

Trabajo completo

23. Tecnologías de la información y comunicación.

Implementación de un transmisor AIS de bajo costo basado en SDR

Autor: Pirri, Máximo; mpirri@fing.edu.uy

Co-autora: García, Romina; rominag@fing.edu.uy

Orientadores: Belcredi, Gonzalo; gbelcredi@fing.edu.uy,

Rattaro, Claudina; crattaro@fing.edu.uy

Universidad de la República, Facultad de Ingeniería, Instituto de Ingeniería Eléctrica

Resumen

El sistema de identificación automática (AIS) es una tecnología que tiene como principal función transmitir información de embarcaciones. Este sistema es de suma importancia para evitar colisiones, para localización de embarcaciones, entre otros. Los barcos de gran porte tienen obligatoriedad de utilizar un sistema de este tipo. Distinta es la situación de los barcos pequeños que no tienen esta obligación. Son claras las ventajas que trae la utilización de este tipo de tecnología. Sin embargo, los equipos disponibles en plaza resultan costosos para barcos pequeños, en particular en Uruguay.

En el marco del proyecto de fin de carrera de Ingeniería en Sistemas de Comunicación, se plantea un proyecto que tiene como objetivo la implementación de un transmisor AIS de bajo costo basado en SDR. El proyecto seguirá lo establecido en la norma ITU-R M.1371-5. Se evaluará un diseño de hardware con componentes de bajo costo para desarrollar un prototipo del transmisor. Además, se estudiarán la generación y codificación de mensajes, y se hará foco en el mecanismo de acceso al medio a utilizarse.

La norma ITU-R M.1371-5 describe dos mecanismos para el acceso al medio para estaciones AIS: SOTDMA y CSTDMA. En el trabajo se describen las consideraciones asociadas a la elección de un mecanismo de acceso al medio, las simulaciones y los resultados obtenidos, permitiendo concluir en la utilización del esquema CSTDMA para el desarrollo del proyecto.

Las simulaciones indican que la estación CSTDMA puede transmitir de forma correcta mientras existe un número menor a 160 embarcaciones de tipo SOTDMA. Se tiene que una estación que implemente el mecanismo de acceso CSTDMA funcionará de manera adecuada incluso en la situación de mayor concentración de naves en Uruguay.

Palabras clave: transmisor, acceso al medio, embarcaciones.

Introducción

Las comunicaciones marítimas han sido un tema de suma relevancia durante el desarrollo del último siglo. Desde el hundimiento del Titanic, que contaba con un telégrafo a través del cual se le avisó de la presencia de hielo en las cercanías (pero cuyo operador estaba muy ocupado enviando otros telegramas para prestar atención al aviso) [1], hasta las comunicaciones entre las flotas de los ejércitos durante la Segunda Guerra Mundial (aplicando técnicas de encriptación para que no fueran interceptadas por el enemigo) [2], la seguridad marina ha dependido de conexiones con otras personas (en tierra o en alta mar). Entre las primeras tecnologías definidas con el principal objetivo de asegurar el desarrollo de travesías marinas, se encuentra el radar [3]. El principio de funcionamiento del mismo consiste en enviar señales de radiofrecuencia en todas las direcciones, y detectar los rebotes de esas señales. En función de desde qué direcciones se obtiene una señal de rebote, y la intensidad de la misma, es posible

generar un mapeo de los alrededores, y determinar si existen o no objetos cercanos, y a qué distancia aproximada se encuentran. Estos sistemas permitieron conocer la presencia de embarcaciones dentro de cierto rango, algunas veces previo a poder visualizar dichas naves en el horizonte¹. Sin embargo, el radar no permite saber con seguridad qué objetos se identificaron, tampoco funciona de forma correcta si no se tiene línea de vista con el objeto. La búsqueda por desarrollar tecnologías que mejoraran la seguridad en el mar tuvo un hito significativo en el comienzo del siglo XXI, cuando se introdujo la tecnología Automatic Identification System (AIS).

