

SISTEMA TRANSPONDEDOR PARA MONITOREO DE TRANSPORTE MARÍTIMO EN LOGÍSTICA DE COMBUSTIBLES

Jorge H. Vázquez Leiva¹, Randy Mustelier Rivero², Michel Buzón Tur³, Armando Estévez Alonso⁴

¹⁻² Centro de Investigación y Desarrollo de Electrónica y Mecánica “CID MECATRONICS”, dir: Calle 15 y 86A,
Playa, La Habana, Cuba

³⁻⁴ Empresa de Informática, Automática y Comunicaciones TECNOMÁTICA, dir: Árbol Seco 56 e/ Estrella y
Maloja, Centro Habana, La Habana, Cuba.

¹e-mail: cid3@reduim.cu

⁴e-mail: aestevez@tm.cupet.cu

RESUMEN

Este trabajo propone el desarrollo de un sistema transpondedor para la monitorización del transporte marítimo con la utilización del Sistema de Identificación Automática (AIS por sus siglas en inglés). La composición general del diseño comienza con la recepción del protocolo AIS en la banda de muy alta frecuencia (VHF por sus siglas en inglés). Una vez recibida la señal se realiza la demodulación y decodificación de los datos de interés para el monitoreo que incluyen posicionamiento y parámetros de navegación de cada buque. La transmisión de la información hacia los centros de control se lleva a cabo en la banda de 2.4 GHz mediante un módem por radiofrecuencia (RF) del fabricante DIGI. Aunque para la investigación fueron empleados medios técnicos en existencia, se puede reproducir la investigación con dispositivos similares si se desea variar o agregar nuevas prestaciones. Las pruebas de validación se realizaron en condiciones de laboratorio y se analizan parámetros fundamentales en este tipo de comunicación. El sistema obtenido puede aplicarse en medios de transporte o señalización marítima.

PALABRAS CLAVES: Transporte marítimo, monitoreo, transpondedor, AIS.

TRANSPONDER SYSTEM FOR MONITORING OF MARITIME TRANSPORTATION IN FUELS LOGISTICS

ABSTRACT

This work proposes the development of an automatic transponder system for monitoring vessels with the use of the Automatic Identification System (AIS). The general composition of the design begins with the reception of the AIS protocol in the very high frequency (VHF) band. Once the signal is received, the demodulation and decoding of the data of interest for monitoring is carried out, which includes positioning and navigation parameters of each vessel. The transmission of information to the control centers is carried out in the 2.4 GHz band using a radio frequency (RF) modem from the manufacturer DIGI. Although existing technical means were used for the research and can be reproduced with similar devices if one wishes to vary or add new features. The validation tests were carried out under laboratory conditions and fundamental parameters in this type of communication are analyzed. The system obtained can be applied in means of transport or maritime signaling.

INDEX TERMS: Maritime Transportation, monitoring, transponder, AIS.

1. INTRODUCCIÓN

Para determinadas operaciones de logística de combustibles es crucial el conocimiento de la posición exacta del medio marítimo que se aproxima a puerto. A nivel mundial este monitoreo se realiza con la ayuda de sistemas de grandes prestaciones que precisan de conexión a Internet y por ello en ocasiones la inmediatez de la información puede verse afectada [1]. Una alternativa a esta situación es auxiliar el control de trayectoria desde tierra con la ayuda del AIS que permite ofrecer información de localización. Estos mensajes se utilizan para diversos usos, como el control de la flota, el control del tráfico o la prevención de abordajes. En la actualidad los transpondedores de AIS presentan altos costos en el mercado internacional, sin tener en cuenta los elementos adicionales que precisan como es el caso de antenas, líneas de transmisión y sistemas de respaldo energético [2].

Manuscrito recibido: 09-01-2025, aceptado: 25-05-2025

Sitio web: <http://revistatelematica.cujae.edu.cu/index.php/tele>

Con el avance de la tecnología varios equipos de costo elevado para el monitoreo han sido sustituidos por aplicaciones informáticas combinadas con radio definido por software (SDR por sus siglas en inglés) [2]. Novedosas técnicas se han aplicado en este campo, algunas de ellas incluyen el diseño transmisor AIS de bajo coste utilizando la tecnología SDR y software de código abierto [3] aunque se ve limitado por el alcance. En otra investigación [4] se integra el receptor basado en SDR en el satélite AAUSAT lo cual evidencia la facilidad de implementación de nuevos algoritmos de detección y su fácil adaptación a los nuevos canales de transmisión AIS propuestos. El estudio presentado en [5] realiza el diseño de una unidad de seguimiento de animales silvestres o protegidos que viven en un parque nacional para una distancia similar. Este utiliza AIS como protocolo de comunicación para rastrear la ubicación de dichas especies dentro de un área sin infraestructura de red inalámbrica.

