

DISEÑO DE UN TRANSMISOR DE TELEMETRÍA DOBLE BANDA PARA CUBESATS

Lombardozzo, Simón - Roncagliolo, Agustín
simon.lombardozzo@ing.unlp.edu.ar - agustinr@ing.unlp.edu.ar

SENYT

Departamento de Electrotecnia
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de la Plata
Calle 116 s/n, B1900
La Plata - Argentina.

RESUMEN

El presente trabajo consiste en el diseño de un transmisor para nanosatélites de baja órbita y bajo costo atractivo para proyectos universitarios y de investigación. En particular, se busca lograr un sistema de comunicaciones apto para el estándar CubeSat cuyo costo se encuentra en el orden de los miles de dólares en el mercado actual. Debe considerarse que el costo total de un nanosatélite de este tipo se estima en los cientos de miles de dólares, en franco contraste con las centenas de millones de dólares que cuestan las misiones satelitales tradicionales. El transmisor debe cumplir con diversos requerimientos como bajo consumo de potencia, suficiente velocidad de transmisión de datos para enviar toda la información del CubeSat hacia la estación terrena, capacidad de recibir comandos desde la estación que permitan modificar su funcionamiento, operar en bandas de frecuencia que no requieran licencias de uso exclusivo y ser construido con componentes comerciales adaptados para el uso espacial. En el trabajo se presenta el diseño de un transmisor capaz de operar tanto en UHF (banda de radioaficionados en 434 MHz) como también en banda S (banda en 2.4 GHz para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas) en el caso que se requiera mayor tasa de transmisión y por lo tanto mayor ancho de banda. Además, se realiza el cálculo de enlace subyacente para ambos casos y se define el tipo de modulación y protocolo de comunicaciones a utilizar. Una vez fijados todos los requerimientos y parámetros del enlace, se propone un diseño final del transmisor basado en componentes comerciales de bajo costo.

1.- INTRODUCCION

Con bases en el objetivo de desarrollar un nanosatélite universitario de bajo costo, idealmente bajo el estándar CubeSat [1], para la Universidad Nacional de la Plata, se propone el diseño de uno sus módulos principales, el sistema de telemetría y telecomando. Dicho módulo es el que permite el intercambio inalámbrico de datos entre el satélite y la estación terrena durante la misión.

Para el diseño del mismo se hace particular hincapié en la utilización de transceptores comerciales modificados o adaptados para el uso espacial, así también como de otras soluciones diseñadas para la aplicación específica. Las bandas utilizadas en estos casos suelen ser VHF (30 a 300

MHz) o UHF (300 MHz a 3 GHz, aunque utilizada por debajo del GHz, en particular en las bandas de 400-500MHz) y las modulaciones empleadas generalmente del tipo FSK (modulación digital por cambio de frecuencia). En los desarrollos más recientes, y asociado con la generación de mayores tasas de datos producto de los instrumentos a bordo (típicamente cámaras ópticas) se están empleando también canales de comunicación en bandas de frecuencia más elevadas (la más común es la banda ISM para aplicaciones Industriales Científicas y Médicas en 2.4 GHz), separados de los enlaces de telemetría y telecomando. Este hecho es debido a que, estos últimos enlaces, deben estar operativos incluso en condiciones en las cuales la orientación del satélite aún no se encuentre estabilizada y por ende no puedan

utilizarse antenas direccionales. Detalles de ejemplos concretos de sistemas de telemetría realizados pueden hallarse en [2] y [3].

Los satélites de órbita baja se utilizan típicamente para la observación de la tierra y su atmósfera mediante técnicas de sensado remoto, y poseen alturas que no superan los seiscientos kilómetros. Esto implica que para permanecer en órbita su velocidad debe ser del orden de siete kilómetros por segundo, lo que se traduce en un periodo orbital de algo más de una hora. En consecuencia, la dinámica impuesta al enlace de comunicaciones es muy significativa, ya que los momentos en los cuales se puede establecer la comunicación se reducen a intervalos de algunos minutos por pasada, y dependiendo del tipo de órbita del satélite, cuántas pasadas están dentro del alcance de una estación terrena. Asimismo, durante la ventana de oportunidad para establecer la comunicación, los cambios de la velocidad relativa del satélite con respecto a tierra causan por efecto Doppler cambios significativos en las frecuencias de las señales transmitidas que afectan la sincronización de los receptores, y condiciona la elección del tipo de modulación a ser utilizado.

Teniendo en cuenta que los satélites de este tipo deben tener un costo relativamente bajo, ya que cuentan con una vida útil de no más de un año, es que la tendencia en este ámbito actualmente está enfocada en adaptar circuitos integrados disponibles en el mercado (COTS) para el uso espacial [4]. Por otro lado, el tamaño y el peso del satélite deben ser lo más bajo posible para economizar el lanzamiento y, además su consumo de potencia debe ser mínimo por la reducida área útil con la que se cuenta para los paneles solares [5]. Partiendo de lo anterior, se propone una solución de compromiso que cumpla requerimientos y exigencias de las distintas partes del proyecto.

