

**Desarrollo de un Sistema de Monitorización del Espectro Radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 160MHz para la banda de 100KHz a 20GHz, utilizando el receptor digital SM200B**

Contreras Maldonado, Hernán Santiago

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones


Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones

Ing. León Vásquez, Rubén Darío

19 de marzo de 2021



## Document Information

<b>Analyzed document</b>	TESIS SANTI URKUND.docx (D98973150)	
<b>Submitted</b>	3/19/2021 9:07:00 PM	 <small>Escanea este código QR para:</small> <b>RUBEN DARIO LEON VASQUEZ</b>
<b>Submitted by</b>	León Vásquez Rubén Darío	
<b>Submitter email</b>	rdleon@espe.edu.ec	
<b>Similarity</b>	8%	
<b>Analysis address</b>	rdleon.espe@analysis.orkund.com	

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / urkut_Calderon_Reinoso FINAL-REVISADA.docx</b> Document urkut_Calderon_Reinoso FINAL-REVISADA.docx (D54457573) Submitted by: rdleon@espe.edu.ec Receiver: rdleon.espe@analysis.orkund.com	 14
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Urkut_TG_Ponce_Ulloa .docx</b> Document Urkut_TG_Ponce_Ulloa .docx (D54293265) Submitted by: rdleon@espe.edu.ec Receiver: rdleon.espe@analysis.orkund.com	 5
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / urkut_Acevedo_Recalde_Final.docx</b> Document urkut_Acevedo_Recalde_Final.docx (D54155386) Submitted by: rdleon@espe.edu.ec Receiver: rdleon.espe@analysis.orkund.com	 2
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / Urkut_Andrade Machado.docx</b> Document Urkut_Andrade Machado.docx (D54503058) Submitted by: rdleon@espe.edu.ec Receiver: rdleon.espe@analysis.orkund.com	 1
<b>SA</b>	<b>Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE / tesis_ok.docx</b> Document tesis_ok.docx (D97326752) Submitted by: rdleon@espe.edu.ec Receiver: rdleon.espe@analysis.orkund.com	 1



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**Desarrollo de un Sistema de Monitorización del Espectro Radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 160MHz para la banda de 100KHz a 20GHz, utilizando el receptor digital SM200B**”, fue realizado por el señor **Contreras Maldonado Hernán Santiago**; el cual ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 18 de marzo de 2021

Firma:



RUBEN DARIO  
LEON VASQUEZ

---

**Ing. León Vásquez Rubén Darío**

CC.: 1801654284



**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA**

Yo **Contreras Maldonado Hernán Santiago**, con cédula de ciudadanía n° 1716878606, declaro que el contenido ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Desarrollo de un Sistema de Monitorización del Espectro Radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 160MHz para la banda de 100KHz a 20GHz, utilizando el receptor digital SM200B”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

**Sangolquí, 16 de marzo de 2021**

Firma:



**Contreras Maldonado Hernán Santiago**

CC.: 1716878606





**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES**

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo **Contreras Maldonado Hernán Santiago**, con cédula de ciudadanía n° 1716878606, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Desarrollo de un Sistema de Monitorización del Espectro Radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 160MHz para la banda de 100KHz a 20GHz, utilizando el receptor digital SM200B”**, en el Repositorio Institucional cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

**Sangolquí, 18 de marzo de 2021**

Firma:

---

**Contreras Maldonado Hernán Santiago**

CC.: 1716878606

## **Dedicatoria**

Dedico este trabajo a Dios, como parte de lo poco que puedo retribuir por el infinito amor y misericordia que me ha mostrado día a día.

A mis padres, Yolanda y Hernán, este trabajo es el fruto de la labor incansable que hicieron y continúan haciendo al apoyarme incondicionalmente durante todas las etapas de mi vida.

A mi amada esposa, Estefi, por llevarme con amor a conseguir metas que ahora son de los dos, por los desvelos, el estrés y la ansiedad compartidos durante el desarrollo de este proyecto, por ser el motor de mi vida, por creer en mí y por no dejar que me rinda; eres la mayor responsable de que hayamos llegado hasta aquí.

**Hernán Santiago Contreras Maldonado**

## **Agradecimiento**

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por estar siempre presente y poner en mi camino a personas excepcionales que me han ayudado a conseguir este logro.

Gracias al Ing. Rubén León por todo el apoyo, paciencia, guía y dedicación; su labor como docente es y ha sido siempre inspiradora para quienes tuvimos la oportunidad de compartir un aula de clase con usted.

Agradezco también al Ing. Héctor Moya por compartir sin reservas el contenido de su investigación y confiarme este proyecto; gracias por las horas invertidas en ayudarme a comprender el funcionamiento del sistema, su labor ha sido fundamental para el desarrollo del presente proyecto.

Al ing. Alexis Tinoco, gracias por las observaciones realizadas y el tiempo invertido en la revisión del proyecto, sus aportes enriquecen y le agregan valor a esta investigación.

De manera general extender un sincero agradecimiento al personal del CICTE, a su director MsC. Pablo Albán Mayor de Comunicaciones, por abrirme las puertas y apoyarme durante todo el tiempo que duró este proyecto.

Gracias a mis docentes y al director de carrera MsC. Freddy Acosta, por cada minuto dedicado a la incansable labor de formar nuevos profesionales, su esfuerzo es un aporte valioso para la sociedad.

Finalmente quiero agradecer a mis compañeros, amigos, familiares e iglesia, por cada una de sus oraciones, por sus consejos por el apoyo y por dejarme saber que siempre puedo contar con ellos.

**Hernán Santiago Contreras Maldonado**

## Índice de Contenidos

Hoja de Resultados Verificación de Similitud de Contenidos .....	2
Certificado del Director .....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria .....	6
Agradecimiento .....	7
Resumen.....	11
Abstract.....	12
Generalidades .....	13
Antecedentes.....	13
Justificación e Importancia .....	13
Alcance .....	14
Objetivos.....	15
Objetivo General .....	15
Objetivos Específicos .....	16
Fundamentación Teórica.....	17
Análisis teórico del hardware SM200 .....	17
Aspectos destacados .....	17
Arquitectura de Interfaz .....	18
Preselector.....	20
Procesamiento de la señal en la FPGA .....	23
Rango dinámico .....	23
Protección de la entrada de RF del SM200 .....	25
Gestión de la energía .....	26
Refrigeración activa.....	27
Análisis y Descripción de Elementos .....	28
Receptor Digital Signal Hound SM200B.....	28
Panel Frontal del SM200B.....	29
LED de estado.....	31
Antena Logarítmica Periódica (LPDA).....	32
Diseño e Implementación del Sistema de Monitorización .....	35
Diseño .....	35
Hardware del sistema.....	36



Software del sistema .....	36
Implementación .....	36
Requisitos del sistema.....	36
Funcionamiento del SM200B.....	38
Abrir el dispositivo.....	39
Configurar el dispositivo.....	39
Adquirir medidas.....	39
Detener las mediciones.....	40
Cerrar el dispositivo.....	40
Recalibración.....	40
Implementación del SM200B en el Sistema Arturo.....	41
Pruebas y Resultados .....	44
Armado del sistema .....	44
Pruebas del sistema para la Banda de FM .....	45
Conclusiones y Recomendaciones.....	49
Conclusiones .....	49
Recomendaciones .....	51
Proyección de la investigación.....	52
Referencias Bibliográficas .....	53

### Índice de Tablas

Tabla 1 Filtros preseleccionados opcionales.....	22
Tabla 2 Filtros preseleccionados siempre activos.....	22
Tabla 3 Características de una antena LPDA 3G/4G/LTE/Wi-Fi.....	33

### Índice de Figuras

Figura 1 Arquitectura de Interfaz del SM200.....	20
Figura 2 Pérdida de inserción de preselector típica (dB) vs Frecuencia (MHz).....	21
Figura 3 Receptor Digital Signal Hound SM200B.....	29
Figura 4 Panel frontal del receptor digital Signal Hound SM200B.....	30
Figura 5 LED de estado (Status) del receptor digital Signal Hound SM200B.....	31
Figura 6 Antena Logarítmica Periódica.....	33
Figura 7 Patrón de radiación de la antena LPDA.....	34
Figura 8 Diseño del sistema de monitorización.....	35
Figura 9 Propiedades del sistema de la laptop Z50-70.....	38
Figura 10 Diagrama de clases sistema Arturo.....	41
Figura 11 Diagrama de clases sistema Arturo actual.....	42
Figura 12 Sistema de monitorización del espectro radioeléctrico.....	44
Figura 13 Sistema Arturo - Frecuencia central 98 MHz con span de 22 MHz.....	45
Figura 14 Sistema Arturo - Frecuencia inicial 96.47 MHz y frecuencia final de 96.34 MHz .....	46
Figura 15 Sistema Arturo - Frecuencia central de 100 MHz con span de 100 MHz.....	47
Figura 16 Sistema Arturo - Frecuencia central de 100 MHz con span de 160 MHz.....	47
Figura 17 Programa Spike - Frecuencia central de 100 MHz con span de 160 MHz.....	48

## Resumen

El proyecto a ejecutar tiene como objetivo desarrollar un sistema de monitorización de señales radioeléctricas con alta probabilidad de interceptación POI (superior al 90%) para la banda de 100 KHz a 20 GHz, bajo la filosofía del sistema Arturo, a través de metodologías *Original Equipment Manufacturer* (OEM) utilizando el receptor digital SM200B, enfocadas a incrementar las capacidades operativas de las Fuerzas Armadas que permitirá fortalecer la monitorización y control del espectro radioeléctrico de posibles amenazas que pongan en riesgo la seguridad de la ciudadanía y soberanía territorial, para lo cual se realiza el estudio y análisis de los métodos de detección de señales de RF (radio frecuencia) basados en las componentes en fase y cuadratura (I – Q), haciendo efectiva la aplicación de políticas y planes para el desarrollo tecnológico de las tecnologías de información y comunicación en el ámbito de la seguridad nacional, aumentando la eficiencia y la efectividad de respuesta del Ejército Ecuatoriano en situaciones de riesgo que requieran atención inmediata; para lo cual se desarrolla técnicas y algoritmos que se incluyen en el sistema Arturo y se evalúan experimentalmente en los sistemas de vigilancia y reconocimiento que están a disponibilidad del CICTE, como sistemas prototipo en diversas fases de implementación.

