

Tipo de artículo: Ingeniería Aplicada

Prototipo del Sistema de Llamada Selectiva (SELCAL)

Prototype of the Selective Calling System (SELCAL)

 William Jaldin Corrales¹, Joel Kevin Pacocillo Casa²

1. Docente.Universidad del Valle.Cochabamba. Bolivia. wjaldinc@univalle.edu
2. Estudiante.Universidad del Valle.Cochabamba. Bolivia. pcj0026380@est.univalle.edu

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el modelamiento de hardware del sistema de comunicación SELCAL correspondiente al ATA 23 del sistema de comunicaciones de la aeronave, presente en todas las aeronaves. Este sistema tiene como propósito discriminar las llamadas realizadas desde un SELCAL de tierra mediante señales de radiofrecuencia, usando una codificación binaria de 16 bits compuesta por 4 caracteres únicos para cada aeronave. Si la llamada es dirigida a una estación a bordo determinada, el código de caracteres configurado en la aeronave debe coincidir con el código marcado en la estación terrestre, emitiendo una alerta audible y visible para la tripulación.

Para el desarrollo del prototipo, se utilizó la plataforma open hardware ESP32, que permitió crear un modelo funcional con características específicas. Se diseñó una interfaz gráfica de software mediante Microsoft Windows Forms para el emisor en la estación de tierra y una interfaz de hardware con LEDs y dip-switches para configurar el código binario del receptor. Como resultado, se implementó un transmisor en tierra y un sistema de recepción SELCAL a bordo de la aeronave, con una configuración binaria eficaz, permitiendo incluso la interacción de múltiples sistemas SELCAL en aire. Sin embargo, el prototipo abarca solo el primer código alfanumérico de los cuatro que conforman el código convencional de una aeronave comercial.

El prototipo ha permitido modelar la estructura básica del sistema SELCAL, y se destacó que el uso del ESP32 es adecuado para este tipo de aplicaciones, gracias a sus amplias prestaciones inalámbricas. La conexión entre Windows Forms y el ESP32 mediante el puerto serial facilita la interacción directa con el hardware, permitiendo configurar de manera flexible los terminales y ejecutar diferentes escenarios. Aunque se identificaron limitaciones en cuanto al número de códigos que se pueden manejar, este modelo cumple una función educativa, ofreciendo una plataforma que permite a los estudiantes interactuar con tecnología actual, abriendo así oportunidades para futuras investigaciones y mejoras en los sistemas de comunicación aeronáutica.

Palabras clave: SELCAL, Prototipo, ESP32, Comunicaciones, Aeronaves

Citar como: Jaldin Corrales, W., & Pacocillo Casa, J. K. (2024). Prototipo del Sistema de Llamada Selectiva (SELCAL). *Journal Boliviano De Ciencias*, 20(56). 94-110 <https://doi.org/10.52428/20758944.v20i56.1170>

Revisado: 30/07/2024

Aceptado: 11/12/2024

Publicado: 30/12/2024

Declaración: Derechos de autor 2024 Ramos Pacheco, R. B., Crespo Vargas, J., & Carrillo Mendoza. Esta obra está bajo una licencia internacional [Creative Commons Atribución 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Los autores/as declaran no tener ningún conflicto de intereses en la publicación de este documento.



ABSTRACT

In this work, the hardware modeling of the SELCAL communication system corresponding to ATA 23 of the aircraft communications system, which is present in all aircraft, was carried out. This system aims to discriminate calls made from a ground SELCAL through radio frequency signals, using a 16-bit binary code composed of 4 unique characters for each aircraft. If the call is directed to a specific onboard station, the character code configured on the aircraft must match the code marked on the ground station, triggering an audible and visible alert for the crew.

For the development of the prototype, the open hardware platform ESP32 was used, which enabled the creation of a functional model with specific characteristics. A graphical software interface was designed using Microsoft Windows Forms for the emitter at the ground station, and a hardware interface with LEDs and dip-switches to configure the binary code of the receiver. As a result, a transmitter on the ground and a SELCAL reception system onboard the aircraft were implemented, with an effective binary configuration, allowing even the interaction of multiple SELCAL systems in the air. However, the prototype only covers the first alphanumeric code of the four that make up the conventional code of a commercial aircraft.

The prototype has allowed the modeling of the basic structure of the SELCAL system, and it was highlighted that the use of the ESP32 is suitable for this type of application, due to its extensive wireless capabilities. The connection between Windows Forms and the ESP32 through the serial port facilitates direct interaction with the hardware, allowing flexible configuration of the terminals and execution of different scenarios. Although limitations were identified regarding the number of codes that can be handled, this model serves an educational function, providing a platform that allows students to interact with current technology, thus opening opportunities for future research and improvements in aircraft communication systems.

