



CCADET

CENTRO DE CIENCIAS APLICADAS Y DESARROLLO TECNOLÓGICO
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Informe Técnico

Integración del Sistemas Embebidos para Instrumentación Aeroespacial: Sistema de Adquisición SADM-1

Rafael Prieto Meléndez, Mario Alberto Mendoza Bárcenas

Diciembre 2017

Proyecto Interno

Financiamiento parcial externo
Fondo Sectorial de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Actividades Espaciales
AEM-CONACYT

Integración del Sistemas Embebidos para Instrumentación Aeroespacial: Sistema de Adquisición SADM-1

Rafael Prieto Meléndez¹, Mario Alberto Mendoza Barcenás².

1 - Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico, Universidad Nacional Autónoma de México.

2 - Centro de Desarrollo Aeroespacial, Instituto Politécnico Nacional.

Resumen

Entre las líneas de trabajo de nuestro grupo se encuentra el desarrollo de sistemas embebidos, en donde uno de los campos de aplicación en que trabajamos se encuentra la instrumentación aeroespacial. Dentro de los objetivos a largo plazo en esta área de aplicación, está el generar instrumentación que pueda orbitar la tierra a bordo de satélites. En este trabajo se presenta el diseño e integración del sistema de adquisición SADM-1 (Sistema de Adquisición de Datos Meteorológicos versión 1), una prueba de concepto para el desarrollo posterior de una misión espacial, que integrará un módulo de carga útil que será compatible con el estándar Cubesat y cuya tarea científica será la de coadyuvar, mediante la medición de ciertas variables atmosféricas, con los estudios de las perturbaciones en la ionósfera asociadas a eventos sismotectónicos. Para validar la operación de este tipo de sistemas, la realización de pruebas es complicado y muy costoso, por lo que se ha adoptado un esquema de validación tecnológica basado en vuelos suborbitales utilizando globos estratosféricos. El sistema de adquisición SADM-1 formó parte de la instrumentación "cliente" que fue alojada dentro de la estructura de la plataforma CSM (Carga de Servicio Mexicana), para una prueba de validación mediante un vuelo a la estratósfera. Mediante dicha experiencia, además de poder validar experimentalmente los componentes comerciales que se utilizaron para la integración de dicho instrumento, se validó el carácter multimisión de la plataforma CSM, proveyendo además de experiencia logística en la integración de las diferentes disciplinas asociadas: diseño mecánico, manufactura, diseño térmico, instrumentación, comunicaciones, etc. En este informe se describe la arquitectura y los puntos más relevantes en el diseño del sistema SADM-1, así como los primeros resultados obtenidos en el vuelo a la estratósfera realizado en noviembre de 2016.

Índice

Introducción	3
1. Arquitectura del sistema SADM-1	4
2. Software del sistema SADM-1	6
3. Integración del sistema SADM-1 a la plataforma suborbital CSM	10
4. Descripción del vuelo de validación	11
5. Resultados y experiencia obtenida del vuelo de validación	12
Conclusiones	21
Referencias Bibliográficas	22

Introducción

Entre las líneas de trabajo de nuestro grupo se encuentra el desarrollo de sistemas embebidos, y en los últimos años esta línea se ha aplicado al desarrollo de instrumentación aeroespacial. Dentro de los objetivos a largo plazo en esta área de aplicación, está el generar instrumentación que pueda orbitar la tierra a bordo de satélites. Sin embargo, realizar este tipo de pruebas es complicado y muy costoso, por lo que se ha adoptado un esquema de validación tecnológica basado en vuelos suborbitales utilizando globos estratosféricos.

En este informe se describe, ampliando lo presentado en el SOMI XXXII Congreso de Instrumentación (Mendoza Bárcenas *et al.*, 2017), los puntos más relevantes en el diseño del sistema SADM-1, se presentan algunos resultados adicionales obtenidos en el vuelo suborbital a la estratósfera realizado en noviembre de 2016, así como los trabajos de ajuste a las lecturas de los sensores de temperatura debidos a las condiciones ambientales que se presentaron en dicho vuelo.

El sistema de adquisición SADM-1 (Sistema de Adquisición de Datos Meteorológicos versión 1), formó parte de la instrumentación “cliente” que fue alojada dentro de la estructura de la plataforma CSM (Carga de Servicio Mexicana), para una prueba de validación mediante un vuelo a la estratósfera. Mediante dicha experiencia, además de poder validar experimentalmente los componentes comerciales que se utilizaron para la integración de dicho instrumento, se validó el carácter multimisión de la plataforma CSM, proveyendo además de experiencia logística en la integración de las diferentes disciplinas asociadas: diseño mecánico, manufactura, diseño térmico, instrumentación, comunicaciones, etc.

Hay que señalar que el sistema SADM-1 es una prueba de concepto para el desarrollo posterior de una misión espacial, que integrará un módulo de carga útil que será compatible con el estándar Cubesat y cuya tarea científica será la de coadyuvar, mediante la medición de ciertas variables atmosféricas, con los estudios de las perturbaciones en la ionósfera asociadas a eventos sismotectónicos, temática que se trabaja en conjunto con el departamento de Física de la Tierra, Astronomía y Astrofísica I de la Facultad de Ciencias Físicas de la Universidad Complutense de Madrid.

Es importante destacar que en los últimos años, el aprovechamiento de las misiones suborbitales por grupos académicos, tanto en países que cuentan con programas bien establecidos de desarrollo espacial, como aquellos en los cuales se inician y que pretenden incursionar en el desarrollo tecnológico dentro del campo aeroespacial ha ido en aumento, principalmente impulsado por las grandes ventajas que representan: bajo costo (respecto a una misión espacial), recuperabilidad y reutilización del hardware. Dichas características permiten a los desarrolladores la oportunidad de que, con un presupuesto razonablemente alcanzable, puedan no sólo validar su instrumentación en ambiente de espacio cercano, sino también adquirir la experiencia logística, para el futuro desarrollo de misiones espaciales de mayor complejidad.

1. Arquitectura del sistema SADM-1

El objetivo del módulo experimental SADM-1, cuya arquitectura se muestra en la figura 1, es la adquisición de variables atmosféricas, tales como temperatura del aire, así como de datos a partir de sensores de navegación inercial, principalmente acelerómetro, magnetómetro y giróscopo, todos en tres ejes. La computadora a bordo (OBC, por sus siglas en inglés) está integrada a partir de un microcontrolador de grado industrial de 32 bits de propósito general. Los datos adquiridos mediante los sensores son almacenados en una tarjeta SD.

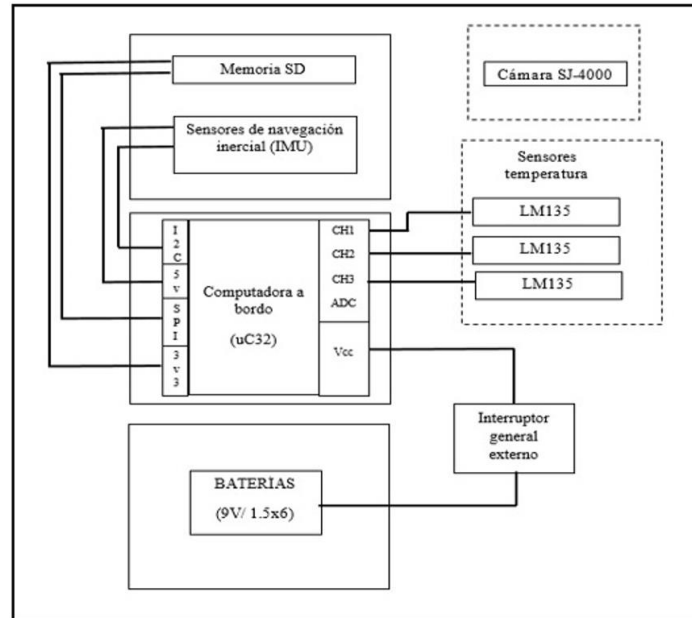


Figura 1. Arquitectura del instrumento SADM-1.

El módulo SADM-1 es una prueba de concepto para el desarrollo, a largo plazo, de un módulo de carga útil que será ubicado a bordo de la plataforma de un satélite pequeño de órbita, y que permitirá el estudio de perturbaciones en la ionósfera, principalmente temperatura del aire, campo magnético y resistividad del aire.

El estudio de la relación de las perturbaciones en la ionósfera con la actividad sismotectónica permitirá entender con mayor precisión la relación litósfera-atmósfera, particularmente en términos de anomalías que ocurren en ciertas variables atmosféricas alrededor de la ocurrencia de un terremoto de gran magnitud ($>7^\circ$ Richter), tales como variaciones en la temperatura del aire, campo magnético, resistividad del aire y TEC. De manera subyacente, el estudio de perturbaciones en la ionósfera podría ayudar a diseñar mecanismos para reducir el impacto sobre sistemas de geoposicionamiento (GPS) y otros medios de ubicación global, que utilizan las capas altas de la atmósfera como medio de propagación.