Palabras clave:

- **PROBABILIDAD DE INTERCEPTACIÓN POI**
- **METODOLOGÍAS (OEM)**
- **RECEPTOR DIGITAL SM200B**
- **COMPONENTES (I – Q)**

### **Abstract**

The objective of the project to be executed is to develop a radio signal monitoring system with high probability of intercept POI (over 90%) for the 100 KHz to 20 GHz band, under the Arturo system philosophy, through Original Equipment Manufacturer (OEM) methodologies using the SM200B digital receiver, focused on increasing the operational capabilities of the Armed Forces that will strengthen the monitoring and control of the radio electric spectrum of possible threats that jeopardize the security of citizens and territorial sovereignty, For this purpose, the study and analysis of RF signal detection methods based on I-Q components will be carried out, making effective the application of policies and plans for the technological development of information and communication technologies in the field of national security, increasing the efficiency and effectiveness of the Ecuadorian Army's response in risk situations that require immediate attention; For this purpose, techniques and algorithms were developed and included in the Arturo system and were experimentally evaluated in the surveillance and reconnaissance systems available to CICTE, as prototype systems in various stages of implementation.

Key words:

- **PROBABILITY OF INTERCEPT POI**
- **(OEM) METHODOLOGIES**
- **DIGITAL RECEIVER SM200B**
- **I – Q COMPONENTS**

## **Generalidades**

### **Antecedentes**

En la actualidad la Guerra Electrónica continúa siendo un factor determinante en las operaciones militares que realizan las Fuerzas Armadas con la finalidad de preservar y controlar la soberanía de las naciones.

La Universidad de Fuerzas Armadas ESPE con su Centro de Investigación de Aplicaciones Militares (CICTE) junto al AGRUCOMGE (Agrupamiento de Comunicaciones y Guerra Electrónica) organismo perteneciente al Ejército Ecuatoriano, conscientes de esta realidad, se han esforzado desde hace algunos años por recuperar varios sistemas de guerra electrónica existentes y volverlos operativos.

El presente proyecto de investigación nace con la finalidad de incrementar las funcionalidades y mejorar la capacidad actual que tiene el sistema de monitorización del espectro radioeléctrico desarrollado por Calderón y Reinoso en el 2019, ofreciendo así al Ejército Ecuatoriano un nuevo y mejor sistema para la monitorización de señales.

### **Justificación e Importancia**

El presente proyecto es parte del programa que ha venido recuperando y operativizando los sistemas de guerra electrónica existentes en el AGRUCOMGE, y contribuirá con el desarrollo del sistema de monitorización de señales radioeléctricas con alta POI (superior al 90%) para sistemas públicos de seguridad y vigilancia, con tecnología desarrollada en los laboratorios del CICTE, es decir; cumpliendo con todas las etapas de un proceso coherente de I+D+i (Concebir, Diseñar, Implementar y Operar CDIO).

Los principales problemas que se presentan a la hora de usar sistemas ya existentes en el mercado de Guerra Electrónica son: altos costos de los existentes y de



alta reserva (en la mayoría propietarios), muchas veces la falta de soporte, así como también la deficiencia en la transferencia de tecnología por ser sistemas cerrados de producción. Contrario a ello, los sistemas que se desarrollan en base a la investigación aplicada e ingeniería inversa que pueden subsanar estos inconvenientes con costos muy reducidos y con garantía de una transferencia de tecnología real dentro de todos los procesos de implementación. Por lo tanto, el seguimiento basado en la detección e identificación debe superar estas dificultades mediante el uso de diferentes estrategias (técnicas de detección, identificación y gestión de los datos obtenidos), lo que a través de la investigación y desarrollo pueden ser solventados dando como resultado mejores herramientas que sobre todo son parte intrínseca y propietaria del sistema general de vigilancia y seguridad.

Finalmente, debido a que el sistema deseado implica desarrollar técnicas y algoritmos endógenos para monitorear el espectro radioeléctrico hasta 20GHz, en coordinación con los grupos de desarrollo del arreglo de antenas y localización (DF) de un objetivo específico dentro de múltiples objetivos, justifica ser realizado bajo la filosofía ARTURO.

### **Alcance**

Como producto del desarrollo tecnológico y las actividades de la colaboración conjunta en este proyecto se espera obtener:

- Nuevas funcionalidades del Sistema Arturo, mediante la generación de algoritmos eficaces y eficientes para la monitorización de señales radioeléctricas con alta POI (superior al 90%), de manera que el sistema posea la capacidad automática o semi automática de identificar y elegir un objetivo(s) para aplicación de contra medidas.

- Nuevos algoritmos, procesos, métodos, etc. aplicados a diversas pruebas locales, para su posterior ejecución y que finalmente podrán ser implementados en sistemas de vigilancia y seguridad de tipo público.
- Un documento que dé cuenta de los principales ejes del intercambio y lecciones aprendidas delineadas entre los participantes.
- Una comunidad de práctica y aprendizaje sobre temas de *Information Warfare*, para el intercambio de información, la articulación de procesos de aprendizaje y de colaboración en futuros proyectos de investigación de sistemas de inteligencia de señales de última generación.
- Generar tiempos más rápidos de respuesta por parte de las organizaciones de seguridad y emergencia. Mejorando así la gestión de riesgos, la reacción inmediata de fuerzas de seguridad, la identificación específica de objetivos, el control de elementos del entorno a través del seguimiento de objetivos específicos. Además, se obtendrá un incremento de la efectividad y eficiencia de la infraestructura instalada. Se dispondrá de sistemas desarrollados en base a tecnología de tipo *open source* con propiedad de los contribuyentes y beneficiarios finales.
- Participación en congresos nacionales o internacionales.

## **Objetivos**

### ***Objetivo General***

Desarrollo de un sistema de monitorización de señales radioeléctricas con anchos de banda instantáneos de 160 MHz para la banda de 100 KHz a 20 GHz con alta POI (superior al 90%).

***Objetivos Específicos***

- Realización de un estudio profundo y crítico del estado del arte en relación con la monitorización de señales radio eléctricas.
- Implementar un sistema de monitorización basado en la filosofía del sistema Arturo que ha sido recuperado y puesto operativo por el AGRUCOMGE.
- Disminuir el peso, volumen, costo computacional y precio del sistema.
- Disponer de tecnología obtenida a través de la investigación y enfocada hacia aplicaciones reales con software libre.
- Probar los algoritmos del sistema de monitorización de señales radioeléctricas disponibles en el CICTE.
- Desarrollar nuevos algoritmos para incrementar las funcionalidades del sistema Arturo.
- Generar una participación sinérgica en el proceso de I+D+i entre instituciones gubernamentales de investigación, docencia y de prestación de servicios públicos y de emergencias.

## Fundamentación Teórica

### **Análisis teórico del hardware SM200**

Los sistemas de guerra electrónica de anteriores generaciones estaban basados fundamentalmente en la estructura del receptor superheterodino, donde un generador de barrido escaneaba una porción del espectro radioeléctrico. La velocidad del proceso de escaneo determinaba que la probabilidad de interceptación (POI) sea baja y para poder incrementar esta POI los operadores se veían obligados a escanear anchos de banda lo más estrechos posibles (Yazicigil, Haque, Wright, & Kinget, 2016, págs. 1032-1036).

El desarrollo tecnológico de las últimas dos décadas se ha centrado en lo que se conoce ampliamente como representación de valor compleja de un proceso estocástico pasa banda (el ancho de este pasa banda es conocido como ancho de banda instantáneo), a través de sus componentes en fase (I) y cuadratura (Q). Siendo I y Q procesos de naturaleza pasa bajos, estos son digitalizados con tasas de muestreo adecuadas y número de bits de muestra suficientes para que la relación señal a ruido de cuantización garantice la calidad de la representación digital. Una vez digitalizados I – Q, son procesados con la Fast Fourier Transform (FFT) para disponer de su Densidad Espectral de Potencia (Yazicigil, Haque, Wright, & Kinget, 2016, págs. 1032-1036).

### ***Aspectos destacados***

El SM200 utiliza un oscilador de cristal controlado por horno OCXO (oven controlled cristal oscillator) de 100 MHz de ruido de fase ultra bajo, que se multiplica y filtra para generar una referencia limpia de 1 GHz. El oscilador local (LO) utiliza esta referencia de 1 GHz en una arquitectura de bucle, lo que proporciona un ruido de fase muy bajo.

El receptor digital de la serie SM200 cuenta con un diseño que le permite tener un IP3 alto y un DANL bajo en todos los niveles de entrada, dando como resultado una eficacia en la capacidad de “monitorear el espectro a máxima sensibilidad sin preocuparse por sobrecargar el extremo frontal o generar productos de intermodulación excesivos” (Signal Hound, 2020, pág. 15). Sumado a ello, el SM200 está diseñado bajo una representación de “valor compleja ( $I + jQ$ ) de un proceso estocástico pasa banda (con anchos de banda instantáneo de 160 MHz)” (Signal Hound, 2020, pág. 15), mismo que deja abierta la posibilidad de reconfigurar completamente sus filtros LO, RF y FI en menos de 20 microsegundos, y posee un tiempo de salto de frecuencia mínimo de 120 microsegundos; los microsegundos restantes, que serían 100, son utilizados para “procesar un bloque del espectro de 160 MHz, permiten que el SM200 realice un barrido de 2 GHz en menos de 2 ms, más de 1 THz / seg” (Signal Hound, 2020, pág. 15). Esto representa aproximadamente 40 veces más la velocidad del BB60C utilizado en [referencia de la tesis de Calderón y Reinoso].

Las velocidades de barrido continuas de THz / s permiten al SM200 monitorear intervalos mayores de 160 MHz, cientos o miles de veces por segundo. Por ejemplo, utilizando una resolución de banda ancha (RBW) de 30 kHz, un usuario puede barrer de 700 MHz a 2700 MHz, 500 veces por segundo.

