

Memoria técnica del Proyecto FOSSA-1

Julián Fernández

FOSSA / AMSAT EA

Contents

1. Introducción y misión	4
2. Hardware	5
2.1 Estructura	5
2.2 Sistemas desplegables.....	6
2.3 Sistema de alimentación (EPS)	6
2.4 Sistema de telecomunicaciones y procesamiento (OBC).....	8
2.5 Sistema de detección y control de posición pasivo	10
2.6 Payload experimental.....	10
2.7 Despliegue en órbita	11
3. Modulación RF.....	11
3.1 Descripción general downlink	11
3.2 Downlink LoRa.....	11
3.3 Uplink	12
3.4 Presupuesto de enlace Downlink (satélite transmitiendo).....	12
3.5 Presupuesto de enlace Uplink (estación de tierra transmitiendo)	13
4. Estaciones de Tierra	14
4.1 Estaciones LoRa	14
4.2 Estaciones de tierra convencionales	14
4.3 Radioaficionados	14
5. Software	15

1. Introducción y misión

FOSSA-1 es un pico-satélite (<1kg) desarrollado en colaboración con AMSAT-EA por un grupo de radioaficionados y estudiantes. El satélite FOSSA-1 tiene una gran variedad de misiones entre las que destacan las siguientes:

La primera es el desarrollo general de la miniaturización de sistemas electrónicos y mecánicos para aplicaciones de uso espacial, el satélite es un pocketcube 1P con un tamaño de aproximadamente 6x5x5cm por lo que el espacio es muy restringido. FOSSA-1 también será el satélite más pequeño del mundo en usar paneles solares desplegables. Hasta la actualidad solo se han lanzado 4 satélites de este tamaño abordo del satélite Unisat-5 en 2014 para su posterior despliegue, sin embargo, existen decenas de satélites similares en tamaño a FOSSA-1 con lanzamientos previstos para 2018-2019.

La segunda es la promoción y fomento de estudiantes y jóvenes a nivel internacional en el sector aeroespacial mediante su involucramiento en el desarrollo del proyecto. El satélite se está desarrollando en colaboración de alumnos de todo el mundo y les dará la posibilidad de experimentar con el diseño y manufactura de sistemas espaciales. Un sector del satélite estará puramente dedicado a experimentos desarrollados por estudiantes para su posterior análisis en tierra.

La tercera es la puesta a prueba y experimentación de un nuevo tipo de modulación por radiofrecuencia, esta nueva modulación chirp LoRa de espectro ensanchado incrementa enormemente el rango de comunicación del satélite usando potencias menores a 100 mW, reduciendo así sus posibles interferencias emitidas a otros satélites.

Adicionalmente esta nueva tecnología reduce el consumo energético y simplifica la recepción de telemetría desde el satélite en estaciones de tierra.

La tecnología LoRa es muy común para aplicaciones relacionadas con el internet de las cosas (IoT) para redes terrestres, sin embargo, solo se ha probado con éxito 1 vez desde el espacio a bordo de satélite NORSAT-2 a principios de 2018.

Este sistema permitirá la recepción de telemetría del satélite usando componentes electrónicos fácilmente encontrados por menos de 5\$ con antenas compactas (ej. monopolo $\frac{1}{2}$ onda)

Adicionalmente el satélite transmitirá telemetría en modulaciones destinadas a radioaficionados como RTTY que se podrán recibir con un SDR, de esta manera esta satélite expandirá el acceso a telecomunicaciones en órbita a miles de estudiantes e individuos.

El lanzamiento planificado se realizará a finales de 2019 en el cual el satélite se lanzará en una órbita polar a 375 km, garantizando una vida orbital de menos de 12 meses.

2. Hardware

2.1 Estructura

El satélite está constituido internamente por la batería, la pila de PCBs y los soportes estructurales en la sección superior e inferior del satélite. Estos soportes están mecanizados con aluminio y tienen la función principal de unificar los paneles exteriores del satélite y absorber parte de la carga estructural. Estos paneles que directamente contienen las células solares y los componentes electrónicos en su interior están fabricados con FR4 de 1,6mm. Existen 4 barras M3 que unen la totalidad de las estructuras electrónicas y mecánicas axialmente.