El componente principal de la OBC está basado en una tarjeta de desarrollo comercial ChipKIT uC32 de Digilent, que es una plataforma para desarrollar aplicaciones basadas en microcontrolador. Dicha tarjeta es compatible con el factor de forma del sistema Arduino Uno, y utiliza el núcleo chiKIT-core, cuyo API está basado en la especificación Arduino 1.6.x, lo que permite que sea compatible con los recursos existente para las plataformas Arduino. La tarjeta ChipKIT uC32 además es compatible con muchos shields diseñados para Arduino, siempre y cuando pueden operar a 3.3V.

Para los sensores de navegación inercial (IMU, por sus siglas en inglés) se utilizó en circuito LSM9DS1, que es un sistema versátil de medición de movimiento, contenido en un solo chip. Integra en el mismo encapsulado un magnetómetro, giróscopo y acelerómetro, cada uno en tres ejes (9 grados de libertad). El esquema de comunicación entre la OBC y el LSM9DS1 se establece mediante el protocolo I²C, aunque también es posible configurarlo para que soporte el protocolo SPI. El voltaje de alimentación del módulo

es de 3.3 V, el cual se obtiene a partir de una de las salidas de voltaje de la misma tarjeta ChipKIT que integra la OBC.

Para el sensado de la temperatura, se utilizaron los sensores LM135, los cuales son sensores de precisión y de fácil calibración. Su principio de operación se basa en un diodo Zener de dos terminales, el cual tiene un voltaje de ruptura directamente proporcional a la temperatura absoluta, a razón de 10 mV/°K. El sensor posee una impedancia dinámica de menos de 1Ω, y opera sobre un rango de corriente de 400μA a 5mA. Cuando se calibra el sensor a una temperatura de 25°C, tiene un error típico menor a 1°C en un rango de temperatura de hasta 100°C. En comparación con otros sensores de temperatura, el LM135 posee una salida muy lineal. Las aplicaciones dentro de las cuales se puede considerar al LM135, incluyen aquellas que requieren medición de temperatura en un rango de entre -55°C a 150°C. Por sus características de baja impedancia y salida lineal, los hacen ideales para poder interactuar con circuitos de control y sistemas de adquisición de datos. Para su conexión con la OBC, la interfaz se realizó mediante uno de los canales de conversión analógico-digital de la tarjeta ChipKIT uC32.

En la figura 2 se muestra el diseño del circuito impreso para la OBC con los sensores del sistema, de acuerdo con la arquitectura descrita del instrumento, mientras que en la figura 3 se muestra al módulo SADM-1 ya integrado con la configuración utilizada para la evaluación en vuelo suborbital.

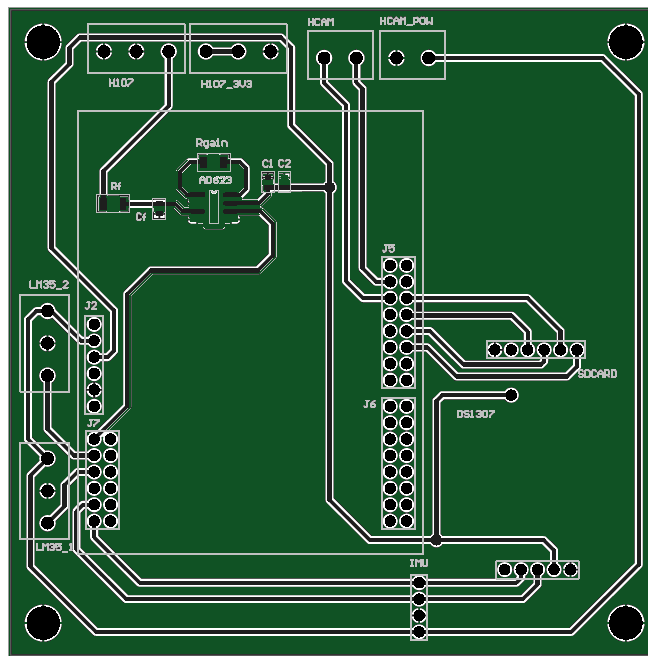


Figura 2. Diseño del circuito impreso de la OBC del Instrumento SADM-1.

Para la alimentación del instrumento SADM-1 se utilizó un banco de baterías de litio que proporcionan un voltaje de +9V, las cuales están especificadas para trabajar adecuadamente hasta una temperatura mínima de -40 °C, que como se verá más adelante, representa un parámetro crítico para la correcta operación del sistema durante el vuelo.

Otro de los elementos importantes dentro de la instrumentación del sistema SADM-1 y, aunque en la práctica operó como un dispositivo autónomo, es una cámara fotográfica y de video. En este caso, se utilizó la cámara SJ-4000. Dentro de las características más destacables de esta cámara, se encuentra su interfaz WIFI, su resolución de 12 megapíxeles y su capacidad de grabar video FullHD 1080p a 30 frames por segundo y a 720p a 60 frames por segundo.

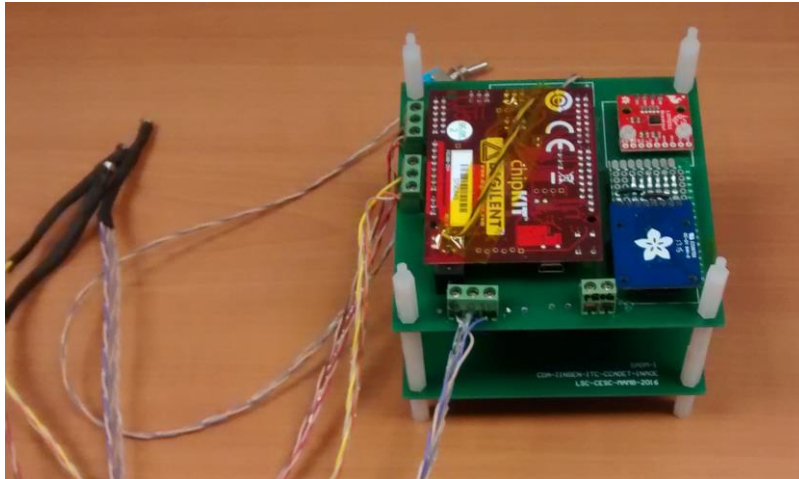


Figura 3. Instrumento SADM-1 integrado.

2. Software del sistema SADM-1

Para el software integrado en el SADM-1, dado que el sistema está construido sobre una tarjeta ChipKIT uC32, y a que este sistema es compatible con el estándar de programación de Arduino, se puede utilizar el amplio conjunto de bibliotecas para el manejo de sensores existente para dicha plataforma, lo que facilita el desarrollo del programa de control. Este programa se encarga de llevar a cabo las funciones de adquisición de datos de los sensores a bordo en tiempos predefinidos, almacenando los datos leídos en una memoria SD.

Para la ejecución de las tareas que realiza el SADM-1, la estructura del programa de control se basa en el uso del administrador de tareas propietario de la plataforma ChipKIT, el cual se encarga de garantizar la ejecución de las tareas de acuerdo con el esquema de tiempos programado. Al inicio de la ejecución del programa, se pone a funcionar el reloj de tiempo real (RTCC) contenido en la ChipKIT uC32, permitiendo ajustarse la fecha y hora a través de la consola, a la que se accede vía un puerto USB. Posteriormente se configuran el acceso a los dispositivos (IMU, sensores de temperatura y memoria SD), y se configura una tarea que se ejecuta recurrentemente cada 30 segundos. En esta tarea se hace la lectura de la IMU (aceleración, velocidad angular y campo magnético) y de los tres sensores de temperatura, y se almacena en la memoria SD junto con la estampa de tiempo en que se hizo la lectura. En caso de que haya algún problema con algún sensor, también se almacena en la memoria dicho evento. En el listado 1 se muestra el código desarrollado para el control del sistema SADM-1.