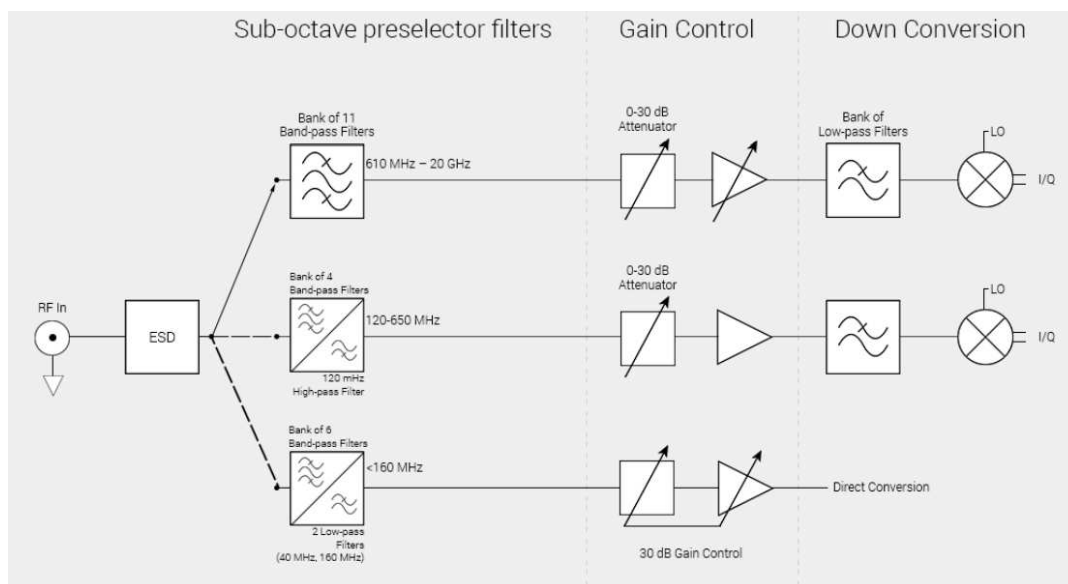
### ***Arquitectura de Interfaz***

El SM200 es esencialmente un receptor de baja IF (Intermediate Frequency), se ha elegido esta arquitectura para complementar nuestro oscilador local (LO) de bajo ruido de fase, por ende, evitando las “deficiencias de la conversión de IF cero (directa) y debido a la disponibilidad de demoduladores de conversión directa de alta linealidad y mezcladores I / Q” (Signal Hound, 2020, pág. 16), factor que beneficia el análisis del dispositivo.



El SM200 cuenta con cuatro bandas de mezclador que cubren de 120 MHz a 20 GHz, además, una banda de conversión directa que permite la cobertura de 100 kHz a 160 MHz. Añadido a esto, un preselector que consta de “21 filtros pasa banda de sub-octavas, cubre de 20 MHz a 20 GHz” (Signal Hound, 2020, pág. 16). Por debajo de 650 MHz, el preselector puede llegar a omitirse para que la velocidad de barrido aumente y mejore la respuesta de fase (mostrada como filtros de paso alto y paso bajo en lugar de filtros pasa banda), entonces, garantizando 40 MHz de ancho de banda utilizable. Una vez que el preselector está habilitado, pueden estar disponibles tan solo 6 MHz de datos I / Q, especialmente debajo de lo que vendría a ser la frecuencia central de 100 MHz.

La presencia de cuatro mezcladores separados, optimizados para IP3 y rechazo de imágenes dentro de su rango operativo, convierten “la señal de RF entrante en señales I / Q de banda base” (Signal Hound, 2020, pág. 16). En el SM200, el “LO normalmente se inyecta por encima de la RF en 15-180 MHz” (Signal Hound, 2020, pág. 16), esto genera una señal I / Q de banda base, misma que se va a ir filtrando y luego se digitaliza a 500 MSPS, transmitiendo a la FPGA Arria 10 de Intel, como se observa en la Figura 1 a continuación:

**Figura 1***Arquitectura de Interfaz del SM200*

*Nota.* La figura representa la arquitectura del SM200B. Tomado de: (Signal Hound, 2020)

**Preselector**

El preselector “es una colección de filtros de sub-octavas que abarcan de 20 MHz a 20 GHz” (Signal Hound, 2020, pág. 16), esta elimina la energía fuera de banda de la entrada de RF, evitando entonces que se produzca cualquier tipo de amplificación o mezcla. Cabe recalcar que muchos de los filtros preseleccionados se pueden omitir a fin de aumentar la velocidad de barrido y el ancho de banda disponible a bajas frecuencias, esto a expensas de IP2.

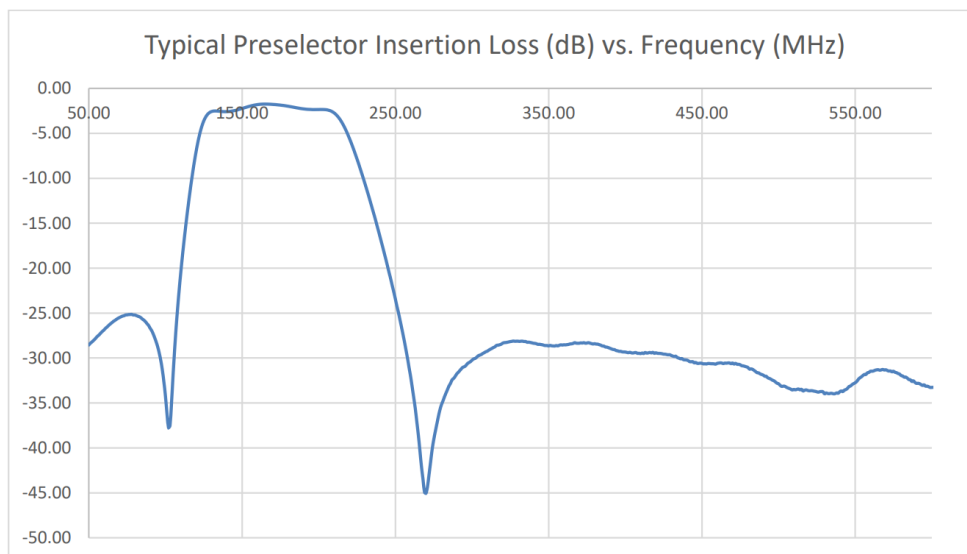
Dentro del modo de barrido antes mencionado la API llega a compensar la pérdida de inserción de los filtros de preselector opcionales, pero cuando “I / Q fluye por debajo de 645 MHz con el preselector encendido, solo se aplica una corrección de amplitud promedio” (Signal Hound, 2020, pág. 16), esto aumentará el error de amplitud

típico que se llega a observar en los bordes del filtro en una pequeña cantidad (típicamente 0,5 dB). Ahora bien, en los modos de análisis de espectro, este error se elimina y se mantiene la precisión de amplitud total. Es necesario resaltar que una superposición mínima de 6 MHz garantiza que las señales VHF de uso común se puedan transmitir incluso si el preselector estuviera activado.

Por otro lado, cuando se omiten los filtros de preselección opcionales, “los 40 MHz completos de transmisión I / Q están disponibles en todas las frecuencias” (Signal Hound, 2020, pág. 16). Sin embargo, por debajo de 645 MHz, el hardware de 160 MHz en tiempo real no está disponible. Por debajo de 650 MHz, todos los preselectores van a contar con una forma similar a la que se muestra en la Figura 2 (filtro 7):

## Figura 2

*Pérdida de inserción de preselector típica (dB) vs Frecuencia (MHz)*



*Nota.* Tomado de: (Signal Hound, 2020)

**Tabla 1***Filtros preseleccionados opcionales*

## Optional Preselector Filters

Filter	Range used for Sweeps (MHz)	Useable Range for I/Q streaming	Bypass Filter (Preselector Off)
0 (LPF)	0-19.5	0-40	160 MHz LPF
1	19.5-29.3	19-31	160 MHz LPF
2	27-36	23.8-39	160 MHz LPF
3	36-47	33-52	160 MHz LPF
4	47-63	42-68	160 MHz LPF
5	63-92	59-100	160 MHz LPF
6	92-136.7	86-146	160 MHz LPF
7	136.7-198	130-210	110 MHz HPF
8	198-293	190-303	110 MHz HPF
9	293-410	280-440	110 MHz HPF
10	410-644.5	400-645	110 MHz HPF

*Nota.* Recuperado de: (Signal Hound, 2020)

**Tabla 2***Filtros preseleccionados siempre activos*

## Always-On Preselector Filters

Filter	Frequency Range used for Sweeps
11	644.5 - 957 MHz
12	957 - 1465
13	1465-1855
14	1855 - 2400
15	2400 - 3260
16	3260 - 4460
17	4460 - 6150
18	6150 - 8180
19	8180 - 10960
20	10960 - 14000
21	14000 - 20000

*Nota.* Recuperado de: (Signal Hound, 2020)

### ***Procesamiento de la señal en la FPGA***

Los datos digitalizados se procesan con un filtro FIR (Finite Impulse Response), mismo que es especial para rechazar la respuesta de la imagen y llegar a aplanar la respuesta en frecuencia. Seguido a esto, los datos se sintonizan “digitalmente para seleccionar la banda lateral inferior, se deciman a 250 MSPS I/Q y se distribuyen a varios bloques de procesamiento de señales dentro de la FPGA” (Signal Hound, 2020, pág. 19). El bloque de procesamiento de barrido rápido toma una breve “ráfaga de datos I/Q de 250 MSPS, realiza una FFT, la convierte a dB y almacena el resultado con una resolución de 0,01 dB” (Signal Hound, 2020, pág. 19) mismo que se refleja en un registro de 16 bits. Esto combinado con un LO de conmutación rápida permitiendo velocidades de barrido de THz/seg con un RBW de 30 kHz.