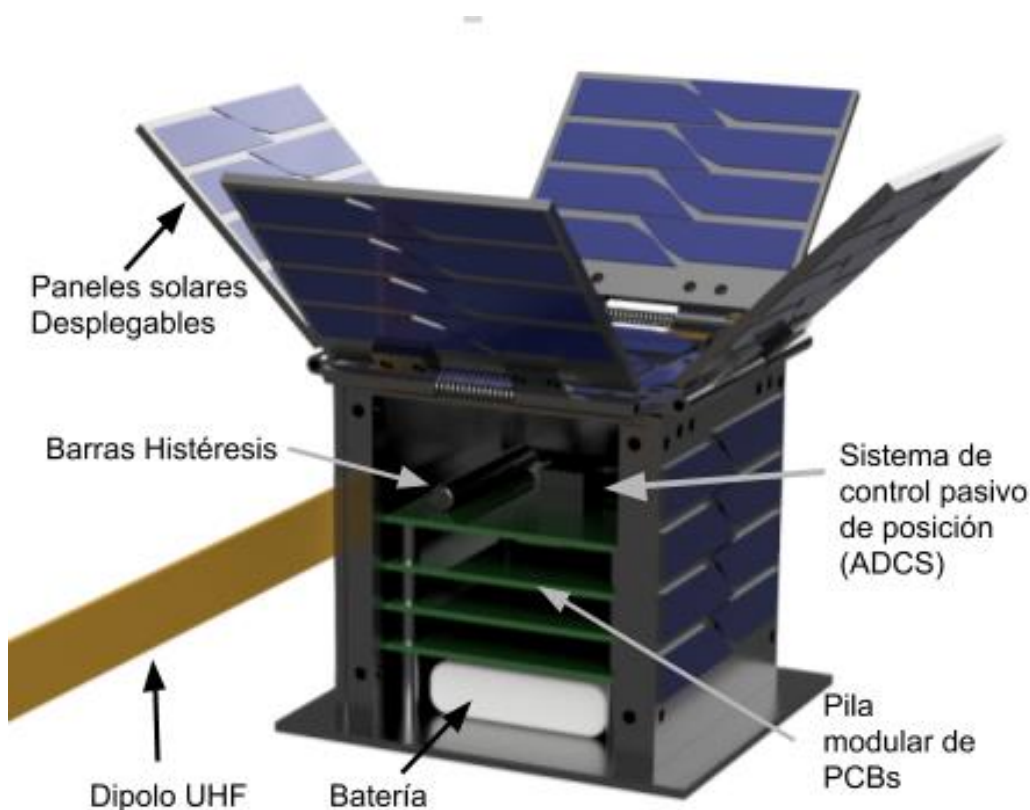


Figura 1 Estructura Interna

Todos los cálculos de carga estructural están simulados tomando en consideración una aceleración de 8G axial y 2G Lateral, correspondiente a la aceleración nominal de nuestro vehículo de lanzamiento planificado.

Internamente los 4 paneles laterales cuentan con una capa de MLI (Multi-Layer Insulation) formada por mylar y una manta aislante de Aerogel. La placa inferior de FR4 1,6 mm del satélite se usará como apoyo en los raíles del lanzador durante el lanzamiento. El satélite tiene un peso de 250g y ocupa un volumen de 62mm x 64mm x 55mm en estado plegado como se muestra en los planos estructurales.

2.2 Sistemas desplegables

El satélite cuenta con 2 estructuras desplegables; la antena y los paneles solares. Ambos funcionan conjuntamente con la intención de simplificar el diseño, de tal manera que el despliegue de los paneles solares implica el despliegue de la antena. El uso de paneles solares desplegables en un satélite con una superficie tan reducida aumenta significativamente la energía usable, FOSSA-1 será el satélite más pequeño en usar paneles solares desplegables.

La antena UHF del satélite se encuentra envuelta alrededor del satélite durante el lanzamiento con las placas solares plegadas sobre ella, manteniéndola en posición. La antena está formada por secciones de cinta métrica que automáticamente se despliegan al no estar retenidas.