A pesar del éxito de las investigaciones desarrolladas [1-5], estos sistemas de grandes prestaciones exigen como mínimo una conexión permanente a Internet. Por tanto, se genera dependencia en cuanto a la ocurrencia de fallos e interrupciones, falta de seguridad contra ataques externos y aumento de costos adicionales por adquisición de hardware o software especializado [6]. En este trabajo se propone una solución alternativa que emplea como soporte técnico radio definido por software, computadora de placa única y módem RF, cuya función será recibir y retransmitir la trama AIS de los buques, que por exigencia internacional cuentan con transmisores de este tipo. La solución consiste en desarrollar un sistema transpondedor de este protocolo que garantice confirmar la recepción de las tramas de ubicación y su disponibilidad. De tal manera se podrá controlar la ubicación de medios de transporte, puesto que los sistemas actuales dependen de internet y los buques por su protección contra sanciones prefieren desconectarse. La ventaja radica en la obtención de un sistema independiente de internet, con alcance de transmisión de hasta 30 km determinados por la distancia a la que se ubica la boya indicadora con respecto al puerto y que brinda soberanía tecnológica mediante el empleo de software de decodificación y representación propias.

2. ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA

El sistema propuesto cuenta con dos extremos de comunicación, el primero es el sistema transpondedor el cual se ubica a una distancia de hasta 30 km del centro de control y se ubica en una boya de indicación en mar abierto. Por ello, utilizar líneas de transmisión complejiza el sistema y es más factible emplear comunicación inalámbrica. En este punto se garantiza la recepción del protocolo AIS mediante un receptor definido por software (SDR) de tipo comercial basado en un chip en un chip RTL2832U [7] con un sintonizador integrado (generalmente R820T o R820T2) que cubre frecuencias desde aproximadamente 24 MHz hasta 1.7 GHz, incluyendo la banda AIS (~162 MHz). Tiene una resolución de 8 bits y puede muestrear hasta 3.2 MS/s, suficiente para señales AIS que usan GMSK a 9.6 kbps. El mismo requiere una antena VHF adecuada para AIS para captar señales marítimas, por lo que se equipa con una antena de monopolo diseñada para recibir señales en la banda de onda ultracorta en las frecuencias de 156.25 MHz a 163 MHz. La potencia de señal esperada en el SDR está en el rango de -50 a -110 dBm lo cual permite realizar el monitoreo en la posición antes mencionada.

El SDR empleado no tiene firmware propio para procesamiento; este convierte la señal RF a digital y la envía a la computadora de placa única, la cual se encarga del procesamiento y decodificación de la señal de AIS y la entrega al módem RF. El módem transmite en la banda de 900 MHz con características para contrarrestar las pérdidas por obstáculos en la comunicación, se pueden citar algunas como: alta sensibilidad receptora de -110 dBm, tecnología de saltos de frecuencia (FHSS por sus siglas en inglés) y potencia ajustable hasta un 1W con el hardware sin incorporación e antena auxiliar de mayor ganancia. Es preciso señalar que, aunque estos aspectos mejoran la robustez es crucial garantizar la visibilidad directa entre ambos extremos de comunicación [8]. El centro de monitoreo ubicado en los locales destinados con este fin en el puerto, se equipa con medios de cómputo para la demodulación, decodificación y representación de la trama AIS, así como el módem RF que garantiza la transmisión y recepción de los datos. La Fig.1 muestra el diagrama de bloques que ilustra las etapas y componentes del transpondedor AIS diseñado.

