



TEPEU-1: Misión espacial latinoamericana con fines científicos y de validación tecnológica

TEPEU-1: Latin American space mission for scientific and technological validation

Mario Alberto Mendoza-Bárceñas¹, Rafael Prieto Meléndez², Omar Álvarez-Cárdenas³,
Javier Arellano-Verdejo⁴, Alejandro Padrón-Godínez^{2,5,*},

¹ Centro de Desarrollo Aeroespacial, Instituto Politécnico Nacional, Ciudad de México, México

² Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX-México

³ Facultad de Telemática, Universidad de Colima, Colima, Colima, México

⁴ El Colegio de la Frontera Sur, Estación para la Recepción de Información Satelital ERIS, Chetumal, Quintana Roo, México

⁵ Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla-México

*Autor de correspondencia: alejandropadron@icat.unam.mx

RESUMEN— El presente trabajo muestra el diseño conceptual de la primera misión del Programa Espacial TEPEU, estará basada en el desarrollo de un satélite pequeño de órbita baja con un objetivo doble. Primero, demostrar las capacidades institucionales latinoamericanas para la integración de grupos académicos interdisciplinarios con proyectos afines mediante la planeación, desarrollo y construcción de un satélite tipo Cubesat unitario que orbitará la Tierra, así como la integración de una red de estaciones terrenas basada en infraestructura de radio aficionados para la recepción de datos y telemetría del satélite en órbita. Segundo, desde el punto de vista científico, con las mediciones obtenidas en la instrumentación a bordo, se desarrollarán modelos matemáticos y computacionales que describan fenómenos naturales que ocurren en la tierra y su atmósfera, relacionados con la estimación de fenómenos geofísicos y su correlación con el comportamiento de capas atmosféricas. En el apartado técnico, se trabaja en establecer características de la instrumentación y equipos a implementar, tanto en el segmento espacio como con el segmento tierra. En el segmento espacial, se trabaja en la definición del módulo de carga útil, contendrá sensores comerciales y experimentales, tales como un magnetómetro comercial y una sonda de Langmuir tipo parche, desarrollado en conjunto con el Laboratorio de Exploración Espacial y Planetaria de la Universidad de Chile. En el caso del segmento tierra, se proyecta, en colaboración con la Federación Mexicana de Radio Experimentadores, federaciones y clubes de radio aficionados en América Latina y otros países, la integración de una red de estaciones terrenas.

Palabras clave— Satélites pequeños, radio aficionado, ionósfera, clima espacial.

ABSTRACT— The present work shows the conceptual design of the first mission of the TEPEU Space Program, which will be based on the development of a small low-orbit satellite with a double objective. First, to demonstrate the Latin American institutional capacities for the integration of interdisciplinary academic groups with related projects through the planning, development and construction of a 1-unit Cubesat satellite that will orbit the Earth, as well as the integration of an infrastructure-based network of earth stations amateur radio for data reception and satellite telemetry in orbit. Second, from the scientific point of view, with the measurements obtained with the instrumentation on board, mathematical and computational models will be developed that describe natural phenomena that occur in the earth and its atmosphere, related to the estimation of geophysical phenomena and their correlation with the atmospheric layers behavior. In the technical section, we work on establishing characteristics of the instrumentation and equipment to be implemented, both in the space segment and ground segment. In the space segment, we work on the definition of the payload module, which will contain commercial and experimental sensors, such as a commercial magnetometer and a Langmuir probe type patch, developed in collaboration with the Space and Planetary Exploration Laboratory (SPEL) from the University of Chile. Meanwhile, in the case of the land segment, the integration of a network of earth stations is planned, in collaboration with the “Federación Mexicana of Radio Experimentadores” (FMRE), federations and amateur radio clubs in Latin America and other countries.

Keywords— Small satellites, amateur radio, ionosphere, space weather.

1. Introducción

TEPEU, en la cosmovisión maya fue un dios del cielo y una de las deidades que participó en los tres intentos de crear a la humanidad. En el contexto del desarrollo

tecnológico actual, TEPEU es el nombre de la misión espacial con fines científicos y tecnológicos impulsada dentro y fuera de México por instituciones de educación superior y de investigación. Sin duda, el lanzamiento y

Citación: A. Padrón, “TEPEU-1: Misión espacial latinoamericana con fines científicos y de validación tecnológica”, *Revista de I+D Tecnológico*, vol. 17, no. 1, pp. (no modificar), 2021.

Tipo de artículo: Original. **Recibido:** 27 de febrero de 2020. **Recibido con correcciones:** 17 de junio de 2020. **Aceptado:** 17 de junio de 2020.

DOI.

