

Diseño del sistema módulo de carga para nanosatélites tipo CubeSat de 1U con fines científicos.

Juan Antonio Murillo Vargas¹, Antonio Alfonso Rodríguez Rosales¹, José Andrés Guevara Rojas¹
Mario Alberto Mendoza Bárcenas², Rafael Prieto Meléndez³ y Cesar Augusto
Sebastián Núñez¹

¹Centro de Investigación Científica y Tecnológica de Guerrero A.C. (CICTEG), Rio Atoyac L28 Col Vista Alegre, 39560, Acapulco, Guerrero, México.

²Centro de Desarrollo Aeroespacial-IPN (CDA), Belisario Domínguez 22, 06000 Centro Histórico, CDMX

³Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología-UNAM (ICAT), Cto. Exterior S/N, Coyoacán, 04510, CDMX.

Resumen

Como parte de una colaboración multidisciplinaria de un proyecto aeroespacial, se diseñó y construyó un módulo de carga para CubeSat de tamaño 1U (unidad). Esto con el propósito de recabar parámetros geomagnéticos y físicos en la ionosfera; para ello se construyó un módulo utilizando un microcontrolador Atmega328p junto con otros sensores que recabaran datos, que sirvan a las áreas de investigación científica para ampliar sus estudios inherentes a la correlación de la actividad de la ionosfera con los fenómenos geofísicos. Como es el caso particular del Dr. Enrique Cordaro que propone la existencia de una correlación entre las anomalías geomagnéticas que se presentan en la ionosfera, con las actividades sísmicas.

Para ello con base a la colaboración del Centro de Investigación Científica y Tecnológica de Guerrero, A.C. (CICTEG) con otras instituciones como el CDA-IPN y el ICAT-UNAM entre otras, se tuvo la tarea de diseñar un prototipo del módulo de carga completo, desde el diseño de las placas de circuito impreso (PCB), la selección de los sensores a usar (GPS, Presión, Sensor de humedad y temperatura así como la Sonda de Langmuir, contador de radioactividad y el magnetómetro enfocando especial investigación en estos últimos) la programación del módulo de carga y creación de una interfaz de usuario para comunicación computador- usuario.

Sometimos el sistema a diferentes pruebas de laboratorio y de campo para conocer la fiabilidad de los sensores y el microcontrolador; para simular una altitud de hasta 20 Km se construyó un prototipo de cámara de vacío, donde sometimos el módulo de carga a distintos ambientes de presión y temperatura con el propósito de saber si cumplía con los parámetros del fabricante de los sensores utilizados, para la prueba de campo de transmisión de datos y de coordenada, el prototipo se montó sobre un vehículo motorizado, utilizando el módulo de comunicaciones basado en un sistema de radio-comunicación (RFM95 LORA).

Los resultados obtenidos en las diferentes pruebas de laboratorio y de campo, con las correcciones y ajustes correspondientes, mostraron que el prototipo puede ser utilizado en futuras pruebas de vuelo suborbitales y evaluar en condiciones más reales el desempeño de los instrumentos en su conjunto.

1. Introducción

En el año de 1999 comenzó el proyecto denominado CubeSat entre California Polytechnic State University (Cal Poly) y la Universidad de Stanford cuando ellos desarrollaron las especificaciones para ayudar a las universidades alrededor del mundo a desarrollar proyectos de ciencia espacial, éste tiene como denominación un tipo de nanosatélite cuya masa oscila entre 1 a 10 kilogramos una de las ventajas de estos en comparación con satélites grandes es que reducen los tiempos de desarrollo así como sus costos de producción.[1]