### ***Rango dinámico***

En este apartado se describirá en primera instancia el bloque de procesamiento en tiempo real, mismo que “toma un flujo continuo de datos I/Q de 250 MSPS y realiza FFTs superpuestas al 50%, para el buffer de fotogramas en tiempo real, los resultados de estas FFTs se convierten en dB” (Signal Hound, 2020, pág. 19), y se trazan en una imagen bidimensional que muestra la cantidad de veces de la frecuencia en esa amplitud durante el intervalo de fotogramas en tiempo real. El desplazamiento y el escalado, de dB a píxeles, se controlan mediante su nivel de referencia y dB/div, por otro lado, para el “buffer de trazado en tiempo real, se selecciona el mínimo/máximo o el promedio” (Signal Hound, 2020, pág. 19). En el caso del promedio, los resultados de la FFT se convierten en potencia y se suman, posterior a ello, cuando se selecciona mín/máx, la FFT se convierte a una resolución de 0,01 dB, misma que se procesará de



un buffer de traza de retención mínima y máxima. Se debe recordar que el SM200B incluye un buffer de captura DDR de 2 GB a la velocidad I/Q de 250 MSPS.

El bloque de procesamiento I/Q Streaming del SM200A/B sintoniza primero los datos I/Q de 250 MSPS a una nueva frecuencia central, y luego los decima por 5, para proporcionar datos I/Q de 50 MSPS con un ancho de banda utilizable de 40 MHz. Hay etapas adicionales de decimación por 2 para decimar aún más los datos a 25, 12,5 o 6,25 MSPS si se desea. Esto puede reducir significativamente los requisitos de procesamiento del PC para señales de menor ancho de banda. Dentro de las aplicaciones LTE, el hardware también puede remuestrear a 61,44, 30,72, 15,36 y 7,68 MHz.

El bloque de procesamiento de flujo I/Q del SM200C primero sintoniza los datos I/Q de 250 MSPS a una nueva frecuencia central, y luego remuestrea por 4/5, para proporcionar datos I/Q de 200 MSPS con un ancho de banda utilizable de 160 MHz. Se hacen presentes las “etapas adicionales de decimación por 2 para decimar aún más los datos a 100, 50 o 25 MSPS” (Signal Hound, 2020, pág. 19) si se desea. Esto puede reducir significativamente los requisitos de procesamiento del PC para señales de menor ancho de banda. Para aplicaciones LTE, el hardware también puede remuestrear a 122,88, 61,44, 30,72 y 15,36 MHz, ahora bien, “las frecuencias de muestreo I/Q de 50 MS/s o inferiores están totalmente corregidas y las tasas de muestreo superiores a 50 MS/s, especialmente cuando se utilizan frecuencias inferiores a 700 MHz” (Signal Hound, 2020, pág. 19), pueden utilizar datos de corrección interpolados o extendidos, y no están totalmente calibrados, para estas altas tasas de muestreo, la precisión especificada se mantiene normalmente, pero no está garantizada.

Por último, el rango dinámico tiene muchas definiciones, pero una definición común en el análisis del espectro “es  $2/3(\text{TOI} \pm \text{DANL})$ , un número típico para 1 GHz,

nivel de referencia de -10 dBm (atenuador de 10 dB), sería  $TOI = +21$  dBm,  $DANL = -150$  dBm (1 Hz RBW)” (Signal Hound, 2020, pág. 19). Es decir, el rango dinámico,  $2/3$  ( $TOI \pm DANL$ ) = 114 dB, obteniendo como resultado principalmente una función del RBW y la frecuencia.

### ***Protección de la entrada de RF del SM200***

El conmutador frontal del SM200 posee protección ESD, pero aun así es posible que se produzcan daños por ESD, además, las señales superiores a +20 dBm de pico (no RMS) también pueden causar daños. En adición, algunos eventos comunes que pueden conducir a daños en el extremo frontal, estos incluyen:

- Aplicar más de +20 dBm de potencia de pico, como una antena expuesta a un pulso de radar.
- ESD de una antena pasiva, ya sea por la descarga de un elemento de la antena, o por la conexión de una gran antena o cable que haya acumulado una carga estática (Signal Hound, 2020, pág. 21).

Para cualquier aplicación que pueda exponer al SM200 a daños en la parte frontal, incluyendo a esto “la conexión a antenas activas o pasivas, se recomienda un limitador coaxial para proteger la entrada” (Signal Hound, 2020, pág. 21). Un limitador protegerá contra la sobrecarga de la entrada, de tal forma que se eleve normalmente el nivel de daño por encima de los 2 vatios, además de ofrecer una protección adicional contra la ESD. También ofrecerá cierta protección contra el pico de energía que se obtiene cuando se conecta a un equipo con una tensión continua o estática presente” (Signal Hound, 2020, pág. 21). Ante lo mencionado la energía puede “superar significativamente los +20 dBm durante varios microsegundos” (Signal Hound, 2020, pág. 21). En general, el rendimiento a niveles bajos de señal de entrada representa únicamente “la pérdida de inserción del limitador, mientras que altos niveles de señal

habrá cierta no linealidad y los productos de intermodulación resultantes” (Signal Hound, 2020, pág. 21). Ahora bien, un limitador típico tendrá un “IP3 alrededor de +30 dBm, por lo que para señales de entrada por debajo de -20 dBm debería haber poco o ningún efecto en la linealidad del SM200” (Signal Hound, 2020, pág. 21). Si se trata de una antena pasiva montada con un cable coaxial largo, puede estar acumulando una carga estática importante hasta que se conecte. Por esta razón, podría tener más sentido mantener el limitador conectado a la antena en lugar del SM200. Sin embargo, en la mayoría de los casos no es necesario un bloque de CC para las antenas pasivas.

### ***Gestión de la energía***

Es necesario tener precaución después de que el SM200 haya estado funcionando durante un tiempo, ya que puede estar caliente. Hay que recordar que cuando el SM200 funciona a pleno rendimiento, suele consumir entre 25 y 30 vatios de energía. Esto puede dar lugar a dos problemas: “1. Las aplicaciones alimentadas por batería tienen un alto índice de agotamiento 2. El calor generado hace que la unidad se sobrecaliente y que se produzcan daños” (Signal Hound, 2020, pág. 22), además de apagarse en climas cálidos. A fin de reducir este factor se dispone de un estado de potencia reducida cuando se necesita, dando lugar al estado que “reduce el consumo de energía a 12-14 vatios, y requiere unos 30 ms para reanudar las operaciones” (Signal Hound, 2020, pág. 22). El uso del estado de potencia reducirá significativamente el consumo de energía, y aunque puede darse lugar a reanudar “el barrido o la transmisión en 30 ms, el ruido de amplitud y de fase del SM200 tarda un segundo completo en estabilizarse completamente después de salir de este estado” (Signal Hound, 2020, pág. 22). Ante esto se observan unas variaciones de amplitud de 0,7 dB, y varios dB de ruido de fase extra en este estado, en el software de Spike, esta característica se puede activar aumentando el intervalo de barrido, si sólo necesita

barrer una vez por segundo, el consumo de energía puede reducirse a la mitad típicamente. Ahora bien, algunas aplicaciones remotas pueden requerir horas o días de tiempo de desconexión entre usos, ya que en ellas la vida de la batería es muy importante. Se debe apagar remotamente un PC o portátil equipado con vPro o tecnología similar, ya que de lo contrario el voltaje del USB caerá a 0V, el SM200 lo detectará y se apagará completamente. La “FPGA del SM200 tiene una temperatura máxima de funcionamiento del núcleo de 100 °C. Si se supera esta temperatura, el SM200 apagará automáticamente los relojes de RF, LO y del sistema” (Signal Hound, 2020, pág. 22), ante esto el software debe cerrar y volver a abrir, así, después de que el dispositivo se haya enfriado lo suficiente reanudará las operaciones.

### ***Refrigeración activa***

Se debe mencionar que de forma opcional puede tener lugar la instalación de un módulo de refrigeración activa. Se recalca también que “el aire forzado reduce la diferencia de temperatura entre el SM200 y la temperatura del aire ambiente” (Signal Hound, 2020, pág. 22). El ventilador se encenderá cuando el dispositivo esté caliente y se apagará cuando se enfríe. La vibración de los ventiladores puede afectar al ruido de fase, por lo que el ventilador puede apagarse durante las mediciones del ruido de estas.

Dentro de este capítulo se analizó la teoría del hardware de los componentes que vienen integrados en el receptor digital Signal Hound SM200B. Se describen las partes más importantes, el funcionamiento de estas y los parámetros principales de cada característica, a fin de dar a conocer la capacidad del dispositivo utilizado en el desarrollo del proyecto.

## **Análisis y Descripción de Elementos**

Dado que en este proyecto se busca ampliar la capacidad de monitorización del espectro y mejorar el rendimiento que actualmente tiene el sistema desarrollado por Calderón y Reinoso en el 2019, el objetivo es lograr que la monitorización del espectro radioeléctrico se realice con anchos de banda instantáneos de 160MHz para la banda de 100KHz a 20GHz, utilizando el receptor digital Signal Hound SM200B. A continuación, se detallan los elementos utilizados en el desarrollo de este sistema.

### **Receptor Digital Signal Hound SM200B**

El SM200B que se muestra en la Figura 3, es un analizador de espectro y receptor de monitorización de alto rendimiento que cuenta con “un ajuste de 100 kHz a 20 GHz, el analizador tiene 160 MHz de ancho de banda instantáneo (IBW), 110 dB de rango dinámico, velocidad de barrido de 1 THz / seg a 30 kHz RBW” (Signal Hound, s.f, pág. 2) y un rendimiento de ruido de fase lo suficientemente bajo como para contribuir con menos del “0,1% de error en las mediciones de EVM (Magnitud del Vector de Error)” (Signal Hound, s.f, pág. 2), es decir, hace factible un rendimiento eficaz.

**Figura 3**

*Receptor Digital Signal Hound SM200B*



*Nota.* Fotografía del SM200B utilizado en el proyecto. Fuente: (Contreras, 2021)

El SM200 es un analizador de espectro en tiempo real con una alta velocidad de escaneo y un alto rango dinámico, que se comunica con la PC a través de un enlace de datos de alta velocidad mediante un puerto USB 3.0.