Copyright: 2021 A. Padrón. This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

puesta en órbita del satélite ruso Sputnik el 4 de octubre de 1957, representa un referente indispensable para entender el inicio de la carrera espacial en el mundo. Luego de ello, otras potencias mundiales, como Estados Unidos, se sumaron al esfuerzo por alcanzar la conquista de espacio con el lanzamiento del Explorer I, con lo cual los límites han superado los objetivos iniciales de exploración espacial y ahora, se trabaja incluso en planes para la colonización de otros planetas. En este contexto, México tiene una tradición que data de fines de la década de los 50's, donde se incursionó en el diseño y desarrollo de cohetes con fines de exploración de las capas altas de la atmósfera terrestre [1]. La década de los 60's representó para nuestro país una época en la que el desarrollo tecnológico en materia espacial, particularmente en el campo de la cohería tuvo un gran auge, con el lanzamiento de cohetes impulsados incluso con combustible líquido, con tecnología similar a la de los cohetes desarrollados por los alemanes durante la segunda guerra mundial [2]. El campo de las comunicaciones satelitales también tuvo un avance impresionante, teniendo como marco la celebración de los Juegos Olímpicos de 1968, se instaló en el estado de Hidalgo la primera estación de comunicaciones satelitales en México, "Tulancingo-1", a partir de la cual, con el uso de los entonces novedosos satélites comerciales de telecomunicaciones se pudieron realizar transmisiones de televisión a todo el mundo [3]. Luego de ello, debido a diferentes cambios en los paradigmas y políticas del gobierno federal, las instancias creadas para el desarrollo espacial en México, tales como la Comisión Nacional del Espacio Exterior (CONAE) y el Instituto Mexicano de Comunicaciones (IMC) desaparecieron, dejando en el abismo el desarrollo espacial en México, convirtiéndose en un usuario más del mercado tecnológico espacial internacional. No fue sino hasta la década de los 90 cuando en la UNAM, se desarrolló e integró el microsatélite UNAMSAT-B, hasta ahora el primer satélite desarrollado por académicos y estudiantes mexicanos, el cual fue lanzado en septiembre de 1996 y que debido a problemas con el subsistema de suministro eléctrico se declaró perdido para agosto de 1997 [4].

2. Participación latinoamericana en el desarrollo espacial

Brasil ha incursionado desde 1961 al programa espacial con el desarrollo y prueba de cohetes con la

creación de varios institutos para la investigación espacial. En 1993 y 1998 lanzaron satélites de recolección de datos para la adquisición de datos sobre el medio ambiente. La agencia espacial brasileña (AEB) ha firmado acuerdos con China para la colaboración y financiamiento de desarrollos espaciales. La agencia chilena del espacio (ACE) desde 2001 fue creada para desarrollar y expandir el conocimiento del espacio exterior manifestando los beneficios y aplicaciones de la tecnología espacial en sus actividades nacionales [5]. En noticias como la estrella de Panamá, publican los intentos para la creación de la agencia espacial de Panamá, según una experta de la NASA, Erika Podest. Además de la creación de un centro de lanzamiento de satélites mediante alianzas con otros países, mencionó Podest científica en estudios del cambio climático [6].

Actualmente existen proyectos de constelaciones de satélites de órbita baja (LEO, por sus siglas en inglés), creadas por empresas como OneWeb, Amazon y Space X, que desarrollan grandes expectativas en América Latina como modelo de negocio para servicios comerciales. Argentina tiene proyectado lanzar tres satélites en orbitas GEO hasta 2022, pero muchos de sus problemas es la reglamentación a través de sus agencias espaciales [7].

Dado el contexto anterior y en virtud de los cambios en el panorama mundial, resulta crucial la inclusión de México y América Latina en el escenario del desarrollo espacial, sin embargo, esta inclusión se debe asumir a partir de una estrategia que parta de la suma de esfuerzos institucionales y que permita superar limitaciones, así como potencializar los alcances de las iniciativas tecnológicas, apoyándose además en la participación de asociaciones civiles y la iniciativa privada nacional e internacional.

En este sentido, la misión espacial TEPEU-1, coordinada por el IPN y la UNAM, representa una propuesta que, además de los objetivos científicos y tecnológicos que persigue, se ha convertido en un detonante para la integración y participación sinérgica de componentes de la llamada triple hélice: instituciones educativas-sector productivo-sector gobierno, en torno al diseño, desarrollo e integración de una misión espacial con fines de investigación científica y desarrollo tecnológico nacional [8].

La misión espacial TEPEU-1, está diseñada en torno a dos segmentos principales: el segmento espacial y el

segmento terrestre, integrado por elementos comerciales en la mayoría de sus componentes, partiendo de la filosofía de desarrollar un satélite pequeño, funcional y de arquitectura sencilla, que nos permita comenzar la ruta del aprendizaje en el diseño y desarrollo de sistemas espaciales además de la conformación de grupos de trabajo multidisciplinarios e interinstitucionales. El segmento espacial, está constituido por un nanosatélite integrado a partir de los siguientes subsistemas básicos en su plataforma: computadora a bordo, comunicaciones, potencia, estructura y protección térmica.

En cuanto a la carga útil, está integrada a partir de sensores para el registro de temperatura y campo magnético de la ionósfera terrestre, así como un repetidor de señales que será aprovechado por la comunidad de radio aficionados para realizar diferentes experimentos de recepción en tierra. Por su parte, el segmento terrestre, estará integrado por un conjunto de estaciones terrenas distribuidas a lo largo de todo el territorio mexicano, a partir de infraestructuras institucionales, en algunos casos, y en otros, apoyándose en infraestructuras pertenecientes a radio aficionados (con capacidades de enlaces satélites) participantes en el proyecto espacial.