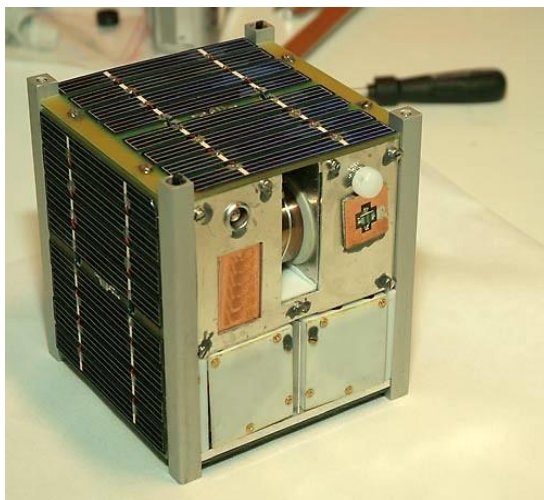


Figura 1: CubeSat 1U

Aunque en su mayoría su producción y desarrollo proviene de universidades, también existen compañías que se dedican al desarrollo de estos una de ellas es la compañía española PLD Space que se especializa en desarrollo de lanzadores con costos accesibles para nanosatélites. [1]

Actualmente se sabe que existen una variedad aun mayor de nanosatélites que satélites convencionales en el espacio, cumpliendo varios tipos de tareas específicas entre los que destacan el monitoreo de distintos factores ambientales de la atmosfera terrestre.

2. CubeSat y su arquitectura

El termino CubeSat hace énfasis a un tipo de nanosatélite cuya estructura es de 10 centímetros de arista y su masa es menor a 1,33 Kg.

Los CubeSat tiene una medida de estándar de 1U (10x10x10) sin embargo pueden existen distintos modelos (2U, 3U, 5U o hasta 6U) actualmente se siguen desarrollando nuevas configuraciones [2].

La arquitectura del CubeSat se define como un conjunto de subsistemas que describen a continuación en base a la norma CP-CDS-R13 dada por la asociación de aficionados CubeSat [3].

1. Sistema de comunicaciones: Un circuito de radiofrecuencia que utiliza una banda dedicada en banda UHF (Ultra High Frequency) para la comunicación entre el CubeSat y la estación terrena.
2. Sistema de control de vuelo o computadora a bordo: Su función es controlar el entorno del CubeSat tanto como corregir su orientación su movimiento y procesar la información que esta recibe del sistema de carga útil.
3. Sistema de carga útil: Cuenta con diferentes tipos de sensores para objetivos específicos tales como temperatura, radiación etc. Estos sensores varían según el propósito para el que se diseña el CubeSat, en esencia su función es clara, monitorear y proveer de datos específicos de su entorno de operación para su proceso y envío a la estación terrestre para sus estudios (En este último es en el que nos enfocaremos a desarrollar)
4. Sistema de energía: Proveer por medio de paneles solares en este caso, la energía a todos los subsistemas del

CubeSat para cumplir con un funcionamiento adecuado.

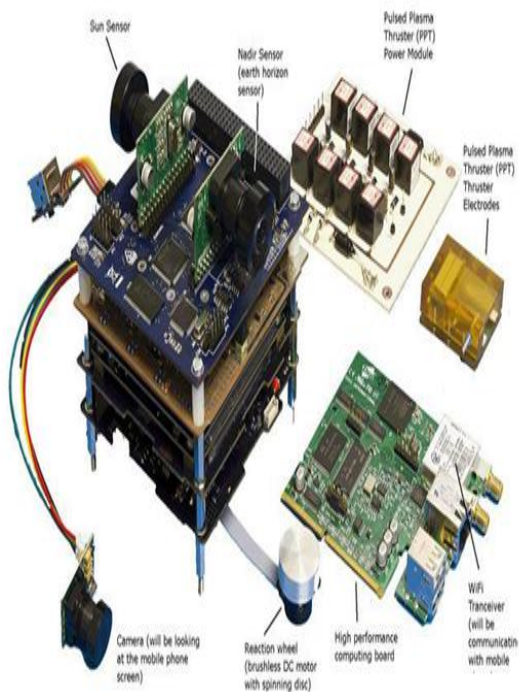


Figura 2: Arquitectura interna de un CubeSat

3. La misión TEPEU

Científicos del Centro de Desarrollo Aeroespacial-IPN, el Instituto de Ciencias Aplicadas-UNAM (ICAT), Centro de Investigación Científica y Tecnológica de Guerrero, A.C. (Convenio con el instituto Tecnológico de Acapulco para elaboración de tesis y residencias de sus alumnos), la consultora tecnológica oaxaqueña Fupresa, la Universidad de Colima, la Federación Mexicana de Radio experimentadores, la Universidad de Chile, la compañía espacial española Proxima Space bajo el asesoramiento de la Agencia Espacial Mexicana impulsan el desarrollo y lanzamiento de un nano satélite para fines científicos y tecnológicos con el fin de realizar estudios de la ionósfera terrestre, así como su posible correlación por eventos

de clima espacial y otros fenómenos geofísicos.

