

Modelado del Perfil de Temperatura para el Vuelo Suborbital EMIDSS-1

Padrón-Godínez, Alejandro ¹ ; Prieto-Meléndez, Rafael ¹ ; Mendoza-Bárceñas, Mario Alberto ² 

¹Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México

²Centro de Desarrollo Aeroespacial, Instituto Politécnico Nacional, CDMX, México

Resumen: La medición física de las principales variables involucradas en las diferentes capas de la atmósfera ante un eminente cambio climático puede proporcionar registros que coadyuven al modelado, pronóstico, predicción y simulación del clima. En particular, el propósito de este trabajo se centra en el modelado del perfil de temperatura en diferentes etapas del vuelo, haciendo énfasis en la Tropopausa. El perfil fue obtenido por varios termómetros dentro y fuera del módulo “*Experimental Module for the Iterative Design for Satellite Subsystems version 1*” por sus siglas en inglés (EMIDSS-1) y registrados en la computadora de abordaje. Este es un Proyecto de colaboración entre el Centro de Desarrollo Aeroespacial del Instituto Politécnico Nacional y del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México. El módulo fue lanzado con la ayuda de la NASA en la misión FY19-FTS dentro de la plataforma 11MCF#697N en septiembre 2019 desde Fort Sumner, Nuevo México-EUA dentro del Programa *Columbia Scientific Balloon Facility*. Los perfiles se comparan con vuelos suborbitales similares con plataformas de grandes altitudes y estándares internacionales de la atmósfera para el estudio y predicciones entre la tropósfera y la estratósfera.

Palabras clave: Cambio Climático, Cubesat, Instrumentación Espacial, Vuelos Suborbitales

Temperature Profile Modeling for Suborbital Flight EMIDSS-1

Abstract: The physical measurement of the main variables involved in the different layers of the atmosphere in the face of eminent climate change can provide records that contribute to the modeling, forecasting, prediction and simulation of the climate. In particular, the purpose of this work focuses on the modeling of the temperature profile at different stages of flight, emphasizing the Tropopause. The profile was obtained by several thermometers inside and outside the module “*Experimental Module for the Iterative Design for Satellite Subsystems Ver.1*” and recorded on the on board computer. This is a collaboration project between the CDA-IPN and ICAT-UNAM. The module was launched with NASA's help on the FY19-FTS mission within the 11MCF#697N platform in September 2019 from Fort Sumner, New Mexico-USA of the Columbia Scientific Balloon Facility Program. The profiles are compared with similar suborbital flights with high altitude platforms and international atmospheric standards for the study and predictions between the troposphere and the stratosphere.

Keywords: Weather Change, Cubesat, Space Instrumentation, Suborbital Flight

1. INTRODUCCIÓN

Entre muchas de las misiones espaciales de bajo costo que se están desarrollando en América Latina, la misión TEPEU-1 se viene desarrollando entre diversas instituciones mexicanas y diferentes programas espaciales. La misión TEPEU-1, como otras, está abierta a colaboraciones y participaciones con instituciones relacionadas de cualquier parte del mundo. A la misión TEPEU se le nombra así porque en la cosmovisión maya, este era un dios del cielo y una de las deidades que participaron en los tres intentos de crear humanidad. En el contexto del desarrollo tecnológico actual, TEPEU es el nombre de la misión espacial con fines científicos y tecnológicos promovida dentro y fuera de México por

instituciones de educación superior e investigación, (Mendoza et al., 2021).

La primera misión de TEPEU-1 se basará en la integración de un satélite de órbita baja con un doble objetivo. Por un lado, demostrará las capacidades institucionales para el desarrollo de un dispositivo de alta tecnología basado en componentes tipo COTS que orbitan la Tierra. Por otro lado, desde el punto de vista científico, se desarrollarán las bases para la creación de herramientas tecnológicas (Padrón et al., 2020). Esto permitirá, en el futuro, el registro de datos sobre variables físicas (temperatura, presión, intensidad del campo magnético, densidad de electrones, conductividad, etc.) presentes en las capas intermedias de la estratósfera terrestre y que, además,

*alejandro.padron@icat.unam.mx

Recibido: 02/09/2021

Aceptado: 21/06/2022

Publicado en línea: 04/08/2022

10.33333/rp.vol50n2.04

CC 4.0

permitan el estudio de su relación con los fenómenos geofísicos, como el clima espacial.

Desde 2015, el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) junto con el Centro de Desarrollo Aeroespacial (CDA) del Instituto Politécnico Nacional (IPN) colaboran en este proyecto en el que generan instrumentación espacial, con especificaciones de satélites tipo CubeSat, para el análisis y determinación de la ionósfera. Las capas de la atmósfera ubicadas entre 85E03 y 460E03 (m) de altitud, una zona que se piensa que esta ionizada a causa de los efectos producidos por la radiación solar (Prieto, 2019).

En la misión TEPEU-1, se tomarán mediciones que coadyuven a caracterizar el plasma que forma a la ionósfera y que fenómenos físico-químicos se producen en esa capa. Al mismo tiempo se quiere analizar, estudiar y conocer las perturbaciones que se producen en la ionósfera además de su relación con otras capas de la atmósfera. Para lograr estos objetivos de la misión de TEPEU-1 se están realizando vuelos suborbitales para validar la instrumentación que se pondrá en órbita. En ese sentido, se ha iniciado con los primeros intentos para alcanzar grandes altitudes, entonces se usaron parapentes y globos aerostáticos. Los diseños de la instrumentación electrónica se desarrollan y se prueban para que puedan integrarse en satélites pequeños de baja órbita denominados LEO (Low Earth Orbit).