La red de estaciones terrenas permitirá, además de ampliar la cobertura para la recepción de los datos del satélite TEPEU-1 una vez puesto en órbita, también, poder establecer y coordinar esquemas de distribución de datos en todo el territorio de cobertura, para el aprovechamiento futuro de los datos que en las siguientes misiones del programa espacial TEPEU y otras iniciativas científicas y tecnológicas se puedan generar. En los siguientes apartados se describirán los detalles de cada uno de los segmentos que integran a la misión, así como las primeras pruebas de concepto que en torno a su desarrollo se han realizado con efectos de validación tecnológica.

2.1 Zonas de Cobertura

El método para calcular las zonas de cobertura se denomina algoritmo de Longley-Rice y se utiliza para el cálculo de zonas de cobertura de antenas transmisoras en sistemas de radiofrecuencia. El algoritmo calcula la pérdida para ondas electromagnéticas entre las coordenadas del transmisor y del receptor. El algoritmo considera las variaciones de elevación de terreno (perfil)

y las características del suelo (cluster) [9]. La pérdida es calculada para una trayectoria entre la antena del transmisor y la antena del receptor a lo largo de un perfil de la sección transversal del terreno, figura 1.



Figura 1. Trayectoria para el seguimiento de un satélite en órbita.

Este método se toma como referencia ya que la situación en la que calcularemos las zonas de cobertura será mediante el cálculo del ángulo sólido sobre una superficie esférica, bajo un sistema de coordenadas azimut-elevación (polares) y diversas trayectorias. Tomando la propagación de las ondas electromagnéticas entre dos puntos de línea de vista, transmisor-receptor, alejados una distancia espacio-superficie terrestre y ver las pérdidas de potencia por las sobre y subcapas atmosféricas que hay entre estos puntos. Por tal circunstancia se vuelve relevante un sistema de seguimiento automatizado de un punto en el espacio con velocidades angulares grandes en ventanas de entre 5 y 15 minutos, eliminando efectos de ecos, rebotes o fenómenos de resonancia, es decir interferencias.

Así mismo, las estaciones de la red de radio aficionados que podrán registrar los pases y bajar los datos del LEO-TEPEU serán estaciones con este tipo de infraestructura y que puedan distribuir la información hacia los demás nodos. Para poder llevar a cabo esta tarea, hay que tener bien especificados los parámetros en la subcarga útil del pequeño satélite para las frecuencias y potencias que se emplearán.

3. Objetivos de la Misión

Los objetivos generales de la misión TEPEU-1 son los siguientes:

- Demostración tecnológica de las capacidades institucionales nacionales en el diseño e integración de misiones espaciales con fines científicos y de desarrollo tecnológico.

- Validación experimental de una misión espacial integrada a partir de elementos comerciales tipo COTS en el segmento espacio.

Dentro de los objetivos específicos de la misión, se pueden mencionar los siguientes:

- Desarrollo de una metodología propia para el desarrollo de sistemas espaciales basada en estándares de agencias espaciales internacionales y acorde con las capacidades institucionales en el área de desarrollo tecnológico espacial en México.
- Probar sistemas de instrumentación integrados a partir de componentes tipo COTS, particularmente microcontroladores y sensores multivariable.
- Diseñar, integrar y probar a bordo, como parte de la carga útil del satélite, un experimento basado en un repetidor que permita a la comunidad de radio aficionados en México, validar técnicas novedosas de recepción y distribución de datos.
- Desarrollar un esquema de sistema distribuido para el desarrollo del segmento terrestre para la recepción y transmisión de datos, basado en infraestructura de radio aficionado, así como medios para la distribución y almacenamiento de datos para su aprovechamiento en México y otras partes del mundo.

4. Conceptos Básicos de la Misión

En un marco general, la misión TEPEU-1 está siendo diseñada a partir de la metodología de gestión de proyectos espaciales propuesta por PROXIMA SPACE, la cual está basada en el desarrollo de documentos que engloban aspectos metodológicos utilizados por la Agencia Espacial Europea (ESA) y que, de manera general se describe en la figura 2 [10].

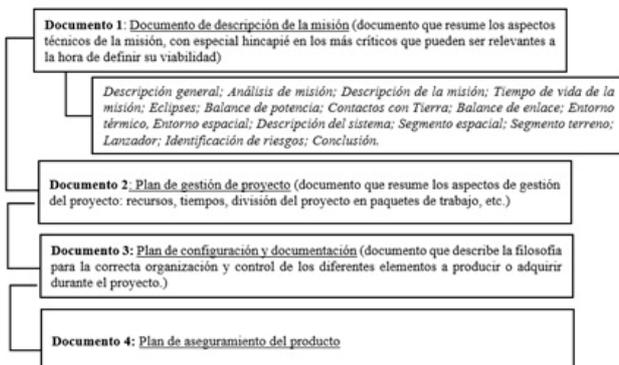


Figura 2. Estrategia de gestión de proyectos espaciales propuesta por PROXIMA SPACE, adoptada para el desarrollo de la misión TEPEU-1.

