

Estudio sobre el desarrollo de un prototipo para monitoreo del espectro radioelectrónico utilizando SDR

Study on the development of a prototype for radio spectrum monitoring using SDR

Edison Alexis Torres Garzón¹, Julián Camilo Guevara Cardona^{2*} y Yilver Orley Mendoza Prieto³

(1) Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD, Facatativá - Colombia,

✉ eatortes14@misena.edu.co

(2) Universidad Militar Nueva Granada - UMNG, Bogotá, D. C. - Colombia,

✉ est.julian.guevara@unimilitar.edu.co

(3) Escuela de Comunicaciones Militares - ESCOM, Facatativá - Colombia,

✉ ymendozap@imi.mil.co

* Autor a quien se dirige la correspondencia

Resumen

Las comunicaciones en la actualidad están manejando al mundo, en especial las comunicaciones inalámbricas. Este tipo de comunicaciones ha permitido reducir distancias y tiempos en el proceso de comunicación entre personas, y mejorar las condiciones de vida de las mismas; así mismo, permitiendo generar más seguridad a los Estados. Para los sistemas de comunicación es de vital importancia que los medios o canales de comunicación sean lo más claros y exclusivos posibles; es por esto por lo que se plantea la investigación y la descripción del proceso y de cómo se realizó la construcción de un prototipo funcional para la identificación de señales de radiofrecuencia por medio de radio definida por software (SDR), realizando pruebas con el fin de obtener resultados para determinar la funcionalidad del prototipo. Además, se analiza cómo este desarrollo y la aplicabilidad de esta tecnología aportan a la Inteligencia Estratégica en su campo operacional para la recolección de datos.

La propuesta del prototipo se desarrolló bajo el funcionamiento de un software basado en GNU/radio, herramienta de desarrollo libre y abierta, que permite el procesamiento de las señales por medio de bloques integrados al sistema de SDR.

Clasificación JEL: L96, O3, P55

Palabras clave: Radio definida por software, SDR, espectro radioeléctrico, sistema de comunicaciones, GNU/Radio, Inteligencia Estratégica.

Abstract

Communications are currently driving the world, especially wireless communications, this type of communication has allowed to reduce distances and times in the process of communication between people, and improve their living conditions, as well as allowing to generate more security for states. For communication systems it is of vital importance that the means or channels of communication are as clear and exclusive as possible, which is why the research topic and the description of the process and how the construction of a system was carried out. Functional prototype for the identification of radio frequency signals by means of software defined radio (SDR), carrying out tests in order to obtain results to determine the functionality of the prototype. In addition, it is analyzed how this development and the applicability of this technology contributes to Strategic Intelligence in its operational field for data collection.

The prototype proposal was developed under the operation of software based on GNU/radio, a free and open development tool that allows signal processing by means of blocks integrated into the SDR system.

Keywords: Software Defined Radio, SDR, electric radio spectrum, communications system, GNU/Radio, Strategic Intelligence.

Introducción

El siguiente artículo tiene como finalidad evidenciar, mediante una metodología de investigación aplicada, cómo se desarrolló un prototipo funcional para el monitoreo del espectro electromagnético. En la implementación de un sistema de comunicaciones se hace necesario realizar una gestión eficiente en la administración del espectro radioeléctrico (Roba Iviricu et al., 2020); en consecuencia, se debe planear una supervisión y vigilancia constantes para que las condiciones diseñadas en el sistema de comunicaciones no desmejoren. Cuando se mencionan los “sistemas de comunicación” se hace referencia a sistemas basados en la transmisión de voz por medio de bandas de HF, UHF y VHF (Buitrago Betancourt, 2017), las cuales pertenecen a la rama de las comunicaciones análogas, y es por esto que son muy sensibles a las interferencias ocasionadas por la saturación de los canales de transmisión de información.

Específicamente se detectó que la calidad y fiabilidad de la señal de los sistemas de telecomunicaciones en la zona rural y urbana del municipio de Facatativá (*municipio de Cundinamarca/Colombia, lugar en donde se desarrolló el prototipo*) es deficiente, debido a una sobreocupación de los canales de comunicación en las banda de HF y VHF usados por los sistemas de emergencias (*la Policía Nacional, el Ejército Nacional, servicios de transporte y radioaficionados*); es por esto por lo que se hizo necesario el planteamiento de la construcción de un prototipo de un sistema móvil de vigilancia que permitiera realizar la verificación de la ocupación de los canales de comunicaciones en las distintas frecuencias. Si bien es cierto que el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones de Colombia (MINTIC) es el ente regulador del uso del espectro radioeléctrico mediante la expedición de licencias de uso de canales y frecuencias, la vigilancia que realizan para el cumplimiento de sus licencias es nula (Cadena Muñoz et al., 2015).

Mediante la construcción de este prototipo se podrá realizar la caracterización del espectro radio de manera local, permitiendo identificar qué frecuencias están en blanco o, dicho de otra manera, las frecuencias que menos ocupación tengan, con el fin de poder planear una gestión eficiente del uso del espectro radioeléctrico, y obtener un sistema de telecomunicación de mejor calidad. El propósito del presente artículo se basa en divulgar cómo se realizó la construcción del prototipo resultante, el cual está compuesto por distintos módulos, iniciando por el módulo de visualización, módulo de procesamiento de señales, módulos de adquisición de señales y finalizando con el módulo de almacenamiento de energía. A grandes rasgos, cada uno de los módulos los integraran equipos, los cuales interactuaran entre sí, formado el sistema propuesto, además de comprender su utilidad para la Inteligencia Estratégica.

