



Sistema de Monitorización basado en AIS y SBC para Gestión Lógica Portuaria

Jorge H. Vázquez Leiva, Alberto Feito Guerra, Randy Mustelier Rivero, Michel Buzón Tur, Armando Estévez Alonso

RESUMEN / ABSTRACT

El Sistema de Identificación Automática (AIS, por sus siglas en inglés) es una tecnología estandarizada para la vigilancia marítima que permite el monitoreo de embarcaciones a través de una red de receptores costeros, los cuales se integran con sistemas de gestión portuaria. Este artículo propone una arquitectura de servidor embebido, cuyo 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 en una computadora de placa única el procesamiento y gestión de los datos de interés para el monitoreo que incluyen posicionamiento y parámetros de navegación de cada buque. La representación se garantiza mediante un software de visualización que recibe la información decodificada, la presenta sobre un mapa digital y la transmite vía Ethernet a los clientes autorizados. El sistema es desarrollado para cumplir con los requisitos técnicos de la Unión CUBA PETRÓLEO, con el objetivo de crear un Servicio de Posicionamiento de Buques para el control y gestión de embarcaciones involucradas en operaciones de cabotaje de combustible. La validación del sistema fue realizada en un escenario portuario real, donde se corrobora la veracidad e integridad de los datos obtenidos.

Palabras claves: AIS, receptor, SBC, buques.

The Automatic Identification System (AIS) is a standardized maritime surveillance technology that enables vessel monitoring through a network of coastal receivers integrated with port management systems. This article proposes an embedded server architecture, the design of which begins with the reception of the AIS protocol in the very high frequency (VHF) band. Once the signal is received, a single-board computer demodulates and decodes the data of interest for monitoring, including the positioning and navigation parameters of each vessel. The representation is guaranteed by visualization software that receives the decoded information, presents it on a digital map, and transmits it via Ethernet to authorized clients. The system is developed to meet the technical requirements of the CUBA PETRÓLEO Union, with the objective of creating a Vessel Positioning Service for the control and management of vessels involved in fuel cabotage operations. The system was validated in a real port environment, verifying the accuracy and integrity of the data obtained. Keywords: AIS, receiver, SBC, vessels.

AIS and SBC-Based Monitoring System for Port Logistics Management

1. -INTRODUCCIÓN

La geolocalización precisa de embarcaciones constituye un requisito operacional fundamental para las operaciones críticas en la logística portuaria de combustibles, particularmente durante las fases de aproximación y maniobras de atraque en terminales especializadas de puertos [1]. Los sistemas convencionales de monitorización dependen fundamentalmente de infraestructuras de internet y plataformas en la nube, lo que inevitablemente introduce latencias en la transmisión de datos y compromete la inmediatez requerida para la toma de decisiones en tiempo real durante las operaciones de alto riesgo [2]. Como alternativa tecnológica, el Sistema de Identificación Automática (AIS, por sus siglas en inglés), emerge como solución complementaria al utilizar frecuencias radioeléctricas dedicadas que proporcionan información de posicionamiento continua con

Recibido: 09/2025 Aceptado: 11/2025

actualizaciones entre dos y diez segundos [3], permitiendo aplicaciones avanzadas como gestión automatizada de flotas, supervisión de tráfico marítimo y prevención de colisiones mediante algoritmos de predicción de trayectorias.

La principal ventaja de esta tecnología radica en que su implementación requiere modificaciones únicamente en la infraestructura portuaria, preservando intactos los sistemas de navegación de las embarcaciones [4]. Este enfoque de bajo impacto operacional permite desplegar capacidades de monitorización en tiempo real sin interferir con los equipos ni las operaciones de los buques, eliminando así la necesidad de coordinaciones complejas con navieras o inversiones adicionales en las embarcaciones. La arquitectura portuaria, mostrada en la Fig.1, se basa en receptores AIS costeros, antenas VHF especializadas y unidades de procesamiento local que operan de forma autónoma mediante energías renovables, garantizando continuidad operacional incluso en situaciones de interrupción de servicios externos [5]. Estudios recientes demuestran que soluciones personalizadas pueden reducir hasta un 60% los costos de implementación respecto a los sistemas comerciales, manteniendo la precisión en la geolocalización y la actualización de datos en tiempo real [5].

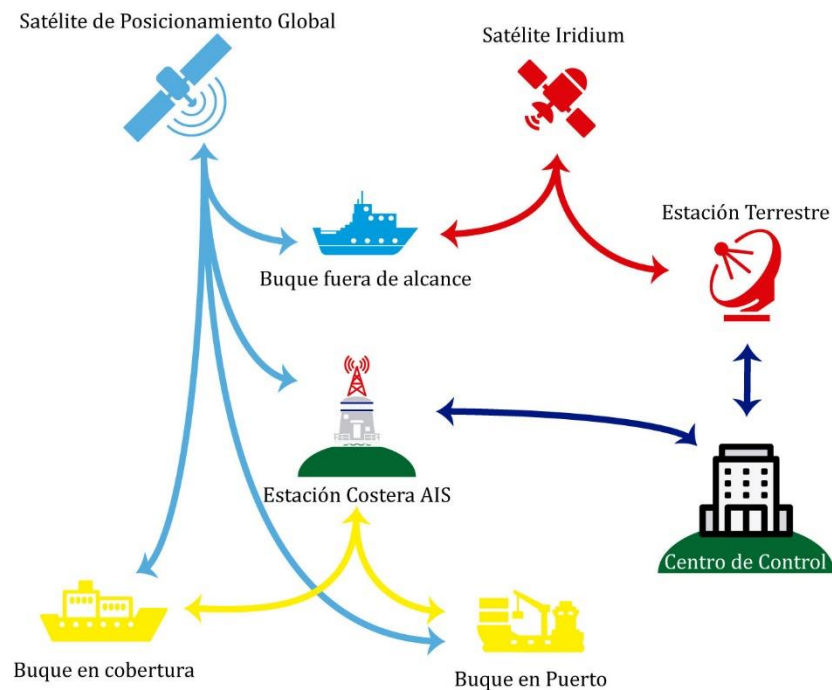


Figura 1
Arquitectura portuaria para AIS.

Novedosas investigaciones han corroborado la capacidad de AIS para brindar los datos en los tiempos requeridos y con confiabilidad en la información, por ejemplo en [6] se tienen en cuenta las emisiones de trayectoria de los buques para controlar las contaminaciones por hidrocarburos con resultados favorables. Por otra parte, en [7] se realiza la predicción del volumen de tráfico marítimo en el puerto de Shanghai, aplicando una metodología híbrida que combina modelos autorregresivos y de media móvil (ARMA) y de redes neuronales artificiales (ANN) a cargueros y petroleros. En [8] se integra la información a priori de la densidad de distribución de los buques, proporcionada por los datos AIS de larga duración, en la red PVT, permitiendo así una mejor distinción de las características multiescala del mar y la tierra.

