabilidad de transmitir voz a través de enlaces inalámbricos como Bluetooth.

Limitaciones en calidad: A pesar de los logros, se evidencian limitaciones en la calidad de la señal debido a la baja tasa de muestreo y la sencillez del canal inalámbrico. Esto resalta la necesidad de técnicas de codificación y modulación más avanzadas para mejorar la fidelidad de la transmisión.

Mejoras con técnicas avanzadas: El informe concluye que el uso de técnicas avanzadas de codificación, como la compresión de audio (por ejemplo, MP3) y modulación más eficiente (como QAM), junto con protocolos robustos como Wi-Fi o Bluetooth A2DP, podría mejorar significativamente la calidad y la fiabilidad de las transmisiones de audio.

Futuras aplicaciones: Aunque el sistema básico demostrado tiene aplicaciones limitadas, el desarrollo de sistemas más sofisticados utilizando técnicas de modulación y codificación más avanzadas permitiría su uso en aplicaciones de mayor complejidad y en escenarios donde se requiere alta calidad de audio, como en dispositivos de comunicación móvil o sistemas de IoT.

## V.I REFERENCIAS

- [1] Haykin, S. (2001). *Communication Systems*. 4th Edition. Wiley.
- [2] Oppenheim, A. V., & Schafer, R. W. (2010). *Discrete-Time Signal Processing*. Prentice Hall.
- [3] Stallings, W. (2013). *Wireless Communications & Networks*. 2nd Edition. Pearson.
- [4] Bluetooth SIG. (2020). *Bluetooth Core Specification v5.2*.
- [5] What is GFSK Modulation? - everything RF. (s. f.). <https://www.everythingrf.com/community/what-is-gfsk-modulation>
- [6] Proakis, J. G., & Salehi, M. (2008). *Digital Communications*. 5th Edition. McGraw-Hill.
- [7] Bluetooth SIG. (2021). *Bluetooth Core Specification v5.3*.

- [8] RFC 6716. (2012). *Definition of the Opus Audio Codec*.
- [9] IEEE 802.11-2020. *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*.