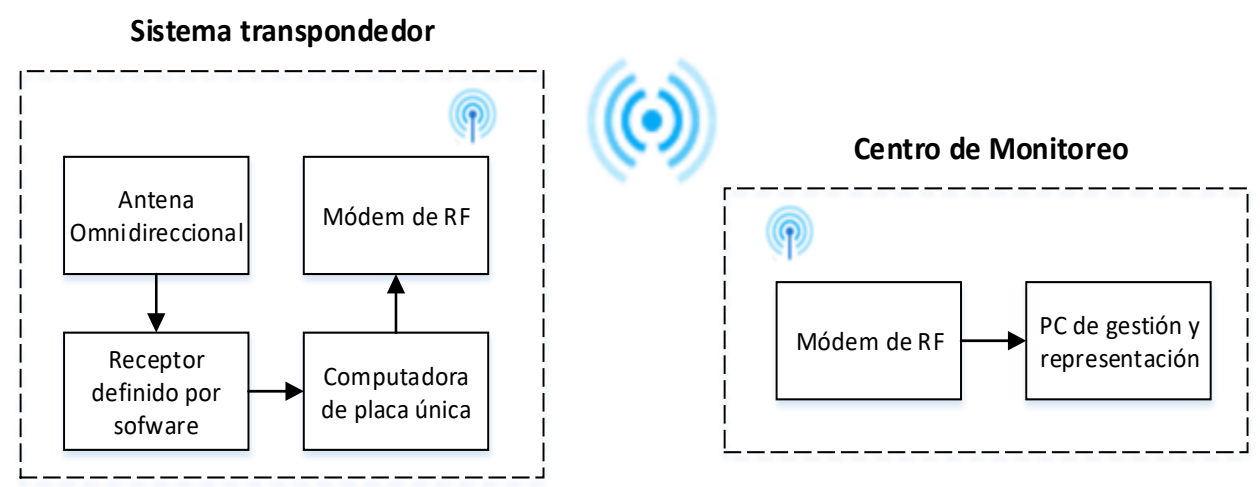


Figura 1: Diagrama de bloques del sistema transpondedor propuesto.

Decodificación de AIS en formato IQ

El SDR entrega la señal recibida en formato IQ, por lo que es necesario realizar la decodificación para obtener la trama NMEA083 [9]. El hardware previsto para contener esta etapa es una computadora de placa única (SBC por sus siglas en inglés), la cual se conecta vía USB. La salida de los datos se configura para una comunicación RS-232 [10] con el módem RF.

Para el intercambio de los datos, se diseña un protocolo de transmisión/recepción que garantiza el transporte de los datos de localización geográfica para el monitoreo. En este caso fue empleada la trama mostrada en la Tabla 1, con la siguiente estructura:

- Bandera de inicio: marca el comienzo de la trama y la identifica como del tipo APRS.
- Campo origen: contiene el indicativo o código de la fuente.
- Campo de información: contiene los datos de ubicación geográfica.
- Bandera final: marca el fin de la trama APRS.

Tabla 1: Formato de la trama a enviarse.

Bandera	Origen	Ubicación	Bandera
3 bits	2bits	12 bits	3 bits

Los datos de ubicación geográfica, pueden adaptarse a la región donde se realice el monitoreo, por ejemplo, si tuviese lugar en Cuba se limitaría a:

- Entre los 19° 46' 36" y 23° 17' 09" de latitud norte.
- Entre los 74° 07' 52" y 84° 00' 00" de longitud occidental.

En el caso particular del sistema propuesto, para la implementación del mecanismo de transmisión/recepción, se utilizó una biblioteca de código abierto, que permite el manejo del hardware de recepción, además provee funciones para manipular la sincronía, demodulación y decodificación del canal, entre otras facilidades. La aplicación final fue desarrollada en Delphi7 para interpretar y estructurar los datos de radiofrecuencia y entregarlos a la entrada de un transmisor que los coloca en el sistema de monitoreo. Para lograr confidencialidad de la información fue aplicado un algoritmo de decodificación basado en Viterbi.

Un elemento a tener en cuenta durante la transmisión de datos a distancia es la constancia de la correcta recepción de la información en la estación destino, lo cual se asegura con un protocolo orientado a conexión con técnicas de acceso al medio de tipo CSMA (Carrier Sense Multiple Access) [11]. Para el cumplimiento del protocolo se parte del principio de una comunicación bidireccional. Deben declararse estados que definan todas las situaciones que pueden presentarse en un proceso de intercambio de información. En primer lugar, se examina el medio de transmisión hasta confirmarse que ha quedado libre y solo se inicia la comunicación una vez ocurrido. Luego es ejecutado el proceso de envío de las tramas AIS hacia el centro de control, de ocurrir este proceso sin error se recibe el acuse de recibo (ACK), en caso contrario se notifica las causas del fallo en la comunicación. La Fig. 2 muestra el diagrama de flujo para el proceso antes explicado.