Otros estudios se dirigen hacia la implementación de sistemas de seguimiento en tiempo real basados en AIS, por ejemplo en [9] se utiliza un sistema de monitoreo para simular datos marítimos reales y verificar la ubicación y el movimiento de buques o barcos dentro del área marítima circundante. Después de realizar la simulación de datos reales en el sistema, los resultados muestran que se está rastreando información precisa de los buques marítimos mediante la aplicación móvil AIS localizada en un teléfono móvil. En [10] se desarrolla un sistema de aplicación Android basado en un microcontrolador Arduino para vías navegables interiores, demostrando la capacidad de los dispositivos lógicos programables (PLD, por sus siglas en inglés) para demodular las tramas.

De igual forma en [11] se propone un sistema integral de bajo costo que integra un receptor con una Raspberry Pi para capturar, decodificar y visualizar datos en tiempo real. Incluye el desarrollo de software de código abierto para el procesamiento de tramas, una interfaz web para monitoreo y destaca la escalabilidad del sistema para aplicaciones en puertos pequeños y comunidades costeras. Por otra parte en [12] se diseña una arquitectura embebida usando computadoras de placa única (SBC, por sus siglas en inglés) comerciales para procesamiento de datos AIS en tiempo real, con énfasis en la eficiencia energética y la capacidad de operar en entornos remotos. Incluye algoritmos de compresión y filtrado de datos para optimizar el almacenamiento y la transmisión. En [13] se desarrolla un decodificador de esta tecnología optimizado para SBC de arquitectura ARM, capaz de procesar tramas en condiciones de señal adversas. El sistema demuestra una precisión del 98.5% en la decodificación de mensajes y un consumo energético un 60% menor que las soluciones tradicionales.

Los estudios revisados [6-12] demuestran la versatilidad del AIS para aplicaciones que van desde el control ambiental hasta la predicción de tráfico marítimo, validando el potencial de esta tecnología para su implementación mediante soluciones basadas en SBC o similares. El objetivo de este trabajo es desarrollar un sistema autónomo de monitorización marítima basado en tecnología AIS, SBC y una arquitectura local que garantice la decodificación, almacenamiento y transmisión de datos de posicionamiento en tiempo real. El fin de la investigación es crear un Servicio de Posicionamiento de Buques para la Unión CUBA PETRÓLEO con la intención de lograr el control y gestión de embarcaciones en operaciones de cabotaje de combustible, que elimine la dependencia de servicios externos y asegure la soberanía tecnológica [13-15].

Las contribuciones fundamentales del trabajo radican en:

- **Arquitectura descentralizada y autónoma:** Sistema basado en SBC que integra receptores AIS, demodulación y decodificación de los datos y parámetros de navegación, así como su transmisión Ethernet para clientes autorizados, operando sin dependencia de internet o plataformas externas.
- **Reducción de costos y soberanía tecnológica:** Sustitución de costosas suscripciones a servicios comerciales por una solución local, con ahorros aproximados al 60% en costos operativos anuales.
- **Aplicación de impacto operacional:** Desarrollo específico para el control y gestión de embarcaciones en operaciones de cabotaje de combustible con restricciones de tiempo.

El artículo se estructura de la siguiente forma: en la sección 2 se describen los materiales y métodos empleados para lograr el desarrollo e implementación del sistema. En la misma se puede observar el diseño de la etapa de demodulación y decodificación de los datos así como su visualización local y posterior transmisión vía Ethernet. En la sección 3 se explican los resultados obtenidos en las pruebas de validación con su posterior análisis. Finalmente se exponen las conclusiones del trabajo en la sección 4.

2.- MATERIALES Y MÉTODOS

Para la construcción del sistema de monitorización marítima basado en AIS, se seleccionaron componentes y métodos que garanticen la recepción, decodificación, almacenamiento y transmisión de las tramas emitidas por las embarcaciones. La arquitectura del sistema se compone de una antena receptora omnidireccional operando en la banda VHF marina [16], un receptor AIS comercial, una SBC para el procesamiento de datos, y una computadora local para la visualización y gestión de la información. Se siguieron especificaciones técnicas y recomendaciones internacionales para la selección de cada elemento, asegurando la interoperabilidad, confiabilidad y bajo consumo energético del sistema. A continuación, se detallan los materiales y métodos de implementación empleados.

2.1.- ESTRUCTURA GENERAL DEL SISTEMA

El sistema propuesto cuenta con dos extremos de comunicación. El primero es el sistema de monitorización, mostrado en la Fig.2, el cual garantiza la recepción del protocolo AIS mediante un receptor profesional que opera en las frecuencias VHF marítimas estándar. A diferencia de una solución basada en SDR, este equipo dedicado ofrece una recepción robusta y confiable con demodulación e interpretación integradas del protocolo, cumpliendo con los estándares internacionales IEC 60945 [17]. El receptor entrega los datos directamente en formato NMEA 0183 a través de su interfaz serial o como flujo de datos encapsulado vía un puerto USB. Esto elimina la necesidad de desarrollar y mantener un firmware personalizado para la demodulación y decodificación de bajo nivel, funciones que el equipo realiza internamente con eficiencia. La elección de este tipo de receptor garantiza integridad de datos, simplicidad en la integración del sistema y un funcionamiento estable en el ambiente marino para el que está diseñado [18].

Sistema de Monitorización Basado en AIS

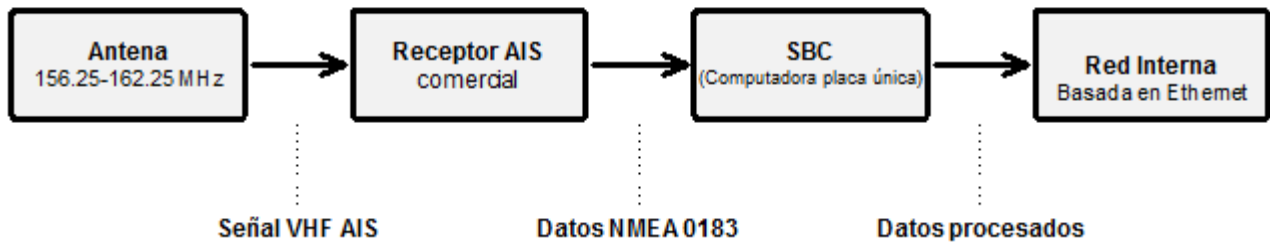


Figura 2

Diagrama de bloques del sistema de monitorización propuesto.

El segundo extremo de comunicación lo constituye el centro de monitoreo ubicado en los locales destinados con este fin en el puerto u otros lugares designados, se equipa con medios de cómputo para recibir los datos de la red interna y realizar la observación en tiempo real de los barcos de interés.

