

Instituto Tecnológico de Costa Rica

Escuela de Ingeniería Electrónica



**Rediseño del sistema de adquisición de datos
de radiofrecuencia para la empresa
MONITEC, S.A**

Informe de Proyecto de Graduación para obtener el título de
Ingeniero en Electrónica con el grado académico de licenciatura

Daniel Víquez Gómez

Cartago, Noviembre de 2017

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
PROYECTO DE GRADUACIÓN
ACTA DE APROBACIÓN

Defensa de Proyecto de Graduación
Requisito para optar por el título de Ingeniero en Electrónica
Grado Académico de Licenciatura
Instituto Tecnológico de Costa Rica

El Tribunal Evaluador aprueba la defensa del proyecto de graduación denominado 'Sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia' para la empresa MONITEC, S.A, realizado por el Sr. Daniel Víquez Gomez y, hace constar que cumple con las normas establecidas por la Escuela de Ingeniería Electrónica del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Miembros del Tribunal Evaluador


Ing. Anibal Coto Cortés

Profesor lector


Ing. Julio Stradi Granados

Profesor lector


Ing. Luis Paulino Méndez Badilla

Profesor asesor

Cartago, 12 de diciembre de 2017

Declaración de autenticidad

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado, en su totalidad, por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado material bibliográfico, he procedido a indicar las fuentes mediante citas.

En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Daniel Víquez Gómez.

Daniel Víquez Gómez

Cédula: 3 0480 0374

Resumen

La recolección y análisis de información estratégica, para las muchas aplicaciones en las que esta puede ser útil, crece en un mundo globalizado que se mueve gracias a las comunicaciones digitales y analógicas. El análisis de la información cobra vital importancia para la toma de decisiones estratégicas que le permiten a empresas y organizaciones tomar ventaja sobre aquellas que no disponen de la misma, lo que aumenta significativamente su competitividad. La digitalización de la información permite su captura y almacenamiento, para hacer análisis en tiempo real de esta o almacenarla en bases de datos para su posterior estudio.

La empresa Monitoreo Tecnológico (MONITEC, S.A) surge en el año 2000 en Costa Rica, como una respuesta a la necesidad del monitoreo de los medios electrónicos con tecnología adecuada, que permita generar reportes de la información transmitida. La empresa se encarga de brindar a sus clientes la frecuencia diaria de toda la programación musical y publicitaria de un territorio. El recurso humano con el que cuenta el país en materia tecnológica le permitió a la empresa el desarrollo de herramientas para capturar, reconocer y monitorear medios electrónicos y acústicos. El sistema de digitalización de la información creado por MONITEC le permitió dar una solución a la problemática de escasa eficiencia y bajos niveles de confianza que se obtenía con el monitoreo “artesanal”.

Palabras clave: adquisición de datos, radiofrecuencia, protocolos de comunicación serial, sistemas embebidos, indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI), relación señal a ruido (SNR), espectro de potencia de una señal.

Abstract

The data collecting and analysis of strategic information, for all the applications this may be useful, is growing in a globalized world that moves thanks to digital and analog communications. The analysis of the information that moves from one side to another, has a vital importance for the strategic decisions that allow to the companies and organizations to take advantage in comparison with those that do not have this information; so, increases their competitiveness. Digitalize the information allows its capture and storage, to make real-time analysis or to store it in databases for later study.

Monitoreo Tecnológico company (MONITEC, S.A) emerged in Costa Rica in the year 2000, as a response to the needing of the monitoring electronic media with proper technology to generate reports of this information. The company takes care of providing daily information about all the musical and advertising programming of a territory. The human resources available in the country in terms of technology allow the company to develop technological tools to capture, recognize and monitor electronic and acoustic media. The system created by MONITEC allowed to provide a solution to the problem of low efficiency and low levels of confidence that was obtained with “handmade” monitoring.

Keywords: Data acquisition, radio frequency, serial communication protocols, embedded systems, received signal strength indicator, signal to noise ratio, power spectrum.

Dedicatoria

Primeramente, a Dios, por permitirme llegar hasta aquí, ayudarme en los momentos difíciles a superar las pruebas, poner en mi camino a muchas personas realmente especiales que me impulsaron a terminar este proceso y darme siempre todo lo necesario para seguir adelante.

A la Reina de los Ángeles por ser mi principal intercesora en estos años de carrera, por su ayuda y por escuchar mis necesidades y súplicas todos los días que la he visitado.

A mi madre por todo su esfuerzo, Amor, atención y paciencia a lo largo de estos años de carrera, en los que he recibido de ella estas y más cosas de manera incondicional.

A todas las personas que me apoyaron espiritual y económicamente en muchos momentos de mi carrera y a quienes les deseo que Dios les devuelva con generosidad todas las muestras de apoyo y cariño que han tenido conmigo.

A mis abuelos maternos y familiares queridos que ya no están en este mundo, pero que sé que han intercedido por mí ante Dios en las pruebas y dificultades.

A mis amigos más cercanos dentro y fuera del Instituto Tecnológico de Costa Rica por su apoyo, compañía y ejemplo.

A mi familia por el apoyo y el ánimo para seguir adelante.

Agradecimientos

Agradezco al señor Ing. Carlos Cordero Jiménez por la oportunidad de realizar mi proyecto de graduación en la empresa MONITEC, S.A, por haber creído en que era capaz de desarrollar el proyecto casi sin conocerme, por su confianza y los consejos dados para obtener los mejores resultados, por el conocimiento que me ha compartido en estos meses de trabajo, así como la disposición a ayudar y colaborar siempre.

Agradezco a mi profesor asesor Ing. Luis Paulino Méndez Badilla por su interés en mi proyecto de graduación, por el tiempo dedicado, la guía que me ha brindado y los consejos acertados que he recibido de él. Le agradezco también por la puntualidad en el cumplimiento de sus deberes como asesor, así como la confianza, cercanía y trato amable que tiene con los estudiantes en general, incluyéndome.

A mis profesores lectores Ing. Aníbal Coto Cortés e Ing. Julio Stradi Granados por el tiempo dedicado y por los aportes que han dado, para mi crecimiento profesional y humano.

Al personal docente de la Escuela de Ingeniería en Electrónica que ha hecho crecer mi conocimiento y me ha forjado profesionalmente desde los primeros cursos recibidos, especialmente a los profesores que han mostrado mayor interés en el aprendizaje y crecimiento profesional de sus estudiantes.

Al Instituto Tecnológico de Costa Rica por brindarme los medios económicos para hacer posibles mis estudios mediante la beca recibida, a todas esas personas involucradas, Dios les pague.

A mis amigos más cercanos en el Instituto Tecnológico de Costa Rica: Alberto Garín Campos por su dedicación, paciencia, tiempo y desinterés para ayudarme a estudiar y prepararme, Alejandro Nevares Luis por su amistad, consejo, apoyo, impulso y ejemplo para no rendirme ni decaer ante ninguna dificultad y Mariana Guzmán Fonseca por su disposición a aconsejarme, por su compañía y apoyo en las diferentes etapas de la carrera y por ser una amiga ejemplar.

Finalmente agradezco a todos los demás amigos y compañeros que conocí a lo largo de la carrera, por sus muchos aportes a mi formación académica y humana.

Índice General

Capítulo 1. Definición del problema a resolver	1
Capítulo 2. Enfoque de rediseño y solución del sistema de recepción de datos de radiofrecuencia	6
2.1 Etapa de regulación de tensión.....	7
2.2 Etapa de radiofrecuencia.....	8
2.3 Etapa de almacenamiento y envío de datos de audio.....	10
2.4 Puertos y conectores del sistema.....	12
2.5 Esquemático representado en diagrama de bloques.....	13
2.6 Diseño del software en el sistema de adquisición de datos.....	14
2.6.1 Etapa de comunicación	14
2.6.2 Etapa de interfaz gráfica para el usuario	17
Capítulo 3. Resultados	21
3.1 Resultados de hardware	21
3.2 Resultados de software	28
Capítulo 4. Análisis de resultados.....	38
4.1 Análisis de resultados del hardware.....	38
4.2 Análisis de resultados del software.....	40
Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones.....	43
5.1 Conclusiones.....	43
5.2 Recomendaciones	44
Bibliografía.....	45
Apéndices.....	47
A1. Circuitos Integrados	47
A2. Conectores:	55
A3. Otros componentes.....	58

Índice de figuras

Figura 1. Circuito PCB de 8 sintonizadores FM/AM.	4
Figura 2. Sistema embebido MarsBoard.....	4
Figura 4. Página web principal de interfaz gráfica usuario.....	19
Figura 5. Página de confirmación de envío de datos solicitados.	19
Figura 6. Vista superior del PCB, trazado de pistas y 'pads'.....	22
Figura 7. Vista inferior PCB, trazado de pistas y 'pads'.....	23
Figura 8. Vista superior de la placa electrónica diseñada	23
Figura 9. Vista inferior de la placa electrónica diseñada	24
Figura 10. Resultados de ejecución de herramienta Design Rule Check en Altium Designer	24
Figura 11. Vista superior del PCB fabricado	25
Figura 12. Vista inferior del PCB fabricado	25
Figura 13. Vista superior del PCB con componentes	26
Figura 14. Vista inferior del PCB con componentes	26
Figura 15. Vista costado izquierdo posterior del chasis diseñado	27
Figura 16. Vista lateral izquierda del chasis diseñado	27
Figura 17. Vista frontal de la base del chasis.....	28
Figura 18. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 1° filtro pasa-banda, usando función ventana Hanning.....	29
Figura 19. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 2° filtro pasa-banda, usando función ventana Hanning.....	29
Figura 20. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 3° filtro pasa-banda, usando función ventana Hanning.....	30
Figura 21. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 4° filtro pasa-banda, usando función ventana Hanning.....	30
Figura 22. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 5° filtro pasa-banda, usando función ventana Hanning.....	30
Figura 23. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 1° filtro pasa-banda, usando función ventana rectangular	31
Figura 24. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 2° filtro pasa-banda, usando función ventana rectangular	31
Figura 25. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 3° filtro pasa-banda, usando función ventana rectangular	32
Figura 26. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 4° filtro pasa-banda, usando función ventana rectangular	32
Figura 27. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 5° filtro pasa-banda, usando función ventana rectangular	32
Figura 28. Tabla de costos del hardware del sistema de adquisición de datos de RF.....	37
Figura 29. (Apéndice) Regulador de voltaje TS30042	47
Figura 30. (Apéndice) Diodo TVS contra ESD	48
Figura 31. (Apéndice) Micrófono con salida digital I2S	49
Figura 32. (Apéndice) ADC MAXIM 11645.....	50
Figura 33. (Apéndice) Sintonizador FM/AM Si4735-D6.....	51
Figura 34. (Apéndice) Oscilador de cristal de 12.288 MHz	52

Figura 35. (Apéndice) Chip Antena 2.4 GHz	53
Figura 36. (Apéndice) Embebido Onion Omega 2S	54
Figura 37. (Apéndice) Conector USB tipo A.....	55
Figura 38. (Apéndice) Conector U.FL para radiofrecuencia	56
Figura 39. (Apéndice) Conector de 1 puerto RJ45	57
Figura 40. (Apéndice) Barra de ferrita de 1.8 μ H.....	58
Figura 41. (Apéndice) Capacitor cerámico SMD 0805	58
Figura 42. (Apéndice) Inductor de potencia SMD.....	59
Figura 43. (Apéndice) Inductor SMD 0805.....	59
Figura 44. (Apéndice) Resistencia SMD 0805	60
Figura 45. (Apéndice) Diodo Schottky SMD	60
Figura 46. (Apéndice) LED rojo SMD	60

Capítulo 1.

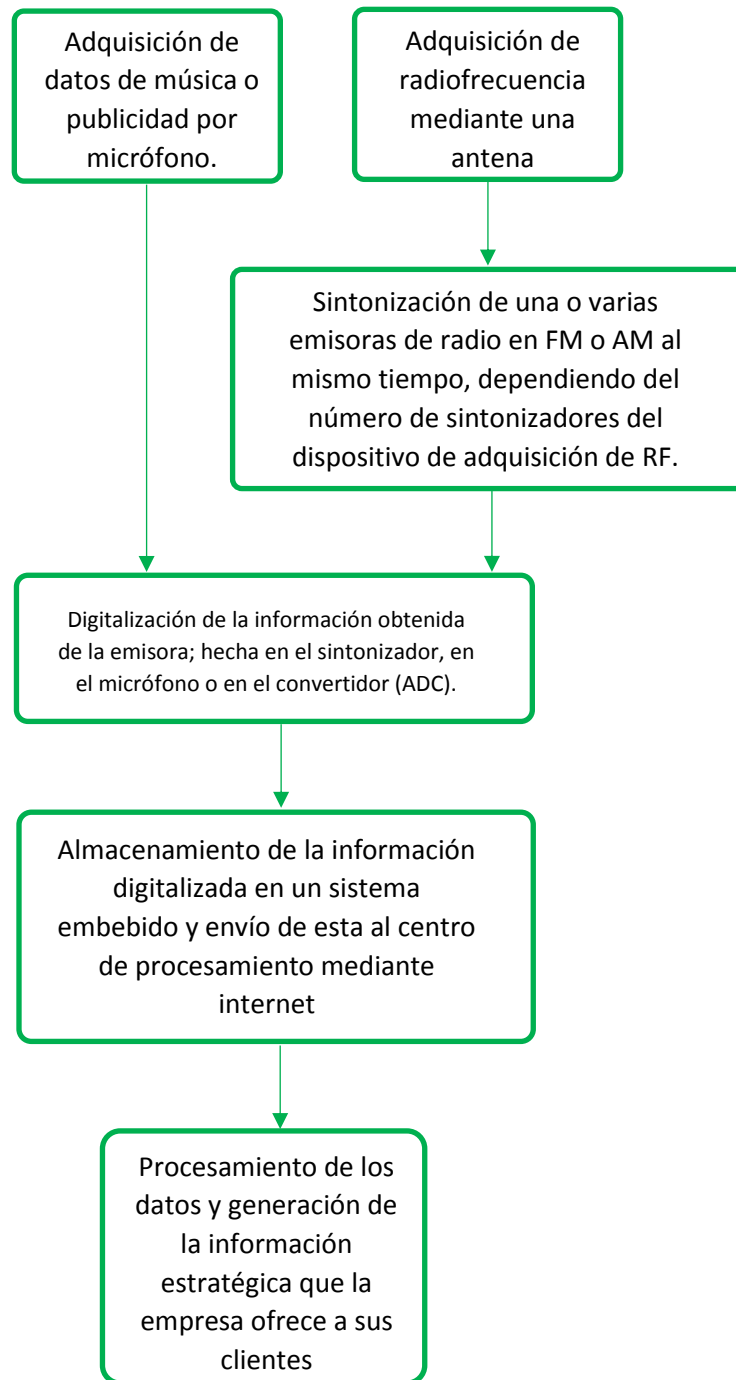
Definición del problema a resolver

La empresa MONITEC, S.A para la cual se desarrolla este proyecto, inició en el año 2000 como una empresa dedicada al monitoreo de la información transmitida por medios de comunicación electrónicos en una región determinada, especialmente de la música y publicidad en emisoras de radio e incluso en la televisión. El monitoreo ‘artesanal’ de los medios que se hacía en ese tiempo conllevaba a grandes inversiones en recurso humano y a pesar de esto se obtenían bajos niveles de confianza. Por ese motivo la empresa trabajó durante varios años en la automatización y digitalización del proceso de monitoreo de la información transmitida en los medios como radio o televisión, creando sistemas de adquisición de datos de radiofrecuencia (RF), en formato digital, que pudieran ser enviados a los servidores de la empresa por medio de la internet y allí ser analizados para generar reportes de información estratégica.

Durante los últimos años, la empresa ha diseñado y fabricado varios modelos de los sistemas de adquisición de datos de radiofrecuencia en tiempo real, que cuentan incluso con varios sintonizadores de radio en un solo sistema. Los sistemas de varios sintonizadores reciben mediante una antena la señal de radiofrecuencia, que pasa por una etapa de amplificación previa. Al llegar a los sintonizadores, cada uno selecciona una emisora específica según los datos de configuración que se le envían. Esa información es digitalizada de acuerdo con las posibilidades para salida digital que ofrece el circuito integrado, o con el uso de un convertidor analógico-digital, que digitaliza la señal que sale por los pines de salida de audio analógica de los sintonizadores. Una vez digitalizada, la información que se genera en cada sintonizador es almacenada en un ‘buffer’ o espacio de memoria en un sistema embebido. Al llenarse el espacio de memoria con los datos de radiofrecuencia, se debe enviar esta información al centro de procesamiento que tiene la empresa, para su análisis y la generación de los reportes que los usuarios soliciten. Una vez enviados los datos se libera el ‘buffer’ y se inicia un nuevo proceso de captura. Es así como han funcionado durante los últimos años los sistemas de adquisición de datos de radiofrecuencia que posee la empresa.

A continuación, se muestra un diagrama de bloques que representa el funcionamiento de los sistemas de adquisición que ha fabricado y usado la empresa en los últimos años:

Diagrama 1. Adquisición y procesamiento de la información



El primer paso del proceso, como lo muestra el diagrama, es la adquisición de la información de música o publicidad transmitida por medio de radiofrecuencia, que se hace mediante una antena adecuada o mediante un transductor como un micrófono. Si la fuente de información es el sintonizador, será este el que determine el ancho de banda de RF de interés, para capturar la información de una emisora en específico.

Esto lleva al segundo paso del diagrama, donde el sistema realizado por la empresa detecta la información de una emisora de AM o FM, por ejemplo, y dependiendo del número de sintonizadores, se puede capturar la información proveniente de varias emisoras de radio de manera simultánea. La empresa ha hecho dispositivos en los que un mismo sistema embebido maneja hasta 8 sintonizadores a la vez.