Conceptualización sobre aplicabilidad de SDR

La implementación del SDR tiene origen en un proyecto científico-militar estadounidense, denominado *SpeakEasy*, cuyo objetivo era implementar más de diez tipos de tecnologías de comunicaciones inalámbricas en un equipo programable, operando en la banda de frecuencias de 2MHz a 200MHz (Domínguez, 2011). Este desarrollo permitió que el hardware digital del propósito general se comuniquen en una amplia gama de frecuencias, técnicas de modulación, métodos de codificación de datos, tipos criptográficos y otros parámetros de comunicación (PG Cook y W. Bonser, 1999). Dicho desarrollo se llevó a cabo con el fin de solucionar los problemas de interoperabilidad dentro de los servicios y operaciones militares que contaran con telecomunicaciones soportadas en sistemas de radio.

FIGURA 1. Speakeasy Phase-2



Fuente: (Bonser, 1998)

Según el estudio realizado por Maldonado (2017), la implementación de un prototipo de analizador del espectro radioeléctrico, utilizando sistema Radio Definida por Software (SDR), el cual está orientado a la necesidad de instituciones públicas y privadas enfocadas en las telecomunicaciones, dando realce en la educación superior para un mejor desempeño de sus educadores, para la implementación de este prototipo, se diseñó el algoritmo para el funcionamiento del analizador en el software libre GNU Radio, el cual fue efectuado en el sistema operativo Ubuntu. Este algoritmo fue implementado en la tarjeta USRP B210, la misma se acopló a un ordenador portátil mediante los puertos USB 3.0 de la tarjeta y el ordenador. Este prototipo trabaja en el rango de frecuencias de 70 MHz a 6 GHz. Debido al rango de trabajo de la tarjeta USRP, para una mejor visualización y manipulación del espectro radioeléctrico posee las opciones de frecuencia central, ganancia, número de divisiones por decibelios y nivel de referencia de la gráfica. Para la correcta lectura de las gráficas existe la opción de *Max Hold* para los picos máximos, promedio (*Average*) que permite tener los promedios de la señal recibida, dando así una funcionalidad básica para entrenamiento de educadores y educandos en los centros educativos. Así también se plasmó la comparación con el analizador comercial, obteniéndose una variación de alrededor de 0,0045 mW en referencia a potencia, y un error del 15,7% con respecto al ancho de banda con el prototipo implementado. Se concluye que el prototipo permite visualizar el espectro de una frecuencia determinada, así como su manipulación para una mejor lectura. Según este autor, es de vital importancia la implementación de la tecnología SDR para la adquisición de información del espectro radioeléctrico para entidades regulatorias.

En cuanto a la evaluación de ocupación por parte de los espectros radioeléctricos en zonas determinadas, se hace énfasis en la tesis de Pinos (2019) “Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico y análisis de factibilidad de uso de radio cognitiva en la banda UHF” (450 – 512 MHz), en donde se evaluó el porcentaje de ocupación del espacio radioeléctrico en la banda UHF (450 – 512 MHz), en la ciudad de Riobamba. El estudio permitió identificar porcentajes de ocupación de frecuencias licenciadas y espacios en blanco para analizar la factibilidad de uso de Radio Cognitiva y un plan de reutilización de frecuencias para la optimización del espectro. Las mediciones al espectro se realizaron en dos puntos de la ciudad de Riobamba; uno en la Unidad Regional Sierra Centro Riobamba de la Agencia de Regulación y Control de las Telecomunicaciones (ARCOTEL), y otro en el hospital del IESS con el sistema SACER de la ARCOTEL. A nivel mundial se conoce que existe un incremento en las comunicaciones y que la asignación del espacio radioeléctrico es estática, lo que imposibilita la asignación de frecuencias para nuevos usos tecnológicos. Con esta problemática se analizó la banda de 450 - 512 MHz, que tiene espaciamiento de 12.5Khz, por lo cual, en el rango indicado, existen 4.960 portadoras de frecuencia, de las cuales se tomó una muestra de 621 portadoras que fueron analizadas durante doce días. Como resultado se obtuvo que el 93.24% de las bandas de frecuencias medidas no están siendo ocupadas y que apenas el 6.77% de las 621 bandas medidas presentan algún porcentaje de utilización. Estos datos permiten concluir que el porcentaje de utilización de usuarios primarios es de 11.25%, sustentando así la necesidad de implementación de radio cognitiva para la optimización del espectro. De esta investigación se pueden derivar diversos estudios, tales como nuevos escenarios de uso de radio cognitiva y su aplicación, de acuerdo con las infraestructuras de red cognitiva.

Mediante la búsqueda bibliográfica se evidencia que, a pesar de que la tecnología de la radio definida por software lleva algún tiempo en el mercado, aún se encuentra vigente en desarrollos y en investigaciones. (Robustelli et al., 2022) en su artículo “Evaluación de rendimiento de posicionamiento de punto único y calidad de pseudodistancia GNSS-SDR”, evalúan la posibilidad de utilizar receptores SDR como sistemas de posicionamiento; para esto realizan pruebas de posicionamiento con único punto para determinar la desviación estándar de una SDR vs un GNSS¹.

Otro caso lo expone Madeira (2022), en su artículo “Una implementación de radio definida por software de la seguridad de la capa física utilizando MIMO-SVD”, en donde aplica la opción de implementar una SDR en la transmisión de datos para poder aumentar la seguridad de la información, pues la SDR, al ser un hardware, es menos vulnerable que un software. Por esta misma línea de investigación podemos encontrar a (Fokin & Volgushev, 2022), quien en su investigación “Diseño de tecnología de posicionamiento

1 Un GNSS es un sistema de navegación por satélite, el cual tiene una estructura claramente definida, que se divide en tres segmentos distintos: un segmento espacial, un segmento de control y un segmento de usuarios (Álvarez, 2008).

de red de radio definida por software. Desarrollo de transmisores” exalta la importancia de utilizar la tecnología SDR para evaluar las vulnerabilidades del posicionamiento inalámbrico.