#### ***Panel Frontal del SM200B***

El panel frontal tiene 8 conectores como se observa en la Figura 4:

**Figura 4**

*Panel frontal del receptor digital Signal Hound SM200B*



*Nota.* Fotografía del panel frontal del SM200B utilizado en este proyecto. Fuente: (Contreras, 2021)

De izquierda a derecha la descripción de los conectores es la siguiente:

1. Entrada de alimentación de 9-16 V CC: el equipo viene con una fuente de alimentación incluida de 12 V y especifica que también se puede usar batería de 40 watts.
2. Entrada de RF de 50 ohmios tipo N(F): no se debe superar los +20 dBm o se podrían producir daños en el equipo.
3. Puerto de antena GPS SMA: el equipo trae una antena GPS (incluida) que se puede conectar en este puerto para georeferenciar las medidas.
4. Trigger de entrada: el flanco ascendente o descendente de una señal digital de 3,3 V o 5 V se puede utilizar para disparar en los modos de transmisión I / Q.
5. Salida de 10 MHz: se utiliza para sincronizar equipos externos que requieren una entrada de 10 MHz
6. Entrada de 10 MHz: se utiliza para sincronizar a una fuente externa de 10 MHz. Se recomienda de 0 a +15 dBm.

7. Conector USB 3: se utiliza para la transferencia de datos con la PC. Tanto la fuente de alimentación como el USB 3.0 deben estar conectados para que el dispositivo se encienda.

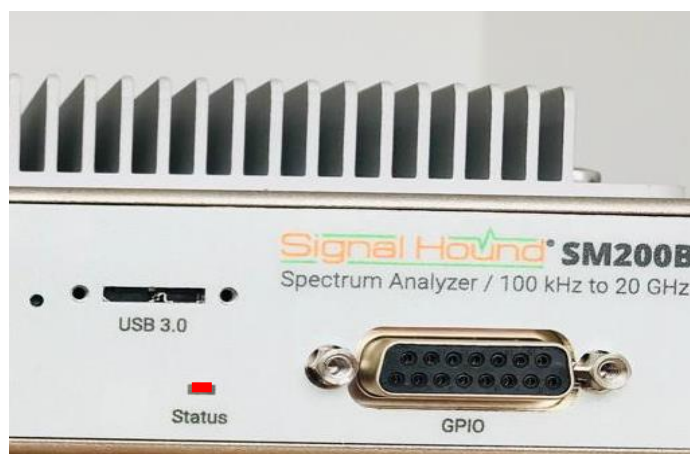
8. Puerto GPIO (DB15): se puede utilizar para controlar equipos externos, como un conmutador de antena externo. Los comandos pueden estar insertados dentro de un barrido.

### **LED de estado**

El LED de estado (Figura 5) alterna entre rojo y verde según se procesan los comandos y se generan los barridos del espectro. Existen dos tipos de estados: estados de inicialización y estados operacionales; y de acuerdo con los estados en que se encuentre el dispositivo, los colores del LED deben interpretarse de distintas maneras, a continuación, se describe el significado de los colores del LED.

### **Figura 5**

*LED de estado (Status) del receptor digital Signal Hound SM200B*



*Nota.* Fotografía del LED de estado del SM200B usado en este proyecto. Fuente: (Contreras, 2021)



**Estados de Inicialización:**

- **APAGADO ±** Hasta que el cable de la alimentación y el cable USB estén ambos conectados.
- **NARANJA/ROJO ±** durante la inicialización del dispositivo.
- **VERDE ±** una vez inicializado el equipo.

**Estados operacionales:**

- **ALTERNADO ROJO/VERDE ±** cuando el dispositivo está transmitiendo por el USB 3.0.
- **VERDE ±** cuando el equipo entra en estado IDLE.
- **El equipo se queda en ROJO ±** Identifica una falla.
- **APAGADO ±** cuando el equipo ha perdido su alimentación.

**Antena Logarítmica Periódica (LPDA)**

La antena utilizada en este proyecto es una antena direccional de banda ancha de 10 dBi con registro de alta ganancia y 50 ohmios de impedancia. Este tipo de antenas es comúnmente utilizado para las bandas 3G/4G/LTE/Wi-Fi. En el presente proyecto se utilizó el modelo TDJ-0727DSAN10 que trabaja en el rango de 700-2700 MHz, misma que se visualiza en la Figura 6:

**Figura 6****Antena Logarítmica Periódica**

*Nota.* Fotografía de la antena LPDA genérica utilizada en este proyecto. Fuente: (Contreras, 2021)

Las características de la antena se muestran a continuación en la tabla 3:

**Tabla 3****Características de una antena LPDA 3G/4G/LTE/Wi-F**

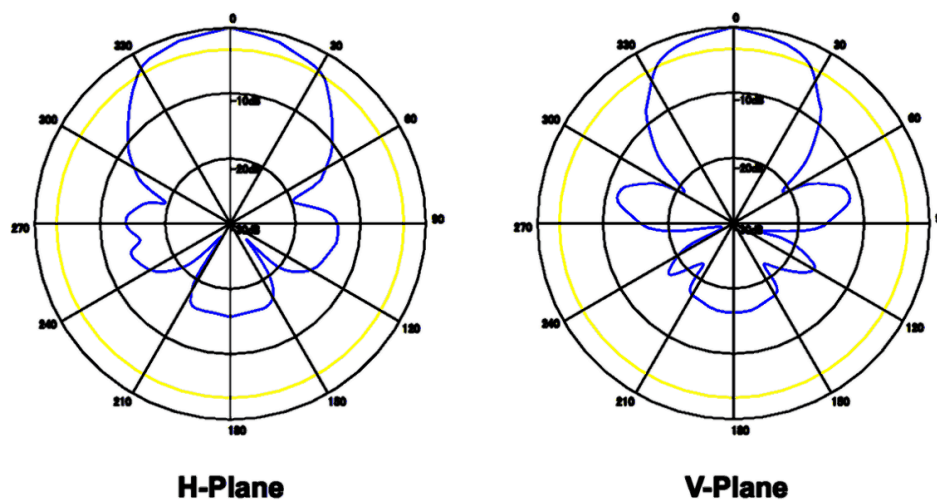
Categoría	LPDA Las antenas
Modelo	TDJ-0727DSAN10
Rango de frecuencia-MHZ	700 ~ 960/1710 ~ 2700
Ganancia dBi	10
Haz Horizontal-°	90/70
Vertical haz-°	60/55
F/B-dB	≥ 18
VSWR	≤ 1,5
Impedancia Nominal-Ω	50
La polarización	Vertical
Potencia máxima-W	100
Longitud-cm	29x21x6 5
Peso-kg	0,8
Conector	N hembra o personalización
Observaciones	Polos de montaje

*Nota:* Recuperado de: (AliExpress, 2021)

En la Figura 7 se muestra el patrón de radiación de la antena en los planos Horizontal y Vertical:

**Figura 7**

*Patrón de radiación de la antena LPDA*



*Nota.* Tomado de: (OnWireless, 2020)

En este capítulo se describen las partes del receptor digital Signal Hound SM200B y los parámetros con los que trabaja, tales como, voltaje de alimentación, impedancia de entrada, puertos de transmisión de datos, entre otros, con el objetivo de prevenir daños en el equipo y tener una idea clara acerca de los componentes que pueden ser usados junto con el dispositivo, como es el caso de la antena LPDA, esto ayuda a que el diseño e implementación del sistema de monitorización sea óptimo.

## Diseño e Implementación del Sistema de Monitorización

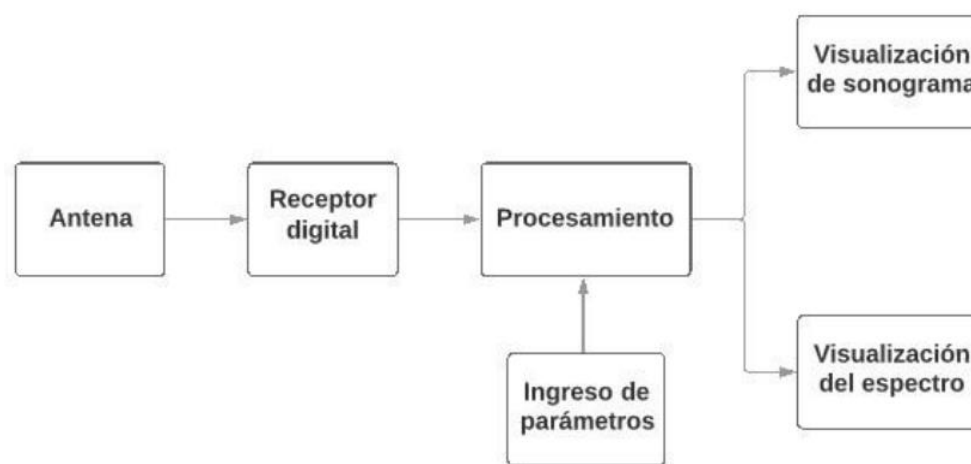
En general los analizadores de espectro Signal Hound poseen una interfaz de programación de aplicaciones (API), esta API proporciona un conjunto de rutinas C de bajo nivel para interconectar el dispositivo mediante una aplicación propia. El SM200B es compatible con C ABI (Interfaz binaria del computador), por lo que es posible conectarse a través de la mayoría de los lenguajes de programación, es por esto que el presente proyecto busca desarrollar un sistema propio de monitorización del espectro radioeléctrico gestionando el equipo mediante la creación de algoritmos que puedan implementarse bajo la filosofía del sistema Arturo.

### Diseño

El diseño del sistema de monitorización desarrollado por Calderón – Reinoso bajo la filosofía del sistema Arturo se muestra en la Figura 8:

### Figura 8

*Diseño del sistema de monitorización*



*Nota.* Tomado de : (Calderón & Reinoso, 2019)

La idea general es mantener el mismo diseño ya que es completamente funcional y compatible con la doctrina de empleo actual, pero en lugar de utilizar el

receptor BB60C el objetivo es conseguir que el sistema funcione con el receptor SM200B para ello se deben implementar ciertas rutinas de programación que consigan que el sistema Arturo tenga un funcionamiento integral con el nuevo receptor.