El tercer paso es la digitalización de la información recibida para su envío al sistema embebido. El chip del sintonizador puede hacer la conversión de la información de analógica a digital y enviarla de forma serial al sistema embebido para su almacenamiento, también puede digitalizarse la información analógica que proviene de los pines del sintonizador con un convertidor ADC, o en el caso del micrófono puede entregarla en formato digital a su salida o podría requerir digitalización con ADC. Finalmente, se hace el envío al centro de procesamiento, de los paquetes que provienen de las diferentes fuentes de información.

En el cuarto paso se almacena la información que llega de forma serial al sistema embebido, donde los datos de cada dispositivo 'fuente' se almacena de forma separada. Una vez que se llenan los espacios de almacenamiento disponibles, se envía la información por internet y se empieza a recibir y almacenar de nuevo.

Finalmente, la información se recibe en el sistema de procesamiento y se hace el análisis, la comparación, clasificación y generación de la información estratégica para ofrecerla a los clientes. Los clientes accesan la página de la empresa y tienen a su disposición variedad de información y reportes para su utilización y provecho.

Mediante el micrófono que posee este sistema y los algoritmos de análisis que posee MONITEC, S.A es posible identificar sonidos, lo que permite su uso en múltiples aplicaciones en la industria, que requieren identificación de patrones definidos. Este sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia ha sido implementado por la empresa con diferente número de sintonizadores, se han llegado a producir versiones con hasta 8 sintonizadores controlados por un mismo embebido.

A continuación, se muestra una fotografía del sistema de adquisición de datos con 8 sintonizadores (sin el sistema embebido en la misma placa):

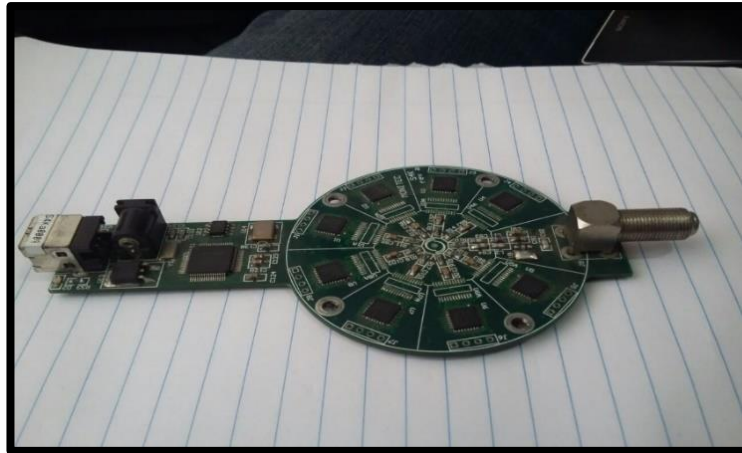


Figura 1. Circuito PCB de 8 sintonizadores FM/AM.

Cortesía de MONITEC, S.A

La figura 2 muestra el sistema embebido MarsBoard, que se usó para recibir, almacenar y enviar los datos del circuito de figura 1:

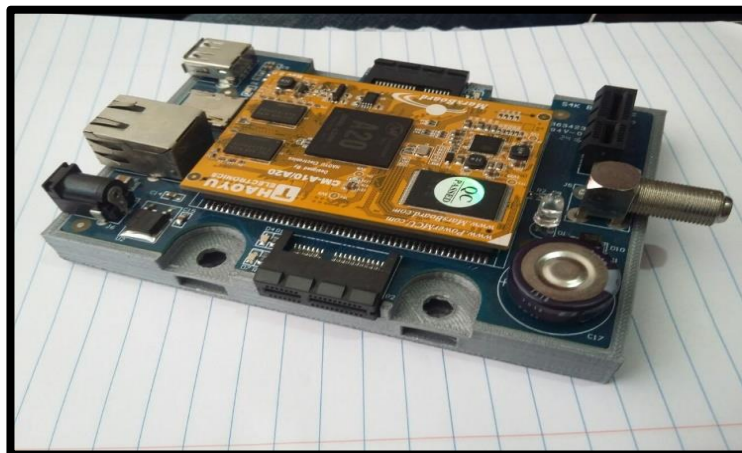


Figura 2. Sistema embebido MarsBoard

Cortesía de MONITEC, S.A

La empresa MONITEC, S.A fabrica estos sistemas de adquisición de datos de radiofrecuencia para el uso propio. Estos dispositivos al tener potenciales aplicaciones en la industria, el comercio e incluso en la vida cotidiana, representan una oportunidad de mercado para la empresa. Se prevé un aumento significativo en el número de clientes y en consecuencia, en las ganancias que la empresa podría percibir. Los sistemas de adquisición de datos de radiofrecuencia con muchos sintonizadores aumentan significativamente el costo de producción para la empresa y por lo tanto el costo en el mercado para el destinatario final.

Esto se debe a que al aumentar el número de sintonizadores crece el número de componentes y etapas en el circuito necesarios para asegurar la calidad de los resultados finales, lo que reduciría el número de clientes interesados en adquirir el dispositivo por dos razones principalmente:

La primera razón es porque se hace innecesario un número tan grande de sintonizadores, ya que los sistemas fabricados por la empresa fueron hechos así porque la empresa requería maximizar el número de sintonizadores en cada nodo para reducir costos y abarcar un gran número de medios que debía monitorear.

La segunda razón es porque hay clientes que no están interesados en usar el dispositivo para monitorear radiofrecuencia, y lo adquieren más bien para otros fines, como la identificación de sonidos, usos comerciales, entre otros. La empresa MONITEC, S.A brindó el dato del costo de producción actual para la empresa de los dispositivos de adquisición de RF, el cual es de \$100 USD para la versión de 4 sintonizadores y \$256 USD para el dispositivo con 8 sintonizadores.

El costo en el mercado de estos dispositivos sería de más de \$300 USD para el de 4 sintonizadores y de unos \$850 USD para el dispositivo de 8 sintonizadores. El costo elevado de este sistema, podría desmotivar a los posibles consumidores y los llevaría a buscar otras opciones más baratas y acordes a sus verdaderas necesidades. Esto pues posiblemente la aplicación del cliente no requiera de tantos sintonizadores en el dispositivo o incluso no los requiera del todo.

La empresa ganaría un número importante clientes fabricando dispositivos con las funcionalidades de los actuales, pero a un costo mucho menor. Para poder producir este sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia, con destino al consumo masivo, se requiere reducir significativamente el costo de producción para la empresa. Esto se puede lograr únicamente si se eliminan las características innecesarias de los sistemas actuales y se rediseña el dispositivo para orientarlo a las exigencias del mercado de consumo masivo.

Capítulo 2.

Enfoque de rediseño y solución del sistema de recepción de radiofrecuencia

Tras varios años de fabricación y uso en la empresa MONITEC, S.A, el sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia ha alcanzado la confiabilidad y madurez suficiente para llevarlo al mercado de consumo masivo. Ya sea que se utilice para el análisis de radiofrecuencia o en la identificación de patrones de sonidos, por ejemplo, el sistema ha mostrado un excelente desempeño. La permanencia y confianza de los clientes en la empresa y los servicios que la misma ofrece, muestran que la empresa ha tomado los pasos correctos en el diseño y fabricación de los dispositivos utilizados, en la generación de información estratégica que la empresa ofrece.

No obstante, poner este dispositivo en el mercado, obliga a la empresa a rediseñar el sistema para captar el interés del mercado meta, con un dispositivo funcional y que se adapte a las necesidades reales de los consumidores. El mercado meta se compone de sectores como la industria, el consumo masivo e incluso instituciones u organizaciones que lo requieran. Por esto es necesario que el dispositivo tenga las características de adquisición de datos de radiofrecuencia que se ofrecen, pero sin que el comprador tenga que pagar de más por características que usualmente no le serán útiles, como el uso de 4 u 8 sintonizadores en el sistema.

Así la solución queda orientada a buscar un rediseño del sistema que resulte en un dispositivo funcional y confiable como los que posee la empresa, pero reduciendo todo lo posible los costos de producción de los mismos y por tanto el costo para el destinatario final. Este proyecto queda orientado al rediseño de una etapa de adquisición de datos de radiofrecuencia con un hardware funcional y de un costo de producción significativamente menor. El costo de producción se estima que debe ser entre un 15% - 20% del que posee el sistema de adquisición de radiofrecuencia con 4 sintonizadores, siendo este último el más barato de los que hasta ahora fabrica MONITEC.

Teniendo como objetivo del proyecto la construcción de un sistema de adquisición de datos con un solo sintonizador y un costo de producción menor, se vuelve de alta relevancia la selección de componentes para la construcción del hardware y el adecuado diseño del PCB, en lo que compete a este proyecto. Los componentes que se utilicen deben cumplir con los requisitos mínimos en las etapas del sistema de adquisición, sin elevar el costo por características innecesarias. También se debe evitar el uso de componentes o etapas que no sean realmente necesarias para el correcto funcionamiento.

Cabe aclarar que en este proyecto el sistema de adquisición se diseñará solo para la radio FM comercial.

Gracias a que la empresa ha proporcionado el diseño esquemático del sistema de adquisición con 4 sintonizadores, se hizo uso del mismo para decidir qué componentes y etapas eran realmente necesarias en el nuevo diseño y eliminar todo lo innecesario para reducir los costos.

El software por diseñar en la realización del proyecto, es el necesario para manejar desde el sistema embebido Onion Omega 2 los circuitos embebidos que permiten la adquisición de los datos de radiofrecuencia y los indicadores de intensidad de la señal recibida (RSSI) y relación señal a ruido (SNR). Para cumplir lo anterior, el programa que se diseñe tiene que generar los valores adecuados para configurar el circuito integrado sintonizador según sea la solicitud del usuario en ese momento. Si el usuario solicita la sintonización de una emisora, el programa debe capturar y almacenar los datos una vez filtrados. Se almacenan aproximadamente 40,000 valores que corresponden a un segundo de información. Si el usuario solicita un nuevo barrido de los indicadores RSSI y SNR, el programa debe generar los comandos necesarios para la sintonización de las emisoras en la banda de FM desde los 88 MHz hasta los 108 MHz, con un paso de 10 kHz. Así se obtienen 2000 valores de los indicadores RSSI y SNR que deben ser solicitados y almacenados en archivos mediante el programa.

Al obtener lo descrito anteriormente, se habrá abarcado satisfactoriamente los alcances del proyecto de graduación.

El esquemático proporcionado por la empresa no se muestra por ser confidencial, pero se dará una idea de su estructura en la descripción de las etapas que posee la propuesta de solución que se detalla ahora.

Los precios de los componentes se consultaron en Digikey.com y corresponden al precio que se paga por la compra de una unidad.

2.1 Etapa de regulación de tensión.

En el esquemático proporcionado por la empresa se usó un regulador de tensión de 5 V a 3.3 V. Esto debido a que el circuito se alimentaba con una tensión regulada de 5 V, y solamente se requirió generar el voltaje de 3.3 V para aquellos circuitos digitales que funcionaban con esta tensión. El regulador utilizado es el LD1117.

El sistema de adquisición diseñado en este proyecto está pensado para funcionar con tensiones de entrada variables de hasta 40 V. Dado que se requiere alimentar a los circuitos digitales con una tensión regulada de 3.3 V se debe usar un regulador con esta tensión de salida y que soporte tensiones de hasta 40 V en la entrada. Además es necesario implementar un regulador adicional con tensión de salida de 5 V, para alimentar una llave Wi-Fi para permitir el acceso a internet en cualquier sitio.

Adicionalmente, para esta etapa es necesario considerar la corriente que cada uno de los reguladores debe entregar. El regulador de 3.3 V de salida que alimenta la mayor parte del circuito debe tener una salida de corriente de al menos 1 A. El sistema embebido Onion Omega 2 tiene un consumo máximo de 800 mA, el sintonizador Si4735 consume como máximo 23.1 mA, el ADC requiere 0.5 mA para una tasa de conversión de 40 kSPS, el micrófono consume 0.6 mA típicamente y el oscilador requiere entre 32 mA a 60 mA. Todo esto suma 884.2 mA como máximo, y dado que los reguladores comerciales se obtienen con corrientes de salida de 500 mA, 800 mA o 1 A, el que se utilice debe entregar al menos un amperio de corriente. Por otro lado, la llave Wi-Fi tiene un consumo máximo de 0.5 A, por lo que el regulador de 5 V a usar debe entregar al menos esa corriente.

Dado que el diseño se tiene pensado para usar los reguladores en un espacio reducido, con montaje superficial, estos deben ser conmutados y no lineales, que son de menor tamaño y consumen mucho menos potencia. Siendo el regulador conmutado, de alta eficiencia, es más acorde a los objetivos del proyecto.

Para mantener reducido el espacio del circuito ocupado por la etapa de alimentación, se hizo necesario considerar reguladores con una frecuencia de conmutación alta, para reducir el tamaño de la bobina comercial que se utilizaría con cada regulador. Las frecuencias de conmutación máximas en reguladores comerciales rondan el MHz.

Tras buscar un regulador de voltaje que cumpliera con las especificaciones requeridas, se escogió uno de la serie 'TS' del fabricante Semtech. Estos son reguladores de salida fija que cumplen con los requisitos que se buscan y tienen un precio unitario de unos \$1.33 USD, por lo que se escogió este modelo para el diseño. Se usará en cada dispositivo uno con salida de 3.3 V y otro con salida de 5 V.

2.2 Etapa de radiofrecuencia

En esta etapa, se considera la adquisición de la señal de radiofrecuencia, el manejo de la señal que hace el sintonizador y la digitalización de la información, de forma que pueda enviarse al sistema embebido. En el esquemático proporcionado por la empresa para el sistema de 4 sintonizadores, esta etapa se compone de la antena que captura la señal, una etapa de filtrado y amplificación de las señales de FM y AM, un circuito integrado que hace el procesamiento digital de la señal por cada sintonizador, y los 4 sintonizadores.

El diseño en este proyecto elimina la etapa de amplificación de FM, así como el circuito integrado DSP, ya que se hacen innecesarios en este caso. Como el sistema es de un solo sintonizador, la señal de radiofrecuencia es llevada directamente al sintonizador que posee una sensibilidad de $3.5 \mu\text{V EMF}$ típicamente, según lo indica el fabricante en la hoja de datos.

El circuito integrado DSP es innecesario en este caso, ya que la finalidad de este dispositivo es ejecutar un algoritmo de compresión de la información de los diferentes sintonizadores. Esto permite que usando un solo puerto serial I²S, se reciba la información de los 4 sintonizadores en el sistema embebido. Como en el diseño de este sistema se usa solo un sintonizador, la información se envía directamente al sistema embebido.

A solicitud de la empresa y luego de analizar la viabilidad de la propuesta, se decidió usar el sintonizador del fabricante Silicon Labs, modelo Si4735. Este modelo de sintonizador posee una serie de ventajas y características que permiten que sea apto para su uso en el proyecto. Este sintonizador es capaz de sintonizar radio FM, AM, así como onda corta (SW) y onda larga (LW). Este sintonizador tiene integradas las etapas de filtrado de la señal tanto para FM como para AM, posee control automático de ganancia y frecuencia, también posee decodificador digital de radio FM, procesamiento avanzado de audio, reloj de referencia programable, integra un regulador LDO, tiene salida analógica y digital de audio, posee interfaz de control que puede usarse con un SPI y soporta un amplio rango de tipos de antenas. Además, posee una serie de propiedades que son configurables y que le añaden muchas características más que son personalizables, permitiendo que el usuario tenga libertad en el uso del dispositivo según los requerimientos que tenga. Este dispositivo integra todas esas características en un encapsulado de tipo QFN de 20 pines con apenas 3.31 mm por cada lado, por lo que el espacio que ocupa es realmente pequeño a pesar de ser quizá el componente más importante del sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia.

Debido a que el sistema embebido que se eligió para el diseño solo tiene una entrada serial en formato I²S disponible (de la que se carece de librería para su uso) y los otros formatos de salida que ofrece el sintonizador no son compatibles, se debió usar un ADC para digitalizar una de las salidas analógicas de audio y transmitir esa información en otro formato serial compatible con el sistema embebido. Otra opción hubiera sido usar un circuito de procesamiento digital como los que se usaban cuando había muchos sintonizadores, pero esto aumenta el costo. El costo del ADC seleccionado es de \$1.5 USD.

El ADC para este diseño debía cumplir con características indispensables para el funcionamiento del sistema de adquisición de datos. Una de las principales características es que debía contar con salida de datos en formato serial, y además este formato serial debía ser compatible con el sistema embebido donde se almacena la información. Como opciones se tenía compatibilidad con un puerto SPI, I²C o UART. La cantidad de muestras por segundo que se generan en el ADC debe ser de al menos 40.000 muestras por segundo, preferiblemente más para ajustarse a los estándares de audio. Para reducir los costos de producción, fue necesario establecer que el ADC tuviera referencia interna.

También el dispositivo debía funcionar con alimentación de 3.3 V para que fuera compatible la tensión de su salida con la entrada del sistema embebido sin adicionar circuitería extra. La cantidad de bits de los datos que se generan en su salida debía ser de 16 bits o 12 bits al menos.

Luego de realizar la búsqueda de convertidores analógico-digital con esas características, se encontraron varias opciones que eran viables. No obstante, el elevado precio las dejó fuera. Tras buscar más opciones, se encontró un convertidor analógico-digital que cumplía con los requisitos. Es del fabricante MAXIM, el modelo MAX11645 y cumple a cabalidad con los requisitos a pesar de tener un precio de unos \$1.5 USD. El convertidor MAX11645 tiene 12 bits de resolución, su salida es en formato serial I²C de hasta 94.400 muestras por segundo en modo de bajo consumo, la referencia se configura para ser interna o externa, tiene una entrada diferencial o dos entradas de tipo ‘single-ended’ y puede alimentarse con tensiones entre 2.7 V - 3.6 V.