Para el presente año (Powell et al., 2022) realizó una investigación sobre la gestión de la movilidad de los UAV mediante el uso de SDR para el diseño metodológico de prueba, con la finalidad de la construcción de un prototipo. Finalmente (Ferreira et al., 2022), en su artículo denominado “Un sistema móvil anti-UAV basado en radio definido por software con capacidades de interferencia y suplantación de identidad”, planteó la idea de poder usar SDR de bajo costo para la implementación en sistemas anti UAV. Como se evidencia, el uso de la SDR es diverso y muy eficiente en los diferentes tipos de aplicaciones; así mismo, se demuestra que existe una industria especializada para el desarrollo de estos prototipos. Al mostrar esta tecnología, claramente ayuda a ejecutar procesos de comunicación e interceptación de frecuencias con una arquitectura cómoda para el usuario. También ofrece facilidades para una investigación menos costosa a través de simulación, permitiendo su experimentación y estudio a profundidad en entidades profesionales, comerciales y académicas (Algora, 2011).

Pedraza L. F., Forero, F., & Patricia Páez, I. (2014), en el artículo “Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá - Colombia”, describen los detalles y resultados de una campaña de medición de espectro, que tuvo lugar en Bogotá de marzo a diciembre de 2012. El estudio incluye el análisis de ocupación de las bandas de frecuencias que van desde 54 MHz a 6 GHz. Las mediciones se ordenan de acuerdo con las diferentes bandas y servicios, a fin de proveer una visión clara de los ciclos de trabajo típicos asociados a diferentes tecnologías, siendo importante resaltar la necesidad de la vigilancia del espectro para su correcta gestión, la cual da lugar a investigar en el desarrollo de prototipos con tal fin.

Implementación para la Inteligencia Estratégica

Mediante la recolección de datos en un campo de radiofrecuencia, el cual se aplica mediante el monitoreo en las comunicaciones, desde la Inteligencia Estratégica se puede usar el modelo de la radiofrecuencia por software con el fin de aplicar el funcionamiento del SDR para la seguridad y defensa del país, ya que con el monitoreo de las comunicaciones se logra anticipar posibles amenazas y riesgos que puedan afectar al Estado, brindando oportunidades en pro de generar estrategias de defensa gubernamental (Hirane, 2016) y generando así nuevo conocimiento a partir de datos e información proveniente de diversas fuentes, como lo puede ser el espectro radioelectrónico, utilidad como principio básico de la Inteligencia Estratégica, fundamentada significativamente al introducir el espacio radioelectrónico como un lugar de información e incertidumbre que se tiene (Cáceres, 2001) y así obtener información a la hora de tomar cualquier decisión y generar algún tipo de estrategia. El desarrollo de planeación de cualquier política de seguridad para el Estado debe de estar acompañado de un proceso de evaluación, la cual es lograda con mayor facilidad gracias a la Inteligencia Estratégica. Dicha Inteligencia también es

concebida como el proceso y producto de desarrollar el contexto, el conocimiento y la comprensión del ambiente estratégico de una nación, necesario para respaldar los planes y las políticas de seguridad nacional de un Estado (Vargas, 2022).

Dentro de la recolección de información los servicios de inteligencia son vitales para la concepción de la seguridad dentro un Estado, desempeñando labores de protección estatal, en donde su principal objetivo consiste en recopilar, analizar y difundir cierta información que ayude y permita a los responsables de las políticas de seguridad y otras entidades a tomar posturas de protección de la seguridad nacional. En este último concepto está incluida la protección de la población y la protección de sus derechos (Rojas, 2016). Es aquí en donde la definición de Inteligencia Estratégica, por Jordan (2013), “conocimiento especializado derivado de un proceso sistemático y normalizado que resulta de la transformación de un conjunto de informaciones obtenidas por medios, recursos y fuentes muy dispares, tanto de carácter abierto como cerrado”, enmarca la importancia de la recolección de información para la Inteligencia Estratégica.

En el marco de la ley en Colombia, la implementación del monitoreo del espectro electromagnético se ampara dentro de la Ley Estatutaria 1621 de 2013, y en el Artículo 17 se menciona el monitoreo del espectro electromagnético e interceptaciones de la comunicación privada.

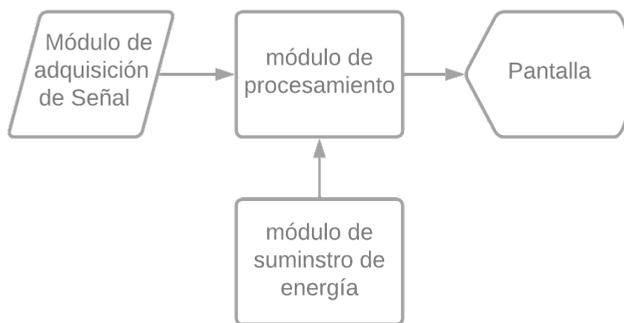
Las actividades de inteligencia y contrainteligencia comprenden actividades de monitoreo del espectro electromagnético, debidamente incorporadas dentro de órdenes de operaciones o misiones de trabajo. La información recolectada en el marco del monitoreo del espectro electromagnético en ejercicio de las actividades de inteligencia y contrainteligencia, que no sirva para el cumplimiento de los fines establecidos en la presente Ley, deberá ser destruida y no podrá ser almacenada en las bases de datos de inteligencia y contrainteligencia. El monitoreo no constituye interceptación de comunicaciones (Ley Estatutaria 1621 de 2013, Artículo 17).