Keywords: SELCAL, Prototype, ESP32, Communication, Aircraft

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo describe la implementación de un módulo didáctico y experimental basado en un prototipo funcional de SELCAL. Este prototipo ha sido desarrollado para permitir a los estudiantes experimentar y comprender de manera práctica el funcionamiento del sistema, favoreciendo el desarrollo de habilidades en la identificación y gestión de señales de comunicación aeronáutica en un entorno controlado.

Por lo cual es necesario aclarar que el proceso de crear una muestra o modelo inicial de un producto para probar un concepto o proceso se conoce como prototipado (Teel, 2023).

La importancia de desarrollar prototipos es grande, Barriga J. (2021) indica lo siguiente al respecto:

Cuando queremos prototipar debemos pensar en el concepto de iterar; lo cual significa hacer la misma acción varias veces encontrando los errores, y como el error en este caso no es algo negativo, sino que es una oportunidad de mejoramiento, de esta manera estamos probando nuestro

prototipo para llegar a uno final que podamos usar con la comunidad como una solución a la problemática identificada.

SELCAL es un sistema de identificación radiofonía a bordo, que tiene la intención de notificar a la tripulación que una estación en tierra desea comunicarse con ellos mediante radio (Gómez, V, 2009).

Modelar este sistema conllevó un conjunto de retos. Para este propósito, fue necesario cumplir con una serie de tareas:

- El análisis de la estructura del sistema a modelar.
- La definición de los medios, métodos y recursos para lograr el objetivo.
- El diseño y configuración del prototipo.
- El desarrollo de interfaces de usuario para cada terminal.

1.1 SELCAL

De acuerdo a Gomez, V, (2009), SELCAL fue concebido por la necesidad de mitigar la molestia sonora en trayectorias aéreas transoceánicas. Las ondas HF (High Frequency) brindan suficiente cobertura de comunicaciones por radio, con la desventaja que los sonidos de estática son muy fuertes. Motivo que llevó a las tripulaciones a tener el radio sin volumen. Para que una emisión desde Centro de control operacional pueda ser oído, ARINC (Aeronautical Radio Incorporated) diseñó un sistema que alerta a la tripulación pueda comunicarse con los operarios en tierra.

La organización Internacional de Aviación Civil (OACI). Describe la notificación en cabina como un par de pulsos sonoros que combinan dos frecuencias no armónicas diferentes entre sí (Figura 1).

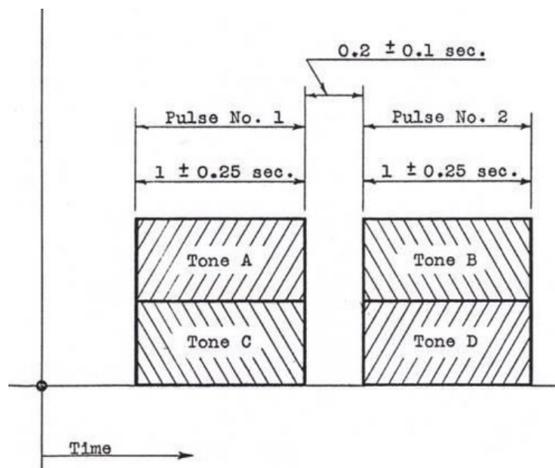


Figura N°1. Distribución de pulsos

Fuente: Elaboración propia, 2024.

La aeronave cuenta con un botón que apaga la alerta, entonces la tripulación está lista para subir el volumen del radio y oír el mensaje (Figura 2).



Figura N°2. Cockpit de aeronave

Fuente: Elaboración propia, 2024.

El conjunto de señales se basa en 16 tonos diferentes entre sí, que son representados con las letras y frecuencias mostradas en la Tabla N°1. Y la asignación de código a cada unidad consta de una agrupación de cuatro términos, por ejemplo “AB-CD”. Cada término puede ser convertido en el sistema binario (Tabla N°2). Este sistema de numeración permite interactuar con un Módulo de Programación de interruptores de estado discreto de 16 bits (Figura N°3). Donde de cuatro en cuatro bits conforman una letra en el sistema binario.

Tabla N°1. Frecuencia de tonos SELCAL

Código de letra SELCAL	Frecuencia sonora (Hz)
S	1479.1
H	645.7
D	426.6
M	977.2
B	346.7
K	794.3
F	524.8
Q	1202.3
A	312.6
J	716.1
E	473.2
P	1083.9
C	384.6
L	881.0
G	582.1
R	1333.5

Fuente: OACI, 2019.

Tabla N°2. Conversión de letras SELCAL a código binario

Carácter	Base Binaria
S	0000
H	0001
D	0010
M	0011
B	0100
K	0101
F	0110
Q	0111
A	1000
J	1001
E	1010
P	1011
C	1100
L	1101
G	1110
R	1111

Fuente: Service Bulletin (EASA.21J.452) en Eitech Aviation Services (2021).



Figura N°3. Decodificador SELCAL

Fuente: AvtechTyee Corporation, 2018.