En resumen, la etapa de radiofrecuencia que se usa en este proyecto consiste en la adquisición, el manejo de la señal de radiofrecuencia por el sintonizador y la digitalización de la información por medio de un ADC para el envío al sistema embebido.

2.3 Etapa de almacenamiento y envío de datos de audio.

Esta etapa consiste en el sistema embebido que tiene la función de almacenar la información que proviene del ADC y los datos de audio que vienen del micrófono para su posterior envío al sistema de monitoreo de MONITEC. En el esquemático proporcionado por la empresa para el sistema de adquisición con 4 sintonizadores, se utilizó el sistema embebido MarsBoard CM-A20 de Haoyu Electronics. Este dispositivo tiene un procesador AllWinner A20 ARM Cortex A7 Dual Core CPU a 1 GHz de frecuencia de reloj y un procesador gráfico Mali-400 GPU. Tiene 1 GB de memoria RAM, almacenamiento de 8 GB tipo Nand Flash y mide 5cm x 7 cm en sus dimensiones físicas. Su precio es de \$40 USD para este modelo.

El sistema embebido que se use tiene que cumplir con algunas características para que sea elegible en el proyecto. Debido a que la cantidad de bits que provienen del sintonizador Si4735 y del micrófono que se use, es alta, se hace necesario que el sistema embebido a utilizar en el proyecto tenga puertos seriales disponibles. También es requisito que tenga una interfaz serial SPI para poder enviar los comandos al sintonizador, pues es la opción más sencilla con la que este se puede configurar. A solicitud de la empresa, el sistema de adquisición de datos debe poseer un puerto Ethernet para acceder a internet, así como ser accesible por medio de red inalámbrica, requisitos que están directamente ligados al sistema embebido que se use. Es importante que el sistema embebido a utilizar sea de tamaño reducido para no aumentar en gran medida las dimensiones del sistema de

adquisición de radiofrecuencia. El sistema embebido puede tener menos potencia de procesamiento y características de hardware que las que posee el sistema embebido Mars Board, que se usó hasta en la versión anterior, creada por la empresa. Esto debido a que ahora se debe manejar solamente 1 sintonizador mientras que anteriormente se debía manejar, al menos, 4 sintonizadores. Así se reduce el costo que representa el procesador en este proyecto.

Además, el sistema embebido debe ser compatible con algún sistema operativo basado en el software libre, preferiblemente con el 'kernel' Linux por las ventajas que ofrece y la basta información que se puede conseguir sobre Linux. Como el sistema embebido se debe usar básicamente para almacenamiento de la información y el envío por medio de internet, las características de frecuencia de reloj de los procesadores, memoria gráfica y memoria RAM no son características de una importancia crítica para el proyecto, por lo que hay flexibilidad en estos aspectos. Por las características de precio y tamaño reducido, es posible que la búsqueda se enfoque en sistemas embebidos utilizados en dispositivos IoT, que generalmente son de menor precio y tamaño que otros sistemas embebidos comerciales, pero conservando gran parte de las características de estos. Todos los requisitos anteriormente descritos nacen de la necesidad de reducción de costos para el cumplimiento del objetivo del proyecto y la preferible reducción del tamaño del sistema de adquisición; pero asegurándose que se tiene las características suficientes para el correcto funcionamiento del dispositivo.

La investigación acerca de sistemas embebidos de tamaño reducido y con las características descritas anteriormente, llevan al sistema embebido Onion Omega 2 S por la relación precio/características que posee. Este modelo en específico está pensado para montaje superficial, lo que favorece su colocación en la misma placa electrónica que el resto de los componentes del sistema de adquisición de datos, sin aumentar la complejidad ni las dimensiones para montarlo. Las únicas desventajas que se encontraron en este modelo con respecto al Omega 2 o el Omega 2 +, es que no integra la antena de Wi-Fi ni el LED de estado como los otros dispositivos, pero se puede conseguir un chip antena apropiado para darle acceso inalámbrico en unos \$0.5 USD y el LED es incluso de un costo menor. El Onion Omega 2 S ofrece un puerto SPI, un puerto en formato serial I²S, 1 puerto en formato serial I²C, pines para puerto Ethernet, pin para adaptar un chip antena para acceso Wi-Fi, se alimenta con 3.3 V y ofrece algunas otras características de hardware adicionales que escapan al interés de este proyecto. El sistema operativo es compatible con Linux como se solicitó, la velocidad del procesador es de 580 MHz, posee 64 MB de memoria RAM y 16 MB de almacenamiento flash, su tamaño es de 3.5 cm x 2.1 cm y con solamente 2.8 mm de altura. Finalmente, su precio de \$8 USD hace que no se haya encontrado otro sistema embebido comercial con esas características y precio, siendo esta la opción más compatible con los objetivos del proyecto.

2.4 Puertos y conectores del sistema

Los puertos y conectores en el sistema de adquisición de datos son los encargados de comunicar el sistema de adquisición de datos con los dispositivos externos que en este caso funcionan como ‘extensiones’ necesarias para el funcionamiento. Los puertos y conectores que se solicitaron por parte de la empresa son 1 USB tipo A para alimentación de la llave Wi-Fi, 1 conector tipo U.FL para la antena de radiofrecuencia, 1 puerto Ethernet y 1 micrófono.

En el esquemático facilitado por la empresa para el sistema de adquisición con 4 sintonizadores, los puertos que existen son: 4 puertos JTAG, 1 conector serie F de codo para PCB para la antena, 1 conector para MicroSD, 1 puerto Ethernet, 1 puerto USB tipo A y un puerto USB tipo B.

En el caso de los puertos y conectores, el precio no es elevado y si se opta por usar puertos o conectores que son comunes, se tiene a disposición una enorme variedad de posibilidades.

Para el caso del puerto USB tipo A, dado que su función será alimentar la llave Wi-Fi, se conectarán únicamente los pines correspondientes a la tensión de 5 V y a tierra. El puerto USB que se use, debe ser capaz de soportar los 500 mA que requiere para la alimentación la llave Wi-Fi. Este valor de corriente no es tan grande como para requerir el uso de un conector con características especiales, por lo que se puede usar cualquier conector USB tipo A convencional.

El conector U.FL para la antena que capta la señal de radiofrecuencia, es conveniente por el espacio reducido que ocupa con respecto al que se usó para el sistema de adquisición de datos con 4 sintonizadores. Este conector debe tener una impedancia de 50Ω para asegurar el acople de impedancia con la antena que propuso la empresa y también debe tener un excelente desempeño en las frecuencias del espectro que abarca la banda comercial de FM.

El puerto Ethernet que se utilice en el diseño, preferiblemente debe integrar los transformadores de desacople, que se utilizan con fines de aislamiento electromagnético. Si se usara un conector RJ45 sin estos transformadores, sería necesario añadir al diseño un circuito integrado que los incluya o bien agregarlos en forma separada, lo que aumenta tanto el costo como el espacio utilizado para colocar el puerto RJ45 en el sistema de adquisición de datos. El sistema embebido Omega 2 posee los pines Rx+, Rx-, Tx+ y Tx-. Adicionalmente se requiere la alimentación que deberá ser de 3.3 V y una pequeña red que se usa para conectar la carcasa de blindaje electromagnético a tierra. Esta red consiste una inductancia y dos capacitancias en paralelo antes de conectar al nodo tierra.

El micrófono permite la identificación de sonidos en sus alrededores y también permite verificar la correcta adquisición y envío de la información de radiofrecuencia que almacena el sistema embebido Omega 2. La información que se adquiere debe hacerse

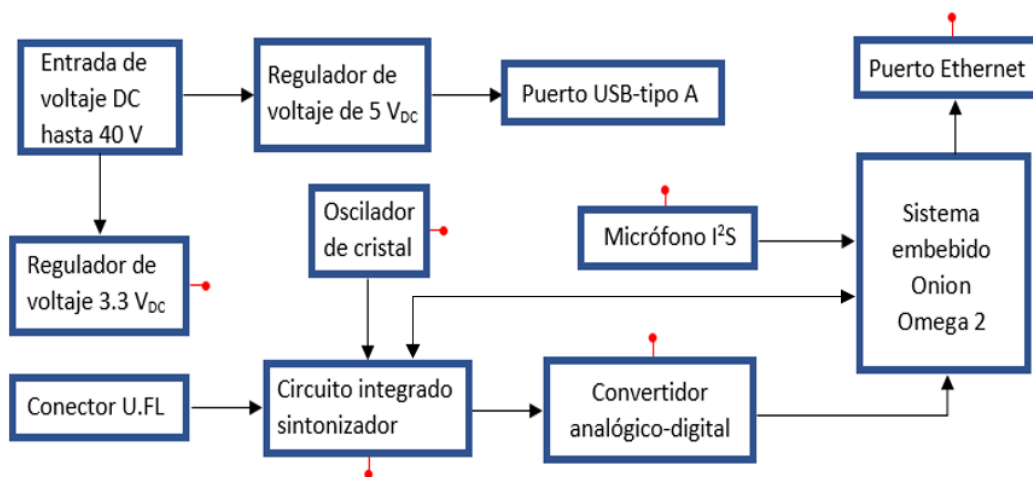
llegar en forma serial al embebido. Existe la posibilidad de digitalizar la información analógica del micrófono mediante un convertidor analógico-digital como el utilizado para la etapa de radiofrecuencia o se puede usar un micrófono con salida digital serial. Esta última opción es más conveniente porque permite reducir el espacio necesario y la cantidad de componentes a utilizar y el costo de producción, por lo tanto.

Tras realizar la búsqueda de puertos y conectores que cumplieran los requisitos descritos, se encontraron: para el puerto USB tipo A se usa un conector convencional del fabricante Assman, que soporta hasta 1.5 A y tiene un costo de \$0.5 USD aproximadamente. Para el conector U.FL se usa uno del fabricante TE Connectivity AMP Connectors, que mide 3 mm x 3mm, con una impedancia de 50 Ω para que se acople a la antena de montaje superficial, y el fabricante garantiza buen desempeño en frecuencias de hasta 6 GHz como máximo, el costo es de \$0.2 USD. Para el conector RJ45 se encontró uno del fabricante Abracon LLC que posee de manera interna los transformadores de desacople, por lo que solamente se debe hacer las conexiones de los pines y usar la red de la que se habló antes; el precio es de \$3.5 USD aproximadamente. Finalmente, el micrófono que se usa es del fabricante Knowles, con salida digital serial en formato I²S que permite obtener una menor cantidad de ‘Jitter’, de tipo omnidireccional de 20Hz-20KHz, con 3.3 V de alimentación, tamaño de 3.5 mm x 2.65 mm y el costo es de \$3 USD.

2.5 Esquemático representado en diagrama de bloques

Se presenta el esquemático en diagrama de bloques del circuito del sistema de adquisición de datos en radiofrecuencia. No se presenta el esquemático con los componentes y el circuito por motivos de confidencialidad a solicitud de la empresa.

Diagrama 2. Diagrama de bloques del circuito realizado



2.6 Diseño del software en el sistema de adquisición de datos

Con el esquemático expuesto anteriormente se concluye lo que corresponde al diseño y enfoque de la solución del hardware. Ahora corresponde explicar el enfoque de la solución que debe tener el software que corresponde a la otra etapa del proyecto.

Se puede enfocar el diseño del software que se requiere en 2 ramas, que son la comunicación y la interfaz gráfica para el usuario. Cada una de estas ramas tiene una funcionalidad bien delimitada, pero hay dependencia mutua entre ambas, pues la rama de comunicación debe atender a lo que el usuario solicite en la interfaz gráfica.

2.6.1 Etapa de comunicación

Esta etapa consiste en la comunicación del sistema embebido Onion Omega 2 con el resto de los dispositivos del sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia, pues es el Omega 2 quien recibe los datos que se generan en los circuitos integrados para su manipulación y uso. El sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia recibe los datos de sonido del sintonizador Si4735.

Para ello, se debe tener comunicación con el sintonizador para enviarle los comandos/propiedades que debe ejecutar/configurar y recibir la respuesta que se genera en el sistema controlador del Si4735. El embebido Onion Omega 2S a utilizar, ofrece distintos puertos de comunicación serial, dentro de los que hay 3 UART, 1 SPI, 1 I²C, 1 I²S, 1 PCIe, 1 USB y un Ethernet. El sintonizador Si4735 es compatible con 3 formatos para la recepción de los comandos a utilizar, dentro de los que están el formato SPI y 3-wire (similar al SPI). Por este motivo se elige usar y configurar el puerto SPI del Onion Omega 2S para el envío de los comandos y recepción de los bytes de respuesta. Además, se debe escoger un puerto para los datos digitales de audio provenientes del sintonizador, dado a que se eligió el ADC expuesto en uno de los puntos anteriores, se usará el puerto I²C para este fin, por lo que debe configurarse este puerto serial. Finalmente, pertenece a la rama de comunicación la habilitación del puerto Ethernet que debe funcionar como un acceso alternativo a internet.

Definido lo anterior, el software de comunicación tiene como funciones las siguientes:

- Enviar los comandos/propiedades al sintonizador y recibir la respuesta mediante el puerto SPI del Onion Omega 2S, según sean las solicitudes del usuario.
- Solicitar al sintonizador los indicadores de RSSI y SNR, usando un paso de 10 kHz, desde los 88 MHz hasta los 108 MHz y almacenar esos datos que llegan por el puerto SPI en la memoria del sistema embebido para su uso posterior.

- Recibir los datos en formato I²C del ADC para almacenarlos en la memoria del sistema embebido. Antes de almacenar los datos, estos deben pasar por 5 filtros FIR pasa-bandas con un ancho de banda de 500 Hz cada filtro, por lo que se va desde los 100 Hz hasta los 2.6 kHz.
- Usando los valores resultantes de los filtros FIR pasa-banda, se debe generar 5 archivos con los datos correspondientes a la salida de cada filtro.
- Atender las peticiones de sintonización de emisora y nuevo barrido de indicadores RSSI y SNR que haga el usuario en la interfaz gráfica. Con el uso de las funciones que se diseñen, generar los comandos con la información requerida para su envío al sintonizador.

Para cumplir los objetivos del software en la etapa de comunicación, lo primero es colocar las tensiones en los pines GPIO_RST, GPIO1 y GPIO2 del sintonizador con los valores correspondientes. El fabricante, en el documento guía de programación para el Si4735, explica cómo debe encenderse el dispositivo. Primero se coloca el pin GPIO-RST en 0 V durante 275 microsegundos. Pasado este tiempo, se debe colocar en 1 este pin nuevamente para asegurar que se mantiene encendido el sintonizador y ya no se cambia más. Para establecer el modo de comunicación con el sintonizador, se debe poner ceros o unos lógicos en los pines GPIO 1 y 2.

Según la guía de programación, para establecer comunicación en modo SPI, se debe colocar un uno lógico en ambos pines. Los valores se establecen en los pines usando una librería preinstalada en el Onion Omega 2S que permite desde la línea de comandos, colocar un cero o uno lógico en los pines de propósito general. Para hacerlo desde el programa en C++, se debe usar una llamada al sistema.

En del Onion Omega 2S, se debe inicializar una estructura de C++ que contiene los parámetros con los que la librería configura la comunicación SPI. Una vez que se llama a las funciones de inicialización, registro y colocación de los parámetros para la librería SPI del Onion Omega 2, se colocan los valores que van en el buffer de transmisión del SPI, que consta siempre de 9 bytes.

Para enviar un comando al sintonizador, lo primero es colocar en el buffer de transmisión del puerto SPI, los valores que corresponden a un comando. En el primer byte, va un valor en hexadecimal que le permite al Si4735 saber que se quiere enviar un comando, en los demás va el código del comando respectivo y el resto de la información para este comando.

El primer comando que se debe enviar es el de “POWER_UP”, y por recomendación del fabricante se debe esperar unos 300 ms antes de continuar configurando el sintonizador. Las siguientes transferencias que se hacen son para configurar las propiedades de interés para el proyecto. Según los datos que facilitaron en la Empresa, se deben configurar las propiedades REF_CLK, REF_PRESCALE, FM_BLEND_STEREO_THRESHOLD y FM_DEEMPHASIS. Cada una se configura usando el código del comando SET_PROPERTY, así como el valor de la propiedad a modificar, en un par de los bytes que se transmiten.

En otro par de bytes se escribe el valor que tendrá esa propiedad. En la guía de programación se muestran los rangos de valores válidos según la propiedad a modificar y qué valores están reservados para ciertas funcionalidades del sintonizador y cuales tiene por defecto cada propiedad. Colocados los valores de cada propiedad en el buffer de transmisión del puerto SPI, se hace la transferencia al sintonizador y este configura las propiedades especificadas con los valores dados. Este procedimiento descrito se debe hacer solo una vez, al inicio del programa y la función `EncenderSintonizador()` del código en C++ será la encargada de hacerlo.

Cuando en el archivo compartido entre el código de C++ y el código PHP se lee el último valor de emisora ingresado por el usuario o la solicitud de un nuevo barrido de los indicadores RSSI y SNR, la función `LeerSolicitudesUsuario()` se encarga de dar cumplimiento a las peticiones. Esta función lee el valor de la emisora que está almacenado en el archivo compartido y comprueba si es diferente al último valor de emisora leído. En caso de que sea diferente, llama a la función `SintonizarEmisora()` y le pasa como parámetro el nuevo valor de emisora que se solicitó.

La función `SintonizarEmisora()` debe descomponer en 2 bytes el valor de emisora solicitado y asignarlo a los espacios de buffer de transmisión del puerto SPI que corresponden al valor de la emisora, según lo que espera el sintonizador. Esto es necesario porque el controlador del sintonizador requiere que el valor de la emisora se le envíe como dos bytes por separado. Luego, se asigna al buffer de transmisión del puerto SPI los otros valores y se hace la transferencia al sintonizador. Es importante mencionar que los valores aceptados por el sintonizador para el comando `FM_TUNE_FREQ` que se debe usar, van de los 6400 a 10800, por lo tanto, un valor dentro de este rango es el que se descompone en los 2 bytes que se mencionó.