La tecnología AIS permite a las embarcaciones comunicarse entre sí, o con estaciones en tierra firme. La principal característica de este sistema es la transmisión por defecto de información básica de cada estación: posición, velocidad y dirección de navegación. A partir de estos mensajes, todas las embarcaciones tienen

¹ Por ejemplo, en casos de condiciones climáticas extremas.

acceso a un mapeo de las estaciones cercanas, su tipo e identificación, y sus características de movimiento. La utilización de canales de radiofrecuencia en la banda de Very High Frequency (VHF) hace que AIS supere de forma significativa el rendimiento de los radares, ya que no es necesario tener línea de vista con las embarcaciones para tener conocimiento de su presencia. Además, los alcances de las ondas de radiofrecuencia son mucho mayores a los alcances del radar, obteniendo información de embarcaciones hasta 50 km a la redonda².

La introducción de AIS, definido a partir de la norma ITU-R M.1371-5 de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) [4], generó un impacto significativo dentro del área de las comunicaciones marinas. Actualmente es obligatorio para todas las embarcaciones de gran porte contar con un sistema AIS que cumpla los estándares definidos en la norma. Sin embargo, la situación es distinta para embarcaciones pequeñas, como barcos pesqueros o de recreación. En Uruguay no es obligatorio que estas embarcaciones de pequeño porte cuenten con un sistema AIS. Debido a los costos elevados de dichos transceptores, casi ninguna embarcación pequeña tiene el sistema incorporado.

² Este rango de alcance depende de la potencia de transmisión de las señales, que varía entre los tipos de estaciones AIS.

Este trabajo forma parte de la investigación realizada para un proyecto de fin de carrera de Ingeniería en Sistemas de Comunicación, cuyo objetivo es implementar un transmisor AIS de bajo costo basado en tecnología de Software Defined Radio (SDR). El foco de la primera parte del proyecto está en definir el mecanismo de acceso al medio que utilizará la estación AIS móvil a implementar. En la norma ITU-R M.1371-5 se describen dos mecanismos de acceso al medio: Self-Organized Time Division Multiple Access (SOTDMA) y Carrier-Sense Time Division Multiple Access (CSTDMA). En este documento se describe el proceso realizado para definir cuál de los dos mecanismos de acceso al medio es el adecuado para el transmisor AIS a implementar. En particular, se detallan investigaciones iniciales, simulaciones creadas y resultados de las mismas.

El presente trabajo se estructura de la siguiente manera. En la sección de Objetivos se describen con un poco más de detalle los objetivos de la investigación. La sección Materiales y métodos introduce los dos mecanismos de acceso al medio considerados. Además, describe el proceso asociado a la generación de simulaciones propias de un canal con presencia de estaciones AIS. En la sección Resultados y discusión se presentan los resultados de las simulaciones, y se comparan los mismos

con datos obtenidos de fuentes oficiales de prefectura marítima de nuestro país.

Finalmente, en la sección de Conclusiones se concluye el trabajo, se reflexiona sobre los resultados del mismo y se plantean algunas líneas de trabajo a futuro. Se agregan también al final del documento una sección con la bibliografía consultada, así como una con los agradecimientos correspondientes.

Objetivos

Se presentan en esta sección los objetivos de este trabajo.

Un primer objetivo consiste en realizar un estudio completo y en detalle de la norma ITU-R M.1371-5, con foco en los mecanismos de acceso descritos en la misma: SOTDMA y CSTDMA. Se busca entender su funcionamiento, así como las principales ventajas y desventajas de cada uno. Una vez se comprendan los mecanismos de acceso al medio, se buscarán investigaciones previas que presenten resultados del desempeño de los mismos. Se complementará el trabajo con la creación de simulaciones propias de un canal con presencia de embarcaciones que implementen ambos mecanismos. El objetivo principal de esta investigación es determinar cuál estrategia es más conveniente para el transmisor a implementar.

Este objetivo se enmarca dentro de un proyecto de mayor alcance, que busca la implementación de un sistema transmisor AIS. El objetivo resaltado es el primer objetivo del proyecto integrador, que necesita de la decisión de qué mecanismo de acceso al medio utilizar para su desarrollo.

Materiales y Métodos

Esta sección presenta el fundamento teórico necesario para el desarrollo de la investigación, y luego detalla la metodología seguida para el mismo.