Los paneles solares están conectados a la estructura del satélite mediante una serie de bisagras mecanizadas por electroerosión que limitan su ángulo de giro máximo a 45°, entre ellos existen 2 muelles de torsión redundantes que ejercen la fuerza necesaria para desplegar los paneles. Los paneles están retenidos durante el lanzamiento por 2 líneas redundantes de nylon que envuelven la totalidad de los paneles. Estas 2 líneas de nylon son derretidas por una serie de resistencias activadas por un temporizador tras el despliegue en órbita.

Un micro-interruptor confirmará el despliegue de los paneles solares y la antena, en el caso contrario el satélite entrará en un estado de emergencia en el cual realizará procedimientos con la intención de desplegar los paneles solares. En el caso de que este fuera un fracaso, el satélite está diseñado para operar de manera reducida usando una menor cantidad de energía desde los paneles no desplegables.

Al no estar la antena desplegada se tendrá que realizar contacto con el satélite desde una antena parabólica de alta ganancia.

2.3 Sistema de alimentación (EPS)

El sistema de alimentación del satélite está compuesto por las siguientes partes:

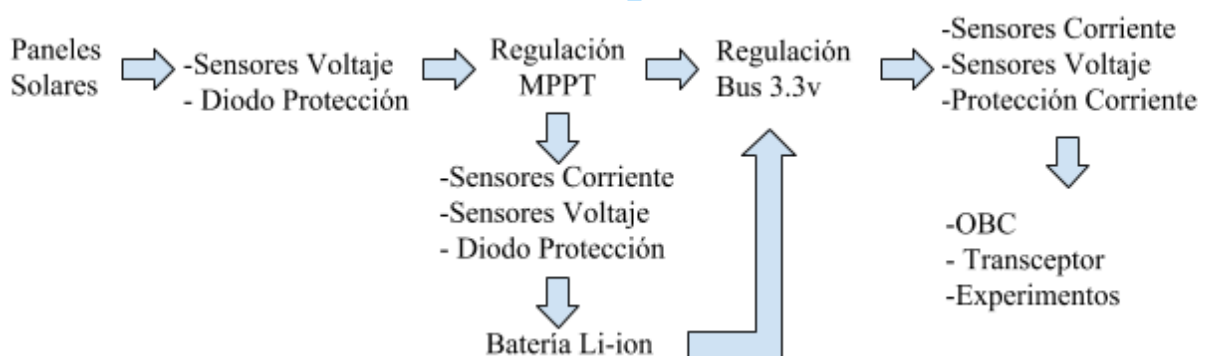


Figura 2 Diseño del sistema de alimentación

Paneles solares - Un total de 100 células solares están situadas en el exterior del satélite, divididas en paneles de FR4, de los cuales 4 son desplegables. Las células solares usadas en el satélite son células TrisolX 160701 con 28% de eficiencia y las siguientes características:

Voltaje (Circuito Abierto)	Voltaje (Potencia Máxima)	Corriente (Potencia Máxima)	Coef. V Temp (Potencia Máxima)
2.62 V	2.33 V	14.6 mA	-6.1 mV / °C

Estas células están soldadas directamente a los paneles PCB de FR4 con estaño de baja temperatura mediante reflow. Una capa de epoxi de baja desgasificación protege a las células solares interiores de los paneles desplegables contra los arañazos de la antena en situaciones de vibración.

Las células solares están conectadas en paralelo entre ejes correspondientes (X, Y, Z) usando diodos de bloqueo para evitar perder energía debido a la resistencia interna de las células solares, esto devuelve un voltaje nominal de 1,95V a los tres reguladores MPPT debido a la caída de tensión en los diodos. De esta manera se maximiza la energía regulada por los MPPT entre ejes cuando alguno de los paneles se encuentra en la sombra.

La totalidad de los paneles solares generan una media de 604 mW a 1,95 V en cualquier momento dado durante el periodo no eclipsado de la órbita.

Regulación MPPT - El satélite cuenta con un controlador de carga MPPT (Seguidor Punto de Máxima Potencia), este sistema regula la carga de la batería controlando el punto en el que los paneles solares producen la mayor cantidad de energía, de esta manera se maximiza la eficiencia de dichos paneles solares.