Metodología de desarrollo del prototipo

Como se hizo mención con anterioridad, el tipo de investigación elegida es una investigación aplicada, ya que se fundamenta en teorías, investigaciones e implementaciones que se muestran en artículos científicos de revistas, tesis doctorales y libros basados en publicaciones de alto impacto. La información obtenida sirve de base para fundamentar el presente trabajo de investigación e implementación (Rodríguez Ortiz, 2021), permitiendo conocer las herramientas y tecnologías actualizadas para la construcción de este prototipo. Adicionalmente, la investigación aplicada está orientada a resolver los problemas que se presentan en los procesos de producción, distribución, circulación y consumo de bienes y servicios de cualquier actividad humana. Se denomina aplicadas porque, con base en investigación básica, pura o fundamental, en las ciencias fácticas o formales se formulan problemas o hipótesis de trabajo para resolver los problemas de la vida productiva de la sociedad (Gracia, 2018).

El sistema de vigilancia del espectro radioeléctrico está integrado por cuatro módulos principales (ver FIGURA 2), los cuales son: módulos de procesamiento de la información, el cual está compuesto por una *Raspberry PI 4* de 4g de RAM; módulo de adquisición de señales del espectro radioeléctrico, conformado por una *SDR-RTL2832U dongle*; módulo de visualización, conformado por una pantalla táctil de siete pulgadas con conexión DSI; y el módulo de suministro de energía, conformado por cuatro baterías de litio, ferro y fosfato (LIFEPO4) de 3.2v a 10000mA.

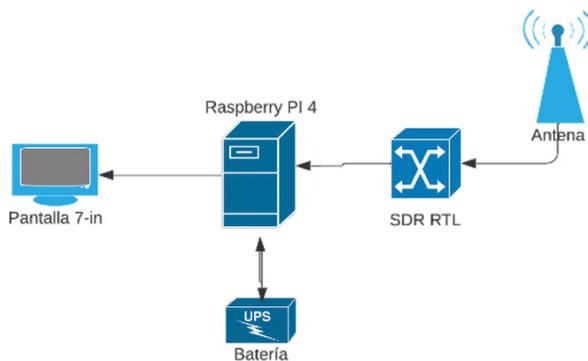
FIGURA 2. Estructura de módulos que integran el sistema de vigilancia



Fuente: Elaboración propia.

Diseño de sistema de vigilancia de espectro radioeléctrico: En la etapa de diseño se planteó que el prototipo debía contar con los módulos referenciados en la FIGURA 3.

FIGURA 3. Diagrama de Módulos con referencia de equipos



Fuente: Elaboración propia.

Módulo de visualización: Pantalla IPS de siete pulgadas, con panel táctil capacitivo, resolución de hardware de 1024 x 600.

Características:

- Táctil capacitivo, admite hasta cinco puntos táctiles.
- Panel táctil capacitivo de vidrio templado, dureza 6 H.
- Interfaz DSI, frecuencia de actualización de hasta 60 Hz.
- Al trabajar con Raspberry Pi, proporcionamos el controlador para el sistema operativo Raspberry Pi.
- El brillo es ajustable por software.
- Admite Pi 4B/3B+/3A+, CM3+/4. Debe usarse con cable adaptador.

Módulo de suministro de energía: Celda de batería prismática Lifepo4 3.2v 10ah de fosfato de iones de litio para EV y ESS.

Características:

- Capacidad Nominal 10 Ah.
- Tensión nominal 3,2 V.
- Condición de carga estándar 0.5C (10000mA), 3.65V(CC-CV), 2.5h.
- Corriente de carga máxima 1C (50A).
- Voltaje máximo de carga 3,65 V.
- Corriente máxima de descarga 3C (150A).
- Voltaje de corte de descarga 2,3 V.
- Voltaje en el momento del envío 3,2 ~ 3,4 V.
- Peso de la celda Aprox. 0,3 kg.

Módulo de procesamiento: *Raspberry Pi 4 Model B*. Este computador, de tamaño reducido, es el encargado de procesar la información del espectro radioeléctrico que está siendo adquirida por medio de la tarjeta SDR. En este módulo de procesamiento se encuentra instalado el software gratuito (GQRX), el cual está basado en GNU/Radio (herramienta de desarrollo libre que provee bloques de procesamiento de señal para implementar sistemas de radio definida por software); el software GQRX cuenta con una interfaz gráfica, la cual permite configurar los dispositivos conectados a la computadora, procesamiento datos I/Q de los dispositivos compatibles, cambio de frecuencia, ganancia y correcciones (frecuencia, balance I/Q), demoduladores AM, SSB, CW, FM-N y FM-W (mono y estéreo); modo FM especial para NOAA APT, filtro de paso de banda variable, AGC, SQUELCH y supresores de ruido, gráfica FFT y cascada, modo de analizador de espectro donde todo el procesamiento de señales está deshabilitado, control remoto básico a través de conexión TCP y transmisión de salida de audio a través de UDP.

Característica Raspberry Pi 4 Model B:

- Procesador Arm cortex-a72
- Frecuencia de reloj 1,5 GHz
- GPU Video Core vi (con soporte para OpenGL es 3.x).
- Memoria 4 GB lpddr4 SDRAM.
- Conectividad Bluetooth 5.0, WI-FI 802.11ac, gigabit Ethernet.
- Puertos GPIO 40 pines 2 x micro HDMI 2 x USB 2.0 2 x USB 3.0 CSI (cámara Raspberry pi) DSI (pantalla táctil) microSD conector de audio Jack USB-c (alimentación).

Módulo de adquisición de señales del espectro radio eléctrico: El Módulo RTL-SDR RTL2832 es un módulo de Radio Definida por Software (SDR: Software Defined Radio), la cual funciona con compatibilidad con el software GQRX, este módulo permite adquirir frecuencias desde 24MHz hasta 1766MHz, como radio FM, señales de AM, CW (código morse) y cualquier señal de radio sin cifrar, en la banda de VHF.