Listado 1. Código del instrumento SADM-1.

```

/*
 * Código de control del Sistema de Adquisición de Datos Meteorológicos SADM-1
 * Version 3
 * Sensores: IMU LMS9DS1 + 3 analog p/Temp (LM135)
 * Librerías (wire)
 *
 *                               * RPM
 */

#define LEDtest 43           // LED testigo
boolean ptoSerie = false;   // Define si esta conectada la terminal

float T1=0;                 // T1 - Temperaruta de la sonda
float T2=0;                 // T2 - Temperaruta LM335 1
float T3=0;                 // T3 - Temperaruta LM335 2

#include <RTCC.h>           // ***** Definiciones para el uso del RTCC *****
RTCCValue rv;
char fh[22];                // Cadena con fecha y hora

```

```

#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SparkFunLSM9DS1.h>
LSM9DS1 imu;
#define addressAyG 0x6B //1101011b, direccion I2C 7bit Acelerometro+Giroscopio LMS9DS1
#define addressMag 0x1E //0011110b, direccion I2C 7bit Magnetometro LMS9DS1
#define DECLINATION 5.37 // Declinacion Leon //Ciudad de Mexico: 4.48
uint8_t bufferD[6]={0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00};
boolean IMUPres = true; // Bandera para indicar si la IMU esta presente
int fSensor_id; // Variables para el control de la tarea
unsigned long fSens_var; // Variable de paso para la funcion de los sensores

#include <SD.h> // ***** Definiciones para el uso de la memoria SD *****
#define CS_SD 10 // Pin SS por default
File archSens; // Manejador de archivo para sensores
char nArch[14]; // Nombre del archivo para datos de los sensores

void setup() {
  Serial.begin(115200); // Configura puerto serie (consola)
  Serial.print ("Puerto configurado");
  for (int i=0; i < 5; i++) {
    delay(1000);
    if (Serial.available() > 0) {
      ptoSerie = true;
      break;
    }
    Serial.print (".");
  }
  Serial.println("");
  if (!ptoSerie)
    Serial.println ("Modo autonomo.");
  pinMode(LEDTest, OUTPUT); // Configura pin LED testigo

  /***** CONFIGURACION DEL RTCC *****/
  RTCC.begin(); // Inicializa modulo RTCC
  iniciaRTCC(); // Usuario define valores iniciales del RTCC via puerto serie

  /***** CONFIGURACION DE LA IMU *****/
  imu.settings.device.commInterface = IMU_MODE_I2C;
  imu.settings.device.mAddress = addressMag;
  imu.settings.device.agAddress = addressAyG;
  if (!imu.begin())
  {
    Serial.println("*** Error al configurar IMU ***");
    IMUPres = false;
  }
  if (IMUPres)
    Serial.println("IMU configurada.");

  /***** CONFIGURACION DE LA MEMORIA SD *****/
  pinMode(CS_SD, OUTPUT);
  digitalWrite(CS_SD, HIGH);
  if (!SD.begin(CS_SD))
    Serial.println("*** Error de acceso a la memoria SD ***");
  else
    Serial.println("Memoria SD inicializada.");
  if (ptoSerie) {
    sprintf ( nArch,"D%02d%02d%02d.txt", // Formato de nombre de archivo con fecha
      rv.year(),
      rv.month(),
      rv.day() );
  }
  else
    sprintf ( nArch,"Datos.txt"); // Nombre de archivo fijo
  archSens = SD.open(nArch, FILE_WRITE);
  if (archSens) {
    Serial.print("Archivo de datos de los sensores configurado: ");
    Serial.println(nArch);
    archSens.print("Toma de datos iniciada: ");
    archSens.println(fecha(1));
    if (!IMUPres) archSens.println("*** Error al configurar IMU ***");
    archSens.close();
  } else
    Serial.println("*** Error al crear archivo de datos ***");

  /***** CONFIGURACION DE TAREAS *****/
  fSensor_id = createTask(fSensores, 30000, TASK_ENABLE, &fSens_var);
  if (fSensor_id != -1)
    Serial.println("Tarea - Lectura de Sensores: OK");
} // Fin setup()

```

```

////////////////////////////////////
// Funcion principal:      loop()
////////////////////////////////////
void loop() {
    Serial.write(".");
    digitalWrite(LEDtest, HIGH);      // LED testigo
    delay(250);
    digitalWrite(LEDtest, LOW);
    delay(750);
}

////////////////////////////////////
// Funcion de configuracion inicial del RTCC
////////////////////////////////////
void iniciaRTCC() {
    unsigned char fa, fm, fd, hh, hm, hs;
    rv = RTCC.value(); // Inicializacion de hora

    if (ptoSerie)
    {
        do // Definición de fecha actual
        {
            Serial.println("> Introduce fecha: (formato: AA MM DD)");
            while (!Serial.available()) {}
            fa=Serial.parseInt();
            fm=Serial.parseInt();
            fd=Serial.parseInt();
        } while (fa<0 || fa>99 || fm<1 || fm>12 || fd<1 || fd>31);
        Serial.println("");
        do // Definición de hora actual
        {
            Serial.println("> Introduce hora: (formato: hh mm ss)");
            while (!Serial.available()) {}
            hh=Serial.parseInt();
            hm=Serial.parseInt();
            hs=Serial.parseInt();
        } while (hh<0 || hh>23 || hm<0 || hm>59 || hs<0 || hs>59);
        rv.setValidity(RTCC_VAL_MAN); // fecha/hora inicializada por configuracion manual
    }
    else
    {
        fa=16;
        fm=11;
        fd=26;
        hh=9;
        hm=0;
        hs=0;
        rv.setValidity(RTCC_VAL_NOT); // fecha/hora inicial fija
    }

    rv.date(fa, fm, fd);
    rv.time(hh, hm, hs);
    RTCC.set(rv);

    Serial.print("\nFecha y hora actual: ");
    Serial.println(fecha(1));
    Serial.println("");
}

////////////////////////////////////
// Funcion para obtener la fecha y hora actual
////////////////////////////////////
char * fecha(int l)
{
    rv = RTCC.value();
    if (l) {
        sprintf ( fh,"20%02d/%02d/%02d %02d:%02d:%02d", // Formato fecha "AAAA/MM/DD hh:mm:ss"
            rv.year(),
            rv.month(),
            rv.day(),
            rv.hours(),
            rv.minutes(),
            rv.seconds() );
    } else {
        sprintf ( fh,"%02d:%02d:%02d", // Formato fecha "hh:mm:ss"
            rv.hours(),
            rv.minutes(),
            rv.seconds() );
    }
    return fh;
}

```

```

////////////////////////////////////
// Funcion de lectura de la IMU y almacenado en disco
// -> Administrador de tareas
////////////////////////////////////
void fSensores(int id, void * tpPtr) {
    float accX, accY, accZ;    // Acelerometro 3-axis data
    float magX, magY, magZ;    // Magnetometro 3-axis data
    float girX, girY, girZ;    // Giroscopio 3-axis data
    char datos[40];            // Cadena con fecha y hora
    float roll, pitch, heading;

    Serial.write("-");

    if (IMUPres) {              // Si inicializo IMU toma lecturas
        imu.readAccel();        // Lee datos del Acelerometro
        accX = imu.calcAccel(imu.ax);
        accY = imu.calcAccel(imu.ay);
        accZ = imu.calcAccel(imu.az);

        imu.readGyro();         // Lee datos del Giroscopio
        girX = imu.calcGyro(imu.gx);
        girY = imu.calcGyro(imu.gy);
        girZ = imu.calcGyro(imu.gz);

        imu.readMag();          // Lee datos del Magnetometro
        magX = imu.calcMag(imu.mx);
        magZ = imu.calcMag(imu.my);
        magY = imu.calcMag(imu.mz);

        // Pitch $ Roll
        roll = atan2(imu.ay, imu.az) * 180.0 / PI;
        pitch = atan2(-imu.ax, sqrt(imu.ay * imu.ay + imu.az * imu.az)) * 180.0 / PI;
        // Heading (mx=-my, my=-mx)
        if (imu.mx == 0)
            heading = (imu.my > 0) ? 180.0 : 0;
        else
            heading = atan2(-imu.my, -imu.mx);
        heading -= DECLINATION * PI / 180;
        if (heading > PI) heading -= (2 * PI);
        else if (heading < -PI) heading += (2 * PI);
        else if (heading < 0) heading += 2 * PI;
        heading *= 180.0 / PI;
    }

    T1 = analogRead(A0)*330.0/1024-273.15; // LM135
    T2 = analogRead(A1)*330.0/1024-273.15; // LM135
    T3 = analogRead(A2)*330.0/1024-273.15; // LM135

    archSens = SD.open(nArch, FILE_WRITE); // Escritura de resultados a archivo
    if (archSens) {
        archSens.print(fechar(0));
        if (IMUPres) { // Si lee IMU escribe
            Serial.println(fechar(0));
            sprintf ( datos, " A/%7.4f/%7.4f/%7.4f/ ", accX, accY, accZ);
            Serial.print(datos);
            archSens.print(datos);
            sprintf ( datos, "M/%7.4f/%7.4f/%7.4f/ ", magX, magY, magZ);
            Serial.print(datos);
            archSens.print(datos);
            sprintf ( datos, "G/%7.2f/%7.2f/%7.2f/ ", girX, girY, girZ);
            Serial.println(datos);
            archSens.print(datos);
            sprintf ( datos, "P/%7.2f/ R/%7.2f/ H/%7.2f/ ", pitch, roll, heading);
            Serial.println(datos);
            archSens.print(datos);
        }
        sprintf ( datos, "T1/%.2f/ T2/%.2f/ T3/%.2f/", T1, T2, T3);
        Serial.println(datos);
        archSens.println(datos);
        archSens.close();
    }
    else {
        Serial.println("*** Error al escribir en archivo de datos ***");
        Serial.println(fechar(0));
        if (IMUPres) { // Si inicializo IMU toma lecturas
            sprintf ( datos, "\t Acc : %7.4f, %7.4f, %7.4f", accX, accY, accZ);
            Serial.println(datos);
            sprintf ( datos, "\t Mag : %7.4f, %7.4f, %7.4f", magX, magY, magZ);
            Serial.println(datos);
            sprintf ( datos, "\t Gir : %7.2f, %7.2f, %7.2f", girX, girY, girZ);
            Serial.println(datos);
        }
    }
}