Los controladores MPPT en uso son los SPV1040 de STMicroelectronics, son reguladores monolíticos step-up de bajo voltaje desde 0,3 V a 5,5 V. Estos dispositivos tienen una eficiencia de hasta el 95% y cuentan con protección de corriente, voltaje y temperatura.

Los tres circuitos MPPT SPV1040 están conectados a su correspondiente eje de paneles solares y tienen sus salidas conectadas a la batería Li-ion mediante un circuito de control de carga que restringe su carga en ciertas condiciones establecidas por el OBC (ej. Temperatura baja). Las salidas de los circuitos MPPT SPV1040 están también conectadas al regulador de voltaje para el bus común de 3.3 V, de esta manera en el caso de un fallo de la batería el satélite seguiría operando con los paneles solares. Cuando el satélite está en el periodo eclipsado de la órbita, la batería directamente alimenta al regulador de voltaje.

Batería Li-ion - El satélite utiliza una batería de ion de litio como dispositivo para almacenar la energía sobrante procedente de los paneles solares durante el periodo no eclipsado de la órbita y alimentar al satélite durante el periodo eclipsado. Se eligió una batería de ion de litio debido a su auto descarga reducida y su mayor densidad de energía comparado con otras tecnologías como el níquel-cadmio. La batería tiene una capacidad de 1350 mAh y un voltaje nominal de 3,7 V.

La batería se carga mediante flotación de voltaje a 3,9 V a diferencia de su voltaje de carga nominal de 4,2 V, con la intención de incrementar sus ciclos usables. La

capacidad alta de 1350 mAh se eligió para incrementar el margen de descarga de la batería en temperaturas bajas. La carga de la batería se restringe por el OBC en ciertas situaciones medidas por los sensores de voltaje, temperatura o corriente como puede ser una bajada de temperatura o sobrecarga. La batería en ningún caso se descargará a menos de 3.3 V, a partir de 3.7 V se empieza a ralentizar al ciclo de transmisión del satélite y al alcanzar los 3,4 V se cesará completamente de transmitir hasta alcanzar un voltaje superior.

La batería se encuentra contactando físicamente con el regulador de voltaje y el transceptor del satélite, de esta manera se puede reutilizar la energía perdida en calor de estos componentes para mantener la batería a un nivel de temperatura más cómodo.

Regulación bus 3.3 V - El satélite cuenta con un bus común de 3.3 V para todos los sistemas electrónicos, como ya se ha mencionado este se alimenta directamente de la batería o de los controladores de carga MPPT. De esta manera el bus puede funcionar en caso de un fallo de la batería o en el caso de no recibir corriente desde los controladores de carga.

El regulador de voltaje usado es un LDO TC 1262 de voltaje fijo con bajo voltaje de deserción. Gracias al bajo voltaje de deserción el bus podrá seguir operativo hasta alcanzar un voltaje de 3.36v en la batería, que equivale a aproximadamente 85% de su carga usada. Se decidió usar un regulador de voltaje lineal debido a su simplicidad y similitud en eficiencia a un regulador por conmutación para reducir el voltaje de 3,9 V a 3,3 V. Adicionalmente el uso de un regulador por conmutación introduce el riesgo de causar interferencias en ruido a los sistemas electrónicos.

Sensores y sistemas de protección - El satélite utiliza una serie de sensores de voltaje, temperatura y corriente para monitorizar el sistema de alimentación, estos datos procedentes de los ADCs integrados o sensores I2C son recibidos por el procesador y son analizados para su posterior control de carga y envío como datos de telemetría. Los voltajes y corrientes del bus, la batería y cada eje individual de paneles solares son medidos por sensores INA 260 y los ADC integrados del procesador. Varios sensores de temperatura TMP100 existen en el interior y exterior del satélite para controlar el proceso de carga de la batería.

2.4 Sistema de telecomunicaciones y procesamiento (OBC)

El procesador central de satélite es un Atmega 328P-AU, un procesador muy común en microcontroladores de pruebas (Ej. Arduino UNO) por lo que es una opción ideal para el desarrollo de pruebas por parte de alumnos con el IDE de arduino.