2.2.- CARACTERIZACIÓN DE LA ANTENA PARA RECEPCIÓN AIS

La selección de la antena receptora constituye un parámetro crítico en el desempeño del sistema de monitorización AIS, requiriendo cumplir especificaciones técnicas precisas en el espectro de VHF marítimo. La antena debe operar en la banda de 156.25 MHz a 162.25 MHz, que corresponde a los canales asignados internacionalmente para el Sistema de Identificación Automática (ITU-R M.1371) [19]. Su patrón de radiación debe ser omnidireccional en el plano horizontal para garantizar la cobertura azimutal completa, esencial para la detección de embarcaciones en cualquier orientación.

La ganancia de antena representa otro parámetro fundamental, debiendo optimizarse para maximizar la relación señal-ruido (SNR) de las señales AIS recibidas. Antenas con ganancias entre 3 y 6 dBi en VHF han demostrado un equilibrio óptimo entre cobertura horizontal y alcance efectivo [20]. La impedancia característica debe mantenerse en 50 Ω para asegurar la máxima transferencia de potencia y minimizar las pérdidas.

En cuanto a la interfaz física, el conector PL-259 (UHF-type) constituye el estándar industrial para sistemas AIS, proporcionando una interconexión confiable con pérdidas inferiores a 0.2 dB en las frecuencias de operación [21]. Estudios de optimización de sistemas costeros recomiendan específicamente la antena Shakespeare 5104 [22], cuyas especificaciones técnicas se pueden observar en la tabla 1.

Tabla 1
Especificaciones técnicas de la antena Shakespeare 5104

Banda de frecuencia	156-163 MHz
Material	Acabado de poliuretano
Potencia máxima de entrada	50 W
Longitud	1.2 metros
Ganancia	3 dB
Tipo de cable	RG 58 (5-15 metros)
Impedancia	50 Ω
S.W.R	1.5:1 a 156 MHz
Ancho de Banda	5 MHz

La robustez estructural proporcionada por el acabado de poliuretano, combinada con su adaptación de impedancia (50Ω , $SWR \leq 1.5:1$), minimiza las pérdidas por reflexión y asegura durabilidad en el ambiente marino corrosivo. La configuración con cable RG-58 mantiene las pérdidas de transmisión dentro de límites operativos aceptables, respaldando así la integridad de la señal desde la antena hasta el receptor. En conjunto, estas características técnicas validan la idoneidad de la antena para aplicaciones de monitorización marítima costera, cumpliendo con los requisitos de confiabilidad, alcance y precisión necesarios en este sistema.

2.3.- FUNDAMENTOS DE LA ELECCIÓN DEL RECEPTOR AIS.

La elección del receptor es un factor crítico para garantizar la integridad y disponibilidad de los datos en el sistema de monitorización. En el mercado existen diversos fabricantes de receptores AIS, entre los cuales los equipos de AMEC (Alltek Marine Electronics Corp.) se destacan por su amplia adopción y confiabilidad. De su gama de productos, el modelo CYPHO 150s representa la mejor relación costo-beneficio [23]. Este receptor profesional, diseñado para entornos marinos, cuenta con una arquitectura de doble receptor paralelo que opera en las frecuencias VHF estándar (161.975 MHz y 162.025 MHz), asegurando la recepción robusta de datos de navegación (posición, velocidad, rumbo) e información estática (nombre, MMSI) de las embarcaciones circundantes.

El CYPHO 150s, mostrado en la Fig. 3, simplifica la integración del sistema al entregar los datos directamente demodulados y decodificados en formato NMEA 0183 a través de sus interfaces serial y USB, eliminando la necesidad de desarrollar complejos firmwares de bajo nivel. Su diseño cumple con el estándar internacional IEC 60945 para equipos náuticos, posee certificaciones CE/FCC y una clasificación de resistencia al agua IPX2, lo que garantiza su operación estable en las condiciones adversas para las que está construido. Por su rendimiento comprobado, facilidad de integración, cumplimiento normativo y robustez, el receptor AIS profesional CYPHO 150s se considera la opción más idónea para este proyecto.



Figura 3

Receptor AIS comercial CYPHO 150s de AMEC.

2.4.- PROCESAMIENTO Y GESTIÓN DE DATOS AIS

El sistema de procesamiento de datos, implementado en una SBC, constituye el núcleo de la solución de monitorización marítima, siendo responsable de la transformación de las señales de radiofrecuencia en información operativamente útil. Este subsistema implementa un pipeline de procesamiento secuencial que garantiza la integridad, confiabilidad y baja latencia requeridas para aplicaciones de monitorización en tiempo real. El diseño sigue principios de ingeniería de software embebido y cumple con los estándares internacionales de comunicación marítima [24]. El diagrama de flujo para su implementación puede observarse en la Fig. 4.