```

```

    sprintf ( datos, "\t P:%7.2f   R:%7.2f   H:%7.2f", pitch, roll, heading);
    Serial.println(datos);
}
sprintf ( datos, "\tT1=%7.2f, T2=%7.2f, T3=%7.2f", T1, T2, T3);
Serial.println(datos);
}
}

```

3. Integración del sistema SADM-1 a la plataforma suborbital CSM

La plataforma Carga de Servicio Mexicana, CSM-UNAM, es desarrollada por un grupo multidisciplinario integrado por académicos del Instituto de Ingeniería y la Facultad de Ingeniería, con la colaboración del MADiT, el cual está dedicado al diseño, construcción, lanzamiento y recuperación de cargas útiles para vuelos suborbitales, así como al desarrollo de tecnología espacial. Su principal motivación es la creación, el fortalecimiento y la profesionalización de las capacidades en México para la realización de pruebas y experimentos en ambiente subespacial, dirigidos a la academia nacional e internacional, así como a la iniciativa privada interesada.

Esta plataforma está constituida por 3 partes. La primera es la estructura mecánica, una estructura híbrida constituida por un marco de aluminio ligero y de alta rigidez, con refuerzos de ULTEM fabricados por manufactura aditiva, el cual es un polímero de alta resistencia mecánica y que soporta altas temperaturas. Esta estructura mecánica tiene como objetivo contener a la carga útil.

El segundo elemento es una estructura tipo torre que contiene la electrónica de la CSM y la carga útil de los clientes. La electrónica de la CSM consiste en un sistema para recabar información del estado de la plataforma; las variables que mide son: aceleración, magnetismo, giróscopo, presión, humedad, altitud, luz y contiene 5 termistores para la medición de temperaturas diversas, un GPS y un transmisor de RF. Con esta información se puede determinar la posición en vuelo de la CSM, obtener información de las variables mencionadas, determinar la altitud de la carga y medir cinco temperaturas de los experimentos que así lo requieran. Para minimizar el riesgo de daño por impactos, esta estructura es suspendida al interior de la estructura híbrida mediante tensores elásticos que reducen el efecto de fuerzas dinámicas. Para este vuelo la carga útil estuvo formada por el instrumento SADM-1, así como un experimento del CIIA de la Universidad Autónoma de Nuevo León, en el cual buscan evaluar un recubrimiento vitrocerámico nanoestructurado en multicapa que proteja a una carga útil de choques térmicos y refleje la radiación cósmica.

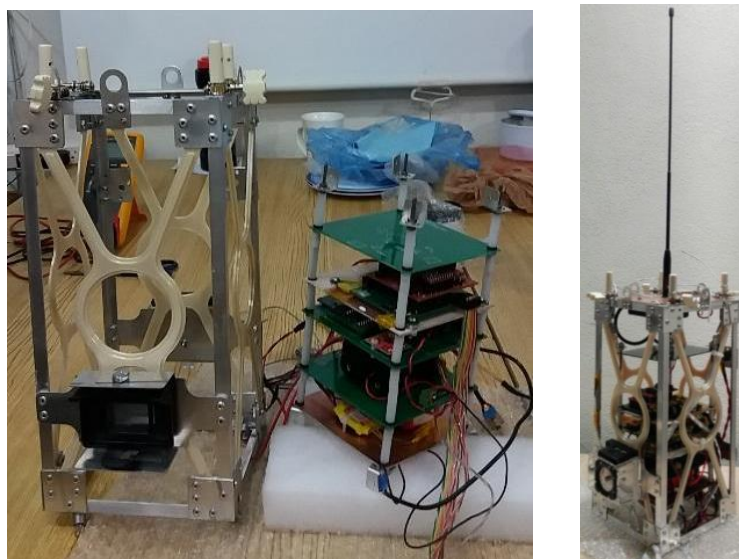


Figura 4. Estructura de la CSM, sistemas electrónicos a bordo e integración de la carga.

Finalmente, el tercer elemento son los mecanismos de protección contra impacto y protección térmica. En cuanto a la protección exterior contra impacto se implementó una base amortiguada compuesta por 2 diferentes tipos de espumados plásticos, formando capas en un arreglo ortogonal lo cual genera una excelente capacidad de amortiguamiento. Para la protección térmica se utilizaron bloques de unicel que fueron recubiertos con una manta térmica de poliéster. Una vez integrada la CSM-UNAM con los dispositivos de los clientes, la estructura alcanzó un peso de 1900 gramos.

4. Descripción del vuelo de validación

El vuelo de validación suborbital de efectuó el sábado 26 de noviembre de 2016, desde el Parque Ecológico Explora de la ciudad de León, Guanajuato, siendo liberado el globo estratosférico que llevó la carga a las 9:05 horas, en un ascenso que duró alrededor de 2 horas 19 minutos, hasta alcanzar una altura aproximada de 34,545 metros, lo cual representa más de 3 veces la altura de crucero de los aviones comerciales.

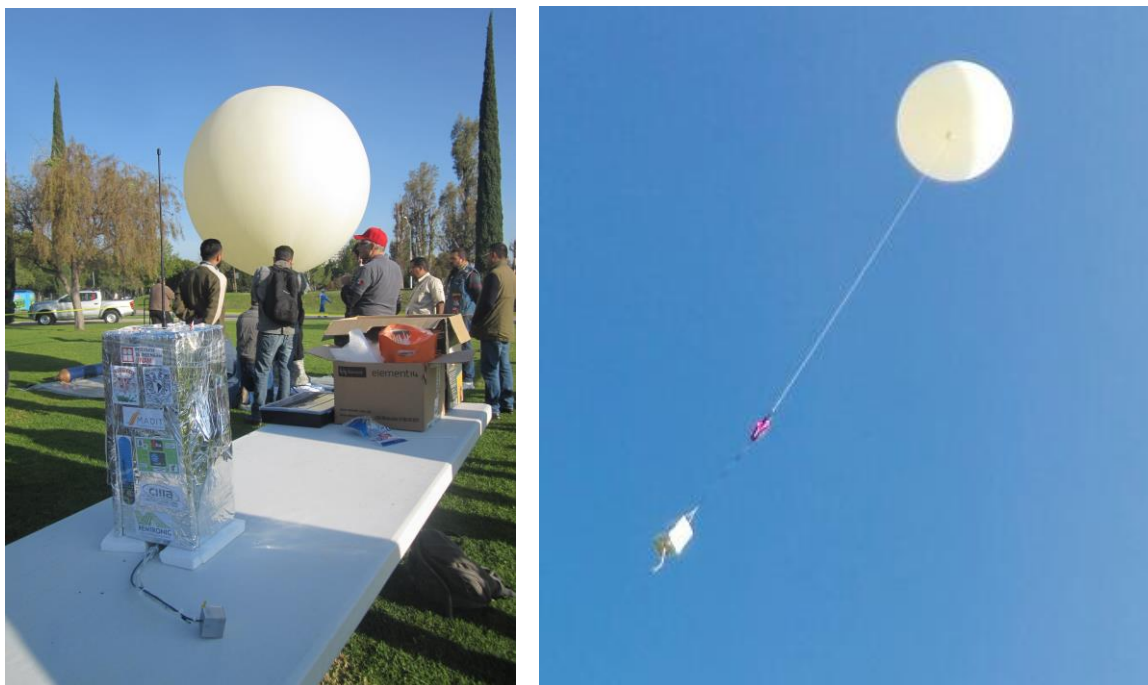


Figura 5. Preparación y lanzamiento de la plataforma CSM.

Gracias a las condiciones climatológicas, la carga útil fue visible desde tierra durante todo el vuelo. Después de alrededor de 90 minutos del lanzamiento, su posición, sin muchas variaciones, se estableció primero sobre la ciudad de Silao, trasladándose después a las inmediaciones del Cerro del Cubilete. Aproximadamente a las 11:24 horas reventó el globo de helio, iniciando una caída, amortiguada por un paracaídas, durante un lapso de 27 minutos, dirigiéndose hacia la localidad de Santa Teresa, Guanajuato, para tocar tierra aproximadamente a las 11:51 horas. La trayectoria seguida por la plataforma se muestra con detalle en la figura 6 (Velázquez, 2016).