A partir de la documentación generada con base en la metodología de PROXIMA SPACE, la misión espacial TEPEU-1 se ha concebido a partir de dos segmentos operativos principales: segmento espacio y segmento tierra, de acuerdo con la Figura 3.

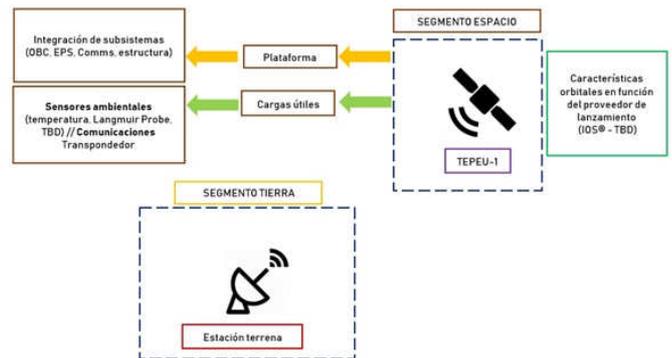


Figura 3. Concepto general de la misión TEPEU-1.

El segmento espacio estará integrado por un nanosatélite tipo cubesat de 1 unidad, orbitando la tierra en una órbita polar circular a 310 [km] de altitud utilizando medios pasivos de control de altitud, el cual tendrá dos cargas útiles principales a bordo, ambas enfocadas a la validación y desarrollo tecnológico. Por un lado, una carga útil estará orientada al registro de algunas variables ambientales, tales como temperatura del aire y campo magnético a partir de sensores comerciales, utilizando técnicas novedosas para su obtención durante la órbita del satélite y que coadyuvarán al diseño de futuros experimentos que buscarán caracterizar el segmento medio de la ionósfera terrestre y estudiar su posible correlación con eventos geofísicos.

La segunda carga útil estará integrada a partir de un “transponder”, el cual permitirá validar esquemas de comunicación propuestos por la comunidad de radio aficionados de México para la recepción de datos satelitales, contribuyendo con ello a mejorar las técnicas para la recepción, almacenamiento y distribución de datos de satélites de órbita baja.



Figura 4. Esquema proyectado de la RALESAT y puntos geográficos de los radioaficionados interesados en participar en la misión TEPEU-1.

En lo que respecta al segmento tierra, este permitirá en una primera instancia, la descarga de los datos registrados en órbita por el TEPEU-1, representando por sí mismo, la oportunidad para realizar ensayos orientados al desarrollo de una red de estaciones terrenas basada en la infraestructura de radioaficionados participantes en el proyecto, figura 4, y que permitirá a futuro, impulsar y establecer las bases para el diseño de un segmento terrestre distribuido, así como de un módulo centralizado de almacenamiento y un esquema de distribución y control de tráfico de datos, cuyas capacidades se pudieran extender hacia otras misiones experimentales espaciales integrado en un esquema denominado Red América Latina de Estaciones Amateur Satelitales (RALESAT).

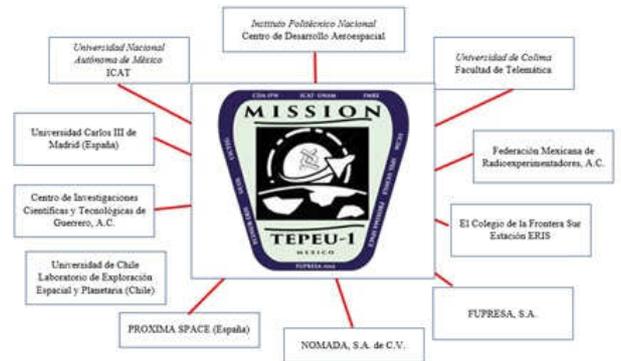


Figura 5. Instituciones participantes de la misión TEPEU-1.

Es importante señalar la participación de instituciones que en torno al diseño y desarrollo de la misión TEPEU-1 se ha detonado no solo en México, sino en otras instituciones internacionales interesadas en participar del proyecto, de acuerdo con la figura 5.

En la figura 6, se detallan los roles de trabajo realizados por cada institución participante en la misión espacial.

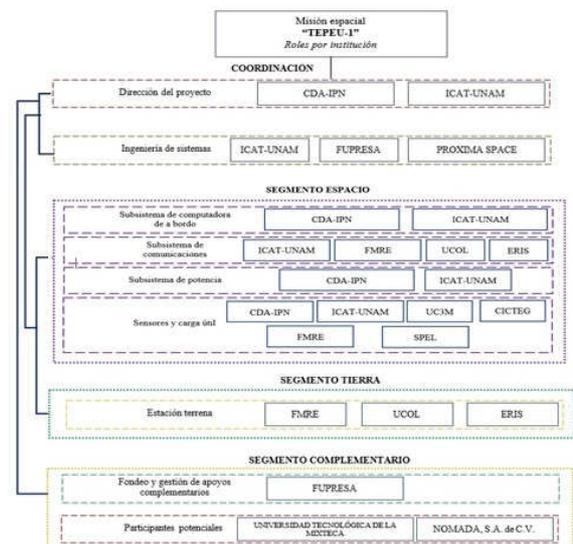


Figura 6. Roles por instituciones participantes en la misión TEPEU-1.