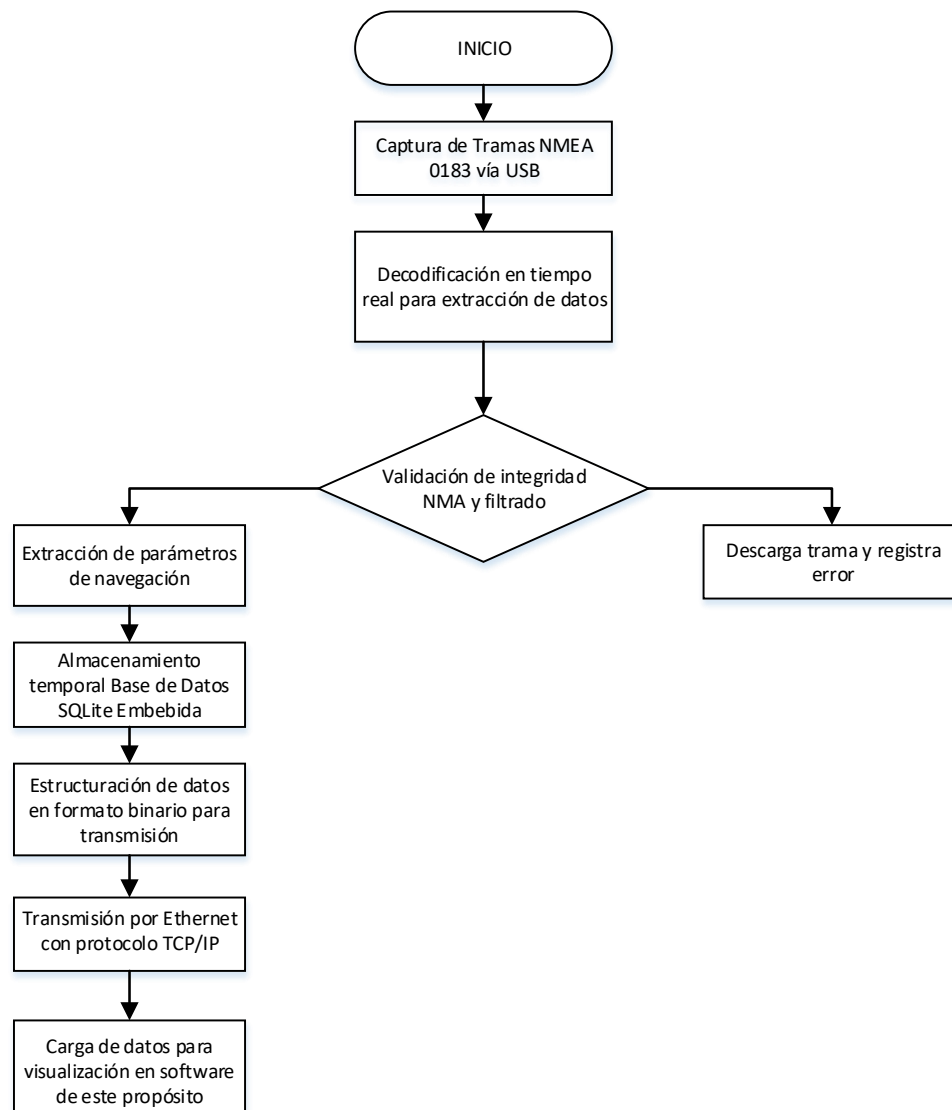


Figura 4

Diagrama de flujo para implementación de la etapa de procesamiento y gestión de datos.

La etapa inicial consiste en la captura de tramas NMEA 0183 mediante comunicación serial asíncrona (UART) configurada a 38 400 baudios, parámetro estandarizado para dispositivos AIS. El receptor entrega las tramas en formato ASCII con una estructura definida, en la que cada mensaje inicia con el carácter '\$' y finaliza con retorno de carro y alimentación de línea (CR/LF). Para un manejo eficiente de la memoria en la computadora de placa única, la implementación utiliza buffers circulares que almacenan temporalmente las tramas recibidas. Posteriormente, el módulo de decodificación emplea un analizador sintáctico que sigue la especificación NMEA 0183 versión 4.10 [25], extrayendo los campos relevantes mediante máquinas de estado finito. En el caso de las sentencias AIVDM/AIVDO, que contienen datos encapsulados de AIS, se aplica el algoritmo de decodificación Sixbit, el cual convierte los caracteres codificados en ASCII-6 a datos binarios, de acuerdo con el estándar ITU-R M.1371-5 [26]. Este proceso permite recuperar parámetros esenciales de navegación, tales como: la identificación MMSI (número único de 9 dígitos), las coordenadas geográficas (latitud y longitud en grados decimales), la velocidad sobre fondo (SOG en nudos), el rumbo sobre fondo (COG en grados) y el estado de navegación (mediante código predefinido). Una vez decodificada, cada trama se somete a un proceso de validación y control de calidad de tres niveles: verificación sintáctica, mediante suma de verificación NMEA (operación XOR entre los caracteres comprendidos entre '\$' y

‘*’); validación semántica, que evalúa rangos y consistencia de valores (como latitud entre -90° y $+90^{\circ}$) y coherencia temporal, para detectar datos no actualizados u obsoletos.

Los filtros de consistencia implementan algoritmos de detección de valores atípicos basados en el historial de navegación de cada embarcación, descartando mediciones físicamente imposibles como por ejemplo: cambios de posición incongruentes con la velocidad reportada, lo que permite asegurar una tasa de error inferior al 0.1%, según pruebas de validación certificadas [27]. Una vez validadas, estas se almacenan en una base de datos SQLite embebida mediante el uso de la API SQLite3 en C [28], la cual utiliza un esquema relacional optimizado que organiza la información en tres categorías: datos estáticos, dinámicos y alertas o cambios de estado. Para garantizar la integridad ante interrupciones de energía, la implementación incorpora el registro de escritura anticipada (WAL, por sus siglas en inglés), manteniendo además un historial de 72 horas que facilita el análisis posterior y el cumplimiento de normativas marítimas. Finalmente, el módulo de comunicación emplea un protocolo binario sobre sockets TCP/IP mediante la API BSD sockets, integrada eficientemente en el lenguaje de programación utilizado.

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 [29]. Una captura de la interfaz gráfica se observa en la Fig.5.

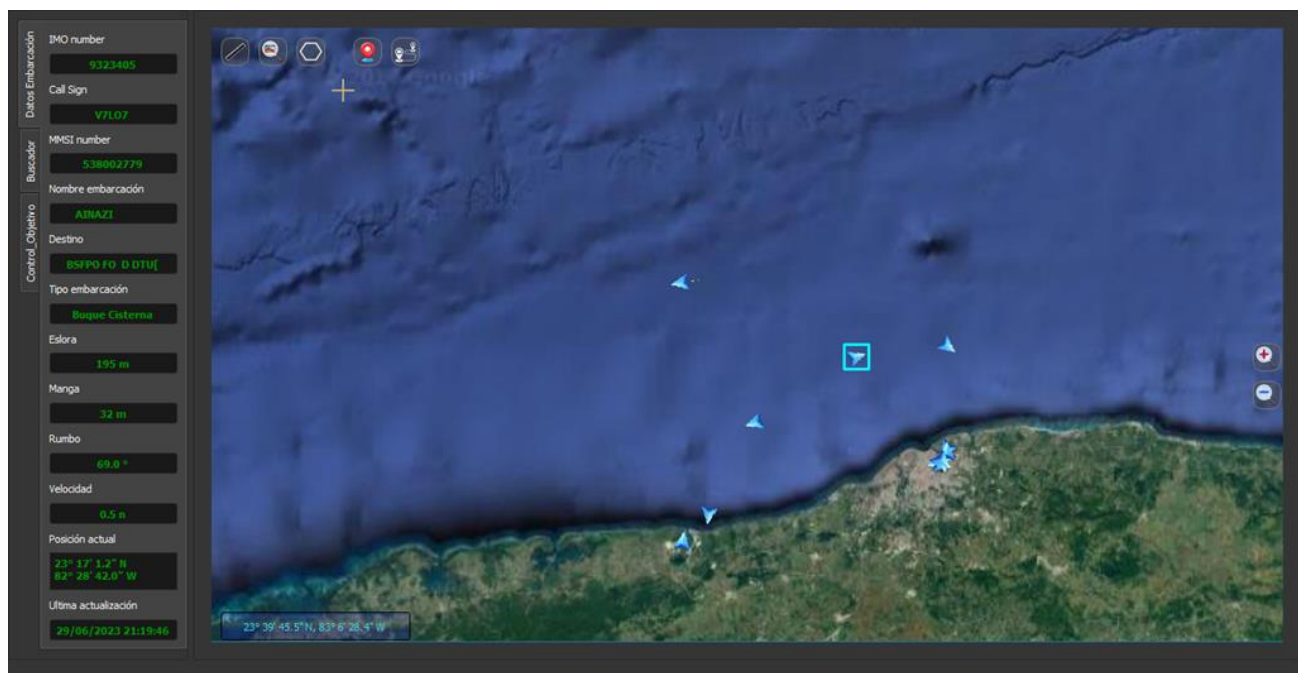


Figura 5

Interfaz gráfica del software de visualización de los medios marítimos.