Las asignaciones de códigos SELCAL tienen reglas que se siguen para asegurar que los sistemas de radio sean consistentes en su uso. En primer lugar, un carácter nunca puede repetirse, es decir, un código no puede usar la 'A' dos veces. En segundo lugar, el primer carácter de cada par debe mostrarse con el carácter alfabético más bajo primero, es decir, 'A' debe estar antes de 'F' (OACI, 2019).

2. METODOLOGÍA

Para lograr el diseño, la elección de la interfaz que realiza esta transmisión fue vital. En principio, se consideró la utilización de una placa Arduino Uno con un Módulo RF Tx-Rx, ya que SELCAL opera con altas radiofrecuencias (HF) y dicho módulo es un perfecto modelo a escala. Sin embargo, de acuerdo con las especificaciones descritas por TecBolivia, este módulo solo se recomienda para el envío de comandos simples. Por lo tanto, se optó por la placa ESP-32, que tiene la capacidad de enviar datos tanto por Bluetooth como por Wi-Fi a 2.4GHz. Según la documentación vigente de Espressif (2023), el fabricante de la placa, esta cuenta con una amplia capacidad para aplicaciones tanto domésticas como industriales, lo que la convierte en una opción adecuada para el proyecto debido a su óptima capacidad de envío y recepción de datos.

Dentro del código fuente, se insertó una librería para cumplir con la función de envío de datos. ESP-NOW es un tipo de protocolo o librería de comunicación Wi-Fi sin conexión, definido por la guía de desarrollo de Espressif, que permite encapsular y enviar datos a uno o más receptores a través de una dirección MAC (Media Access Control), con la que cada dispositivo se identifica. La obtención de estas direcciones se realiza mediante un programa que se compila en cada chip ESP-32, mostrando cada dirección en el monitor serial del software Arduino IDE. Una guía detallada sobre este proceso se encuentra en el portal web de Random Nerd Tutorials (2020).

Hasta el momento, se ha definido la forma de conexión. A continuación, se delimitan los siguientes aspectos:

- Se realizó la codificación de un solo término o tono, debido a que los pines ofrecidos por el chip no son suficientes.
- Para la visualización y verificación de funcionamiento, se utilizaron dos medios: Leds representativos de los bits del término y el Monitor Serial del IDE de Arduino.

Considerando los medios y herramientas descritas anteriormente, se establecieron tres elementos fundamentales: la interfaz gráfica en tierra, la estación de tierra y la estación a bordo (SELCAL).

Un emisor interactúa con una interfaz gráfica que le permite escribir un código SELCAL o elegir una aeronave con la que desea comunicarse. La estación de tierra interpreta la solicitud y realiza una transmisión que es recibida por todas las estaciones en aire disponibles. Solo una de estas estaciones, cuyo código coincide con el marcado en tierra, emite la alerta de llamada.

Para diseñar la interface (Figura N°4) se acudió a Microsoft Windows Forms, que se define a sí mismo como:

“Es un marco de interfaz de usuario para compilar aplicaciones de escritorio de Windows. Proporciona una de las formas más productivas de crear aplicaciones de escritorio basadas en el diseñador visual proporcionado en Visual Studio” (Microsoft, 2023)

En esta herramienta, es posible diseñar una interfaz gráfica con un menú donde se pueden seleccionar aeronaves que cuentan con un código SELCAL predefinido. También es posible realizar marcaciones manuales.

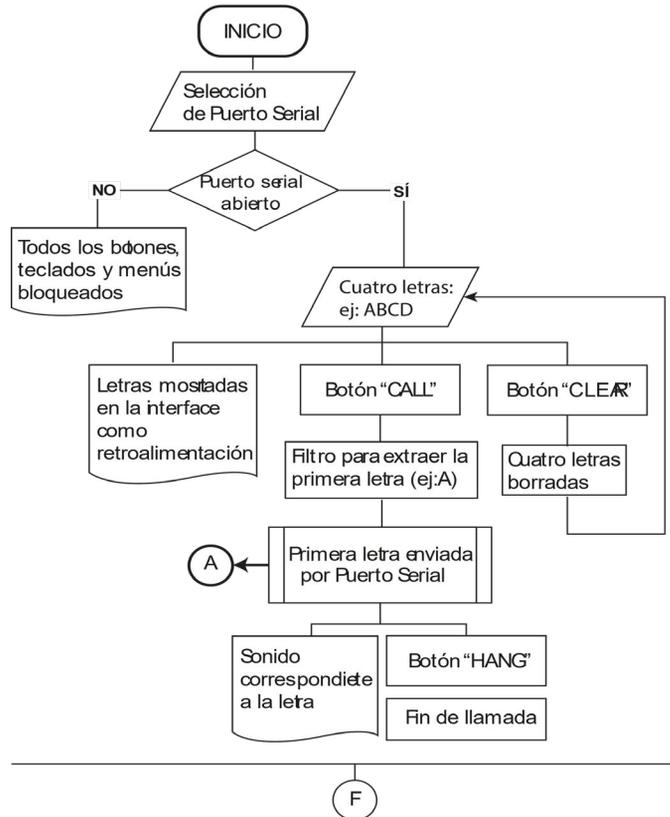


Figura N°4. Diagrama de flujo para el algoritmo de la Estación de Interface
Fuente: Elaboración propia, 2024.

