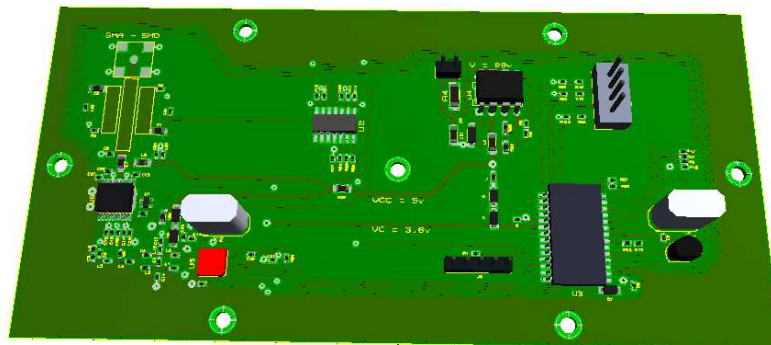


UNLP  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Electrotecnia  
Cátedra de Trabajo Final



## DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA UNA CARGA DE APLICACIONES ESPACIALES.



**Autor:** VIDAURRETA, Andrés Gabriel.

Legajo N° 47.118/7

**Director:** Dr. Ing. BAVA, José Alberto.

**Codirector:** Ing. CIAFARDINI, Juan Pablo.

La Plata, 12de Agosto de 2012

## ***Resumen***

El presente trabajo se originó en base al proyecto de la CONAE de realizar un Vehículo Lanzador con capacidad de poner cargas en órbita, al cual la Facultad de Ingeniería se adhirió ofreciendo crear un *Sistema de Telemetría* que pueda operar durante el vuelo del vehículo.

El mismo consiste en el análisis, diseño, e implementación de un sistema de adquisición y generación de datos que pueda operar en vuelos suborbitales, transmitiendo la información recopilada a una estación terrena en tiempo real a través de un enlace por Radiofrecuencia.

Se incluyen dentro del trabajo la búsqueda de componentes apropiados, la generación de software, el diseño del circuito impreso; por último se describen los ensayos realizados a las etapas digitales y de radiofrecuencia.

## ***Summary***

This work originated based on CONAE project to conduct a Launch Vehicle capable of putting cargo into orbit, which the Faculty of Engineering joined offering to create a Telemetry System that can operate the vehicle during flight.

It consists of the analysis, design, and implementation of a system for acquiring and generating data that can operate suborbital flights, transmitting the collected information to a ground station in real time via a radio frequency link.

Included within the work finding appropriate components, the generation of software, the printed circuit design; finally describes tests performed for the digital and RF stages.

# Índice

<b>1 Introducción.</b>	<b>1</b>
1. Objetivos generales.	2
2. Objetivos específicos.	2
<b>2 Antecedentes y Fundamento Teórico.</b>	<b>3</b>
1 Resumen de antecedentes.	3
2 Planteo de los requerimientos particulares.	5
3 Reglamentaciones vigentes.	5
<b>3 Diseño.</b>	<b>10</b>
1 Introducción.	10
2 Diseño preliminar y selección de componentes.	11
1 Elección de la unidad de proceso central.	12
1. Ensayo previo del Microcontrolador.	14
2. Descripción de la Unidad de Procesamiento.	16
2. Módulo Generador de Radiofrecuencia (RF).	18
3. Amplificador de Potencia.	22
4. Conversor DC/DC	26
3 Cálculo del enlace de radiofrecuencia.	30
1 Margen de Desvanecimiento (MF).	33
2 Sensibilidad Vs. Tasa de Datos.	34
4 Circuito Impreso.	37
1 Condiciones del Circuito	39
<b>4 Desarrollo.</b>	<b>43</b>
1 Software: Planteo de condiciones.	43
2 Herramientas y simuladores que permitan desarrollar el sistema.	45
1 Compilador o Plataforma de Desarrollo.	45
1 Concepto de Sistemas Embebidos.	45
2 Simulador.	47
1 Simulaciones desarrolladas por etapas.	48

3	Software de Diseño y desarrollo del CI	50
4	Configuración del módulo de RF.	
3	Configuración de la comunicación PC/ PIC- PIC/ Módulo RF.	51
<b>5</b>	<b>Implementación.</b>	<b>55</b>
1	Generación de la plaqueta con sus respectivos componentes.	55
<b>6</b>	<b>Ensayos.</b>	<b>57</b>
1	Ensayos de la comunicación PC- PIC.	57
2	Ensayos de la etapa de RF.	57
3	Medición de parámetros.	61
1	Mediciones realizadas con el analizador de espectro HP 4040.	62
2	Mediciones realizadas con el receptor ICOM IC-PCR1000	64
4	Análisis de los resultados obtenidos y planteo de mejoras.	66
<b>7</b>	<b>Conclusiones.</b>	<b>68</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>70</b>
	<b>Anexo I</b>	<b>71</b>
	Software confeccionado para el módulo de ensayo previo del punto 3.2.1.1.	
	<b>Anexo II</b>	<b>73</b>
	Software confeccionado para el modelo experimental	

## 1 Introducción.

Uno de componentes más importantes de cualquier satélite es el subsistema de comunicación.

Este proyecto plantea el diseño de un sistema de comunicaciones específico, partiendo de los requerimientos propios de un enlace satelital de las características mencionadas (bajo peso y reducido volumen), sentando un precedente válido, ya que en la actualidad no existe un sistema de comunicaciones ideal para este tipo de proyectos (Picosatélites<sup>1</sup> y Nanosatélites<sup>2</sup>) pudiendo incluso generar un estándar una vez verificado su funcionamiento en vuelo.

El diseño de este sistema de comunicaciones permite (por las características mencionadas anteriormente) que pueda ser aplicado a aparatos de vuelo suborbital como las radiosondas; donde las distancias, radiación y tiempo de vida son mucho menores.

La primera implementación de este desarrollo será realizada para un vuelo suborbital, ya que el lanzador que autorizó el transporte no llegará en esta ocasión a ponerse en órbita.

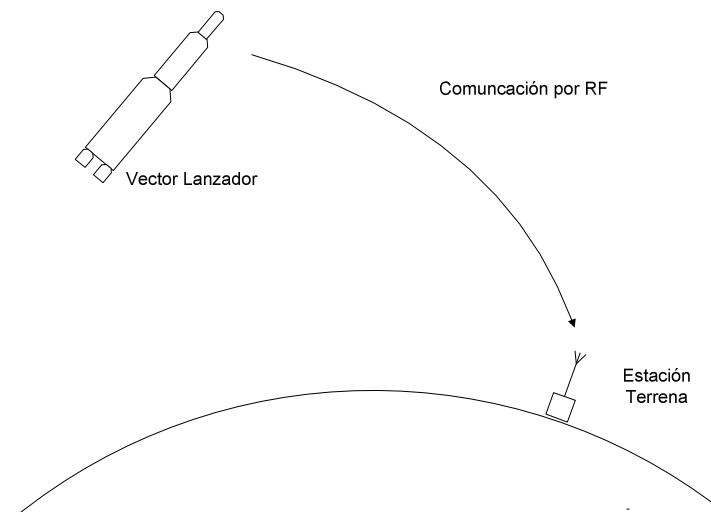


Figura 1 – Esquema general de comunicación.

<sup>1</sup> Picosatélites: Satélites de masa inferior a 1 Kg

<sup>2</sup> Nanosatélites: Satélites de masa inferior a 10Kg

## **1.1 Objetivos generales:**

Diseñar e Implementar un Sistema de Telemetría que opere en las condiciones ambientales espaciales.

Para este tipo de aplicaciones resulta fundamental la validación de técnicas y/o componentes, de modo de poder ser utilizadas en futuras aplicaciones, es por esto que este proyecto servirá como puntapié inicial para el desarrollo de cargas espaciales más complejas y tecnológicamente más avanzadas.

## **1.2 Objetivos específicos:**

- Estudiar y analizar los sistemas de telemetría.
- Diseñar el sistema.
- Analizar las condiciones de vuelo.
- Buscar componentes que soporten las condiciones de vuelo y realizar los ensayos correspondientes.
- Estudiar y calcular el enlace de radiofrecuencia.
- Optimizar en base a simulaciones el diseño.
- Implementación del sistema.

## ***2 Antecedentes y Fundamentos Teóricos.***

### **2.1 Resumen de Antecedentes.**

Como antecedentes de comunicaciones se ha tomado lo publicado por Bryan Klofas y Jason Anderson en *A Survey of CubeSat Communication Systems* [1], en el cual se observaron los sistemas de comunicaciones utilizados por distintas Universidades y Radioaficionados en la generación de satélites Cubesat.

En la tabla 1 se observa que mayormente son utilizados como unidad de procesamiento de datos los Microprocesadores PIC.

Otro dato interesante es que la frecuencia de transmisión es generalmente 436Mhz; en este proyecto dicha frecuencia está reservada para frecuencia de *terminación de vuelo*<sup>3</sup> por lo que tuvo que buscarse otra frecuencia dentro de las bandas disponibles (ver punto 2.3).

En cuanto a la potencia de transmisión, esta varía de un proyecto a otro por lo que es necesario realizar el cálculo del enlace para determinar la potencia mínima a transmitir. Observando la tabla 1 se puede prever en principio que con una potencia de transmisión de 1W y un receptor de bajo ruido podría conseguirse un buen enlace (ver cálculo riguroso en punto 3.3.).

---

<sup>3</sup> Frecuencia utilizada para la autodestrucción del vehículo.

Table 1 Summary of spacecraft transmitters															
Satellite	Object	Size	Radio	Frequeny	unidad	License	Power	unidad	TNC	Protocol	Baud	Fater/Modul	Downloaded	Lifetime	Antenna
AAU/CubeSat	27846 IU		Wood & Douglas SX450	437.475 MHz	500 mW	amateur			MK309	AX.25, Mobitek	9600 GMSK	1KB	3months	dipole	
DTUSat-1	27842 IU		RFMD PFD306	437.475 MHz	400 mW	amateur				AX.25	2400 FSK	0(1)	0 days	caned turnstile	
CanK-1	27847 IU		Meleis	437.880 MHz	500 mW	amateur			Custom		1200 MSK	0(1)	0 days	crossed dipole:	
Cute-1	27844 IU		Maki Denki(Beacon)	4.368.375 MHz	100 mW	amateur			PIC18LC73A	C.V	50 WPM	N/A	65+ months	monopole	
(CO-65)			Alinco DU-C4 (Data)	437.470 MHz	350 mW	amateur			MK314	AX.25	1200 AFSK	>10 MB		monopole	
QuakeSat-1	27845 3U		TekK KS-960	436.675 MHz	2 W	amateur			BajPa-BF-36A	Ax.252	9600 FSK	423 MB	7 months	turnstile	
XI-V	27848 IU		Nishi RF Lab (Beacon)	4.368.475 MHz	80 mW	amateur			PIC18C716	C.V	50 WPM	N/A	65+ months	dipole	
(CO-67)			Nishi RF Lab (Data)	437.490 MHz	1 W	amateur			PIC18C622	AX.25	1200 AFSK	>11MB		dipole	
XI-V	28895 IU		Nishi RF Lab (Beacon)	437.465 MHz	80 mW	amateur			PIC18C716	C.V	50 WPM	N/A	36+ months	dipole	
(CO-68)			Nishi RF Lab (Data)	437.345 MHz	1 W	amateur			PIC18C622	AX.25	1200 AFSK			dipole	
NCube-2	28897 (3) IU			437.505 MHz		amateur				AX.25	1200 AFSK	0(1)	0 days	monopole	
UWE-1	28892 IU		PR430	437.505 MHz	1 W	amateur			H892674F4	AX.25	1200/9600	AFSK	0.75 months	end-fed	
Cute-17-APD	28941 2U		Telemet Beacon	437.385 MHz	100 mW	amateur			H8923284	C.V	50 WPM	N/A	2.5 months	dipole	
(CO-66)			Alinco DU-C5	437.505 MHz	300 mW	amateur			CMK668A	AX.25/SPLL	1200 AFSK/9600	GMSK	<1MB	dipole	
Genesat-1	28655 3U+		Almet AT4902 (Beacon)	437.067 MHz	500 mW	amateur			PIC12C817	AX.25	1200 AFSK	N/A	3 months	monopole	
Microhard			MHY-2400	2.4 GHz	1 W	ISM			Integrated5	Proprietary	500 k			patch	
CSTBI	3122 IU		Commercial6	4.000.375 MHz	1 W	Experimental	<1		PIC	Proprietary	1200 AFSK	6.77 MB(7)	19+ months	dipole	
AeroCube-2	3123 IU		Commercial6	902.928 MHz	2 W	ISM			Integrated5	Proprietary	38.4 k	500 kB	0.25 months	patch	
CP4	3122 IU		TICC000	437.325 MHz	1 W	amateur			PIC18LF620	AX.25	1200 FSK	487 MB	2 months	dipole	
Libertad-1	3128 IU		Stensat	437.405 MHz	400 mW	amateur				AX.25	1200 AFSK	0(8)	1 months	monopole	
CAPET	3120 IU		TICC020	435.245 MHz	1 W	amateur			PIC18LF452	AX.25	9600 FSK	0(9)	4 months	dipole	
CP3	3129 IU		TICC000	436.845 MHz	1 W	Experimental			PIC18LF620	AX.25	1200 FSK	2.0 MB(7)	19+ months	dipole	
MAST10	3126 3U		Microhard MHY-2400	2.4 GHz	1 W	ISM			Integrated5	Proprietary	15 k	>2 MB	0.75 months	monopole	
Delis-C3	32789 3U		Custom Beacon	465.870 MHz	400 mW	amateur			PIC18LF4680	AX.25	1200 BPSK	60 MB(11)	7+ months	turnstile	
(CO-64)			Custom Transponder	465.9.435.55 MHz	200 mW	amateur			N/A	Linear	40 kHz	wide	N/A	turnstile	
Seeds-2	32791 IU		Musasilino Electric (Beacon)	437.485 MHz	90 mW	amateur				C.V	N/A		7+ months	monopole	
(CO-66)			Musasilino Electric (Data)	437.485 MHz	450 mW	amateur				AX.25	1200 AFSK	500 kB		monopole	
CanK-2	32790 3U		Custom S-Band	2.2 GHz	500 mW	Space Research			Integrated MSP		16kbps-256kbps	BPSK	250 MB	patch	
AAUSAT-II	32788 IU		Holger Eckhardt (DF-2F-q)	437.425 MHz	610 mW	amateur			PIC18LF680	AX.25	1200 MSK	8 MB(13)	7+ months	dipole	
Cute-17-APD II	32785 3U+4		Invar(Beacon)	437.275 MHz	100 mW	amateur			H892328	C.V	50 WPM	N/A	7+ months	monopole	
(CO-65)			Alinco DU-C5 (Data)	437.475 MHz	300 mW	amateur			H892328; CMK668A	AX.25/SPLL	1200 AFSK/9600	GMSK	21MB(15)	monopole	
Compass-1	32787 IU		BC546 (Beacon)	437.275 MHz	200 mW	amateur			PIC12F629	C.V	15 WPM	N/A	7+ months	dipole	
			Holger Eckhardt (Data)	437.405 MHz	300 mW	amateur			C8051F123; F1614	AX.25	1200 AFSK/NASK	<1MB		dipole	

Tabla 1 – Resumen de Lanzamientos de Pequeños Satélites

## **2.2 Planteo de los requerimientos particulares.**

En una comunicación satelital o durante un vuelo espacial el subsistema de telemetría permite conocer el estado de todos los demás subsistemas.

El subsistema de telemetría utiliza un gran número de sensores para detectar o medir estados de circuitos y variaciones de temperatura, presión, voltaje, corriente eléctrica, etc.; convierte esa información en datos codificados y los envía en secuencia al centro de control a través de un canal especial de comunicación.

Como el sistema de telemetría se utilizará en la cofia de un lanzador, se deben tener ciertos recaudos al momento de diseñar el circuito impreso y de elegir los componentes electrónicos. Si esto no es tenido en cuenta el sistema puede no soportar las condiciones de vuelo, afectando el funcionamiento propio y pudiendo afectar también a los demás sistemas del vehículo.

Las condiciones a tener en cuenta en el diseño del circuito impreso (CI) para que permita operar en condiciones de vuelo espacial son:

- El CI debe ser capaz de soportar las vibraciones (baja frecuencia) a las que se someterá el Vehículo Lanzador al momento del despegue.
- Deberá soportar durante la operación una gran variación de temperatura (en un rango de 200°C).
- Los componentes utilizados deberán ser aptos para soportar las condiciones de vacío existentes en el espacio.
- El sistema se deberá comunicar con una estación terrena a cientos de kilómetros, por lo tanto se deberá realizar un cálculo del enlace para determinar los requerimientos de diseño del equipo (frecuencia, potencia, ganancia de la antena, etc.).
- El CI debe tener un tamaño reducido ya que se montará en la cofia del cohete en donde el peso y tamaño son requerimientos críticos. Además

el diseño está pensado para que pueda implementarse en el futuro en un satélite o microsatélite.

## 2.3 Reglamentaciones vigentes.

Como se mencionó en el punto 2.2. se utilizará para la comunicación entre la carga en vuelo y la estación terrena un enlace por radiofrecuencia. Para realizar este tipo de enlace debe tenerse en cuenta que el espectro radioeléctrico no es libre; la frecuencia, el ancho de banda y la potencia transmitida serán parámetros analizados y controlados para no interferir a los demás usuarios del espectro.

En un comienzo se pensó en utilizar la banda centrada en 433MHz ya que se podía conseguir fácilmente autorización para transmitir, pero debido a que esa frecuencia es utilizada en el lanzador como *frecuencia de terminación de vuelo* se decidió utilizar una de las bandas ICM (Industriales, Científicas y Médicas) apta para sistemas experimentales y que no requiere de un permiso especial para transmitir tal como se indica a continuación.

El uso del espacio radioeléctrico está controlado en nuestro país por la CNC<sup>4</sup> (Comisión Nacional de Comunicaciones) cuya misión y funciones son la regulación, contralor, fiscalización y verificación de los aspectos vinculados a la prestación de los servicios de telecomunicaciones, postales y de uso del Espectro Radioeléctrico.

La actividad de los servicios espaciales en nuestro país se desarrolla desde el punto de vista de dos perspectivas bien diferenciadas:

1. Sistemas orientados a las comunicaciones; y
2. Sistemas orientados a la actividad científica espacial.

En el segundo de los casos la actividad científica espacial es desarrollada en nuestro país a través de la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE).

En ambos casos la gestión para los derechos de ocupación de la órbita de los satélites y sus parámetros asociados es llevada a cabo por esta

---

<sup>4</sup> Fuente: <http://www.cnc.gov.ar/>

Comisión Nacional de Comunicaciones (CNC). Como parte de dicha gestión se incluyen el análisis y estudio de casos de interferencia, en el marco del Reglamento de Radiocomunicaciones de la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) y la normativa nacional pertinente.

### **Bandas no licenciadas CNC**

Se pueden definir como bandas de frecuencias en las que se permite la operación de dispositivos de radiocomunicaciones sin una planificación centralizada por parte de la Autoridad de Comunicaciones, es decir, sin una autorización individual de cada estación tal que asegure la asignación de una frecuencia o canal para uso exclusivo de la misma. La banda se destina íntegramente a tales dispositivos, sin subdivisión de canales, estableciéndose ciertos requerimientos básicos de convivencia, tales como límites de potencia o de densidad de potencia radiadas, anchura de banda mínima, etc. La coordinación corre por cuenta de los usuarios, pero se apoya principalmente en la inmunidad contra interferencias, propia de la tecnología empleada, y el modo de acceso múltiple a la banda.