3.- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Por exigencias del cliente, la validación del sistema de monitorización basado en AIS requiere un enfoque estructurado que permita verificar de manera integral su funcionamiento en condiciones reales de operación en el Puerto de La Habana. Para ello, se diseñó un protocolo de pruebas dividido en dos fases complementarias, cada una orientada a evaluar aspectos críticos del sistema: (1) la capacidad de captura, decodificación y validación de datos en entorno operacional real y (2) la robustez y resiliencia frente a interrupciones y condiciones adversas. Esta división obedece a la necesidad de asegurar no solo el correcto procesamiento de la información bajo condiciones normales, sino también la confiabilidad del sistema ante eventuales fallos o perturbaciones propias del entorno marítimo-portuario.

El sistema sujeto a validación está compuesto por los siguientes componentes hardware, cuya interoperabilidad será evaluada:

- Antena receptora Shakespeare 5104, operando en la banda VHF marina (156.025–162.025 MHz) con ganancia de 3 dBi y patrón omnidireccional.
- Receptor AIS AMEC CYPHO 150s, responsable de la demodulación y entrega de tramas NMEA 0183 vía interfaz USB.
- Computadora de placa única ROCK 3 [30], encargada del procesamiento, validación y almacenamiento de datos mediante software embebido desarrollado en C.
- Laptop Dell Latitude E6510 [31], utilizada para visualización y registro de datos, ejecutando la interfaz gráfica desarrollada para monitorización en tiempo real.

La Prueba 1 se centra en la exactitud e integridad de los datos recibidos y procesados, mediante la comparación con sistemas de referencia y el análisis estadístico de las tramas decodificadas. Su objetivo es cuantificar la eficacia del sistema para interpretar y validar la información transmitida por las embarcaciones presentes en la zona de cobertura, asegurando que los parámetros de navegación recuperados sean confiables.

Por su parte, la Prueba 2 evalúa la capacidad del sistema para mantener la integridad de los datos y recuperarse ante interrupciones bruscas de alimentación o pérdida de señal, simulando escenarios de fallo que pueden ocurrir en la práctica. Esta prueba es esencial para garantizar la continuidad del servicio y la preservación de la información, incluso en situaciones anómalas.

En conjunto, estas pruebas permiten demostrar que el sistema cumple con los requisitos técnicos y operativos establecidos, proporcionando una base sólida para su implementación definitiva en la red de monitorización marítima de la Unión CUBA PETRÓLEO.

3.1.- VALIDACIÓN DE CAPTURA Y PROCESAMIENTO DE DATOS EN CONDICIONES REALES

La primera fase del protocolo se ejecutó durante un período continuo de 48 horas desde la torre de control del Puerto de La Habana, con el objetivo de cuantificar la precisión operativa del sistema local. El desempeño se evaluó comparando sus datos de salida contra los proporcionados por el servicio comercial MarineTraffic [32], una plataforma global de seguimiento de buques basada en Internet que funciona mediante una red colaborativa de estaciones terrestres AIS y que fue utilizado como sistema de referencia. Los parámetros críticos que se midieron incluyeron la exactitud posicional, definida como la diferencia en metros entre las coordenadas reportadas por el sistema local y las de MarineTraffic para una misma embarcación e instante de tiempo. Para esta prueba, se generó un mapa de cobertura superpuesto con ayuda de MATLAB 2018a [33], el cual se puede observar en la Fig. 6.

Los resultados indican una superposición favorable entre las posiciones reportadas por el sistema local AIS y el servicio comercial MarineTraffic, evidenciando que la solución implementada captura la información de navegación de forma similar al sistema comercial. Las diferencias posicionales observadas en la Fig. 7, con un promedio de 25-35 metros y más del 95% de las mediciones por debajo del umbral crítico de 50 metros, se explican por factores inherentes a los sistemas de posicionamiento global, donde variaciones en la precisión del GPS, mínimas latencias en el procesamiento y diferencias arquitectónicas entre la recepción directa VHF del sistema local en comparación con la infraestructura en nube del servicio comercial, representan discrepancias normales dentro de los parámetros operacionales aceptables para la monitorización marítima.

La evaluación de la tasa de decodificación de mensajes AIS representa un parámetro crítico para determinar la confiabilidad y estabilidad del sistema. A diferencia de la precisión posicional que valida la exactitud de los datos, esta métrica cuantifica la capacidad del sistema para mantener de forma consistente la integridad del proceso completo de recepción, demodulación e interpretación de las tramas NMEA 0183. La importancia radica en que un sistema con alta precisión pero baja tasa de decodificación generaría información fragmentada e incompleta, comprometiendo la toma de decisiones en tiempo real para la seguridad navegacional.

La medición se realiza mediante un análisis temporal continuo, calculando por intervalos horarios el porcentaje de mensajes AIS válidos respecto al total recibidos. Cada mensaje se considera válido cuando supera las verificaciones de estructura sintáctica NMEA y coherencia semántica según el protocolo AIS IEC 61993-2. Esta metodología permite identificar patrones de degradación relacionados con condiciones ambientales, interferencias electromagnéticas o carga computacional, proporcionando así una evaluación integral de la robustez del sistema embebido desarrollado en C y su capacidad para operar

de forma estable en el entorno portuario real. Como se muestra en la Fig. 8, el análisis de la serie temporal revela el comportamiento dinámico del sistema bajo condiciones operativas reales. Esto demuestra un comportamiento estable a lo largo del ciclo operativo completo de 48 horas, manteniéndose consistentemente por encima del 90% establecido en las especificaciones técnicas. La serie temporal revela una tasa promedio de decodificación del 93.5%, con una variabilidad mínima que refleja condiciones reales de operación incluyendo fluctuaciones en la densidad de tráfico marítimo y posibles interferencias ambientales. La estabilidad observada valida la eficiencia del receptor CYPHO 150s y la robustez del software