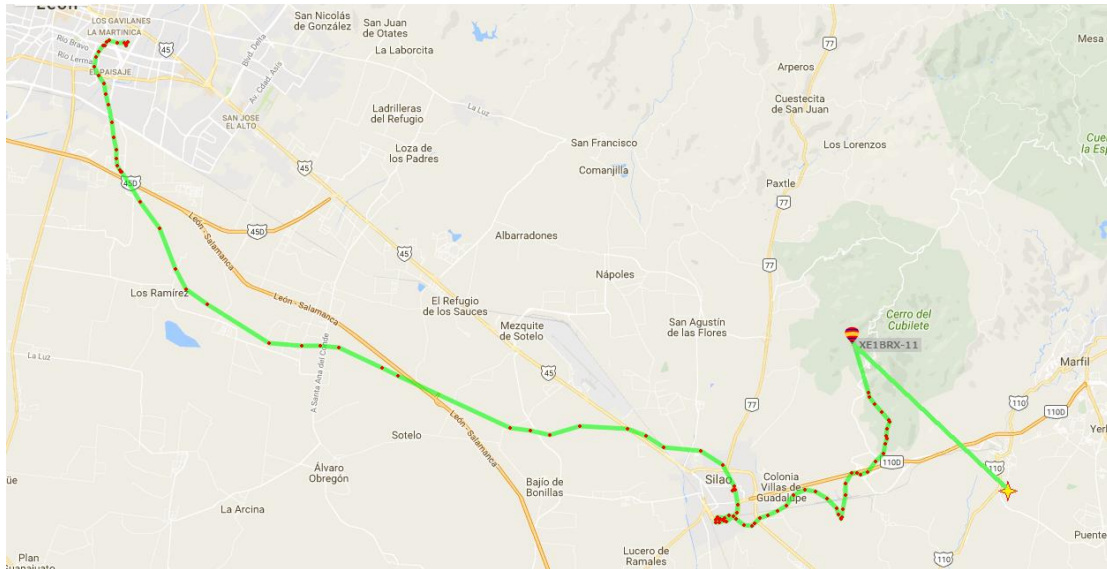


Figura 6. Trayectoria recorrida por la plataforma CSM con el módulo SADM-1 a bordo.

Cabe mencionar que las condiciones climáticas provocaron una complicación importante hacia el final de la misión, pues una corriente de aire frío ocasionó un considerable y abrupto descenso de temperatura, como se describe más adelante, que además de que pudo acelerar el deterioro del látex del globo impidiendo alcanzar una mayor altura, hizo que se congelara el transmisor y se perdiera contacto con la sonda, lo que dificultó la recuperación de la carga, llegando incluso a pensar que se pudiera haber perdido. Finalmente, después de 6 horas de búsqueda, se logró recuperar la carga.

5. Resultados y experiencia obtenida del vuelo de validación

Con la recuperación de la carga a bordo de la plataforma CSM, se recuperó la memoria con los datos adquiridos por el módulo SADM-1 durante su vuelo, junto con las imágenes tomadas por las cámaras. El registro de datos adquirido incluye las siguientes variables:

- Hora de la medición
- Aceleración (3 ejes)
- Campo magnético (3 ejes)
- Velocidad angular (3 ejes)
- Orientación de la carga (pitch, roll, heading)
- Temperatura de la electrónica
- Temperatura al interior de la CSM
- Temperatura exterior

A partir de estos datos adquiridos se puede obtener una idea precisa de las condiciones en que se realizó el vuelo, lo que permite evaluar el desempeño del sistema con miras a mejorar la instrumentación desarrollada, además de contar con una primera idea de los datos con posible utilidad en los estudios sobre perturbaciones atmosféricas. Por ejemplo, los datos de aceleración, que se muestran en la figura 7, nos permiten observar cuando se van presentando algunos eventos significativos para la misión.

Un aspecto que resulta de gran importancia para el desarrollo de la misión es lo relacionado con las temperaturas que se presentaron durante el vuelo, lo cual se observa en la figura 8, donde se muestran las temperaturas en tres zonas de interés, la temperatura de la electrónica del SADM-1, la temperatura en el punto medio al interior de la CSM (lejos de la electrónica) y la temperatura ambiente al exterior de la CSM.

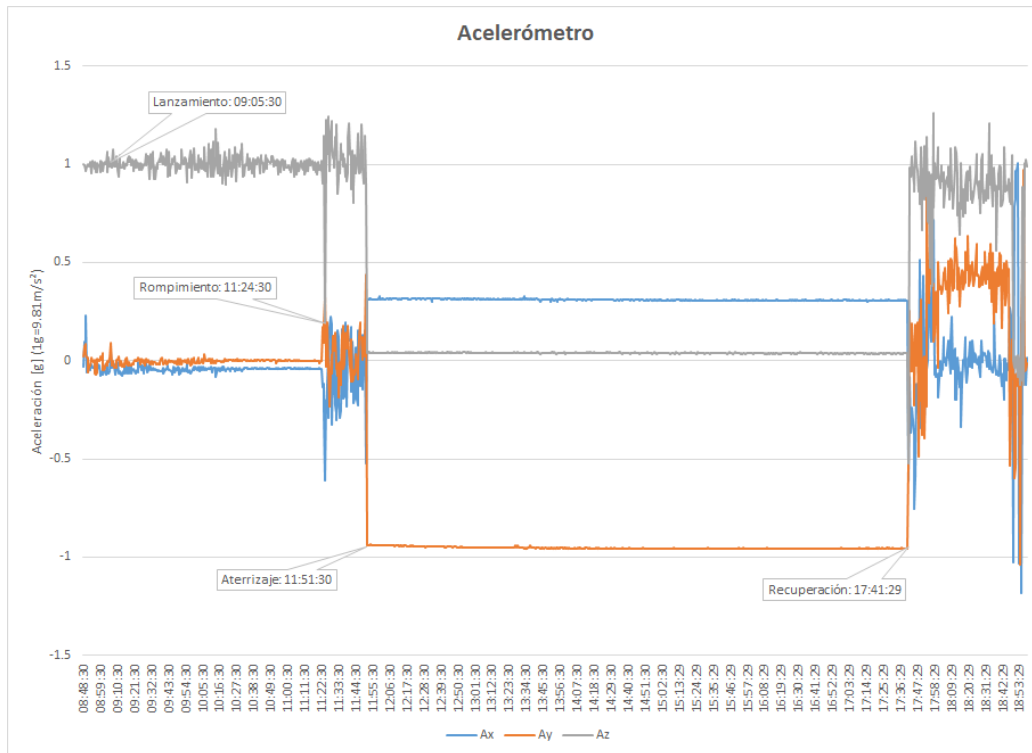


Figura 7. Datos de aceleración adquiridos por el módulo SADM-1.

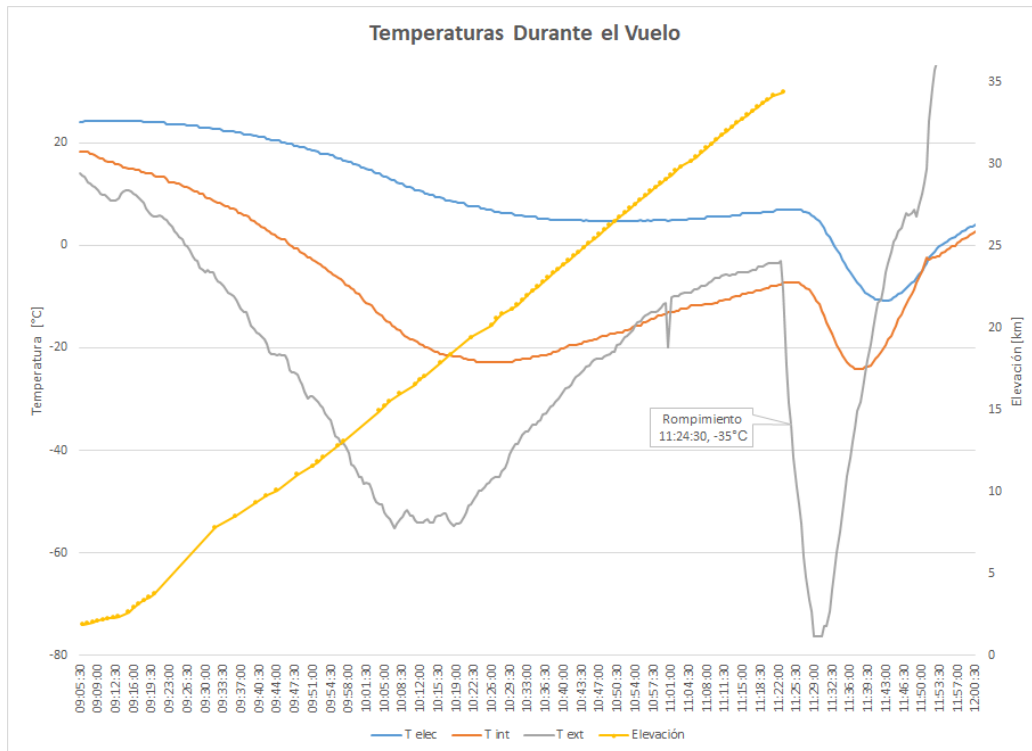


Figura 8. Datos de temperatura durante el ascenso del módulo SADM-1.