Conviene destacar que el Reglamento de Radiocomunicaciones de UIT ha destinado a nivel mundial (y en algún caso regional) bandas para uso primario para las aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ICM), que en su nota 5.150 dice<sup>5</sup>:

*“Las bandas:*

- *13.553-13.567 kHz (frecuencia central 13.560 kHz),*
- *26.957-27.283 kHz (frecuencia central 27.120 kHz),*
- *40,66-40,70 MHz (frecuencia central 40,68 MHz),*
- *902-928 MHz en la Región 2 (frecuencia central 915 MHz),*

---

<sup>5</sup> Fuente: <http://www.itu.int>

- 2.400-2.500 MHz (frecuencia central 2.450 MHz),
- 5.725-5.875 MHz (frecuencia central 5.800 MHz) y
- 24-24,25 GHz (frecuencia central 24,125 GHz),

*están designadas para aplicaciones industriales, científicas y médicas (ICM). Los servicios de radiocomunicación que funcionan en estas bandas deben aceptar la interferencia perjudicial resultante de estas aplicaciones. Los equipos ICM que funcionen en estas bandas estarán sujetos a las disposiciones del número 15.13.”*

En base a las reglamentaciones arriba descritas, se seleccionaron dos de las bandas ISM; la centrada en 915 MHz y la centrada en 2.45GHz por la gran disponibilidad de dispositivos existentes en el mercado que cumplan con los requerimientos de tamaño del diseño y que sean aptos para vuelo espacial.

De las dos bandas posibles fue seleccionada la de 915 MHz por ser más sencillo el diseño de la placa impresa, menos pérdidas y tener una menor atenuación.

La FCC (Federal Communications Comisión, EEUU) permitió la operación sin licencia de dispositivos que utilizan 1 Watt de energía o menos, en tres bandas de frecuencia: 902 a 928 MHz, 2,400 a 2,483.5 MHz y 5,725 a 5,850 Mhz. Estas bandas de frecuencia, llamadas bandas ISM, estaban anteriormente limitadas a instrumentos científicos, médicos e industriales. Esta banda, en la actualidad, está abierta para cualquier uso.

Los equipos para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas (ICM) ó ISM (Industrial, Scientific and Medical applications) son dispositivos que producen energía de radiofrecuencia (RF); sin embargo conviene aclarar que dichos equipos utilizan internamente esa energía para generar efectos de tipo físico, mecánico, biológico y/o químico.

Entre las aplicaciones típicas ICM se encuentran: la calefacción industrial en procesos de manufactura, la diatermia médica, imágenes por resonancia magnética, la aceleración de partículas cargadas, los transductores

electromecánicos para producir energía mecánica, los limpiadores ultrasónicos de joyería, los humidificadores ultrasónicos, los hornos de microondas, etc.

Por lo tanto, los equipos ICM no son equipos de radiocomunicación debido a que no transmiten información de telecomunicación. Toda vez que las ICM no son aplicaciones de radiocomunicación o telecomunicación, las diferentes Administraciones (países) permiten el uso libre del espectro radioeléctrico para dichos usos.

Las aplicaciones ICM conviven con otros servicios primarios de radiocomunicación, como: los radares del servicio aeronáutico, los sistemas de radiolocalización y el servicio de radioaficionados. Todas estas formas de utilización del espectro radioeléctrico son protegidas y reglamentadas por las Administraciones de los diferentes estados miembros de la UIT.

### **3. Diseño**

#### **3.1 Introducción**

Este trabajo consiste en la implementación de un sistema de adquisición y generación de datos con la posterior adecuación de los mismos para ser enviados por un sistema de transmisión por radiofrecuencia, como se muestra en el siguiente diagrama en bloques (fig 2).

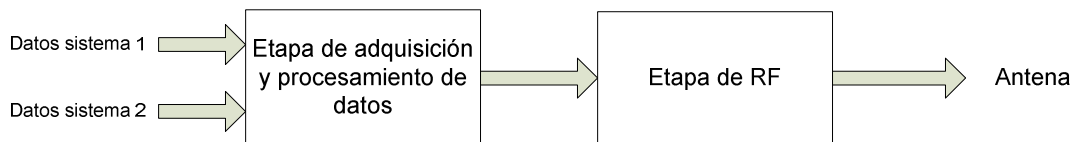


Figura 2 – Caracterización básica del sistema.

En la figura 2 se observa que el dispositivo cuenta dos etapas principales; etapa de procesamiento y etapa de RF. La etapa de procesamiento tiene la finalidad de adquirir datos tanto de otros dispositivos como del propio Circuito Impreso y luego agruparlos para su envío a la estación terrena. La etapa de RF tiene como finalidad la adecuación de los datos para poder transmitirlos por el espacio libre.

Se puede apreciar que la etapa de adquisición y procesamiento cuenta con dos entradas. Por la una entrada se reciben datos de una carga útil que tomará datos geofísicos y que viajará en el módulo contiguo. La otra entrada conecta el sistema con el router del Vehículo Lanzador. El router del lanzador envía datos de telemetría al sistema, teniendo de esta forma el Vehículo dos transmisores de RF independientes que envíen información sobre la posición del mismo.

Con el desarrollo de este trabajo se pretende adquirir experiencia en la generación y transmisión de datos durante el vuelo del cohete, lo que permitirá en un futuro tener las bases para la generación de un Satélite Universitario<sup>6</sup>.

### 3.2 Diseño preliminar y selección de componentes.

Como diseño preliminar se pensó en una unidad de proceso central, la cual se comunicará con varios sensores del Circuito Impreso y con los demás módulos del vehículo para recopilar datos; luego los datos almacenados serán reordenados y enviados al transmisor de RF (Radiofrecuencia) que generará la portadora de RF en la frecuencia seleccionada, la cual será modulada con la información para ser transmitida mediante una antena. La modulación se debe realizar en una banda de frecuencia adecuada para el enlace. Desde una estación terrena será captada la señal y demodulada para su posterior interpretación.

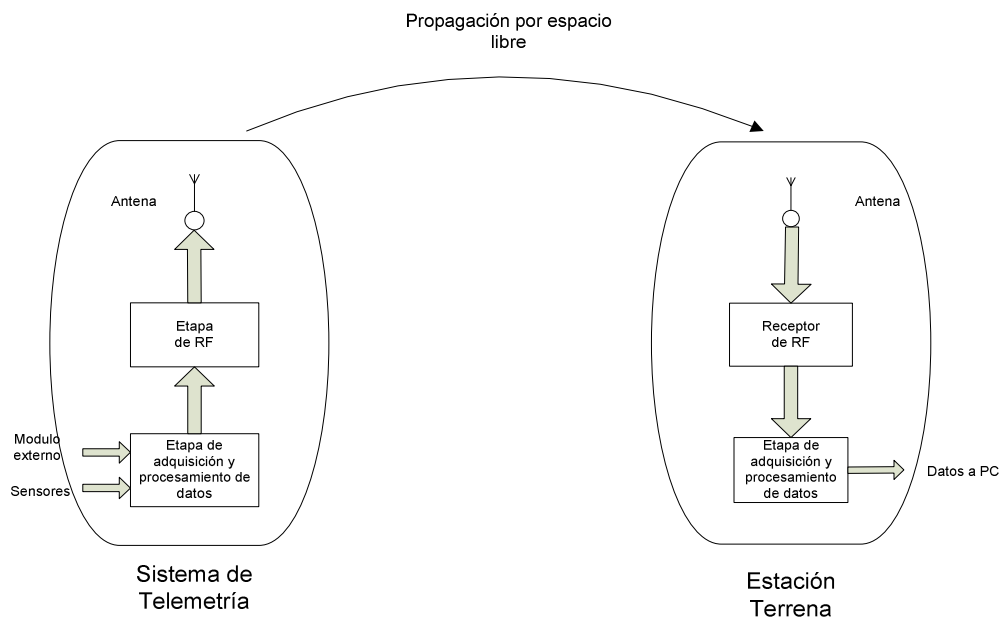


Figura 3 – Esquema del sistema de comunicación.

<sup>6</sup> Satélites desarrollados con dispositivos de estándar comercial o industrial que permiten reducir significativamente los costos.

Según un análisis realizado previamente y sujeto a uno posterior más riguroso se consideró que los componentes principales para implementar el sistema serán:

- Unidad de Proceso Central (microcontrolador).
- Etapa de RF.
- Convertidor DC/DC.
- Sensores.
- Componentes pasivos.

### **3.2.1 Elección de la Unidad de Proceso Central.**

De los antecedentes recopilados en el punto 2.1 se observa que la unidad de proceso central puede implementarse con los Microcontroladores PIC de Microchips.

Partiendo del diagrama de la figura 3 y analizado la arquitectura de los PIC se deduce que estos microcontroladores tienen distintos módulos que optimizan la comunicación con los periféricos según su tipo[2] [12]:

1. Los dispositivos utilizados para sensar la tensión, corriente, potencia de RF y temperatura en la placa, entregan una tensión proporcional a la magnitud que están midiendo; por lo tanto para la entrada de estos datos es conveniente utilizar el módulo conversor A/D (Analógico/Digital). Este módulo convierte una magnitud de tensión en un número discreto, dependiendo de la cantidad de bit del conversor tendremos acotado el error de conversión.
2. La comunicación con los sistemas relacionados es conveniente que se realice por medio del módulo USART (Universal Synchronous Asynchronous Receiver Transmitter). En las especificaciones del

Vehículo Lanzador se informa que el router con el que nos comunicaremos utiliza el protocolo 422. La USART del PIC debe permitir el “modo interrupción” para no perder información mientras el programa se está ejecutando en otra parte, ver figura 4.

3. La comunicación con otros dispositivos dentro del circuito impreso, como ser el generador de RF, se puede realizar a través del módulo SPI (Serial Peripheral Interface), ver figura 4.

Con la información recopilada se puede generar un diagrama de la Unidad de Proceso Central detallando los módulos principales, la alimentación y las líneas de comunicación.

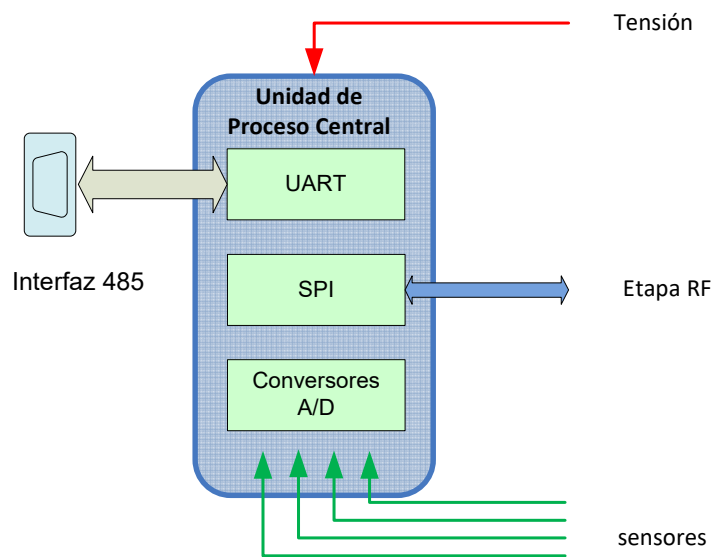


Figura 4 – Diagrama en bloques del CPU.

Como se ve en la Figura 4 la Unidad de Procesamiento Central (CPU) estará formada por distintos módulos que optimizan cada tipo de tarea; estos módulos se encargan de comunicarse con cada uno de los periféricos en el lenguaje apropiado.

### 3.2.1.1 Ensayo previo del Microcontrolador

En una primera instancia y con el fin de probar el funcionamiento de un PIC de la serie 18F (convertidores A/D, USART y manejo de interrupciones) se eligió trabajar con el PIC 18f452 [3], ya que dentro de los existentes en la Cátedra cumplía con los requerimientos para el ensayo.

Se confeccionó un circuito de prueba empleando el PIC, un par de potenciómetros, una conexión Tx/Rx y una pantalla de LCD. Este circuito se conectó al puerto USB de una PC mediante el convertidor MCP2200 de Microchip que adapta los protocolos del puerto USB de la PC a los del puerto USART del PIC.

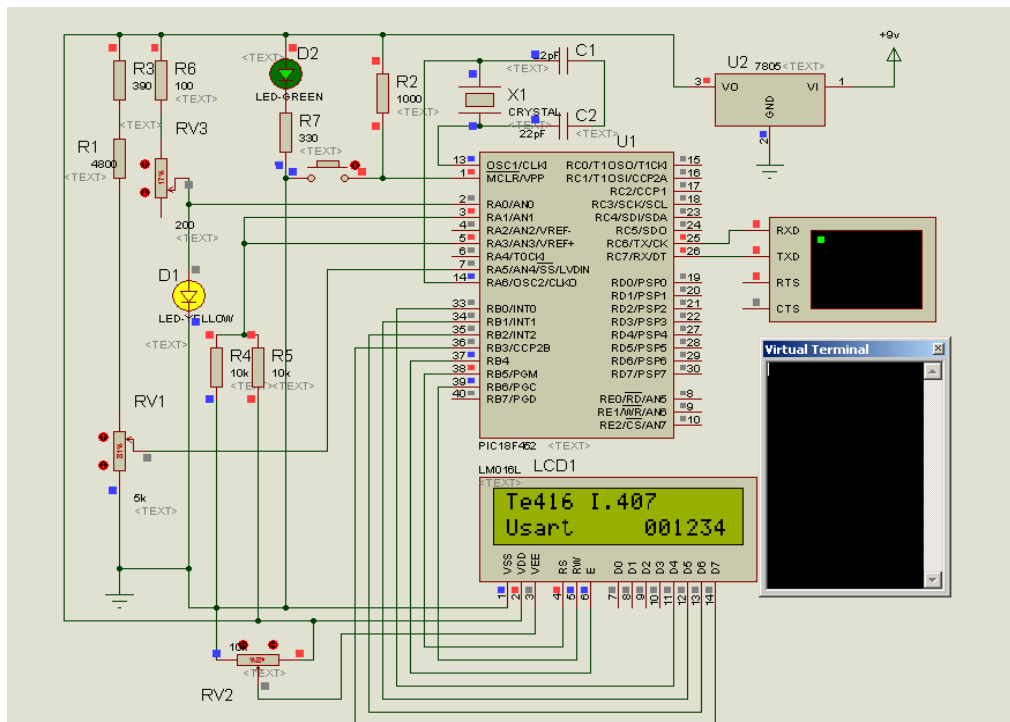


Figura 5 – Circuito Esquemático

En la figura 5 se ve el esquemático de módulo de ensayo previo y la simulación obtenida con ISIS de Proteus, (en el punto 4.2 se hará una descripción de las herramientas por software utilizadas).

Para el circuito de prueba se desarrolló un programa en lenguaje “C” [2] [11] [12] [13] que corra dentro del PIC (ver Anexo I). Este programa posibilita tomar la tensión de los potenciómetros en función de la tensión de referencia haciendo uso del conversor A/D; y con el uso de interrupciones permite leer los datos (caracteres ASCII) enviados desde una PC por el puerto serie RS232. Tanto los datos tomados con los conversores A/D como los tomados por la USART son mostrados en una pantalla de LCD.

Otro objetivo del programa es que pueda filtrar los datos que ingresan en la USART comparando su encabezado con una tabla interna y en función de esto enviar al LCD una cadena de 6 caracteres.

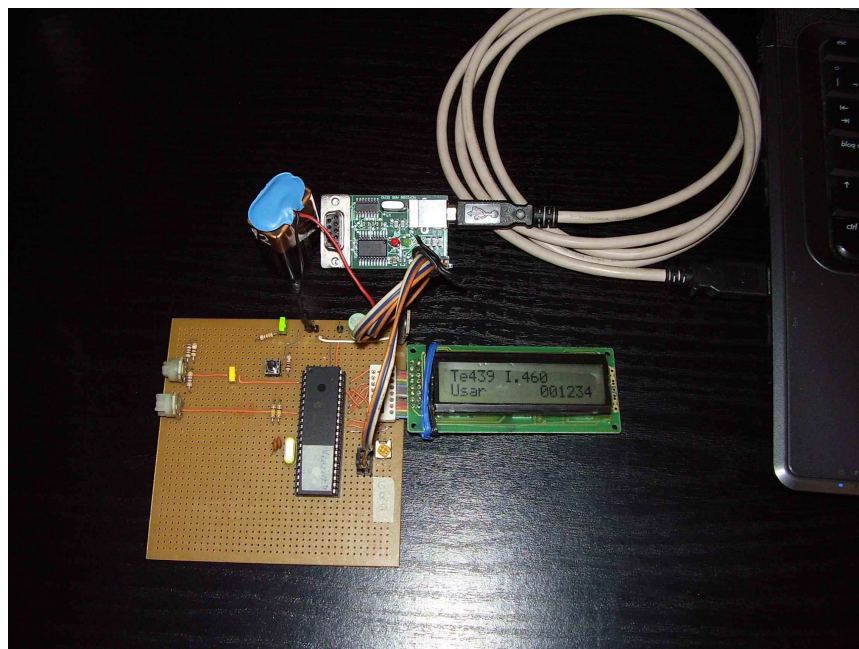


Figura 6 – Módulo de Prueba.

En la Figura 6 se ve el módulo de prueba durante uno de los ensayos. En la pantalla de LCD aparece, en tiempo real, la información recopilada por el PIC.

En los ensayos con el circuito de pruebas se observó el correcto funcionamiento de los siguientes puntos a verificar: lectura y conversión de datos del conversor Analógico/Digital, comunicación mediante el puerto USART, manejo de interrupciones para dicho puerto y filtrado de datos por software según su encabezado. Al mismo tiempo se verificó con este circuito el adecuado funcionamiento de las herramientas de desarrollo y simulación a utilizar, también se comprobó el funcionamiento del programador de PIC y su manejo desde el entorno de desarrollo MPLAB.

Con las pruebas realizadas se puede concluir que el PIC resulta adecuado para implementar la Unidad de Proceso Central. El PIC cuenta con un módulo específico para cada aplicación y/o pueden implementarse mediante software si la velocidad de proceso de dicha función no es algo crítico.

### **3.2.1.2 Descripción de la Unidad de Procesamiento.**

Dentro de los PIC existentes en el mercado se eligió trabajar con el PIC 18F2550 porque cuenta con los módulos requeridos y puede obtenerse fácilmente en cualquier casa de electrónica a un precio accesible.

El PIC 18F2550 tiene las siguientes Características[4]:

- Posee un conversor Analógico digital de 10 bits al que se puede acceder desde 9 puertos; además este conversor permite configurar el valor de referencia.
- Posee una USART por hardware, pero puede implementarse, de ser necesario, otra USART por software.
- Posee un módulo SPI, que permite realizar comunicaciones entre distintos dispositivos inteligentes.

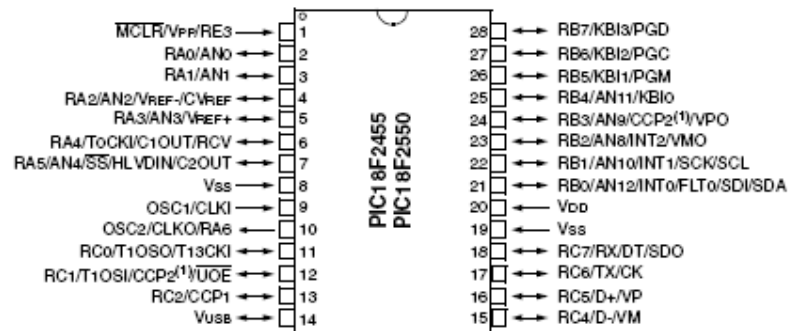


Figura 7 – Pin Out de PIC.