En las convocatorias realizadas por la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA) para participar en vuelos suborbitales en el Programa *Columbia Scientific Balloon Facility* (CSBF), se sometió la propuesta para integrar el módulo EMIDSS-1 en uno de sus vuelos. Después de una evaluación, decidieron y consideraron que era pertinente que el módulo pudiera participar en alguna de sus misiones. En este primer vuelo suborbital con la NASA, se lanzó un globo que llegó a una altura máxima entre 36E03 y 38,5E03 (m), llevando una góndola enganchada con tres módulos experimentales, dos de ellos de Universidades Americanas y el otro por la colaboración mexicana IPN-UNAM. En el vuelo dentro de la misión FY19-FTS el *Experimental Module for the Iterative Design for Satellite Subsystems* versión 1 (EMIDSS-1) de 2019, cuyo objetivo era validar, en condiciones de espacio cercano, la instrumentación a bordo. En esta misión es donde obtuvimos los perfiles de temperatura, durante el vuelo de la sonda que nos disponemos analizar en este trabajo.

Con este experimento pretendemos comprender como debido a factores externos como la actividad solar, el campo magnético terrestre, la atmósfera pueden llegar a influir con los fenómenos naturales que suceden en la Tierra. Para esto se graficarán las mediciones registradas por la computadora de la hora local contra la temperatura de los sensores dentro y fuera del módulo EMIDSS-1 en función de la altitud. El módulo registró otras variables durante el vuelo como la presión barométrica, humedad relativa, altitud, latitud, longitud, voltaje de baterías, tiempo. Dentro de la carga útil, también se tienen transductores de movimiento inercial, con mediciones de aceleración, velocidades angulares y campos magnéticos. Una tarea de la comunidad científica es conocer la composición de la atmósfera terrestre, Figura 1, ya que la vida

en ella depende de la temperatura y de la radiación que recibe del sol.

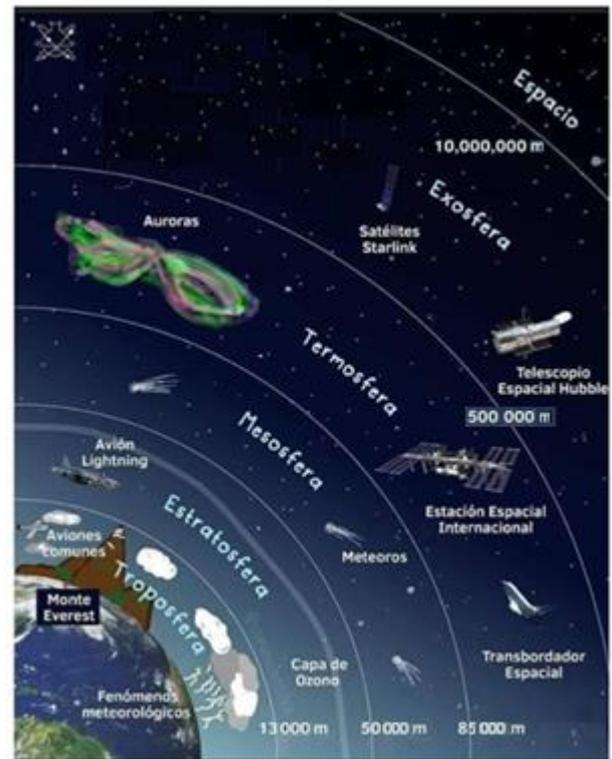


Figura 1. Capas intermedias de la atmósfera (cortesía de @cumulo científico)

“Si no hubiera atmósfera, la temperatura del planeta sería de 271 (K), es decir temperatura bajo cero” en la escala de grados centígrados -2°C (Green, 2018). La atmósfera vista como un manto grueso transparente, es donde se concentran o dispersan contaminantes debido a factores como los vientos, las precipitaciones pluviales, las inversiones térmicas por mencionar algunos. Es bien conocido que la interacción entre la vegetación y el medio ambiente, durante la evolución está cambiando con el tiempo, por lo que las concentraciones de gases encontrados en el aire pueden medirse. Por ejemplo, podemos registrar Nitrógeno con 78,084, Oxígeno con 20,946, Helio con $5,2\text{E}-04$, Hidrógeno con $5,0\text{E}-05$, Xenón con $0,9\text{E}-05$ por porcentaje de volumen, por mencionar algunos. La metrología estudia y genera los modelos de predicción del clima en la atmósfera y cómo influyen sobre estos fenómenos como descargas eléctricas, la transferencia de energía en forma de calor, la contaminación por ruido en la atmósfera. Otros gases que conforman a la atmósfera en cantidades variables son: vapor de agua entre 0 y 7, Dióxido de carbono 0,035, el metano $1,5\text{E}-04$, el ozono con $0,2\text{E}-04$ por porcentaje de volumen. Estos porcentajes realizan un balance adecuado para el sustento de la vida en la Tierra (Günter, 2003).

Si observamos la estructura de la atmósfera, las capas que nos interesan, donde se registró los valores de temperatura a modelar son la Estratósfera y la Tropósfera pasando por la Tropopausa entre unos 10E03 y 12E03 metros de altura (Cavcar, 2017), ver Figura 2.

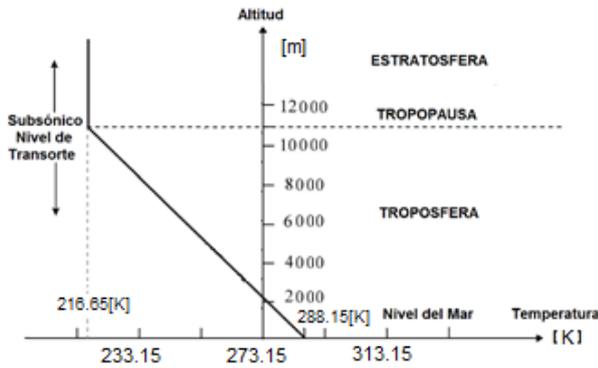


Figura 2. Temperatura contra altitud según el modelo de la ISA

La Figura 2 muestra el comportamiento de la temperatura en la tropósfera de acuerdo al modelo de la *International Standard Atmosphere* (ISA), usando:

$$T = T_0 - 6,5 \frac{h(m)}{1000} \quad (1)$$

$$T = T_0 - 1,989 \frac{h(ft)}{1000} \quad \text{o bien} \quad T = T_0 - 2 \frac{h(ft)}{1000}, \quad (2)$$

donde:

- T: Temperatura, (K) o (°C)
- T₀: Temperatura Inicial
- h: altura, (m) o (ft)

Veamos ahora el comportamiento o perfil de la temperatura contra la altitud registrada según las capas de la atmósfera, donde el modelo ISA ya no corresponde a la tendencia, ver Figura 3. La Figura 3 muestra la tendencia de la temperatura en función de la altitud que se encuentra reportada en la literatura de otras misiones en otros vuelos suborbitales, conforme se recorren las diferentes capas de la atmósfera (Chudobova, 2015). Recordando que el modelado que se presentará se hace para las etapas del vuelo suborbital de la misión FY19-FTS, que lleva al módulo EMIDSS-1 y alcanza una altitud cerca de los 39E03 (m). La Tropopausa es la capa intermedia entre la tropósfera y la estratósfera donde según la Organización Meteorológica Mundial, la "primera Tropopausa" se define convencionalmente como el nivel más bajo en el que la tasa de lapso disminuye a 2E-03 (K/m) o menos, siempre que la tasa de lapso promedio entre este nivel y todos los niveles superiores dentro de 2E03 (m) no supere los 2E-03 (K/m). Si la tasa de lapso promedio por encima de esta "primera Tropopausa" entre cualquier nivel y todos los niveles superiores dentro de 1E03 (m) supera los 3E-03 (K/m), entonces una "segunda Tropopausa" se define con el mismo criterio que la primera. Esta segunda Tropopausa puede estar dentro o por encima de la capa de 1E03 (m).

En la siguiente sección describiremos a grandes rasgos el camino que tomó el EMIDSS-1 hasta que fue recuperado a 200E03 (m) de donde fue el lugar del lanzamiento. También mencionaremos los instrumentos usados a bordo que nos servirán para este trabajo. Luego mostraremos los perfiles en los resultados y obtendremos los modelos de la hora local contra la temperatura registrada por varios termómetros.

La Figura 3 nos muestra un perfil genérico de temperatura con respecto a la altitud.

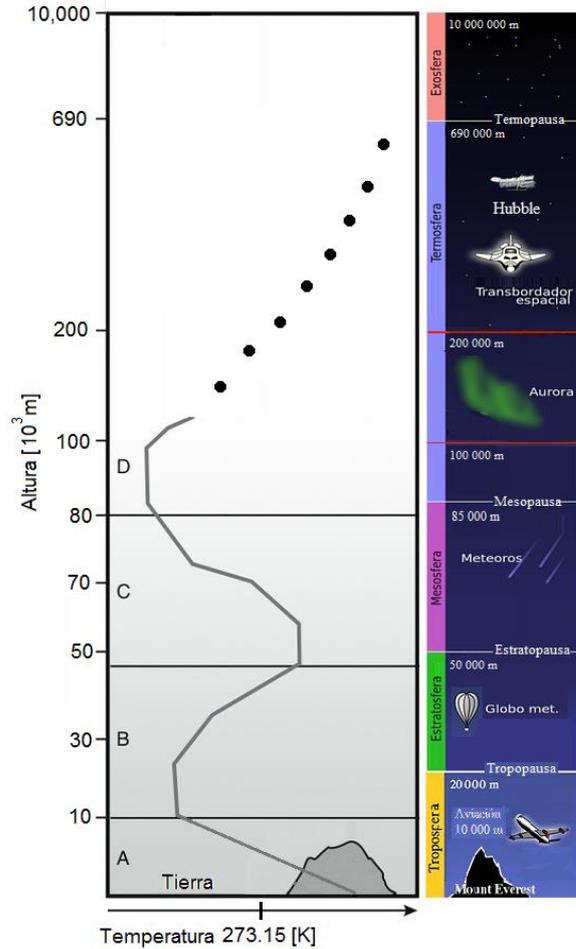


Figura 3. Temperatura contra altitud en las capas de la atmósfera, (cortesía de ISA y @astromia)633

2. MÉTODOS

El módulo EMIDSS-1 construido en el Laboratorio de Modelado y Simulación de Procesos del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la UNAM con la colaboración del Centro de Desarrollo Aeroespacial del IPN, fue un diseño que se adaptó e integró de misiones anteriores, realizados en otros vuelos suborbitales. El sistema se desarrolló con base en la tecnología de los Cubesat de dos unidades, con dimensiones 0,1(m), 0,1(m), 0,2(m) por cada lado, una estructura metálica aislada térmicamente y un peso aproximado de 1,5 (Kg).

El módulo integrado dentro de la plataforma 11MCF #697N con la misión FY19-FTS de la NASA fue lanzado desde la base del programa CSBF, ubicada en *Fort Sumner*, Nuevo México, Estados Unidos, en septiembre del 2019, en un exitoso vuelo que tuvo una duración aproximada de cinco horas. Los instrumentos estuvieron registrando a dos intervalos de muestreo, uno cada 30 (s) y otro a cada 10 (s), baja y alta frecuencia respectivamente. En la Tabla 1, se muestran los sensores que se emplearon para las mediciones durante el vuelo.