2.- MISIÓN Y REQUERIMIENTOS GENERALES

Como misión principal del proyecto se propone la detección de incendios forestales mediante una cámara infrarroja de tipo comercial. Como objetivo mínimo se pretende obtener imágenes del territorio argentino con el fin de

detectar focos de calor asociados a incendios forestales de gran escala (mayores a 1 km²). Para detectar dichos focos antes de que se propaguen demasiado, se deben transmitir las imágenes sin procesar en el menor tiempo posible, idealmente de manera inmediata una vez tomada la fotografía. Por otra parte, si se realiza un procesamiento a bordo, debería existir la posibilidad de modificar el algoritmo desde tierra para emplear los datos obtenidos en otras aplicaciones.

Para cumplir con el objetivo de la misión y cubrir todo el territorio argentino, el satélite deberá recorrer una órbita aproximadamente polar (entre 85 y 95°). Por otra parte, la altitud deberá ser del orden de los 500 km para que la apertura del lente cubra el área adecuada sin perder resolución. Una cámara comercial de resolución relativamente baja (640 x 480 pixels) con un lente gran angular estándar (62° x 46°) podría cubrir el largo del territorio argentino, y gran parte de su ancho, con una sola pasada del satélite y un total de 9 a 10 fotos. Teniendo en cuenta que dichas cámaras pueden generar hasta 16 bits por pixel (600 kB por foto) y que el tiempo estimado de visibilidad de un satélite con esta altitud y para ángulos de elevación mayores a 10° (donde atenuación en la atmósfera terrestre de la señal transmitida es relativamente predecible) es de no más de 3 minutos, se deberían transmitir los datos con una tasa de al menos 250 kbps.

Además de transmitir los datos tomados por la carga útil del satélite (en este caso una cámara infrarroja), el enlace debe permitir la transmisión del estado del mismo en cuanto a sus parámetros vitales (tensiones de batería, consumo de potencia, temperaturas en puntos relevantes, posición y velocidad, orientación, etc.) hacia la estación terrena, lo que usualmente se denomina telemetría, así como la posibilidad de enviar comandos al satélite que permitan modificar ciertos parámetros de su funcionamiento (cambiar entre modos de misión, encender o apagar ciertos instrumento o equipos, eventualmente realizar correcciones de órbita, etc.) desde tierra, acciones denominadas habitualmente telecomandos.

3.- BANDAS DE FRECUENCIAS

En la actualidad, el espectro radioeléctrico se encuentra sobrecargado por todos los sistemas de comunicaciones inalámbricos en uso. Por ello, lo primero que se debe hacer antes de empezar a diseñar cualquier enlace de radiofrecuencia, es solicitar los permisos necesarios sobre la banda de frecuencias en que se desea transmitir o elegir intervalos del espectro que sean de uso libre aceptando interferencias de otros usuarios. Por otra parte, hay que tener en cuenta que no todas las porciones o bandas del mismo son aptas para cualquier servicio o sistema, sino que, por el contrario, determinadas zonas del espectro están especialmente indicadas para proporcionar servicios concretos. Las atribuciones de frecuencia las efectúa la Unión Internacional de Comunicaciones (UIT) y quedan recogidas en el Cuadro de Atribución de Bandas de Frecuencias del Reglamento de Radiocomunicaciones [6]. Las bandas se proponen en principio a nivel internacional, y luego las Administraciones realizan las subdivisiones necesarias de acuerdo a las necesidades específicas de cada país. En la República Argentina la atribución de bandas la realiza el Ente Nacional de Comunicaciones (ENACOM) y quedan recopiladas en el Cuadro de Atribución de Bandas denominado CABFRA [7]. La atribución de una banda a un servicio puede ser con categoría primaria o secundaria, significando esto que, si el servicio posee categoría primaria, está protegido contra interferencias; mientras que, si su categoría es secundaria, no sólo no se encuentra protegido contra interferencias, sino que además tiene prohibido interferir a las aplicaciones de bandas primarias y, llegado el caso, se deberá arbitrar los medios para imponer el cese las posibles interferencias.

En el presente trabajo se propone utilizar la banda de 434 MHz. La misma es conocida en carácter de atribución primaria como “banda de 70 cm” siendo utilizada sólo por usuarios con licencia de radioaficionado y radioaficionados por satélite sin fines comerciales. Esta decisión se tomó considerando dos criterios fundamentales: la compatibilidad de una gran cantidad de transceptores comerciales de RF (radiofrecuencia) con este intervalo del espectro y la posibilidad de colaboración de la comunidad de radioaficionados