En la figura 7 puede verse el diagrama de pines (puertos) del PIC. En este diagrama se observa que los puertos tienen funciones especiales asignadas, además de las de simples entrada/salida:

- El módulo USART tiene su Rx Tx (Entrada, Salida) vinculado a los puertos 17, 18; también se puede implementar a través de otros puertos mediante software.
- Programación In-circuit: El PIC puede ser programado y reprogramado sin necesidad de extraerlo del circuito impreso a través de los puertos PGD, PGC, PGM y MCLR.
- Protocolo SPI disponible desde los pines SDO, SDI y SCK
- Al conversor A/D se tiene acceso desde los puertos etiquetados como An1, An2, An3....., del diagrama se ve que puede setearse la referencia desde los puertos 4 y 5; esto es útil para poder discretizar de una forma más óptima los valores entregado por los sensores.

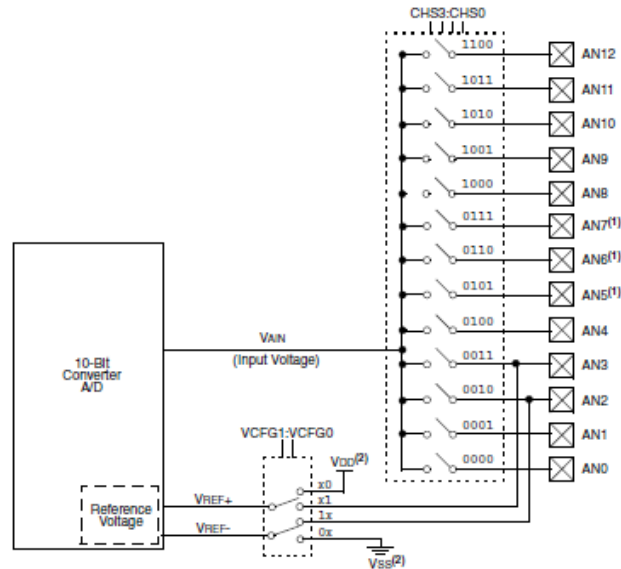


Figura 8 – Diagrama en bloques del convertidor A/D

En la figura 8 se detalla el conexionado interno del convertidor A/D y su acceso a través de los diferentes pines.

### 3.2.2 Módulo Generador de Radiofrecuencia (RF).

Para la generación de la radiofrecuencia se analizaron, dentro de los dispositivos de comunicación existentes en el mercado, los que permiten transmitir en la banda centrada en 915MHz. (elegida en el punto 2.3.).

Se encontró el transceptor de baja potencia de Texas Instruments<sup>7</sup> CC1101, que reúne las siguientes condiciones[5]:

- Bandas de frecuencias preestablecidas en 315, 433, 868 y 915 MHz; que además puede ser programado fácilmente para funcionar a otras frecuencias en la banda de 300-348, 387-464 y 779-928 MHz.

<sup>7</sup> Proveedor mundial de semiconductores e integrados.

- El transceptor RF se integra con un módem que soporta varios formatos de modulación y a una velocidad de datos configurable de hasta 600 kbps.
- Todos los parámetros de funcionamiento puede ser controlado a través de una interfaz SPI.
- Cuenta con dos buffer para transmisión y recepción de datos, ambos de 64 bytes. Los 64 bytes de la memoria de transmisión y los 64 bytes de la memoria de recepción se acceden mediante una interfaz SPI del tipo FIFOs
- Potencia de salida programable hasta 12 dBm para todas las frecuencias compatibles.

### *Características de la etapa Digital*

- Soporte flexible para sistemas de paquetes orientados; chip de soporte para la detección y sincronización de la palabra, longitud del paquete flexible, y el manejo automático de la CRC (corrección de errores por redundancia cíclica).
- Eficiente interfaz SPI; Todos los registros se pueden programar con una transferencia del tipo "Ráfaga".
- Indicación digital de RSSI (potencia de RF recibida).
- Canales de ancho de banda programable.
- Preámbulo programable Indicador de Calidad (PQI) para mejorar la protección contra falsa sincronización de detección de la palabra por ruido aleatorio.
- Apoyo CCA (Clear Channel automatic), escucha del canal antes de realizar una transmisión.

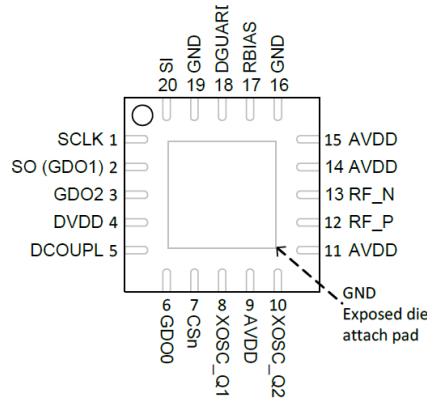


Figura 9 – Módulo de RF

En la figura 9 se ve que la alimentación se realiza por medio de 5 pines, 1 DVDD (alimentación etapa digital) y 4 AVDD (alimentación etapa analógica), es conveniente tener esta separación en cuenta al momento de diseñar el Circuito Impreso.

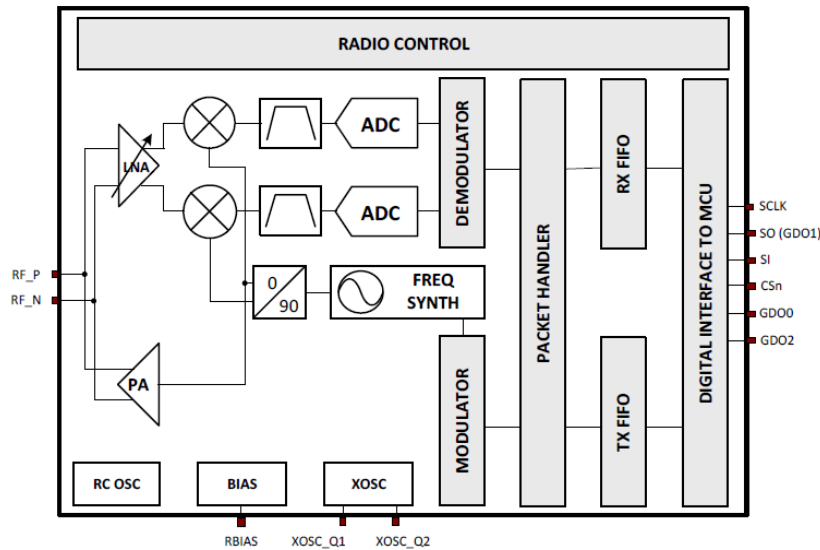


Figura 10 – Diagrama en bloque simplificado del modulo de RF

En la figura 10 se ve un diagrama en bloques mostrando el funcionamiento interno del dispositivo.

Dejando de lado los pines de alimentación vemos que quedan las siguientes entrada/salida:

- Dos puertos para RF, tanto para entrada como para la salida, son por par balanceado con  $85\Omega$  de impedancia de salida a la frecuencia de 915 MHz, luego con una red LC se convertirán en  $50\Omega$ . Ambas etapas, entrada LNA (amplificador de bajo ruido) y salida PA (amplificador de potencia) comparten los mismos puertos. La función de enviar o recibir es controlada por el propio chip.
- Dos pines para el cristal de referencia.
- Seis pines están dedicados a la comunicación con el microcontrolador de los cuales 4 se usarán para la comunicación SPI.

Con los componentes seleccionados se puede confeccionar un diagrama más detallado de lo que será el sistema de telemetría.

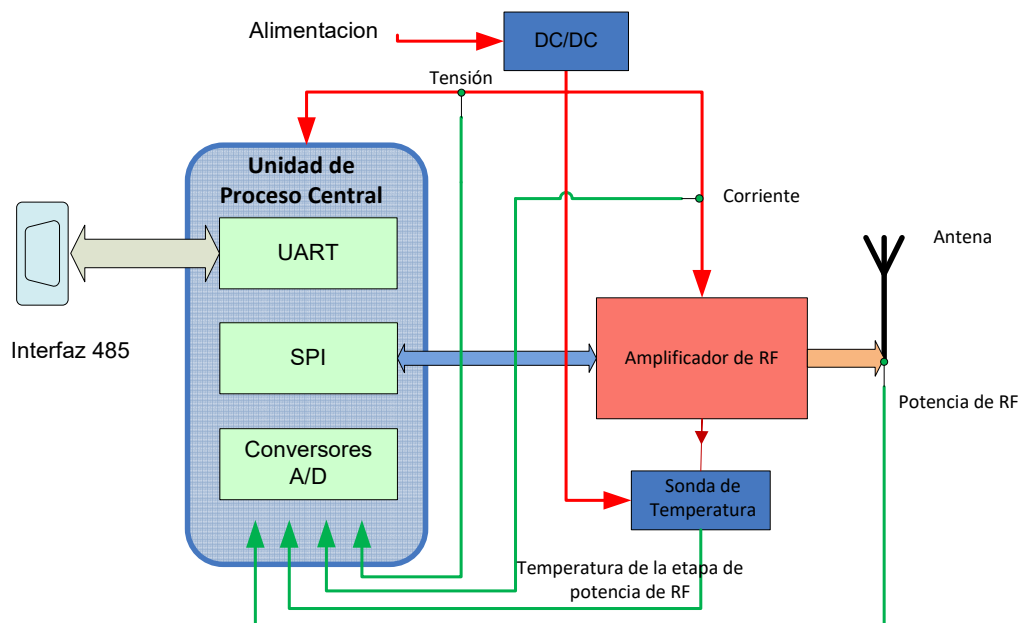


Figura 11 – Diagrama en bloque del sistema de Telemetría

En la figura 11 puede observarse con más detalle como se comunicaran las distintas partes del sistema, podemos ver como los sensores ubicados en la placa nos darán un estado general de la misma para poder recopilar información útil de lo que ocurre durante el vuelo del cohete.

### **3.2.3 Amplificador de Potencia.**

Dado que el Transceptor de RF elegido para esta aplicación es de baja potencia (alrededor de 10 dBm) y que el enlace sería debe establecerse por lo menos hasta los 200Km de distancia, se necesitará colocar en el Circuito Impreso un módulo Amplificador de RF para aumentar la potencia de la señal.

Como se dijo en el punto 2.1, se puede intuir en un principio que con una potencia de transmisión de 1W y un receptor de bajo ruido podría conseguirse un buen enlace; quedando sujeto a un cálculo posterior más riguroso con los componentes seleccionados (ver punto 3.3).

Con esta base se buscó en distintos portales de proveedores de insumos electrónicos un amplificador de potencia adecuado que cumpla con los requerimientos del diseño que se detallan a continuación:

- que opere en la banda de los 915MHz
- tensión de alimentación no mayor de 5 Vcc.
- potencia de salida de aproximadamente 1 [W],
- amplificador clase C (alto rendimiento) ya que debe consumir la menor cantidad de energía posible, sobre todo para aplicaciones satelitales.
- tamaño reducido.

Hide Controls	Total Parts: 8 Matching Parts: 6	Solutions	Applications	Freq. (MHz)		P <sub>OUT</sub> (dBm)	Efficiency (%)	Features	Low Pwr. Shutdn	Footprint (mm x mm)	Package/Pins	Smallest Available Pckg. (mm <sup>2</sup> ) max w/pins	RoHS Available	Budgetary Price			
				min	max												
Current Selections: = 900MHz																	
Clear All Selections		Clear															
Parametric Selection Controls:		<input type="checkbox"/> 2.4GHz <input type="checkbox"/> 400MHz <input checked="" type="checkbox"/> 900MHz <input type="checkbox"/> Cellular <input type="checkbox"/> Cordless <input type="checkbox"/> WLL		<input type="checkbox"/> 302.11b <input type="checkbox"/> AMPS <input type="checkbox"/> AMR <input type="checkbox"/> Bluetooth <input type="checkbox"/> CDMA <input type="checkbox"/> Cordless <input type="checkbox"/> GSM <input type="checkbox"/> HomeRF <input type="checkbox"/> ISM <input type="checkbox"/> TDMA		2400 2500 30 58 1000 849 20 16 0		<input type="checkbox"/> Analog Gain Control <input type="checkbox"/> Autoramping <input type="checkbox"/> Digital Gain Control <input type="checkbox"/> Digital Power Control <input type="checkbox"/> External Bias Control for Current Throttleback <input type="checkbox"/> Integrated Diode for Biasing <input type="checkbox"/> Matched Input Matching <input type="checkbox"/> On-Chip Power Detector <input type="checkbox"/> Programmable RF Power Ramping <input type="checkbox"/> Tuneable Output Power		<input type="radio"/> Yes <input type="checkbox"/> 1.6 x 1.6 <input type="checkbox"/> 1.5 x 2.0 <input type="checkbox"/> 3.9 x 6.0 <input type="checkbox"/> 4.9 x 6.0 <input type="checkbox"/> 5.0 x 6.4 <input type="checkbox"/> 6.4 x 6.5		<input type="checkbox"/> QSOP-EP/16 <input type="checkbox"/> SOIC(N)-EP/8 <input type="checkbox"/> TSSOP-EP/16 <input type="checkbox"/> TSSOP-EP/20 <input type="checkbox"/> UCSP/E <input type="checkbox"/> UCSP/11		42.9 30.9 2.5		<input type="radio"/> Yes \$3.57 @1k \$2.04 @1k \$1.41 @1k	
Hidden Columns: 0		Hide		Hide		Hide		Hide		Hide		Hide		Hide			
Compara		Sort by: Part Number		Default = Newest First													
<input checked="" type="checkbox"/> All <input checked="" type="checkbox"/> None																	
<input checked="" type="checkbox"/> MAX2265 2.7V, Single-Supply, Cellular-Band Linear Power Amplifier		900MHz Cellular		AMPS CDMA TDMA		824 849 28		37		-		Yes 5.0 x 6.4 TSSOP-EP/16		33.2 Yes \$3.57 @1k			
<input checked="" type="checkbox"/> MAX2235 +3.6V, 1W Autoramping Power Amplifier for 900MHz Applications		900MHz Cellular		AMPS GSM ISM		800 1000 30		47		Autoramping		Yes 6.4 x 6.5 TSSOP-EP/20		42.9 Yes \$2.04 @1k			
<input checked="" type="checkbox"/> MAX2601 3.6V, 1W RF Power Transistor for 900MHz Applications		400MHz 900MHz		Cordless ISM		0 1000 29		58		-		4.9 x 6.0 SOIC(N)-EP/8		30.9 Yes \$2.39 @1k			
<input checked="" type="checkbox"/> MAX2602 3.6V, 1W RF Power Transistor for 900MHz Applications with Integrated Diode for Biasing		400MHz 900MHz		Cordless ISM		0 1000 29		58		Integrated Diode for Biasing		4.9 x 6.0 SOIC(N)-EP/8		30.9 Yes \$2.45 @1k			
<input checked="" type="checkbox"/> MAX2232 900MHz ISM-3and, 250mW Power Amplifier with Analog and Programmable RF Power Ramping		900MHz		AMR ISM		800 1000 24		44		Analog Gain Control Programmable RF Power Ramping		Yes 3.9 x 6.0 QSOP-EP/16		30.9 Yes \$2.10 @1k			
<input checked="" type="checkbox"/> MAX2233 900MHz ISM-3and, 250mW Power Amplifier with Digital Gain Control		900MHz		AMR ISM		800 1000 24		44		Digital Gain Control		3.9 x 6.0 QSOP-EP/16		30.9 Yes \$2.08 @1k			

Figura 12 – Buscador de componentes de la página de Maxim.

La figura 12 es la captura de la página de Maxim<sup>8</sup> en su sección amplificadores de RF. En la misma se observa que puede filtrarse la búsqueda de amplificadores utilizando distintos parámetros. En la parte superior se seleccionan las características requeridas y en la parte inferior aparecen los componentes o integrados que cumplen con esa condición.

El Amplificador max2235 es el que mejor se adapta a las necesidades del desarrollo[6].

- Tiene una potencia de salida de 30 dBm a 3,6 v de alimentación, con una eficiencia del 47%, y puede llegar hasta los 32.5 dBm a 5V.
- Admite varios servicios de transmisión AMPS, AMR, GSM, ISM; este último compatible con los del módulo generador de RF.
- Permite el control de la potencia de salida, haciéndolo apto para los dispositivos de comunicación en donde la potencia consumida o la temperatura que alcanza el componente es crítica.
- Permite el modo apagado para reducir el consumo

<sup>8</sup> Proveedor mundial de semiconductores e integrados.

El dispositivo elegido viene en un encapsulado TSSOP/20 que lo hace muy apropiado para este proyecto por su reducido tamaño 6.50mm x 6.50mm.

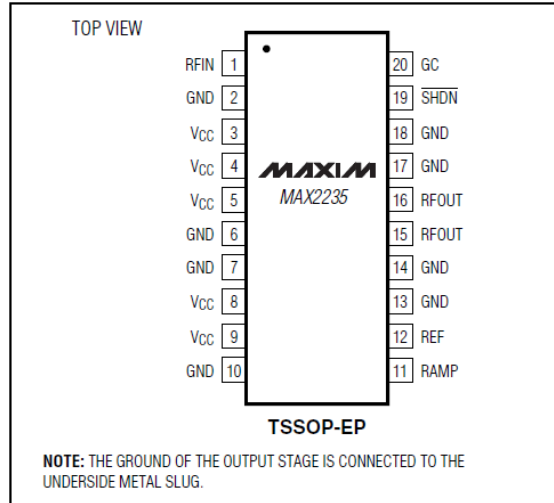


Figura 13 - Pin Out del Amplificador.

En la figura 13 vemos en diagrama de pines del MAX2235. En el diagrama se puede observar que la entrada de RF está en la pata 1 y la salida es por las patas 15 y 16, tanto la entrada como la salida de RF se encuentran adaptadas a 50 Ω.

El control de encendido y la regulación de potencia se realizan a través de los pines 19 y 20.

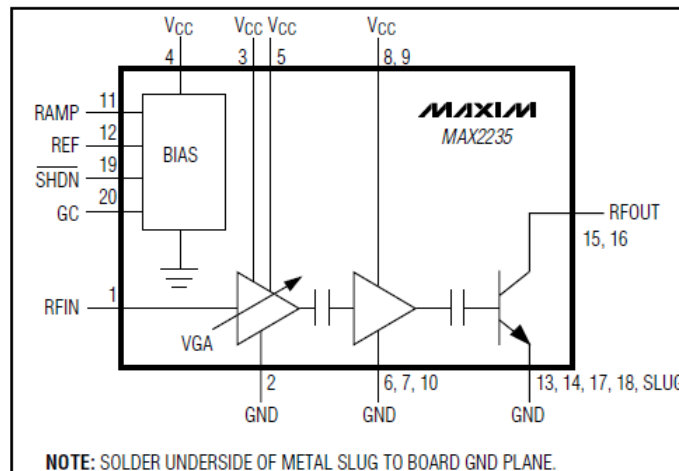


Figura 14 – Diagrama en bloques

En la figura 14 se tiene un detalle de las etapas internas del amplificador, puede verse que los pines de alimentación y tierra están separados para cada etapa, cada uno de estos pines lleva su correspondiente desacople mediante un capacitor.

En el diagrama se ve que en este integrado no es necesario adaptar las etapas amplificadoras; esto simplifica mucho el diseño de la placa ya que no es necesario diseñar e implementar redes de adaptación que requieren ajuste fino, ahorrando componentes como inductores y capacitores variables.

La salida de potencia de RF se toma del colector del transistor de potencia, se deberá colocar un choque para aislar a la fuente de la RF y un capacitor para aislar la salida de RF de la continua.

