

Avances en el diseño de un módulo de carga útil compatible con el estándar Cubesat para estudios sobre la ionósfera terrestre

M.A. Mendoza-Bárceñas¹, R. Prieto-Meléndez², M. Sanjurjo-Rivo³, JAL Cruz-Abeyro⁴, O. Álvarez-Cárdenas⁵, M. Díaz-Quezada⁶, A. Tamez-Rodríguez⁷, A. Rodríguez-Rosales⁸, I. Canseco-Jiménez⁹

¹ Centro de Desarrollo Aeroespacial, IPN, México

² Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM, México

³ Universidad Carlos III de Madrid, España

⁴ Centro de Geociencias, UNAM.

⁵ Facultad de Telemática, Universidad de Colima, México

⁶ Laboratorio de Exploración Espacial y Planetaria, Universidad de Chile, Chile

⁷ Federación Mexicana de Radioexperimentadores, A.C.

⁸ Centro de Investigación Científica y Tecnológica de Guerrero, A.C.

⁹ ANCEGRI-Oaxaca, México

1. Introducción

El lanzamiento y puesta en órbita del satélite ruso Sputnik el 4 de octubre de 1957, es el acontecimiento con que da inicio 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 [3]. 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 cohetaría 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 [4].

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 [1].

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 [5].

No fue sino hasta la década de los 90's cuando en la UNAM, se desarrolló e integró el microsatélite UNAMSAT-B, 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 [5].

Dado el contexto anterior y en virtud de los cambios en el panorama mundial, resulta crucial la inclusión de México 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.

La misión espacial TEPEU-1, está diseñada en torno a dos segmentos principales: el segmento espacio y el segmento tierra, 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 espacio, está constituido por un nanosatélite integrado a partir de los siguientes subsistemas básicos en su plataforma: computadora a bordo, comunicaciones, potencia y estructura. En cuanto a la carga útil, está integrada a partir de sensores de grado industrial para el registro de temperatura y campo magnético de la ionósfera terrestre, así como un repetidor que será aprovechado por la comunidad de radioaficionados para realizar diferentes experimentos de recepción en tierra.

Por su parte, el segmento terrestre, se contará con la Red Mexicana de Estaciones Amateur Satelitales (REMEASAT), la cual estará integrada por un conjunto de estaciones terrenas distribuidas a lo largo de todo el territorio mexicano, a partir de

infraestructuras institucionales, pero sobre todo, apoyándose y complementándose con la infraestructura perteneciente a radioaficionados mexicanos participantes en el proyecto espacial.

La REMEASAT permitirá, además de ampliar la cobertura para la recepción de los datos del satélite TEPEU-1 sobre México una vez puesto en órbita, también, poder establecer y coordinar esquemas de distribución de datos en todo el territorio nacional, para el aprovechamiento futuro de los datos científicos que en las siguientes misiones del programa espacial TEPEU y otras iniciativas científicas y tecnológicas se puedan generar.

A continuación, 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. Antecedentes

Nuestro grupo académico está integrado por investigadores de las principales casas de estudio de México, tales como el IPN, la UNAM, la Universidad de Colima, El Colegio de la Frontera Sur, así como asociaciones civiles como el Centro de Investigaciones Científicas y Tecnológicas de Guerrero y la Federación Mexicana de Radioexperimentadores. También contamos con la colaboración de académicos de instituciones internacionales como la Universidad Carlos III de Madrid, en España y de la Universidad de Chile.

Desde 2015 trabajamos en el desarrollo de proyectos de cooperación técnico-académica que impulsan el diseño de instrumentación aeroespacial con fines de investigación científica y demostración tecnológica, particularmente en el diseño de la misión espacial TEPEU-1, la cual tiene como objetivos la integración y puesta en órbita de un satélite pequeño tipo Cubesat de órbita LEO, el cual coadyuvará a estudios sobre la probable correlación entre eventos de Clima Espacial y otros fenómenos

geofísicos, así como su impacto sobre los esquemas de comunicación en las bandas de radioaficionados.