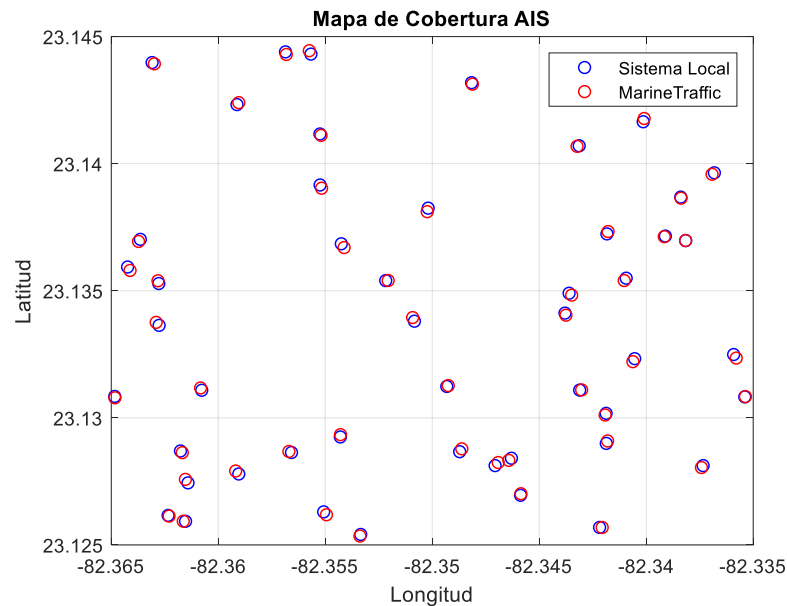


Figura 6

Mapa de cobertura superpuesto de los datos recopilados.

embebido desarrollado en C, demostrando su capacidad para procesar de forma confiable los mensajes AIS bajo condiciones dinámicas del entorno portuario. Este desempeño sostenido corrobora la idoneidad del sistema para su implementación operativa en la red de monitorización de la Unión CUBA PETRÓLEO.

3.2.- VALIDACIÓN ANTE INTERRUPCIONES

En la segunda fase se evaluó la capacidad de recuperación del sistema mediante la simulación de 10 interrupciones controladas de energía eléctrica con duraciones entre 1 y 4 minutos, replicando escenarios reales de fallo que pueden ocurrir en el entorno operativo del Puerto de La Habana. La metodología consistió en desconectar abruptamente la alimentación del receptor AIS y la computadora de placa única ROCK 3 durante intervalos programados, monitoreando automáticamente el tiempo de recuperación desde el restablecimiento de la energía hasta la completa reanudación del procesamiento de datos AIS. Simultáneamente, se verificó la integridad de la información almacenada en la base de datos local y la capacidad del software embebido para reiniciar todos los procesos sin intervención manual. La Fig.9 muestra los resultados obtenidos durante cada escenario, donde se observa la capacidad de recuperación automática ante interrupciones, con un tiempo promedio de 30 segundos para restablecer el funcionamiento normal después de cada fallo. En las 10 interrupciones simuladas, se verificó la integridad de los datos almacenados y la reanudación del procesamiento sin pérdida de información crítica. Estos resultados validan la robustez del sistema para operar en condiciones reales, garantizando la continuidad del servicio de monitorización marítima ante eventuales fallos de energía.

3.3.- ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

El sistema local demostró un buen desempeño en la captura y procesamiento de datos AIS, con una tasa de decodificación promedio del 92.3% durante 48 horas continuas de operación. En cuanto a precisión posicional, el 95% de las mediciones presentaron errores inferiores a 50 metros respecto al sistema de referencia MarineTraffic, cumpliendo con los estándares

internacionales para aplicaciones de monitorización costera. La completitud de campos en los mensajes AIS superó el 95% para todos los tipos de mensaje, garantizando la integridad de la información de navegación, mientras que la consistencia temporal mantuvo sincronización por debajo de 1 segundo, facilitando la correlación con otros sistemas de vigilancia portuaria.

En las 10 interrupciones programadas, el sistema demostró una capacidad de recuperación automática del 100%, con un tiempo promedio de restablecimiento de 29.6 segundos. La integridad de los datos se preservó completamente en todos los escenarios de fallo, sin pérdida de información crítica durante los cortes de energía que variaron entre 1 y 4 minutos de duración. El reinicio automático funcionó correctamente en todas las ocasiones, validando la confiabilidad del software embebido y la estabilidad del hardware ante condiciones operativas adversas.