El transceptor en uso es el SX1278 de Semtech¹, capaz de usar la modulación LoRa y FSK que requerimos, este se comunica con el procesador mediante una interfaz SPI. El transceptor utiliza un oscilador TCXO de 32 MHz que compensa automáticamente por los cambios de temperatura.

Un cable U. FL conecta el transceptor a la antena. La antena está construida usando cinta métrica debido a su tendencia natural a desplegarse y su conducción eléctrica, es una antena dipolo calibrada a la frecuencia asignada. El sistema tiene una impedancia de

50 Ohmios. Se eligió una antena dipolo debido su ganancia cuasi omnidireccional y tamaño compacto y simple.

El diagrama de radiación de la antena es el siguiente:

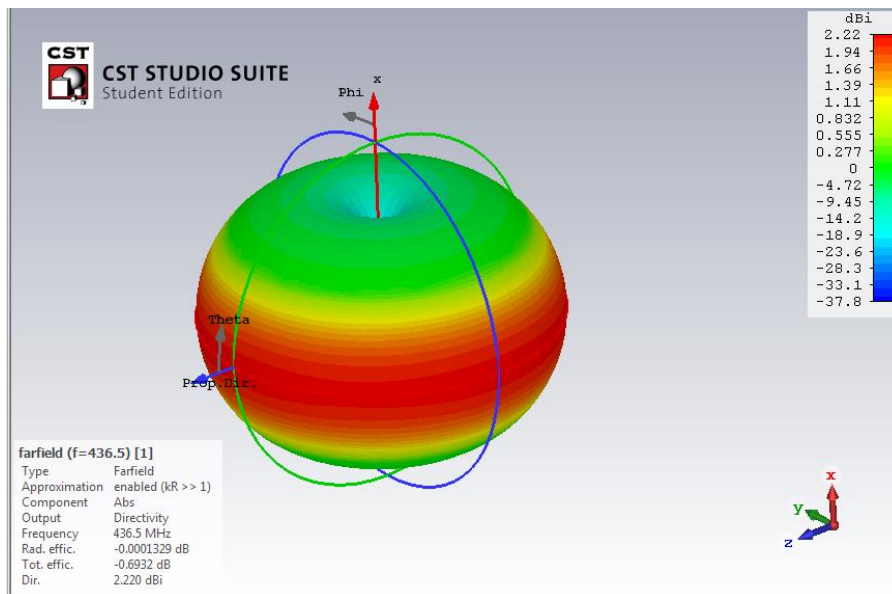


Figura 3 Diagrama 3D de Radiación

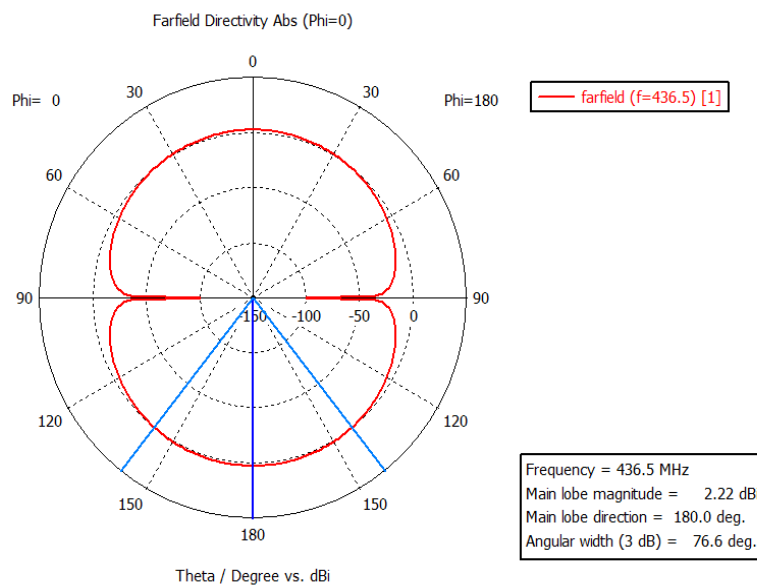


Figura 4 Diagrama de radiación, theta/grados vs dBi

El transceptor y el procesador reciben una alimentación protegida por un circuito de interrupción de sobrecarga monitorizada por un sensor de corriente y tensión INA 260, adicionalmente se monitoriza la temperatura interna del Atmega 328P-AU y exterior de un TMP100.