Fundamento teórico

Los sistemas AIS transmiten, como fue previamente mencionado, información de posición, velocidad y dirección del movimiento, entre otros parámetros. Los mensajes que contienen estas tres características principales del movimiento de la embarcación se transmiten de forma periódica. El intervalo de repetición de los mensajes depende del tipo de embarcación (de gran porte, usualmente denominadas “clase A”, o de pequeño porte, “clase B”). El funcionamiento básico de cada estación será transmitir cada cierto tiempo (indicado por el intervalo de reporte) su información de posición, velocidad y dirección. Para las transmisiones, es importante implementar algún tipo de mecanismo de acceso al medio, con el fin de que las estaciones

tengan algunas consideraciones antes de utilizar el canal. Esto evitará que todas las estaciones transmitan al mismo tiempo (lo que haría que todos los mensajes se entremezclaran, y ninguno pudiera recibirse por otras estaciones).

La norma ITU-R M.1371-5 describe varios mecanismos de acceso al medio para las estaciones AIS. La estrategia en la que se basan los diversos esquemas es el multiplexado en el tiempo: dado que todas las estaciones buscarán transmitir utilizando el mismo medio (el aire), deben tomar turnos. Se divide el tiempo en slots de tiempo, y la transmisión de un sistema AIS tendrá que llevarse a cabo durante uno de estos slots. En particular, se le llama frame a un intervalo temporal de un minuto, y se divide cada frame en un total de 2250 slots. Todas las estaciones se sincronizan con la referencia temporal Universal Time Coordinated (UTC), con el fin de que cada minuto UTC sea el comienzo de un nuevo frame³. Los dos mecanismos de acceso al medio considerados para esta investigación son Self-Organized Time Division Multiple Access (SOTDMA) y Carrier-Sense Time Division Multiple Access (CSTDMA). El funcionamiento de ambos mecanismos sigue la estrategia de multiplexado en el

tiempo, y ambos basan su funcionamiento en la referencia de los slots de tiempo.

El mecanismo de acceso al medio SOTDMA es la estrategia usada por embarcaciones de gran porte, que tienen obligatoriedad de contener un sistema de transmisión/recepción AIS. En la figura 1 se describe brevemente su funcionamiento. En términos generales, el mecanismo se basa en que cada estación AIS pueda reservar ciertos slots de tiempo en los que va a transmitir en el futuro. Cada vez que una estación transmite, avisa al resto de las estaciones cuál será el próximo slot de tiempo a utilizar⁴. De esta forma, dicho slot se reserva, y el resto de las embarcaciones SOTDMA saben que no podrán hacer uso de ese slot para sus propias transmisiones. Este mecanismo de acceso al medio permite cierto nivel de organización dentro del medio compartido, y es por eso que se denomina “self-organized”: las estaciones se auto-organizan para que todas puedan transmitir de forma satisfactoria.

³ De esta forma, si todas las estaciones tienen la misma referencia de tiempo, los frames empiezan en el exacto mismo momento para todas.

⁴ Esta elección depende del intervalo de reporte de la estación.

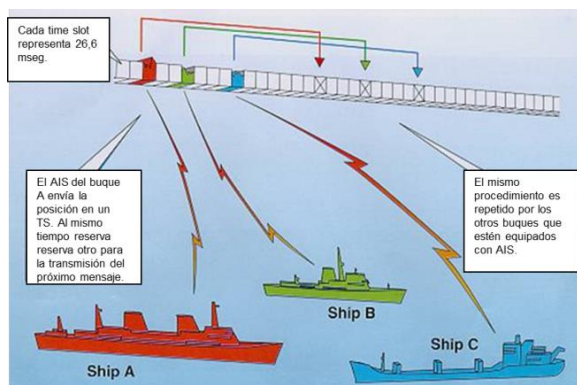


Figura 1: Funcionamiento del mecanismo SOTDMA. Imagen recuperada de [10].

Por otro lado, se tiene el mecanismo CSTDMA, utilizado en muchas aplicaciones por fuera del sistema AIS. La estrategia CSTDMA plantea que cada transmisor verifique si el canal está siendo utilizado en el slot de tiempo en el que le corresponda transmitir. Esta verificación se realiza midiendo el nivel de ruido del canal. A partir de un umbral dinámico⁵, se define que el canal está siendo utilizado si el nivel de ruido está por encima del umbral, y el canal no estará en uso si el nivel de ruido está por debajo del umbral. En el caso de que la estación no detecte ninguna otra embarcación transmitiendo, podrá enviar su información a través del canal.