Para el diseño e implementación de este sistema de monitorización del espectro radioeléctrico se consideraron los siguientes elementos de hardware y software:

### ***Hardware del sistema***

- El receptor digital Signal Hound SM200B, que es el que garantiza un barrido del espectro desde 100 KHz hasta 20 GHz con anchos de banda instantáneos de 160 MHz.
- Una antena log periódica de propósito general para las bandas 3G /4G/ LTE que trabaja en el rango de frecuencias 700 - 2700 MHz.
- Una laptop lenovo z 50 – 70.

### ***Software del sistema***

- Microsoft Visual Studio 2019 en su última versión 16.9.0, este entorno de desarrollo integrado para Windows es compatible con múltiples lenguajes de programación, entre ellos C y se utilizó para desarrollar los algoritmos propios del SM200B que se implementaron dentro del sistema Arturo.
- Sistema Arturo, sistema de monitorización del espectro radioeléctrico que ha sido recuperado y puesto operativo al incrementar rutinas de programación con distintos proyectos desarrollados

## **Implementación**

### ***Requisitos del sistema.***

El receptor digital SM200B requiere ciertos requisitos del sistema a nivel de software, tanto para poder enviar datos a través del puerto USB 3.0 al computador, como para recibir las rutinas de programación propias a través del sistema Arturo.

Los requisitos para poder usar el SM200B en un computador son: una computadora externa local con Microsoft Windows 7 o posterior y un puerto USB 3.0 para operar el SM200B (mínimo de procesador Intel tercera Generación i7 o equivalente equipado con SSD para almacenamiento masivo rápido de datos durante la grabación IQ) (Signal Hound, 2019).

Los requisitos, según Signal Hound (2020), que debe cumplir el sistema para poder manipular el receptor mediante una API son:

- Windows 7/8/10, (se recomienda Win 7/10 de 64 bits)
- Conectividad USB 3.0 proporcionada a través de CPU Intel de cuarta generación o posteriores. Los sistemas de CPU Intel de cuarta generación pueden requerir la actualización de los controladores USB 3.0 para que funcionen correctamente.
- (Recomendado) Procesador Intel i5 o i7 de cuatro núcleos, cuarta generación o posterior.
- (Mínimo) Procesador Intel i5 o i7 de doble núcleo, cuarta generación o posterior.

Finalmente, las características del sistema de la laptop que se utilizó son las que se muestran en la Figura 9, comprobando así que cumple con lo mínimo necesario para poder implementar el sistema.

## Figura 9


### *Propiedades del sistema de la laptop Z50-70*

[Ver información básica acerca del equipo](#)

Edición de Windows

---

Windows 10 Home  
© 2020 Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.



Sistema

---

Procesador:	Intel(R) Core(TM) i7-4510U CPU @ 2.00GHz 2.60 GHz
Memoria instalada (RAM):	8,00 GB (7,89 GB utilizable)
Tipo de sistema:	Sistema operativo de 64 bits, procesador x64
Lápiz y entrada táctil:	La entrada táctil o manuscrita no está disponible para esta pantalla

**Nota.** Captura de pantalla de las propiedades del sistema de la laptop usada en este proyecto. Fuente: (Contreras, 2021)

### ***Funcionamiento del SM200B***

Cualquier aplicación que utilice la API SM200 debe seguir estos pasos para interactuar y realizar mediciones en el dispositivo (Signal Hound, 2020).

- Abrir el dispositivo y recibir un identificador del dispositivo.
- Configurar el dispositivo.
- Adquirir medidas.
- Detener las adquisiciones, cancelar la operación actual.
- Cerrar el dispositivo.
- (Recalibrar)

A continuación, se describe brevemente y de manera general cada uno de estos seis pasos que, al ser implementados como algoritmos, permitirán gestionar el dispositivo SM200B a través del sistema Arturo.

### **Abrir el dispositivo.**

La apertura del dispositivo es el primer paso que se debe realizar y de ser exitoso, se devuelve un identificador que se podrá utilizar durante el resto de la ejecución del programa para hacer referencia al dispositivo.

La apertura del dispositivo cambia según el tipo de conexión, si es mediante puerto USB 3.0 se realiza a través de las funciones *smOpenDevice* o *smOpenDeviceBySerial* y si se la realiza como un dispositivo en red se debe llamar a la función *smOpenNetworkedDevice*.

### **Configurar el dispositivo.**

La configuración del equipo se realiza una vez que el dispositivo está abierto, este es el segundo paso que se debe realizar. Este proceso permite configurar el dispositivo antes de realizar una medición. Los modos de medición disponibles son:

- Análisis de barrido.
- Análisis en tiempo real.
- Transmisión I / Q.

Cada modo tiene rutinas de configuración específicas, que establecen un estado de configuración temporal. Una vez que se han llamado todas las rutinas de configuración, al llamar a la función *smConfigure* se copia el estado de configuración temporal en el estado de medición activo y el dispositivo está listo para las mediciones.

### **Adquirir medidas.**

La adquisición de medidas es el tercer paso, este se lo realiza una vez que el dispositivo se encuentra configurado correctamente, la API proporciona varias funciones para adquirir medidas. Solo ciertas mediciones están disponibles dependiendo del modo



de medición activo. Por ejemplo, la adquisición de datos I / Q no está disponible cuando el dispositivo está en modo de medición de barrido y viceversa.

### **Detener las mediciones.**

La detención de mediciones se realiza mediante la función *smAbort*. El detener las mediciones no es un paso necesario ya que el dispositivo llama automáticamente a esta función cuando cambiamos el modo de medición o cuando cerramos el dispositivo, sin embargo, dos usos prácticos para esta función son:

- El ahorro de energía, ya que hace que el dispositivo cancele cualquier operación y pase a un estado inactivo.
- Liberar recursos, ya que ciertos modos de medición pueden consumir grandes cantidades de memoria y uso del CPU.

### **Cerrar el dispositivo.**

Al cerrar el dispositivo se liberan todos los recursos relacionados con el funcionamiento del dispositivo, este paso se efectúa una vez que se termina de realizar las mediciones, para ello se utiliza la función *smCloseDevice*. Una vez cerrado el dispositivo se puede volver a abrirlo sin necesidad de cerrar la aplicación ya que es posible abrir y cerrar un dispositivo varias veces durante la ejecución de un programa.

### **Recalibración.**

La recalibración es un proceso que se realiza cada vez que se reconfigura el dispositivo (*smConfigure*). Por ejemplo, cuando el dispositivo está configurado para transmisión I / Q, el instrumento y la medición se calibran para el entorno actual y no se calibrarán nuevamente hasta que la medición del dispositivo se cancele y se inicie nuevamente.

El dispositivo no se recalibrará durante las mediciones, ya que esto provocaría que detenga su funcionamiento y se interrumpirían las mediciones.

Los grandes cambios de temperatura afectan a las mediciones y se recomienda volver a configurar el dispositivo una vez que se haya registrado una alta variación de temperatura.

### ***Implementación del SM200B en el Sistema Arturo***

Una vez comprendidas las rutinas necesarias para lograr que el funcionamiento del dispositivo sea controlado a través de nuestra API, el siguiente paso es realizar la integración del SM200B dentro del sistema Arturo.

La filosofía del sistema Arturo está basada en una programación orientada a objetos, dentro de la cual es fundamental la creación de clases para que los objetos puedan heredar las propiedades y métodos de la clase; para entender de mejor manera el proceso que se realizó, se muestra en la Figura 10 el diagrama de clase del sistema Arturo realizado por Calderón – Reinoso.

**Figura 10**

*Diagrama de clases sistema Arturo*



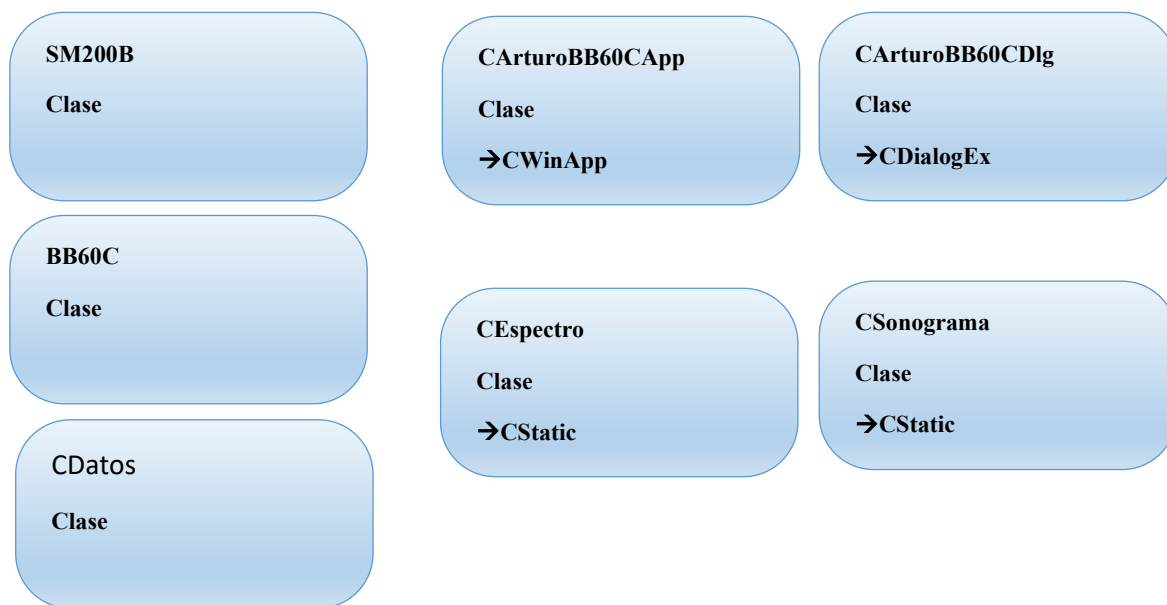
Nota. Tomado de: (Calderón & Reinoso, 2019)

Como se observa la Figura 10, la clase BB60C está implementada en el sistema Arturo y mediante esta clase es que el sistema puede controlar el dispositivo Signal Hound BB60C, es decir, que para implementar más funcionalidades al sistema, en este caso el control del SM200B, fue necesario crear una clase SM200B que se incluyó en el sistema Arturo y le permite ahora controlar también al dispositivo Signal Hound SM200B, incrementando así las capacidades del sistema al poder trabajar con un dispositivo de mejores características que el anterior.