4. Segmento Espacio

El segmento espacio de la misión TEPEU-1 estará integrado por dos bloques principales: plataforma y carga útil. La plataforma estará basada en el bus comercial IOS Old Standard Cubesat de la empresa Inter orbital Systems®, mientras que el módulo de carga útil o

payload, estará basado en tres módulos principales: módulo de adquisición de datos (DAQ), módulo de acondicionamiento y módulo de sensores y equipos experimentales, como se describe en la Figura 7, y en el que destaca la integración de un sensor de temperatura y un magnetómetro para la adquisición de datos del campo magnético terrestre [11].

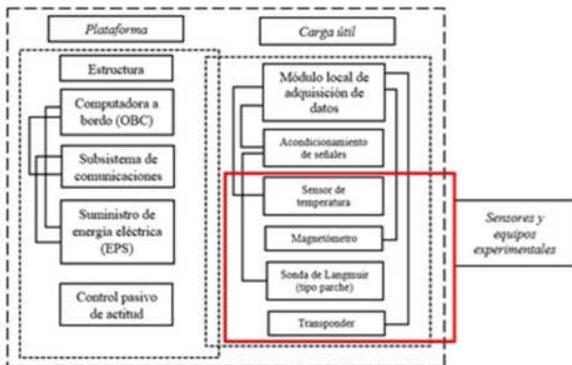


Figura 7. Esquema general de arquitectura para los dos bloques principales de TEPEU-1.

5. Segmento Terrestre

El segmento tierra contará con equipos de comunicación en el intervalo de frecuencias de los 435 a los 438 [MHz] con incrementos de 5 [MHz], mientras que la señal de salida del TEPEU-1 tendrá una potencia estimada de 100 [mW] a 500 [mW]. Un esquema general, mostrado en la Figura 8, describe la arquitectura de la estación terrena para la misión TEPEU-1.

En el esquema de la Figura 8, destacan los elementos generales que debe incluir la estación terrena del proyecto TEPEU-1. Se requerirá de un equipo de cómputo para el seguimiento automatizado (azimut y elevación) de la misión, así como la corrección del efecto Doppler generado por las frecuencias de operación de la misión. Una alternativa será utilizar el programa SatPC32 para atender ambos requerimientos y, adicionalmente permitirá integrar con facilidad varios dispositivos para controlar el sistema de antenas. Con el propósito de tener la estación automatizada, se agrega al SatPC32 una etapa de hardware intermedio que consiste en el equipo Fox Delta Tracker modelo ST2-USB [12] y [13], el cual tiene la ventaja de utilizar el protocolo de intercambio de información de los rotores Yaesu® modelo G-5500 a utilizar en el segmento tierra.

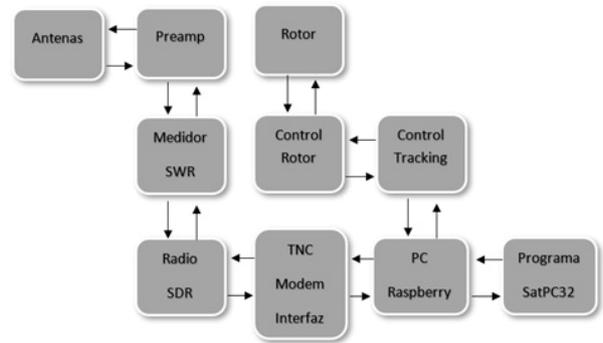


Figura 8. Arquitectura propuesta para la estación terrena para TEPEU-1.

Una vez configurado el SatPC32 en la estación terrena, será posible calcular las efemérides de la misión TEPEU-1 y enviar por conexión USB los valores de azimut y elevación al ST2-USB para que genere los movimientos del rotor Yaesu® G-5500, para que el sistema de antenas logre la recepción de la información enviada por el segmento espacio, desde el inicio de la órbita hasta el final de la misma, sin errores por el seguimiento del TEPEU-1. Simultáneamente, el programa SatPC32 tiene la capacidad de conexión al equipo receptor para hacer los ajustes de la frecuencia de bajada debido al efecto Doppler. Con esta configuración en el SatPC32, y una vez seleccionado el TEPEU-1 para su seguimiento, la estación terrena propuesta tendrá la capacidad de hacer todo el seguimiento y ajustes para recibir toda la información que genere el segmento espacio, sin necesidad de intervención humana, incluso en las órbitas nocturnas o fines de semana.

La calidad de las antenas instaladas en la estación es de vital importancia, ya que permitirán tener una mejor calidad de las señales recibidas, independientemente de la exactitud de seguimiento que ya proporciona el SatPC32 y sus módulos de apoyo descritos. Con base en la experiencia técnica, se sugiere contar con antenas direccionales de polarización circular que tengan al menos 15 elementos en la polarización horizontal y 15 en la vertical, una propuesta ideal es el modelo 436CP30 de la marca M2 que ofrece una ganancia de 15.50 [dBi]. Es conveniente apoyar al sistema de antenas con preamplificadores de bajada instalados directamente en las antenas [14], sin embargo, al utilizar cable coaxial de una longitud no mayor a 15 m de largo y que sean de baja pérdida, es posible omitir el uso de preamplificadores de recepción. Por lo tanto, la línea coaxial podría ser

integrada con el LMR-400 como mínimo, o bien el LMR-600 para garantizar una baja pérdida en la línea de transmisión [15].