El procesador está protegido contra los SEU (Single Event Upsets) por un watchdog MAX 6369 que resetea el sistema. El procesador realiza pruebas de memoria

periódicamente entre la memoria de programa y el EEPROM para comprobar si se han producido bit-flips.

El procesador está igualmente protegido de los SEL (Single Event Latchup) mediante un circuito de corriente constante que forzara un reseteo en la fuente de alimentación si se detecta un SEL.

2.5 Sistema de detección y control de posición pasivo

Se decidió usar un sistema de control de posición pasivo debido a su simplicidad comparado con un sistema activo. La misión no requiere control de posición específico debido a su uso de una antena omnidireccional, la única función del sistema de control pasivo es controlar la rotación del satélite respecto al campo electromagnético de la tierra.

Para esto, FOSSA-1 emplea una serie de imanes de neodimio que se atraen pasivamente al campo electromagnético de la tierra. El uso de este sistema puede crear una oscilación al variar con el campo electromagnético de la tierra, debido a esto, FOSSA-1 utiliza una serie de materiales de histéresis para amortiguar este efecto.

Los imanes están situados tomando en consideración la desviación electromagnética en efecto sobre Europa, de esta manera podemos asegurar que la máxima ganancia de la antena se podrá usar sobre Europa y más precisamente en España. Esto no significa que otros países no tengan la posibilidad de usar el satélite con esa ganancia específica ya que la variación es mínima, solo se asegura que estará en efecto sobre Europa.

El satélite cuenta con un sistema de detección de posición basándose en los siguientes datos:

- Voltajes y corrientes de cada panel solar
- Información de un magnetómetro HMC5883L
- Información de un sensor solar experimental CMOS

Esta información junto con cálculos de mecánica orbital nos permitirá calcular información aproximada sobre la posición del satélite relativo al sol y el campo electromagnético de la tierra.

2.6 Payload experimental

Uno de los PCBs de la pila central el satélite está completamente dedicado a experimentos diseñados y posteriormente analizados por alumnos, este se basa en un procesador Atmega 8-bit AVR que remite la información mediante I2C al OBC. Este payload cuenta con una serie de sensores entre los que destacan:

- Acelerómetro y giroscopio MPU6050
- Magnetómetro HMC5883L
- Sensores de temperatura TMP100

Este sistema es completamente independiente al resto de sistemas del satélite y en el caso de su fallo no se vería en peligro la misión integral de FOSSA-1. El procesador central de estos experimentos cuenta con sus propios sistemas independientes de protección contra los SEU (Single Event Upsets) y los SEL (Single Event Latchups).

2.7 Despliegue en órbita

El satélite se desplegará en órbita mediante el uso de un contenedor común de Pocketqubes desarrollado por un bróker de lanzamiento similar a Alba Orbital² o Gauss³. Este está compuesto por un raíl en el que se deslizan los pocketqubes. 2 micro interruptores redundantes están situados en el inferior de satélite, tienen la función de conectar la batería una vez el satélite desplegado.

3. Modulación RF

3.1 Descripción general downlink

Como se ha mencionado previamente, el transceptor del satélite está basado en un SX1278, capaz de transmitir en FSK, LoRa, OOK y GFSK. El satélite transmitirá periódicamente en un bucle información básica sobre el estado de los sistemas del satélite y su identificación. Esta información incluye:

- Voltaje y corriente batería
- Voltaje y corriente paneles solares
- Estado del procesador
- Numero de reinicios

Esta información se transmitirá desde el satélite alternando entre las 2 siguientes modulaciones:

1. Modulación FSK RTTY en formato Baudot ITA2 con 45 baudios y shift 183Hz con designador ITU 270H0 F1B
2. Modulación LoRa espectro ensanchado a 180 bps y 125 kHz de ancho de banda con designador ITU 125K0 KX1D

Las transmisiones se realizarán con una potencia de 100mW desde el transceptor y con un EIRP total de 22.15dBm (no incluye pérdidas de cable o conexiones).