Tabla 1. Instrumentación a bordo del EMIDSS-1

Instrumento	Modelo	Escala	Precisión/Resolución	Voltaje de Operación
GPS Copernicus II Latitud, Longitud y Altitud	Spark Fun Trimble 63530-00	...	<2.0 (m) 50%, <4 (m) 90% con SBAS	2,7 – 3,3 (VDC) 233 a 358 (K)
Acelerómetro Ax, Ay, Az: (9.8 ms ⁻²)	LSM9DS 19 DoF IMU	±2/±4/±8 /±16 (9.8 ms ⁻²)	±1 (9.8 ms ⁻²)	1,9 a 3,6 (V)
Magnetómetro Mx,My,Mz: (µT)	LSM9DS 1 IMU	±4/±8/±1 2/±16	1x10 ⁻⁴ (Tesla)	1,9 a 3,6 (V)
Giroscopio Gx, Gy, Gz (rad/s)	LSM9DS 1 IMU	±4.27/±8. 72/±34.9 (rad/s)	1 (rad/s)	1,9 a 3,6 (V)
Magnetómetro Bx,By,Bz: (µT)	MAG311 0	±1000 (µT)	Sensitivity of 0,10 (µT)	1,95 a 3,6 (V)
Cronómetro EMIDSS-1	PIC32M X 5XX	---	1.25 (ns), 80 (MHz)	2,3 a 3,6 (V)
Voltaje de las Baterías	alcalina	---	+/- 0.1 (V)	1,5 (V)
Termómetro en las Baterías	LM135	218 a 435	3 (+/-K)	3,01 a 5 (V)
T ₁ : interna	LM135	218 a 435	3 (+/-K)	3,01 a 5 (V)
T ₂ : tapa superior	LM135	218 a 435	3 (+/-K)	3,01 a 5 (V)
T ₃ : OBD	LM135	218 a 435	3 (+/-K)	3,01 a 5 (V)
Medidor de Presión Barómetro (KPa)	MS5803- 14BA	0 a 1400 (KPa)	2 (KPa)	1,8 a 3,6 (V)
Humedad Relativa	DHT22	0 ~ 100% RH	± 2%	3,3 a 6 (V)
T _{nd} : temperatura exterior	LM135	218 a 423 (K)	3 (+/-K)	3,01 a 5 (V)
T _{pa} : temperatura del sensor de presión	LM135	218 a 423 (K)	3 (+/-K)	3,01 a 5 (V)

La Figura 4 muestra el módulo EMIDSS-1, la góndola o zona de anclaje, el inflado del globo y una toma del globo desde la sonda hacia el globo.

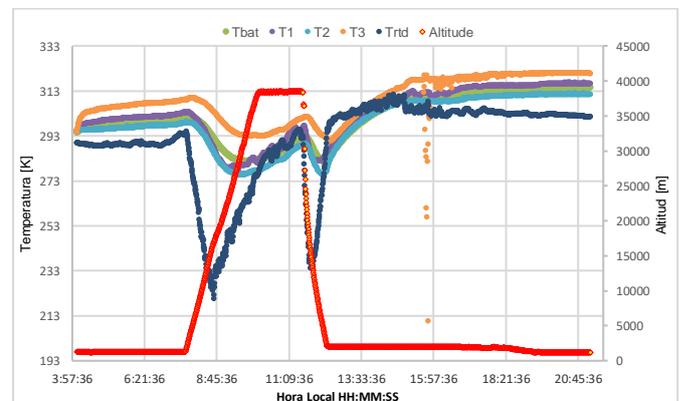
**Figura 4.** Imágenes del lanzamiento de la misión FY19-FTS

2.1 Preparación del vuelo

En Fort Sumner, Nuevo México donde está la base de lanzamiento de la NASA dentro de sus hangares se sujetan en la góndola o plataforma los diferentes módulos experimentales que llevará, estos módulos son de varias universidades con distintos propósitos. Una vez que se cierra el módulo y queda anclado a la góndola, se enciende la computadora abordo que controla los sensores y empezará a registrar los datos que se almacenan en una memoria SID. Luego es llevado hacia la zona de lanzamiento, se empieza a llenar el globo de Helio a su capacidad 311485,3 (m³) para iniciar el ascenso. El grupo de logística de la NASA se encarga de hacer el seguimiento en tiempo real del vuelo y se monitorea hasta que llega a su nivel de flotación mientras los instrumentos están registrando. En un momento, el globo que va perdiendo su capacidad de flotación es rasgado por un gancho controlado remotamente y entonces empezará el descenso. Mediante los GPS abordo, se realiza la ubicación del aterrizaje de la góndola y el equipo de rescate actúa para traer de regreso la góndola al hangar de operación y se apagan los módulos abordo.

3. RESULTADOS

En esta sección, mostraremos las gráficas de los registros obtenidos por el módulo, y los modelos dinámicos de los segmentos de interés durante el vuelo. Con los datos registrados y graficados del módulo EMIDSS-1 se obtienen los modelos dinámicos del comportamiento en vuelo para comprobar, analizar (validar, certificar) el funcionamiento de la instrumentación empleada.

**Figura 5.** Hora Local vs. Temperaturas & Altitud del EMIDSS-1

En la Figura 5, se muestran las variables de interés en este trabajo que son las temperaturas de los cinco termómetros, la altitud durante el tiempo de vuelo. En la Figura 6, se muestran las gráficas para cada perfil que analizaremos.