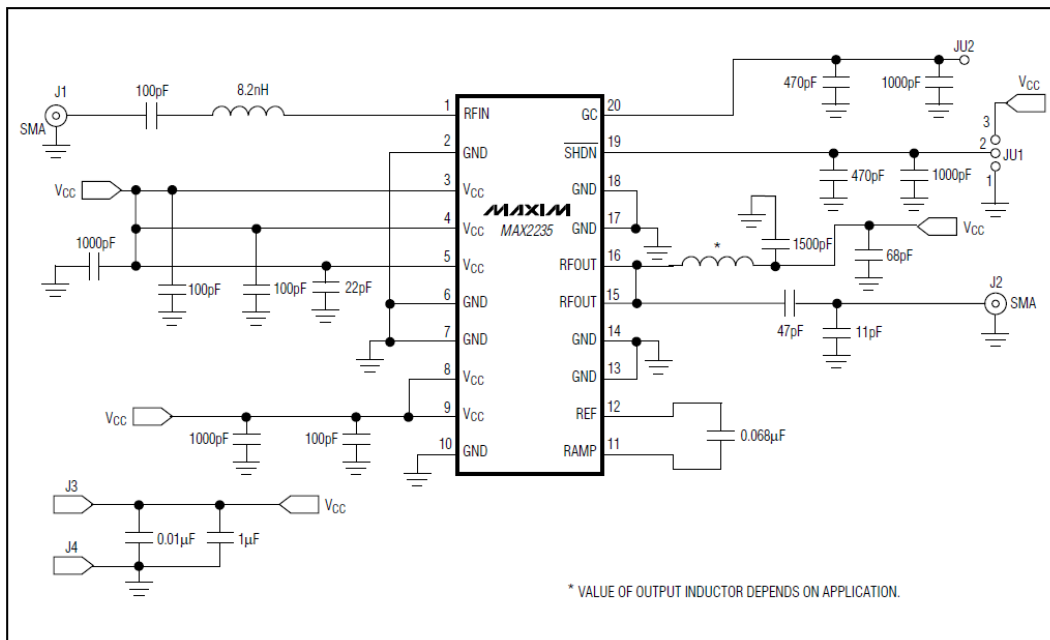


Figura 15 - Circuito de aplicación del max2235 sugerido por el fabricante.

### 3.2.4 Conversor DC/DC.

Los integrados seleccionados para implementar el sistema de telemetría funcionan con una tensión máxima de 3,6 volt o de 5 volt dependiendo del integrado. Según surge de las especificaciones del Vehículo Lanzador, la tensión que éste suministra para la alimentación de los subsistemas es de 28 volt.

Para adaptar esta diferencia de tensión con la menor pérdida de potencia se optó por implementar un conversor de tensión del tipo DC/DC en configuración back (reductor) que opere a alta frecuencia.

De los disponibles en el mercado se eligió el integrado MC34063A de Motorota que cumple con los requerimientos necesarios para implementar el conversor [7] y se consigue fácilmente en el mercado.

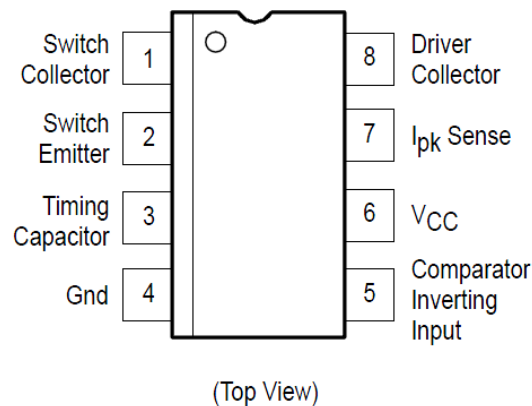


Figura 16. Diagrama de pines del integrado MC34063.

Para que el integrado funcione como conversor reductor es necesario agregarle algunos componentes pasivos tal como se detalla en su hoja de datos. Con esa configuración el fabricante garantiza una eficiencia del 83.7% que es suficiente para este proyecto.

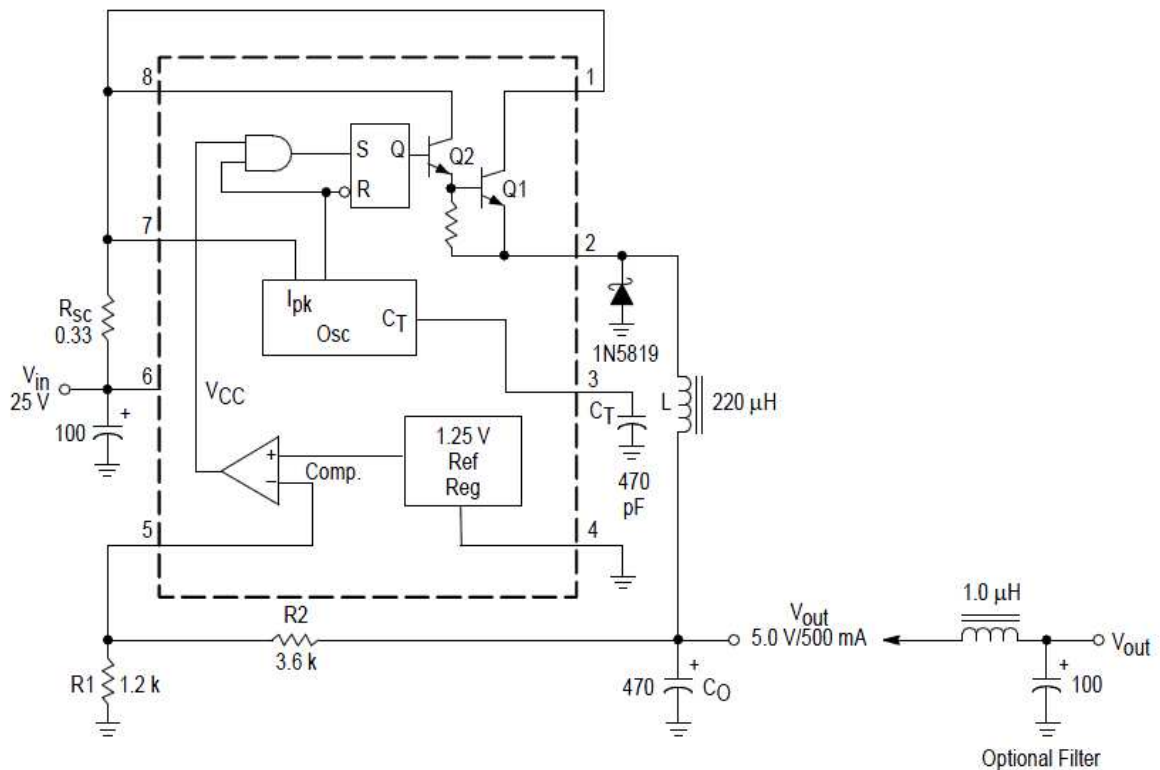


Figura 17. Diagrama esquemático en configuración back.

En la figura 17 vemos el integrado con sus componentes periféricos necesarios para implementar el convertidor reductor; en esta figura se detalla el tipo y valor de cada componente y la corriente máxima de funcionamiento para la cual se garantiza un error en la regulación de hasta 3mV.

Además en la hoja de datos se sugiere la colocación de un filtro opcional para disminuir aun más el ripple, en este proyecto dicho filtro se implementará a la entrada de cada componente con bobinas del tipo choque, evitando también que la RF se propague por las líneas de alimentación.

**Cálculo de la corriente de salida máxima que entrega el conversor.**

Para realizar el cálculo debemos analizar la corriente que circula por el inductor L, siendo la corriente media en este, la que tendremos a la salida del conversor, las variaciones de la corriente en el inductor serán absorbidas por el capacitor C<sub>0</sub>.

De la hoja de datos surge que la corriente pico máxima admitida por el pin 2 del integrado es de 1.5 Amp. Teniendo en cuenta que en este tipo de conversores la corriente en la bobina L aumenta en forma lineal hasta I<sub>pico</sub> mientras Q conduce y luego cuando Q se abre la corriente de la bobina cierra su circuito por el diodo D decayendo también en forma lineal hasta un valor cercano a 0 tendremos una corriente media máxima en modo de conducción continua de 0.75 Amp.

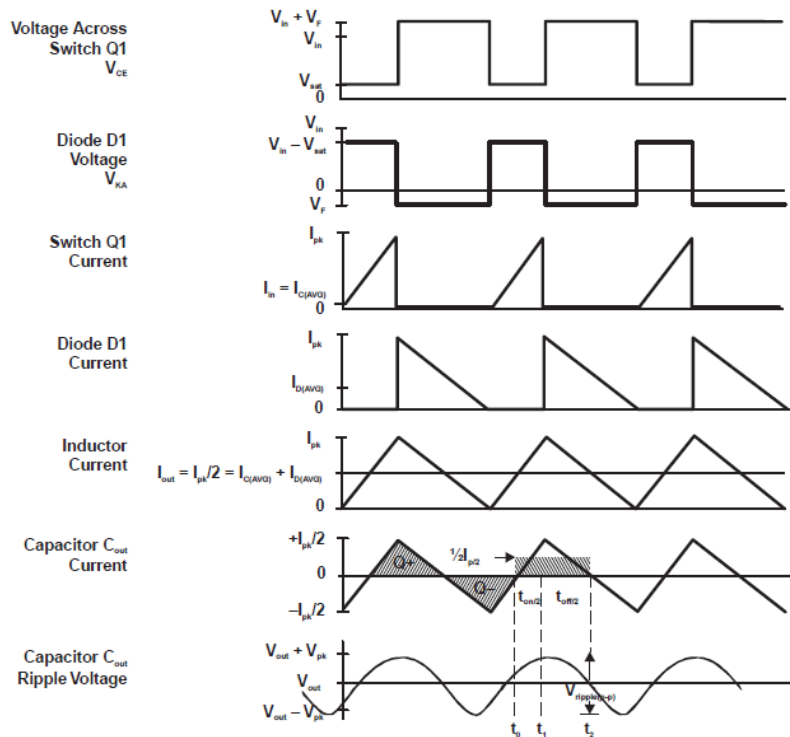


Figura 18 - Grafica de Tensión y Corriente en función del tiempo

En la figura 18 se puede observar que la corriente media de salida en el inductor es la mitad que la corriente de pico que circula por el transistor o llave Q1.

Analizando de la hoja de datos las tensiones con las que operan cada uno de los integrados podemos ver que el generador de RF admite una tensión de alimentación máxima de 3,6 volt; el módulo de potencia puede operar con 3,6 volt o con 5 volt, obteniendo con este último valor la máxima potencia de transmisión. El PIC puede funcionar con cualquiera de los dos valores quedando a nuestro criterio elegir el valor con el que operará.

Luego de un análisis se concluyó que lo más conveniente era optar por mantener la comunicación SPI entre el PIC y el módulo de RF sin adaptadores de tensión ya que el flujo de información es hacia ambos lados; en cambio los puertos USART son solo entradas y con un simple divisor resistivo podemos adaptar los 5 volt del módulo contiguo en los 3,6 volt necesarios en los pines del PIC. De este análisis surge que el PIC deberá funcionar en 3,6 volt, que es la misma tensión a la que debe operar el módulo de RF.

### 3.3 Cálculo del enlace de Radiofrecuencia

El cálculo del enlace se realizará suponiendo que la señal va a ser recibida en la estación terrena con el mismo modelo de transceptor utilizado para transmitir. El fabricante del transceptor proporciona en la hoja de datos la sensibilidad esperable de dicho integrado según las condiciones en las que se encuentre y el tipo de transmisión elegida[5].

Para el cálculo del enlace, si se cumple con la potencia de señal mínima requerida a la entrada del receptor, no será necesario caracterizar al mismo ni evaluar la relación Señal a Ruido.

	Supply Voltage VDD = 1.8 V			Supply Voltage VDD = 3.0 V			Supply Voltage VDD = 3.6 V		
Temperature [°C]	-40	25	85	-40	25	85	-40	25	85
Sensitivity [dBm] 1.2 kBaud	-113	-112	-110	-113	-112	-110	-113	-112	-110
Sensitivity [dBm] 38.4 kBaud	-105	-104	-102	-104	-104	-102	-105	-104	-102
Sensitivity [dBm] 250 kBaud	-97	-94	-92	-97	-95	-92	-97	-95	-92
Sensitivity [dBm] 500 kBaud	-91	-89	-86	-91	-90	-86	-91	-89	-86

**Table 9: Typical Sensitivity over Temperature and Supply Voltage, 915 MHz, Sensitivity Optimized Setting**

Figura 19 – Tabla de sensibilidad del receptor.

La figura 19 es la tabla proporcionada por el fabricante en la hoja de datos, detalla la sensibilidad del CC1101 en función de la tasa de transmisión de datos elegida, la temperatura y la tensión de alimentación.

Para obtener la potencia de la señal a la entrada del receptor se realizará el siguiente análisis:

Un sistema que irradia potencia con un radiador isotrópico genera una densidad de potencia a una distancia  $d$  que está descrita por la siguiente fórmula [8]:

$$S_d = P_t / (4 \pi d^2) \text{ [W/m}^2\text{]}$$

En donde  $P_t$  es la potencia promedio irradiada por el sistema.

En este caso se tendrá una antena con ganancia  $G_t$ , conectada al transmisor mediante una línea de transmisión con pérdida  $L_t$ , puede establecerse que la densidad de potencia a una distancia  $d$  estará dada por:

$$S_d = P_t L_t G_t / (4 \pi d^2) \text{ [W/m}^2\text{]}$$

El campo eléctrico transmitido está caracterizado por la potencia radiada efectiva isotrópica *PIRE*, definida por:

$$\text{PIRE} = P_t L_t G_t \text{ [W]}$$

Teniendo en cuenta que la transmisión se realiza durante el vuelo del cohete, se considera que la antena óptima para este caso son las del tipo Blade<sup>9</sup>.

Como se mencionó anteriormente el sistema de telemetría se colocará en la cofia del vehículo lanzador pero no será expulsado fuera de él al finalizar su trayectoria.

Considerando que este tipo de antenas tienen una ganancia típica de 5 dBi, las pérdidas en el cable son de 1 dBi y que la etapa de potencia entrega una potencia máxima de 32.5 dBm se obtiene el siguiente PIRE:

$$\text{PIRE} = P_t L_t G_t = 1,78 \times 0,8 \times 3,16 = 4,5 \text{ [W]}$$

$$\begin{aligned} \text{PIRE [dB]} &= P_t \text{ [dBm]} + L_t \text{ [dBi]} + G_t \text{ [dBi]} = 32.5 - 1 + 5 \\ \text{PIRE} &= 36.5 \text{ [dBm]}. \end{aligned}$$

En la estación terrena esa potencia es captada por una antena de área de apertura  $A$  y con una eficiencia  $\eta$ . Considerando que el producto del área

---

<sup>9</sup> Antena de bajo perfil para plataformas aeronáuticas

real  $A$  por la eficiencia corresponde al área efectiva de captura  $A_{ef}$  y que la misma para una antena isotrópica es:

$$A_{ef} = \lambda^2 / 4 \pi \text{ [m}^2\text{]}$$

La potencia recibida será:

$$P_r = \text{PIRE} \times A_{ef} / (4 \pi d^2) \text{ [W]}$$

La transferencia de potencia entre la antena transmisora y la receptora es:

$$P_r / \text{PIRE} = (\lambda / 4 \pi d)^2 = 1 / P_{el}$$

El valor  $P_{el} = (4 \pi d / \lambda)^2$  es denominado Pérdida de Transmisión en el Espacio Libre de una onda de programación directa. Dicha pérdida es función de la distancia entre el sistema transmisor y la estación receptora.

Para el cálculo vamos a tomar una distancia  $d = 200\text{Km}$  como distancia máxima o esperable que se mantenga el enlace.

$$P_{el} = (4 \pi 200.000 / 0.3267)^2$$

$$P_{el} = 137,8 \text{ dB}$$

Si se considera que la antena receptora tiene una ganancia  $G_r$  con respecto al radiador isotrópico, la potencia recibida será:

$$P_r = \text{PIRE} \times G_r / (4 \pi d / \lambda)^2 = \text{PIRE} \times G_r / P_{el}$$

Si para el cálculo del enlace se considera una típica antena Yagi con una ganancia  $G_r = 8 \text{ dBi}$ , obtendremos de esta forma una potencia recibida por el receptor igual a:

$$P_r = 36.5 \text{ dBm} + 8 \text{ dBi} - 137,8 \text{ dB} = -93 \text{ dBm}$$

En un principio y contrastando este resultado Tabla de Figura 18, podría pensarse que el enlace se realizará sin problemas hasta una tasa de transferencia de 250 kbaud/seg.

### 3.3.1 Margen de Desvanecimiento (MF)

Un variable muy importante a tener en cuenta al diseñar un radio enlace son las pérdidas adicionales debidas a diferentes factores; estos están fundamentalmente relacionados con la propagación de ondas electromagnéticas a través de la atmósfera.

Entre estos factores se pueden mencionar: absorción de energía por los gases de la atmósfera, atenuación por reflexiones en el terreno, desvanecimiento por múltiples trayectorias y dispersión de energía debido a precipitaciones. Estos factores actúan produciendo pérdidas variables que se comportan en forma aleatoria, produciendo que una señal que se mantuvo con un nivel durante un cierto tiempo caiga en forma abrupta y luego regrese al mismo valor. Este fenómeno se denomina desvanecimiento (fading).

Para tener esto en cuenta y no perder información cuando ocurra el desvanecimiento se debe sumar en la ecuación del enlace un cierto Margen por Desvanecimiento. En este radioenlace se considera un MF = 10 dB.

**868/915 MHz**

1.2 kBaud data rate, sensitivity optimized, MDMCFG2.DEM_DCFILT_OFF=0 (GFSK, 1% packet error rate, 20 bytes packet length, 5.2 kHz deviation, 58 kHz digital channel filter bandwidth)					
Receiver sensitivity		-112		dBm	Sensitivity can be traded for current consumption by setting MDMCFG2.DEM_DCFILT_OFF=1. The typical current consumption is then reduced from 17.7 mA to 15.7 mA at sensitivity limit. The sensitivity is typically reduced to -109 dBm
Saturation		-14		dBm	FIFOTHR.CLOSE_IN_RX=0. See more in DN010 [8]
Adjacent channel rejection ±100 kHz offset		37		dB	Desired channel 3 dB above the sensitivity limit. 100 kHz channel spacing See Figure 4 for selectivity performance at other offset frequencies
Image channel rejection		31		dB	IF frequency 152 kHz Desired channel 3 dB above the sensitivity limit

Figura 20 - Sensibilidad del receptor.

En la figura 20 el fabricante detalla la potencia mínima de señal con modulación GFSK para obtener un error del 1% de los paquetes enviados. También se detalla la potencia de saturación que deberá ser tomada en cuenta al momento del despegue del vehículo ya que la distancia será mínima.

### 3.3.2 Sensibilidad Vs. Tasa de Datos

En la figura 19 se observa que la potencia de señal necesaria a la entrada del receptor varía entre otras cosas con la tasa de datos elegida.

Esto ocurre porque para el análisis del enlace no es suficiente tener en cuenta solo la atenuación del espacio libre, sino que es fundamental el cálculo de la relación señal a ruido (CNR) registrada en el receptor. Este es el dato de importancia que permite evaluar la calidad del enlace. La relación portadora a ruido está dada por la relación entre la potencia de la señal recibida en los terminales de la antena con la potencia de ruido del sistema referenciado al mismo punto que en el sistema receptor. Dicha relación está dada por:

$$C / N_0 = ( \text{PIRE} \times G_r / P_{el} ) / (k \times T_{sys})$$

Donde  $C$  es la potencia de la portadora en el receptor;  $N_0$  es la densidad espectral de potencia de ruido blanco aditivo en el mismo punto,  $T_{sys}$  es la temperatura equivalente de ruido del sistema,  $k$  es la constante de Boltzmann ( $1,38 \times 10^{-23}$  J/K).