El enlace con el hardware ESP32 de la estación tierra se logró mediante el Puerto Serial. Microsoft Visual Studio permite insertar una lista con la posibilidad de mostrar y seleccionar cualquier puerto disponible. Con el puerto conectado, se permite seleccionar cada letra sin la necesidad de conocer su notación binaria. Al presionar el botón “Call”, la interfaz envía el primer carácter del código a la estación de tierra para que esta lo decodifique y realice la transmisión.

Esta interfaz cuenta con un botón de cuelgue “Hang” para detener la llamada, “Clear” para limpiar el marcador y un menú de directorio donde se pueden hallar aeronaves con un código predefinido. La estación tierra (Figura N°5) recibe directamente la letra enviada por el puerto serial. Se programó para que, al reconocer cada letra, escriba en cada término booleano (x1, x2, x3 y x4) un estado particular que corresponda a la notación binaria de la letra requerida. A continuación, cada término es transmitido en conjunto mediante el protocolo ESP-NOW. A la vez, estos términos son mostrados en el Monitor Serial con el propósito de verificar, en forma de texto visible, el correcto envío del mensaje.

Por lo cual, la estación a bordo (Figura N°6) cuenta con un módulo ‘Dip Switch’ que define un código fijo con el que la estación a bordo podrá identificarse, esto mediante un conjunto de interruptores, cuyos estados representan a una letra en término binario (y1, y2, y3 e y4).

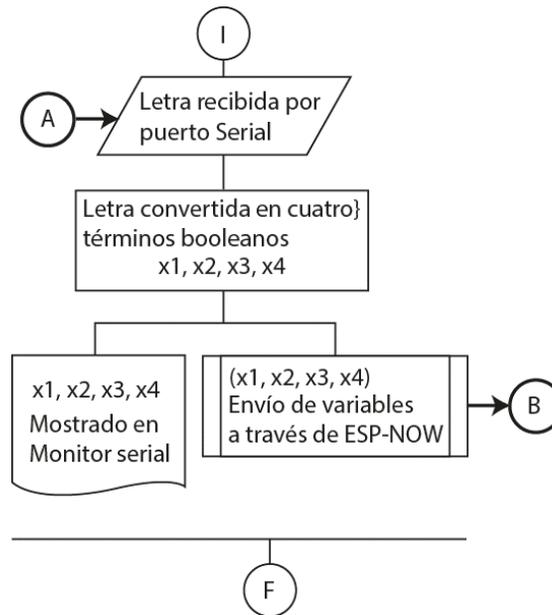


Figura N°5. Diagrama de flujo para el algoritmo de la Estación de Tierra
Fuente: Elaboración propia, 2024.

El protocolo NOW permite que las variables x_1 , x_2 , x_3 y x_4 sean recibidas por esta estación. Para verificar el mensaje, se recurre al monitor serial. Adicionalmente cuatro LED indicarán el estado de cada uno de estos términos.

Para la alerta, un led rojo permanece encendido si no existen llamadas emitidas o si la llamada no está dirigida a la estación. En cambio, un led verde parpadeante se enciende si cada término X e Y coinciden, siendo ésta una llamada a la estación a bordo.

Se implementó además un botón físico de colgado, para que la alerta deje de emitirse.