SOTDMA fue inventado por el sueco Håkan Lans para su utilización en AIS [5]. La principal ventaja de este mecanismo es que sus reservas de slots de tiempo tendrán

preferencia en el canal. Así, las embarcaciones SOTDMA se aseguran de tener slots de tiempo en los que podrán transmitir. Esto no sucede en el caso del mecanismo CSTDMA, cuyo funcionamiento más tradicional depende de verificar cada slot para determinar si puede transmitir o no. Las estaciones de clase CSTDMA, a pesar de implementar un mecanismo de acceso mucho más sencillo, se ven perjudicadas ante la presencia de una cantidad considerable de estaciones SOTDMA. Por otro lado, una ventaja a considerar es que los requerimientos del estándar son más flexibles con las estaciones CSTDMA, permitiendo una implementación de bajo costo más viable para las mismas. En el resto del trabajo se buscará sopesar estas ventajas y desventajas entre ambas, para determinar cuál de las dos es más adecuada para el proyecto final.

Simulaciones

Para la definición del mecanismo de acceso al medio se buscó apoyar la decisión en algunas simulaciones. Se buscaron simuladores disponibles en línea (como los simuladores de [6], [7]). Las alternativas no permitían utilizar cantidades arbitrarias de cada tipo de embarcaciones (con SOTDMA o con CSTDMA), por lo que se desarrolló una simulación propia a partir de código de Python.

⁵ El umbral se define promediando el nivel de ruido del canal en los últimos 60 s.

Como fue previamente mencionado, dado que las embarcaciones de clase CSTDMA sensan el canal antes de transmitir y no transmiten en caso de detectar una señal mayor a cierto umbral, se les da prioridad a las embarcaciones SOTDMA. Esto podría provocar que una embarcación de clase CS no transmita nunca (si siempre elige slots reservados por una embarcación SO). Por esta razón se decidió construir un simulador relativamente simple para evaluar los efectos del desempeño de una embarcación de clase CS en un canal con presencia de embarcaciones de clase SO.

El pseudocódigo para el simulador se presenta en la figura 2. En la simulación se simplifican algunos aspectos de funcionamiento, como la elección de los slots de tiempo de transmisión, o el hecho de que en un canal todas las reservas y transmisiones ocurrirían de forma alternada, y no de forma secuencial.

El funcionamiento del simulador es el siguiente. Se tiene un mapeo de los slots de cinco frames, algunos de ellos ocupados por transmisiones de estaciones base de AIS. En primer lugar, todas las embarcaciones de clase SOTDMA elegirán sus slots de transmisión, uno tras otro, en el correr de los frames⁶. Una vez se cuente con un mapeo de cuáles slots estarían ocupados por embarcaciones con prioridad, se modela el funcionamiento de las estaciones de clase CSTDMA. Las mismas determinarán sus slots de transmisión según sus intervalos de reporte. Suponiendo que idealmente deben transmitir en el slot s , considerarán los slots desde $s-5$ hasta $s+5$, aproximadamente. De esta forma, intentarán transmitir en todos los slots dentro de ese rango, midiendo el nivel de ruido del canal para determinar si el mismo está o no siendo utilizado. Si se intenta transmitir en el primer slot y el mismo está libre, se considera que la estación CSTDMA ya transmitió, y no debe seguir

```

1 PSEUDOCÓDIGO: Función de simulación AIS.
2
3 Se tiene una matriz de 2250 columnas
4 (cantidad de slots por frame) y 5 filas.
5 La misma tendrá inicialmente ceros en todas
6 sus entradas, exceptuando los slots reservados
7 por la estación base.
8 Con esta matriz se representarán los slots
9 disponibles en el canal.
10
11 Para cada embarcación de clase SO:
12     Elegir de forma aleatoria el slot donde
13     transmitir el primer mensaje.
14     Para cada vez que deba transmitir (según
15     el intervalo de reporte):
16         Buscar el slot en el que corresponda
17         transmitir.
18         Si el slot está libre, reservarlo
19         (con un 1 en la matriz).
20         Si el slot no está libre, intentar la
21         transmisión en el siguiente slot.
22
23 Para cada embarcación de clase CS:
24     Determinar un número aleatorio donde
25     centrar el intervalo de elección de slot.
26     Para cada vez que deba transmitir (según
27     el intervalo de reporte):
28         Si el slot está libre, transmitir.
29         Si el slot no está libre intentar con
30         el slot siguiente que esté en el
31         intervalo de elección de slot.
32
33 Si dos embarcaciones de clase CS transmiten en
34 el mismo slot, esa transmisión no se contará
35 como exitosa (si se cuenta como intento).
36 Si una embarcación de clase CS intenta transmitir
37 en un slot reservado, se contará como un intento
38 de transmisión.
```

Figura 2: Pseudocódigo del simulador.