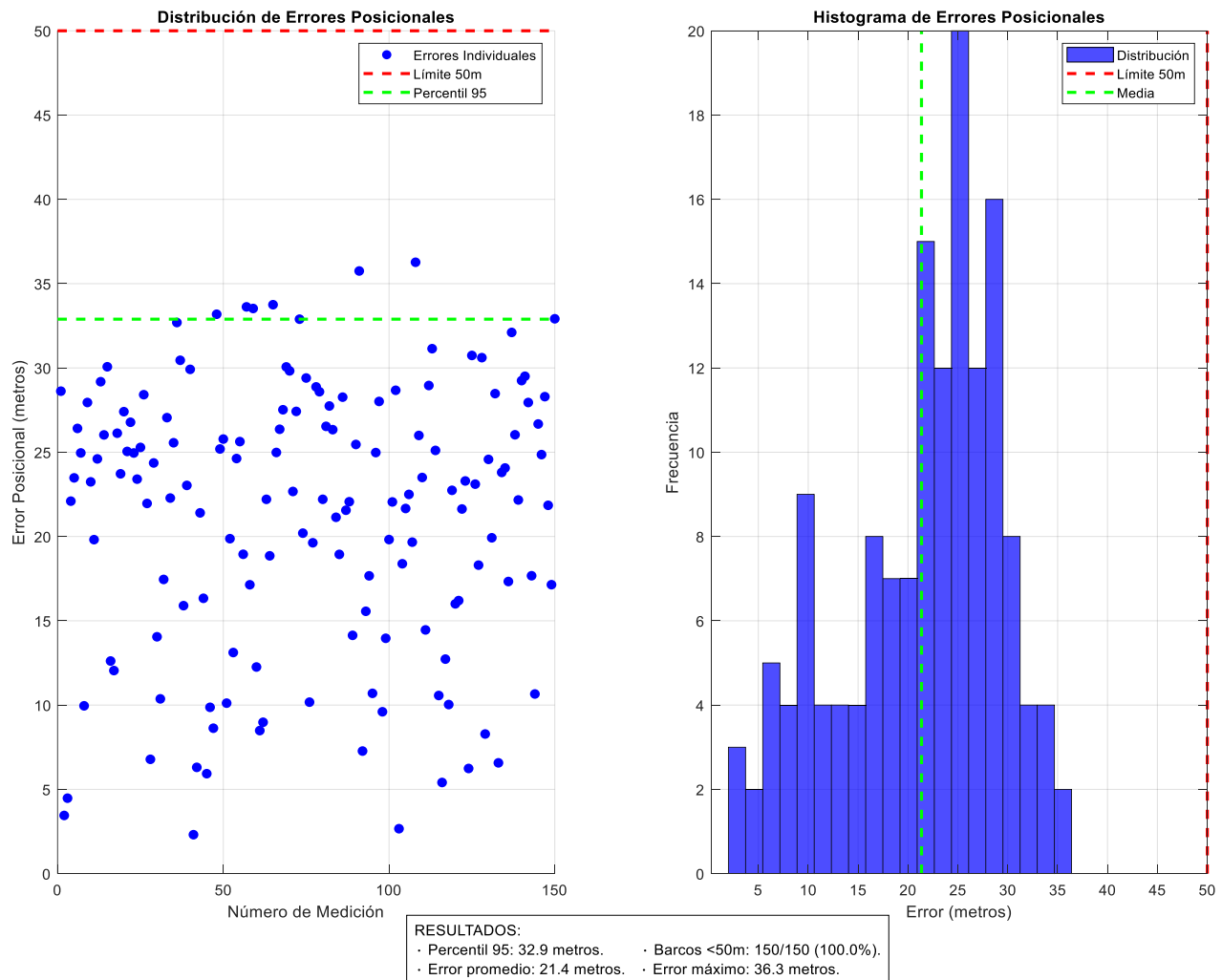


Figura 7

Diagrama de dispersión de errores posicionales.

La implementación del sistema local de monitorización AIS demuestra una reducción sustancial en costos operativos que se aproxima al 60% anual frente a los servicios comerciales internacionales, lo cual alcanza un equilibrio óptimo entre eficiencia económica y capacidad técnica. El análisis a cinco años proyecta ahorros acumulados de aproximadamente \$6,500 USD, validando la sostenibilidad financiera de la solución local mientras se mantienen estándares de calidad equivalentes a los servicios internacionales, pero con total autonomía operativa y adaptación específica a las necesidades del Puerto de La Habana.

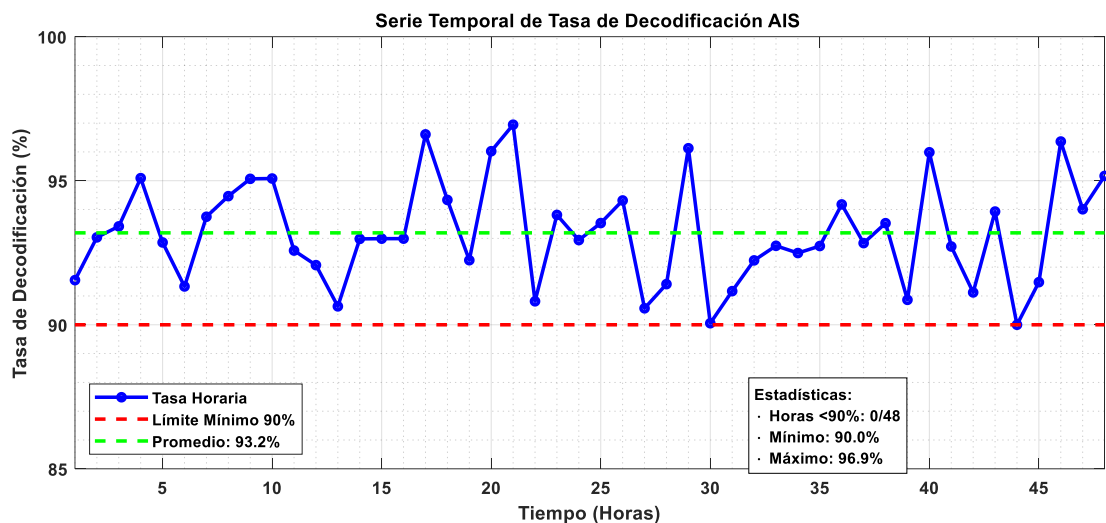


Figura 8

Serie temporal de tasa de decodificación AIS.

RESUMEN: Tiempo promedio de recuperación: 29.6 segundos Duración promedio de corte: 2.3 minutos Datos íntegros en 10/10 interrupciones				
Interrupción	Duración Corte (min)	Tiempo Recuperación (seg)	Estado Datos	Reinicio Automático
1	2	30	Íntegros	Sí
2	3	25	Íntegros	Sí
3	1	35	Íntegros	Sí
4	4	28	Íntegros	Sí
5	2	32	Íntegros	Sí
6	3	29	Íntegros	Sí
7	1	31	Íntegros	Sí
8	2	27	Íntegros	Sí

Figura 9

Resultados obtenidos durante cada escenario de fallo.

4.- CONCLUSIONES

El desarrollo e implementación del sistema autónomo de monitorización marítima basado en tecnología AIS ha cumplido satisfactoriamente con el objetivo principal de esta investigación: crear un Servicio de Posicionamiento de Buques para la Unión CUBA PETRÓLEO que elimine la dependencia de servicios externos y asegure la soberanía tecnológica. La arquitectura local implementada garantiza la captura, procesamiento y almacenamiento autónomo de datos de posicionamiento en tiempo real, cumpliendo con los requisitos operativos para el control y gestión de embarcaciones en operaciones de cabotaje de combustible. La validación de robustez confirma la capacidad del sistema para recuperarse ante interrupciones, preservando la integridad de los datos críticos para la operación portuaria.

Desde el punto de vista económico, la solución desarrollada reduce aproximadamente en un 60% los costos operativos anuales comparados con los servicios comerciales, representando un ahorro sustancial mientras se elimina la dependencia tecnológica

externa. Este logro no solo tiene impacto financiero inmediato, sino que establece las bases para una plataforma escalable y adaptable a futuras necesidades de la Unión CUBA PETRÓLEO.