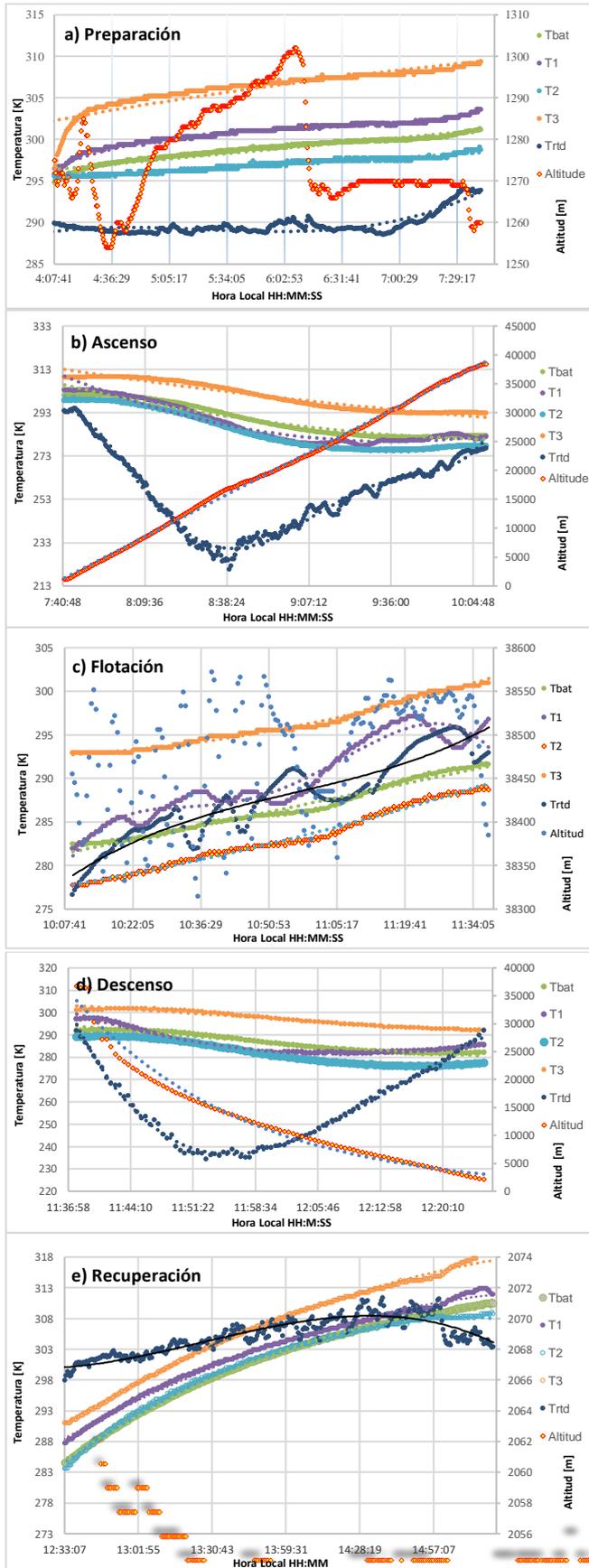


Figura 6. Perfiles de la temperatura en la a) preparación, b) ascenso, c) flotación, d) descenso y e) recuperación del módulo

Los termómetros registran la temperatura exterior, la temperatura de las baterías y tres temperaturas internas (tapa

superior, media e inferior) del módulo EMIDSS-1. Las gráficas de la Figura 6a, 6b, 6c, 6d y 6e son los perfiles de la temperatura en grados centígrados durante los tiempos de preparación, ascenso, flotación, descenso, recuperación de la sonda. En estas gráficas también están las altitudes como eje secundario medida en metros.

Para estas gráficas se obtuvieron los modelos experimentales representativos dados los registros obtenidos de las temperaturas en cada etapa del vuelo. Estos modelos de temperatura fueron ajustados a una tendencia lineal, exponencial, polinomial para cada termómetro en cada perfil dentro de lo físicamente razonable, ver la Tabla 2. Cada perfil puede ser comparado e interpretado con experiencias de otros vuelos similares, esto se discutirá más adelante.

Tabla 2. Ajuste de modelos para cada perfil de temperatura

Perfil	Termómetro	Modelo	Coef. Correlación
Preparación	T ₁	$y = 5\,049,4x^3 - 943,4x^2 + 1\,040,4x - 64,471$	R ² = 0,9753
	T ₂	$y = 20,42x + 18,716$	R ² = 0,9549
	T ₃	$y = 55,179x + 0,3637$	R ² = 0,7516
	T _{bat}	$y = 31,95x + 17,738$	R ² = 0,932
	T _{trd}	$y = 6\,624,3x^3 - 457,8x^2 + 986,37x - 55,701$	R ² = 0,7626
Ascenso	T ₁	$y = 4\,798,9x^2 - 835,5x + 772,93$	R ² = 0,9463
	T ₂	$y = 77\,329x^3 - 913x^2 + 29\,187x - 356$	R ² = 0,9882
	T ₃	$y = 668,91x^2 - 713,34x + 199,71$	R ² = 0,9493
	T _{bat}	$y = 1\,898,7x^2 - 656,6x + 368,57$	R ² = 0,9562
	T _{trd}	$y = 2E+08x^5 - 4E+08x^4 + 3E+08x^3 - 1E+08x^2 + 2E+07x - 2E+06$	R ² = 0,9811
Flotación	T ₁	$y = 6E+07x^5 - 2E+08x^4 + 2E+08x^3 - 8E+07x^2 + 2E+07x - 2E+06$	R ² = 0,9359
	T ₂	$y = 890,06x^2 - 617,54x + 106,6$	R ² = 0,9883
	T ₃	$y = 1\,531x^2 - 246,8x + 273,04$	R ² = 0,9897
	T _{bat}	$y = 0,0538E12,097x$	R ² = 0,9906
	T _{trd}	$y = 99\,570x^3 - 219x^2 + 62\,302x - 9510,9$	R ² = 0,867

Descenso	T_1	$y = 39\,522x^2 - 39\,998x + 10\,128$	$R^2 = 0,9778$
	T_2	$y = 2E+06x^3 - 2E+06x^2 + 1E+06x - 197\,439$	$R^2 = 0,9967$
	T_3	$y = 41\,151E-14,88x$	$R^2 = 0,9668$
	T_{bat}	$y = 4\,059x^2 - 479,1x + 1\,238,3$	$R^2 = 0,9575$
Recuperación	T_{Ttd}	$y = 7E+07x^4 - 2E+08x^3 + 1E+08x^2 - 4E+07x + 5E+06$	$R^2 = 0,9928$
	T_1	$y = -1\,137,2x^2 + 523x - 470,15$	$R^2 = 0,9953$
	T_2	$y = -1\,968,3x^2 + 490,5x - 752,8$	$R^2 = 0,9963$
	T_3	$y = -1\,060,2x^2 + 460,7x - 456,2$	$R^2 = 0,9978$
	T_{bat}	$y = -1\,498,9x^2 + 956,4x - 601,36$	$R^2 = 0,9987$
	T_{Ttd}	$y = -22\,847x^3 + 409x^2 - 21\,382x + 972,1$	$R^2 = 0,8426$

Por otra parte, también se midieron los perfiles de una serie de datos durante el vuelo correspondientes a la presión barométrica y los graficamos junto con la temperatura exterior del módulo y la altitud con respecto a las horas de vuelo, Figuras 7 y 8 respectivamente.