Tomando en cuenta estas consideraciones, la estación del segmento tierra ofrecerá la posibilidad operar de manera totalmente automatizada y con la capacidad de recibir cualquier medición del segmento espacio del TEPEU-1 o futuras misiones espaciales. El objetivo será contar con al menos una estación de este tipo, una en Chetumal, la segunda en la UNAM y la tercera en la UCOL. Es importante mencionar que en el segmento tierra, se cuenta con el apoyo de la FMRE y de 24 radio aficionados participantes ubicados en 13 estados de la república mexicana que han mostrado el interés de colaborar con estaciones terrenas con configuraciones que van desde estaciones portátiles, móvil, fija, fija automatiza y remota operada vía internet, lo cual permite asegurar la recepción de la misión TEPEU-1 en todo México.

Los datos provenientes de los sensores a bordo de TEPEU-1, serán almacenados y distribuidos a universidades y centros de investigación que requieran dicha información, utilizando una plataforma de almacenamiento distribuido en la nube denominada PADN.

Como se puede observar en la figura 9, una vez que los datos provenientes del satélite TEPEU-1 han sido capturados por las estaciones de recepción en tierra, estos deberán ser enviados a la PADN. La PADN se encuentra integrada por dos elementos principales; el cliente PADN y la misma PADN.



Figura 9. Plataforma de Almacenamiento Distribuido en la Nube para la misión TEPEU-1.

Cada una de las estaciones terrenas de recepción ubicadas ya sea en México o en otros puntos del planeta, deberá contar con un cliente PADN autorizado para la distribución de los datos adquiridos por el satélite en órbita. Adicionalmente, para garantizar el flujo seguro de la información entre las estaciones de recepción y el sistema de almacenamiento en la nube, cada cliente necesitará contar con un “token” único de acceso a la PADN.

Por su parte, el “core” de la PADN, estará compuesto por un conjunto de servidores de almacenamiento (tantos como se desee o requiera), cuya tarea será almacenar la información enviada por el coordinador general. El coordinador general, será el encargado de validar las credenciales (token) de los clientes, una vez hecho esto, procesará, dividirá y almacenará los datos a lo largo de los nodos de almacenamiento (SS01, SS02, SS03), garantizando así la redundancia, seguridad y disponibilidad de la información para los usuarios finales. Con el objetivo de evitar generar un cuello de botella del lado del coordinador, se ha propuesto el uso de un sistema de balance de carga elástico, esto es, a mayor número de peticiones por parte de los clientes, más recursos por parte del coordinador son puestos a disposición.

Es importante señalar que los nodos de almacenamiento no serán nodos redundantes, ya que estos no contienen copias exactas unos de otros, en su lugar, se usará un esquema de partición de datos, lo cual permitirá distribuir diversas secciones de los archivos (*slices*) a lo largo de los nodos de almacenamiento, por lo tanto, solo serán necesarios un subconjunto de estos nodos para recuperar la información original aumentando así la robustez del PADN [16].

6. Pruebas de Concepto y primeros resultados

Desde 2016 a la fecha, se han realizado pruebas de concepto a bordo de misiones suborbitales basadas en globos estratosféricos y en parapente, gracias a las cuales se han podido probar y evaluar diversos esquemas de instrumentación basados en componentes de grado comercial, tales como microcontroladores, sensores, transceptores, módulos de comunicación, baterías, etc., los cuales en un futuro podrán ser considerados para su inclusión como parte de la arquitectura final de subsistemas del nanosatélite TEPEU-1.

En el caso de las misiones suborbitales en globos estratosféricos, en colaboración con la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se han realizado dos experimentos a bordo de globos de gran altura. El primero de ellos en noviembre de 2016 y el segundo en abril de 2018, en los cuales se alcanzaron alturas de 35 y 33 [km], respectivamente, Figura 10.



Figura 10. Pruebas de concepto a bordo de globos estratosféricos y parapente. a) Lanzamiento de la plataforma CSM-2018-A desde el parque Explora de León, Gto, en 2018. b) Módulo PEGASUS-4 a bordo de un parapente en sobrevuelo en la zona de los valles centrales de Oaxaca en abril de 2019.

A partir de estos vuelos experimentales en globo, realizados en León, Guanajuato, figura 11, se ha podido validar en ambiente de espacio cercano y bajo condiciones de aceleración, que han alcanzado en promedio las 3g y temperaturas cercanas a los $-60[^\circ\text{C}]$, figura 12, el adecuado desempeño de una computadora de vuelo basada en el microcontrolador comercial PIC32MX340F512H, para el control lógico a bordo, así como para el registro y almacenamiento en una memoria SD de datos de sensores de temperatura LM135, RTDs, sensores de navegación inercial integrados en una unidad IMU de 9 grados de libertad y un magnetómetro digital MAG3110, de tres ejes, de potencia y dimensiones reducidas.