Para tener en cuenta la potencia de ruido total del canal es necesario considerar el cálculo del Ancho de Banda Equivalente de Ruido ( $B_N$ ). La potencia de ruido del sistema esta dada por la siguiente formula [8]:

$$N = N_0 \times B_N = k \times T_{sys} \times B_N \text{ [W]}$$

La relación portadora a ruido queda:

$$C / N = ( \text{PIRE} \times G_r ) / (k \times T_{sys} \times B_n \times P_{el})$$

El ancho de banda de la señal está en función de la tasa de datos seleccionada, el integrado elegido puede modificar digitalmente el filtro de frecuencia intermedia y con esto se varía la potencia de ruido que ingresa al detector de señal.

Por lo tanto a mayor tasa de datos, mayor será el ancho de la señal, mayor deberá ser el ancho del filtro de frecuencia intermedia produciendo esto un mayor ingreso de potencia de ruido. Para mantener la relación señal a ruido constante se deberá aumentar la potencia de la señal recibida, con lo cual disminuye la sensibilidad.

A continuación se observa un gráfico que muestra la potencia de la señal recibida en el receptor en función de la altura (distancia) a la que se encuentra en transmisor, considerando además el MF.

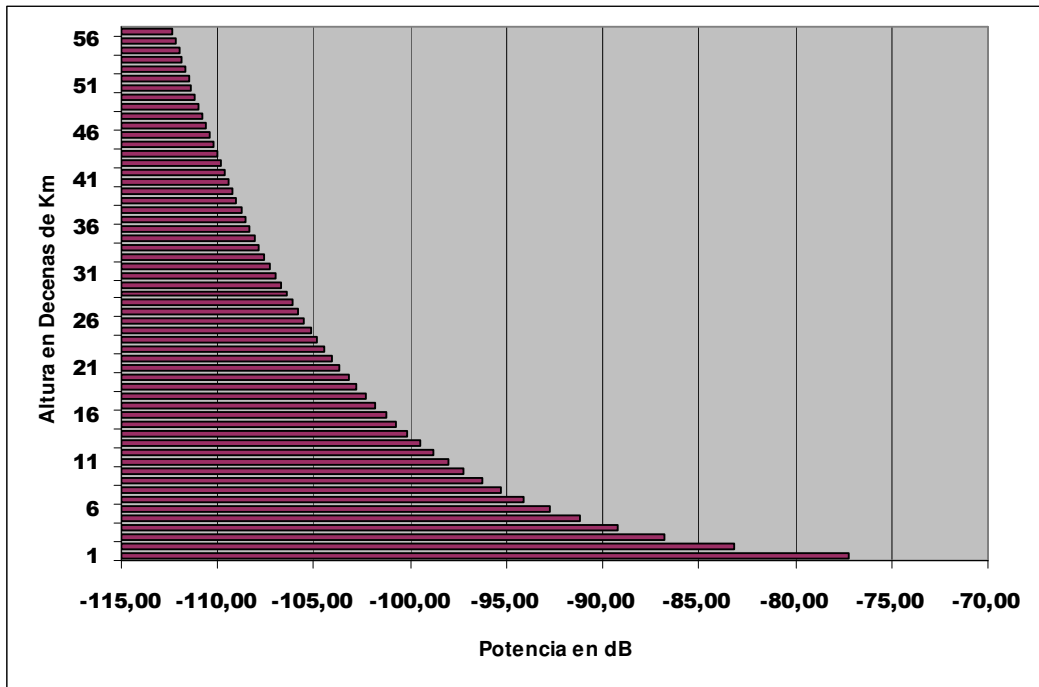


Figura 21 – Potencia de señal recibida en función de la distancia.

Teniendo la gráfica de la potencia recibida (la escala de distancia es medida en 1= 10 km) se puede ajustar la máxima velocidad de transferencia de datos posible según la distancia sin perder calidad de información.

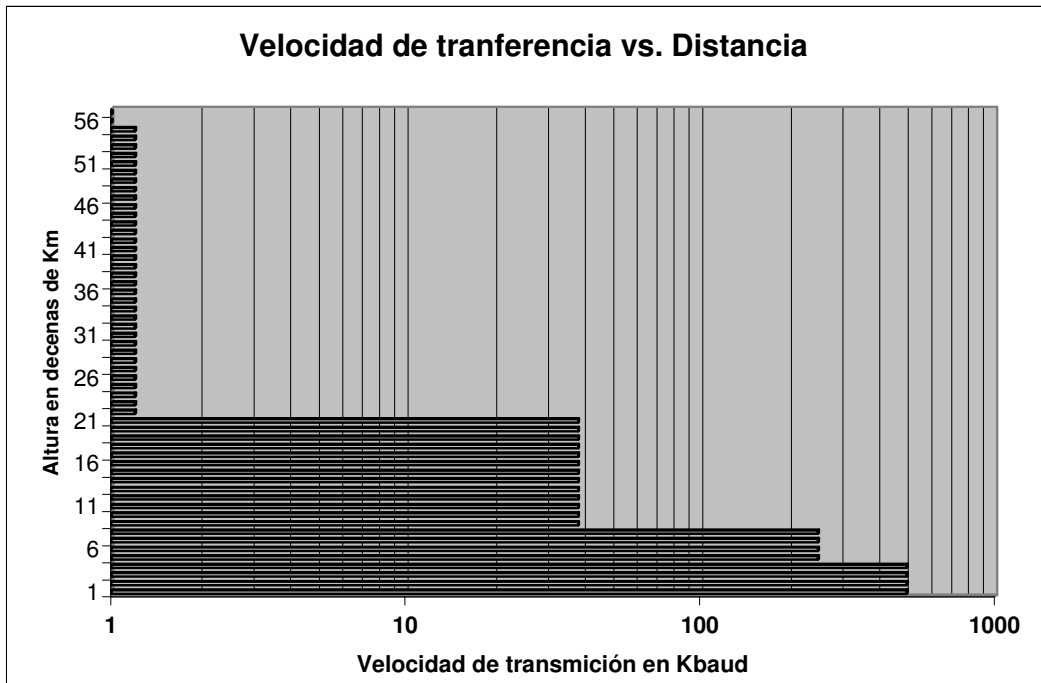


Figura 22 – Velocidades máximas de transferencia de datos.

En la figura de arriba se ve una curva en escala logarítmica con la máxima velocidad de transferencia admisible por el sistema teniendo en cuenta las pérdidas por fading. Este cuadro se obtiene cruzando la información suministrada por el fabricante en la tabla de la figura 19 con la curva de potencia recibida, figura 21.

### 3.4 Circuito Impreso.

Con los componentes seleccionados y teniendo verificado el cálculo del enlace estamos en condiciones de armar un diagrama completo de lo que será el Sistema de Telemetría (figura 23).

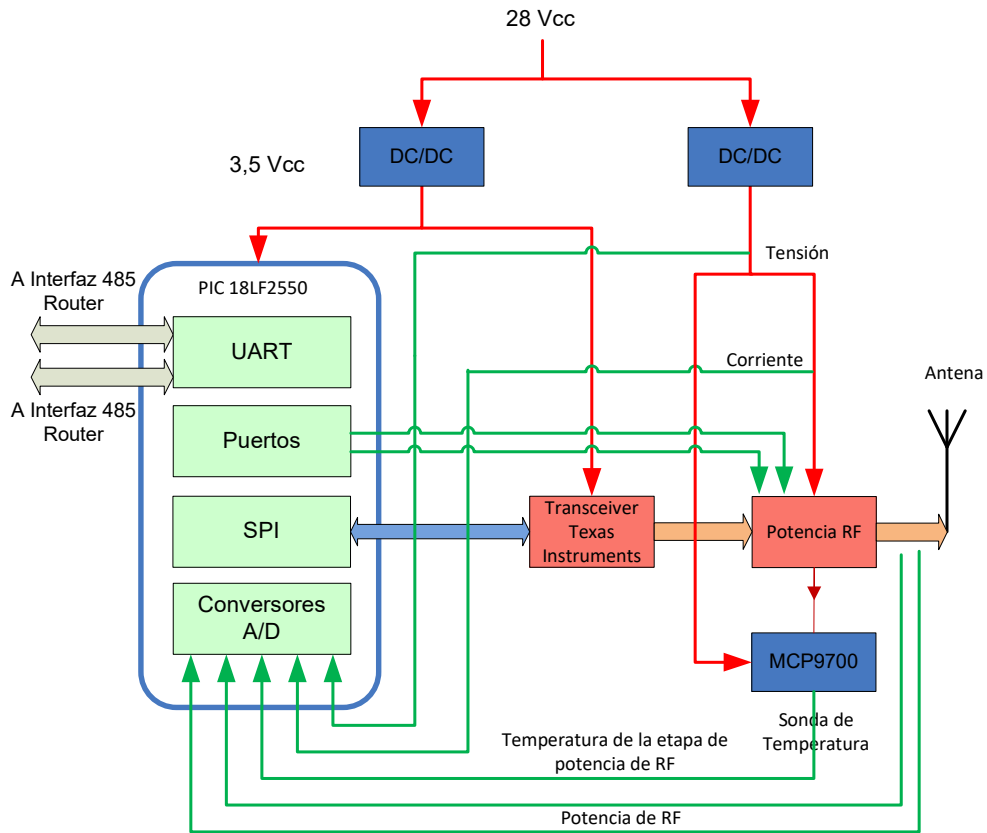


Figura 23 – Diagrama completo del Sistema de Telemetría

Como se observa en el diagrama, el PIC permite implementar y controlar el ingreso y egreso de información, además el PIC realizará el análisis y adecuación de los datos a transmitir. También permite la toma de decisiones en función de la información recopilada, pudiendo modificar los parámetros de los integrados de RF y del amplificador de potencia.

Los datos externos que provienen del módulo contiguo ingresarán a través de la USART implementada por software y los que provienen del router del vehículo lanzador ingresarán por medio de la USART por hardware del PIC.

Los datos internos de la placa ingresan al conversor Analógico/Digital por medio de 5 pines, estos datos serán: Tensión, Corriente, Temperatura, Potencia Incidente y Potencia Reflejada.

- La Tensión sensada indica la tensión entregada por el DC/DC
- La Corriente sensada será la consumida por las etapas de Radiofrecuencias.
- La Temperatura será a la que se encuentre la etapa de potencia y será tomada por el un sensor dispuesto muy próximo a la etapa de potencia. Con esta medida se pretende analizar el estado de dicha etapa y reducir la potencia de transmisión si fuera crítica su temperatura.
- Potencia incidente, tomada mediante un acoplador inductivo situado en la línea de transmisión que alimenta a la antena.
- Potencia reflejada, tomada con otro acoplador inductivo pero en sentido inverso al anterior.

El PIC puede, en función de la temperatura sensada o de algún otro parámetro, modificar la potencia de transmisión a través de dos pines dedicados a tal efecto y una red resistiva que permitirá setear hasta 7 niveles de potencia de salida. Por medio de otro puerto se puede anular totalmente la potencia irradiada reduciendo la corriente consumida al mínimo.

Analizando la baja corriente que pueden llegar a consumir los dos componentes que funcionarán a 3,6 volt, se concluyó que no era conveniente colocar dos conversores DC/DC, uno a 5 volt y otro a 3,6 volt. La alimentación puede resolverse con un solo conversor DC/DC que baje la tensión de 28 a 5 volt y luego colocar un reductor pasivo que nuevamente baje la tensión para estos componentes a 3,6 volt.

### **3.4.1 Condiciones del circuito.**

Las condiciones a tener en cuenta en la elección del sustrato:

- Debe soportar las condiciones de vuelo espacial: esfuerzos mecánicos, amplitud térmica, vacío al que será sometido, etc.
- Pérdidas despreciables para RF a 915MHz.
- Buena conducción térmica, ya que la placa será el único medio para extraer el calor de los componentes de potencia.
- Las dimensiones de la placa no deben superar los 150 x 70 mm, debe colocarse dentro del módulo de aluminio.

Condiciones a tener en cuenta en el diseño del circuito impreso [4][5][6]:

- Separación física entre la parte de RF con la parte Digital.
- Plano de tierra uniforme tanto en la zona de RF como en la zona digital.
- La evacuación de calor de los componentes se realizará a través de sus pines de conexión; los integrados de potencia evacuan el calor también mediante pads térmicos con vías colocadas debajo de lo mismos. Las vías conducirán el calor al plano de tierra para su dispersión hacia la carcasa del módulo.
- Los componentes discretos de la etapa de RF deben ser de tamaño muy reducido para no producir Inductancias no deseadas (especificación del fabricante tanto Texas como Maxim).
- Las pistas de la etapa de RF deben ser cortas comparadas con la longitud de onda de trabajo, en su defecto deben estar adaptadas.

Teniendo en cuenta las condiciones planteadas anteriormente se eligió un sustrato de FR-4 para desarrollar el circuito impreso, este sustrato tiene buena amplitud térmica y bajas pérdidas a frecuencias cercanas al Ghz.

El diseño del circuito impreso se realizó con el software ARES (ver capítulo 4.2.3) de la siguiente manera:

- Se comenzó importando desde el diseño de la caja exterior (realizada en Autocad) para tener las dimensiones máximas del sustrato; a su vez permite tener bien definidos los sitios de sujeción de la plaqueta y poder tomarlos como puntos de evacuación del calor. Los componentes de mayor potencia fueron colocados cerca de estos puntos para maximizar la transferencia de calor del Circuito Impreso a la caja del módulo.
- Se importó desde el soft ISIS (ver capítulo 4.2.2) los Footprint con sus respectivas conexiones; se fueron ubicando los componentes principales y que producen más calor cerca de los sitios de sujeción, luego se fueron colocando los componentes pasivos.
- El rutéo de cada conexión se diseñó en forma manual teniendo en cuenta las disposiciones planteadas por cada fabricante, en el caso de trabajar con RF es fundamental respetar cada pista y cada distancia. La Línea de transmisión hacia el conector SMA de RF se diseñó de mayor longitud porque debían colocarse dos acopladores direccionales para medir potencia incidente y potencia reflejada. Esta línea fue diseñada de modo que esté adaptada a  $50\Omega$  (para minimizar las reflexiones indeseadas), para esto se generó de un ancho de 3mm [8].
- El diseño del acoplador direccional se realizó también sobre una pistas de 3mm de ancho y lo más cerca posible (limitación establecida por el fabricante de CI) de la línea de transmisión, ya que es fundamental que estas también sean líneas adaptadas.
- Se colocaron los planos de tierra (superior e inferior). En el plano de tierra interior se implementó una división física entre las masas analógicas de las digitales

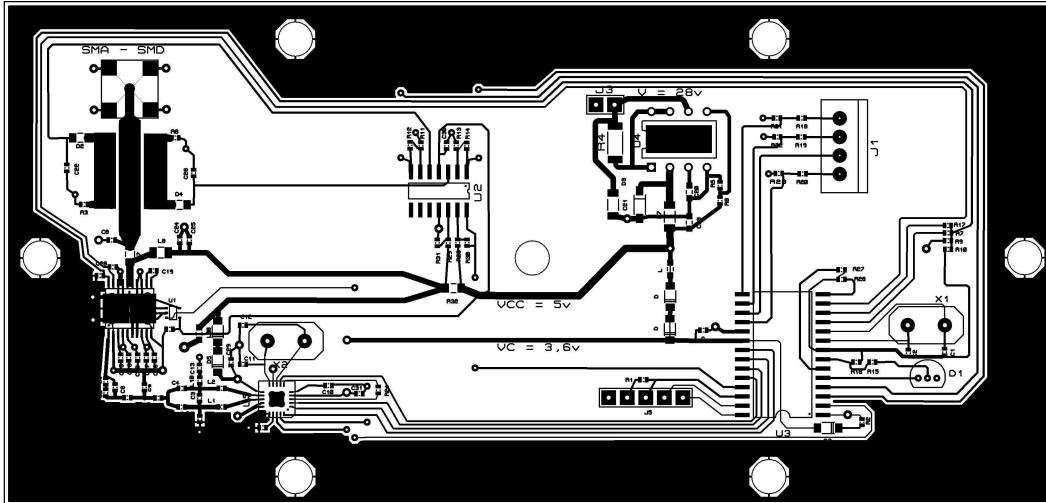


Figura 24 – Diseño por software del circuito impreso.

La figura 24 es la vista del diseño de la placa que se envió a confeccionar. Se observa en el borde superior izquierdo la línea adaptada y los dos acopladores direccionales.

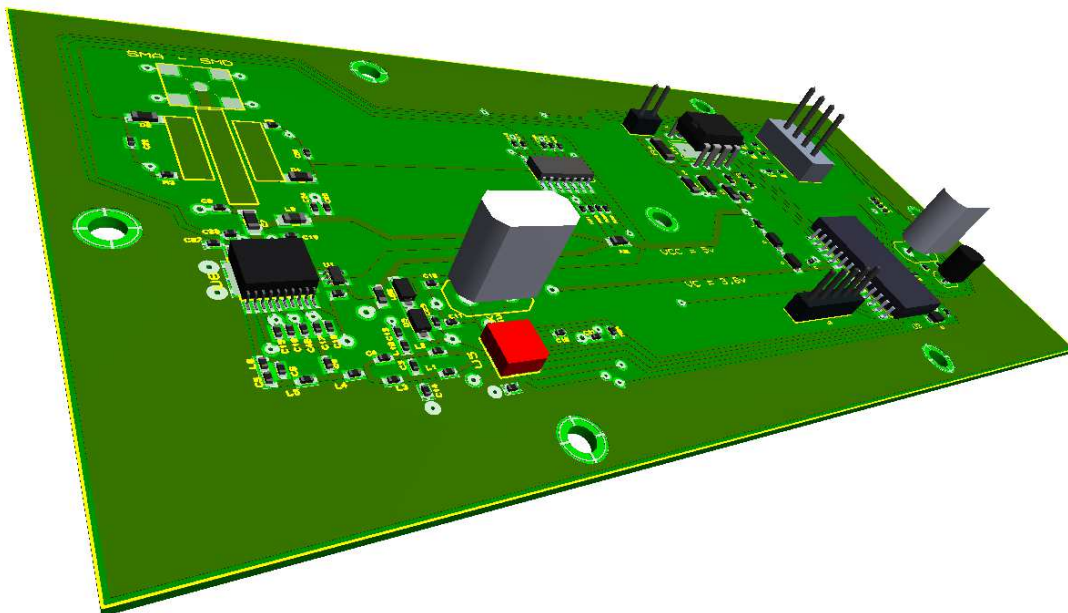


Figura 25 a – Vista 3D del diseño del circuito (top).