3.2 Downlink LoRa

La modulación LoRa es un nuevo tipo de modulación desarrollada por Semtech¹ que se basa en la tecnología “Chirp spread spectrum” que utiliza señales sinusoidales cuya frecuencia varía linealmente con el tiempo dentro de un espectro de banda ensanchado (En nuestro caso 125kHz).

Este nuevo tipo de modulación presenta una serie de ventajas comparado con otras modulaciones más convencionales como el GFSK, entre ellas destacan:

- Alta sensibilidad de recepción (-136 dB)
- Alta tolerancia a interferencias
- Bajo consumo
- Largo alcance a bajas potencias
- LoRa permite la recepción de datos de telemetría del satélite usando antenas básicas y compactas.

La modulación LoRa es muy común en el sector del “Internet de las Cosas” siendo el medio principal de telecomunicaciones en redes como LoRaWAN⁴ o The Things Network⁵.

Hasta la actualidad existen miles de diferentes dispositivos capaces de decodificar la modulación LoRa. Adicionalmente estamos desarrollando software para poder decodificar LoRa usando un SDR similar a un Funcube o RTL2832 y un ordenador.

Este nuevo tipo de modulación sólo se ha probado en órbita abordo del satélite NORSAT-2 a principios de 2018, sin embargo varios satélite se están desarrollando con la intención de usar LoRa como su principal modulación de telemetría.

La frecuencia portadora estará sujeta a una variación de +/- 10 kHz debido al efecto Doppler, LoRa es capaz de soportar una variación de hasta el 20% de su ancho de banda por lo que el uso de 125kHz permitiría una variación de 25 kHz en la frecuencia portadora.

3.3 Uplink

El satélite acepta 2 tipos de modulaciones de uplink por parte de radioaficionados y por parte del operador del satélite para el telecomando del satélite en ambas modulaciones, estas son:

1. Modulación FSK con +/- 5 kHz de desviación a 1,2 kbps y designador ITU 10K0 F1D
2. Modulación LoRa espectro ensanchado a 180 bps y 125 kHz de ancho de banda con designador ITU 125K0 KX1D

Ambas modulaciones pueden ser utilizadas por radioaficionados, una serie de comandos estarán disponibles al público para su experimentación. Estos simplemente devolverán datos como el RSSI recibido o responderán con el indicativo del satélite.

3.4 Presupuesto de enlace Downlink (satélite transmitiendo)

Altitud órbita= 375 km

Distancia en horizonte= 2186 km

Frecuencia = 435MHz

Potencia Tx= 20dBm

Ganancia Antena Tx = 2.15dBi

Pérdida de espacio libre a $0^\circ = 152 \text{ dB}$
Pérdida de espacio libre a $90^\circ = 136.69 \text{ dB}$
Sensibilidad Rx LoRa = -136 dBm
Sensibilidad Rx FSK = -119 dBm
Ganancia antena Rx (Yagi 8 elementos) = 10 dBi
Ganancia antena monopolo = 0 dBi

Margen LoRa a 0° con yagi = 16.15 dB
Margen Lora a 0° con monopolo = 6.15 dB
Margen FSK con yagi a $0^\circ = 1.15 \text{ dB}$ (Se recomienda el uso de un LNA para incrementar margen fading.
Margen FSK con monopolo $0^\circ = -8.85 \text{ dB}$ (Se requiere LNA para recibir con antena monopolo)

Margen LoRa con yagi a $90^\circ = 31.46 \text{ dB}$
Margen LoRa con monopolo a $90^\circ = 21.46 \text{ dB}$
Margen FSK con yagi a $90^\circ = 14.46 \text{ dB}$
Margen FSK con monopolo a $90^\circ = 4.46 \text{ dB}$

3.5 Presupuesto de enlace Uplink (estación de tierra transmitiendo)

Potencia Tx = 30 dBm
Ganancia Antena Tx (yagi 8 elementos) = 10 dBi
Sensibilidad Rx LoRa = -136 dBm
Sensibilidad Rx FSK = -119 dBm
Ganancia Antena Rx = 2.15 dBi
Pérdida de apuntamiento = 2 dB