Figura 11. Fotografía de la estratósfera sobre México.

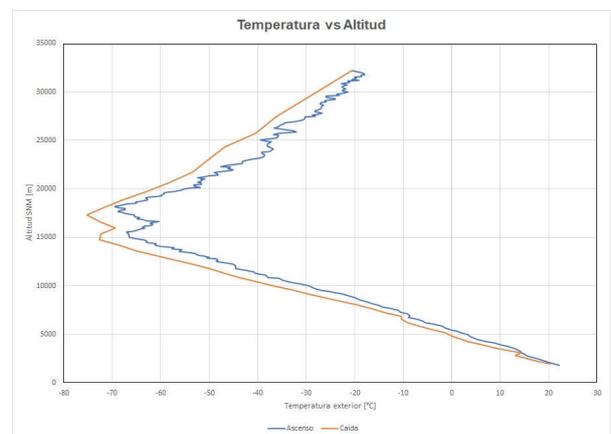


Figura 12. Registro de temperaturas a bordo de la misión CSM-2018-A.

Mientras que, en el caso de los vuelos en parapente, realizados en el Estado de México y Oaxaca, además de la instrumentación para la adquisición de datos y sensores antes descritos, se ha probado exitosamente un esquema de comunicación para la transmisión de datos de telemetría entre el módulo en vuelo en la banda de 2.4 GHz hacia una estación terrena portátil.

En lo que respecta a los primeros prototipos de instrumentación, en paralelo con las pruebas de concepto a bordo de vuelos suborbitales a la estratósfera, se ha diseñado e integrado un modelo de ingeniería para computadora de vuelo y de carga útil denominado SADM. El sistema SADM, o Sistema de Adquisición de Datos Meteorológicos, inicialmente fue concebido como un sistema básico para adquisición y almacenamiento de datos obtenidos de experimentos orientados al registro de variables ambientales, tales como temperatura del aire,

presión barométrica, humedad y otras, ha sido la base para el desarrollo de un primer sistema integrado a partir de un microcontrolador de propósito general basado en un microcontrolador de 32 bits PIC32MX340F512.

El sistema SADM se ha complementado con una segunda tarjeta electrónica de expansión, donde se encuentran acondicionadores de señales que permiten la integración de sensores y otros equipos de salida analógica que requieran ser conectados con SADM, evolucionando a un primer sistema de cómputo a bordo base, y que ha sido probado en las tres misiones suborbitales a la estratósfera, pudiendo validar exitosamente su operación durante los vuelos en condiciones de espacio cercano, y que permitirá sentar las bases para el planteamiento de un diseño de computadora a bordo para aplicación en la misión espacial TEPEU-1, como se muestra en la figura 13.



Figura 13. Sistema SADM y tarjeta de expansión para sensores y equipos periféricos.

Es importante señalar que la tarjeta de expansión del SADM, está diseñada como una tarjeta para la integración de nuevos sensores, cuenta además con terminales para entradas y salidas digitales, así como entradas analógicas y puertos de comunicaciones para periféricos como UART, SPI, I2C y de propósito general. Así mismo, cuenta con puerto para tarjeta de memoria SD para el almacenamiento de datos a bordo. El diseño de las tarjetas electrónicas está basado y cumple con el factor de forma y características indicadas en el estándar PC-104, que es el mismo que se utiliza en el estándar

Cubesat para el diseño de hardware para satélites pequeños.

7. Conclusiones

TEPEU-1 es una misión espacial científica mexicana para fines científicos y de validación tecnológica, la cual marca la pauta para la colaboración multidisciplinaria e interinstitucional en México y otras partes del mundo, representando una iniciativa para impulsar el desarrollo tecnológico nacional en materia espacial, la cual además de los sectores académicos, involucra la participación de la iniciativa privada, sectores gubernamentales estatales, así como asociaciones civiles.

La misión TEPEU-1 representa una invaluable oportunidad para poder establecer vínculos de colaboración con segmentos importantes de la sociedad (latina), tal como la comunidad de radio aficionados, los cuales representan un nicho de oportunidad de cooperación invaluable, no solo por su expertise técnico en la recepción de datos, sino también para el desarrollo de infraestructura destinada a la recepción de datos en varios puntos de la república mexicana, ampliando de manera sustantiva el área de cobertura de datos en tierra, lo cual, conforma, junto con otros elementos, el éxito de una misión espacial. TEPEU-1 no representa solo la primera etapa de un proyecto satelital mexicano con fines científicos y tecnológicos, sino también para la comunidad de radio aficionados es la puerta que se abre para que en un futuro próximo se pueda contar con un satélite propio que incluya equipos de retransmisión no solo de datos, sino también de voz. La incursión del radio aficionado en el proyecto TEPEU-1, es una oportunidad de poder refrendar su compromiso con la comunidad científica en el sector aeroespacial, extendiendo su alcance hacia la búsqueda de atender a la sociedad mexicana en casos de emergencia y otros escenarios que requieran el uso de las comunicaciones para fines benéficos en apoyo a la sociedad.