Para ilustrar de mejor manera este proceso, se muestra en la Figura 11 el diagrama actual del sistema Arturo.

**Figura 11**

*Diagrama de clases sistema Arturo actual*



*Nota.* Diagrama actual de clases para el sistema Arturo una vez implementada la clase SM200B e incluida en el modelo anterior.

Respecto a los detalles de la interfaz del sistema Arturo, al ser sencilla y por lo tanto fácil de entender por los usuarios, no ha sido modificada en su apariencia y si es de interés del lector, se puede encontrar la descripción completa de la interfaz del sistema Arturo en el documento (Calderón & Reinoso, 2019, págs. 41-43).

En resumen, el sistema Arturo se actualizó luego de la implementación de algoritmos que permiten controlar las funciones básicas del dispositivo SM200B, consiguiendo un sistema de monitorización del espectro radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 160MHz para la banda de 100KHz a 20 GHz utilizando el receptor digital SM200B, una vez completada esta etapa se pueden realizar las respectivas pruebas del sistema.

## Pruebas y Resultados

Una vez desarrollados el diseño y la implementación del sistema de monitorización del espectro radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 160 MHz para la banda de 100 KHz a 20 GHz utilizando el receptor digital SM200B se procede con las pruebas para verificar su funcionamiento y verificar los parámetros esperados.

### Armado del sistema

Lo primero es armar el sistema de acuerdo con el diseño y conectar las partes (antena Log Periódica de montaje fijo universal (700-2700 MHz), receptor digital Signal Hound SM200B y laptop Lenovo z50-70) tal como se observa en la Figura 12:

### Figura 12

*Sistema de monitorización del espectro radioeléctrico*



Nota. Fotografía del Sistema de monitorización desarrollado. Fuente: (Contreras, 2021)

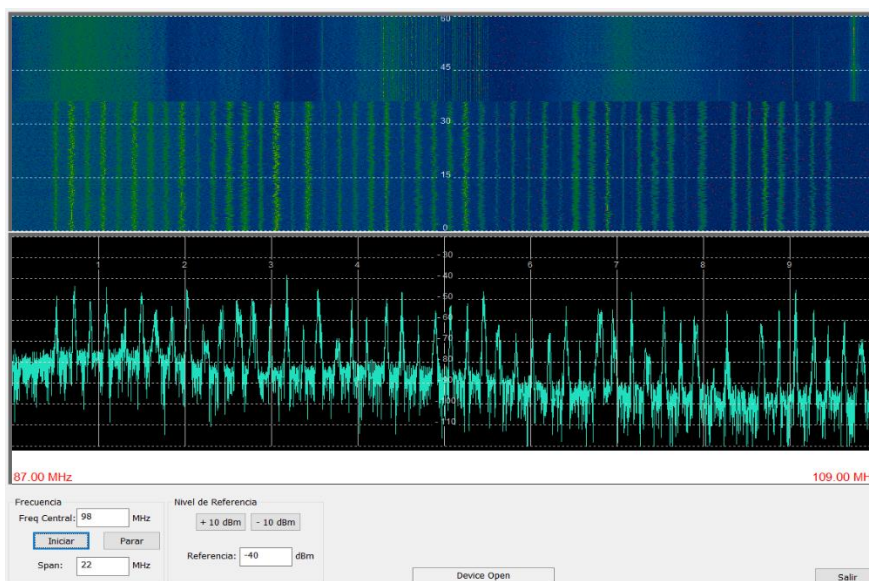
A continuación, se muestran algunas pruebas realizadas con el sistema de monitorización para diferentes parámetros de frecuencia central y span, utilizando el sistema Arturo.

### Pruebas del sistema para la Banda de FM

El espacio del espectro radioeléctrico que se desea mostrar para las pruebas del sistema es el de las señales de FM (88 – 108 MHz), para ello iniciamos con una frecuencia central de: 98 MHz y un span de: 22 MHz que nos permita observar con claridad el rango antes mencionado tal como se muestra en la Figura 13:

#### Figura 13

*Sistema Arturo - Frecuencia central 98 MHz con span de 22 MHz*

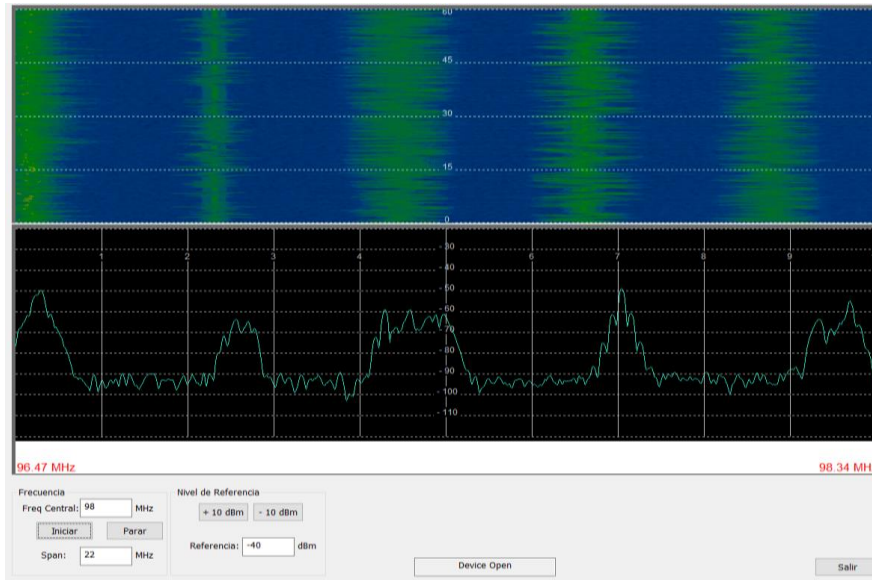


Nota. Captura de pantalla de la interfaz del sistema desarrollado, funcionando para una frecuencia central de 98 MHz con un span de 22 MHz. Fuente: (Contreras, 2021)

Dentro de esos mismos parámetros se realiza un zoom del espectro para reducir el span y observar las señales de FM de mejor manera, consiguiendo una frecuencia inicial de 96,47 MHz y una frecuencia final de 98,34 MHz tal como se muestra en la Figura 14:

**Figura 14**

*Sistema Arturo - Frecuencia inicial 96.47 MHz y frecuencia final de 96.34 MHz*

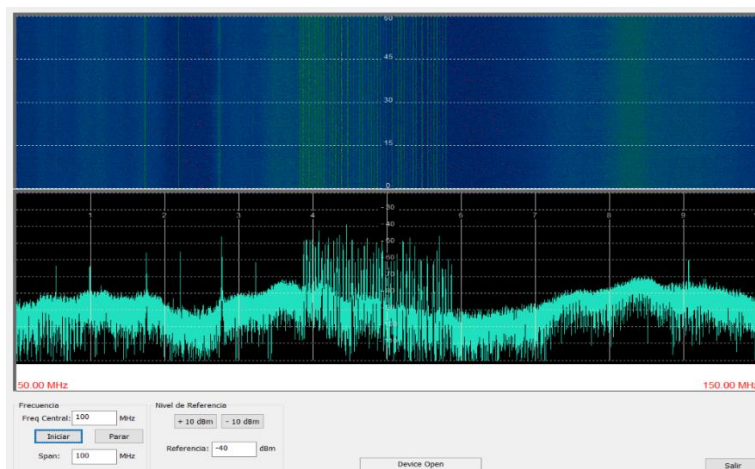


Nota. Captura de pantalla de la interfaz del sistema desarrollado. Fuente: (Contreras, 2021)

Luego, con la intención de ir aumentando el span hasta llegar a verificar que el sistema sea capaz de monitorizar un ancho de banda de 160 MHz, se hicieron dos capturas de su funcionamiento; en la Figura 15 se muestra una prueba realizada con frecuencia central de: 100 MHz y span de: 100 MHz y en la Figura 16 otra prueba con una frecuencia central de 100 MHz y un span de 160 MHz, verificando así que el sistema cumple con los resultados esperados.

**Figura 15**

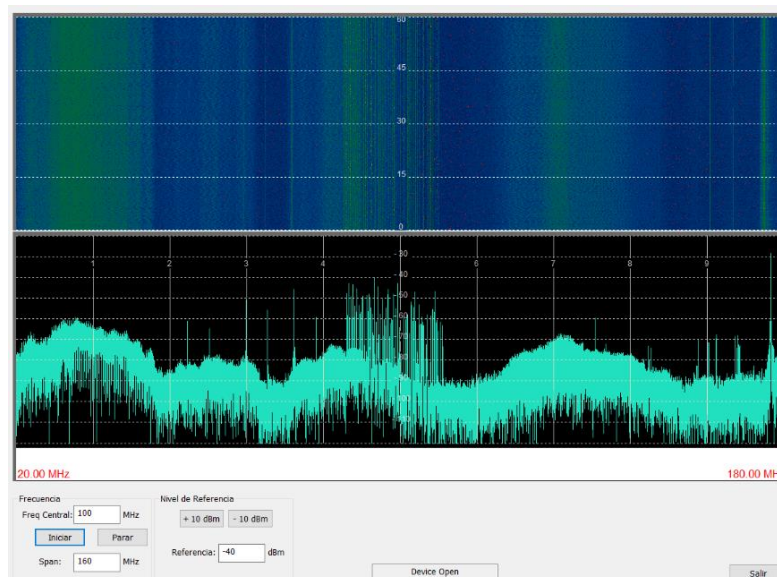
*Sistema Arturo - Frecuencia central de 100 MHz con span de 100 MHz*



Nota. Captura de pantalla de la interfaz del sistema desarrollado, funcionando para una frecuencia central de 100 MHz con un span de 100 MHz. Fuente: (Contreras, 2021)