Margen LoRa a $0^\circ = 24.15 \text{ dB}$
Margen FSK a $0^\circ = 9.15 \text{ dB}$
Margen LoRa a $90^\circ = 39.46 \text{ dB}$
Margen FSK a $90^\circ = 22.46 \text{ dB}$

(La pérdida de espacio libre no toma en consideración obstáculos o reflexiones y se ha calculado tomando en consideración la velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas en vacío)

Como se puede observar, es posible establecer comunicación con el satélite en todos los casos con antenas simples (ej. Antena monopolo) y con un margen considerable para el fading. Sólo es necesario el uso de un LNA para recibir telemetría RTTY FSK usando una antena monopolo con el satélite a una elevación de 0° .

4. Estaciones de Tierra

4.1 Estaciones LoRa

Gracias al uso de la modulación LoRa, se puede simplificar enormemente la recepción de la telemetría del satélite con antenas monopolo compactas como se ha podido demostrar en el presupuesto de enlace.

Los módulos LoRa son muy comunes en el mercado de componentes electrónicos y se pueden adquirir por menos de 5€ en internet, estos módulos acoplados con un microcontrolador Arduino UNO y un cable que actúa como antena, sería capaz de recibir datos de telemetría desde FOSSA-1. Esto expande significativamente el acceso a telecomunicaciones espaciales para centros educativos.

Nuestra intención es promover este uso de FOSSA-1 como herramienta para motivar y enseñar a una nueva generación de ingenieros.

Los datos de telemetría de FOSSA-1 en LoRa se podrán también recibir usando tecnología existente como los SDR usando nuestro software para decodificar LoRa. Esta información se podrá subir a una base de datos pública y común.

4.2 Estaciones de tierra convencionales

El acceso al satélite para funciones críticas como su apagado se realizará siempre usando la modulación FSK debido a su mayor grado de familiaridad y desarrollo comparado con LoRa, este se podrá realizar desde estaciones portables con bajas potencias de emisión como se ha demostrado en el presupuesto de enlace.

4.3 Radioaficionados

Se eligió específicamente la modulación RTTY 45 debido a su uso actual en la tecnología de radioaficionados, este asegura que miles de radioaficionados alrededor del mundo tendrán acceso a la telemetría de FOSSA-1. Esta información se podrá decodificar con una amplia gama de tecnología existente o usando SDRs comunes como el RTL2883 con software como FLDIGI⁶ o MMTTY⁷.

De esta manera podemos garantizar que tendremos estaciones de tierra disponibles para recibir su información en cualquier momento de su órbita.

5. Software

Como se ha mencionado anteriormente, el satélite cuenta con varias funciones integradas en el satélite que aseguran su correcto funcionamiento. Una de estas es la comprobación periódica de la información guardada en la memoria de programa comparándola con la guardada en el EEPROM.

El código del satélite está programado en un bucle en el que se transmite periódicamente en las distintas modulaciones. Al ser semi-dúplex el receptor, dentro del bucle existen periodos donde el transmisor está a la escucha para comandos.

El satélite nunca transmitirá información que no se haya solicitado mediante un comando a excepción de la transmisión periódica de su estado general para su localización.

6. Índice de figuras

Figura 1 Estructura Interna	5
Figura 2 Diseño del sistema de alimentación.....	6
Figura 3 Diagrama 3D de Radiación	9
Figura 4 Diagrama de radiación, theta/grados vs dBi	9

7. Bibliografía

1. Semtech - (<https://www.semtech.com/>)
2. Alba Orbital - (<https://www.albaorbital.com/>)
3. Gauss SRL - (<https://www.gaussteam.com/>)
4. LoRaWAN - (<http://lorawan.es/>)
5. TheThingsNetwork - (<https://www.thethingsnetwork.org/>)
6. FLDIGI - (<https://sourceforge.net/projects/flidigi/>)
7. MMTTY - (<http://hamsoft.ca/pages/mmtty.php>)