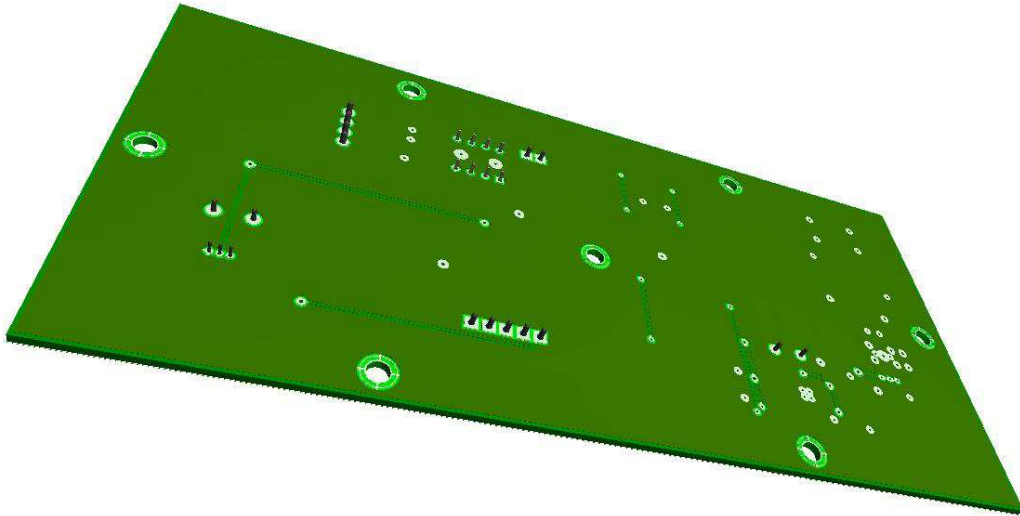


Figura 25 b – Vista 3D del circuito (bottom)

La figura 25 a es la vista en 3D obtenida con el software de diseño, puede observarse como quedará el producto terminado con todos los componentes soldados. En este caso el conector SMA no fue incluido, en el borde superior izquierdo se encuentra el lugar (footprint) donde irá soldado.

Una vez concluido el diseño por software se generaron los archivos Gerber; con estos archivos se pidió presupuesto a distintas empresas, luego se envió a confeccionar las placas a una de las empresas.

## **4 Desarrollo**

### **4.1 Software: Planteo de Condiciones.**

Para desarrollar el software se tuvo en cuenta cuáles eran las necesidades y objetivos del sistema.

A saber:

- Leer los datos de los sensores ubicados en el circuito impreso a través el módulo conversor Analógico/Digital.
- Tomar datos del sistema contiguo, este los enviará mediante el protocolo USART a través de dos pines; uno de datos y otro como bandera que indica que los datos serán enviados.
- Tomar los datos de telemetría desde el router del vehículo lanzador, este los enviará a través del protocolo RS422 junto con otros datos. Habrá que filtrarlos según su encabezado y desechar la información no deseada.
- Armar un paquete de datos con la información recopilada y trasmitirlo al módulo de radiofrecuencia. El paquete de datos se enviará a través de un bus de 4 pines con protocolo SPI.
- Al inicio o puesta en marcha, se debe programar el módulo de radiofrecuencia mediante el protocolo SPI colocando en alto el cuarto pin.
- En función de la temperatura sensada en la plaqueta y del estado de la carga de batería, se debe regular el módulo de Potencia a través de dos pines del PIC dedicados a tal función.

El software se fue desarrollando en módulos independientes de modo de ir probando su funcionamiento antes de ser ensamblado en el programa definitivo; de esta forma es más sencillo encontrar los errores y poder depurarlos sin necesidad de verificar todo el programa para corregir un error.

Las tareas y módulos que se generaron y se probaron en forma independiente son:

- Se desarrolló un módulo que pueda manejar la comunicación con el router del vehículo lanzador utilizando un protocolo USART implementado por el hardware del PIC y haciendo uso de interrupciones. Además en este módulo se activó el conversor Analógico/Digital para discretizar la información emitida por los sensores dispuestos en la placa y de este modo poder transmitir dicha información a la estación terrena.
- Para la comunicación con el módulo contiguo también se desarrolló un programa que contenga un protocolo USART pero implementado por software ya que el PIC elegido no dispone de múltiples USART.
- La comunicación con el integrado generador de RF se implementó mediante un bus SPI, este integrado de RF cuenta con una interfaz SPI en modo esclavo que permite comunicarse con él y transferirle los paquetes de información. El protocolo SPI del PIC no se puede implementar por hardware ya que se superpone en la asignación de pines del PIC con los de la USART, para este caso se implementa dicho protocolo por software pudiendo elegir que pines se asignaran a dicho bus.

## **4.2 Herramientas y simuladores que permitan desarrollar el sistema.**

### **4.2.1 Compilador o Herramienta de Desarrollo**

Como Herramientas de desarrollo se usa el PMLAB IDE (Entorno de Desarrollo Integrado), es un editor que permite realizar el desarrollo de las aplicaciones de los diseños embebidos con microcontroladores PIC de Microchip.



#### **4.2.1.1 Concepto de sistemas embebidos**

Un sistema embebido es típicamente un diseño que hace uso de la fuerza de un pequeño microcontrolador, como el MCU PIC de Microchip o dsPIC "Digital Signal Controller"(DSC). Estos microcontroladores combinan un microprocesador (como la CPU de una PC de escritorio) con algunos circuitos adicionales llamados "periféricos", además incluye circuitos adicionales en el mismo chip para hacer un pequeño módulo de control que requieren algunos dispositivos externos. Este dispositivo puede ser integrado en otros dispositivos electrónicos y mecánicos de bajo costo de control digital.

Un controlador embebido tiene un solo programa y, como resultado, se puede hacer a bajo precio e incluir poder de cómputo suficiente y el hardware para realizar esa tarea específica.

Un entorno de desarrollo de controladores embebidos es un sistema de programas que se ejecutan en una PC de escritorio para ayudar a escribir, editar, depurar el código del programa (la inteligencia de las aplicaciones de sistemas embebidos) en un microcontrolador.

MPLAB IDE se ejecuta en una PC y contiene todos los componentes necesarios para diseñar y desplegar aplicaciones de sistemas incorporados, por ejemplo permite compilar un programa escrito en un lenguaje de alto nivel como ser el Lenguaje C y convertirlo un archivo \*.hex (0's y 1's) que es el código máquina para grabar en el Pic. Este software es ofrecido directamente por Microchip desde su página en forma libre, permite también grabar el Pic mediante un puerto USB de la PC.

A continuación se adjunta captura de pantalla del entorno de desarrollo.

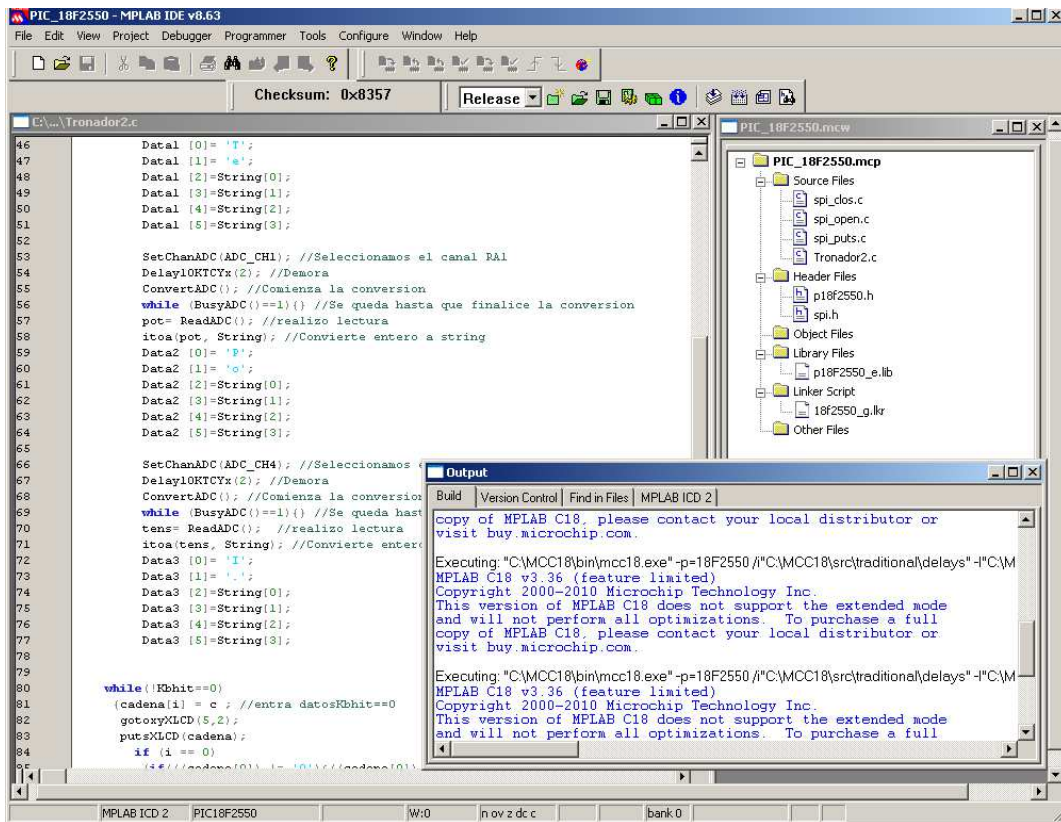


Figura 26 – Captura de la pantalla del entorno de desarrollo.

Observando la captura de pantalla se reconoce que el programa se escribe en lenguaje C (derecha) y que se compila junto con otros archivos que ya proporciona el software y que contiene los registros de PIC, además se pueden usar otras subrutinas que ayudan a la programación (derecha superior), en la ventana inferior se puede ver la generación del archivo .hex al compilar todos los archivos adjuntos.

El archivo .hex es en formato hexadecimal, es el formato de archivo con el que se programa el pic.

## 4.2.2 Simulador

Como simulador para probar el funcionamiento de PIC se utilizó el Programa ISIS (Intelligent Schematic Input System) de Proteus 7.

Este programa permite la realización de un modelo virtual de lo que será el circuito real. Posibilita la interconexión de todos los componentes ya que cuenta con una completa librería de componentes discretos y de circuitos integrados. Admite una simulación en tiempo real mediante el ingreso del archivo \*.hex obtenido anteriormente con el MPLAB en el esquemático del PIC y de esta forma correr el mismo programa que se diseñó para el PIC.

Con este simulador se puede analizar como interacciona el PIC con sus periféricos sin necesidad de grabar el mismo ni armar el Circuito Impreso con todos los componentes y periféricos hasta tanto no se tenga la certeza de que todo funciona correctamente.

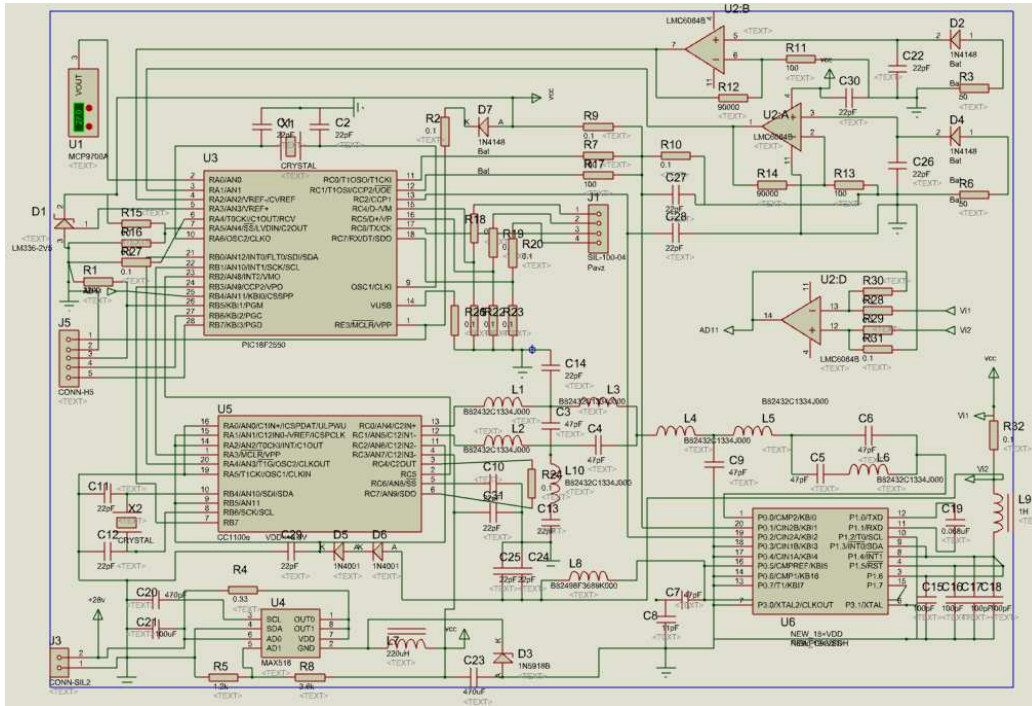


Figura 27 – Esquemático general con todos los componentes del circuito.

En la figura 27 se encuentran incluidos todos los componentes intervinientes en el circuito. Si bien este circuito no se pudo simular por no contar con la librería del módulo de RF, sirve como base para el diseño del Circuito Impreso utilizando el programa ARES (Advanced Routing y software de edición) que pertenece a la misma Suite de Diseño del Proteus que el ISIS.

### 4.2.2.1 Simulaciones desarrolladas por etapas.

La primera simulación fue la descrita en el punto 3.2.1.1. (ver esquemático en figura 5).

Las siguientes simulaciones fueron realizadas para depurar errores y comprobar el funcionamiento del protocolo SPI desarrollado por software; a tal efecto se realizó un esquemático con 2 microcontroladores comunicándose entre si (figura 28).

Otras de las simulaciones hechas sirvieron para implementar de una USART por software.

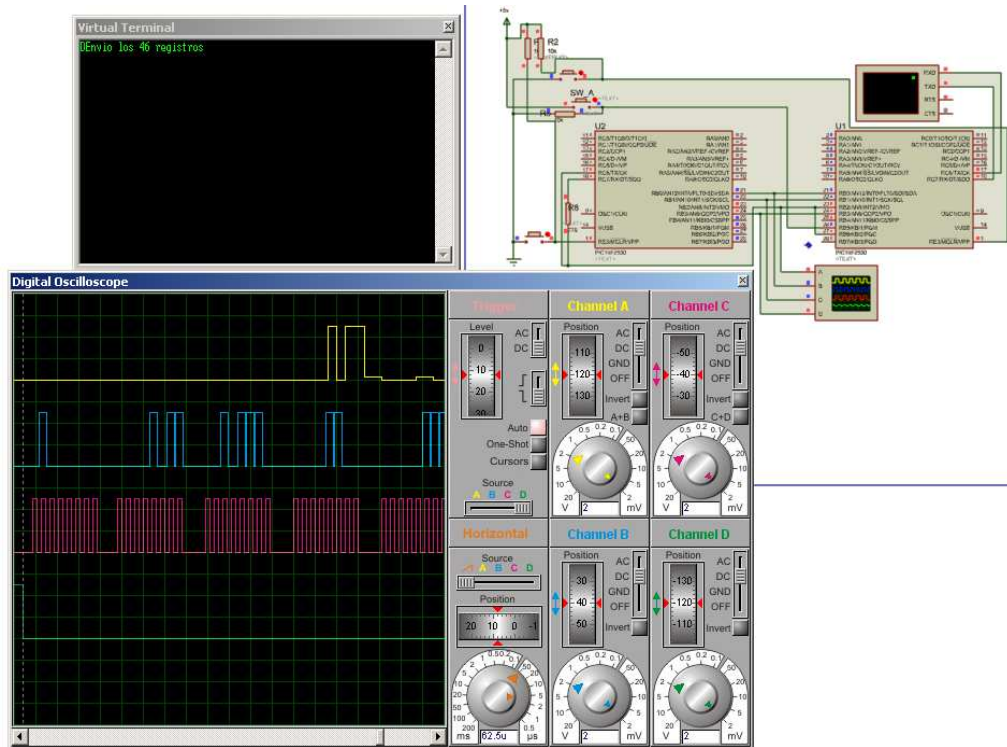


Figura 28 – Simulación y herramientas de control.

### 4.2.3 Software de Diseño y desarrollo del CI

Para el diseño del Circuito Impreso se utilizó el programa ARES (Advanced Routing y software de edición) que pertenece a la Suite de Diseño del Proteus al igual que ISIS.

Es una herramienta de enrutado, ubicación y edición de componentes, se utiliza para la fabricación de placas de circuitos impresos.

El ARES permite además importar los componentes colocados en el esquemático del ISIS con lo cual la tarea se realiza en forma conjunta permitiendo que las modificaciones en el esquemático se trasladen al diseño de la PBC.

## 4.2.4 Configuración del Módulo de RF

En la configuración el Chip de RF se está utilizando el software recomendado por el fabricante, éste en su hoja de datos indica lo siguiente:

“...El software **Smart RF Studio** es altamente recomendado para generar los registros necesarios a efecto de obtener la óptima configuración. Este software permite evaluar el rendimiento y funcionalidad de la configuración elegida...”; más adelante agrega “...Al reiniciar el chip todos los registros vuelven a su valor por defecto, por lo tanto deberá ser programado a través de la interfaz SPI cada vez que se inicie o reinicie el chip...”.

El transceiver elegido (CC1101) se configura a través de una sencilla interfaz de 4 hilos compatible SPI (SI, SO y SCLK, CSN), donde el transceiver es el esclavo. Esta interfaz es también utilizada para leer y escribir datos en el bufer.

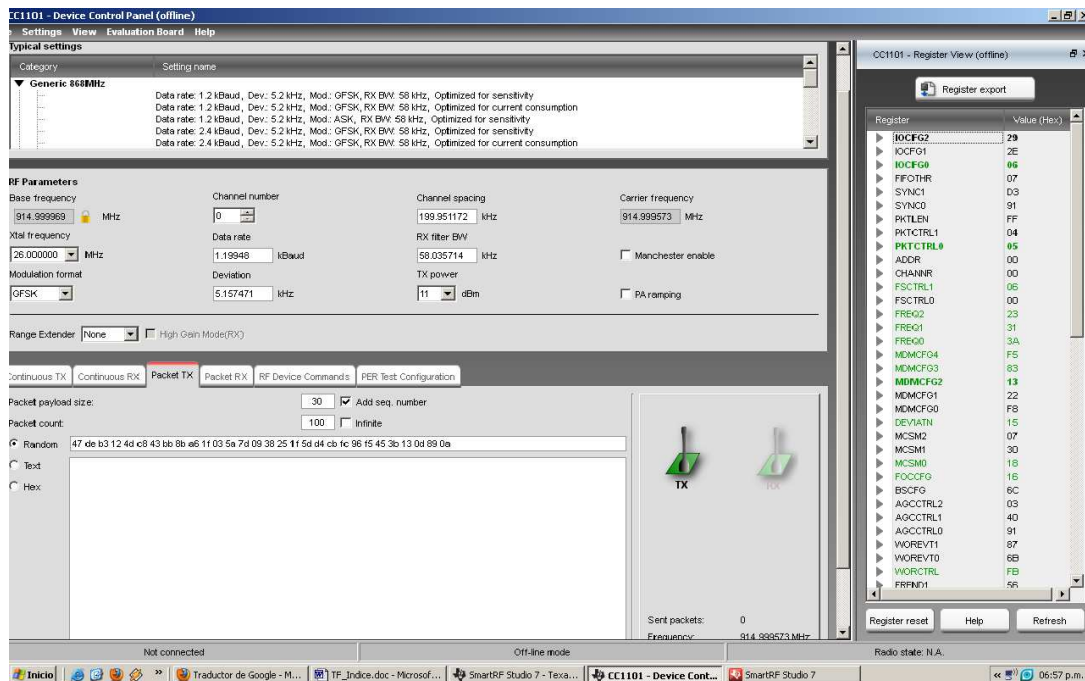


Figura 29 – Captura de pantalla del software.

La figura 29 es una captura de pantalla del Smart RF Studio, se puede ver como configurando los parámetros de modulación al centro de la pantalla, se genera en el margen derecho un listado con los registros necesarios para setear el módulo de RF. En verde se resalta los registros que se modificaron con el último cambio.

## **4. 3 Configuración de la comunicación**

### **PC / PIC - PIC / Módulo RF.**

Como se mencionó en el capítulo 4.2.3 para realizar la configuración del Módulo de RF se deben tomar los registros que genera el Smart RF Studio y se confecciona una tabla que se graba en la memoria del Pic; luego, al momento de poner en marcha el módulo se le deben pasar esta tabla por el bus SPI mediante una ráfaga de datos.