para la recepción de los datos en distintos lugares del territorio argentino. Por otra parte, utilizar esta frecuencia tiene como desventaja que el ancho de banda permitido es bastante limitado (12 kHz para comunicaciones digitales) y por ello no es apto para el enlace de bajada de datos de la cámara infrarroja a bordo del satélite. Sin embargo, dicho ancho de banda es suficiente para la transmisión de la telemetría y los telecomandos cuya tasa de datos, en general, no supera los 9600 bps y 1200 bps respectivamente. Si se quiere alcanzar la tasa de 250 kbps requerida para la transmisión de datos de la cámara infrarroja es necesario utilizar una banda de frecuencias con mayor disponibilidad de ancho de banda sin necesidad de una licencia de uso exclusivo. Dentro de las distintas bandas asignadas para las comunicaciones de satélites de uso no comercial, encontramos la banda de 2.4 GHz reservada para aplicaciones industriales científicas y médicas (banda ISM). Es de suma importancia tener en cuenta que esta porción del espectro radioeléctrico es de uso compartido y se pueden sufrir interferencias debidas a otros equipos y/o dispositivos electrónicos que realicen transmisiones inalámbricas. Es por ello que, a pesar de no haber limitaciones respecto del ancho de banda que se puede utilizar, la potencia transmitida no puede superar los 30 dBm (1 W) [8]. Cabe destacar, que dicho valor es suficiente como para lograr una tasa de error de bits aceptable siempre y cuando se utilicen las antenas adecuadas tanto para el satélite como para la estación terrena. En la Figura 1 se presenta un esquema de la solución propuesta.

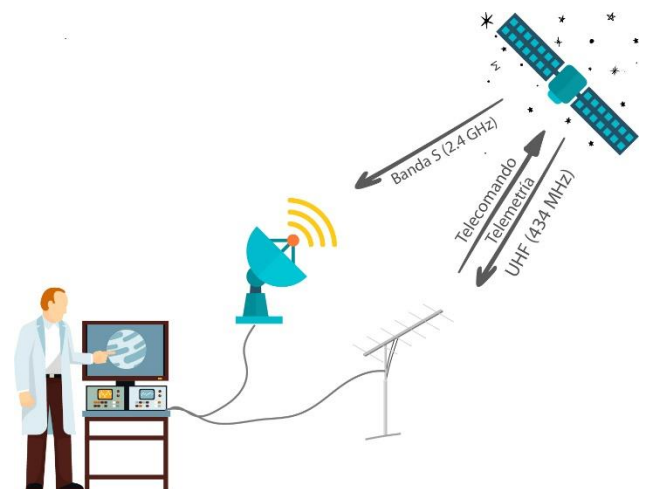


Figura 1. Esquema del enlace propuesto

4.- COMPONENTES COTS

Como se mencionó anteriormente, el espíritu del trabajo es utilizar componentes comerciales con la idea de reducir los costos, manteniendo los niveles de potencia por debajo de los permitidos en las bandas de frecuencias disponibles sin perder la confiabilidad del enlace. En esta sección se describen los módulos básicos que debe tener el sistema de telemetría y algunas de las opciones disponibles en el mercado para su implementación.

4.1- Transceptor de RF

El transceptor (transmisor y receptor) de radiofrecuencia es el módulo más importante de la placa. Este componente es el encargado de acondicionar y transmitir hacia la estación terrena los datos generados por los instrumentos del satélite, así también como de recibir los comandos enviados hacia el mismo con el fin de cambiar sus modos de funcionamiento, encender/apagar distintos subsistemas, etc.

La mayor parte de los transceptores disponibles en el mercado utilizan modulaciones del tipo FSK ya que los esquemas de modulación no coherente permiten una implementación más sencilla del receptor [9], la cual se integra en el mismo chip juntamente con los amplificadores, filtros y conversores de frecuencia necesarios. Entre las diferentes marcas que poseen familias de integrados de estas características pueden mencionarse Texas Instruments [10], ON Semiconductor [11], Analog Devices [12] y Silicon Labs [13]. Esta última con la particularidad de contar con una familia que implementa en un mismo chip dos radios, una en la banda de 434 MHz y otra en la de 2.4 GHz. Sin embargo, las familias de transceptores de Texas Instruments son las que cuentan con mayor legado espacial y las más usadas en misiones de estas características.

4.2- Amplificador de RF

Los transceptores de RF antes mencionados cuentan con una potencia de salida máxima del orden de los 14 dBm. Este valor está

muy por debajo de la potencia necesaria para obtener un enlace robusto y confiable debido a las altas pérdidas en el trayecto de la señal. Es por ello que se debe incluir en la placa un amplificador de radiofrecuencia capaz de elevar dicha potencia de salida al orden de los 30 dBm (1 W) típicos para este tipo de aplicaciones. Diversas empresas ofrecen este tipo de productos y entre las más destacadas se encuentran Qorvo [14] y Skyworks [15]. Ambas proveen amplificadores de RF en las bandas de frecuencia propuestas para este trabajo y amplificadores de bajo ruido integrados para la recepción de señales provenientes de la estación terrena. Los integrados que combinan estas dos características son conocidos como Front Ends y resultan de gran utilidad con miras a reducir al mínimo el tamaño final de la placa de telemetría.