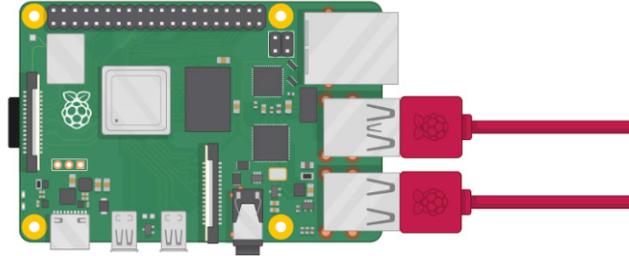
Características:

- RTL-SDR Blog V3 original.
- Recepción SDR completa desde 500Khz a 1,766 GHz ((*) 500 kHz a 24 MHz con prestaciones reducidas).
- ADC 8 bit.
- Chip RT820T2
- Salida opcional de 4,5V, para la alimentación de preamplificadores a través del cable coaxial.
- Conexión USB al ordenador.
- Conector de antena SMA dorado.
- Caja metálica que facilita la disipación de calor.
- Software de recepción de uso libre.
- Hasta 3,2 MHz de frecuencia de muestreo (ancho de banda en pantalla).

Integración de módulos de sistema de vigilancia

Para la implementación del prototipo del sistema de vigilancia se trabajó en la integración de los módulos para que existiera compatibilidad entre componentes y sus configuraciones. La primera parte de la integración se basó en la instalación del módulo de visualización (*pantalla de siete pulgadas DSI*) en el módulo de procesamiento, esto se realiza por medio del bus de datos DSI con el que cuenta la pantalla y el conector que dice *display* en la *Raspberry PI*.

FIGURA 4. Visualización Raspberry Pi 4 indicando la ubicación del puerto para pantalla DSI

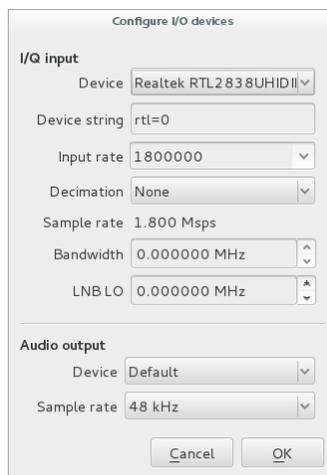


Fuente: Adaptado de (projects.raspberrypi, 2022)

Luego procedemos a realizar la configuración del módulo de procesamiento, el software GQRX y la SDR RTL; para esto se descargó e instaló la última versión del sistema operativo *Raspberry Pi OS – Bullseye*. Es importante que esté actualizado el sistema operativo para que no se tenga problemas con la instalación de software GQRX, luego se procede a instalar GQRX desde el repositorio de software de *Raspberry Pi*, siguiendo la siguiente ruta: abra el menú Aplicaciones, seleccione Preferencias → Agregar o quitar software y busque GQRX.

El siguiente paso consiste en configurar la RTL SDR en el software, esto se hace conectando la SDR a la *Raspberry Pi* y luego procedemos a abrir el GQRX; en la primera ventana nos aparecerá la opción DEVICE, allí seleccionamos la que dice *Realtek RTL 2838*.

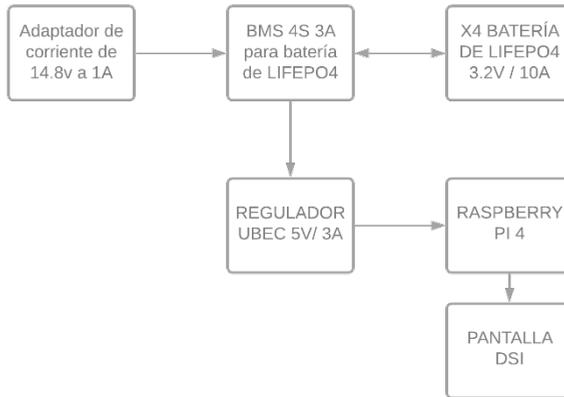
FIGURA 5. Ventana de configuración de GQRX y SDR- RTL



Fuente: Elaboración propia.

Un vez configurados y probados estos dos primeros equipos procedemos a diseñar y ensamblar la etapa de alimentación, la cual se realiza por medio de cuatro baterías de litio, ferro y fosfato (ver FIGURA 6).

FIGURA 6. Diagrama de bloques de módulo de alimentación



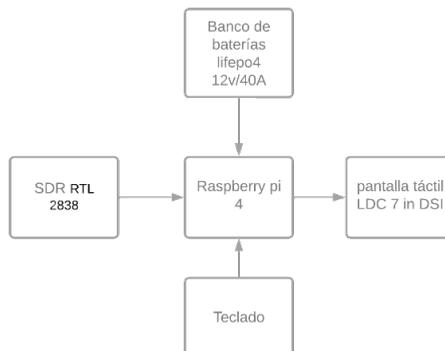
Fuente: Elaboración propia.

Resultados

Prototipo funcional

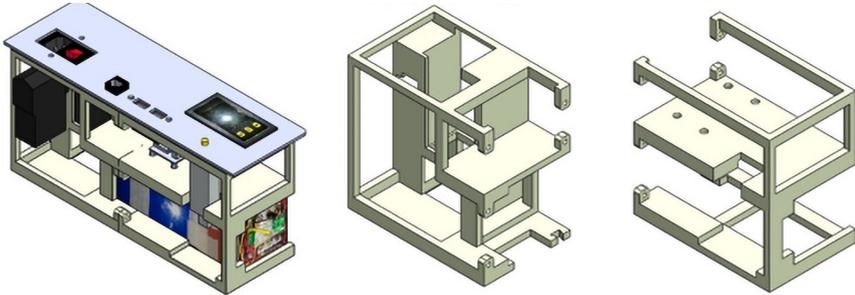
El diseño del sistema de prototipo propuesto se representa en el diagrama de bloques de la Ilustración 7. El sistema implementado tiene como elemento contenedor de los equipos una maleta *pelican iM2075 Storm*, la cual se adaptó por medio del diseño de una estructura interna para ubicación y anclaje de los diferentes componentes del sistema a la maleta (FIGURA 8).