⁶ En el funcionamiento real, la elección de slots es de forma alternada entre estaciones, y no de forma secuencial, como en la simulación.

intentando⁷. Si el slot no estaba libre, se pasará a probar con el siguiente. Se tendrá un intento fallido cuando un intento de transmisión se vea frustrado por tener previamente una reserva de una embarcación SOTDMA en ese slot. Si se intenta en todos los slots del rango y se tienen fallas en todos los intentos, se considerará una transmisión fallida.

Una vez se ejecutó el código correspondiente al simulador, habiendo fijado algunos parámetros como la cantidad de estaciones de cada tipo que se quieren modelar, o los intervalos de reporte que les corresponden a cada una, se obtienen porcentajes de transmisiones exitosas o fallidas para las estaciones CSTDMA⁸. A partir de estos valores es que se puede concluir, en algunos casos, si tiene sentido utilizar estaciones de clase CSTDMA ante la presencia de una gran cantidad de estaciones SOTDMA. De esta forma, se obtienen insumos importantes para la toma de decisión del mecanismo de acceso al medio a implementar.

Se debe notar que, por la sencillez inicial de la implementación de un mecanismo

CSTDMA, y por la extensión del proyecto de fin de carrera, la decisión inicial es desarrollar un transmisor con acceso al medio basado en CSTDMA. Sin embargo, se considera de relevancia estudiar qué tan significativa sería la presencia de estaciones SOTDMA para la estación CSTDMA. En el caso de que los resultados sean desfavorables para la estación CSTDMA, se decidirá desarrollar un mecanismo SOTDMA.

Resultados y Discusión

Se realizaron varias simulaciones. El principal factor a cambiar fue la cantidad de estaciones AIS de cada tipo. Los intervalos de reporte se mantuvieron. Para tomar un canal lo más congestionado posible y ver el desempeño de las embarcaciones CSTDMA en dicho caso, se optó por tomar los intervalos de transmisión más cortos posibles tanto en embarcaciones CSTDMA como en embarcaciones SOTDMA. Es decir, todas las embarcaciones transmitirán cada poco tiempo para que el canal esté congestionado. Las estaciones SOTDMA tienen un intervalo de reporte mínimo de 5 s, mientras que las estaciones CSTDMA tienen un intervalo de reporte mínimo de 30 s.

El primer dato buscado fue la cantidad máxima de embarcaciones SOTDMA que se pueden tener presentes en el canal, que permitan un correcto funcionamiento de una estación CSTDMA (esto es, que no reserven

⁷ En el caso de tener más de una estación CSTDMA, podría ocurrir que dos estaciones CSTDMA intenten transmitir en el mismo slot. En este caso, se considera como que ambas transmisiones fueron erróneas.

⁸ Observar que las estaciones de tipo SOTDMA no tendrán transmisiones fallidas debido al mecanismo de reservas.

todos los slots). Se tiene que con alrededor de 160 estaciones SOTDMA, los porcentajes de transmisiones fallidas se mantienen en menos de 20% del total de las transmisiones intentadas. Se utiliza 160 entonces como el límite superior a la cantidad de sistemas SOTDMA que permiten que las estaciones CSTDMA funcionen bajo ciertos criterios.

A partir de conversaciones con Prefectura Nacional Naval se obtuvieron datos de cantidades diarias de embarcaciones que ingresan a las distintas zonas del puerto principal de Uruguay. En un día promedio, se tienen entre 30 y 40 barcos de gran porte dentro de la jurisdicción del puerto de Montevideo. Dado el alcance de las transmisiones/recepciones en la banda de Very High Frequency (VHF) en la que funciona AIS, y considerando las potencias de transmisión de las estaciones de clase A, podrían existir embarcaciones con destino al puerto de Buenos Aires, Argentina, que formarían parte del canal AIS cercano al puerto. No se tiene registro de estas embarcaciones, y se planifica obtener más información de prefectura en las siguientes semanas. Sin embargo, verificando algunas estadísticas del puerto de Buenos Aires [8], es posible estimar que se tendrán en total unas 100 estaciones SOTDMA diarias en las cercanías del puerto de Montevideo. Considerando que este es el punto con mayor concentración de embarcaciones de

Uruguay, este puerto es una referencia para determinar si una embarcación con mecanismo CSTDMA funcionaría en nuestro país. Si se parte de los resultados de las simulaciones realizadas, el total de 100 embarcaciones permite el funcionamiento adecuado de una estación CSTDMA.