El programa liderado por el catedrático del Instituto Politécnico Nacional (IPN) Mario Alberto Mendoza Bárcenas, busca poner en órbita un satélite tipo CubeSat con menos de un kilogramo de peso. En entrevista, el profesor adscrito al Centro de Desarrollo Aeroespacial del IPN destaca que el artefacto diseñado por mexicanos se ubicará, en la primera misión, en las capas bajas de la ionósfera –a unos 350 kilómetros de la tierra– desde donde realizará diversas mediciones. El proyecto, con un costo aproximado de cinco millones de pesos en sus dos misiones iniciales TEPEU-1 y TEPEU-2, contará con sensores como magnetómetros, sonda de Langmuir para estudiar la ionósfera a partir de su consideración como un plasma, además de tener un medidor de partículas, un GPS y equipos de comunicación.[4]

Con la información proporcionada por el satélite y el procesamiento de datos será posible estudiar la ionósfera –que es una capa de la atmósfera altamente sensible– y se podrían establecer bases para la investigación sobre la actividad solar y del interior de la tierra.

4. Diseño del módulo de carga.

Con el propósito de diseñar y construir un prototipo del módulo de carga, las actividades se dividieron en tres fases.

Fase 1: Elección del microcontrolador y sensores.

Fase 2: Diseño en placa de pruebas y programación del sistema del módulo de carga.

Fase 3: Diseño del módulo de carga dentro en una placa de circuito impreso (PCB)

Fase 1:

Para el control de los datos del módulo de carga necesitamos encontrar el microcontrolador adecuado de buen rendimiento y compatible con un variado tipo de sensores.

Después de una extensa búsqueda y comparación entre microcontroladores y pruebas en la cámara de vacío, se tuvo la elección escoger un modelo de la compañía ATMEL de manera específica el Atmega328p, una de sus múltiples ventajas es que es un controlador potente, poco consumo de energía, bajo coste de producción, tiene mucha documentación de su uso y por último este ya ha sido usado en misiones espaciales con la misión ArduSat [5] que actualmente sigue en operación.

SENSORES

Magnetómetro

El magnetómetro es un dispositivo capaz de medir el magnetismo de un campo específico de un material ferromagnético o del ambiente en general.

El magnetismo varía de lugar en lugar y a las diferencias en el campo magnético terrestre (la magnetósfera) y puede ser causada por la diferente naturaleza de cada tipo de rocas y la interacción entre las partículas cargadas del Sol y la magnetósfera de un planeta.

En los últimos años, los magnetómetros se han miniaturizado en la medida en que puedan ser incorporados en los circuitos integrados a muy bajo costo y se utilizan cada vez más. [6]

La unidad de campo magnético en el Sistema Internacional es el tesla (T). Un tesla se define como el campo magnético que ejerce una fuerza de 1 N (newton) sobre una carga de 1 C (culombio) que se mueve a velocidad de 1 m/s dentro

del campo y perpendicularmente a las líneas de campo.[7]

En nuestro caso, debido a que el Tesla como unidad de medición es demasiado grande, se usa otra unidad de medida que en este caso es el Gauss (G) que, aunque no pertenece al sistema internacional de unidades, sino al SCG (Sistema Cegesimal de Unidades), tiene un valor más adecuado con el orden de magnitud de los campos magnéticos que habitualmente se manejan.

$$1 \text{ T} = 10.000 \text{ gauss}$$

Sin embargo, es posible usar otra equivalencia de unidad de Teslas (T) que en este caso son microteslas (μT).

$$1 \text{ T} = 1.000.000 \mu\text{T}$$

Puesto que la magnetosfera donde tiene un rango aproximado de $0.25 - 0.65 \mu\text{T}$ debemos escoger un sensor que cumpla con dicho rango.