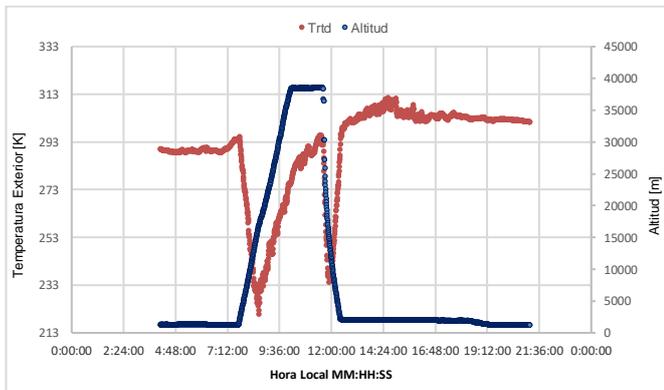


Figura 7. Hora Local vs. Temperatura Exterior & Altitud del EMIDSS-1

En la gráfica de la Figura 8a puede verse que el comportamiento de la temperatura en el perfil de flotación es creciente y decrece rápidamente en el descenso para después crecer en el perfil de recuperación. En este caso, la temperatura exterior comparándola con otros vuelos experimentales no tiene un comportamiento similar, es decir, es irregular en el sentido de que está creciendo en el perfil de flotación y no se muestra estable en un intervalo. En la Figura 8b, se muestra la gráfica del tiempo (UTC) contra el perfil de temperatura y presión barométrica del “High Altitude Student Platform” (HASP) del 2 de agosto del 2017, tomado como referencia y comparación para los registros del EMIDSS-1.

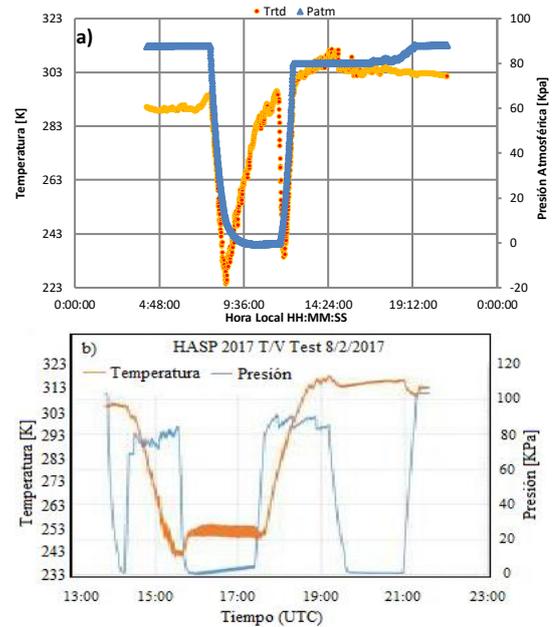


Figura 8. Hora Local vs Temperatura Exterior & Presión atmosférica, a) del EMIDSS-1 y b) de un HASP.

En otra gráfica donde se midió la velocidad de vuelo de la sonda se puede observar que durante el ascenso mantiene una velocidad promedio de 20 (Km/h) o bien 5,5 (m/s) y en flotación se mantiene más o menos estable ya que oscila entre los 38E03 y 39E03 (m) de altitud, Figura 9. Sin embargo, durante el descenso, pensaríamos que cuando se desgarran el globo, empieza la sonda en caída libre y el perfil de velocidad aumenta cuadráticamente con respecto a su desplazamiento. Hasta que llega, en un momento en que la fricción con el aire es mucho mayor por la apertura total de los paracaídas a una altitud de 12E03 (m). Aquí llega a una velocidad promedio otra vez de 5,5 (m/s) hasta que aterriza y entonces en el tiempo de la recuperación la velocidad es cero.

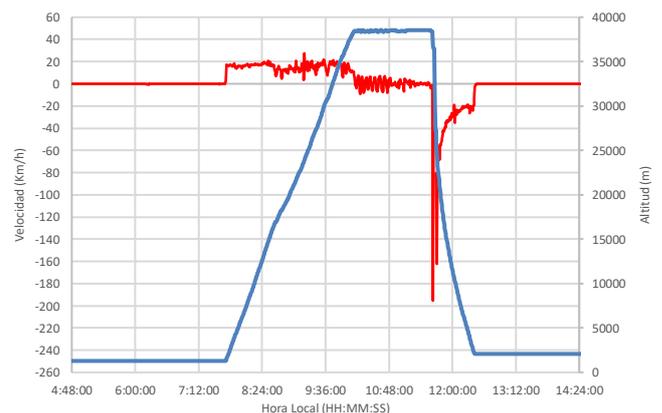


Figura 9. Hora Local vs. Velocidad & Altitud

La velocidad de la sonda en la zona de la Tropopausa tiene perturbaciones que la hacen oscilar entre los 12,5E03 (m) y hasta que llega al perfil de flotación los 37E03 y 38E03 (m) de altitud. En el descenso nuevamente la velocidad de la sonda vuelve a oscilar cerca de los 12,5E03 (m) de altitud en la zona de la Tropopausa. Este fenómeno tenemos que relacionarlo con el perfil de temperaturas que mostramos anteriormente y que discutiremos en la sección correspondiente.