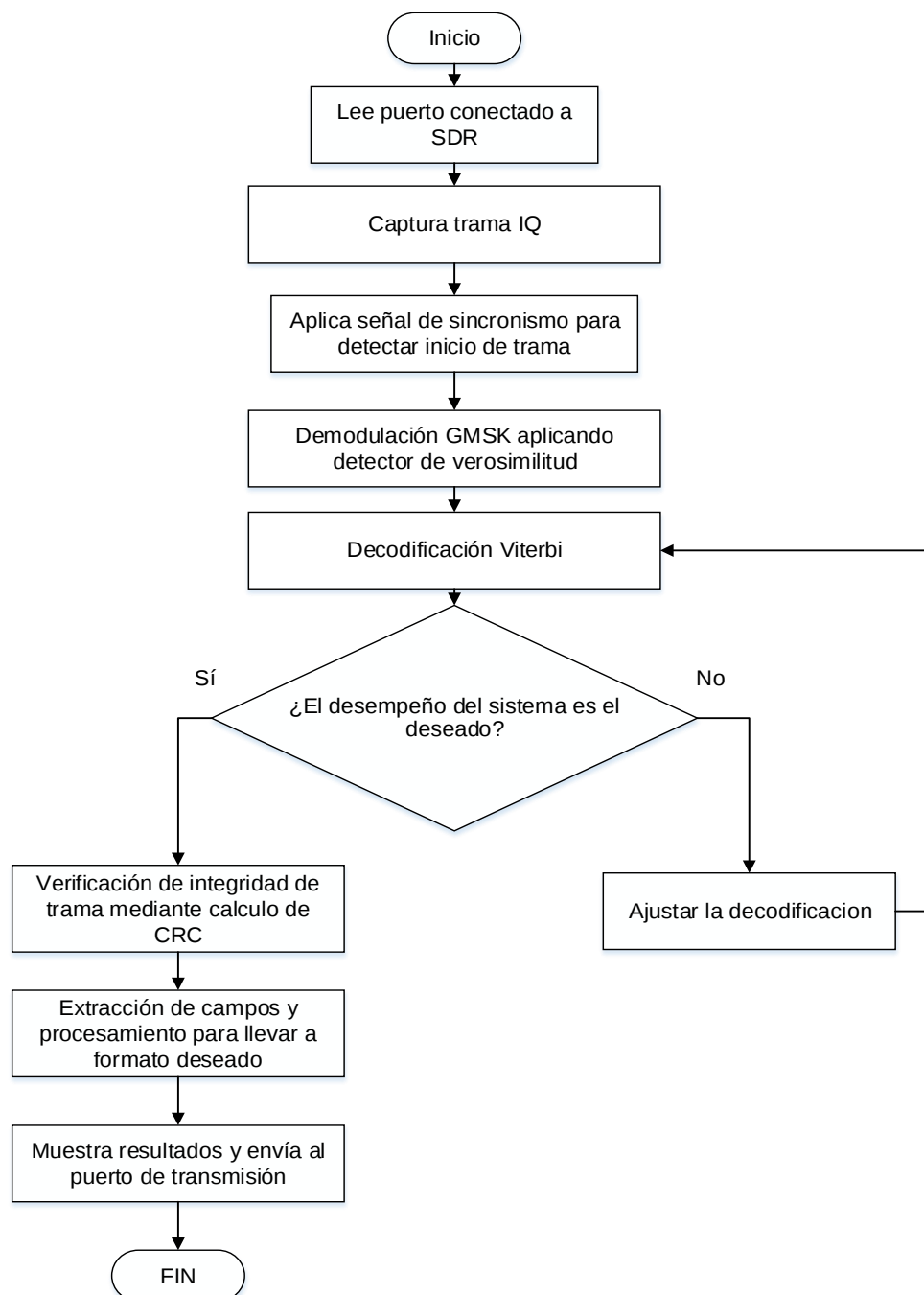


Figura 2: Diagrama de flujo de la aplicación para procesar los datos para monitoreo.

En la figura anterior el “desempeño deseado” es un criterio cuantitativo de calidad de decodificación que guía ajustes iterativos en el proceso para garantizar que la señal AIS se recupere con precisión y fiabilidad. Por lo que se refiere a la calidad o eficacia con la que el sistema de decodificación AIS procesa la señal IQ para extraer correctamente los datos de la trama. Este desempeño se mide principalmente a través de métricas como la tasa de error en la decodificación (por ejemplo, tasa de bits erróneos o tasa de tramas correctamente decodificadas) y la estabilidad del enlace, comparando estos resultados con un umbral o estándar predefinido que indica una decodificación confiable. Si el desempeño no es el deseado (es decir, si la tasa de error es alta o la sincronización falla), el sistema ajusta parámetros en etapas previas del proceso, como el sincronismo, la demodulación GMSK o el decodificador Viterbi, para mejorar la recuperación de la señal y reducir errores. Esto puede incluir modificar el umbral del detector de verosimilitud, ajustar la ventana de sincronización o cambiar parámetros del decodificador para optimizar la relación señal-ruido y la tasa de error.