En el marco de la vertiente tecnológica de nuestro grupo y como parte de los trabajos encaminados al desarrollo de la misión TEPEU-1, desde 2016 se inició la participación en el diseño y desarrollo de dos misiones suborbitales impulsadas por globos, en colaboración con otras instituciones en México, principalmente con la Facultad de Ingeniería y el Instituto de Ingeniería de la UNAM, las cuales permitieron realizar ensayos con esquemas de instrumentación en ambientes de espacio cercano con el fin de validar componentes y esquemas de instrumentación aeroespacial, principalmente en el diseño de una computadora de vuelo basada en componentes electrónicos de grado comercial y un microcontrolador de 32 bits.

Como resultado de la evolución en los esfuerzos de diseño e integración de nuestros prototipos electrónicos y, ante la necesidad de continuar realizando ensayos de validación con instrumentos tecnológicos integrados por nuestro grupo, en 2019 se aplicó a la convocatoria del programa CSBF de la NASA, para poder participar como carga de oportunidad (*piggyback*) en la campaña de verano FY19, en la que fue aprobada nuestra participación. Tras una participación exitosa en la campaña FY19, y, luego de poder recuperar los datos almacenados en el instrumento y tras el análisis de las lecciones aprendidas, particularmente de la organización y logística que lleva a cabo el programa CSBF, resulta importante proponer estrategias de desarrollo nacional en materia de misiones suborbitales.

Por otro lado, en colaboración con la Facultad de Farmacia de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, nuestro grupo se encargó del desarrollo de un módulo de carga útil para desarrollar experimentos con muestras biológicas en ambientes de microgravedad, con lo cual se fortalecieron nuestras capacidades en la

integración de esquemas de instrumentación para aplicaciones aeroespaciales.

Es importante reconocer la participación de instituciones con las que se ha ido integrando nuestro grupo académico en torno al desarrollo de instrumentación aeroespacial en lo general, y en particular al diseño y desarrollo de la misión TEPEU-1, la cual se ha detonado no solo en México, sino también contando con otras instituciones internacionales interesadas en participar del proyecto, lo que se ilustra en la Figura 1.

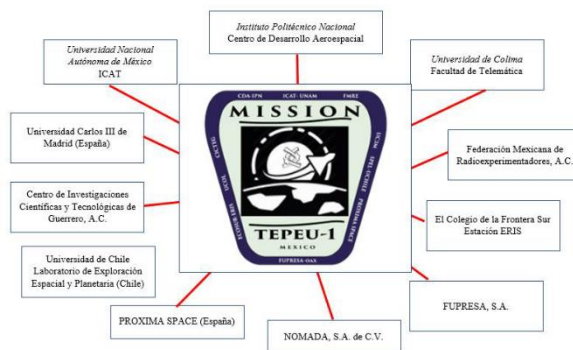


Figura 1. Instituciones participantes de la misión TEPEU-1.

3. Concepto general 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) [6]. A partir de la documentación generada, 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 2.

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 actitud, 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.

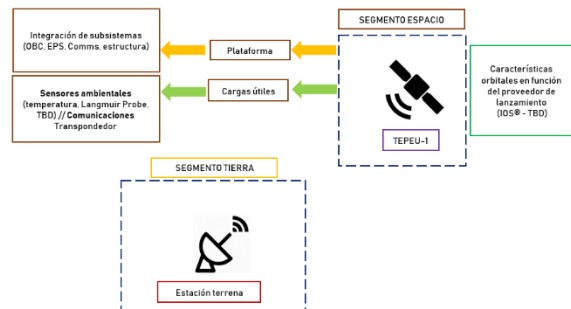


Figura 2. Concepto general de la misión TEPEU-1.

La segunda carga útil estará integrada a partir de un transponder, el cual permitirá validar esquemas de comunicación propuestos por la comunidad de radioaficionados 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.

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 3, 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 mexicanas integrado en un esquema denominado Red

Mexicana de Estaciones Amateur Satelitales (REMEASAT).