El monitorear la temperatura de la electrónica es importante, ya que todos los componentes electrónicos tienen problemas para operar en temperaturas extremas. Los diferentes componentes utilizados en la construcción del SADM-1 están especificados para operar en temperaturas mínimas que oscilan entre los $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$, y durante el vuelo, en la zona donde se encontraba la electrónica, se alcanzó una temperatura mínima de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que se pudo validar que el sistema estuvo en todo momento en condiciones adecuadas de operación. Medir la temperatura al centro de la CSM nos permite evaluar la eficiencia de la protección térmica utilizada. En este vuelo se alcanzaron temperaturas de $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ y temperaturas aun menores en la zona donde se instalaron las cámaras, lo que provocó que sus baterías fallaran antes de lo esperado, por lo que no se cuenta con un registro fotográfico a alturas por arriba de los 21 km. Pero lo más grave fue lo ocurrido al transmisor, que se encontraba ubicado en el extremo opuesto a la electrónica (que durante su operación genera calor) y que ante un evento climático extremo se congeló, dejando de transmitir la ubicación de la sonda, lo que estuvo cerca de ocasionar la pérdida de la carga, situación que hubiera representado un resultado no exitoso de la misión. Esto representa un aprendizaje importante, particularmente para los responsables de la CSM, que son los encargados de proporcionar las condiciones adecuadas y seguras a los clientes (como en este caso lo fue el SADM-1), que tendrán que hacer mejoras significativas a la protección térmica para próximos vuelos. Finalmente, el registro de la temperatura exterior nos permite identificar las condiciones a las que se enfrenta la carga. Como se observa en la figura 8, una corriente de aire frío alcanzó a la sonda ocasionando una abrupta caída de temperatura, ya que en 2 minutos, aun con el globo en ascenso, hubo una disminución de temperatura de $32\text{ }^{\circ}\text{C}$ (de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$), y que continuó disminuyendo hasta alcanzar los $-76\text{ }^{\circ}\text{C}$ (aunque como se verá más adelante, estas temperaturas se corrigieron a la baja), lo que dio origen a los problemas mencionados con el transmisor. Sin embargo, el perfil observado de temperatura durante el ascenso, como se observa en la figura 9, coincide con los perfiles esperados de temperatura atmosférica, en donde se puede observar la pendiente de la caída de temperatura en la tropósfera, la estabilidad en la tropopausa, y la elevación gradual de la temperatura en la estratósfera, hasta que se presentó la corriente de aire frío.

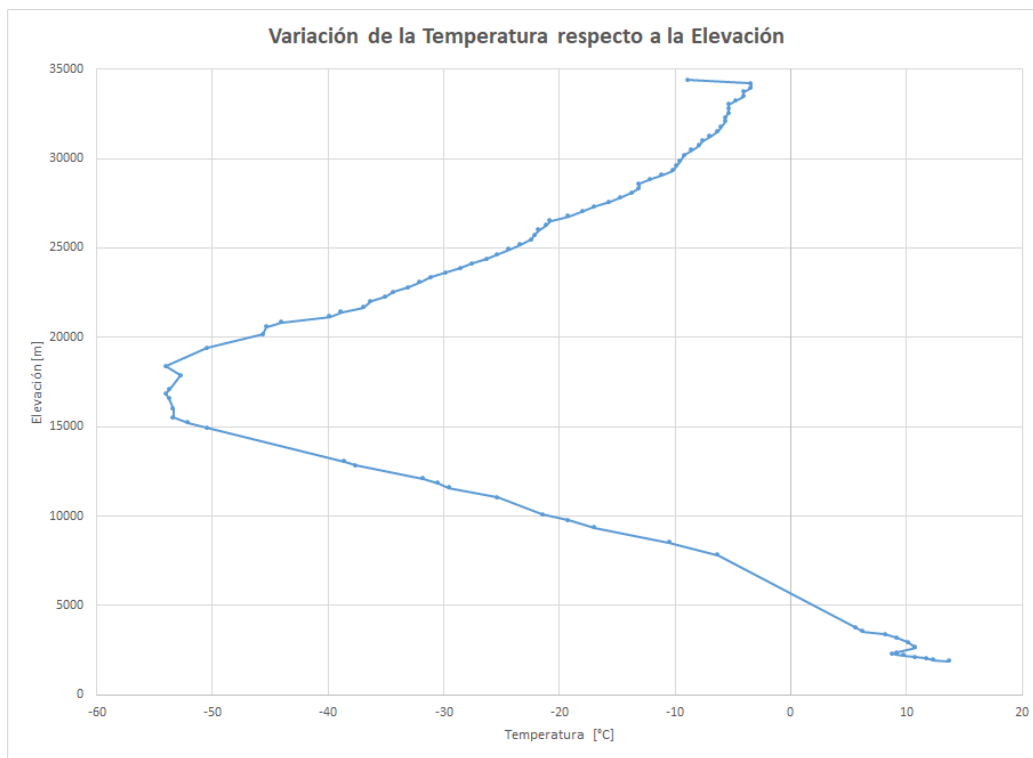


Figura 9. Perfil de temperatura respecto a la elevación.

En relación con las mediciones de temperatura, especialmente en la temperatura exterior, un detalle importante que debemos observar es que la temperatura mínima registrada ($-76\text{ }^{\circ}\text{C}$) sobrepasa el límite inferior del rango de operación definido por el fabricante para este sensor ($-55\text{ }^{\circ}\text{C}$). Esto no quiere decir que al salir de su rango de operación el sensor inmediatamente va a dejar de funcionar, sino que estamos saliendo de su rango de respuesta lineal y va a tener un error mucho mayor al señalado por el fabricante. Por esto, para poder tener una mayor confianza en las lecturas obtenidas, se hizo un proceso de calibración de los sensores en condiciones extremas. Para ello se consiguió el acceso a un ultracongelador, en el cual se pueden tener temperaturas controladas en el rango de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Con este equipo se realizaron pruebas que nos permitieron obtener una curva de calibración para los sensores, en el rango mencionado. Desafortunadamente no se pudo conseguir otro equipo en el que se pudieran tener temperaturas controladas de los $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta temperatura ambiente para tener la curva de calibración completa en el rango en que trabajaron los sensores durante el vuelo estratosférico, pero con esta prueba, al menos podemos corregir las temperaturas en las condiciones en que se excede lo especificado por el fabricante. En la figura 10 se muestra la gráfica de temperatura obtenida de los tres sensores utilizados en el vuelo desde que fueron llevados a las temperaturas para la calibración, así como el desarrollo de la prueba.

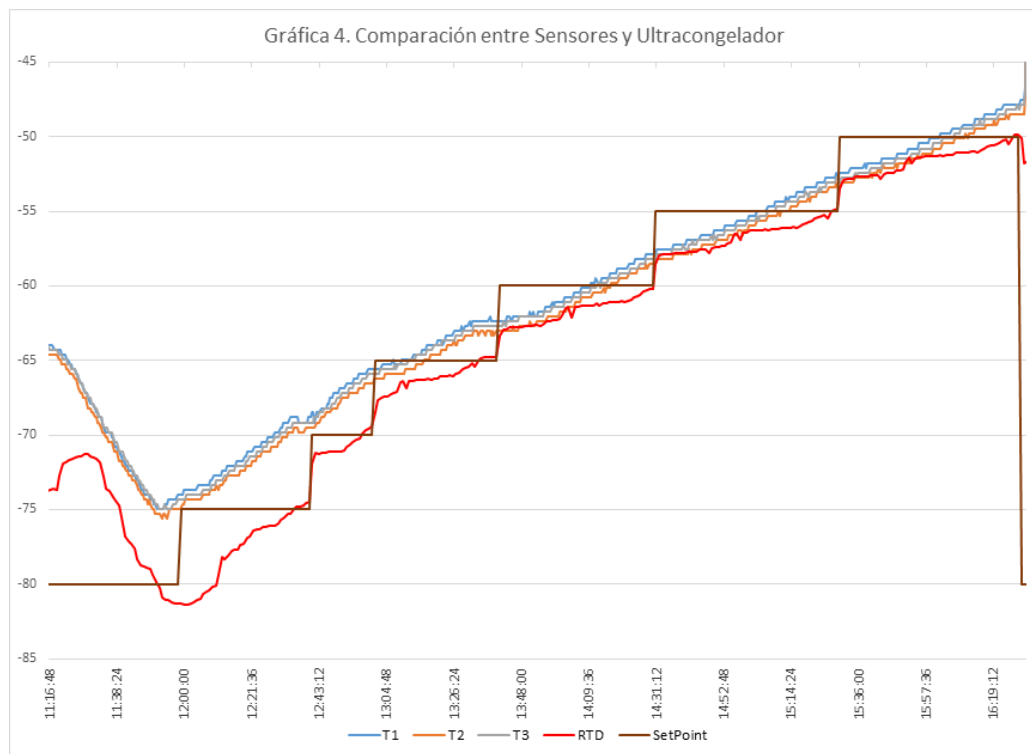


Figura 10. Lectura de temperatura de sensores para calibración.