Software para representación gráfica

La visualización de los datos de posicionamiento geográfico se puede realizar sobre cualquier aplicación destinada a tal efecto, pero las de tipo comercial no dan acceso a sus librerías para poder distribuir los datos recibidos en la red, lo cual es un deseo del cliente. Por lo que el colectivo de autores se propuso el desarrollo de una aplicación propia empleando el entorno de desarrollo (IDE) QtCreator en su versión 5.7 [12], la que se conecta vía Ethernet y realiza la lectura del buffer de datos disponibles. Una captura de la interfaz gráfica puede observarse en la Fig. 3.

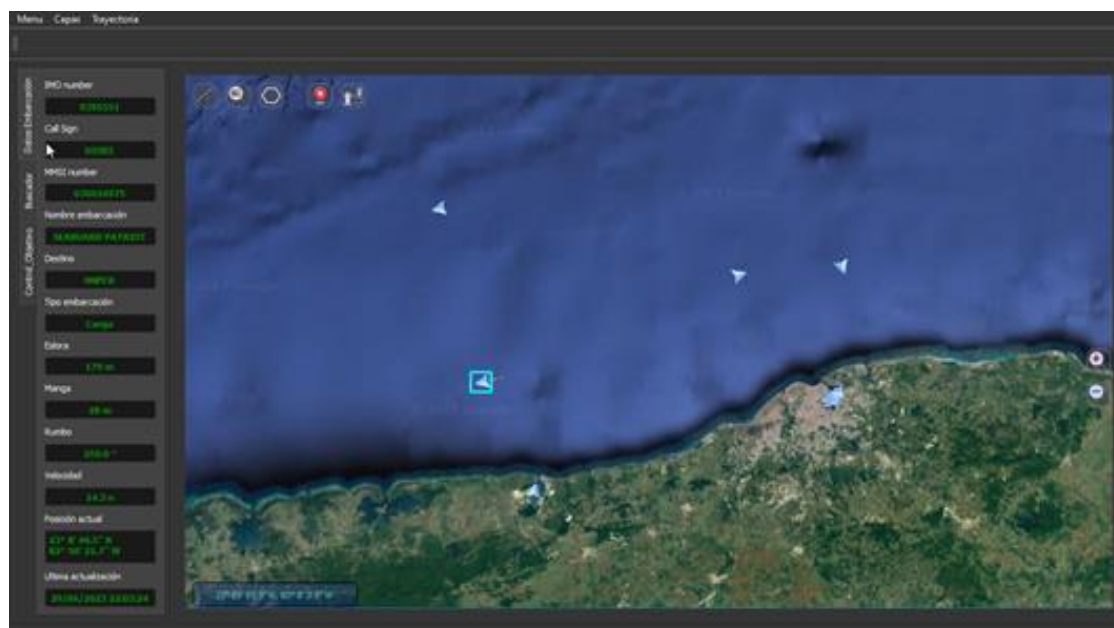


Figura 3: Interfaz gráfica de la aplicación para monitoreo de los medios marítimos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las pruebas se llevan a cabo empleando módem RF del fabricante DIGI del tipo XTEND-PKG [13], computadora de placa única Raspberry PI 4 [14], dongle RTL RTL2832U [15] y analizador de espectro Rohde & Schwarz R&S®FPC1000[16]. La estructura del sistema para cada extremo de comunicación con el hardware citado se puede observar en las Fig. 4 y Fig. 5 respectivamente.



Figura 4: Montaje del centro de control para las pruebas de validación.



Figura 5: Montaje del sistema transpondedor para las pruebas de validación.

En la conexión inalámbrica, resultan parámetros claves en la caracterización del enlace: la potencia recibida, la ganancia de la antena y el nivel de ruido ambiental [17]. Las mediciones de potencia recibida en la Tabla 2 se realizaron capturando la señal con el SDR conectado al puerto USB del SBC, usando la antena integrada del SDR en el ambiente de laboratorio para simular condiciones iniciales y validar la recepción frente a diferentes distancias al punto de acceso del servidor. La elección de la antena integrada del SDR en esta etapa se debe a que se busca evaluar el desempeño básico del receptor sin mejoras externas, para luego proyectar que con una antena monopolo de mayor ganancia la recepción mejoraría significativamente.

Tabla 2: Dependencia de la potencia recibida respecto a la distancia.