4.3- Microcontrolador

La elección del microcontrolador es de suma importancia para la placa ya que, es el encargado de “orquestrar” el funcionamiento de los distintos componentes y facilitar la comunicación con la computadora del satélite al momento de recibir los datos provenientes de los distintos subsistemas y que se desean transmitir a la estación terrena. La familia de microcontroladores más utilizada en misiones CubeSat es la de los MSP430 de Texas Instruments [16]. Esto se debe principalmente al bajo consumo de los mismos y la gran cantidad de herramientas y diseños de referencia que ofrece el fabricante para su programación, evaluación y validación de funcionamiento.

5.- CÁLCULO DE ENLACE

El cálculo del enlace debe asegurar que el receptor tenga a su entrada la potencia de señal necesaria para lograr una determinada confiabilidad expresada en una dada tasa de error de bits. Para el mismo, se siguieron distintas recomendaciones de la UIT que permiten estimar pérdidas atmosféricas, ruido radioeléctrico y otros factores que afectan a los sistemas satelitales [17]. El cálculo se realizó de manera detallada para cada uno de los enlaces propuestos (telemetría,

telecomando y bajada de datos de los instrumentos) teniendo en cuenta los requerimientos antes mencionados y estimando las características de posibles estaciones terrenas a construir para el proyecto.

5.1- Telemetría

En primer lugar, se resumen los requerimientos para en enlace de bajada de datos correspondiente a los parámetros vitales del satélite (ver Tabla 1). El mismo debe ser de gran confiabilidad ya que, de los datos que se reciban por este canal, dependen los comandos que se envíen al satélite. Cabe destacar que, algunos de los requerimientos se fijaron para este proyecto en particular, otros son limitaciones impuestas por las entidades regulatorias y el resto se basan en misiones de similares características.

Tabla 1. Requerimientos del enlace de bajada de datos

Parámetro	Valor
Potencia máxima en el transmisor	0 dBW
Ganancia de antena transmisora	2 dB
Frecuencia de portadora	434 MHz
Tasa de bits	9600 bps
Distancia máxima de transmisión (órbita de 500 km y 10° de elevación mínima)	1700 km
E_b/N_0 (para FSK no coherente y una tasa de error de 10^{-5})	13.8 dB

Por otro lado, suponiendo una estación terrena como la que se presenta en la Figura 2, compuesta por una antena tipo Yagi con una ganancia del orden de los 17 dBi, un amplificador de bajo ruido (LNA) basado en un transistor comercial, un filtro de RF implementado con componentes discretos, cables coaxiales de 50 ohm y bajas pérdidas y el transceptor de RF de Texas Instruments para demodular los datos, se puede estimar que la relación de ganancia a temperatura equivalente de ruido (G/T) de la misma será del orden de los -9dB/K. Esta relación se define como la ganancia neta de la antena receptora (descontando las pérdidas que se

producen en la misma) sobre la temperatura equivalente de ruido del receptor (LNA, cables, filtros y esquema de demodulación) más la temperatura de ruido vista por la antena que apunta hacia el cielo. Para calcularla, se puede un procedimiento como el detallado en [18].

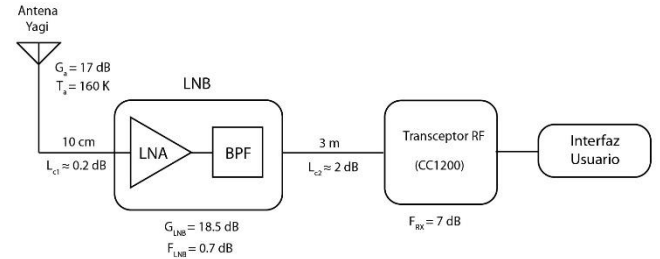


Figura 2. Esquema de la estación terrena de UHF

Para el cálculo de enlace, en primer lugar, debemos estimar la potencia de señal que llega al receptor siguiente manera:

$$P_{rx} = \frac{P_{tx} \cdot G_t \cdot G_r}{P_{atm} \cdot P_{ant}} / \left(\frac{4\pi D}{\lambda} \right)^2 \quad (1)$$

donde P_{tx} representa la potencia en el transmisor del satélite, G_t es la ganancia de la antena transmisora, G_r es la ganancia de la antena receptora, P_{atm} son las pérdidas atmosféricas producidas por los gases de la misma y la ionósfera, P_{ant} son las pérdidas que se producen en la antena receptora a causa del mal apuntamiento y polarización de la onda electromagnética (típicamente estimadas en 2 dB para el tipo de antenas a utilizar) y el factor $(\lambda/4\pi D)^2$ corresponde a las llamadas pérdidas por transmisión en el espacio libre (P_{tel}) que dependen de la distancia D entre antenas y la longitud de onda correspondiente a la frecuencia de portadora (434 MHz en este caso).

Ahora, si dividimos dicha potencia de señal a la que representaremos con la letra C , por la densidad espectral de potencia de ruido en el receptor N_0 , que se calcula como la constante de Boltzmann K (1.38×10^{-23} KJ) por la temperatura equivalente de ruido del sistema antena-receptor (T_s), obtenemos la siguiente relación:

$$\frac{C}{N_0} = \frac{P_{tx} \cdot G_t}{K \cdot P_{atm} \cdot P_{tel}} \cdot \frac{G_r}{P_{ant} \cdot T_s} \quad (2)$$

donde el término $G_r/(P_{ant} \cdot T_s)$ corresponde a la relación G/T de la estación terrena.