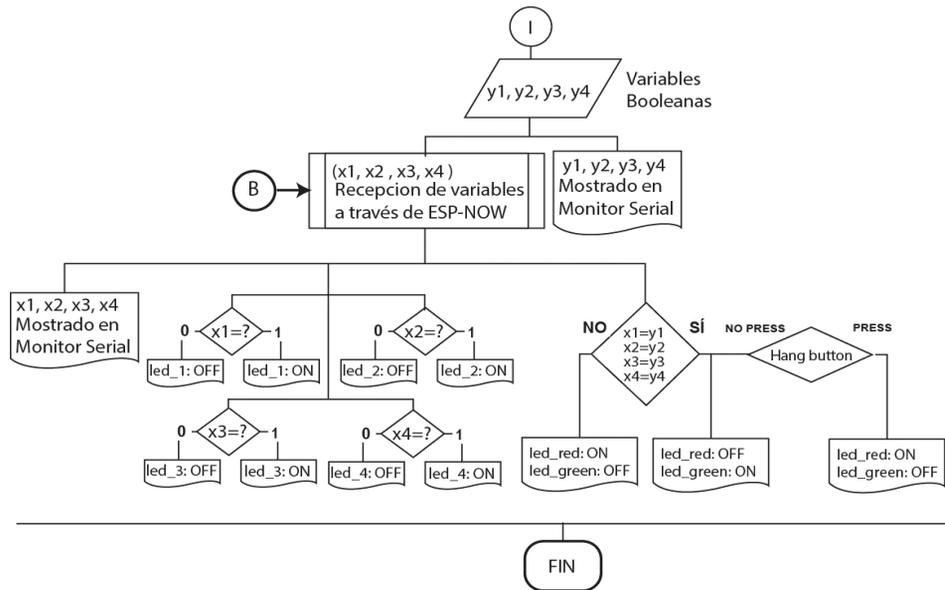


Figura N°6. Diagrama de flujo para el algoritmo de la Estación a Bordo

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Es posible replicar esta estación múltiples veces, y asignarles un código diferente con el que se puede experimentar. Solo se requiere obtener la dirección MAC de hardware correspondiente al microcontrolador ESP32 de cada estación adicional para vincularlas a la estación de tierra.

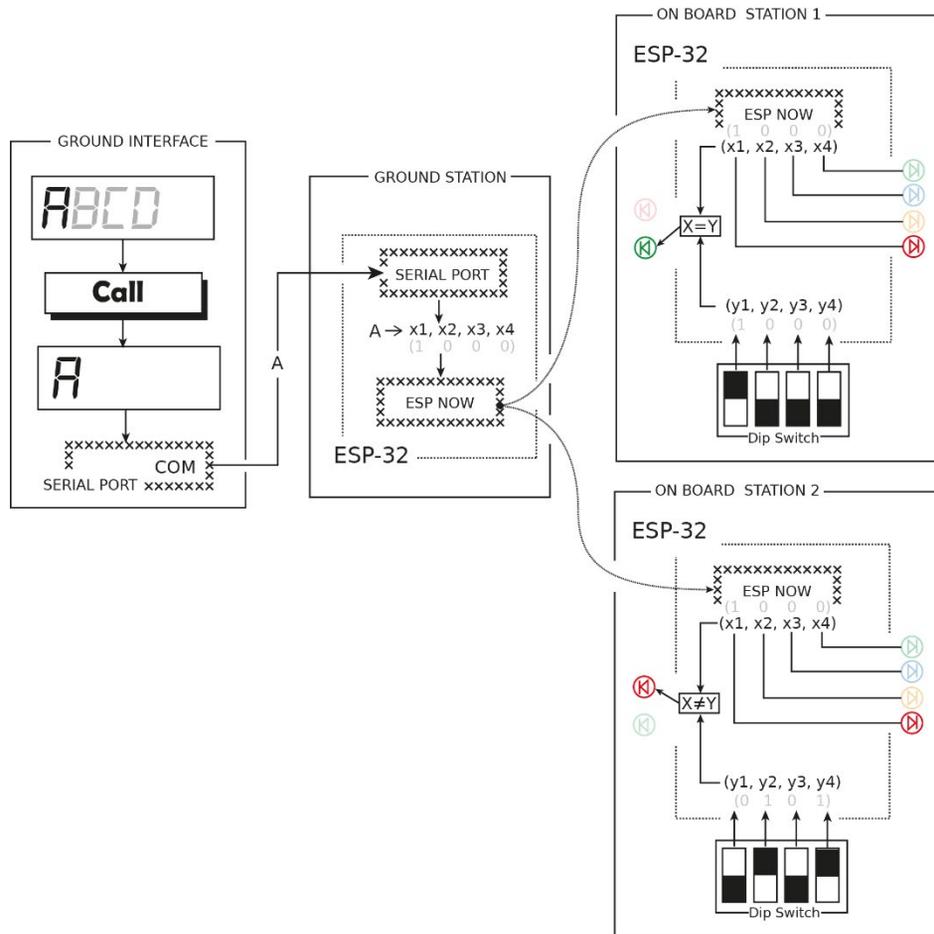


Figura N°7. Esquema de funcionamiento del Prototipo SELCAL
Fuente: Elaboración propia, 2024.

3. RESULTADOS

Con el fin de realizar pruebas de verificación del correcto funcionamiento del prototipo, se procedió a realizar una llamada SELCAL desde la estación de tierra a dos estaciones a bordo.

Para realizar la llamada, se selecciona en la interfaz, mostrada en la Figura N°8, el puerto COM, que corresponde a un cable USB conectado al microcontrolador ESP32. Este puerto puede variar de equipo en equipo. Una vez seleccionado, el botón “Open” habilita el resto de las opciones. A continuación, se presentan dos opciones: realizar el marcado de cada término manualmente o seleccionar una aeronave de la flota. Por ejemplo, “QA-RM”. El programa muestra un mensaje indicando que solo se pueden escribir cuatro términos si la cantidad es excedida. El resto de las reglas, como el orden ascendente obligatorio o la no repetitividad, no fueron implementadas.