Para la infinidad de tareas a futuro y perspectivas del proyecto cuando se tengan las etapas de telemetría y telecomunicaciones, se está desarrollando un módulo de cifrado de datos que nos pueda dar servicios de seguridad en los protocolos de comunicación. Este módulo se integrará mediante la implantación de mecanismos de seguridad en sistemas de lógica programable. El módulo puede extenderse para el intercambio de información entre los nodos de la red de radio aficionados en Tierra.

8. Agradecimientos

Se agradece la colaboración de todos los integrantes, académicos y estudiantes del grupo académico TEPEU por sus contribuciones a la organización de este artículo y al material aquí presentado, en especial al Mtro. Octavio Plaisant Zendejas, divulgador del CDA-IPN. Finalmente, se reconoce y agradece el apoyo de la empresa Fuente Productiva Renovable, S.A. (FUPRESA) por su gran apoyo en la gestión de las subvenciones necesarias para el arranque de los trabajos de la misión TEPEU-1.

9. Referencias

- [1] Sosa Pedroza, J. “Las comunicaciones espaciales y la agencia espacial mexicana”. Academia de Ingeniería. Comisión de Comunicaciones y electrónica. Coloquio de especialidades 2009. Octubre, 2009.
- [2] Nava Amezcua, Rodrigo. “Historia de la industria aeroespacial en México y su vínculo con la aeronáutica”. Revista de divulgación científica de la Universidad Autónoma de Nuevo León. <http://cienciauanl.uanl.mx/?p=6263>. Último ingreso 25 de agosto de 2019.
- [3] Montaña Barbosa, Alejandro, (2015). La trayectoria de México en la exploración espacial. Ciencia MX Noticias. ienciamx.com/index.php/ciencia/universo/4714-historia-de-la-astronautica-en-mexico-del-sputnik-i-a-la-agencia-espacial-mexicana. Último ingreso 19 de agosto de 2019.
- [4] Rivera Parga, José R. “La exploración espacial: una oportunidad para incrementar el poder nacional del Estado mexicano”. Secretaría de Marina. México, agosto, 2017.
- [5] Agencia Espacial Brasileña, (2019, Dic), [Online]. https://es.wikipedia.org/wiki/Agencia_Espacial_Brasile%C3%BA1a, [Ene. 15, 2020]
- [6] La estrella de Panamá, (2020, Ene), [Online]. <https://www.laestrella.com.pa/cafe-estrella/ciencia/180816/crea-nasa-panama-experta-agencia>, [Ene. 15, 2020]
- [7] Convergencia Latina, (2019, Sep), [Online]. http://www.convergencialatina.com/Nota-Desarrollo/306083-3-53-Mapa_de_Satelites_en_America_latina_2019, [Ene. 15, 2020]
- [8] Etkowitz, H. “The triple Helix of University-Industry-Government Implications for policy and evaluation”. Science Policy Institute, SISTER, Estocolmo, 2002.
- [9] L. Benoso, A. Padrón-Godínez, A. Herrera, R. Prieto, “Modelo para predecir áreas de cobertura en sistemas de Radiofrecuencia”. XIX Congreso de Instrumentación, Pachuca, Hgo. México, 2004.
- [10] European Space Agency. Space Project Management. Project planning and implementation. ECSS-M-30B. Draft 14. July, 2006.
- [11] M.A. Diaz, J.C. Zagal, C. Falcon, M. Stepanova, J.A. Valdivia, M. Martinez-Ledesma, J. Diaz-Peña, F.R. Jaramillo, N. Romanova, E. Pacheco, M. Milla, M. Orchard, J. Silva, F.P. Mena, “New opportunities offered by Cubesats for space research in Latin America: The SUCHAI project case”, *Advances in Space Research*, Volume 58, Issue 10, 15 November 2016, Pages 2134-2147, ISSN 0273-1177.
- [12] FoxDelta – Satellite Antenna Tracking Interface ST2-0417 USB. August 18, 2017. <https://www.foxdelta.com/products/ST2-0417/st2-usb-do6dad.pdf>. Última consulta: 25 de agosto de 2019.
- [13] Setting up auto-tracking with SDR-Console and the FoxDelta ST2-USB Interface. <https://www.foxdelta.com/products/ST2-0417/ST2-USB%20and%20SDR-Console-V1.0.pdf>. Última consulta: 20 de Agosto de 2019.
- [14] Quintero, C. A. N., & Peralta, J. D. M. (2012). Montaje e implementación de una estación terrena satelital para el seguimiento de satélites de órbita baja.
- [15] J. Solana (2000), Ganancias y pérdidas en antenas. [Online]. <https://www.jsolana.com.mx/xel1yjs/>, [Jul. 18, 2019].
- [16] Gonzalez-Compean, J. L., Sosa-Sosa, V. J., Diaz-Perez, A., Carretero, J., & Marcellin-Jimenez, R. (2018). FedIDS: a federated cloud storage architecture and satellite image delivery service for building dependable geospatial platforms. *International journal of digital earth*, 11(7), 730-751.