**Figura 16**

*Sistema Arturo - Frecuencia central de 100 MHz con span de 160 MHz*



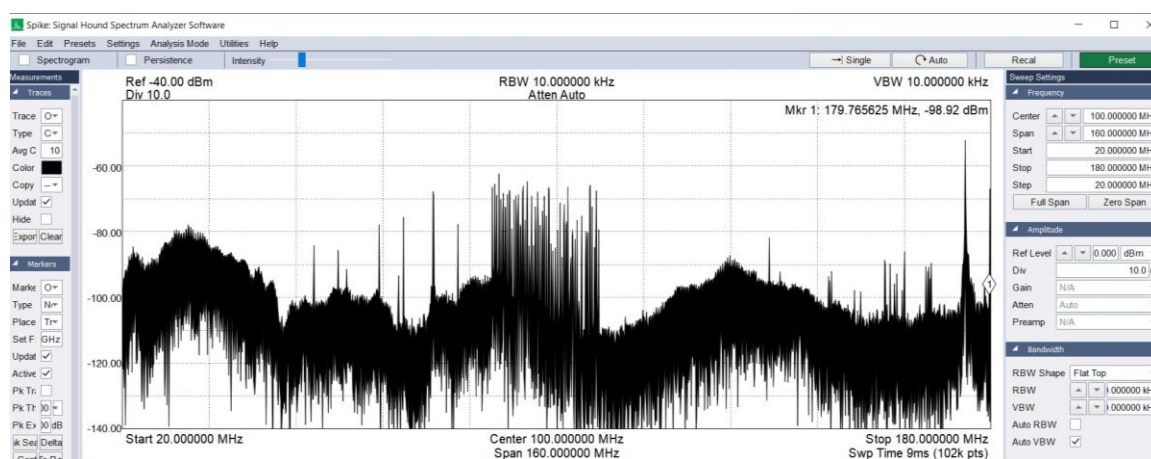
Nota. Captura de pantalla de la interfaz del sistema desarrollado, funcionando para una frecuencia central de 100 MHz con un span de 160 MHz. Fuente: (Contreras, 2021)



Finalmente, la Figura 17 muestra una imagen capturada utilizando el software que Signal Hound ofrece para sus dispositivos, es el programa Spike, en el cual se colocaron los parámetros de frecuencia central en 100 MHz y span en 160 MHz para poder establecer una comparación del funcionamiento del equipo con ambos sistemas: el que viene con el dispositivo (Spike) y el sistema de monitorización desarrollado en este proyecto (Arturo).

**Figura 17**

*Programa Spike - Frecuencia central de 100 MHz con span de 160 MHz*



Nota. Captura de pantalla de la interfaz del programa Spike, para una frecuencia central de 100 MHz con un span de 160 MHz. Fuente: (Contreras, 2021)

Al finalizar este capítulo se probó tanto el sistema de monitorización desarrollado como el funcionamiento del receptor digital SM200B, que, gracias a las rutinas de programación incluidas, fue controlado a través del sistema Arturo, de aquí se obtendrán las conclusiones finales del proyecto que se muestran en el siguiente capítulo.

## Conclusiones y Recomendaciones

A continuación, se muestran todas las conclusiones que se obtienen luego de culminar el desarrollo del sistema de monitorización y haberlo probado, también se dan algunas recomendaciones relacionadas con el presente proyecto y se proponen algunas ideas para proyectos que pueden ser desarrollados en el futuro.

### Conclusiones

- La etapa de prueba del software, previa al desarrollo del sistema, se realizó con el sistema Arturo tal cual estaba, es decir, funcionando con el receptor BB60C; esta etapa sirvió principalmente para comprender como funciona el sistema y entender las rutinas de programación que ya estaban implementadas cumpliendo así con la evaluación de los algoritmos y procesos desarrollados antes del presente proyecto en el sistema de monitorización.
- Las pruebas realizadas muestran que el sistema de monitorización desarrollado es capaz de gestionar y controlar el funcionamiento del receptor digital Signal Hound SM200B, mismo que tiene una velocidad de barrido del espectro radioeléctrico de 1 THz / s, logrando así superar al anterior sistema aproximadamente en 40 veces, ya que el BB60C llega a una velocidad de barrido de 24 GHz / s.
- Los algoritmos desarrollados e implementados en las rutinas de programación del sistema Arturo incrementan sus funcionalidades, logrando una monitorización del espectro radioeléctrico con anchos de banda instantáneos de 160 MHz para la banda de 100 KHz a 20 GHz.
- El sistema Arturo tienen una interfaz sencilla tiempo – frecuencia y es completamente funcional para los fines que se busca en el presente proyecto ya que la característica principal es la técnica que utiliza el sistema para refrescar la

pantalla evitando por completo la sensación de pausas en la imagen del espectro radioeléctrico y haciéndolo ideal para monitorizar señales que están presentes durante un corto período de tiempo.

- El sistema Arturo tiene implementadas rutinas de programación que pueden gestionar tanto al receptor BB60C como al receptor SM200B, sin embargo, no realiza un reconocimiento automático del dispositivo, sino que hay que manipular las rutinas de acuerdo con el equipo con el que se quiera trabajar.
- Se realizó el estudio exhaustivo y analítico del estado del arte en relación al monitoreo de señales radioeléctricas utilizando la representación compleja de un proceso pasa banda.
- Se implementó el sistema de monitoreo en base a la filosofía de empleo del sistema Arturo que dispone el AGRUCOMGE y se obtuvo un sistema mejorado con el receptor SM200B el cual se encuentra listo para ponerlo operativo.
- Se disminuyó el peso, volumen, costo computacional y precio del sistema, comparado con el sistema original desarrollado en el año 1996.
- Con este proyecto se deja disponible en el CICTE tecnología basada en la investigación orientada a aplicaciones reales con software propio garantizando así la soberanía tecnológica.
- Se evaluaron los algoritmos y procesos desarrollados en el sistema de monitoreo de señales radioeléctricas que el CICTE disponía para el efecto, siendo mejorados y adaptados al receptor SM200B.
- Se desarrollaron los nuevos algoritmos para incrementar las funcionalidades del sistema Arturo, en base al receptor SM200B.

- Se generó una participación sinérgica en el proceso de I+D+i, entre los diseñadores originales del sistema Arturo, el personal investigador del CICTE y el autor del presente trabajo.
- Se desarrolló el sistema de monitoreo de señales radioeléctricas con anchos de banda instantáneos de 160 MHz para la banda de 100 KHz a 20 GHz con alta POI (superior al 90%).

### **Recomendaciones**

- El presente proyecto está enfocado en gestionar y controlar el receptor digital SM200B a través del sistema desarrollado y para comprobar los resultados fue suficiente una antena LPDA genérica que trabaja en el rango (700 – 2700 MHz), pero dada la capacidad del SM200B se recomienda utilizar antenas adecuadas para operar en frecuencias superiores a los 3GHz.
- La técnica empleada por el sistema Arturo para graficar el espectro radioeléctrico en su interfaz, hace posible mostrar en pantalla un vector de datos, como el obtenido a través del receptor digital Signal Hound SM200B, que cambia a una velocidad 1 THz/s por lo cual se recomienda analizar sus rutinas de programación y utilizarlas en proyectos similares que requieran actualizar datos en pantalla a grandes velocidades.
- Se recomienda analizar y desarrollar una nueva doctrina de empleo para la posible implementación de este sistema de monitorización dentro del AGROCOMGE ya que supone un incremento en la banda del espectro que se puede barrer desde 6GHz hasta 20 GHz, valores que no estaban disponibles con el anterior sistema.

### **Proyección de la investigación**

- El sistema Arturo tiene ahora la posibilidad de gestionar al dispositivo SM200B, sin embargo, no están implementadas el 100% de sus funcionalidades por lo que un posible proyecto futuro podría ser explotar las capacidades máximas del equipo SM200B desarrollando algoritmos que puedan ser implementados en el sistema para que incremente las funcionalidades del mismo, para ello se recomienda continuar con la investigación, comprender, integrar y desarrollar nuevas rutinas de programación relacionadas con la determinación del ángulo de arribo de las señales.
- El presente proyecto muestra que el sistema Arturo es capaz de gestionar al menos dos receptores digitales diferentes, un proyecto a futuro puede ser la incorporación de rutinas que permitan al sistema manejar varios equipos, reconociéndolos de forma automática, es decir, que ya no exista la necesidad de manipular el código para usar uno u otro dispositivo.

### Referencias Bibliográficas

- AliExpress. (12 de Febrero de 2021). *AliExpress*. Obtenido de <https://es.aliexpress.com/item/1005001808007798.html>
- Calderón, D., & Reinoso, M. (2019). *TEMA: “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO DEL ESPECTRO RADIOELÉCTRICO CON ANCHOS DE BANDA INSTANTÁNEOS DE 44MHz PARA LA BANDA DE 10kHz A 6GHz”*. Quito: ESPE.
- Contreras, S. (13 de Marzo de 2021). Receptor Digital Signal Hound SM200B. Quito, Pichincha, Ecuador: Autónomo.
- OnWireless. (12 de Diciembre de 2020). *OnWireless 3D and 4G WIRELESS CONNECTIVITY*. Obtenido de <https://onwireless.com.au/11dbi-700-2700mhz-nextg-3g-4g-lte-wifi-radome-lpda-antenna.html>
- Signal Hound. (2019). *SM200B Real-Time Spectrum Analyzer & Monitoring Receiver*. Battle Ground: Signal Hound.
- Signal Hound. (2020). *SM200 Application Programming Interface (API) Programmers Reference Manual*. Battle Road: Signal Hound.
- Signal Hound. (2020). *SM200A/B/C Spectrum Analyzer Product Manual*. Battle Ground: Singal Hound WA.
- Signal Hound. (s.f). *SM200B Spectrum Analyzer*.
- Yazicigil, R., Haque, T., Wright, J., & Kinget, P. (2016). *Band-Pass Compressive Sampling As an Enabling Technology for Rapid Wideband RF Spectrum Sensing*. New York: Asilomar.