Distancia (km)	Potencia (dBm)	Frecuencia (MHz)	Ganancia de la antena (dBi)	Ruido ambiental (dBm)
1	-35	900	3	-100
5	-45	900	3	-100
10	-50	900	3	-100
20	-54	900	3	-100

25	-58	900	3	-100
30	-62	900	3	-100
35	-69	900	3	-100

Se garantiza que el enlace inalámbrico entre el transpondedor AIS ubicado en la boya y el centro de control cumple con la cobertura requerida de hasta 30 km, utilizando el módem RF XTEND-PKG de DIGI en la banda de 900 MHz. En este enlace, la potencia recibida estimada en el receptor del centro de control es de aproximadamente -62 dBm a 30 km, lo cual se valida mediante mediciones realizadas con el analizador de espectro Rohde & Schwarz R&S®FPC1000 conectado a la etapa receptora para medir directamente la potencia de la señal recibida en diferentes distancias. Este equipo, con rango de frecuencia de 5 kHz a 1 GHz (ampliable hasta 3 GHz), cuenta con una alta resolución de pantalla WXGA de 10,1 pulgadas y un rango dinámico amplio gracias a su bajo nivel de ruido base y capacidad para medir señales de hasta +30 dBm.

Esta potencia recibida considera la potencia de transmisión típica del transpondedor AIS (entre 1 y 12.5 W en VHF) y las características del módem RF, que incluye una potencia ajustable de hasta 1 W y una sensibilidad receptora alta, lo que permite superar las pérdidas por distancia y obstáculos en el entorno portuario. Es importante destacar que esta potencia recibida no corresponde a la señal captada directamente por el dongle RTL2832U en la recepción AIS VHF, sino al enlace posterior entre la boya portadora del transpondedor y el centro de monitoreo. Esta aclaración es importante para evitar confusiones en el análisis de los resultados.

En el centro de control se implementaron tres herramientas de decodificación de la trama AIS: Soundmódem 100[18], AFSK1200 [19] y AX.25-SCS [20], con el objetivo de comparar su desempeño en la recepción y procesamiento de la señal recibida bajo condiciones reales de operación. Esta evaluación permitió analizar la robustez, precisión y eficiencia de cada decodificador. Para validar la veracidad de las tramas decodificadas, se incorporó una aplicación desarrollada en DELPHI 7 que calcula la tasa de bits errados (BER por sus siglas en inglés). En todos los casos, el protocolo orientado a conexión confirmó la recepción correcta mediante acuses de recibo (ACK). La Tabla 3 presenta el resumen de los resultados comparativos, puesto que se hicieron varias pruebas que arrojaron resultados similares, mostrando la cantidad de bits transmitidos, recibidos, errados, la llegada del ACK y el BER resultante para cada herramienta. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los parámetros aceptables según estándares de ICT (Information and Communications Technology)[20].

Tabla 3: Resultados obtenidos.

Herramienta decodificadora	Total de bits transmitidos	Total de bits recibidos	Bits errados	Llegada de ACK	BER
Soundmódem 100	7,200,000	7,200,000	9	Sí	0.00000125
AFSK 1200	7,200,000	7,199,950	50	Sí	0.00000694
AX.25-SCS	7,200,000	7,199,800	200	Parcial	0.00002778

De acuerdo con los resultados, Soundmódem 100 demostró el mejor desempeño, con la tasa de bits errados más baja y confirmación constante de llegada de ACK, lo que garantiza una decodificación más precisa y estable. Por ello, se propone utilizarlo como la herramienta de decodificación para la aplicación final de monitoreo AIS, asegurando así la fiabilidad y eficiencia del sistema.

Análisis de los resultados

El sistema validado presenta como ventajas el costo reducido que se debe principalmente al uso de hardware accesible

y de bajo precio, como la Raspberry Pi 4, cuyo precio ronda entre 35 y 60 USD[21], y el dongle RTL2832U, que es un receptor SDR económico (alrededor de 20-30 USD)[22] ampliamente usado en proyectos AIS de bajo costo. El módem DIGI XTEND-PKG, aunque más especializado, ofrece una buena relación costo-beneficio para enlaces de largo alcance. En conjunto, el sistema es significativamente más económico que soluciones comerciales tradicionales que pueden costar miles de dólares.

El alcance garantizado de hasta 30 km representa una ventaja competitiva importante, ya que permite cubrir grandes áreas del puerto y sus accesos con un solo nodo de monitoreo, reduciendo la necesidad de múltiples estaciones receptoras o repetidores. Este rango es posible gracias a la potencia y sensibilidad del módem en la banda de 900 MHz, que supera ampliamente las limitaciones típicas de receptores AIS VHF convencionales y mejora la fiabilidad del enlace en entornos portuarios con obstáculos.