Si la función `LeerSolicitudesUsuario()` lee un 1 en la primer línea del archivo compartido entre los códigos, es porque se ha solicitado un nuevo barrido de los indicadores RSSI y SNR. En este caso, se llama a la función `NuevoBarrido()`. Esta función se debe encargar de sintonizar y leer los 2000 valores de RSSI y SNR para la banda de FM desde los 88 MHz hasta los 108 MHz con un paso de 10 kHz. Lo primero que debe hacer es colocar al sintonizador en la frecuencia de 88 MHz, y con un ciclo se repite 2000 veces la sintonización de las frecuencias y se solicita por el puerto SPI los valores de RSSI y SNR de cada emisora. Un contador se puede usar para incrementar el valor de la emisora a sintonizar en cada recorrido del ciclo hasta completar los 2000 recorridos. Al realizar cada recorrido, se debe respaldar en archivos Excel separados, los valores recuperados del sintonizador para RSSI y SNR.

Mientras el software no detecte que se solicita sintonizar una nueva emisora o hacer un nuevo barrido de los indicadores, la señal de audio en las frecuencias sintonizadas es muestreada y recibida en el sistema embebido en formato serial I²C. Dentro del programa de C++, se ejecuta un ciclo constantemente y dentro del ciclo están las funciones `LeerSolicitudesUsuario()` y `ProcesadoDatos()` de forma que si el usuario no ha solicitado nada, será la función `ProcesadoDatos()` la que se ejecute permanentemente.

La función `ProcesadoDatos()` será la encargada de crear 5 archivos de Excel donde se guardarán los valores provenientes del puerto I²C. Cabe destacar que antes de empezar a recibir los datos por el puerto I²C, se debe configurar el ADC enviando en una transferencia de escritura dos bytes, uno llamado 'Setup byte' y el otro es el 'Configuration byte'. Esto se debe hacer una vez solamente. En el 'main' del código C++, se calculan los coeficientes $h(n)$ para cada uno de los 5 filtros FIR pasa-bandas, así como los coeficientes de la ventana Hanning, que fue la que se solicitó por parte de la Empresa. Estos valores se almacenan en un arreglo de una dimensión para su uso con los datos de entrada posteriormente. Los filtros digitales realizados usan 128 'taps' para los cálculos y se debe hacer así por solicitud de la empresa.

El tamaño del buffer requerido para almacenamiento de los datos de audio es de un segundo, la frecuencia de muestreo deseada es de 40,000 muestras por segundo. Entonces con ayuda de un ciclo de 40,000 repeticiones se deben leer los datos del buffer de recepción del puerto I²C donde se almacena el valor leído descompuesto en 2 bytes.

De estos 16 bits, solo 12 corresponden al dato y los 4 primeros bits del byte más significativo son siempre unos lógicos. La función se encarga de eliminar estos bits innecesarios mediante operaciones de bits y asignar a una variable entera el dato completo con 12 bits de información válida. Este valor se escala para que corresponda a un valor de tensión, haciendo uso del factor $(3.3 \text{ V})/2^{12}$, pues el ADC es de 12 bits y al hacer este escalado se obtiene el respectivo valor de tensión entre (0 - 3.3) V leído por el ADC. Hecho lo anterior, con ayuda de un ciclo de 128 repeticiones (para los 128 'taps'), se hace el filtrado de cada dato en cada una de las 5 bandas y se almacena el resultado en variables temporales que finalmente se respaldan en cada uno de los 5 archivos Excel según corresponda. Así se obtienen los datos filtrados con filtros FIR pasa-banda mediante la técnica del ventaneo y usando la ventana de tipo 'Hanning' como se mencionó anteriormente.

2.6.2 Etapa de interfaz gráfica para el usuario

La etapa de interfaz gráfica para el usuario es la que permite configurar el sintonizador con una emisora específica y solicitar un nuevo barrido para actualizar valores de los indicadores RSSI y SNR. La interfaz gráfica se debe mostrar en el servidor web del Onion Omega 2S y es aquí donde el usuario puede escribir el valor de la frecuencia de la emisora que desea sintonizar y solicitar una actualización de los datos de RSSI y SNR. Estas son las funcionalidades que se han solicitado por parte de la empresa para la interfaz gráfica del usuario.

De esta manera se tiene que la interfaz gráfica debe cumplir las siguientes funciones:

- Ofrecer una pantalla de diálogo en el servidor web al usuario para que especifique la frecuencia que desea sintonizar.

- Ofrecer un botón para que el usuario especifique si desea hacer un nuevo barrido que actualice los valores de los indicadores RSSI y SNR de las frecuencias en la banda comercial de FM desde los 88 MHz hasta los 108 MHz.
- Permitir que el programa en C++ inicie el código PHP de la página web.
- Preferiblemente avisar al usuario si los datos de emisora y solicitud de un nuevo barrido se enviaron correctamente.

Para cumplir los objetivos de software en la etapa de interfaz gráfica para el usuario, se debe hacer un programa en HTML y PHP que permita al usuario mediante la conexión al servidor web del sistema embebido Onion Omega 2S hacer las peticiones de emisora a sintonizar y solicitud de un nuevo barrido de RSSI y SNR en la banda de FM comercial.

El Onion Omega 2S tiene un servidor llamado 'uhttpd' que permite correr código PHP en el servidor web del dispositivo, lo que permite crear páginas web para atender solicitudes del usuario como en este caso. Luego de instalar los programas para PHP y CLI ya se puede crear páginas web personalizadas con las facilidades que HTML y PHP ofrecen.

CLI es una herramienta que permite ejecutar programas de PHP desde la terminal de Linux, y en este caso particular es útil porque de esta manera se puede iniciar el código PHP de las páginas web desde el programa en C++ usando las llamadas al sistema y esta herramienta.

Para esta etapa se debe diseñar una página con el uso de formularios de HTML para que el usuario ingrese el valor de la frecuencia de la emisora que desea sintonizar, en el típico formato con un decimal que se suele usar. Sin embargo, el usuario debe tener la posibilidad de especificar hasta un segundo decimal si así lo desea. Si se va a sintonizar la frecuencia 92.7 MHz, puede introducir ese número en la pantalla de diálogo o puede escribir 92.70. También esta página debe ofrecer un 'checkbox' de HTML, para que al marcarlo se indique que desea un nuevo barrido de los indicadores RSSI y SNR. La figura muestra la apariencia de esta página principal.



Figura 3. Página web principal de interfaz gráfica usuario (elaboración propia)

En el cuadro de texto para la emisora no se puede ingresar letras o caracteres no numéricos, no se puede ingresar valores menores a 88 ni mayores a 108, tampoco con más de 2 decimales y no se puede dejar vacío el cuadro de diálogo al enviar el formulario. Una vez que se envía el formulario el servidor web lo dirige a una página que confirma que los datos han sido enviados y guardados correctamente en el archivo compartido por los códigos en C++ y PHP. Ahí se le presenta al usuario un botón para regresar de nuevo a la página principal. La siguiente figura muestra la página web de confirmación:



Figura 4. Página de confirmación de envío de datos solicitados. (elaboración propia)

El código de PHP recibe los valores ingresados por el usuario en el cuadro de diálogo y el 'checkbox' con el método `$_REQUEST`, y con ayuda del código PHP se hace la escritura de estos valores en el archivo compartido por los códigos usando las funciones `fopen()`, `fputs()` y `fclose()`. La primera permite abrir el archivo reemplazando su contenido o crearlo. La segunda permite escribir en el archivo. La tercera lo cierra para que el código en C++ pueda acceder al archivo y leer los nuevos valores. Como se puede apreciar en las imágenes se trabajó también en el formato de la página web, de manera que se cambiaron aspectos como la posición del texto en las páginas, el color y la fuente del texto, la colocación de una imagen de fondo y el logotipo de la empresa.

Capítulo 3.

Resultados

3.1 Resultados de hardware

Las consideraciones de diseño que se expusieron anteriormente sobre el circuito y los componentes a utilizar se mantuvieron sin cambio en la fabricación y montaje de la placa electrónica. Luego de montar los componentes en el PCB diseñado, no se consiguió el funcionamiento del Onion Omega 2S en el PCB, por lo que solo se logró la prueba de concepto. No se pudo comprobar que el problema con el sistema embebido se debiera a un mal diseño del PCB, pero tampoco se puede demostrar lo contrario. Se hicieron mediciones con multímetro en los pines del Onion Omega 2S donde se tenía certeza de los valores de tensión que teóricamente debían existir y no se encontró problemas. Los pines que se comprobaron fueron los de V_{DD} donde efectivamente la tensión medida fue de 3.3 V, los de GND donde la tensión medida fue de 0 V para todos los casos y la continuidad entre todos los pines GND se comprobó también. Luego de investigar los valores de tensión que deben existir en los pines HW_RST y SW_RST para un correcto funcionamiento según el fabricante, se hicieron las mediciones de tensión y los resultados coincidieron con lo indicado para el correcto funcionamiento.

En lo relacionado al diseño, se usó en su mayoría componentes de montaje superficial. Los componentes de tipo ‘thru-hole’ que se usaron se colocaron de tal manera que no provocaran problemas con los componentes de montaje superficial en ninguna de las caras del PCB. De este tipo solo se utilizaron para los conectores USB-A y RJ45 para el puerto Ethernet. Además, se hizo un par de agujeros donde se conectan los cables de alimentación. Esto se hizo para darle mayor soporte mecánico a los ‘pads’ donde se deben soldar los cables.

La placa electrónica se fabricó usando 6 capas, inicialmente se pensó en usar 4 capas, pero luego de hacer la distribución de los componentes en ambas caras, se decidió por parte de la Empresa añadir un plano de 3.3 V y una capa de señal más.

Los ‘footprints’ de varios de los componentes utilizados fueron diseñados exitosamente en una librería de ‘footprints’ en la herramienta Altium Designer, que permite crear librerías de esquemáticos y ‘footprints’ de componentes que no están en sus librerías estándar. Con las herramientas de dibujo y medición que ofrece el programa y siguiendo las recomendaciones para el diseño de los ‘footprints’ dadas por el fabricante, se dibujaron exitosamente.

También se creó una librería de esquemáticos para los componentes que lo requerían, que fueron los circuitos integrados, los conectores y el sistema embebido Onion Omega 2.

Las pistas fueron diseñadas usando un ancho de 8 milésimas de pulgada, excepto aquellas que por la corriente que conducen deben ser más anchas. Las más críticas por el paso de alta corriente son de 30 milésimas y las de vulnerabilidad media se hicieron de 16 milésimas. Las pistas por donde circula la mayor parte de la corriente se ubican en las caras de la placa electrónica, lo que les permite conducir más corriente con esos anchos, con un riesgo menor que si estuvieran en las capas intermedias del PCB.

Los componentes fueron distribuidos en ambas caras de la placa electrónica para reducir el espacio requerido y se hizo de la siguiente manera:

- En la parte superior se colocaron el sistema embebido Onion Omega 2S, los reguladores de tensión de 3.3 V y 5 V, así como los componentes periféricos correspondientes (resistencias, capacitores y bobinas), y la antena del sistema embebido. También se colocaron los fiduciales y los 'pads' de los cables de alimentación.
- En la parte inferior se colocaron el micrófono, el conector de la antena, el ADC, el circuito integrado de protección ESD, el sintonizador, así como los conectores USB-A y el conector RJ-45.

La distribución de los componentes en las caras del PCB se hizo dejando en los bordes de la placa los periféricos y cumpliendo las recomendaciones del fabricante para el enrutamiento del sintonizador. Finalmente, se obtuvo una placa de 4 cm x 6 cm. Las siguientes figuras muestran la caras superior e inferior del PCB, con la distribución de los 'pads' que se expuso antes:

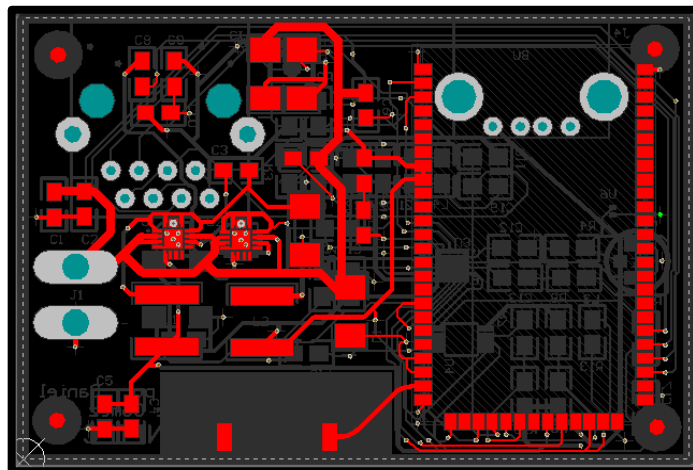


Figura 5. Vista superior del PCB, trazado de pistas y 'pads'. (elaboración propia)

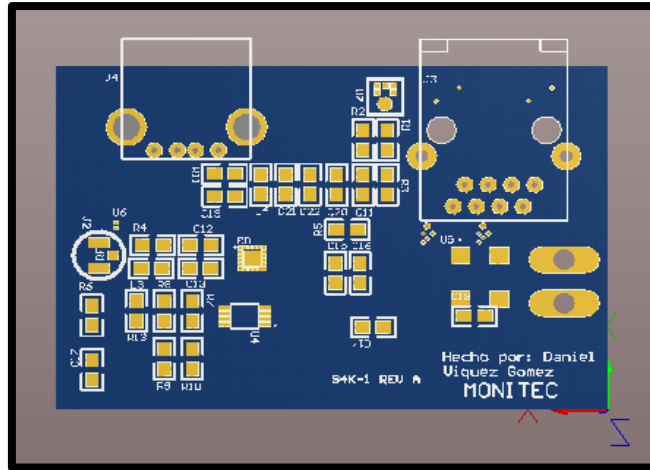


Figura 8. Vista inferior de la placa electrónica diseñada (elaboración propia)

En cuanto al cumplimiento de condiciones de funcionamiento de la placa electrónica, el software Altium Designer posee una herramienta de verificación de reglas de diseño que involucra diversos aspectos. La herramienta permite verificar el cumplimiento del diseño del circuito en cuanto a normas eléctricas, el enrutamiento de las pistas, las conexiones con los elementos de montaje superficial, el estilo de conexión con los planos, algunas normas relacionadas con la máscara de soldadura y otros aspectos que no están relacionados con los intereses del proyecto. Tras finalizar el diseño y ejecutar la herramienta 'Design Rule Check', no se obtuvieron errores en el diseño.

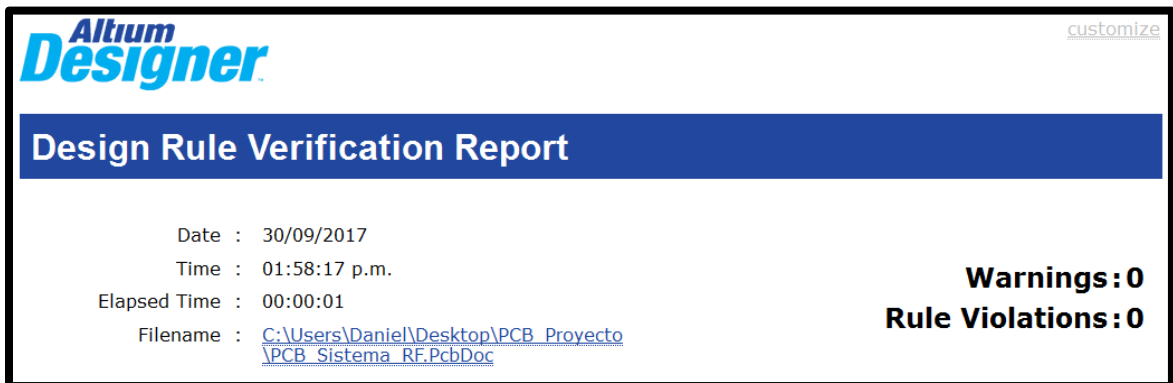


Figura 9. Resultados de ejecución de herramienta Design Rule Check en Altium Designer. (elaboración propia)

La placa electrónica se fabricó en China, se fabricaron 18 copias, y se obtuvo el resultado final que se muestra en las siguientes imágenes:

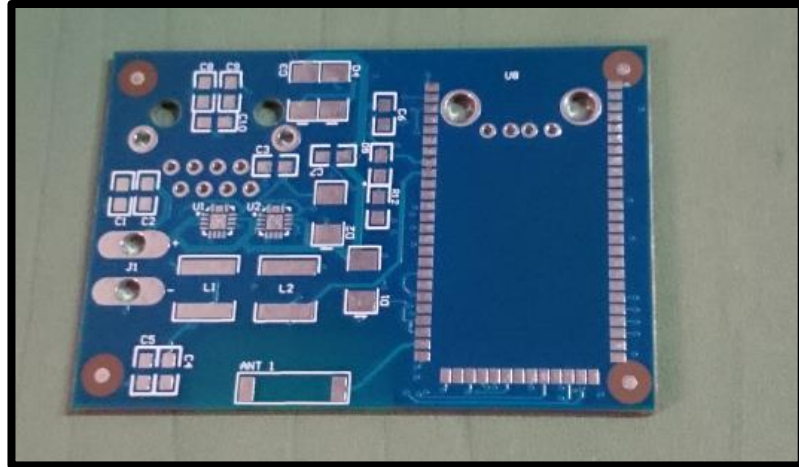


Figura 10. Vista superior del PCB fabricado. (elaboración propia)