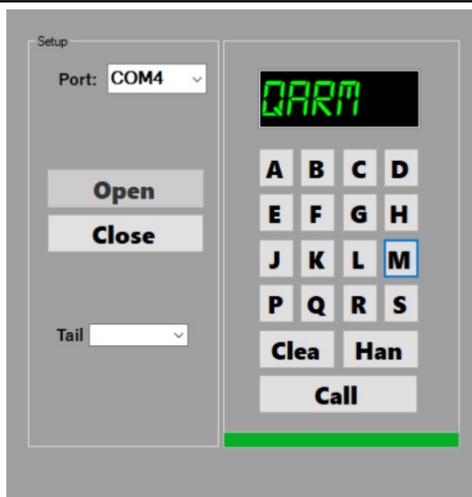


Figura N°8. Interfaz de Usuario de estación tierra
Fuente: Elaboración propia, 2024.

El botón “Call” inicia la llamada, la cual puede ser comprobada desde el Monitor Serial, donde se puede observar el envío exitoso a cada estación a bordo (Figura N°9 y 10), y también el valor booleano correspondiente a la letra Q.

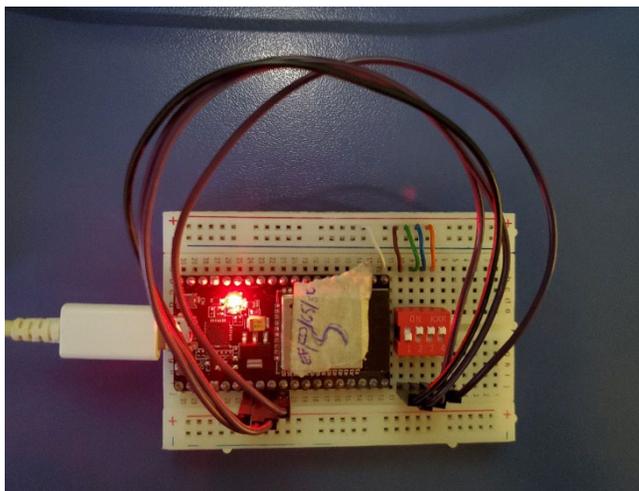


Figura N°9. Estación de Tierra
Fuente: Elaboración propia, 2024.

```
Packet to: 24:d7:eb:0f:5a:0c send status: Envío exitoso
Packet to: 24:d7:eb:10:e1:44 send status: Envío exitoso
enviado x1: 0
enviado x2: 1
enviado x3: 1
enviado x4: 1
Envío Exitoso
```

Figura N°10. Captura del Monitor Serial de Arduino IDE para la estación tierra
Fuente: Elaboración propia, 2024.

La aeronave A tiene configurado en el Dip Switch los valores de 0100, que corresponden a la letra B. Se debe notar que los cuatro LED de colores muestran el mensaje recibido, y el LED rojo indica que la llamada no es correspondida (Figura N°11).

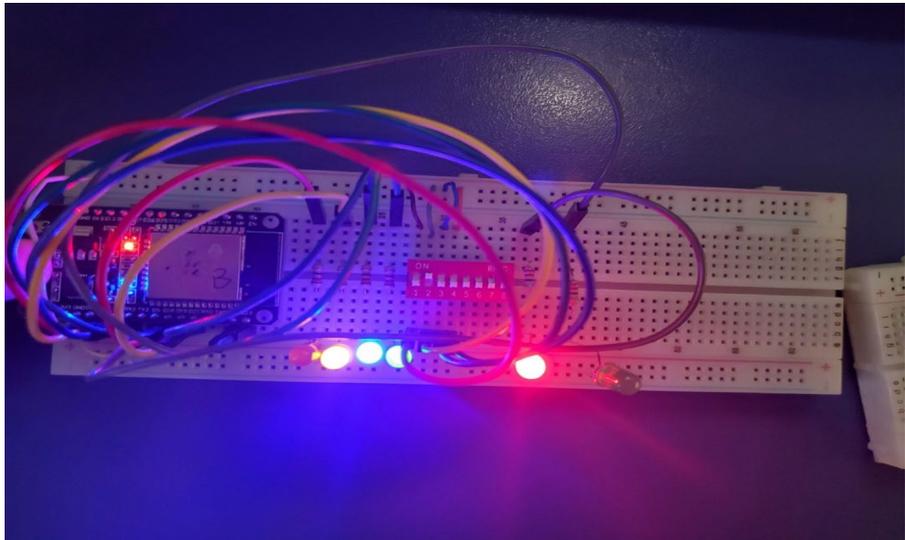


Figura N°11. Interfaz física de la Estación a Bordo “A”
Fuente: Elaboración propia, 2024.

```
Bytes received: 4  
Switch Y1: 0  
Switch Y2: 1  
Switch Y3: 0  
Switch Y4: 0
```

Figura N°12. Captura del Monitor Serial de Arduino IDE para la estación a bordo “A”

Fuente: Elaboración propia, 2024.