Para llegar a la relación E_b/N_0 que determina la tasa de errores de bits que tendrá el enlace en cuestión, es necesario traducir la potencia de señal C en energía de bit (E_b) mediante la siguiente relación:

$$C = E_b \cdot R_b = \frac{E_b}{T_b} \quad (3)$$

donde R_b representa a la tasa de transmisión de datos igual a la inversa del tiempo de bit.

Finalmente llegamos a la relación E_b/N_0 que define la confiabilidad del enlace propuesto:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{P_{tx} \cdot G_t}{K \cdot P_{atm} \cdot P_{tel} \cdot R_b} \cdot \frac{G}{T} \quad (4)$$

Para simplificar los cálculos generalmente conviene aplicar logaritmo a ambos lados de la igualdad y así expresar los valores en decibeles quedando la siguiente ecuación del enlace:

$$\frac{E_b}{N_0} (dB) = P_{tx}(dBW) + G_{tx}(dB) + \frac{G}{T}(dB) - P_{tel}(dB) - P_{atm}(dB) - 10 \log(R_b) - 10 \log(K) \quad (5)$$

Si reemplazamos cada término por los valores estimados para nuestro caso, los cuales se resumen en la Tabla 2, obtenemos que la relación E_b/N_0 del enlace es aproximadamente 30 dB. Este valor está por encima de los 13.8 dB necesarios para alcanzar la confiabilidad requerida (ver Figura 3), dejando un margen de casi 16 dB. Este margen puede ser utilizado para disminuir la potencia de transmisión, en el caso sea necesario ahorrar energía proveniente de los paneles solares, y/o utilizar una estación terrena de menor ganancia. Cabe destacar que las pérdidas atmosféricas se calcularon en base a las recomendaciones de la UIT mencionadas.

Tabla 2. Valores estimados para el cálculo de enlace de bajada

Parámetro	Valor
P_{tx}	0 dBW
G_{tx}	2 dB
G/T	-9 dB
R_b	9600 bps
P_{tel}	150 dB
P_{atm}	1.5 dB

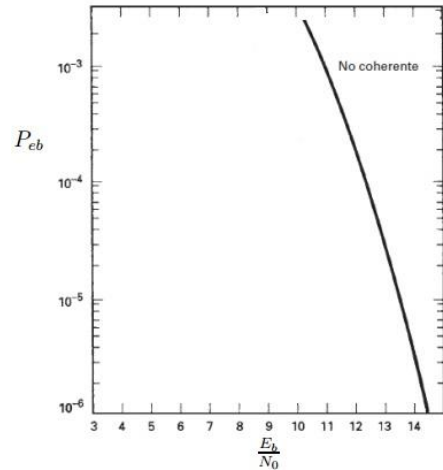


Figura 3. Curva de probabilidad de error de bit para FSK no coherente

5.2- Telecomando

Siguiendo el procedimiento detallado anteriormente, se puede calcular la relación E_b/N_0 en el receptor del satélite para el enlace de subida. Debemos remarcar que dicho enlace debe ser aún más confiable que el anterior ya que, es el único mecanismo para controlar el satélite una vez en órbita. A continuación, se enumeran los requerimientos fijados en este caso:

Tabla 3. Requerimientos del enlace de subida de datos

Parámetro	Valor
Potencia máxima en el transmisor	0 dBW
Ganancia de antena transmisora	17 dB
Frecuencia de portadora	434 MHz
Tasa de bits	1200 bps
Distancia máxima de transmisión (órbita de 500 km y 10° de elevación mínima)	1700 km
E_b/N_0 (para FSK no coherente y una tasa de error de 10^{-5})	13.8 dB

De la misma manera que para la estación terrena, se puede estimar la relación G/T del satélite considerando un esquema de recepción como el de la Figura 4. Notar que se reemplazó el LNA y el filtro de RF por un front end comercial que integra ambos componentes en un solo chip. Además, se incluyó un switch de RF necesario para conmutar entre la recepción y transmisión de datos con el transceptor de radiofrecuencia y se

estimó una ganancia de antena de 2 dB típica para una antena monopolo cuyo escasa directividad brinda la posibilidad de captar señal aún en los casos donde el satélite no apunte directamente a la Tierra.

En la Tabla 4 se repasan los valores estimados para cada parámetro involucrado en el cálculo de la E_b/N_0 del enlace de subida. Notar que, debido a la necesidad de utilizar componentes integrados para reducir el tamaño de la placa y antenas de baja directividad, es que la relación G/T estimada para el satélite es relativamente pobre (aproximadamente -27 dB/K) y, por ende, la tasa de datos no puede ser demasiado elevada si se quiere un enlace confiable.