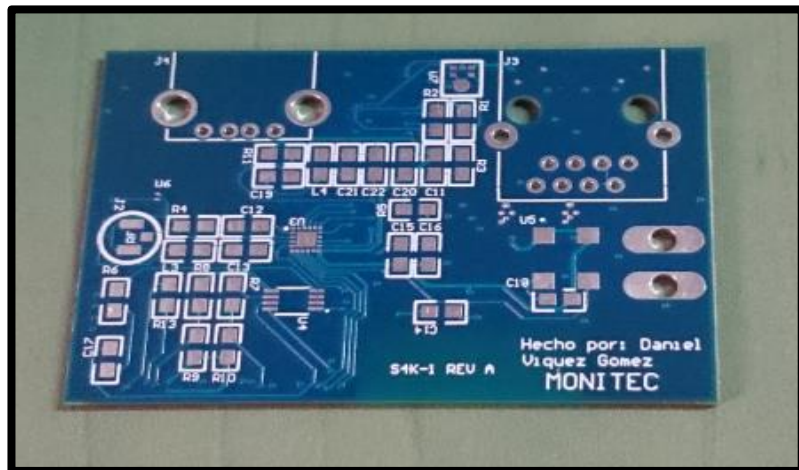


Figura 11. Vista inferior del PCB fabricado. (elaboración propia)

Una vez montados los componentes, la placa quedó así:

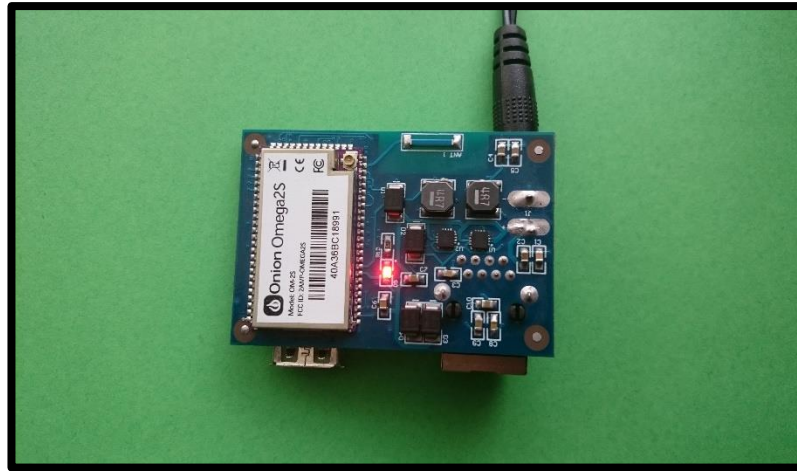


Figura 12. Vista superior del PCB con componentes. (elaboración propia)

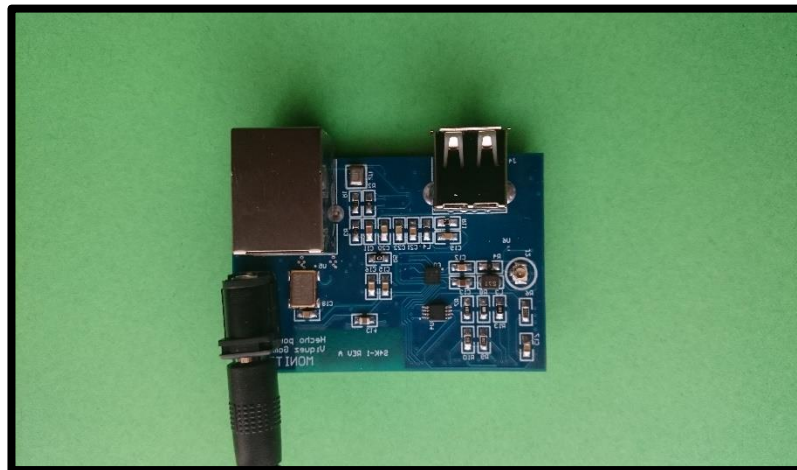


Figura 13. Vista inferior del PCB con componentes. (elaboración propia)

Al hacer las pruebas de funcionamiento del circuito, se tuvo los problemas de funcionamiento descritos anteriormente. El Onion Omega 2S debió generar una red que permite conectarse al dispositivo para hacer la configuración inicial y esta nunca se generó. Se hicieron las pruebas descritas al inicio de este capítulo pero no se logró hacer que funcionara el sistema embebido y por lo tanto no se pudo comprobar el funcionamiento del resto del sistema de adquisición.

Como un aporte adicional a lo establecido en los objetivos del proyecto, se diseñó un chasis para el sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia. El diseño se hizo con ayuda de la herramienta gratuita de Autodesk llamada ThinkerCAD. Considerando el tamaño del PCB diseñado en Altium Designer, así como los tamaños y posición de los periféricos del sistema, se realizó el diseño que se muestra en las siguientes figuras:

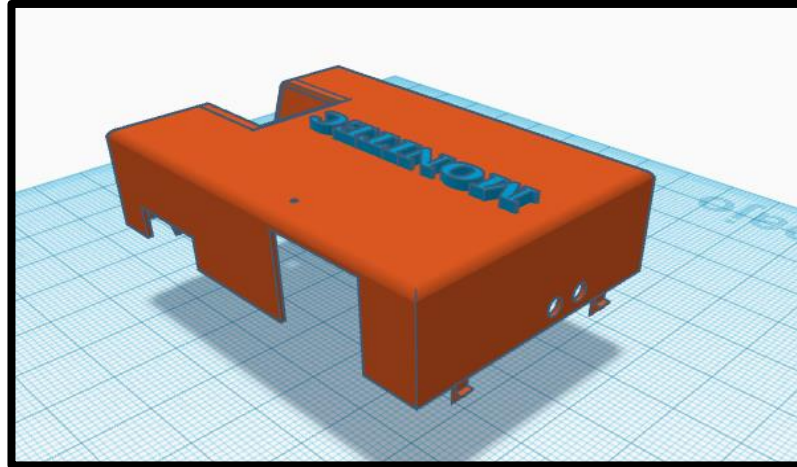


Figura 14. Vista costado izquierdo posterior del chasis diseñado. (elaboración propia)

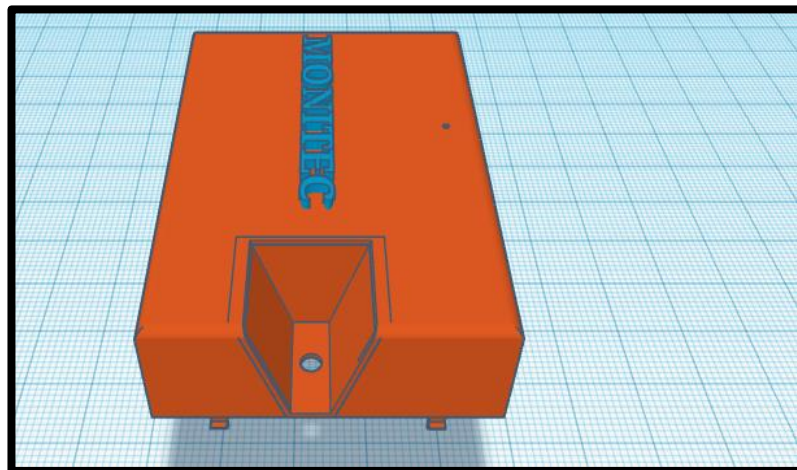


Figura 15. Vista lateral izquierda del chasis diseñado. (elaboración propia)

Se observa en la figura 15, que corresponde a una vista de la tapa del chasis, los agujeros considerados en el diseño para los conectores de los periféricos USB y RJ45, así como un par de agujeros circulares para la alimentación en la otra cara de la pieza. En el plano superior, el pequeño agujero arriba de las letras se hizo para facilitar al micrófono la captura del sonido. En la figura 16, se muestra la vista lateral del chasis y el agujero que se muestra en la parte baja tiene el propósito de permitirle al usuario conectar o quitar la antena de radiofrecuencia fácilmente. Las siguientes figuras muestran el diseño de la base del chasis, que será donde se coloque la placa electrónica.

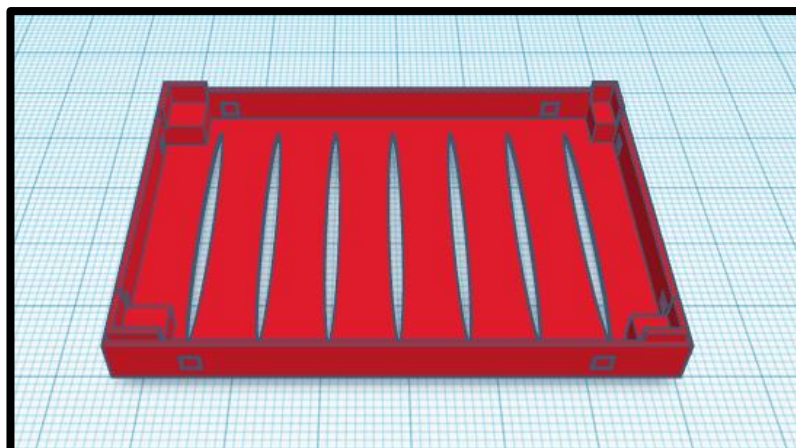


Figura 16. Vista frontal de la base del chasis. (elaboración propia)

Como puede observarse en la figura 17, la base del chasis tiene agujeros que permiten la ventilación del circuito y el flujo de aire. El propósito es que el sistema embebido Onion Omega 2 pueda ventilarse y evitar el sobrecalentamiento, así como los reguladores de tensión que están ubicados en esta misma cara del circuito. También es la base la que posee en cada cara de los costados, los agujeros que receptores para el cierre a presión con la tapa.

3.2 Resultados de software

Para el diseño del software, se tomó en cuenta los requerimientos expuestos en el capítulo anterior, y lo necesario para cumplir con los objetivos relacionados al software que se propusieron por parte de la empresa.

Los datos de audio se deben separar en 5 bandas para aplicar posteriormente los algoritmos de procesamiento que MONITEC implementó y utiliza desde hace varios años para la generación de la información estratégica. Se solicitó por parte de la Empresa realizar 5 filtros digitales de respuesta finita al impulso (FIR), de tipo pasa-banda con el método del ventaneo. Estos filtros van desde los 100 Hz hasta los 2600 Hz y cada uno tiene 500 Hz de ancho de banda. Los anchos de banda y las frecuencias especificadas fueron solicitadas así por la empresa pues representan los datos de interés para el proyecto. También se solicitó que el número de 'taps' o coeficientes usados por los filtros para el cálculo, fuera de 128. La respuesta al impulso del filtro que se diseña se obtiene mediante la multiplicación de la respuesta al impulso deseada y la función ventana que se elija para el cálculo. La elección de la función de respuesta al impulso deseada se elige dependiendo del tipo de filtro requerido, ya sea pasa-bajas, rechaza-banda etc.; en este caso el tipo de filtro requerido es pasa-banda.

Las funciones ventana le dan características particulares y únicas al tipo de filtro diseñado, por lo que la calidad de los resultados obtenidos está fuertemente ligada al tipo de función ventana que se elija. Dependiendo del tipo de función ventana se tendrán resultados diferentes en el ancho de transición del filtro, el rizado en la banda y la relación en decibelios entre el lóbulo principal y los lóbulos laterales, por ejemplo. Inicialmente, por parte de la empresa se solicitó usar la función ventana de tipo 'Hanning'. Se tomó el código que se había escrito en el software del proyecto, para filtros pasa-banda con las características anteriormente descritas y se llevó a Matlab para realizar simulaciones de la respuesta en magnitud de los filtros diseñados, usando la función ventana 'Hanning'. Como entrada se usaron ondas senoidales de diferentes frecuencias con amplitudes entre 0 V a 3.3 V como se espera obtener los datos del ADC en el circuito. Se obtuvieron estos resultados para las gráficas de respuesta en magnitud de los filtros pasa-bandas:

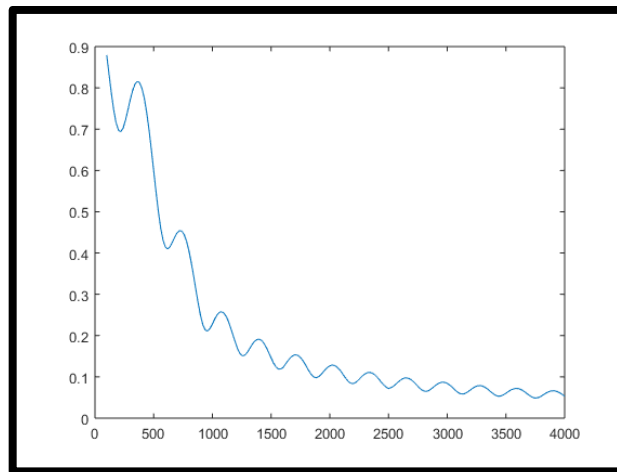


Figura 17. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 1° filtro pasa-banda, usando función ventana Hanning. (elaboración propia)

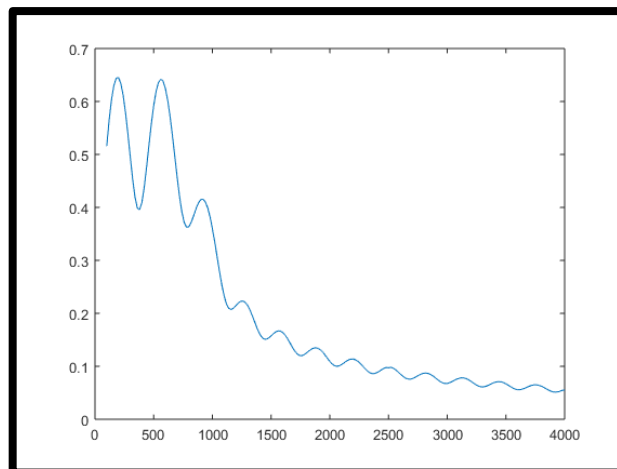


Figura 18. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 2° filtro pasa-banda, usando función ventana Hanning. (elaboración propia)

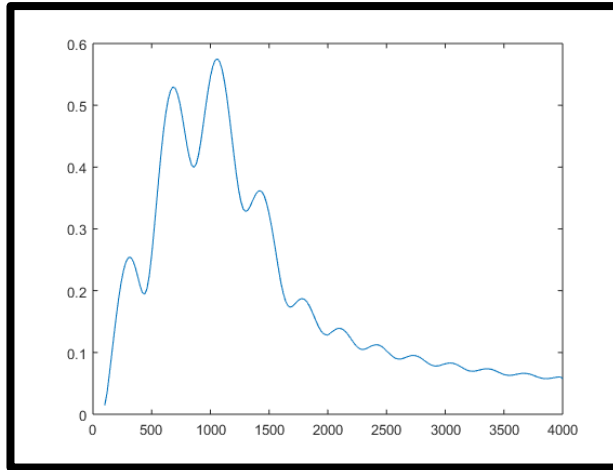


Figura 19. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 3° filtro pasa-banda, usando función ventana Hanning. (elaboración propia)

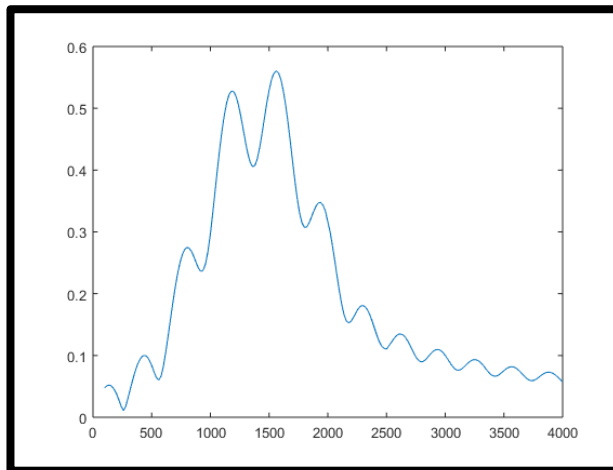


Figura 20. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 4° filtro pasa-banda, usando función ventana Hanning. (elaboración propia)

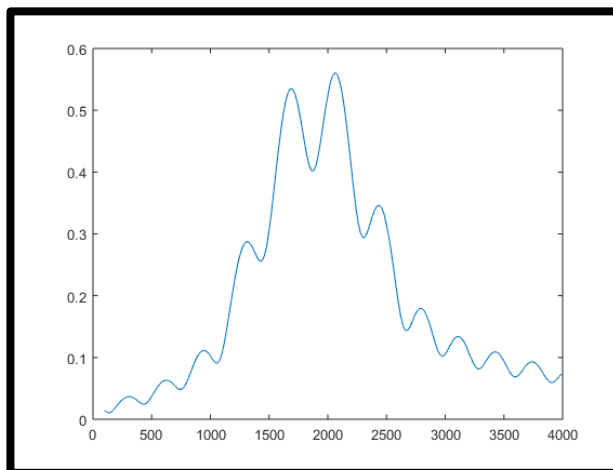


Figura 21. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 5° filtro pasa-banda, usando función ventana Hanning. (elaboración propia)

Como la respuesta obtenida no satisface el comportamiento esperado para filtros pasa-bandas requeridos, fue necesario utilizar otro tipo de función ventana. Tras analizar diferentes opciones de función ventana, como la rectangular, Hamming, Blackman y Kaiser; se decidió emplear la ventana rectangular. El uso de esta función ventana permitió obtener resultados que fueron notablemente mejores para la respuesta en frecuencia de los filtros. Además, este tipo de ventana permite reducir la carga para el procesador Onion Omega 2, pues aquí la función ventana vale 1 para todo caso. Estos son los resultados obtenidos usando la función de ventana rectangular:

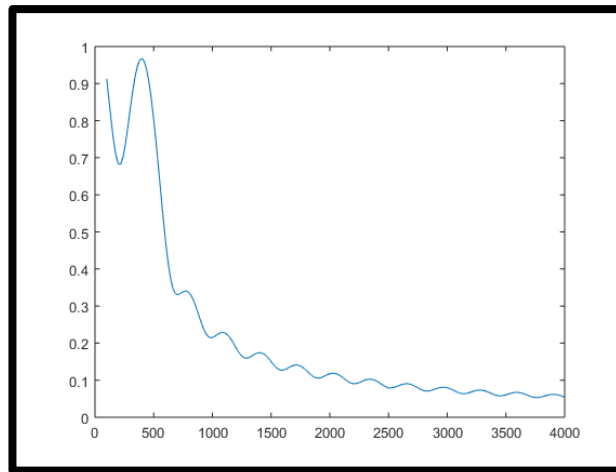


Figura 22. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 1° filtro pasa-banda, usando función ventana rectangular. (elaboración propia)

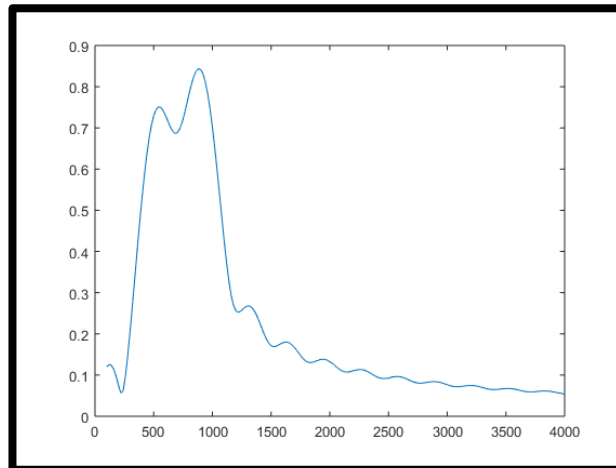


Figura 23. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 2° filtro pasa-banda, usando función ventana rectangular. (elaboración propia)

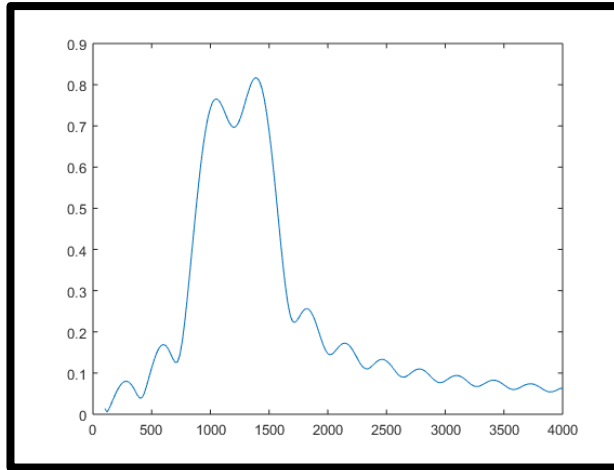


Figura 24. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 3º filtro pasa-banda, usando función ventana rectangular.
(elaboración propia)

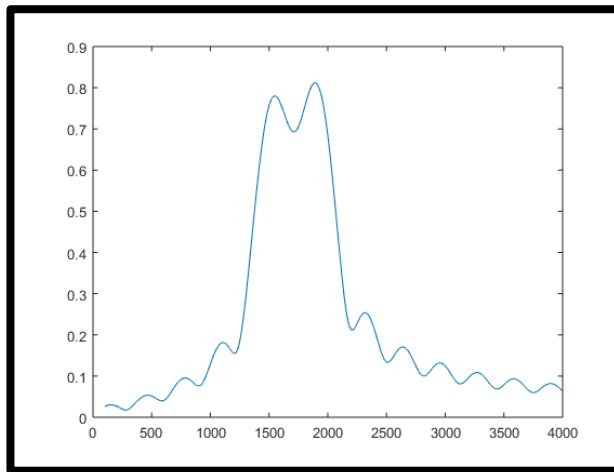


Figura 25. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 4º filtro pasa-banda, usando función ventana rectangular.
(elaboración propia)

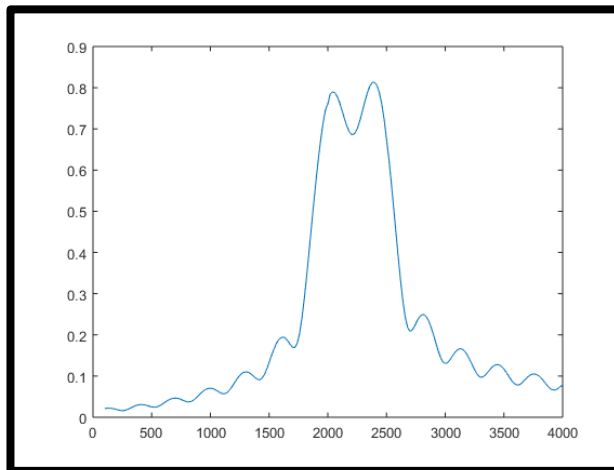


Figura 26. Gráfica de magnitud vs frecuencia para 5º filtro pasa-banda, usando función ventana rectangular.
(elaboración propia)

Al usar la función ventana de tipo rectangular, los resultados fueron mucho más cercanos a lo deseado que con la función ventana ‘Hanning. Tras mostrar los resultados con esta función ventana se autorizó usar la función ventana rectangular. Se procedió a hacer los cambios necesarios en el programa de software para usar este nuevo tipo de función ventana y obtener así resultados como los de las simulaciones.

Ahora, se tratará lo relacionado al funcionamiento del sintonizador y el envío o recepción de datos por el puerto SPI. Para lograr una mejor comprensión del lector, se explicará ahora detalladamente con un ejemplo, el funcionamiento y el manejo de solicitudes del usuario e información que hace el software usando el puerto SPI.

En primer lugar, hay que recordar que la comunicación con el sintonizador Si4735 se debe hacer por medio del puerto SPI para todo lo relacionado a configurar comandos del sintonizador o recibir valores de propiedades de este. Sintonizar una emisora o realizar un barrido de los indicadores RSSI y SNR se debe hacer usando los comandos y las propiedades del sintonizador. El software empieza habilitando la interfaz gráfica para el usuario que se accede mediante un servidor web creado en el sistema embebido. Esto permite que el usuario acceda a la dirección web local del servidor y en la página que se le muestra logre introducir el valor de la frecuencia de radio FM a sintonizar. En esta misma página puede indicar mediante un ‘checkbox’ si desea hacer un nuevo barrido de los indicadores RSSI y SNR. El usuario introduce, por ejemplo, la frecuencia 94.3 y solicita un nuevo barrido marcando el ‘checkbox’ correspondiente. Cuando el usuario hace el envío de este formulario web, los datos de la emisora solicitada se almacenan en un archivo .txt, junto con un 1 si se solicitó un nuevo barrido de los indicadores. El valor de la emisora se almacena multiplicado por 100, es decir, como un entero y no como un decimal. El sintonizador acepta valores entre 8800 y 10800, entonces el valor solicitado se guarda en el archivo como 9430 en este ejemplo, para su envío al sintonizador posteriormente.

Una vez que se tiene los datos solicitados por el usuario, se debe encender el sintonizador. Para ello, el software genera las señales en los pines del sintonizador que el fabricante indica en el manual de programación del sintonizador Si4735. Junto con estas señales se envía el primer comando por medio del puerto SPI, el comando POWER_UP. El software revisa si es posible la comunicación con el sintonizador y si es así, se procede a escribir en el buffer de transmisión del SPI los valores hexadecimales para el encendido del sintonizador. Siempre que se comunica con el sintonizador se deben enviar 9 bytes desde el buffer de transmisión, de otra manera el fabricante indica que el dispositivo ignora la información recibida por ser incompleta. Establecidos los valores se envían mediante la librería SPI de Onion y se debe esperar 300 ms según el fabricante del sintonizador para asegurar que se ha encendido el sintonizador.

Ahora se configuran las propiedades necesarias, que son REF_CLK, REF_CLK_PRESCALE, FM_BLEND_STEREO_THRESHOLD y FM_DEEMPHASIS. Usando los valores de interés dentro de los rangos válidos que indica el fabricante, se colocan estos valores en el buffer de transmisión y se envían mediante el puerto SPI, haciendo una transferencia por cada propiedad a configurar.

Hecho lo anterior, el sintonizador está listo para empezar a sintonizar una emisora y recibir solicitudes de valores de propiedades. En el caso de las propiedades que no se configuraron, quedan funcionando con los valores por defecto que traen de fábrica. Para realizar la tarea, el valor de la emisora solicitada por el usuario y el valor de la solicitud de nuevo barrido de indicadores, se leen del archivo .txt y se almacenan en variables enteras. El valor de la emisora se almacena en una variable cuyo fin es tener un respaldo de la última emisora que solicitó el usuario, para que la próxima vez que se lean las solicitudes del usuario en el siguiente ciclo del programa se sepa si hay que sintonizar o no la nueva emisora.

Una vez que se comprueba que se solicitó una emisora diferente, el valor entero 9430 en este ejemplo se separa en 2 bytes, pues el fabricante del sintonizador indica que el valor de la emisora a sintonizar se envía en dos bytes, un HB (high byte) y un LB (low byte). Para esto se toma el valor 9430 en este ejemplo, y con operaciones de bits se hace un desplazamiento a la derecha de 8 bits y este valor se asigna al HB. Tanto HB como LB son datos de 8 bits de tamaño, pues son de tipo `unit_8t` en el lenguaje C. Al asignar el valor desplazado 8 bits a HB queda truncado justo con la información que este byte debe contener. El valor sin desplazar se asigna a LB que al ser de 8 bits se encarga de truncar los bits incensarios. Se colocan los valores de HB y LB en las posiciones respectivas del buffer de transmisión y se hace el envío mediante la librería SPI. Al completar la transferencia, el sintonizador procede a configurar la emisora solicitada.

Como en el ejemplo se solicitó un nuevo barrido de los indicadores RSSI y SNR, cuando se lee las solicitudes del usuario se revisa el valor correspondiente y si este es un '1' se debe correr un nuevo barrido. Para hacer esto, se debe sintonizar cada frecuencia de la banda de FM donde se quiere conocer el valor de RSSI o SNR y solicitar mediante el puerto SPI, los valores de esas propiedades en ese momento. El sintonizador devuelve la respuesta por el puerto SPI al buffer de recepción del software en el Onion Omega 2. De esta manera, el programa guarda el valor 8800 en la variable que indica a la función de sintonizado, la frecuencia solicitada, con lo que se coloca al sintonizador en el inicio de la banda de FM para seguidamente solicitar mediante transferencias por el puerto SPI los valores de los indicadores RSSI y SNR. El programa crea archivos .csv para almacenar cada uno de los valores de RSSI y SNR leídos, por lo que los valores correspondientes se respaldan en estos archivos. A solicitud de la empresa, el tamaño del paso para este barrido de frecuencia es de 10 kHz. Esto se traduce a aumentar en una unidad el valor 8800 hasta llegar a 10800 (fin de la banda de FM comercial). Se suma 1 al valor de la variable que almacena la frecuencia solicitada y se repite el ciclo unas 2000 veces hasta llegar a la frecuencia 108 MHz.

La captura de los datos de audio que proceden del sintonizador sigue un proceso similar, en el que tampoco es evidente para el usuario lo que sucede con estos. El comportamiento de los filtros se mostró anteriormente mediante las simulaciones, pero no se ha mostrado cómo se hace el trasiego de los datos entre el sintonizador y el sistema embebido Onion Omega 2 y cuál es el destino de esta información.

El tamaño del buffer de datos que solicitó la empresa debe almacenar un segundo, como la frecuencia de muestreo a la que se toman los datos en el ADC es de 40 000 ese es el número de muestras que se almacenan. El ADC MAX11645 utilizado, requiere que se le configure antes de empezar a leer los datos muestreados. Se le debe configurar la referencia según sea interna o externa, el reloj que puede ser interno o externo también, el modo unipolar o bipolar, el bit de reseteo, selección de modo escaneo, y los canales analógicos que se usarán para la conversión. Se le deben enviar dos bytes al ADC antes de empezar a utilizarlo. Este ADC recibe la dirección del esclavo que consta de 7 bits y un octavo bit que indica si se quiere hacer una transferencia de lectura o escritura. Las transferencias de escritura se hacen para enviar los 2 bytes de configuración necesarios antes de empezar a leer del dispositivo. Adicionalmente a los bytes de configuración, se debe enviar el código para que el ADC entre en el modo HS (high speed) requerido, pues si no se configura el ADC en este modo, la velocidad máxima de muestreo es de unas 22 000 muestra por segundo.

Hecho lo anterior se inicia la lectura de los datos usando transferencias de lectura que se solicitan al ADC mediante la librería I²C de Onion. La función que captura y procesa los datos crea 5 archivos .csv para almacenar el valor filtrado de cada dato entrante en estos archivos. La función posee un ciclo de 40 000 repeticiones, en cada una solicita el dato que se muestreó al ADC mediante la librería I²C y extrae del buffer de recepción los dos bytes en los que viene descompuesto el dato capturado.

Según el fabricante del ADC, los datos se envían en dos bytes por separado, el primero contiene cuatro 1 lógicos y el resto son los bits más significativos del dato, en el otro byte se encuentran el resto de los bits menos significativos del dato. Para recuperar los bits más significativos, la función desplaza a la derecha 4 bits para eliminar los 1 lógicos del byte con los más significativos, este valor desplazado se asigna a un entero y se desplaza 4 bits más a la derecha a ese entero. Luego se toma el otro byte con los bits menos significativos y haciendo una operación OR lógico con el entero en el que están los bits más significativos, se logra unir el dato de 12 bits adecuadamente, se escala usando el valor 3.3/4096 para obtener el valor de tensión correspondiente entre 0 v y 3.3 V. Después se almacena en un buffer de datos, en la posición correspondiente al valor de la repetición que se está haciendo, para luego filtrar estos datos. Para empezar a filtrar los datos, es necesario tener 128 valores en el buffer, pues así lo requieren las ecuaciones que se aplicarán luego para obtener el valor ya filtrado.

Cuando se tiene ya 128 valores de entrada, y tras calcular los valores de la respuesta al impulso del filtro diseñado, la respuesta al impulso deseada y la función ventana escogida se empieza el cálculo de las salidas para cada filtro. En este caso como se usa la ventana de tipo rectangular, no es necesario calcular la función ventana porque vale 1 para todo caso. Como el filtro es de 128 'taps', se usa un ciclo con ese número de repeticiones para obtener un valor resultante para cada uno de los cinco filtros pasa-banda. Estos datos son almacenados en el archivo correspondiente al filtro pasa-banda por el que pasaron.

Concluido lo anterior, el ciclo de adquisición y filtrado de los datos vuelve a repetirse hasta completar las 40 000 muestras que se almacenan en los archivos.

3.3 Resultados de reducción del costo de producción para MONITEC

Finalmente, y de mucha importancia, es mostrar los resultados obtenidos en la reducción del costo de producción con esta nueva versión del sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia. Vale la pena recordar que el principal motivo por el que MONITEC, S.A se interesó en este proyecto fue precisamente para buscar reducir el costo de producción para la empresa, y así satisfacer las necesidades de un mercado meta más amplio y reducir los costos del servicio de información estratégica que brinda la empresa. Con la reducción de costos del servicio, este se vuelve más atractivo a potenciales clientes que requieren una opción con todas las características y facilidades tecnológicas que les ofrece MONITEC, S.A.

Dentro de las dificultades que supuso este proyecto, estuvo la selección de algunos de los componentes que se usan en el circuito. Los componentes más difíciles de seleccionar fueron los reguladores de voltaje y el ADC. La dificultad no se debió solamente a las características solicitadas, sino también al límite de precio de estos componentes que propuso la empresa. Por ejemplo, el ADC se había solicitado de 16 bits, pero tras una búsqueda exhaustiva no fue posible encontrar uno de estos dispositivos con un precio en el rango solicitado, por lo que se procedió a rebajar el número de bits a utilizar a 12, que se había usado anteriormente con éxito según lo indicó don Carlos. También en los reguladores de potencia se tuvo inconvenientes con el precio y las características requeridas pues debía ser de tipo 'switching', soportar hasta 40 V en la entrada y tener una frecuencia de conmutación de 1 MHz y un valor inferior a los 2.0 USD, pero se logró conseguir el que se está usando actualmente en el proyecto que cumplía con las características requeridas y el precio acordado.

Los precios que se muestran a continuación reflejan los costos de producción por unidad para la empresa, esto quiere decir que son los costos en la fabricación por unidad de un número importante de dispositivos, aproximadamente lotes de 1000 unidades. Una meta de producción como esta es completamente afín con las pretensiones de la empresa para este dispositivo. Los precios mostrados fueron facilitados por el Ing. Carlos Cordero, quién realizó la compra de componentes y pagó la fabricación de la placa electrónica.

Descripción del componente	Número de parte del fabricante	Unitario (USD)	Total (USD)
Regulador de voltaje salida 3.3 V	TS30042-M033QFNRTR-ND	0.518	0.518
Regulador de voltaje salida 5 V	TS30042-M050QFNRTR-ND	0.518	0.518
Micrófono salida serial I2S	423-1405-2-ND	1.040	1.04
ADC 12 bits 40 000 kSPS	MAX11645EUA+ND	0.453	0.453
Oscilador cristal 12.288 MHz	631-1117-2-ND	2.735	2.735
Chip antena wireless	RF-AN9520	0.17	0.17
Onion Omega 2S	Onion Omega 2S	7	7
Conector USB	AE11181-ND	0.330	0.33
Conector coaxial de tipo UMMC	A118077TR-ND	0.254	0.254
Conector RJ45	535-12604-ND	0.9	0.9
Placa electrónica o PCB	N/A	1.8	1.8
Antena FM y cable conector	N/A	0.5	0.5
Capacitores, resistencias, inductores y diodos	N/A	N/A	0.7
Total final			16.92 USD

Figura 27. Tabla de costos del hardware del sistema de adquisición de datos de RF. (elaboración propia)

Los números de parte del fabricante para la placa electrónica, la antena FM y capacitores, resistencias, inductores y diodos no se indicaron porque hay una amplia variedad de posibilidades que cumplen los requisitos. Falta en la tabla el valor del chasis del circuito, pero este no estaba incluido en el objetivo inicial del proyecto y se espera que en producción el costo sea muy bajo, posiblemente inferior a 2 USD.