Se realizaron además algunas otras pruebas con el simulador desarrollado.

Se presenta en la figura 3 el gráfico de la cantidad de éxitos sobre la cantidad de intentos totales, esto es, el porcentaje de éxitos de las transmisiones, a medida que aumenta la cantidad de embarcaciones SOTDMA, con una sola estación CSTDMA. Notar que se toman las transmisiones tanto de las estaciones CSTDMA como de las SOTDMA. Se busca mostrar el impacto que implica agregar estaciones SOTDMA a un canal. Tiene sentido pensar que a medida que se agregan embarcaciones, cada vez más slots de tiempo estarán reservados, por lo que comenzarán a darse más transmisiones fallidas (en un inicio solo fallarán las transmisiones de la estación CSTDMA, luego comenzarán a tenerse problemas dentro de las estaciones SOTDMA también).

Cantidad de éxitos sobre la cantidad de intentos totales en función de la cantidad de SO (1 solo CS)

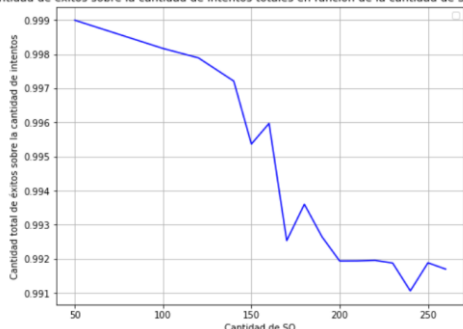


Figura 3: Gráfico de cantidad de éxitos sobre cantidad de intentos totales.

Una vez más considerando el caso de una sola estación CSTDMA, y variando la cantidad de estaciones SOTDMA, se observa la cantidad de éxitos totales en la figura 4. Es interesante notar que existe un punto (cercano a 185 estaciones SOTDMA) en el cual el canal se congestiona, y no permite el ingreso de nuevas embarcaciones. Se llegó al máximo de embarcaciones manejables. La cantidad de éxitos se mantiene constante porque siempre se logra la misma cantidad de transmisiones totales.

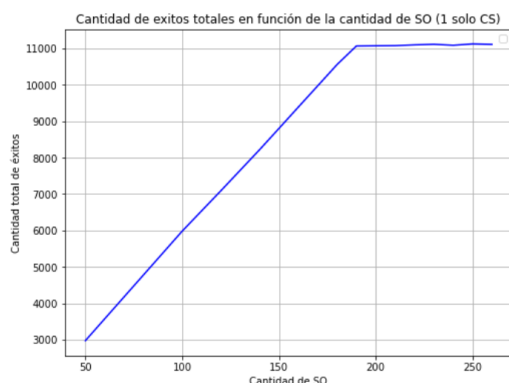


Figura 4: Gráfico de cantidad de éxitos en función de la cantidad de embarcaciones SO.

Ahora variando la cantidad de embarcaciones de clase CS pero manteniendo la cantidad total de embarcaciones, se evaluaron las transmisiones exitosas en función de la cantidad de intentos. En otras palabras, la proporción de embarcaciones de clase CS fue variando para las distintas curvas del gráfico. Como se puede ver en la figura 5, la cantidad de intentos de transmisión es menor cuanto más embarcaciones de clase CS hay, probando una vez más que la congestión generada por las embarcaciones de este tipo es insignificante en comparación con la generada por las de la clase SO. Se observa nuevamente, que con muchas estaciones de clase SO el canal se congestiona y más cantidad de intentos no se traducen en más transmisiones.

Cantidad de aciertos en función de la cantidad de intentos para distintas proporciones de embarcaciones CS

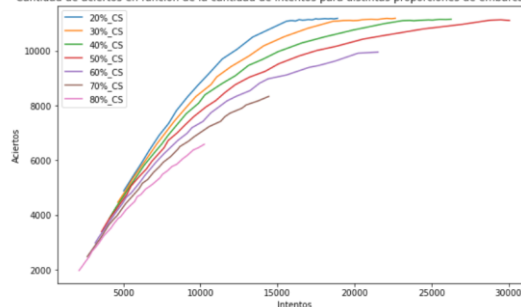


Figura 5: Gráfico de cantidad de aciertos en función de cantidad de intentos.