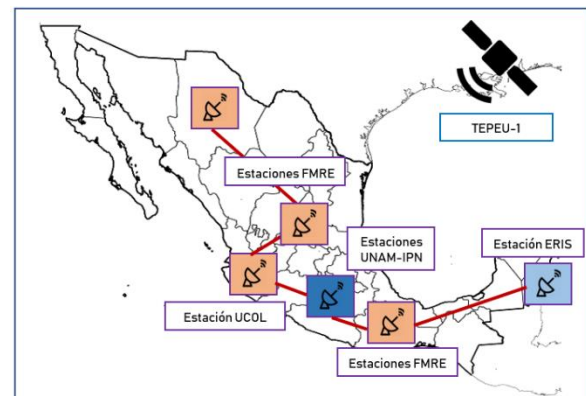


Figura 3. Esquema proyectado para la integración de la REMEASAT y puntos geográficos de los radioaficionados interesados en participar en la misión TEPEU-1.

Para completar la definición de la misión, establecemos los objetivos primarios de la misión TEPEU-1, que 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 secundarios 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 radioaficionados en México, validar técnicas novedosas de recepción y distribución de datos.

d) Desarrollar un esquema de sistema distribuido para el desarrollo del segmento terrestre para la recepción y transmisión de datos, basado en infraestructura de radioaficionados, así como medios para la distribución y almacenamiento de datos para su aprovechamiento en México y otras partes del mundo.

Para la consecución de estos objetivos, en la Figura 4 se detallan los roles de trabajo realizados por cada institución participante en la misión espacial.

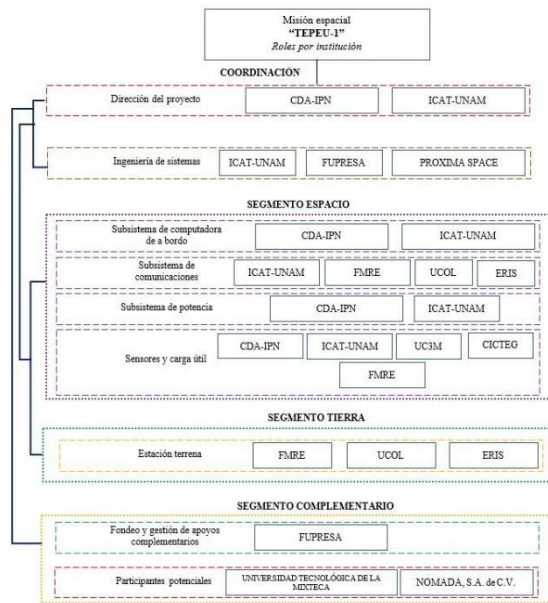


Figura 4. Roles por instituciones participantes en la misión TEPEU-1.

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 *1U CubeSat Platform* de la empresa ISIS Space®, 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 5.

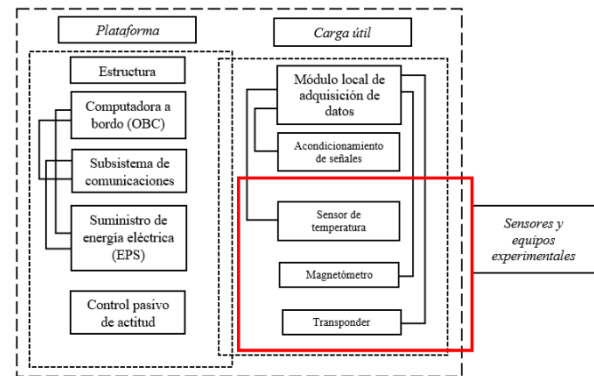


Figura 5. Esquema general de arquitectura para los dos bloques principales de la misión TEPEU-1.

5. Segmento tierra

El segmento tierra contará con equipos de comunicación en dos bandas, VHF para el *uplink* y UHF para el *downlink*. Para el *downlink*, la señal de salida del TEPEU-1 tendrá una potencia estimada de 100 mW a 500 mW y se contará con la infraestructura de la red colaborativa REMEASAT, a partir de la infraestructura de radioexperimentadores en México.

Un esquema general, mostrado en la Figura 6, describe la arquitectura de la estación terrena básica para la misión TEPEU-1.