FIGURA 7. Diagrama de bloques del diseño del prototipo



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 8. Diseño 3D de estructura interna para anclaje de equipos con maleta



Fuente: Elaboración propia.

FIGURA 9. Prototipo funcional ensamblado

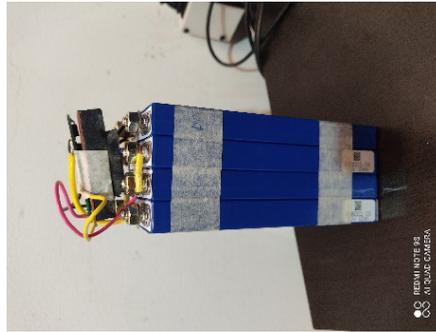


Fuente: Elaboración propia.

Sistemas de Alimentación

Las mediciones de consumo realizadas al sistema de alimentación del prototipo, el cual está compuesto por cuatro baterías de lifepo4 de 10A cada una (**FIGURA 10**), dio como resultado la **TABLA 1**, en la cual se evidencia que el consumo promedio de los componentes del sistema es de 7.2Ah. Bajo parámetros normales de funcionamiento, estas mediciones se realizaron en un lapso de diez días.

FIGURA 10. Conexionado de baterías lifepo4



Fuente: Elaboración propia.

En la siguiente tabla (**TABLA 1**), se evidencia el consumo promedio al día hasta lograr una profundidad de descarga máxima estacional (DOD) del 90%

TABLA 1. Consumo promedio al día/ Capacidad de promedio de la batería

Fecha	Día de prueba	Consumo promedio al día (Ah/día)	capacidad de la batería DOD 90%	Horas de autonomía del sistema
15/01/2022	1	7,5	36	4,8
16/01/2022	2	7,1	36	5,1
17/01/2022	3	7,3	36	4,9
18/01/2022	4	7,2	36	5,0
19/01/2022	5	7,2	36	5,0
20/01/2022	6	7,5	36	4,8
21/01/2022	7	7,1	36	5,1
22/01/2022	8	7,1	36	5,1
23/01/2022	9	7,1	36	5,1
24/01/2022	10	7,3	36	4,9
			Promedio de horas de funcionamiento	5,0

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente gráfico (**FIGURA 11**), evidencia el comportamiento de horas de autonomía del sistema de baterías con consumo en condiciones normales de operación.

FIGURA 11. Horas de autonomía del sistema



Fuente: Elaboración propia.

Validación de funcionalidad del prototipo

Para la validación de la funcionalidad del prototipo se realizó un caso de prueba bajo operaciones normales por parte de usuarios con conocimientos técnicos en el manejo de este tipo de equipos de vigilancia del espectro, evidenciando los siguientes resultados. Ver en (TABLA 2)

TABLA 2. Resumen de resultados obtenidos en proceso de validación y pruebas de prototipo

Parámetro	Actividad	Resultado
Pruebas y mejoras de prototipo respecto a la pantalla.	Análisis de información de pruebas y mejoras de prototipo TEMIS, suministrado por medio de encuesta a operadores y usuarios potenciales respecto a la pantalla.	El usuario determina que para el uso del módulo de visualización se debe tener en cuenta el tamaño; a pesar de que el diseño de prototipo TEMIS es portable y táctico, el tamaño de la pantalla actual (pantalla DSI 7 -in) no permite una visual eficiente para el trabajo a desarrollar en campo. Se siguiere por parte del usuario el uso de una pantalla de 12 – in, pero durante la revisión de fichas técnicas de pantallas LCD, se evidenció que el tamaño más adecuado para la implementación de la pantalla en el maletín es el de 10.1-in; por sus medidas y soportes laterales sí se requiere cambiar el tamaño de la pantalla; por el tamaño sugerido por el BINGE, se debe cambiar el tamaño del maletín.
Pruebas y mejoras de prototipo respecto a la Batería.	Análisis de información de pruebas y mejoras de prototipo TEMIS, suministrado por medio de encuesta a operadores y usuarios potenciales respecto a la Batería.	Se evidencia que la batería tiene una duración de cinco horas durante el funcionamiento del prototipo; se recomienda realizar una carga al 100% de la batería tras cada ciclo de uso del prototipo.