En esta prueba la temperatura T1 corresponde a la temperatura de la electrónica, T2 a la interior de la CSM y T3 a la temperatura exterior; el SetPoint es la temperatura buscada en el ultracongelador y RTD corresponde al sensor de referencia del ultracongelador. A partir de estos datos, se obtienen los valores mostrados en la tabla 2, con los que se puede hacer la calibración y el ajuste de los valores obtenidos en el vuelo, particularmente para la temperatura exterior en el rango evaluado en esta prueba.

A partir de los resultados obtenidos en esta prueba, al hacer la corrección de las exteriores, de concluye que la temperatura exterior extrema, alcanzada durante la caída al paso por la tropopausa, estuvo ligeramente debajo de los $-82\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 2. Temperaturas para calibración de los sensores

Temperatura	T1	T2	T3
-80	-74.31	-74.96	-74.63
-75	-68.83	-69.48	-69.16
-70	-65.61	-66.26	-65.93
-65	-62.39	-63.03	-62.71
-60	-57.88	-58.52	-58.2
-55	-52.4	-53.04	-52.72
-50	-47.89	-48.53	-48.21

Otro de los resultados importantes de rescatar además de lo relativo a la temperatura, son las mediciones de campo magnético, las cuales se muestran en la figura 11, ya que estos son una primera medición que puede ser de utilidad para el estudio de la relación de las perturbaciones en las variables atmosféricas que puedan ser relacionadas con eventos sismotectónicos. De hecho, estos datos junto con los de temperatura fueron enviados a los colegas en España, los cuales hicieron comentarios positivos acerca de estos primeros resultados, e hicieron algunas recomendaciones que serán incorporadas para las próximas misiones.

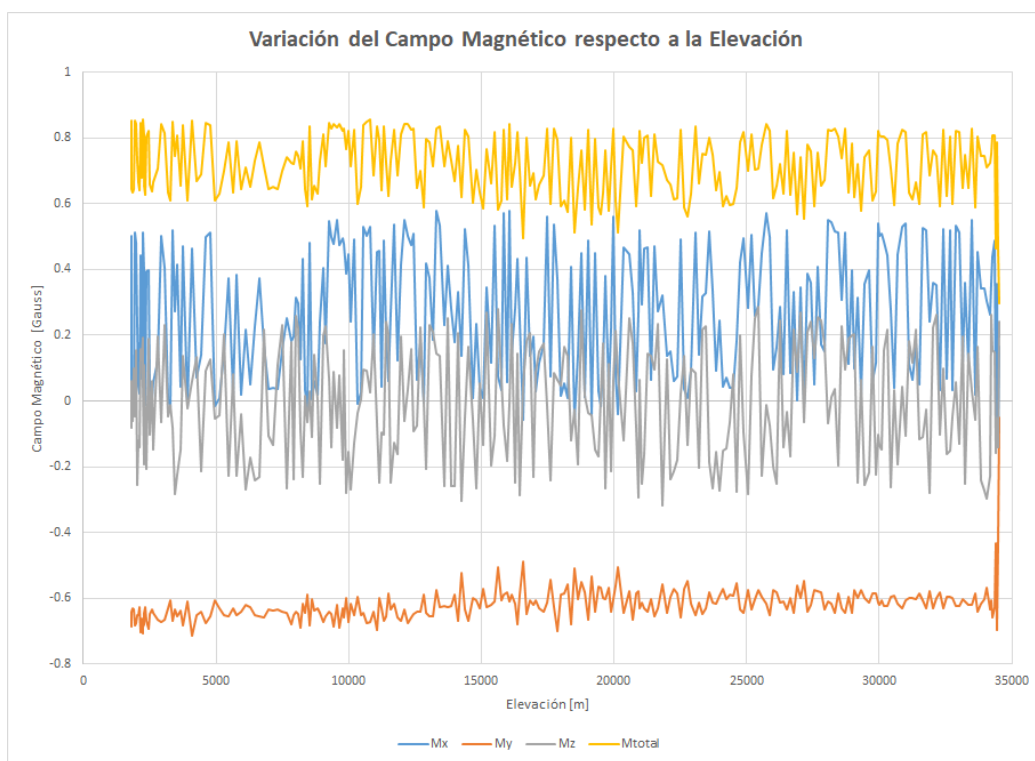


Figura 11. Datos de campo magnético respecto a la elevación.

De manera complementaria, en las figuras 12, 13, 14 y 15 se muestran las gráficas correspondientes a los demás datos obtenidos por el instrumento SADM-1.

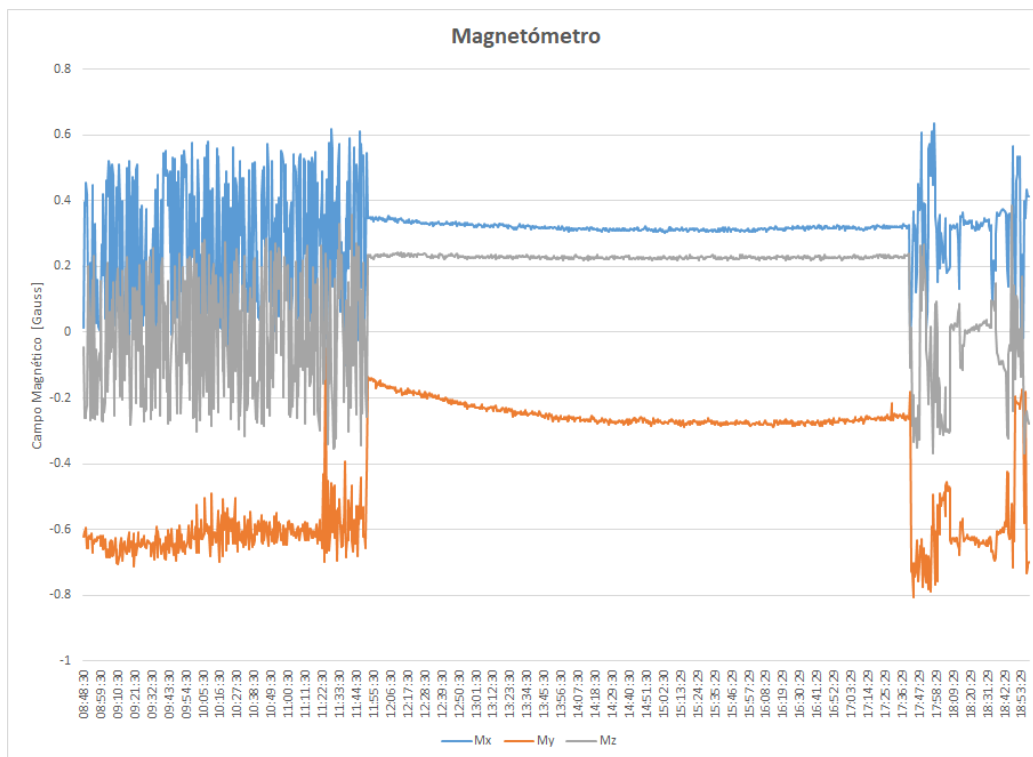


Figura 12. Datos de campo magnético adquiridos por el módulo SADM-1.

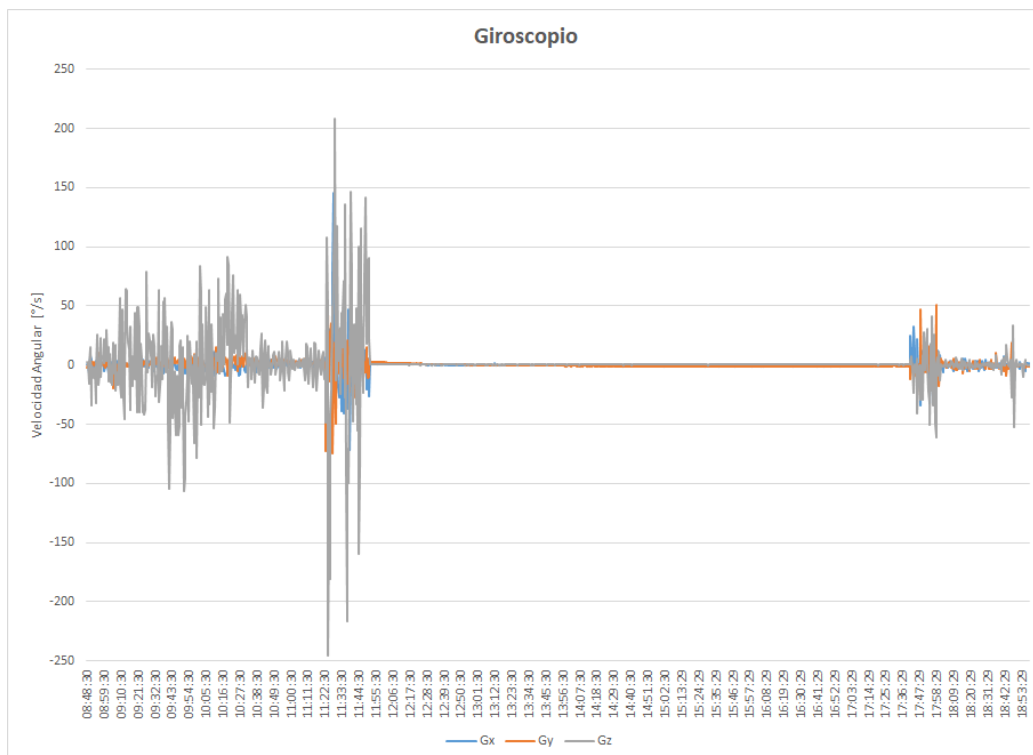


Figura 13. Datos de velocidad angular adquiridos por el módulo SADM-1.