Capítulo 4.

Análisis de resultados

4.1 Análisis de resultados del hardware.

Los resultados que se obtuvieron en el rediseño del hardware son positivos tal como lo muestra la imagen 5 de los resultados de la herramienta de verificación de cumplimiento de las reglas de diseño que incluye el software Altium Designer. Esta herramienta se encarga de verificar el cumplimiento de diversas reglas de diseño y ha concluido sin mostrar errores o advertencias.

El uso de componentes de montaje superficial permite hacer un mejor uso del espacio disponible para colocar los componentes del circuito reduciendo el espacio necesario de 10 cm x 11 cm en un inicio a 4 cm x 6 cm al final. Los conectores de tipo 'thru hole' que se usan, no interfieren en la distribución conveniente del resto los componentes en ambas caras del PCB, por lo que su uso no tiene un impacto negativo.

El uso de 6 capas en el circuito en lugar de 4 es muy positivo, ya que los costos de fabricación que paga la empresa por 6 capas son muy similares a los costos del circuito en 4 capas. Sin embargo, en lo referente al trazado de pistas y un diseño más compacto y conveniente tuvo un impacto favorable. Esto porque se tuvo más libertad en el diseño para trazar las pistas con la nueva capa de señales que se agregó y esto resultó muy útil para reducir problemas cuando se trataba de trazar pistas que estaban encerradas en una capa por conexiones entre pines de componentes y en otras capas también se dificultaba el trazado de la pista por razones similares. Además, al agregar 6 capas de señal se contribuye de alguna manera a la reducción de las dimensiones de la placa. Otro de los beneficios que se obtiene al usar 6 capas, tiene que ver con la dificultad que se presentó al no poder trazar vías debajo del sistema embebido, pues así fue solicitado por parte de la Empresa como medida de seguridad para evitar que, si las vías llegaran a quedar expuestas, se produjeran cortocircuitos. Esto dificultó el trazado de pistas de los componentes que están justo debajo del Omega 2 en la otra cara, pues no pocas veces el camino óptimo para trazar una pista estaba ya ocupado. Al tener más capas se pudieron trazar las pistas sin tener que dar grandes rodeos para llegar al pin destino.

Evitar rodeos en el trazado de las pistas tiene importantes beneficios, pues elimina lazos de corriente, se reducen las pérdidas de la señal por atenuación en el cobre, se puede usar el espacio más eficientemente y se reduce el número de conexiones vecinas que pueden sufrir interferencias por el paso de señales de muy alta frecuencia o muy ruidosas.

La escogencia de los componentes para el circuito y el tipo de montaje de los mismos muestra ser la más adecuada. Los componentes de montaje superficial generalmente se fabrican con encapsulados de tamaño muy reducido a pesar de que muchas veces tienen un funcionamiento muy complejo. En este proyecto no fue la excepción pues los encapsulados que se utilizan en los componentes de tipo SMD/SMT son realmente pequeños e incluso cuando la funcionalidad es muy compleja, como ocurre con el sintonizador que integra todas sus funciones en menos de 4 mm x 4 mm de tamaño. El uso de este tipo de componentes favoreció en gran medida el tamaño reducido del circuito final y una vez más, permitió un mejor aprovechamiento del espacio si se compara con los resultados de un circuito con componentes 'thru hole'. El tamaño actual del circuito es el más pequeño de los que ha hecho la empresa antes e incluso contiene el sistema embebido en la misma placa electrónica, lo que las anteriores versiones no tenían. De esta manera se obtiene un resultado muy positivo y acorde al objetivo de reducción de espacio del circuito.

El ancho de las pistas en 8 milésimas se usó así por ser uno de los valores más utilizados en la industria para el diseño de circuitos electrónicos digitales. Sin embargo, al existir pistas por las que la corriente que pasa es cercana al amperio, lo más conveniente fue aumentar el ancho de estas pistas para que dieran los resultados esperados, dejando en 30 milésimas aquellas por las que pasa más corriente y en 16 milésimas las de riesgo medio. Cuando una pista que lleva mucha corriente se encuentra en una de las capas internas de una placa electrónica, el ancho debe ser más que el de una pista trazada sobre las capas superior o inferior. Esto debido a que en las capas internas aumenta la temperatura más fácilmente que si la pista estuviera en las capas más externas.

La distribución de los componentes en ambas caras del PCB se hizo por la conveniencia que ofrecía distribuirlos así. En la capa superior se colocó la mayor parte de lo que no correspondía a la adquisición y manejo de datos de sonido, para dejar en la parte inferior el mayor espacio posible para las etapas de adquisición de datos de radiofrecuencia y por micrófono. Debido a que la etapa de potencia para colocar los reguladores de 3.3 V y 5 V requería físicamente un espacio amplio, lo mejor fue colocarla en la parte superior de la placa. Junto con la etapa de potencia se decidió colocar en la parte superior el sistema embebido porque la información sale digitalizada de las etapas de adquisición en la capa inferior y no se corre ya un riesgo alto de corrupción de la señal al pasarla de la capa inferior a la superior, si ya está digitalizada. La antena del sistema embebido se decidió colocar en la parte superior también porque la frecuencia de 2.4 GHz que se usa en las redes Wi-Fi normalmente se considera alta y el camino de la señal entre la antena y el sistema embebido debe ser corto y evitarse el uso de vías.

Además, es necesario que la impedancia esté acoplada entre la antena y la pista que lleva la señal al Onion Omega 2S, por lo que se hizo uso de una herramienta que posee el Altium Designer para trazar esta línea con 50 Ω de impedancia y asegurar el acople entre el chip antena y la línea de transmisión hasta el embebido. Otra de las razones por las que se colocó el sistema embebido y el chip antena en la cara superior, es porque justo debajo está el plano de tierra, lo que permite evadir las interferencias electromagnéticas que se generan en las otras vías y componentes de las capas y cara inferiores.

En la capa inferior se colocaron los componentes de las etapas de radiofrecuencia y adquisición de datos de sonido por medio del micrófono. Esto permitió seguir las recomendaciones del fabricante en cuanto al trazado de las pistas de radiofrecuencia y mantener las pistas de la señal de radio lo más limpio posible. Dentro de las recomendaciones del fabricante del sintonizador se siguieron con especial cuidado las de trazar el camino más corto y recto posible para la señal de radiofrecuencia, no trazar pistas de señal en el plano tierra bajo el sintonizador, no pasar pistas de señal bajo el sintonizador sin un plano tierra de por medio y las tierras del sintonizador están casi todas conectadas directamente al plano tierra. Los conectores de USB y RJ45 que se colocaron en la misma cara se colocaron ahí para mejorar el uso del espacio, pues en la cara superior una parte importante del espacio estaba ocupado por el sistema embebido, por el costado izquierdo están los conectores para el cable de alimentación y en el lado que quedaba está la antena del Onion Omega 2S.

4.2 Análisis de resultados del software

Sobre los resultados obtenidos con los filtros, las figuras muestran que la función ventana rectangular permite obtener resultados superiores con respecto a la función ventana ‘Hanning’ que había sugerido la empresa en un principio.

En la figura 18 se puede apreciar que el rizado es grande dentro de la banda de interés, en la banda de transición y es considerable también en las frecuencias superiores. Para el mismo caso, pero usando la función ventana rectangular, se puede apreciar que el rizado en la banda de transición es casi nulo y es más bajo que en la anterior para frecuencias superiores. Además, la banda de transición es más corta, ya que cae más rápido que el filtro con función de ventana Hanning. Para comprobarlo se puede observar en la figura 18, en 600 Hz la ganancia en la gráfica ha caído a 0.4 aproximadamente, pero en la figura 23 la ganancia ha caído a menos de 0.35, lo que permite concluir que la banda de transición para la ventana de tipo rectangular ha sido menor y los resultados obtenidos muestran la ventaja de este.

Para el filtro de 1100 Hz a 1600 Hz que es el caso intermedio del ancho de banda de interés, las figuras 20 y 25 muestran los resultados para cada tipo de función ventana. En la figura 20, se puede observar que en el filtro pasa-banda con la función ventana ‘Hanning’, las frecuencias de mayor ganancia que permite obtener el filtro van de los 700 Hz aproximadamente hasta los 1200 Hz. También es posible observar en la figura, que la ganancia no excede los 0.6 aproximadamente, lo que compromete el funcionamiento del filtro pues los datos que logran pasar deberían tener al menos 70% de ganancia teóricamente. Este problema se debe posiblemente a que los filtros pasa-bajas y pasa-altas del filtro pasa-banda están traslapados para un ancho de banda de 500 Hz y usando la función ventana de tipo ‘Hanning’. Otro problema que se da con este tipo de filtro es que

las oscilaciones son muy grandes tanto en el ancho de banda, en la transición y sigue teniendo oscilaciones en las bandas rechazadas. Al observar la figura 25, usando el tipo de ventana rectangular, los mejores resultados son evidentes. Aquí el ancho de banda va desde los 1000 Hz hasta los 1500 Hz lo que se ajusta muchísimo mejor al ancho de banda de interés de este filtro. La ganancia es superior a 0.7 para las frecuencias del ancho de banda, mientras que en el anterior no excedía los 0.6. Además, las oscilaciones tanto en el ancho de banda, así como en la banda rechazada son menores que con la función ventana 'Hanning' y si se considera las oscilaciones durante la transición, la mejoría es indiscutible pues no se presentan oscilaciones con la función ventana rectangular.

En el filtro de 2100 Hz a 2600 Hz, el último filtro de interés, los resultados se pueden observar en las figuras 22 y 27 usando ambos tipos de ventana. Para este caso, según se puede ver en la figura 22, para la función ventana 'Hanning' las frecuencias que permiten mayor ganancia están entre los 1600 Hz y los 2300 Hz aproximadamente, además se debe considerar que al igual que en el caso anterior, la ganancia máxima de las frecuencias que permite este filtro apenas alcanza los 0.6 aproximadamente, lo que hace que un filtro FIR con estas características no sea útil. Al igual que en el resto de los filtros usando la función ventana de tipo 'Hanning', el rizado es muy grande tanto en el ancho de banda como en las transiciones y la banda rechazada. En la figura 27 se observa los resultados del filtro usando la función ventana de tipo rectangular. El ancho de banda en este caso va de los 2000 Hz a los 2500 Hz. Aquí al igual que en el filtro anterior, la ganancia usando este tipo de ventana es superior a 0.7 para las frecuencias del ancho de banda. Una vez más, las oscilaciones que se presentan en el ancho de banda así, como en la banda rechazada, son menores que con la función ventana del tipo 'Hanning' lo que se traduce en un mejor desempeño de su función como filtro y las oscilaciones en las transiciones son prácticamente nulas.

El envío de los comandos y propiedades por el puerto SPI, se hizo de la manera que se requería según lo que solicita el fabricante del sintonizador Si4735. En las notas de aplicación del fabricante se incluye la guía de programación, documento en el cual se explica de forma detallada el funcionamiento del controlador que gobierna el comportamiento de este dispositivo. Se incluye en ese documento una guía con los códigos que espera recibir el sintonizador para establecer comandos y propiedades.

Estos códigos y su orden respectivo, así como la cantidad de datos que se deben enviar en una transferencia fueron profundamente estudiados y analizados, por lo que el software contiene los valores correctos que se deben enviar al sintonizador para realizar las distintas tareas, desde el encendido hasta el sintonizado de las emisoras o la solicitud de los indicadores RSSI y SNR en la emisora sintonizada.

La lectura de los datos del ADC requirió del análisis profundo del funcionamiento de este dispositivo en la hoja de datos del fabricante, donde se explica ampliamente el funcionamiento y se detalla especialmente cómo funciona la interfaz de comunicación serial para la adquisición por parte del procesador de los datos de audio digitalizados. El software se diseñó satisfactoriamente considerando estos aspectos que también fueron profundamente estudiados y analizados.

De este análisis se determinó que el ADC se debe configurar según el modo de funcionamiento que se desee, enviando los 2 bytes correspondientes con los valores que reconoce el ADC. También se estudió de qué manera se enviaban los datos por parte del ADC al sistema embebido. En base a todas estas consideraciones se diseñó el software para obtener el resultado esperado de lectura de los datos del ADC mediante el protocolo serial I²C.

La página web que contiene la interfaz gráfica que se le ofrece al usuario, permite satisfactoriamente recibir los datos que escribe el usuario en el archivo .txt con el valor de la nueva frecuencia a sintonizar y la solicitud de nuevo barrido de indicadores RSSI y SNR. Estos valores se envían, una vez digitados, mediante un formulario web y el programa en PHP se encarga de almacenarlos en el archivo .txt. Primero se almacena el valor de solicitud de barrido y en la siguiente línea del archivo se almacena el valor de la emisora en el rango de 8800 a 10800, así está lista la información para ser accedida por el resto del software como se explicó en el capítulo anterior.

4.3 Análisis de resultados de reducción de costos de producción

Como lo muestra la figura 28, el costo de producción unitario para la empresa es de \$16.918 USD. El objetivo era construir el hardware del sistema de adquisición de datos con un costo de producción de unos 15 dólares y un rango de incertidumbre de \pm \$2 dólares, según me indicó el Ing. Carlos Cordero. Se puede afirmar que, gracias al aporte de ideas por parte de la empresa, así como el trabajo de investigación y selección de los componentes para el hardware, se logró el objetivo dentro del rango esperado, llegando casi al costo de \$17 USD, pero sin superarlo.

Además, se debe recordar que el costo de producción más bajo para el sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia que se ha hecho hasta ahora en la empresa, es de unos \$100 USD. De esta manera, el costo del sistema de adquisición resultante de este proyecto es de tan solo un 17% del sistema más barato.

En base a estos resultados es posible afirmar que se logró exitosamente el objetivo de la reducción de los costos de producción y no se excedió el rango proyectado al inicio.

Capítulo 5

Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se construyó la placa electrónica del sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia, con una distribución adecuada de los componentes y periféricos. Se tomó medidas para evitar la corrupción de las señales analógicas o de alta frecuencia en el circuito y se hizo el montaje adecuado de los componentes. No obstante, se logró la prueba de concepto únicamente debido al no funcionamiento del sistema embebido y en consecuencia del resto del circuito.
- Adicionalmente, el espacio requerido por el circuito del sistema de adquisición se pudo reducir al punto que es el circuito más pequeño hecho hasta para este sistema de adquisición de datos. Además, contiene en una sola placa todo el sistema de adquisición de datos, mientras que en otras versiones se requería de dos placas electrónicas separadas que se conectaban.
- Se diseñó el software requerido para enviar los comandos y ajustar las propiedades que permiten el manejo y la interacción con el sintonizador. Es posible controlar la totalidad de los comandos y propiedades necesarios para la configuración del sintonizador, el sintonizado de frecuencias en la banda de FM y la lectura de los valores de RSSI y SNR en la emisora sintonizada, que son las funciones de interés para el sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia.
- Se diseñó la página web en el servidor web del Onion Omega 2 que le permite al usuario ingresar el valor de la frecuencia que desea sintonizar y decidir si se hace un nuevo barrido de emisoras para actualizar los datos de los indicadores RSSI y SNR.
- Se diseñó en el software las funciones necesarias para la adquisición y el filtrado de los datos en las 5 bandas que solicitó la empresa satisfactoriamente, y se propuso un cambio acertado en el tipo de función ventana de los filtros FIR.
- El costo de producción de los sistemas de adquisición de datos de radiofrecuencia considerando lotes de 1 000 unidades se logró mantener dentro del rango establecido por la empresa, que era de \$15 USD con \pm \$2 USD de rango de incertidumbre. El costo del nuevo dispositivo es de un 17% del costo de producción que significa fabricar el sistema de adquisición con 4 sintonizadores.

5.2 Recomendaciones

- Al sistema de adquisición de datos de radiofrecuencia se le puede implementar una batería recargable de iones de litio, por ejemplo, ya que el sistema embebido Onion Omega 2 es un dispositivo diseñado para la eficiencia energética y permitiría ir un paso más allá en la portabilidad del sistema de adquisición.
- Al hacer un cambio en los circuitos integrados y dispositivos electrónicos a usar, es recomendable asegurarse que se tiene información basta, incluso cuando la nueva versión que se va a utilizar solo varía en el tipo de montaje para el que fue diseñada. Si la nueva versión es muy nueva, es mejor utilizar otra versión más antigua o buscar otra opción, porque si se presentan inconvenientes en su uso o funcionamiento, no se tiene información que permita atacar el problema.
- Cuando se diseñe el prototipo de un nuevo circuito, es recomendable que se haga de tal manera que se pueda desmontar fácilmente los dispositivos más críticos del circuito. En este proyecto se pudieron haber usado conectores de pines hembra para el sistema embebido Onion Omega 2 y luego de comprobar el funcionamiento, cambiar el diseño al de montaje SMD para este sistema embebido. Así se facilitaría el cambio en caso de daño de un dispositivo o las pruebas eléctricas que se deban hacer para asegurar el correcto funcionamiento.
- Es importante al seleccionar el sistema embebido que se usará, estar seguro de que exista también el software necesario para hacer uso de los protocolos de comunicación que el hardware ofrece. Así se puede evitar problemas como los que se tiene en el presente proyecto con la librería I²S, que al no estar hecha aún imposibilita el uso del micrófono implementado, al menos mientras se desarrolla por parte de los fabricantes o se busca una solución viable.