Existen dos tipos de magnetómetros los escalares y vectoriales, para esta prueba utilizaremos uno de cada uno.

Después de evaluar una variada gama de magnetómetros se tomó la decisión de descartar algunos y por último se hará una última selección escogiendo solamente dos, para ello se usó la tabla 1 como referencia para poder seleccionar el más adecuado.

Nombre	Tipo	Rango	Conexión	Voltaje operativo
MLX90393	Vectorial	5-50mT	I2C	2.2 - 3.3 V
DRV5055-Q1A4	Lineal	±169-mT	Analógica	3.3 - 5 V
Sensor de efecto Hall 49E	Lineal	-100 a 100 mT	Analógica	5 V

Tabla 1: Comparación de magnetómetros y sus características.

Para las pruebas se utilizaron estos dos sensores.

- El magnetómetro vectorial MLX90393 con protocolo de comunicación I2C.
- El magnetómetro escalar DRV50500Q1A4 con comunicación analógica- serial.

Se continúa realizando pruebas con otros sensores, por lo que de encontrar un mejor sensor que el actualmente seleccionado, este se podrá reemplazar con el fin de mejorar la calidad de los datos que se deben recabar.

GPS

Sistema de Posicionamiento Global (en inglés, GPS; Global Positioning System), y originalmente Navstar GPS, es un sistema que permite determinar en toda la Tierra la posición de cualquier objeto (una persona, un vehículo) con una precisión de hasta centímetros (si se utiliza GPS diferencial), aunque lo habitual son unos pocos metros de precisión. [8]

Al momento de escoger el GPS a utilizar en este prototipo se debe priorizar la velocidad de transmisión de las

coordenadas, y que tenga mínimos o nulos errores de datos, en este caso utilizaremos un GPS de la marca neubox específicamente el GPS-NEO-7, anteriormente se trabajó con una versión anterior a esta, pero genero muchos errores tanto de comunicación como de datos, debido a que su velocidad de respuesta era lenta.

Sensor de humedad y temperatura

Un sensor digital de humedad funciona a través de dos microsensors que se calibran a la humedad relativa de la zona dada. Estos se convierten luego en el formato digital a través de un proceso de conversión de analógico-digital que se realiza mediante un chip situado en el mismo circuito. Un sistema basado en una máquina hecha de electrodos con polímeros es lo que constituye la capacitancia del sensor. Esto protege el sensor del panel frontal del usuario (interfaz). [9]

Para este caso se utilizará el sensor digital DHT22 con muy buena resolución, que ofrece tiempos de respuesta muy rápido con la mínima tasa de errores en sus lecturas.

Sensor de presión

En general, los sensores de presión funcionan como un transductor; es decir, generan una señal en función de la presión a la que se someten.

Existen muchísimas variantes de sensores de presión en cuanto a tecnología, diseño, prestaciones, idoneidad de aplicación y coste. Según una estimación conservadora, existen más de cincuenta tecnologías y al menos trescientas empresas que fabrican sensores de presión en todo el mundo. [9]

También existe una categoría de sensores de presión diseñados para medir de modo dinámico y detectar cambios muy rápidos de presión. Este tipo de sensores se fabrican típicamente en materiales piezoeléctricos como el cuarzo.

La unidad de medida es el Pascal (P), aunque en distintos ámbitos de estudio como por ejemplo en meteorología utilizan la medición HectoPascal (Hp) que es la equivalencia a 100 Pascales, así como también podemos hacer sus diferentes tipos de equivalencias en otras unidades de medida, tales como Atmósfera(atm), PSI milibares (mbar) etc.[10]

Para esta ocasión se utilizó un sensor de presión absoluta con un rango de -100 a 100 Kpa (Kilo pascales) que corresponden a 1000 Pascales.

SONDA DE LANGMUIR Y MEDIDOR DE RADIOACTIVIDAD.