Parámetro	Actividad	Resultado
Pruebas y mejoras de prototipo respecto al sistema operativo.	Análisis de información de pruebas y mejoras de prototipo TEMIS, suministrado por medio de encuesta a operadores y usuarios potenciales respecto al sistema operativo.	Para un operador es fundamental el contar con una interfaz amigable con el sistema operativo; por eso es recomendable usar una tarjeta de desarrollo y/o mini pc que venga con Windows, el cual es un sistema operativo que ya conoce el operador. Se sugiere el uso de una tarjeta de desarrollo, la cual cuenta con un sistema operativo de Windows preinstalado LattePanda Alpha 864s with Win10 Pro.
Pruebas y mejoras de prototipo respecto al diseño.	Análisis de información de pruebas y mejoras de prototipo TEMIS, suministrado por medio de encuesta a operadores y usuarios potenciales respecto al diseño.	Se requiere mínimo de cuatro entradas USB 3.1 para la conexión de dispositivos de alta velocidad, tales como un disco duro, audífonos, teclado, mouse, entre otros. Salida HDMI para la conexión de un segundo monitor, lo cual permite trabajar adecuadamente en caso de que se necesite para ser utilizado en modo fijo.
Pruebas y mejoras de prototipo respecto a la funcionalidad.	Análisis de información de pruebas y mejoras de prototipo TEMIS, suministrado por medio de encuesta a operadores y usuarios potenciales respecto a la funcionalidad.	Debido a la solicitud de tamaño mínimo de pantalla de 12-in, se hace necesaria la evaluación de cambio de maleta por una de un tamaño que nos permita la incorporación de esta pantalla.
Pruebas y mejoras de prototipo respecto a la calidad de la recepción de la SDR.	Análisis de información de pruebas y mejoras de prototipo TEMIS, suministrado por medio de encuesta a operadores y usuarios potenciales respecto a la calidad de la recepción de la SDR.	Para los trabajos realizados en el área de operaciones hay que contemplar el uso de una SDR que tenga la opción de recibir señales análogas no solo en la banda de VHF, sino que también pueda recibir señales en la banda de HF. Según la revisión de fichas técnicas realizada, la opción más viable de SDR es la SDRPLAY rspduo, la cual cumple con el requerimiento de poder recibir señales en ambas bandas. Es necesario que el equipo final tenga integrada una Antena Icom AH-8000 Discone, 100Mhz - 3.3GHz.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

La información resultante de la validación de la funcionalidad del prototipo permite establecer aspectos a mejorar antes no considerados, tales como la incorporación de una antena de mayor tamaño, para aumentar la cobertura de operación del prototipo, por lo cual sugieren la integración de una antena tipo sombrilla. Para el software de procesamiento de señales se considera migrar al *software SDR console*, el cual únicamente funciona bajo sistema operativo Windows; por ende se pone en consideración el cambio de módulo de procesamiento, debido a que actualmente la que se implementó solo trabaja bajo un sistema operativo de Linux.

El módulo de visualización para una segunda versión del prototipo se debe cambiar por uno de más tamaño, debido a que no es tan fácil la visualización de los parámetros ni del espectro radio eléctrico. Basados en la funcionalidad en campo del prototipo, se propone la implementación de una SDR de entrada de canal doble para poder monitorear simultáneamente en la banda de HF y VHF.

Se evidencia que el diseño e implementación del prototipo funcional sí corresponde a una solución viable al problema presentado para el trabajo de investigación, pues su funcionalidad en campo permite dar una respuesta acertada a los inconvenientes operacionales y de vigilancia que se presentan, tomando en cuenta los conceptos emitidos en los resultados por parte de los operadores, los cuales resaltan algunas mejoras del prototipo en una segunda versión.

Por ende, las aplicaciones del prototipo a la hora de realizar un trabajo especializado con el fin de recolectar información desde el espectro radioeléctrico son correctas, con lo cual su aplicabilidad para la Inteligencia Estratégica es viable y necesaria para lograr obtener información específica, dependiendo de la necesidad del operador.

Referencias

Álvarez, D. A. (2008). PROYECTO FIN DE CARRERA Sistema GNSS (GLOBAL NAVIGATIO SATELLITE SYSTEM). Madrid: Escuela Politécnica Superior Universidad Autónoma De Madrid.

Algora, C. M. (2011). Radio Definido por Software usando MATLA. Santa Clara: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Departamento de Telecomunicaciones.

Bonser, W. (1998). SPEAKeasy Military Software Defined. New York: 1998 International Symposium on Advanced Radio Technologies- Air Force Research Laboratory Rome, NY.

Barragán Maldonado, J. J. (2017). Implementar un prototipo de analizador de espectro radioeléctrico utilizando sistema SDR. [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/8439>

Buitrago Betancourt, M. F. (2017). Sistema de Georreferenciación para el Monitoreo del Uso del Espectro Radioeléctrico. [Universidad de los Llanos]. <https://repositorio.unillanos.edu.co/handle/001/1141>

Cadena Muñoz, E., Eslava Blanco, H. J., & Franco Calderón, J. A. (2015). Gestión del espectro radioeléctrico en Colombia. In *Tecnura* (Vol. 19, pp. 159–173). Scieloco. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.3.a12>

Cáceres, J. (2001). INTELIGENCIA ESTRATÉGICA - Visión Preventiva y Visión Proactiva para la Decisión. Santiago, Chile: Revista Marina.

Domínguez, I. P. (2011). Laboratorio de Comunicaciones Digitales Radio Definida por Software. Sevilla: Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones Universidad de Sevilla.

Ferreira, R., Gaspar, J., Sebastião, P., & Souto, N. (2022). A Software Defined Radio Based Anti-UAV Mobile System with Jamming and Spoofing Capabilities. In *Sensors* (Vol. 22, Issue 4). <https://doi.org/10.3390/s22041487> PMID:35214388 PMCID:PMC8880238

Fokin, G., & Volgushev, D. (2022). Software-Defined Radio Network Positioning Technology Design. Transmitter Development. 2022 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), 153–158. <https://doi.org/10.1109/BlackSeaCom54372.2022.9858259>

Gracia, J. F. H. (2018). Tipos de Investigación. *Boletín Científico de La Escuela Superior Atotonilco de Tula*, 5 (9 SE - Resúmenes, mapas o diagramas de aplicación del conocimiento). <https://doi.org/10.29057/esat.v5i9.2885>

Hirane, C. S. (2016). Inteligencia y cooperación internacional, desafío para la función estatal de inteligencia en el marco de la coordinación interagencial: una aproximación desde Suramérica en el siglo XXI. Sangolquí, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Jordan, J. (2013). *Manual de seguridad internacional*. Madrid: Ministerio de Defensa España.