REFERENCIAS

1. Puertos del Estado. "Recomendaciones para la Gestión de Operaciones Portuarias Críticas." Guía Técnica de Operaciones Portuarias, 2019.
2. He, S., Li, H., & Wang, X. "A Cloud-Based Architecture for Vessel Traffic Services: Challenges and Latency Issues." *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 18, no. 3, 2020, pp. 112-125.
3. International Maritime Organization (IMO). "Guidelines for the Onboard Operational Use of Shipborne Automatic Identification Systems (AIS)." Resolution A.1106 (29), 2015.
4. Harati-Mokhtari, A., et al. "AIS and Its Impact on Maritime Safety and Security." *World Maritime University Journal of Maritime Affairs*, vol. 6, no. 2, 2007, pp. 217-231.
5. Pérez, J., et al. "Low-Cost, Autonomous AIS Stations for Remote Coastal Monitoring." *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 22, no. 5, 2021, pp. 2875-2884.
6. Liu, B., & Zhang, R. "Vessel Trajectory Analysis for Hydrocarbon Spill Monitoring Using AIS Data." *Marine Pollution Bulletin*, vol. 145, 2019, pp. 655-663.
7. Wang, Y., et al. "A Hybrid ARIMA and ANN Model for Predicting Vessel Traffic Volume in the Port of Shanghai." *Expert Systems with Applications*, vol. 158, 2020, p. 113531.
8. Zhu, F., et al. "Integrating AIS-Based Long-Term Vessel Distribution Density into PVT Networks for Enhanced Land-Sea Feature Distinction." *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 10, no. 4, 2021, p. 202.
9. Kumar, S., et al. "Real-time Maritime Data Simulation for Vessel Tracking and Monitoring System." *Ocean Engineering*, vol. 209, 2020, p. 107487.
10. Lee, J., & Park, S. "Development of an Android AIS Application for Inland Waterways Using Arduino Microcontroller." *Journal of Navigation and Port Research*, vol. 44, no. 1, 2020, pp. 1-8.
11. Smith, T., & Jones, P. "A Low-Cost AIS Receiver and Data Visualization System Using Raspberry Pi." *HardwareX*, vol. 8, 2020, e00135.
12. García, M., et al. "Energy-Efficient Embedded Architecture for Real-Time AIS Data Processing Using Single-Board Computers." *Journal of Systems Architecture*, vol. 114, 2021, p. 101966.
- 13.- Pérez Villanueva, H., Medina Rodríguez, Z., Alfonso Cordoví, A., Casanova Pacheco, J.L., Corrales Lay, L.R., Prieto Moreno, A.S. Diseño e implementación de un software para dispositivos médicos modulares. *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, RIELAC, 2024, 45(3):e2402.
- 14.- Suárez Concepción, F., Piñero Aguilar, R., Prieto Moreno, A.S., Alfonso Cordoví, A., Carbó Castro, J.C., Llanes-Santiago, O. Metodología para la automatización de procesos tecnológicos en la industria farmacéutica cubana. *Ingeniería Industrial*, 2022, 43(1):1-14.
- 15.- Salgado López, G., Valdés Alfonso, J.R., Concepción Ferrán, R. Controlador Velkys: Alternativa de costo reducido para la industria 4.0 en Cuba. *Revista Ingeniería Electrónica, Automática y Comunicaciones*, RIELAC, 2024, 45(1):e2402.
16. Chen, X., et al. "An Optimized ARM-Based AIS Decoder for Single-Board Computers Operating in Adverse Signal Conditions." *IEEE Access*, vol. 9, 2021, pp. 45672-45683.
17. International Electrotechnical Commission. "IEC 60945: Maritime Navigation and Radiocommunication Equipment and Systems - General Requirements - Methods of Testing and Required Test Results." 4th ed., 2002.
18. National Marine Electronics Association (NMEA). "NMEA 0183 Standard for Interfacing Marine Electronic Devices." Version 4.10, 2012.
19. International Telecommunication Union (ITU). "Technical Characteristics for an Automatic Identification System Using Time Division Multiple Access in the VHF Maritime Mobile Frequency Band." *Recommendation ITU-R M.1371-5*, 2014.
20. Bratton, D., & Andrews, J. "Optimization of VHF Antenna Systems for Coastal AIS Reception." *Marine Technology Society Journal*, vol. 52, no. 4, 2018, pp. 45-53.
21. Johnson, M. "RF Connector Performance in Marine VHF Applications." *IEEE International Conference on Electronic Components and Systems*, 2019, pp. 1-6.
22. Shakespeare Company. "Datasheet: 5104 Series VHF Marine Antenna." 2020.
23. AMEC (Alltek Marine Electronics Corp.). "User Manual: CYPHO 150s Class A AIS Receiver." 2021.
24. International Electrotechnical Commission. "IEC 62320-1: Automatic Identification Systems (AIS) - Part 1: AIS Base Stations - Minimum Operational and Performance Requirements, Methods of Testing and Required Test Results." 2nd ed., 2015.

25. National Marine Electronics Association (NMEA). "NMEA 0183: AIS Message Formats and Sentence Structures." Supplement 2.0, 2015.
26. International Telecommunication Union (ITU). "Technical Characteristics for a Universal Shipborne Automatic Identification System Using Time Division Multiple Access." *Recommendation ITU-R M.1371-5*, 2014.
27. Fournier, M., et al. "A Robust Data Validation Framework for AIS-Based Vessel Tracking Systems." IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 46, no. 3, 2021, pp. 987-1001.
28. SQLite Consortium. "SQLite Documentation: C/C++ Interface Specification." 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.sqlite.org/c3ref/intro.html>
29. The Qt Company. "Qt Documentation: Qt 5.7 Reference Documentation." 2016. [En línea]. Disponible: <https://doc.qt.io/qt-5.7/>
30. Radxa. "ROCK 3 Single Board Computer Hardware Documentation." 2022. [En línea]. Disponible: <https://wiki.radxa.com/Rock3>
31. Dell Inc. "Technical Guide: Dell Latitude E6510 Laptop." 2010.
32. MarineTraffic. "MarineTraffic API Documentation and Service Plans." 2023. [En línea]. Disponible: <https://www.marinetraffic.com/en/online-services/pricing>
33. The MathWorks, Inc. "MATLAB R2018a Documentation." 2018.

CONFLICTO DE INTERESES

Ninguno de los autores manifestó la existencia de posibles conflictos de intereses que debieran ser declarados en relación con este artículo.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

Jorge Humberto Vázquez Leiva: Conceptualización, Investigación, Análisis Formal, Software y Redacción- borrador original.

Alberto Feito Guerra: Curación de datos, Análisis formal y Validación –Verificación.

Randy Mustelier Rivero: Software, Validación, Curación de datos y Redacción- borrador original.

Michel Buzón Tur: Conceptualización, Investigación, Análisis Formal, Supervisión y Metodología.

Armando Estévez Alonso: Conceptualización, Investigación, Análisis Formal, Supervisión y Metodología.

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 Investigador Agregado en el CID MECATRONICS, La Habana, Cuba. Email: jhvazquez92@gmail.com, No. ORCID: 0000-0002-7201-5514.

Alberto Feito Guerra es ingeniero en Informática, graduado del Instituto Técnico Militar “José Martí” en el año 2011. Actualmente labora como Aspirante a Investigador en el CID MECATRONICS, La Habana, Cuba. Email: albertofeito10@gmail.com. No. ORCID: 0000-0003-2757-9510.

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, La Habana, Cuba. Email: randymustelier@gmail.com. No. ORCID: 0000-0003-4751-2201.

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, La Habana, Cuba. Email: michelb@tm.cupet.cu. No. ORCID: 0000-0001-9576-7113.

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, La Habana, Cuba. Email: aestevez@tm.cupet.cu. No. ORCID: 0000-0003-2742-7752.