Bibliografía

- [1] Altium Designer. (2017). Shortcut Keys. *Altium Documentation*. Consultado en: <http://techdocs.altium.com/display/ADRR/Shortcut+Keys>.
- [2] Altium Designer. (2017). Fill. *Altium Documentation*. Consultado en: [http://www.altium.com/documentation/17.1/display/ADES/PCB_Obj-Fill\(\(Fill\)\)_AD](http://www.altium.com/documentation/17.1/display/ADES/PCB_Obj-Fill((Fill))_AD)
- [3] Altium Designer. (2017). Controlled Impedance Routing. *Altium Documentation*. Consultado en: [http://www.altium.com/documentation/15.1/display/ADES/\(\(Controlled+Impedance+Routing\)\)_AD](http://www.altium.com/documentation/15.1/display/ADES/((Controlled+Impedance+Routing))_AD)
- [4] Altium designer. (2017). Creating the PCB footprint. *Altium Documentation*. Consultado en: [http://www.altium.com/documentation/15.1/display/ADES/\(\(Creating+the+PCB+Footprint\)\)_AD](http://www.altium.com/documentation/15.1/display/ADES/((Creating+the+PCB+Footprint))_AD)
- [5] BaNenKy. (2009). Videotutoriales de Altium Designer (video). Consultado en YouTube.
- [6] Cohen, Patricio. (2010). Conceptos y terminología usada en Circuitos Impresos (PCB). *Electrosoft Ingeniería*. Consultado en: <http://www.pcb.electrosoft.cl/04-articulos-circuitos-impresos-desarrollo-sistemas/01-conceptos-circuitos-impresos/conceptos-circuitos-impresos-pcb.html>
- [7] Daxes Hacks. (2017). Primeros pasos con la Onion Omega 2 Getting Started #IoT. Consultado en YouTube.
- [8] Echeverri, J. (2016). Funciones de delay en C para Linux. Consultado en: <https://blogdelingeniero1.wordpress.com/2016/06/12/funciones-de-delay-en-c-para-linux/>
- [9] Fox Electronics. (2008). HCMOS 5 x 3.2mm 3.3V Oscillator datasheet. Consultado en: http://www.foxonline.com/pdfs/FXO_HC53.pdf
- [10] Ibarra, O e Ibarra, M. (2010). *Diseño de filtros FIR mediante la técnica de las ventanas*. México: Universidad de Guanajuato. Consultado en: www.uaq.mx/investigacion/difusion/veranos/.../ITQ%20Martinez%20Barrera.doc
- [11] Knowles. (2015). I2S Output Digital Microphone datasheet. Consultado en: <https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/3421/i2S+Datasheet.PDF>
- [12] Maxim Integrated Product. (2010). Low-Power, 1-/2-Channel, I2C, 12-Bit ADCs in Ultra-Tiny 1.9mm x 2.2mm Package datasheet. Consultado en: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX11644-MAX11645.pdf>

- [13] On Semiconductor. (2017). Surface Mount Schottky Power Rectifier. Consultado en: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/SS26-D.PDF>
- [14] Onion. (2017). Installing and using PHP. *Onion Docs*. Consultado en: <https://docs.onion.io/omega2-docs/installing-and-using-php.html>
- [15] Onion. (2017). Using the Omega GPIO's. *Onion Docs*. Consultado en: <https://docs.onion.io/omega2-docs/using-gpios.html>
- [16] Onion. (2017). SPI C Library. *Onion Docs*. Consultado en: <https://docs.onion.io/omega2-docs/spi-c-library.html>
- [17] Onion. (2017). I2C C Library. *Onion Docs*. Consultado en: <https://docs.onion.io/omega2-docs/i2c-c-library.html>
- [18] Online Courses. (2017). Export/Show/Writing C++ output to Excel. Consultado en YouTube
- [19] PHP paso a paso. (2016). Lista de reproducción de videotutoriales. Consultado en YouTube.
- [20] Rainsun Corporation. (2009). Multilayer Chip Antenna for 2.4 GHz wireless communication datasheet. Consultado en: <http://www.image.micros.com.pl/dane/techniczne/auto/rf%20an9520-245.pdf>
- [21] Semtech, (2016). High Efficiency 2 A Current-Mode Synchronous Buck Converter, 1 MHz datasheet. Consultado en: <http://www.semtech.com/images/datasheet/ts3004x.pdf>
- [22] Silicon Labs. (2013). BROADCAST AM/FM/SW/LW RADIO RECEIVER datasheet. Consultado en: <https://www.silabs.com/documents/public/data-sheets/Si4730-31-34-35-D60.pdf>
- [23] Silicon Labs. (2014). Si47XX ANTENNA, SCHEMATIC, LAYOUT, AND DESIGN GUIDELINES. Consultado en: <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/AN383.pdf>
- [24] Silicon Labs. (2014). Si47XX PROGRAMMING GUIDE. Consultado en: <https://www.silabs.com/documents/public/application-notes/AN332.pdf>
- [25] Taiyo Yuden. (2017). SMD Power Inductors datasheet. Consultado en: <https://www.mouser.com/Search/ProductDetail.aspx?qs=PzICbMaShUfL31t2FerArw==>

Apéndices

A1. Circuitos Integrados

Regulador de voltaje TS30042

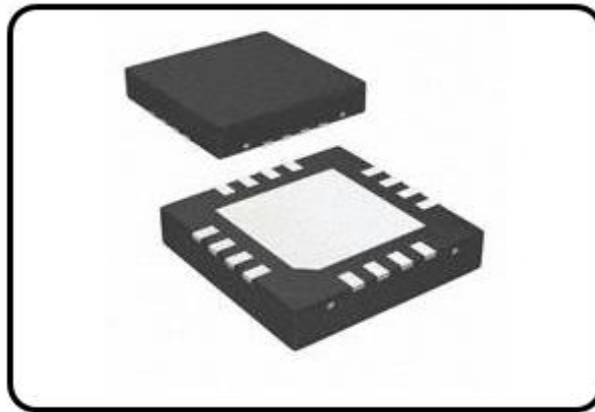


Figura 28. (Apéndice) Regulador de voltaje TS30042
Tomado de: digikey.com

Descripción	Regulador de voltaje de alta eficiencia tipo 'switching' encapsulado tipo 16 QFN, montaje superficial
Tipo de convertidor	Buck síncrono
Tipo de salida	Arreglado de 1.5 V, 1.8 V, 2.5 V, 3.3 V, 5 V con $\pm 2\%$ de tolerancia
Voltaje de entrada máx.	Hasta 40 V (corriente directa)
Voltaje de entrada mínimo	4.5 V
Frecuencia de conmutación	1 MHz $\pm 10\%$
Corriente de salida	2 A de manera continua

Diodo TVS para protección contra descargas electrostáticas (ESD)

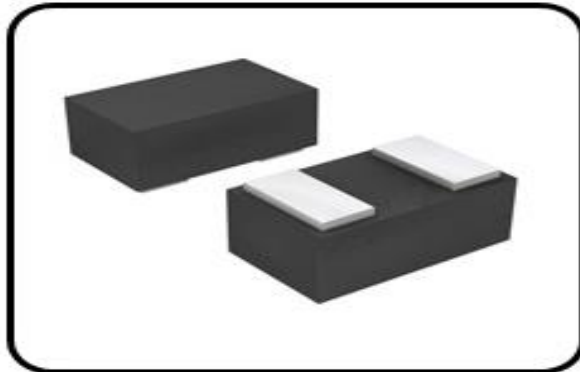


Figura 29. (Apéndice) Diodo TVS contra ESD
Tomado de: digikey.com

Descripción	Diodo TVS de baja capacitancia, montaje superficial
Voltaje electrostático de descarga máx.	30,000 V
Corriente pico	6 A
Configuración	1 línea y unidireccional
Tipo de diodo	Zener
Voltaje de reversa	5.3 V en funcionamiento

Micrófono con salida digital en formato serial I²S

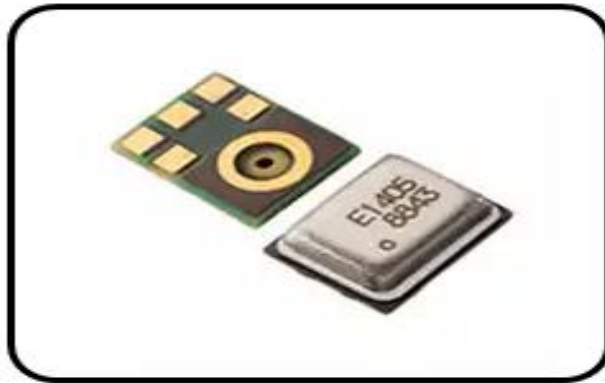


Figura 30. (Apéndice) Micrófono con salida digital I²S
Tomado de: digikey.com

Descripción	Micrófono de salida digital formato serial, montaje superficial
Formato de salida	Digital en formato serial I ² S de acople directo a microprocesador.
Voltaje de entrada V_{DD}	1.62 V ~ 3.6 V máx.
Sensibilidad	-26 dBFS
SNR	65 dB(A) típicamente
THD	1% máx
Encapsulado	RF shielded
Directividad	Omnidireccional
Formato de datos de salida	24 bits, 18 de precisión y los menos significativos rellenos con 0.
Modos de operación	Active mode, sleep mode and powered down mode

Convertidor Analógico Digital ADC

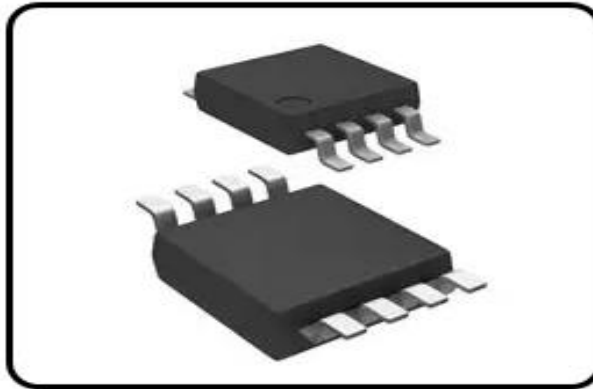


Figura 31. (Apéndice) ADC MAXIM 11645
Tomado de: digikey.com

Descripción	Convertidor analógico digital de 12 bits, salida formatos serial I ² C, montaje superficial
Formato de salida	Digital en formato serial I ² C de alta velocidad compatible con interfaz 'two wire'
Voltaje de entrada V_{DD}	2.7 V~ 3.6 V máx
Consumo de corriente I_{DD}	530 µA para frecuencia de muestreo de 40,000 muestras por segundo
Número de bits	12 bits
Velocidad de muestreo	Hasta 94,4 kSPS en modo consumo de baja potencia
Número de entradas	1 en modo diferencial, 2 en modo 'single ended'
Tipo de referencia	Interna, Externa

Receptor de FM/AM Si4735



Figura 32. (Apéndice) Sintonizador FM/AM Si4735-D6
Tomado de: digikey.com

Descripción	Receptor de radio FM/AM/SW/LW, montaje superficial
Bandas soportadas	FM,AM,SW(short wave) y LW(long wave)
Voltaje de entrada V_{DD}	2 V ~ 5.5 V
Tipo de encapsulado a utilizar	QFN 20 pines
Tipo de interfaz de audio	Analógico, digital
Formatos digitales de audio soportados	I ² S, modo DSP, 'left justified'
Tasas de muestreo disponibles	32 KHz, 44.1 KHz y 48kHz
Interfaz de control	Compatible con los modos '2-wire', '3-wire'
Otras características	Filtro VCO incluido, sintonización de FM y AM avanzada, control de frecuencia automático, control de ganancia automático, decodificador digital FM estéreo, procesado avanzado de audio, regulador LDO integrado, amplio rango de antenas soportado

Oscilador de cristal 12.288 MHz

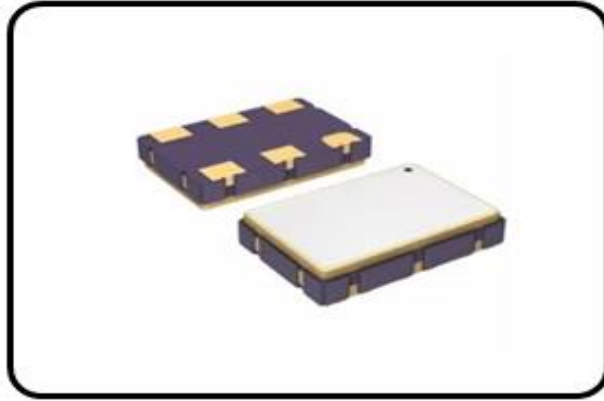


Figura 33. (Apéndice) Oscilador de cristal de 12.288 MHz
Tomado de: digikey.com

Descripción	Oscilador de cristal de 12,288 MHz montaje superficial
Tipo	XO
Entrada de voltaje V_{DD}	3.3 V
Consumo máximo de corriente	32 mA
Resolución de frecuencia	Hasta 6 decimales
Rango de frecuencia	0.75 a 250 MHz

Chip Antena para comunicación inalámbrica a 2.4 GHz



Figura 34. (Apéndice) Chip Antena 2.4 GHz.
Tomado de rainsun.com

Descripción	Chip antena para comunicaciones a 2.4 GHz tipo montaje superficial, omnidireccional
Impedancia	50 Ω
Frecuencia central	2.5 GHz
Ganancia pico	1.5 dBi
Relación de onda estacionaria	2 máx
Potencia máx	3 W
Ancho de banda	200 MHz

Embebido Onion Omega 2 S



Figura 35. (Apéndice) Embebido Onion Omega 2S
Tomado de: <https://onion.io/omega2s/>

Descripción	Embebido Onion Omega 2 S (montaje superficial)
Frecuencia de CPU	580 MHz
Memoria RAM	64 MB
Memoria de almacenamiento (no volátil)	16 MB
Sistema operativo	Linux
Conectividad	Wireless b/g/n con conector para antena Wi-Fi opcional para aumentar la capacidad de recepción
Pines	Al menos 15 pines GPIO (propósito general)
Puertos disponibles	1 puerto I ² S, 1 puerto SPI, 1 puerto PCIe, 3 puertos UART, 1 puerto I ² C, puerto para ETHERNET, 2 pines para señal PWM, puerto para microSD, 1 puerto USB

A2. Conectores:

Conector USB tipo A



Figura 36. (Apéndice) Conector USB tipo A
Tomado de: digikey.com

Descripción	Conector receptor USB tipo A, ángulo recto, montaje 'through hole'
Número de contactos	4
Tipo	USB 1.1
Estilo de montaje	Horizontal
Corriente soportada	1.5 A

Conector U.FL para radiofrecuencia



Figura 37. (Apéndice) Conector U.FL para radiofrecuencia
Tomado de: digikey.com

Descripción	Conector U.FL ultra miniatura coaxial, montaje superficial
Tipo de conector	Jack, pin macho
Frecuencia máx.	6 GHz
Impedancia	50 Ω
Pérdida de inserción	0.24 dB
Voltaje máximo	60 V

Conector RJ45



Figura 38. (Apéndice) Conector de 1 puerto RJ45
Tomado de: digikey.com

Descripción	Conector receptor con 1 puerto RJ45, montaje tipo 'through hole', bobinas magnéticas incluidas, ángulo recto
Tipo de conector	RJ45
Tipo de protección	Blindado contra interferencias de radiofrecuencia

A3. Otros componentes

Barra de ferrita

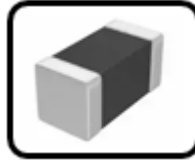


Figura 39. (Apéndice) Barra de ferrita de 1.8 μ H
Tomado de: digikey.com

Descripción	Barra de ferrita (inductor) de 180 Ω , montaje superficial
Inductancia	7.8 μ H
Otras características	Corriente máx. de 1.5 A, resistencia en corriente directa 90 m Ω
Tamaño de encapsulado	0.063" L x 0.031" W conocido como 0603

Capacitor cerámico montaje superficial encapsulado 0805

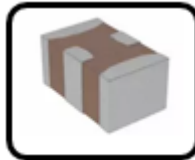


Figura 40. (Apéndice) Capacitor cerámico SMD 0805
Tomado de: digikey.com

Descripción	Capacitor cerámico, montaje superficial
Valores disponibles	Los comerciales
Tamaño de encapsulado	0.080" L x 0.050" W conocido como 0805

Inductor de potencia



Figura 41. (Apéndice) Inductor de potencia SMD
Tomado de: digikey.com

Descripción	Inductor de potencia, montaje superficial
Valor de inductancia	4.7 μ H
Resistencia DC	40.3 m Ω máx. y 31 m Ω típica
Corriente máx.	2.7 A
Tamaño de encapsulado	0.236" L x 0.236" W

Inductor montaje superficial 0805

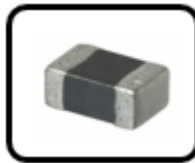


Figura 42. (Apéndice) Inductor SMD 0805
Tomado de: digikey.com

Descripción	Inductor, montaje superficial
Valores de inductancia	Los comerciales
Tamaño de encapsulado	0.080" L x 0.050" W conocido como 0805

Resistencia montaje superficial 0805



Figura 43. (Apéndice) Resistencia SMD 0805
Tomado de: digikey.com

Descripción	Resistencia, montaje superficial
Valores de resistencia	Los comerciales
Tamaño de encapsulado	0.080" L x 0.050" W conocido como 0805

Diodo Schottky montaje superficial

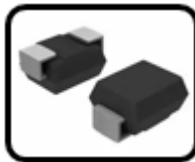


Figura 44. (Apéndice) Diodo Schottky SMD
Tomado de: digikey.com

Descripción	Diodo Schottky SS26T3G, montaje superficial
Voltaje máx. de reversa	60 V
Corriente directa rectificadora máx.	2 A
Tipo de encapsulado	DO-214AA

Diodo LED 0805



Figura 45. (Apéndice) LED rojo SMD
Tomado de: digikey.com

Descripción	Diodo LED rojo de montaje superficial
Eficiencia óptica	7 lm/W
Longitud de onda	633 nm
Tamaño de encapsulado	0.080" L x 0.050" W conocido como 0805