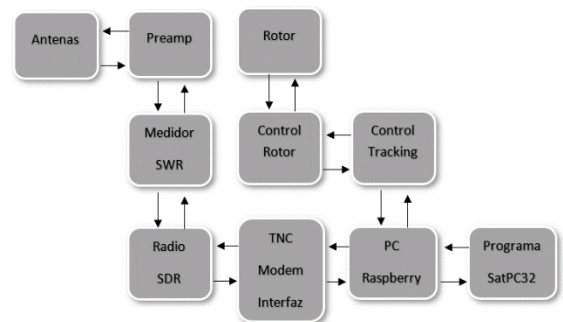


Figura 6. Arquitectura propuesta para la estación terrena para TEPEU-1.

En el esquema de la Figura 6, 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 [7] y [8], 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.

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 esta, 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 [9], 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 [10].

Teniendo 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 28 radioaficionados 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. Cabe mencionar que, en una prueba de concepto operacional de la REMEASAT, además de las estaciones de radioaficionados en México, se sumaron a la red 4 estaciones ubicadas una en Canadá y tres en Argentina, y se espera que esta red se amplíe tanto dentro del territorio nacional como en el extranjero.

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 7, 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 7. 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 [11].

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.

A partir de estos vuelos experimentales en globo, realizados en León, Guanajuato, 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°C, Figura 8, 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.

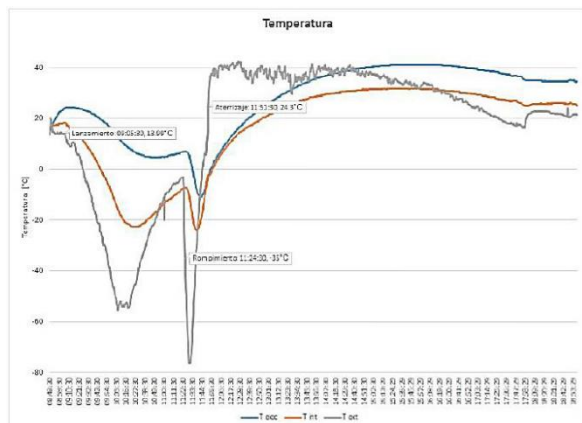


Figura 8. Registro de temperaturas a bordo de la misión CSM-2018-A.

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 el caso de nuestra participación exitosa en el vuelo realizado el 4 de septiembre de 2019 en la misión de *11MCF Piggyback Flight 697N* la campaña FY19 del CSBF de la NASA, representa un hito muy importante para nuestro grupo, pues en esta misión pudimos evaluar operativamente nuestra plataforma tecnológica en condiciones de espacio cercano siguiendo los criterios y estándares operativos de la NASA, aportándonos experiencia para plantear y organizar misiones, así como continuar con el desarrollo de tecnología propia, experiencia que es aplicable en la definición y el desarrollo de la misión TEPEU-1. Los experimentos realizados en esta misión nos permitieron caracterizar la actitud del módulo EMIDSS-1, especialmente en momentos críticos de la misión, como por ejemplo en la terminación del vuelo, Figura 9, evaluar uno esquema de protección térmica, en donde se alcanzaron temperaturas ambientales por debajo de los 50° C, Figura 10, y en general

evaluar el funcionamiento de la computadora de a bordo y el sistema de adquisición y almacenamiento de datos. La instrumentación integrada en la misión incluye sensores de temperatura LM135 y RTDs, sensores de navegación inercial de 9 grados de libertad, un magnetómetro triaxial MAG3110, sensores de presión barométrica y de humedad y rastreo por medio de GPS.

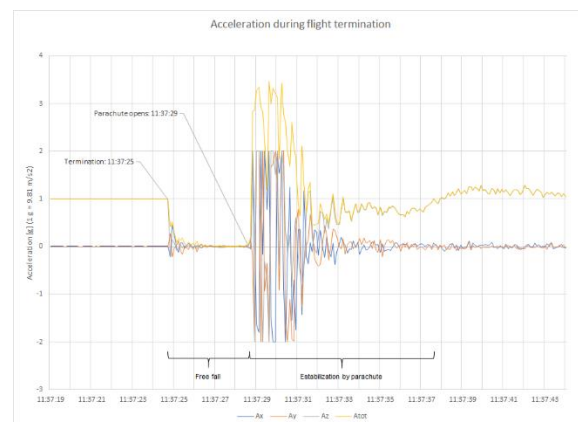


Figura 9. Registro de la aceleración durante la terminación del vuelo en la misión *11MCF Piggyback Flight 697N*.