Tabla 4. Valores estimados para el cálculo de enlace de subida

Parámetro	Valor
P_{tx}	0 dBW
G_{tx}	17 dB
G/T	-27 dB
R_b	1200 bps
P_{tel}	150 dB
P_{atm}	1.5 dB

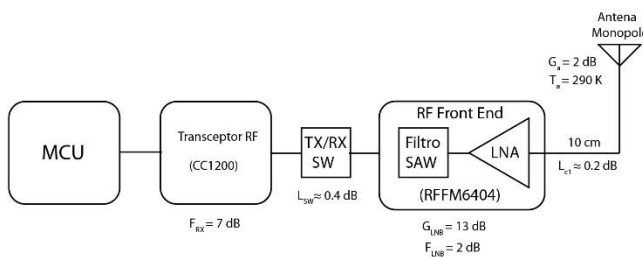


Figura 4. Esquema del receptor del satélite

Tal como para en enlace de telemetría, reemplazamos estos valores en la ecuación 5 y obtenemos que el valor de E_b/N_0 en el receptor del satélite es de alrededor de 35 dB. Esto da como resultado un margen de 21 dB que se traduce en una mayor confiabilidad del enlace ante distintos factores que no hayan sido tenidos en cuenta como lluvia, nubes, centelleo, interferencias, multicamino, entre otros.

5.3- Bajada de datos provenientes de los instrumentos

Para el enlace de bajada de datos de alta velocidad debemos tener en cuenta que la frecuencia de portadora es mayor y, por lo tanto, las pérdidas de transmisión en el espacio libre también lo serán. Además, se debe considerar el uso de antenas de mayor ganancia para lograr una tasa de datos mayor que en los casos anteriores sin perder la confiabilidad. La Tabla 5 resume los requerimientos fijados para el enlace y la Figura 5 esquematiza una posible estación terrena basada en una antena parabólica de 2 metros de diámetro, un LNA de alta ganancia, filtros de RF implementados en microtira, cables coaxiales de 50 ohm y un transceptor comercial típico en la banda de 2.4 GHz de para demodular los datos.

Tabla 5. Requerimientos del enlace de datos de alta velocidad

Parámetro	Valor
Potencia máxima en el transmisor	0 dBW
Ganancia de antena transmisora	6 dB
Frecuencia de portadora	434 MHz
Tasa de bits	250000 bps
Distancia máxima de transmisión (órbita de 500 km y 10° de elevación mínima)	1700 km
E_b/N_0 (para FSK no coherente y una tasa de error de 10^{-5})	13.8 dB

Notar que para el transmisor del satélite se estimó una ganancia de antena de 6 dB que puede corresponder a una antena parche muy común para este tipo de sistemas.

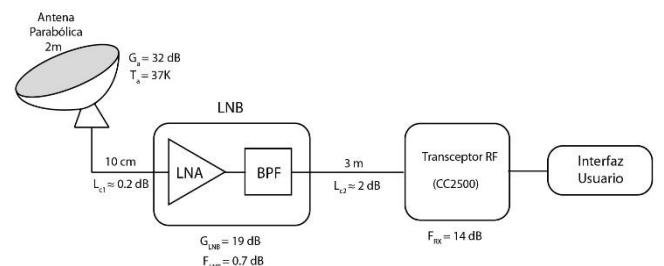


Figura 5. Esquema de la estación terrena de banda S

En este caso, la relación G/T estimada es del orden de los 5 dB/K, las pérdidas atmosféricas calculadas en base a las recomendaciones de la UIT no difieren demasiado que en el caso anterior y las pérdidas de transmisión en el espacio libre rondan los 165 dB debido al aumento de la frecuencia de portadora. Por otro lado, las pérdidas por apuntamiento se estimaron en el orden de los 3 dB ya que la directividad de las antenas hace más difícil su apuntamiento.

Siguiendo el mismo método que para los casos anteriores y reemplazando los valores en la ecuación 5, llegamos a que la relación E_b/N_0 es de aproximadamente 20 dB. Este valor resulta en un margen de 6 dB que permitiría seguir recibiendo datos aún en condiciones adversas como lluvia, interferencias, multicamino y otros factores despreciados al estimar las pérdidas en el trayecto y recepción de la señal.

6.- SOLUCIÓN PROPUESTA

Con miras a construir un primer prototipo para la placa de telemetría, se seleccionaron componentes comerciales de las familias antes mencionadas junto con algunos módulos adicionales para la interfaz con el usuario a la hora de realizar las pruebas de validación, comunicación con el BUS de datos del satélite, protección contra sobrecorriente, etc.

En primer lugar, para el transceptor de RF se optó por el CC1200 de Texas Instruments [19] capaz de transmitir datos en la frecuencia de 434 MHz con tasas de bits de hasta 1 Mbps y operar con diversos esquemas de modulación del tipo FKS, MSK, 4-FSK, entre otras variantes. Como este transceptor es sólo para frecuencias por debajo de 1 GHz, fue necesario incluir un chip adicional para la transmisión de datos en 2.4 GHz. Por simplicidad y análisis de sistemas similares ([2] y [3]) se eligió el transceptor CC2500 del mismo fabricante [20] que cuenta con características similares al CC1200, pero en la banda de frecuencias en cuestión.