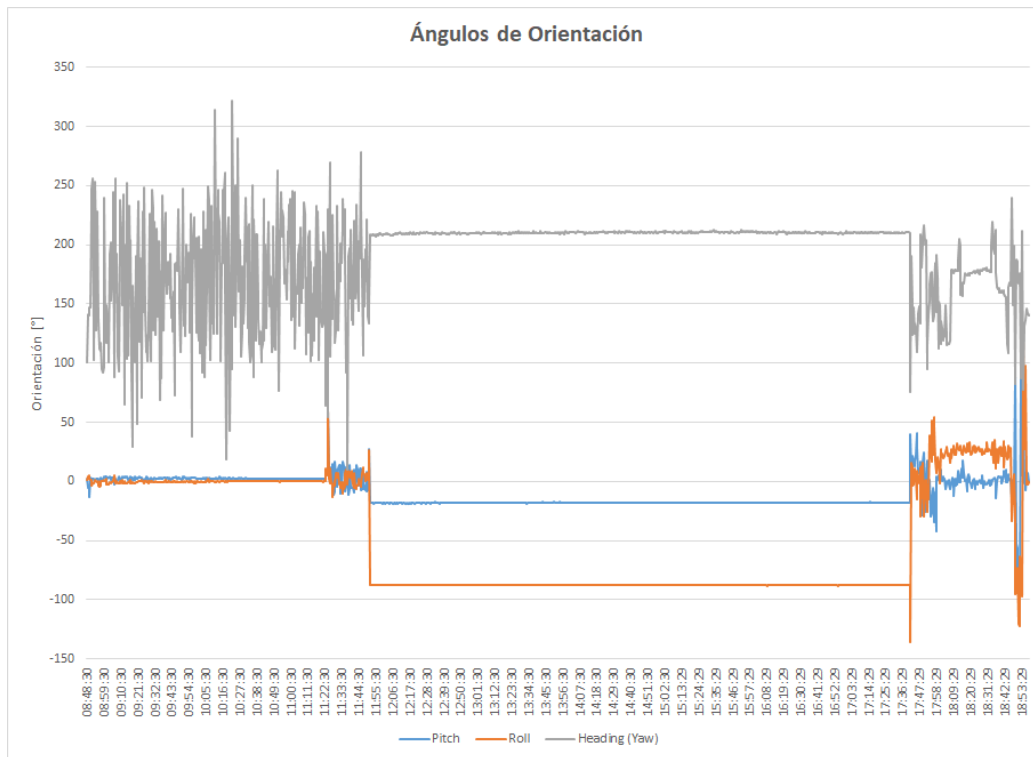


Figura 14. Datos de ángulos de orientación adquiridos por el módulo SADM-1.

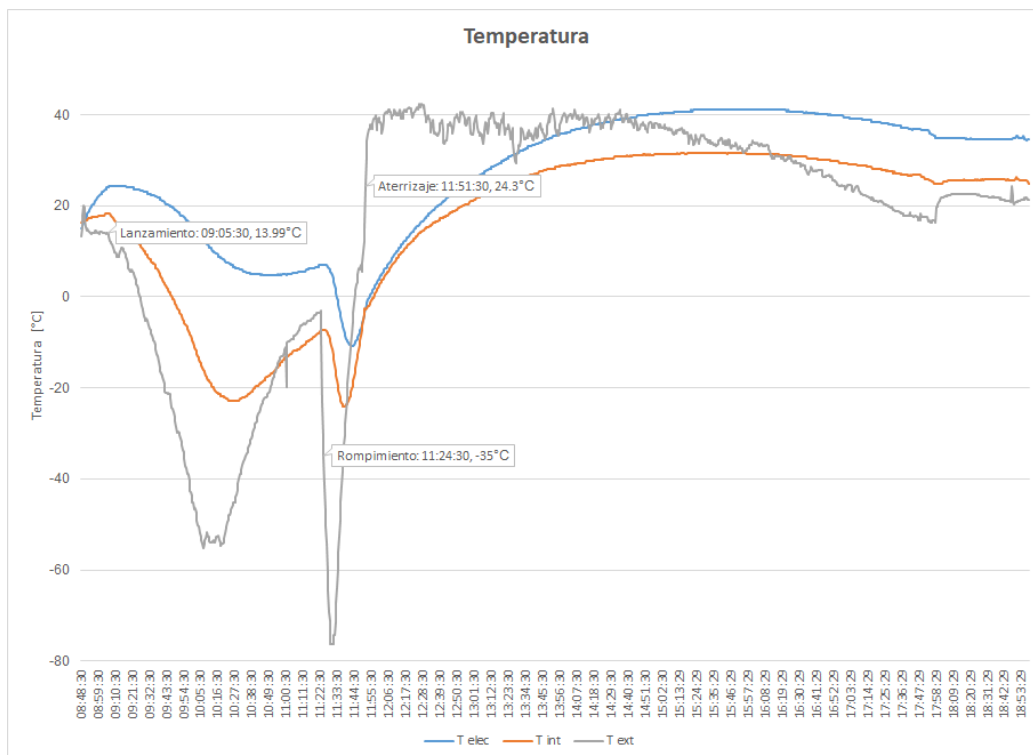


Figura 15. Datos de temperatura adquiridos por el módulo SADM-1.

Adicionalmente, el módulo SADM-1 contó con una cámara que registró, para fines de testificación, fotografías de alta definición. En las figuras 16, 17, 18 y 19 se muestran algunas de las imágenes más representativas, donde en cada una de ellas se puede identificar la hora en que fue tomada la imagen y se indica la altura aproximada en que fue tomada.



Figura 16. Fotografía capturada durante el despegue de la plataforma.



Figura 17. Imagen a una altura aproximada de 13.185 km.



Figura 18. Imagen a una altura aproximada de 16.355 km.



Figura 19. Imagen a una altura aproximada de 20.658 km.

Conclusiones

El vuelo realizado el 26 de noviembre de 2017 representó una experiencia exitosa en varios aspectos. Primero permitió validar el funcionamiento del módulo experimental SAMD-1, con lo que corroboró el adecuado funcionamiento de la instrumentación abordo, en condiciones de presión y temperatura similares a las que se presentarían en un vuelo orbital, convirtiendo a este vuelo en un primer paso hacia el desarrollo de un módulo de carga útil multimisión y multipropósito para ser utilizado en nanosatélites tipo Cubesat. Por otro lado, esta misión representa la primera experiencia de vuelo suborbital en que participa el Instituto Politécnico Nacional. Así mismo, representa el segundo vuelo para la plataforma CSM, logrando la recuperación de la carga intacta, cosa que es poco frecuente en este tipo de vuelos y representa el éxito principal de cualquier misión suborbital.

La experiencia obtenida en esta misión nos permite mejorar y ampliar la instrumentación para exploración atmosférica que se está desarrollando, de tal manera que ya se está preparando la siguiente versión del módulo experimental SADM que será evaluado próximamente en otro vuelo estratosférico, así como en otros vuelos de baja altitud.

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación y desarrollo tecnológico fue financiado parcialmente con recursos del proyecto 262899 del Fondo Sectorial de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Actividades Espaciales AEM-CONACYT.

Referencias Bibliográficas

Mendoza Bárcenas, M. A., Prieto Meléndez, R., Santiago Cruz, L., Trillaud, F., Espinoza Calderón, A., Herraíz Sarachaga, M. y Velázquez Villegas, F. (2017): "Módulo experimental de carga útil 'SADM-1' para fines de exploración atmosférica", *SOMI XXXII Congreso de Instrumentación*. Acapulco, 25-27 octubre 2017. Ciudad de México: SOMI, pp. Ma_SOMI32_32 1-19.

Velázquez, F. (2016): *Resumen de lanzamiento y recuperación de la Carga de Servicio Mexicana CSM-UNAM*. Proyecto sobre Construcción y lanzamiento de cargas útiles para realizar experimentos en ambiente suborbital. Facultad de Ingeniería, UNAM. México, 9 pp.