LEY ESTATUTARIA 1621 DE 2013, (abril 17) Reglamentada por el Decreto Nacional 857 de 2014; Artículo 17, monitoreo del Espectro Electromagnético e Intercepciones de Comunicaciones Privadas.

Madeira, J., Guerreiro, J., & Dinis, R. (2022). A Software Defined Radio Implementation of Physical Layer Security Using MIMO-SVD. 2022 International Young Engineers Forum (YEF-ECE), 75–79. <https://doi.org/10.1109/YEF-ECE55092.2022.9850114>

Pedraza, L. F., Forero, F., & Patricia Páez, I. (2014). Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá - Colombia. *Ingeniería y Ciencia* (Vol. 10, pp. 127–143). Scieloco. <https://doi.org/10.17230/ingciencia.10.19.6>

Ponce Pinos, J. E. (2019). Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico y análisis de factibilidad de uso de radio cognitiva en la banda UHF (450 – 512 MHz) para su optimización en la ciudad de Riobamba. [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. <http://dspace.espacech.edu.ec/handle/123456789/9439>

Powell, K., Yingst, A., Rahman, T. F., & Marojevic, V. (2022). Handover Experiments with UAVs: Software Radio Tools and Experimental Research Platform. *Proceedings of the 15th ACM Workshop on Wireless Network Testbeds, Experimental Evaluation*

& Characterization, 39–45. <https://doi.org/10.1145/3477086.3480841>
PMid: 34864250 PMCID: PMC8626872

Projects.raspberrypi. (1 de 8 de 2022). projects.raspberrypi Foundation . Obtenido de projects.raspberrypi Foundation : <https://projects.raspberrypi.org/en>

PG Cook y W. Bonser, “Resumen arquitectónico del sistema SPEAKeasy”, en IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 17, Núm. 4, págs. 650-661, abril de 1999, doi: 10.1109/49.761042 <https://doi.org/10.1109/49.761042>

Rojas, G. R. (2016). MONITOREO “PASIVO” DE COMUNICACIONES: UNA MANIOBRA LÍCITA DE INTELIGENCIA PARA LA SUPERVIVENCIA DEL ESTADO. Bogotá, D. C.: Universidad de los Andes - Facultad de Derecho.

Roba Iviricu, L. R., Díaz Hernández, J. M., & Portales Pestana, R. (2020). La radio cognitiva: desafíos futuros en el uso del espectro radioeléctrico. Avances, 22(1), 139 -167. <http://www.ciget.pinar.cu/%0Aajs/index.php/publicaciones/article/view/514/1599%0D>
Robustelli, U., Cutugno, M., Paziewski, J., & Pugliano, G. (2022). GNSS-SDR pseudorange quality and single point positioning performance assessment. Applied Geomatics. <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00457-9>

Rodríguez Ortiz, A. F. (2021). Simulación de aplicaciones con series trigonométricas de Fourier en sistemas de comunicaciones electrónicas. Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería en Sistemas ... <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/33226>

Vargas Chaparro, N. E. (2022). Los instrumentos de poder y su importancia para la Inteligencia Estratégica. Perspectivas en Inteligencia, 13(22), 33 - 48. <https://doi.org/10.47961/2145194X.268>

Glosario

A

AM: Sigla de la expresión inglesa Amplitude Modulation, ‘modulación de amplitud’.

C

Comunicaciones análogas: Sistema en el cual la energía electromagnética se transmite y recibe en forma analógica.

D

DSI: Interfaz de pantalla en serie.

E

Espectro radioeléctrico: Se denomina espectro electromagnético a la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas.

F

FM: Sigla de la expresión inglesa *Frequency Modulation*, ‘modulación de frecuencia’, ‘frecuencia modulada’.

G

GNU/radio: Herramienta de desarrollo libre y abierta que provee bloques de procesamiento de señal para implementar sistemas de radio definida por software.

H

HF: Frecuencia alta u onda corta (en inglés *High Frequency [HF]* o *shortwave [SW]*). Se refiere a la banda del espectro electromagnético englobada entre los 3 y los 30 megahercios.

L

LCD: Pantalla de cristal líquido.

LIFEPO4: Baterías de Fosfato de Hierro Litio (LiFePO4), son un tipo de baterías recargable de Ión Litio para aplicaciones que requieran elevadas potencias.

P

Portadoras de frecuencia: Onda, generalmente senoidal, modificada en alguno de sus parámetros (*amplitud, frecuencia o fase*) por una señal de entrada, denominada moduladora, con el fin de transmitir una información.

Prototipo: Un objeto diseñado para una demostración de cualquier tipo.

R

Radio Cognitiva: Paradigma de la comunicación inalámbrica en la cual tanto las redes como los mismos nodos inalámbricos cambian los parámetros particulares de transmisión o de recepción para ejecutar su cometido de forma eficiente, sin interferir con los usuarios autorizados.

S

SDR: Es un sistema de radiocomunicaciones donde varios de los componentes típicamente implementados son hardware (mezcladores, filtros, moduladores/demoduladores, detectores, etc.).

Señales de radiofrecuencia: Define una parte del espectro electromagnético.

U

UAV: Vehículo aéreo no tripulado, UAV, más apropiadamente RPAS, comúnmente conocido como Dron.

UHF: Frecuencia ultra alta es una banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 300 megahercios a 3 gigahercios.

USRP B210: Tarjeta con tecnología SDR que cuenta con características propias dadas por su fabricante ETTUS RESEARCH.

V

VHF: Frecuencia muy alta (del inglés *Very High Frequency* «*VHF*»); se corresponde con la banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de entre 30 y 300 megahercios.