Con el fin de amplificar la potencia de salida del transmisor de telemetría y a su vez las señales provenientes de los telecomando enviados por la estación terrena, se seleccionó un front end de Qorvo que puede llevar dicha potencia hasta un

valor máximo de 32 dBm (punto de compresión de 1 dB) y cuyo LNA posee una figura de ruido de 2 dB. Además, se incluyó un filtro pasabanda tipo SAW (con 3 dB de atenuación) para suprimir señales no deseadas y un switch de radio frecuencia para alternar entre transmisor y receptor ya que el satélite contará con una sola salida de antena en UHF que tanto el enlace de bajada y como de subida deben compartir. En el caso del enlace de bajada de datos, la potencia a la salida del transceptor CC2500 también debe amplificarse para llegar al valor estimado en el cálculo de enlace. Para ello, se optó por un amplificador de RF de Qorvo en la banda de 2.4 a 2.5 GHz, el RFPA5218 [21]. Este integrado es capaz lograr una potencia de salida de 30 dBm sin necesidad de componentes adicionales para la adaptación de impedancias con las líneas de transmisión que van a la antena (lo que reduce considerablemente el espacio que ocupa en la placa). Notar que este caso no es necesario un chip que contenga un LNA para la recepción de señal ya que el enlace de datos es unidireccional.

Dado que los microcontroladores de la familia MSP430 de Texas Instruments son los más utilizados para misiones de este tipo ([2] y [3]), estando probado su funcionamiento en el espacio y brindando menor consumo de potencia que otros de similares características, no hubo dudas a la hora de la selección. Más precisamente el MSP430F6659 [22] fue el elegido para el presente trabajo por su bajo consumo de potencia (menos de 20 mA a una tensión de alimentación de 3.3 V) y debido a la gran cantidad de interfaces de comunicación que puede manejar (seis SPI, tres I2C, tres UARTs). Además, cuenta con un controlador USB para programarlo de manera relativamente sencilla y memorias RAM y FLASH suficientes para este tipo de aplicaciones (64 kB y 512 kB respectivamente).

Para la comunicación con la computadora del satélite, se optó por la implementación de un BUS CAN capaz de alcanzar tasas de datos del orden de los Mbps (necesaria para la transmisión de imágenes provenientes de la cámara en tiempo real) y confiabilidad suficiente para este tipo de aplicaciones. Debido a que el microcontrolador seleccionado no cuenta con dicha interfaz de comunicación, se debe incluir en la placa un transceptor CAN con interfaz SPI. El transceptor

TCAN4550 de Texas Instruments [23] es la alternativa elegida para cumplir con dicha función. El mismo tiene la capacidad de alcanzar tasas de transmisión de hasta 5 Mbps y operar con tensiones lógicas compatibles con el microcontrolador seleccionado.

Por otro lado, la posibilidad de que se produzcan daños en cualquiera de los componentes de la placa debido a la radiación de partículas presentes en el espacio, se seleccionaron limitadores de corriente con protección contra cortocircuito y autoencendido en el caso de dichos efectos sean transitorios. Además, estos dispositivos también resultan útiles a la hora de cortar la alimentación de los amplificadores de RF cuando no se estén usando ya que su consumo es bastante elevado aún en modo de reposo. Los limitadores de corriente incorporados al diseño fueron los TPS25221 y TPS2557 de Texas Instruments ([24] y [25]).

En la Figura 6 se presenta un diagrama en bloques del diseño propuesto anteriormente para entender mejor la conformación de la placa.

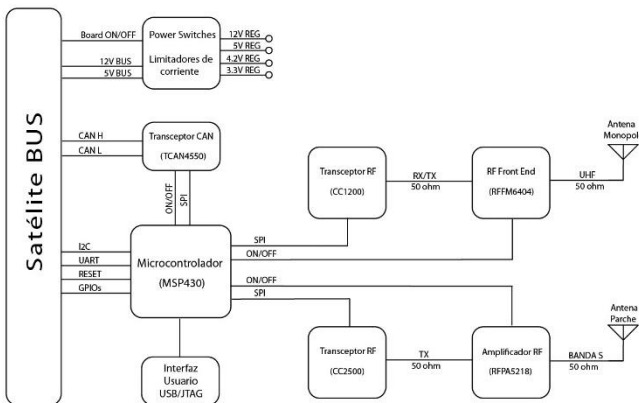


Figura 6. Diagrama en bloques de la placa de telemetría

7.- DISEÑO DE LA PLACA

El diseño de la placa para el transceptor experimental se llevó a cabo con un software de diseño de circuitos impresos. En primer lugar, se realizó el interconexión del circuito a nivel esquemático para luego pasar a un diseño de PCB (Printed Circuit Board) y posterior modelado 3D de la placa. Con el fin de obtener un buen desempeño en cuanto a compatibilidad electromagnética se utilizaron encapsulados de

montaje superficial y se organizó el diseño en un circuito impreso en 4 capas, dos para el montaje de componentes y líneas de señal, un plano de tierra y un plano de alimentación. El tamaño y forma de la placa se eligió en base a estructuras y módulos CubeSat comerciales (en este caso se basó en los módulos de la firma Pumpkin [26]). Además, se agregaron conectores USB y JTAG para la programación del microcontrolador y un conector PC-104 apto para la conexión con los demás módulos del satélite. En la Figura 7 se muestra el modelo 3D de la placa lista para su fabricación.