Proyectos similares basados en Raspberry Pi y SDR se han destacado por su bajo costo y flexibilidad, facilitando el monitoreo AIS en entornos con infraestructura limitada. Sin embargo, estos sistemas suelen estar limitados a distancias menores, típicamente por debajo de los 10 km, y su desempeño depende en gran medida de la calidad de la antena y las condiciones ambientales, lo que puede afectar la fiabilidad de la recepción. En contraste, la incorporación del módem amplía significativamente el rango operativo, alcanzando hasta 30 km, que es la distancia requerida para la preparación efectiva del puerto y la recepción oportuna de la información de los buques, según datos expresados por el cliente. Este alcance superior representa una ventaja clave, ya que permite un monitoreo más amplio con menor cantidad de nodos y reduce la dependencia de infraestructura adicional. Por otra parte, este sistema opera de forma independiente a la red, garantizando soberanía tecnológica y continuidad en la recepción de datos AIS. Esto es especialmente relevante en contextos donde las políticas internacionales limitan el acceso a servicios de Internet.

4. CONCLUSIONES

Se desarrolló un sistema transpondedor AIS autónomo, sin dependencia de conexión a internet, basado en estructuras de datos propias, mecanismos de transmisión segura y representación geográfica integrada. Esta arquitectura brinda soberanía tecnológica al evitar la dependencia de servicios externos y permite una significativa reducción en los costos de inversión y operación. El sistema es flexible y puede implementarse utilizando transceptores especializados, como el módem RF DIGI XTEND-PKG, junto con computadoras de placa reducida como Raspberry Pi 4 u ODRROID, lo que contribuye a mantener un bajo costo total sin sacrificar el desempeño. En conjunto, el sistema propuesto ofrece una solución escalable y económica para el monitoreo marítimo en entornos portuarios, garantizando cobertura hasta 30 km y precisión en la decodificación de señales AIS, lo que representa una ventaja frente a soluciones comerciales tradicionales.

Se recomienda la incorporación potencial de técnicas avanzadas de corrección de errores, como interlineado y códigos FEC (Forward Error Correction), que abre la posibilidad de construir sistemas aún más robustos frente a interferencias, ruido ambiental y otros efectos adversos en el canal de comunicación. Esto contribuiría a disminuir la tasa de error de bits (BER) durante la transmisión, mejorando la fiabilidad y calidad del enlace AIS.

REFERENCIAS

- [1] P. Bernabé, A. Gotlieb, B. Legeard, D. Marijan, F. O. Sem-Jacobsen and H. Spieker, "Detecting Intentional AIS Shutdown in Open Sea Maritime Surveillance Using Self-Supervised Deep Learning," in IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 25, no. 2, pp. 1166-1177, Feb. 2024, doi: 10.1109/TITS.2023.3322690.
- [2] M. Fujii, K. Yamashita, M. Urakami and N. Wakabayashi, "The study of simple navigation system for small craft using Class B AIS," OCEANS 2014 - TAIPEI, Taipei, Taiwan, 2014, pp. 1-4, doi: 10.1109/OCEANS-TAIPEI.2014.6964411.
- [3] M. M. Marques, D. Teles, V. Lobo and G. Capela, "Low-cost AIS Transponder using an SDR device," OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE, Seattle, WA, USA, 2019, pp. 1-4, doi: 10.23919/OCEANS40490.2019.8962863.
- [4] J. A. Larsen, H. P. Mortensen and J. D. Nielsen, "An SDR based AIS receiver for satellites," Proceedings of 5th International Conference on Recent Advances in Space Technologies - RAST2011, Istanbul, Turkey, 2011, pp. 526-531, doi: 10.1109/RAST.2011.5966893.
- [5] N. Hongyim, "Designing and Implementation Wildlife Tracking System Using APRS and AIS Protocol," 2019 5th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEAST.2019.8802541.