La aeronave B tiene configurado en el Dip Switch los valores de 0111 (Figura N°14), que corresponden a la letra Q. Se debe notar que, igualmente, los cuatro LED de colores muestran el mensaje recibido en función de la codificación binaria de la tabla N°2. El LED verde realiza un parpadeo indicando un “call” entrante desde SELCAL de tierra (Figura N°13).

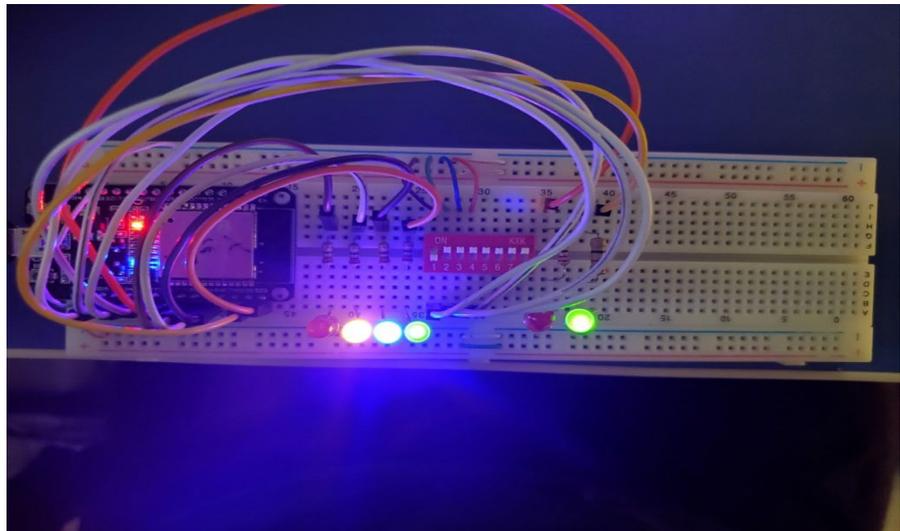


Figura N°13. Interfaz física de la Estación a Bordo “B”

Fuente: Elaboración propia, 2024.

```
Bytes received: 4
Switch Y1: 0
Switch Y2: 1
Switch Y3: 1
Switch Y4: 1
```

Figura N°14. Captura del Monitor Serial de Arduino IDE para la estación a bordo “B”

Fuente: Elaboración propia, 2024.

Este sistema (Figura N°15) permite la modificación en tiempo real del Dip Switch, haciendo que la alerta se adapte a cualquier configuración.

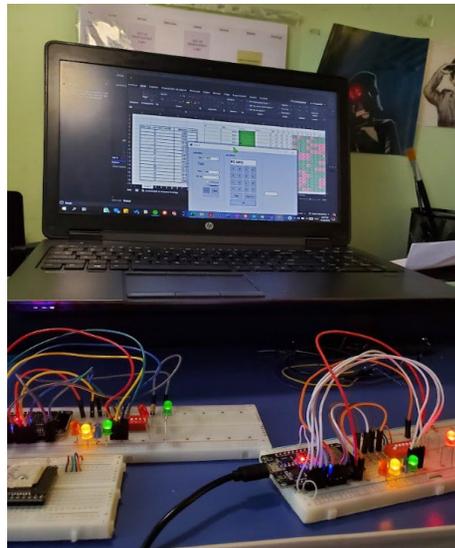


Figura N°15. Sistema SELCAL funcionando en conjunto

Fuente: Elaboración propia, 2024.

4. DISCUSIÓN, DESARROLLO Y ANÁLISIS

4.1 Discusión

Con la implementación de este proyecto, se logró diseñar un prototipo funcional. No obstante, dicho prototipo está lejos de ser funcional en aeronaves reales, ya que la transmisión y decodificación del sistema SELCAL operan de una manera muy distinta. Por lo tanto, este modelo tiene un carácter didáctico y experimental.

Es posible alcanzar los cuatro términos que conforman cada código y establecer las reglas de marcado; sin embargo, se recomienda optimizar el algoritmo para reducir la complejidad. Este prototipo fue implementado en un Protoboard, configuración que no se recomienda debido a la existencia de inductancias parásitas, las cuales podrían generar falsos positivos. También es importante considerar las limitaciones del ESP32, como el número máximo de dispositivos conectados, la cobertura mediante Wi-Fi y la alimentación de la placa. A pesar de ser un modelo de un sistema de comunicación de aeronaves, el principio del sistema diseñado en este artículo podría tener diversas aplicaciones, ya que permite que distintos dispositivos respondan con una alerta ante la solicitud de un emisor.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, mediante la satisfactoria ejecución del prototipo, se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- La estructura fundamental del sistema SELCAL fue descrita y modelada para la implementación de un prototipo funcional.
- El ESP32 es una variante de Arduino con amplias prestaciones inalámbricas, ideales para proyectos como el presentado.
- Windows Forms puede conectarse con un chip Arduino mediante el Puerto serial, permitiendo la interacción directa del usuario con el circuito sin alterarlo.
- Se pudo establecer una lógica de funcionamiento a través de los medios y herramientas seleccionadas, permitiendo la libre configuración de cada terminal y la ejecución de múltiples escenarios.
- Las limitaciones establecidas y encontradas son tenidas en cuenta, siendo estos aspectos evidentemente mejorables.