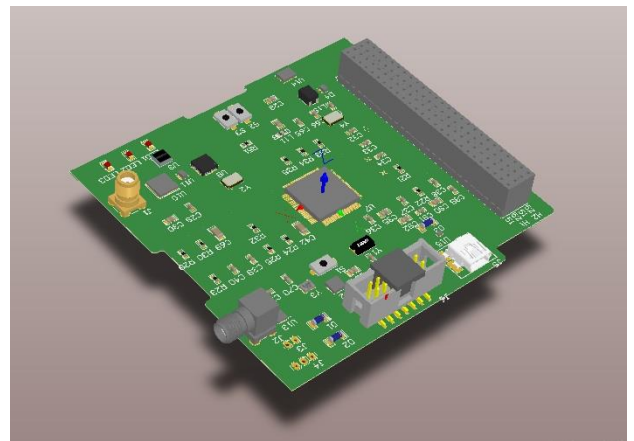


Figura 7. Modelo 3D del prototipo diseñado

CONCLUSIONES

El presente trabajo tuvo como objetivo principal el diseño de un transmisor de radiofrecuencia capaz de operar tanto en UHF (banda de radioaficionados en 434 MHz) como también en banda S (banda en 2.4 GHz para aplicaciones Industriales, Científicas y Médicas).

En primer lugar, se analizó el estado del arte de este tipo de sistemas y se tuvieron como guía distintas misiones satelitales de similares características. Además, se definieron las bandas de frecuencia a utilizar siguiendo las recomendaciones y regulaciones impuestas por la Unión Internacional de Comunicaciones y se realizó un cálculo detallado de cada uno de los enlaces propuestos con el fin de analizar la factibilidad de llevar a cabo el diseño con componentes comerciales de bajo costo. Para dicho cálculo, se presentaron posibles esquemas de estaciones terrenas para la recepción de los

datos y transmisión de telecomandos estimando la calidad y desempeño de las mismas.

Finalmente, a partir de un software de diseño de circuitos impresos se realizó un primer prototipo de la placa de telemetría en base a un PCB multicapa con miras a conseguir un buen desempeño en cuanto a compatibilidad electromagnética.

REFERENCIAS

- [1] <http://www.cubesat.org>
- [2] KLOFAS B., ANDERSON J. **A Survey of CubeSat Communication Systems**. The AMSAT Journal, a publication of The Radio Amateur Satellite Corporation. 2008.
- [3] KLOFAS B., ANDERSON J. **A Survey of CubeSat Communication Systems: 2009-2012**. CubeSat Developers Workshop, Cal Poly State University, San Luis Obispo, California. 2013.
- [4] BALL M. **The Small Satellite Revolution: More Earth Observations at a Lower Cost**. Sensors and System. 2013.
- [5] KONECNY G. **Small satellites - A tool for Earth observation?**. Proc. IISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 2004.
- [6] UIT. **Reglamento de radiocomunicaciones**. Ginebra, Suiza. 2016.
- [7] ENACOM. **Cuadro de atribución de bandas de frecuencia de la República Argentina (CABFRA)**. Argentina. 2018.
- [8] ENACOM. **Resolución 2018-581-APN-MM. Bandas de Frecuencia de Uso Compartido**. Argentina. 2018.
- [9] PROAKIS J. G. **Digital Communications**. McGraw-Hill Education, 5th edition. November 2007.
- [10] http://www.ti.com/lstds/ti/wireless/connectivity/sub-1_ghz/overview.page
- [11] <https://www.onsemi.com/PowerSolutions/parametrics/16860/products>
- [12] <https://www.analog.com/en/products/rf-microwave/integrated-transceivers-transmitters-receivers.html>
- [13] <https://www.silabs.com/products/wireless>
- [14] <https://www.qorvo.com/products/amplifiers>
- [15] http://www.skyworksinc.com/Category/613/Wi-Fi_Connectivity_Amplifiers
- [16] <http://www.ti.com/microcontrollers/msp430-ultra-low-power-mcus/overview.html>
- [17] UIT. **RECOMENDACION UIT-R P.618-13. Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas de telecomunicación Tierra-espacio**. Ginebra, Suiza. 2018.
- [18] JAAKKO JUSSILA. **S-band Transmitter for Aalto-1 Nanosatellite**. Aalto University School of Electrical Engineering. Espoo, Finland. 2013.
- [19] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc1200.pdf>
- [20] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2500.pdf>
- [21] <https://www.qorvo.com/products/p/RFPA5218>
- [22] <http://www.ti.com/product/MSP430F6659>
- [23] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tcan4550.pdf>
- [24] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps25221.pdf>
- [25] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps2557.pdf>
- [26] <https://www.pumpkinspace.com>