Para que el sistema de comunicación desarrollado sea versátil debe permitirse modificar la configuración deseada sin necesidad de reprogramar el PIC. Esto se puede lograr mediante una comunicación PC/ PIC a través de la USART del mismo. A tal efecto se debe conectar el sistema de telemetría a una PC, conectando el puerto serie de la PC a una de las entradas existentes para la comunicación con el módulo contiguo. El ingreso al modo configuración se logra colocando en alto uno de los pines existente en el conector ICSP, al iniciar el PIC el software chequea el estado de dicho pin y en caso de estar en alto ingresa en la subrutina “escritura de registros de configuración”.

A fin de comprender el funcionamiento interno del Módulo de RF (Máquina de Estado) se creo un software experimental que permita recorrer dicha máquina y pasar de un estado a otro mediante sentencias (comandos) escritas en el teclado de la PC (ver Anexo II).

El objetivo de este software es poder avanzar por los distintos estados de la Máquina a fin de analizar su funcionamiento. De esta forma extraer el máximo rendimiento al momento de implementar un sistema concreto donde el tipo de datos, la tasa de transferencia, el consumo de potencia y el nivel de fiabilidad, etc. estén ya estipulados.



Figura 30 - Máquina de Estado

En la figura 30 se muestran los distintos estados del Módulo de RF y su interrelación, además se ve que mediante la configuración de ciertos registros puede definirse cual será el siguiente estado luego de un evento.

Con el desarrollo de este software se pretende observar como responde el integrado de RF a los comandos (strokes) enviados desde una PC. Dicho integrado recibe las instrucciones por medio del bus SPI desde el PIC y responde por el mismo bus informando en qué estado se encuentra y además el estado de las memorias de RX o TR.

A continuación, en la figura 31 se adjunta el listado de comandos que pueden ser enviados al módulo.

Address	Strobe Name	Description
0x30	SRES	Reset chip.
0x31	SFSTXON	Enable and calibrate frequency synthesizer (if <code>MCSM0.FS_AUTOCAL=1</code> ). If in RX (with CCA): Go to a wait state where only the synthesizer is running (for quick RX / TX turnaround).
0x32	SXOFF	Turn off crystal oscillator.
0x33	SCAL	Calibrate frequency synthesizer and turn it off. <code>SCAL</code> can be strobed from IDLE mode without setting manual calibration mode ( <code>MCSM0.FS_AUTOCAL=0</code> )
0x34	SRX	Enable RX. Perform calibration first if coming from IDLE and <code>MCSM0.FS_AUTOCAL=1</code> .
0x35	STX	In IDLE state: Enable TX. Perform calibration first if <code>MCSM0.FS_AUTOCAL=1</code> . If in RX state and CCA is enabled: Only go to TX if channel is clear.
0x36	SIDLE	Exit RX / TX, turn off frequency synthesizer and exit Wake-On-Radio mode if applicable.
0x38	SWOR	Start automatic RX polling sequence (Wake-on-Radio) as described in Section 19.5 if <code>WORCTRL.RC_PD=0</code> .
0x39	SPWD	Enter power down mode when CSn goes high.
0x3A	SFRX	Flush the RX FIFO buffer. Only issue <code>SFRX</code> in IDLE or <code>RXFIFO_OVERFLOW</code> states.
0x3B	SFTX	Flush the TX FIFO buffer. Only issue <code>SFTX</code> in IDLE or <code>TXFIFO_UNDERFLOW</code> states.
0x3C	SWORRST	Reset real time clock to Event1 value.
0x3D	SNOP	No operation. May be used to get access to the chip status byte.

**Table 42: Command Strokes**

Figura 31 - Listado de comandos.

Address	Register	Description	Details on page number
0x30 (0xF0)	PARTNUM	Part number for <b>CC1101</b>	92
0x31 (0xF1)	VERSION	Current version number	92
0x32 (0xF2)	FREQEST	Frequency Offset Estimate	92
0x33 (0xF3)	LQI	Demodulator estimate for Link Quality	92
0x34 (0xF4)	RSSI	Received signal strength indication	92
0x35 (0xF5)	MARCSSTATE	Control state machine state	93
0x36 (0xF6)	WORTIME1	High byte of WOR timer	93
0x37 (0xF7)	WORTIME0	Low byte of WOR timer	93
0x38 (0xF8)	PKTSTATUS	Current GDOx status and packet status	94
0x39 (0xF9)	VCO_VC_DAC	Current setting from PLL calibration module	94
0x3A (0xFA)	TXBYTES	Underflow and number of bytes in the TX FIFO	94
0x3B (0xFB)	RXBYTES	Overflow and number of bytes in the RX FIFO	94
0x3C (0xFC)	RCCTRL1_STATUS	Last RC oscillator calibration result	94
0x3D (0xFD)	RCCTRL0_STATUS	Last RC oscillator calibration result	95

**Table 44: Status Registers Overview**

Figura 32 – Listado de estados de registros.

En la tabla de la figura 32 se ven las consultas posibles al Módulo; por ejemplo, mediante el envío de la dirección 0xF5 por el bus SPI el módulo responde en que punto de la Máquina de Estado se encuentra en ese momento (devuelve un número del 0 al 22 con el que verificamos su estado, visto en la figura 30).

## **5. Implementación.**

### **5.1 Estudio del Circuito Impreso y montaje de componentes.**

Con el circuito impreso ya confeccionado (tratado en la sección 3.4) se realizaron las pruebas de continuidad eléctrica de pistas y vías. También se realizaron pruebas para verificar la correcta disipación del calor de los pad térmicos hacia el plano de tierra. Los pad térmicos están dispuestos en el centro de los footprint de los integrados de potencia (DC/DC, generador de RF y amplificador de RF).

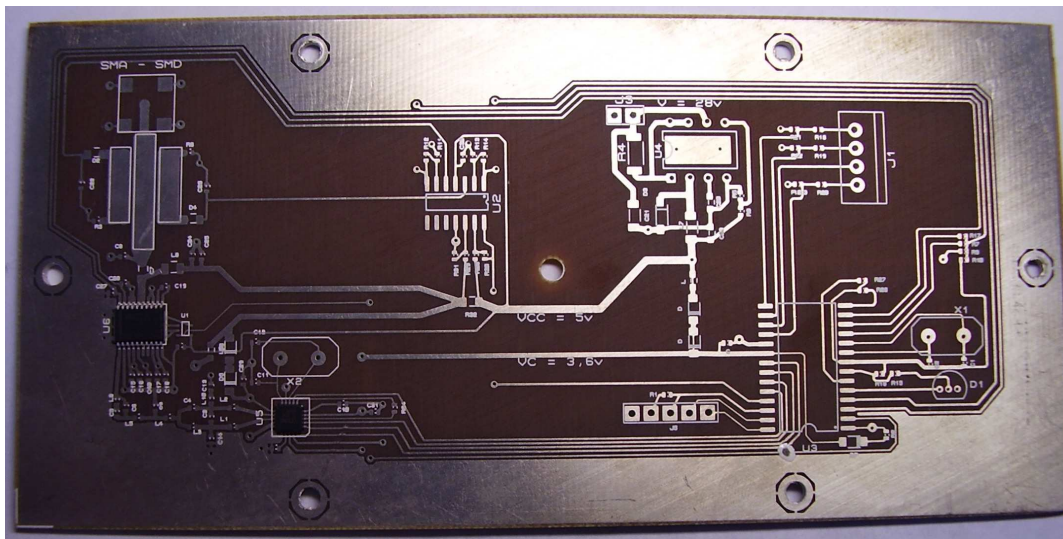


Figura 33 - Circuito Impreso

En la figura 33 se ve el circuito impreso con algunos componentes; en esta instancia, además de las pruebas de continuidad eléctrica y térmica, se verifico que los footprint tengan las dimensiones especificadas.

El montaje de algunos componentes fue realizado en un laboratorio del CIOp<sup>10</sup> ya que cuenta con una sala aséptica e instrumentos apropiados. Allí se utilizó una Máquina de Refusión por IF con perfil térmico programable. Fue necesario el uso de ese instrumento debido a que dos de los componentes del circuito tienen pad térmicos en su centro y que además uno de ellos viene con encapsulado QFN-20; este encapsulado tiene los pines hacia adentro del integrado lo que hace complejo el soldado por punta [13].

Los componentes soldados con la máquina de refusión fueron el generador de RF CC1101 y el Amplificador de RF MAX2235.

Los demás componentes fueron instalados con una estación de soldado en el Laboratorio de la Cátedra.

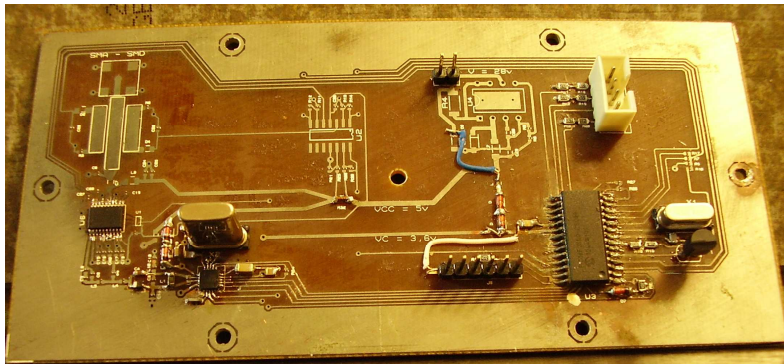


Figura 34 – Circuito con algunos componentes ya soldados.

---

<sup>10</sup> Centro de Investigaciones Ópticas; dependiente del Centro Científico Tecnológico (CONICET) y de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC).

## **6. Ensayos.**

### **6.1 Ensayos de la Comunicación PC - PIC**

Los primeros ensayos se realizaron con un circuito de pruebas confeccionado sobre una plaqueta multiperforada tal como se describió en el punto 3.2.1.1.

En ese momento se verificó el correcto funcionamiento de los siguientes puntos:

- Lectura y conversión de datos del conversor Analógico/Digital.
- Comunicación mediante el puerto USART.
- Manejo de interrupciones para dicho puerto.
- Filtrado de datos por software según su encabezado.

Luego de los ensayos se concluyó que los softwares elegidos para la programación y simulación cumplieron con los objetivos esperados, ya que en el ensayo sobre el hardware no se presentó ningún inconveniente.

### **6.2 Ensayos de la etapa de RF.**

Una de las primeras observación realizada fue asegurarse que el cristal del pic se encuentre oscilando y los en 4 MHz estipulados.

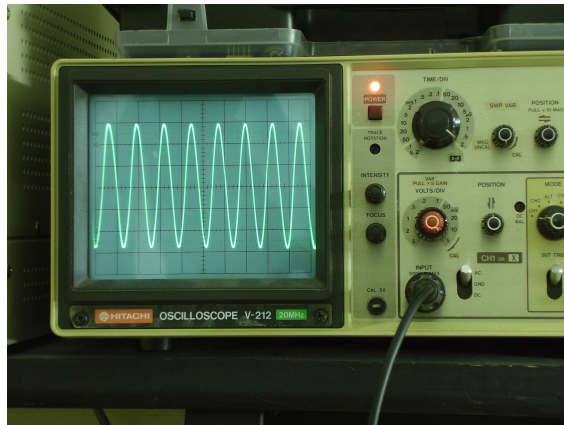


Figura 35 – Osciloscopio V – 212 20MHz de Hitachi conectado al cristal de 4 MHz.

En los ensayos siguientes se verificó el encendido del Módulo comprobando la entrada en resonancia del cristal; además se verificó que el mismo se encuentre en la frecuencia estipulada.

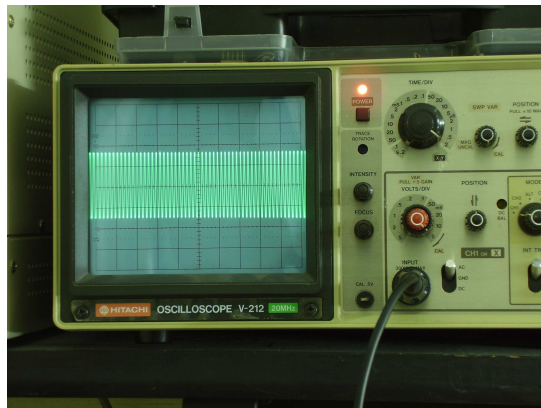


Figura 36 – Osciloscopio conectado al cristal de 27 MHz.

En otra oportunidad se vio como responde el integrado de RF a los comandos (strokes) enviados desde la PC, tal como se indicó en el punto 4.3.

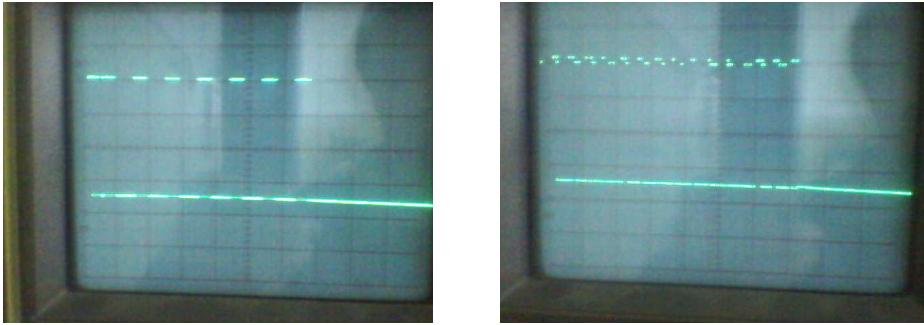


Figura 37 – Comunicación SPI

En la figura 37 de la izquierda puede observarse en el osciloscopio una ráfaga de 15 bytes enviados del pic al Módulo de RF. El primer bytes es el encabezado, seguidos de bytes 0xFF y 0x00 alternadamente. En la figura de la derecha está la respuesta del Módulo de RF pero utilizando otra escala.

En este momento se tuvo la certeza de que el módulo de RF estaba respondiendo por el SPI, o sea la etapa digital estaba en marcha, quedando por verificar que el transmisor de RF encienda.

Mediante la implementación de un detector de envolvente, confeccionado con un diodo bat y un capacitor soldados en la salida de RF se fueron realizando ajustes en el software hasta encontrar una señal (tensión continua) que indicara que la etapa de RF estaba en marcha.

Las primeras señales encontradas indicaron que el transmisor encendía por un breve tiempo y luego no volvía a encender hasta tanto se reiniciara todo el Módulo.

Perfeccionando el software en cuanto a los comandos (strokes) que se envían por el SPI, analizando las respuestas que se podían visualizar por el Hiperterminal de la PC en código ASCII y convirtiendo esto a binario se pudo terminar de comprender el funcionamiento de la Máquina de Estado; logrando luego de repetidos intentos establecer una salida mantenida en el tiempo.

Sabiendo que ya la salida era estable se le soldó un cable de longitud  $\frac{1}{4}$  de onda que opere como antena. Recurriendo a un analizador de espectro se pudo encontrar la señal de radiofrecuencia buscada. En un principio la señal se encontró fuera del rango esperado, dejando en evidencia que el comando SCAL (calibrar sintetizador) no estaba siendo utilizado en la manera correcta.

Una vez conocida la frecuencia a la que se transmitía, se utilizó un receptor comercial a fin de comparar (para cada comando) lo observado en el receptor con lo que el Módulo de RF fue informando a través del bus SPI. El software desarrollado permitió mostrar el dato informado en el Hiperterminal de una PC.

De esta forma se consiguió verificar por ejemplo si:

- posicionando el Módulo en el estado TX (estado 19 en la figura 30) tenemos señal de RF; o
- luego de ejecutar el comando SCAL (*calibrar sintetizador*) la frecuencia de transmisión se establece en 915MHz.

El objetivo perseguido en los siguientes ensayos fue recorrer la Máquina de Estado del Módulo de RF (figura 30) a fin de analizar su funcionamiento y de esta forma poder extraer en un futuro el máximo rendimiento al momento de implementar un sistema concreto.

Con todas las pruebas realizadas se alcanzó una mayor comprensión del funcionamiento interno del módulo.

### **6.3 Medición de parámetros.**

Si bien el Circuito Impreso tiene en su diseño otros componentes además del PIC y del Módulo de RF; la etapa de potencia, el convertor DC/DC y el amplificador operacional no serán incluidos en los ensayos de este Trabajo Final. El fin de este proyecto es probar y analizar el funcionamiento del módulo de RF, formas de control y su interacción con un PIC. Demostrando así que se puede realizar un sistema de telemetría con componentes comerciales con un muy alto grado de integración y con plataformas completamente configurables y autónomas.

La primera medición del transmisor fue realizada con la siguiente configuración:

- Frecuencia central: 915 MHz
- Tasa de datos: 120 kBaud
- Desviación: 50 khz.
- Modulación: GFSK
- Filtro receptor BW: 211 kHz.
- Potencia TX : 11 dBm

Estos datos fueron ingresados en el Smart RF Studio. El software genera en base a los datos ingresados una tabla con los valores de los registros principales con los que se debe setear al Módulo de RF tal como se explico en punto 4.2.4.

En la Figura 37 puede verse que, con datos arriba enunciados, el software generó el listado de registros necesarios para que el Módulo de RF obtenga la configuración antes mencionada.

La irradiación de la señal fue generada con la antena de  $\frac{1}{4}$  de onda que se colocó en uno de los dos pines correspondientes de la salida del módulo.

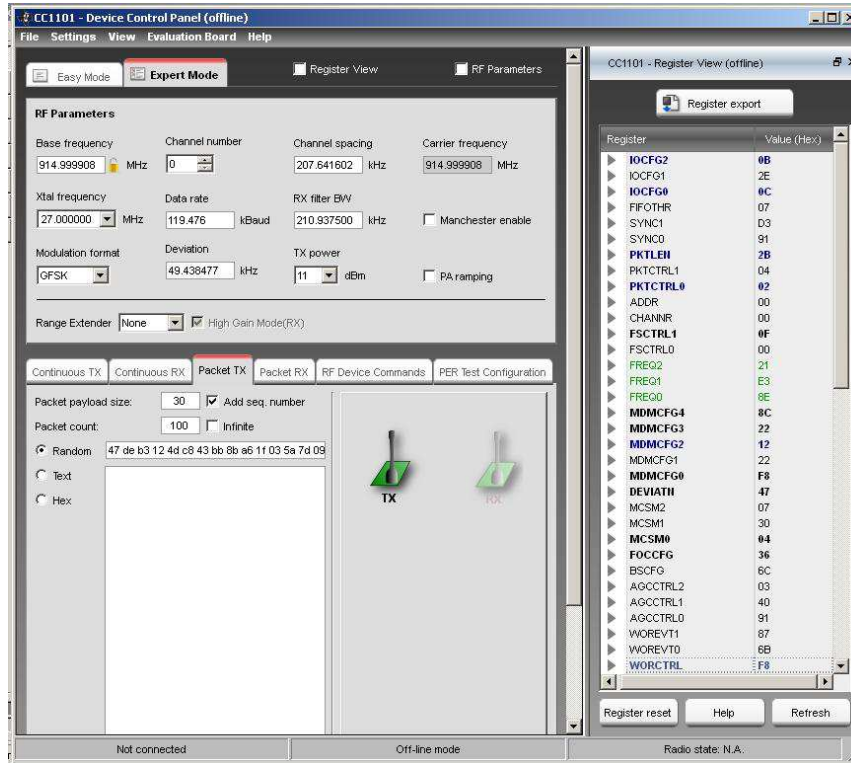


Fig. 38 - Captura de Smart RF Studio.

Con la configuración ingresada en el Módulo se realizaron los ensayos de recepción de RF, a tal efecto fueron usados un analizador espectral Spectram HF 4040 y un receptor ICOM IC-PCR1000.