Luego mediante los registros del GPS Copernicus II podemos seguir el vuelo en el mapa ya que tenemos la longitud y latitud para ver la trayectoria de la sonda en todo momento, Figura 10. Aunque desde la base de lanzamiento se hace la telemetría en tiempo real de todo el vuelo de la sonda y se transmite en vivo vía Facebook.

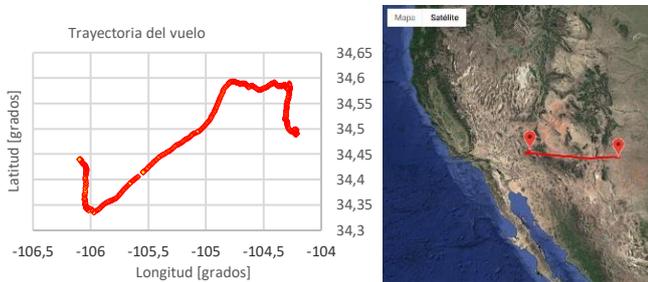


Figura 10. Trayectoria de vuelo de la 11MCF #697N con la misión FY19-FTS de la NASA

4. DISCUSIÓN

Partiendo de la certeza de que en cada misión suborbital se tienen diferentes condiciones ambientales, debido a los puntos geográficos y de la época del año en que se llevan a cabo los lanzamientos de los globos sonda con los módulos experimentales. Nuestro interés se enfoca en el estudio y análisis de los registros de temperatura del módulo EMIDSS-1. En cada capa de la atmósfera se conocen algunos datos que permiten analizar el comportamiento del clima en esas capas, los datos y modelos de tendencias aquí mostrados se pueden corroborar y comparar con otros datos de vuelos suborbitales similares para comprender los fenómenos físicos que se producen en esas capas. En particular a una altitud de 11E03 (m) donde se encuentra la Tropopausa antes de la estratósfera, se conoce que hay fenómenos naturales que pueden influir sobre el cambio climático, las telecomunicaciones y otros fenómenos que suceden en la superficie de la Tierra. Y justamente en las gráficas de las Figuras 5, 7 y 8, el registro de la temperatura exterior a esa altitud muestra una variación a las ya registradas en vuelos similares (HASP, 2017). Observando que, aunque la norma ISA no registra estos datos a mayores altitudes, el módulo EMIDSS-1 en los perfiles de ascenso-flotación-descenso, la temperatura exterior baja rápidamente en el ascenso, tiende a recuperarse durante la flotación para nuevamente bajar rápidamente durante el descenso. Mientras que en los vuelos HASP no hay una variación más allá de 5 (K). En el caso del perfil de flotación, la temperatura exterior se tiene un promedio de 15 (K), fluctuando desde 5 hasta 25 (K), en otras palabras, una variación de 20 (K) en este periodo, podemos observar este comportamiento en la Figura 7. Así el termómetro que registra la temperatura exterior entre los 12E03 y 30E03 (m) de altitud pudo verse afectado por fricción con las partículas suspendidas en estas capas durante el ascenso y descenso. Estas perturbaciones o comportamientos anómalos de los registros de temperatura exterior los podemos relacionar con los registros obtenidos de las velocidades de vuelo que se graficaron en la Figura 9.

En la introducción vimos el comportamiento de la tropósfera con respecto a la temperatura, esto era variaba en una razón de $2E-03$ (K/m). Si en esta zona interpolamos según los registros de la velocidad del vuelo y obtenemos una velocidad promedio de $2,5E03$ (m) en 900 (s), vemos que lo deseable para medir la

razón de cambio anterior la sonda debería subir y bajar en la tropósfera más lentamente. Lo que si podemos ver claramente que durante las etapas de ascenso y descenso en la tropósfera hay perturbaciones en los registros medidos por el módulo EMIDSS-1 por la composición de esta subcapa de la atmósfera. Esto nos lleva a comparar estos registros y los modelos obtenidos en la Tabla 2 con otras y futuras misiones, para ver que puede estar pasando en ese periodo dentro de esas capas, o mandar una sonda que permanezca en flotación en esa subcapa y hacer otro tipo de mediciones para poderlas relacionar con fenómenos producidos en la superficie de la Tierra, pero no era el caso de esta misión.

En el caso de otras variables atmosféricas de estudio en este trabajo como la presión barométrica, no hay cambios relevantes en su comportamiento con respecto a otros vuelos similares, ver la Figura 8. Es decir, en comparación con el perfil de temperatura, el perfil de la presión barométrica se mantiene estable durante la flotación y solo tiene los abruptos en el ascenso y el descenso como se esperaría. Luego en el caso de los registros del GPS Copernicus II, puede observarse que con respecto a la telemetría en tiempo real no tiene variación, ver Figura 10. La posible diferencia que se muestra, es debida a la escala del mapa cuando se tomó la imagen. Realizando un acercamiento de esta imagen nos mostrará la trayectoria de los casi 200E03 (m) del trayecto de la sonda y las direcciones del globo por los vientos durante la misión, como sabemos no tenemos forma de controlar la dirección del vuelo y solo se puede medir la dirección del viento.

5. CONCLUSIONES

En este trabajo, se mostraron los perfiles de temperatura de varios termómetros colocados estratégicamente en el módulo EMIDSS-1 que voló en la misión FY19-FTS de la NASA, durante la preparación, ascenso, flotación, descenso y recuperación. Donde se ajustaron modelos de tendencia a los registros experimentales que se almacenaron durante el vuelo de la sonda. Los modelos presentados en la Tabla 2 que fueron ajustados, van desde los lineales, hasta los polinomiales de sexto grado, pasando por modelos exponenciales en algunos termómetros para los diferentes perfiles. Encontramos una dinámica anormal en el ascenso-flotación-descenso comparada con otros vuelos similares que requiere más análisis y estudio sobre todo a las altitudes de la Tropopausa.