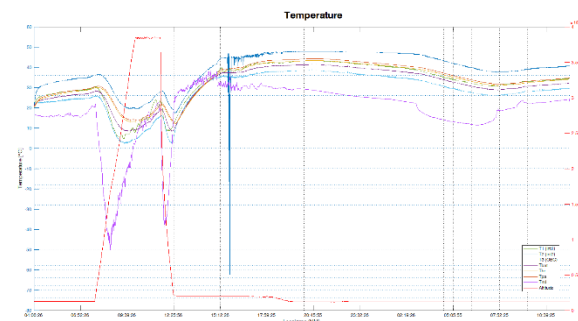


Figura 10. Registro de temperaturas a bordo de la misión *11MCF Piggyback Flight 697N*.

7. Conclusiones

La misión espacial TEPEU-1, es un proyecto que, por sus características, representa una oportunidad invaluable de desarrollo tecnológico e investigación científica en México. La base de colaboración que el proyecto TEPEU ha podido establecer con pares dentro y fuera de México, permite vislumbrar aún un camino complicado, pero con diversas rutas de apoyo que permitirán implementar estrategias para impulsar el

desarrollo de la misión hasta su concreción y puesta en órbita y operación.

En México, la UNAM y el IPN encabezan este grupo que integra a diversas instituciones académicas nacionales y del extranjero, que en colaboración con la iniciativa privada y el sector gubernamental, realizan esfuerzos para el desarrollo de misiones espaciales con fines científicos, lo cual ha tenido experiencia en el desarrollo de vuelos suborbitales y que tiene avances significativos en su primer misión espacial, la misión TEPEU-1, orientada a contribuir en el estudio y caracterización de la ionósfera.

Los esfuerzos que se realizarán a lo largo de todas las misiones que se tienen estimadas para desarrollarse dentro del programa espacial TEPEU, permitirán complementar los estudios actuales basados en instrumentación terrestre y satélites de órbitas altas (GNSS), sin embargo, será punta de lanza para el planteamiento de estudios de ciencia de frontera, que permitirán contar con datos certeros para ayudar a entender a la comunidad científica internacional la interacción litósfera-atmósfera y su irrefutable vinculación con la actividad del clima espacial y la actividad solar.

Por su parte, el objetivo tecnológico basado en la vinculación con la comunidad de radioexperimentadores, dentro y fuera de México, permitirá contar con la primera plataforma satelital que contenga a bordo un módulo repetidor de voz de banda cruzada, mediante el cual se podrán realizar comunicados, fomentando el interés en el área e impulsando a la colaboración y participación de los radioaficionados en proyectos espaciales académicos con fines científicos.

Finalmente, el proyecto TEPEU representa también una oportunidad para detonar el desarrollo de tecnología propia, y la conformación de grupos de trabajo multidisciplinarios e interinstitucionales que permitan el desarrollo de futuras iniciativas no solo en el área aeroespacial, sino en

general, de desarrollo tecnológico y científico.

8. Bibliografía

- [1] 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.
- [2] M.A. Diaz, J.C. Zagal, C. Falcon, M. Stepanova, J.A. Valdivia, M. Martínez-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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Rivera Parga, José R. "La exploración espacial: una oportunidad para incrementar el poder nacional del Estado mexicano". Secretaría de Marina. México, agosto, 2017.
- [6] European Space Agency. Space Project Management. Project planning and implementation. ECSS-M-30B. Draft 14. July, 2006.
- [7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] <https://www.jsolana.com.mx/xe1yjs/>

[11] Gonzalez-Compean, J. L., Sosa-Sosa, V. J., Diaz-Pérez, 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.