### 6.3.1 Mediciones realizadas con el analizador de espectro HF 4040.

Este es un analizador de espectro marca Aaronia, al cual se puede acceder desde una PC mediante un software específico y en forma online se va configurando y procesando los datos.

La medición de radiofrecuencia se realizó configurando el módulo de RF en estado TX, pero sin datos para transmitir; en esta situación solo trasmite un preámbulo en un bucle infinito.

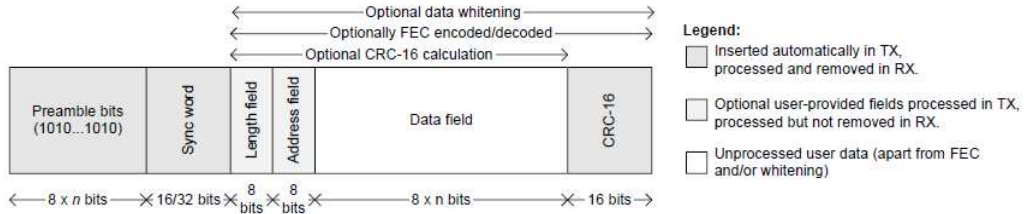


Figura 39 – Formato de Paquete

Los resultados obtenidos son los siguientes y están de acuerdo a lo esperado.

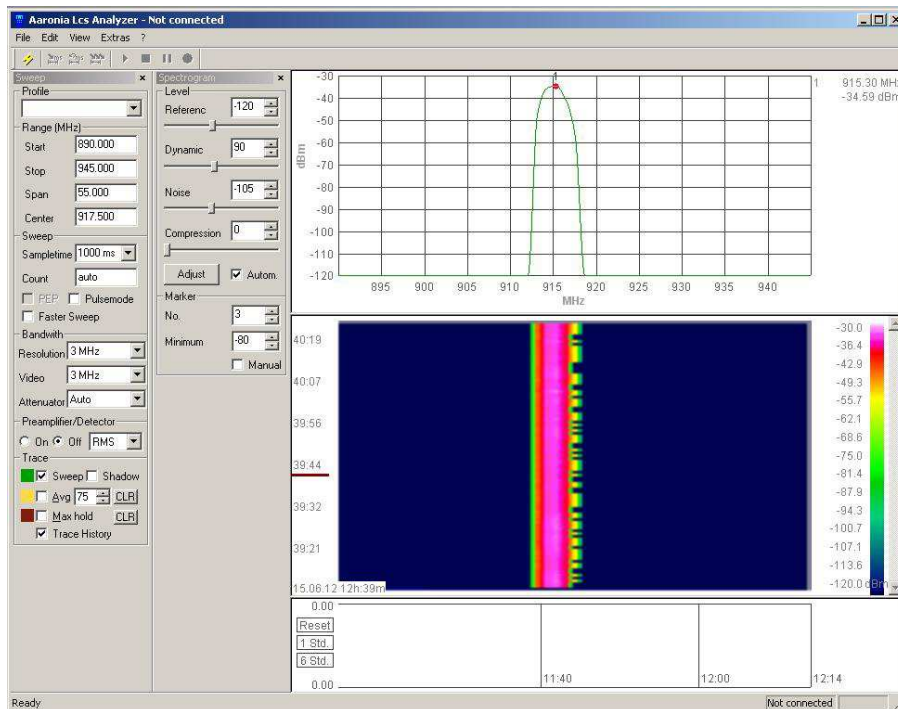


Figura 40 – Espectro y espectrograma radioeléctrico

En la figura 40 se observa el resultado de analizar el espectro radioeléctrico barriendo desde una frecuencia de 880MHz hasta los 945 MHz. Del mismo surge que se está transmitiendo en una banda centrada en 915 MHz

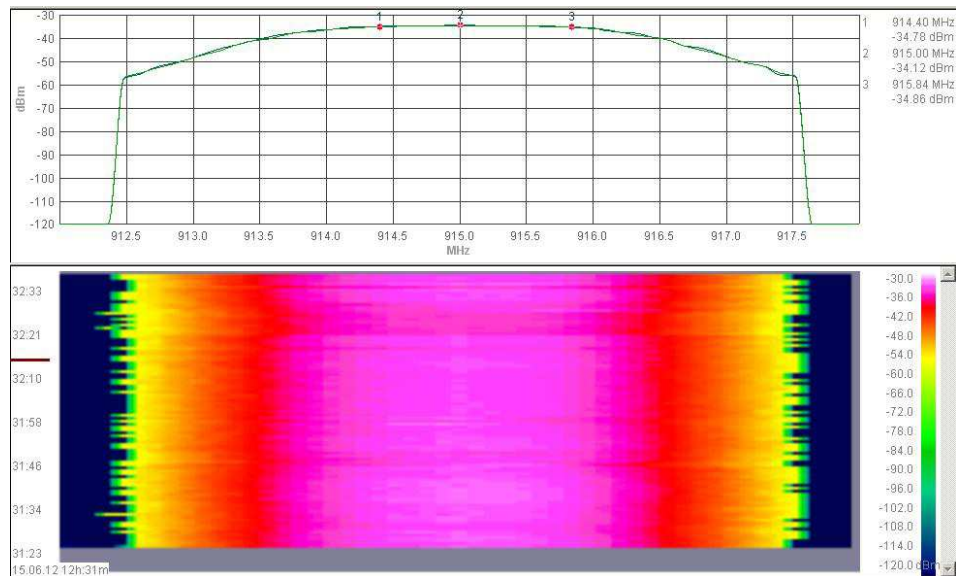


Figura 41 – Distribución de potencia y espectrograma.

La figura 41 es un detalle más acotado en frecuencia y se observa como se distribuye la potencia en todo el ancho de la banda de transmisión.

### 6.3.2 Mediciones realizadas con el receptor ICOM IC-PCR1000

Para tomar las mediciones con el ICOM se utilizó la misma configuración que en el ensayo anterior pero en esta oportunidad el módulo transmitía un paquete de datos de 43 bytes en un bucle infinito.

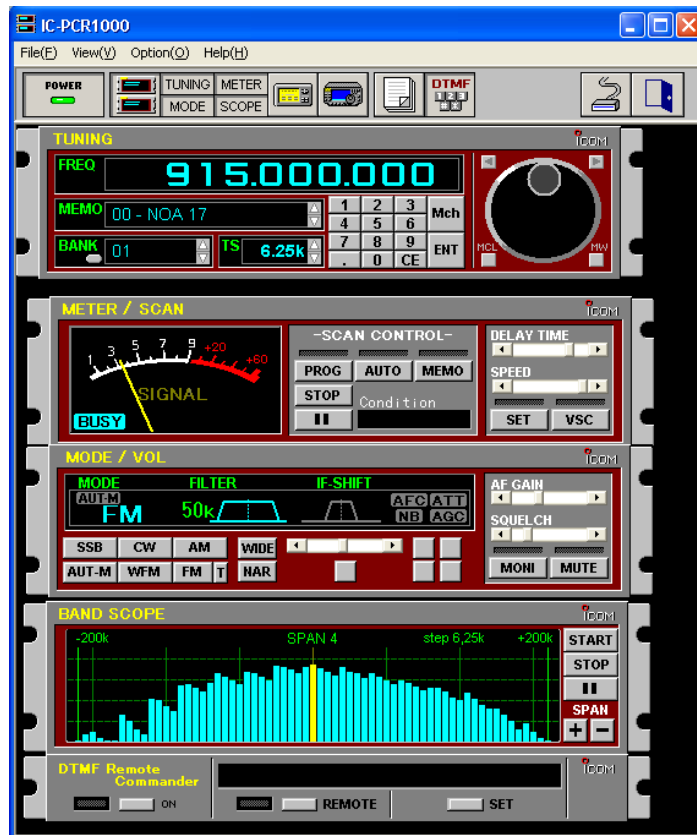


Figura 42 - Captura de software que utiliza el ICOM

En la figura 42 se ve la señal recibida y como se expande el espectro alrededor de la frecuencia central. El rizado en el lóbulo central corresponde al efecto producido por la modulación de los datos que se están transmitiendo, en este caso se eligió un paquete con bytes 0x00 y 0xFF alternados de modo que sea más visible y audible al momento de la recepción.

El integrado de RF tiene incorporado un sensor de temperatura con salida analógica, se puede acceder a él mediante el envío de un comando cuando el transceptor se encuentra en estado IDLE (reposo). La salida es una tensión proporcional a la temperatura ( $2,47\text{mV}/\text{C}^\circ$ ) y se puede tomar con un tester o con el conversor A/D del PIC.

## **6.4 Análisis de los resultados obtenidos y planteo de mejoras.**

El modelo experimental fue realizado sobre un sustrato de 70 mm x 140 mm según las condiciones planteadas en una primera instancia. Debido al alto grado de integración que tienen los componentes seleccionados puede fácilmente reducirse el área del sustrato a la mitad sin complicar el diseño del circuito, haciéndolo apto para implementar en un pequeño espacio, ideal para el uso espacial.

Durante la búsqueda de componentes aptos para este desarrollo se comprobó que los componentes discretos que recomienda el fabricante<sup>11</sup> son difíciles de conseguir en el mercado local; en este modelo de desarrollo se subsanó el problema montando en el circuito impreso componentes con encapsulados 0804 que están disponibles en el mercado.

Una mejora posible en la placa es que al momento de diseñar los pads de los componentes se debe tener en cuenta que el tamaño de estos puede ser de hasta el doble del calculado.

Con respecto al conector de radiofrecuencia SMA, se utilizó uno SMD (montaje superficial), el cual podría no ser apropiado para soportar esfuerzos

---

<sup>11</sup> Maxim recomienda componentes encapsulados 0603, Texas recomienda encapsulados 0402.

mecánicos; entonces para tener una mayor resistencia mecánica en el modelo de vuelo se debe colocar un conector de inserción.

Al momento de presupuestar y enviar a confeccionar el circuito impreso se eligió una placa sin máscara antisoldante y sin preestañado, ya que no son imprescindibles al momento de montar los componentes. La falta de estos dos componentes hace que en la tarea de montaje de componentes se deba tener especial precaución que no queden pines sin soldar o se cortocircuiten entre si.

Para el desarrollo del trabajo final se optó por un PIC de 28 pines. Estos PIC cuentan con un solo módulo USART y un solo Módulo SPI, a su vez este ultimo se superpone en la asignación de pines con el modulo USART. Por las necesidades del proyecto se debieron implementar por software dos de los módulos requeridos. Esto incrementó notablemente el tiempo de desarrollo, la complejidad del programa y sobre todo genera un aumento significativo en el tiempo de ejecución de algunas subrutinas del programa haciendo que este corra más lento en el PIC, que si las mismas se hubieran implementado por hardware.

Verificando que el integrado QFN-20 se pudo soldar sin mayores inconvenientes se concluye que en un nuevo desarrollo se analizaría la implementación de la unidad de proceso central con PIC de muchos pines (por ejemplo los de 64 pines) que tienen implementado por hardware 2 USART y 2 Puertos SPI, evitando de este modo la superposición en la asignación de pines.

## **7. Conclusiones.**

Con todas las etapas finalizadas para el desarrollo del trabajo se está en condiciones de afirmar que se cumplió con el objetivo buscado; Generar un sistema de comunicaciones que permita recopilar datos y empaquetarlos para transmitirlo por radiofrecuencia.

Así mismo del trabajo se desprenden las siguientes conclusiones:

En función de los nuevos componentes que existen en el mercado con alto grado de integración y con arquitecturas de software complejas, junto con completos entornos de desarrollo y simuladores que ofrecen los mismos fabricantes, se pueden implementar sistemas de comunicaciones personalizados.

Estas características posibilitan que para cada proyecto se puedan seleccionar los componentes que más se adapten a las necesidades particulares de cada etapa sin importar que los mismos provengan de distintos proveedores.

El diseño de Circuitos impresos con alto grado de integración fue la tarea que más tiempo demandó, debido a que el ruteo de las pistas fue realizado manualmente.

Una forma de economizar tiempos es realizar los ruteos en forma automática (por software), pero aquí no fue posible con los softwares de licencia libre; además tratándose de etapas de Radiofrecuencia no es conveniente dejar que el software disponga el *mejor camino*. Si por el contrario se utilizan software apropiados para RF estos no contemplan los footprint de los integrados digitales.

De la experiencia obtenida concluyo que la implementación de sistemas propios es laborioso y lleva mucho tiempo de desarrollo y pruebas; tiempos que fueron de difícil estimación, más aún al no tener experiencia previa tanto en el desarrollo del hardware como del software.

Sin embargo, la creación de un sistema propio es muchas veces la única alternativa posible. Dado que se puede requerir un producto que por sus características individuales no existe en el mercado.

Los sistemas propios se ajustan perfectamente a los requerimientos solicitados. Y como se tiene un conocimiento pleno de todas las etapas, pueden realizarse los cambios y modificaciones necesarias en caso de que por alguna razón externa se modificaran los requerimientos solicitados.

## ***Bibliografía***

- [1] A Survey of CubeSat Communication Systems. Bryan Klofas y Jason Anderson.
- [2] Arquitectura y programación de microcontroladores PIC. Andrés B. Saravia y Ariel Coria.
- [3] Hoja de datos PIC 18F452. Microchip.
- [4] Hoja de datos PIC 18F2550. Microchip.
- [5] Hoja de datos, CC1101. Texas Instrument.  
Notas de aplicación. Proveedor Texas Instrument.
- [6] Hoja de datos, Max 2235. Maxim.  
Notas de aplicación. Proveedor Maxim
- [7] Hoja de datos, MC33063. Motorola.  
Notas de aplicación. Proveedor Motorola.
- [8] Microondas y recepción Satelital. J.A. Bava y A. J. Sanz
- [9] Automotive Recommended Product Selector Guide
- [10] PCB Land Pattern Design and Surface Mount Guidelines for QFN Packages. Mark Kwoka and Jim Benson
- [11] El lenguaje de programación C. Brian Kernighan y Dennis Ritchie.
- [12] Microcontroladores PIC 2º edición. Carlos A Reyes
- [13] MPLAB® C18 C COMPILER LIBRARIES. Microchips

## Anexo I

### **Software confeccionado para el módulo de ensayo previo del punto 3.2.1.1 (Ensayo previo del Microcontrolador).**

Este software está escrito en lenguaje "C" y fue desarrollado para implementarse en un PIC 18F452.

Permite tomar el estado de tres tensiones por medio del conversor A/D y por medio del uso de interrupciones permite tomar los datos ingresados por la USART del PIC.

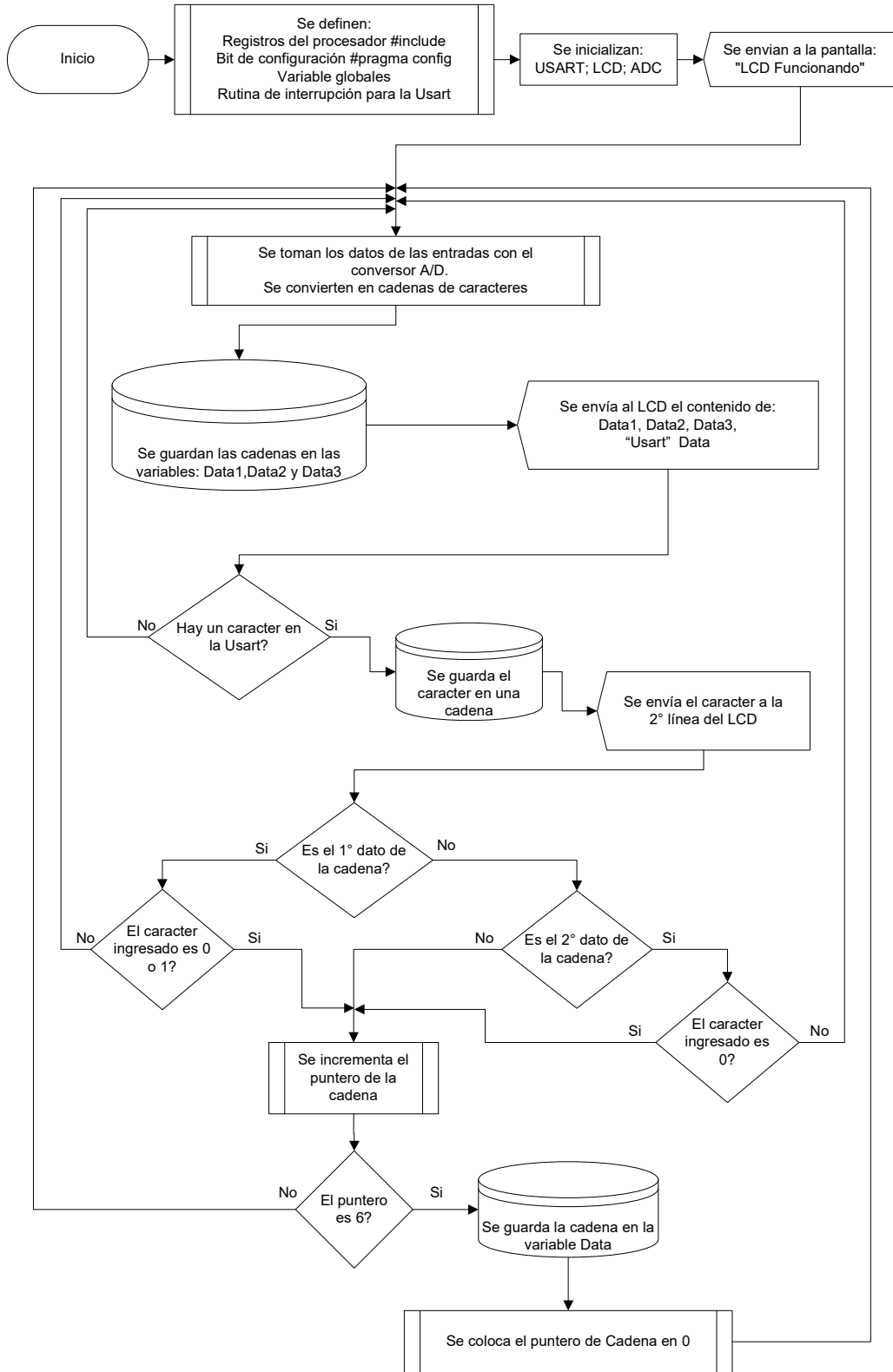
Los datos tomados por el conversor A/D son en formato binario y mediante el uso de la función *itoa* son convertidos a caracteres.

Estos datos con el agregado de un encabezado son mostrados en la primera línea de una pantalla de LCD.

Los caracteres ingresados por el puerto USART son mostrados en la segunda línea luego de la palabra "*Usart*". Si 2 caracteres consecutivos son 00 ó 10 el programa almacenará estos dos datos y los cuatro siguientes; y luego los mostrará al final de la 2° línea del LCD.

A continuación se encuentra el Diagrama de Flujo desarrollado con el cual se confeccionó el software.

**SISTEMA DE TELEMETRÍA PARA UNA CARGA DE APLICACIONES ESPACIALES**



## **Anexo II**

### **Software confeccionado para el modelo experimental del punto 6.2 (Ensayos de la etapa de RF).**

Este software está escrito en lenguaje "C" y fue desarrollado para implementarse en un PIC 18F2550.

Su función principal es la de configurar el integrado CC1101 (Módulo de Radiofrecuencia), enviando los registros necesarios a través de un Bus SPI.

Permite enviar comandos específicos al CC1101 usando el teclado de una PC. Además reenvía al Hiperterminal de la PC la información que surge del integrado de RF luego de cada comando enviado.

A continuación se encuentra el Diagrama de Flujo desarrollado con el cual se confeccionó el software.