Conclusiones

Se analizó la congestión del canal con ambos mecanismos de acceso al medio. En particular, se probó con el caso de mayor

congestión qué impacto genera la introducción de una nueva embarcación de clase CSTDMA. Se puede concluir a partir de lo analizado que incluso en una situación real de máxima congestión en Uruguay, las embarcaciones que implementan un mecanismo de acceso al medio a través de CSTDMA podrán transmitir de forma exitosa en más del 90% de los intentos. Estos resultados se comprobaron también analizando distintas publicaciones que rectificaron nuestras conclusiones, como las de [3], [9]. Se puede concluir también, a partir de los gráficos, que dado un sistema en funcionamiento con embarcaciones de ambas clases, la introducción de una embarcación de clase SOTDMA al sistema generará mucha más congestión que la introducción de una de clase CSTDMA.

A partir de lo mencionado anteriormente se decidió que la utilización de un mecanismo de acceso al medio CSTDMA era una buena opción, especialmente considerando su desempeño y simpleza. Con esta decisión tomada se procederá a desarrollar dicho mecanismo, la codificación y decodificación de mensajes y potencialmente hardware que permita tener un modelo de bajo costo.

Referencias Bibliográficas

- [1] National Geographic España. (2020, 5 de mayo). Por qué la primera llamada de auxilio del Titanic no fue

una señal de SOS. National Geographic. Recuperado de <https://www.nationalgeographic.es/historia/2020/05/por-que-la-primer-llamada-de-auxilio-del-titanic-no-fue-una-senal-de-sos>

- [2] Encyclopædia Britannica. (s. f.). Military communication - World War II and after. En Encyclopædia Britannica. Recuperado de <https://www.britannica.com/technology/military-communication/World-War-II-and-after>
- [3] Hasegawa, K., Hata, K., Niwa, K., & Fukuto, J. (2008). Transmission evaluation of Ship-borne Automatic Identification System (AIS) in congested waterways. En 2008 8th International Conference on ITS Telecommunications (pp. 18-23).
- [4] International Telecommunication Union. (2002). Recommendation M.1371: Technical characteristics for an automatic identification system using time division multiple access in the VHF maritime mobile frequency band. Recuperado de <https://www.itu.int/rec/R-REC-M.1371>
- [5] Wikipedia. (s. f.). Håkan Lans. En Wikipedia, la enciclopedia libre. Recuperado de https://en.wikipedia.org/wiki/H%C3%A5kan_Lans
- [6] Mictronics. (s. f.). AIS Simulator. En

GitHub. Recuperado de

<https://github.com/Mictronics/ais-simulator>

[7] Kagström, U. (s. f.). AIS Simulator.

Recuperado de

https://www.kagstrom.no/ais_simulator.htm

[8] Argentina. Ministerio de Economía.

(2023). Informe Estadístico, Abril

2023. Recuperado de

https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2021/08/abril_2023_informe_estadistico.pdf

[9] Cambridge University Press. (s. f.).

Automatic Identification Systems:

The Effects of Class B on the Use of

Class A Systems. Journal of

Navigation. Recuperado de

[https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-navigation/article/abs/automatic-](https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-navigation/article/abs/automatic-identification-systems-the-effects-of-class-b-on-the-use-of-class-a-systems/F9009AD7B627A72344664EF416606100#access-block)

[identification-systems-the-effects-of-class-b-on-the-use-of-class-a-systems/F9009AD7B627A72344664EF416606100#access-block](https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-navigation/article/abs/automatic-identification-systems-the-effects-of-class-b-on-the-use-of-class-a-systems/F9009AD7B627A72344664EF416606100#access-block)

[10] Digital Yacht España. (2018, 6 de diciembre). Clase B SOTDMA. En Blog

Digital Yacht. Recuperado de

<https://digitalyacht.es/blog/2018/12/06/clase-b-sotdma/>

Agradecimientos

Ambos autores agradecen a los tutores del proyecto, Gonzalo Belcredi y Claudina Rattaro, que asistieron en las dudas surgidas durante el proceso de investigación y de creación de las simulaciones. Además, se agradece al Instituto de Ingeniería Eléctrica de Facultad de Ingeniería, que apoya la realización de este proyecto.