Una sugerencia propuesta para futuras misiones realizada por especialistas en el estudio de la atmósfera es tomar un mayor número de registros en esas altitudes. Aunque los primeros objetivos de estas misiones eran probar la instrumentación electrónica, los sensores de varias variables atmosféricas y el comportamiento de la computadora a bordo, con los resultados obtenidos nos dimos a la tarea de obtener los modelos experimentales para extrapolar resultados a otras altitudes. Cabe señalar que el perfil de la temperatura exterior en los modelos de tendencia fueron los que mayores diferencias tenían y los coeficientes de correlación no eran tan buenos, debido a que los ajuste en su mayoría fueron modelos polinomiales hasta de orden cinco de la Tabla 2.

Las expectativas de esta misión nos motivan a seguir experimentando en este tipo de misiones para ajustar y calibrar

la instrumentación empleada y tal vez usar otros instrumentos. Esto debido a los alcances de las sondas en este tipo de globos y en un futuro integrarlos a misiones satelitales de órbita baja.

En una plática con la directora encargada del Programa *Columbia Scientific Balloon Facility* de la NASA, Debora A. Fairbrother, nos comentó que estas misiones pudieran alcanzar los límites entre la estratósfera y la Mesosfera dependiendo el peso de las cargas útiles y la capacidad volumétrica con que se inflan los globos. Aunque por otro lado el Programa de Globos Científicos de la NASA no son para estudios climáticos pudimos percatarnos con los resultados del módulo EMIDSS-1, que la Tropopausa es la subcapa de la atmósfera donde ocurren fenómenos naturales que deben estudiarse más a fondo. Ahora estamos en espera de que vuelva a México el EMIDSS-2 que viajó a la estratósfera en la campaña primavera-verano de la NASA 2021 desde el mismo lugar en *Fort Sumner*, Nuevo México para comparar los resultados de los vuelos suborbitales con características similares.

REFERENCIAS

- Cavcar M. (2017). *The International Standard Atmosphere (ISA)*, Anadolu University, Turkey.
- Chudobova D., Cihalova K., Jelinkova P., Zitka J., Nejdil L. (2015). Effects of Stratospheric Conditions on the Viability, Metabolism and Proteome of Prokaryotic Cells. *Atmosphere*, 6(9), 1290-1306. <https://doi.org/10.3390/atmos6091290>
- Green Tal. (2018). *Ambientum, El portal profesional del medio ambiente*, <https://www.ambientum.com/>.
- Günter D. R. (2003). *Meteorología: Formaciones nubosas y otros fenómenos meteorológicos. Situaciones meteorológicas generales. Pronósticos del tiempo*. Barcelona: Ediciones Omega.
- HASP, (2020). High Altitude Student Platform. *Balloon Program Office NASA Wallops Flight Facility*. Issued October 16.
- Mendoza M. A., Prieto R. Álvarez-Cárdenas O., Padrón-Godínez A. (2021). TEPEU-1: Latin American space mission for scientific and technological validation, *I+D Tecnológico*. Vol. 17
- Padrón Godínez A., Mendoza M. A., Prieto R., López Cruz-Abeyro J. A. (2020). Integración de una red de estaciones terrestres para la misión TEPEU-1, *CONACES*, Agencia Espacial Mexicana.
- Prieto R. (2019). "NASA Lanza a la Estratósfera Módulo de Instrumentación Electrónica Creado por la UNAM e IPN". Boletín UNAM-DGCS-740. Ciudad Universitaria. Octubre.

BIOGRAFÍAS

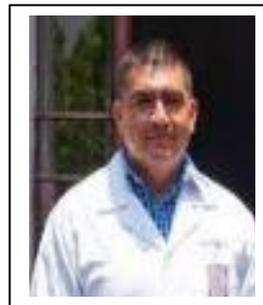


Alejandro Padrón-Godínez, Físico por la Facultad de Ciencias de la UNAM, 1985-1990. Maestro en Ingeniería Eléctrica por la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. 1992-1994, Mención Honorífica. Especialización en Seguridad Informática y Tecnologías de la Información por ESIME-Culhuacán del IPN, 2008-2009. Maestro en Ingeniería en Seguridad y Tecnologías de la Información

por ESIME-Culhuacán del IPN, 2011-2013. Doctor en Ciencias por el INAOE, 2015-2020. Actualmente labora en el Grupo de Modelado y Simulación de Procesos del ICAT-UNAM. Es profesor de asignatura en la División de Ingeniería Eléctrica de la FI-UNAM, donde imparte clase desde 1992.



Rafael Prieto-Meléndez, recibió el título de Ingeniero Mecánico-Electricista en 1993, por la Facultad de Ingeniería y el grado de Maestro en Ingeniería, en la División de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en 1999. Actualmente labora en el Grupo de Modelado y Simulación de Procesos del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología de la Universidad Nacional Autónoma de México. Es profesor de asignatura en la División de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, donde imparte clase desde 1995.



Mario Alberto Mendoza-Bárceñas, Ingeniero eléctrico electrónico. Disciplina académica: Ingeniería eléctrica, electrónica y de comunicaciones. Fecha: 1999 – 2004. Maestro en Ingeniería Disciplina académica: Ingeniería eléctrica (Instrumentación). Fecha: 2005 – 2009. Doctor en Ingeniería Disciplina académica: Ingeniería eléctrica (Instrumentación). Fecha: 2010 – 2014. Actualmente es Profesor Investigador en el Centro de desarrollo aeroespacial del Instituto Politécnico Nacional. Fechas de empleo: desde julio de 2013 – a la fecha. Duración del empleo 8 años y 1 mes. Líneas de Trabajo: Diseño e integración de Instrumentación aeroespacial para el desarrollo de cargas útiles orientadas a misiones científicas aeroespaciales mexicanas.