Una vez completado el prototipo, no solo se logrará una demostración práctica de la identificación de señales, sino que también se brindará una plataforma para que los estudiantes interactúen con tecnología actual en un entorno controlado. Este trabajo contribuye significativamente a la educación aeronáutica y abre posibilidades para futuras investigaciones y mejoras en sistemas de comunicación aeronáutica.

REFERENCIAS

- Barriga, J. A. (2021, junio 18). *La importancia de prototipar para generar soluciones innovadoras en la educación*. *La Palabra Maestra*. Recuperado de : <https://www.compartirpalabramaestra.org/actualidad/columnas/la-importancia-de-prototipar-para-generar-soluciones-innovadoras-en-la-educacion>.
- Gómez, V. (2009, mayo 12). *¿Sabías... qué es el SEL-CAL?*. *Microservos*. Recuperado de <https://www.microservos.com/archivo/aerotrastorno/sabias-sel-cal.html>
- AvtechTye. (2018). *ARINC 714 SELCAL decoders*. Recuperado de <https://www.avtechttye.com/wp-content/uploads/2018/03/ARINC-741-Selcal-Decoders.pdf>
- TecBolivia. (s.f.). *Kit transmisor y receptor RF 315 MHz con codificador y decodificador*. Recuperado de <http://tecbolivia.com/index.php/venta-de-componentes-electronicos-11/comunicaciones/kit-transmisor-y-receptor-rf-315mhz-con-codificador-y-decodificador-detail>
- Espressif. (s.f.). *ESP-NOW API reference*. Recuperado de https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/esp32c3/api-reference/network/esp_now.html
- Santos, S. (2020). *Get ESP32/ESP8266 MAC address and change it (Arduino IDE)*. Recuperado de <https://randomnerdtutorials.com/get-change-esp32-esp8266-mac-address-arduino/>
- Microsoft. (2023). *Guía de escritorio para Windows Forms*. Recuperado de <https://learn.microsoft.com/es-es/dotnet/desktop/winforms/overview/?view=netdesktop-7.0>
- Brown, A. J., & Smith, K. T. (2022). *The evolution of SELCAL systems in commercial aviation*. *Aviation Technology Journal*, 28(4), 210–225. <https://doi.org/10.1016/j.aviat.2022.04.003>
- Li, H., & Zhang, Y. (2021). *Improving communication efficiency with advanced SELCAL systems*. *Journal of Aerospace Engineering*, 35(3), 150–162. <https://doi.org/10.1002/jae.2021.150>
- Johnson, T. D., & Thompson, B. (2019). *SELCAL and its role in improving pilot-controller communication*. *Journal of Air Traffic Management*, 44(2), 87–101. <https://doi.org/10.1016/j.jatm.2019.05.002>
- Kim, S. Y., & Lee, J. H. (2018). *Enhancing aviation safety with digital SELCAL systems*. *Aerospace Safety Journal*, 19(4), 302–315. <https://doi.org/10.1016/j.aersaf.2018.07.004>
- Gupta, R., & Verma, A. (2017). *The impact of SELCAL on long-haul communication*. *Journal of Aviation Communication*, 12(1), 110–123. <https://doi.org/10.1016/j.javiacomm.2017.03.007>
- Singh, V., & Patel, D. (2016). *Comparative analysis of traditional and modern SELCAL systems*. *Journal of Aeronautical Sciences*, 25(3), 185–200. <https://doi.org/10.1007/jaersci.2016.185>

Anderson, C., & Green, S. (2015). *Digital advancements in SELCAL technology*. *Journal of Aircraft Communication*, 34(2), 75–88. <https://doi.org/10.1016/j.jaircomm.2015.02.005>

Rodriguez, L. M., & Thompson, P. (2014). *SELCAL system performance in diverse weather conditions*. *International Journal of Aviation Safety*, 29(1), 45–59. <https://doi.org/10.1016/j.aviatsafe.2014.01.004>

Chen, Y., & Wu, Z. (2013). *Innovations in SELCAL technology for next-generation aircraft*. *Journal of Aeronautics and Astronautics*, 27(5), 210–225. <https://doi.org/10.2514/jaaa.2013.210>

Williams, R., & Thompson, B. (2014). *The impact of SELCAL on global aviation communication networks*. *International Journal of Aerospace Communications*, 16(2), 101–115. <https://doi.org/10.1016/j.ijac.2014.04.002>

Nakamura, H., & Tanaka, T. (2016). *Comparative study of analog and digital SELCAL systems*. *Aviation Technology Journal*, 20(1), 65–79. <https://doi.org/10.1016/j.aviat.2016.01.009>