- [6] S. Khandker, H. Turtiainen, A. Costin and T. Hämäläinen, "Cybersecurity Attacks on Software Logic and Error Handling Within AIS Implementations: A Systematic Testing of Resilience," in IEEE Access, vol. 10, pp. 29493-29505, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3158943.
- [7] T. Shevgunov, "Software Analyzer of Spectral Correlation Functions Using a Low-Cost SDR Receiver," 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744365.
- [8] H. Jin, W. Yang, F. Yu and Z. Wang, "A novel EBG structure with spiral line bridges for radiation suppression in marine VHF band," in IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine, vol. 8, no. 4, pp. 56-61, 4th Quarter 2019, doi: 10.1109/MEMC.2019.8985600.
- [9] National Marine Electronics Association, "NMEA 0183 - Standard For Interfacing Marine Electronic Devices," NMEA 0183 Version 3.01, 2002.
- [10] Electronic Industries Alliance, "Interface Between Data Terminal Equipment and Data Circuit-Terminating Equipment Employing Serial Binary Data Interchange (RS-232C)," EIA/TIA-232-E, 1991.
- [11] Purnimaa G.K and D. G. Devi, "An analysis of SDL based interoperability and performance testing using CSMA protocol in wireless network," 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS), Coimbatore, India, 2015, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICIIECS.2015.7193148.
- [12] The Qt Company Ltd., "Qt Creator Manual," 2024. [Online]. Available: <https://doc.qt.io/qtcreator/>
- [13] Digi International, "XTend® 900 MHz RF Modems Product Datasheet," 2024
- [14] Raspberry Pi Ltd., "Raspberry Pi 4 Model B Product Brief," 2025.
- [15] Realtek Semiconductor Corp., "RTL2832U DVB-T COFDM Demodulator with USB Interface – Datasheet," Rev. 1.4, 2010.
- [16] Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG, "R&S®FPC1000 Spectrum Analyzer – Data Sheet," 2023.
- [17] T. Kagawa et al., "A study on latency-guaranteed multi-hop wireless communication system for control of robots and drones," 2017 20th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC), Bali, Indonesia, 2017, pp. 417-421, doi: 10.1109/WPMC.2017.8301849.
- [18] U.S. Navy, "Soundmodem 100 – Software Modem for Packet Radio," Version 1.0, 2018. [Software]
- [19] J. Pérez, "Demodular AFSK, desde cero," Electrónica y Ciencia, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://www.electronicayciencia.com/2017/10/demodular-afsk-desde-cero.html>.
- [20] J. A. Maguire Jr., "AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio," Amateur Radio, July 1998, pp. 2–45. [En línea]. Disponible: <https://www.ax25.net/AX25.2.2-Jul%2098-2.pdf>.
- [21] Xataka, "Raspberry Pi 4, características, precio y ficha técnica," 2025. [En línea]. Disponible: <https://www.xataka.com/ordenadores/raspberry-pi-4-caracteristicas-precio-ficha-tecnica>.
- [22] AliExpress, "Sintonizador Digital USB 2.0 TV Stick RTL2832U R828D SDR RTL," 2025. [En línea]. Disponible: <https://es.aliexpress.com/item/1005005278826467.html>.

SOBRE LOS AUTORES

Jorge H. Vázquez Leiva es ingeniero en Telecomunicaciones, graduado del Instituto Técnico Militar “José Martí” en el año 2015, optante al título académico de Máster en Automática en la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría”. Actualmente labora como Aspirante a Investigador en el CID MECATRONICS. ORCID: 0000-0002-7201-5514

Randy Mustelier Rivero es ingeniero en Informática, graduado del Instituto Técnico Militar “José Martí” en el año 2015. Actualmente labora como Investigador Agregado en el CID MECATRONICS. ORCID: 0000-0003-4897-1618.

Michel Buzón Tur es ingeniero en Ciencias Informáticas, graduado de la Universidad de Ciencias Informáticas (UCI) en el año 2009. Actualmente labora como Especialista principal y Jefe de Proyecto en la Empresa Tecnomática. ORCID: 0000-0003-2675-3476

Armando Estévez Alonso es ingeniero en Electrónica, graduado de la Universidad Tecnológica de la Habana “José Antonio Echeverría” en el año 1986. Actualmente labora como Director General de la empresa Tecnomática. ORCID: 0000-0003-2742-7752

CONFLICTO DE INTERESES

No existen conflictos de intereses de los autores ni de la institución en relación al contenido del artículo aquí reflejado.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- **Jorge Humberto Vázquez Leiva** participó en la conceptualización, preparación, creación y desarrollo del artículo, realizó el diseño del enlace inalámbrico y la implementación del controlador. Elaboró el protocolo de pruebas para validación del sistema y participó en su ejecución.
- **Randy Mustelier Rivero** participó en la conceptualización, preparación, creación y desarrollo del artículo. Participó en el diseño del enlace inalámbrico.
- **Michel Buzón Tur** participó en la implementación del controlador, en la revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo y aprobación de la versión final a publicar.
- **Armando Estévez Alonso** participó en la revisión crítica de cada una de las versiones del borrador del artículo. Participó en la etapa de validación y elaboración de la discusión de los resultados.

Esta revista provee acceso libre inmediato a su contenido bajo el principio de hacer disponible gratuitamente investigación al público. Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 Unported License. Se permite la copia y distribución de sus manuscritos por cualquier medio, siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores y no se haga uso comercial de las obras.