Como parte del módulo de carga se está trabajando de manera paralela con otro grupo de estudiantes en el CICTEG en la construcción de un prototipo de sonda de Langmuir que tendrá como objetivo medir el potencial eléctrico de un plasma, así como un contador Geiger-Müller para medir la radiactividad en la región de estudio.

Fase 2.

Seleccionando el microcontrolador y los sensores adecuados para el prototipo se prosigue a diseñar el circuito en placa de pruebas (protoboard) y posteriormente la programación de los sensores.

El primer paso consiste en la configuración del microcontrolador, para su programación utilizaremos el entorno de desarrollo IDE-ARDUINO por lo que debemos grabar el gestor de arranque

(bootloader) para poder usar dicho entorno de desarrollo.

Con ayuda de una placa de desarrollo Arduino se extrae el microcontrolador y realizamos la siguiente configuración.

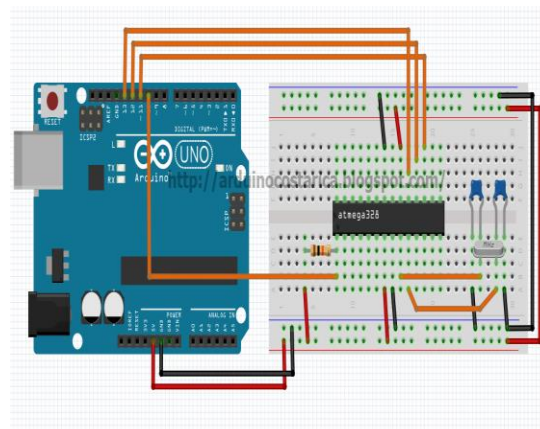


Figura 3: Diagrama de conexión para grabado de bootloader

Para la comprobación del grabado cargamos un sketch con un “Hola Mundo” para ver si fue exitoso.

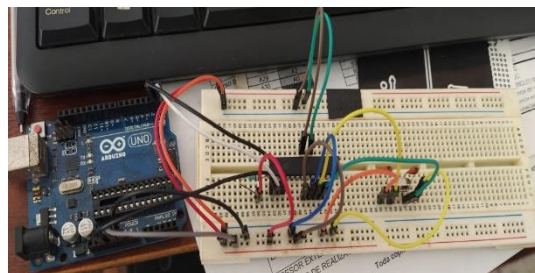


Figura 4: Circuito de grabado de bootloader

```
COM3
14:03:39.413 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:40.396 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:41.411 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:42.395 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:43.410 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:44.425 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:45.408 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:46.392 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:47.407 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:48.423 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:49.403 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
14:03:50.416 -> HOLA nueva placa arduino 2.0
```

Figura 5: Código de prueba

Comprobando que el gestor de arranque funcione correctamente se procede a crear el circuito con los sensores mencionados anteriormente con su respectiva calibración en el entorno de programación.

Para ello primero se van probando cada uno de los sensores para integrar todos dentro del mismo prototipo.

Para los sensores de salida analógica tales como el sensor de presión y el magnetómetro lineal utilizamos una salida analógica y hacemos uso del convertidor ADC del ATMEGA328P.

Los voltajes analógicos tienen un valor entre 0-5 voltios con valores en bits comprendidos entre 0-1023 por lo que se realizaremos un cálculo para calibrar sus voltajes de entrada y poder tener una mejor comprensión de estos.

La ecuación es:

$$Vs = ValorADC * 5/1024$$

Esta funcionaría como la calibración básica de estos sensores sus valores en unidades serán realizados por la interfaz que se desarrolló para tal fin.

Para el GPS se utilizó una librería de código abierto para ARDUINO-IDE que se denomina TinyGPS en esta solo basta con realizar las configuraciones de los pines de transmisión y recepción de datos respectivamente (RX y TX).

De igual manera para el sensor de humedad y temperatura DHT22 se utilizó una librería de código abierto y solo se configuro el pin de entrada al microcontrolador.

El magnetómetro vectorial de tres ejes (X, Y Z) se programó utilizando una librería denominada MLX90393 con una

comunicación I2C este tipo utiliza los pines analógicos del microcontrolador A5 (SCA) Y A4 (SCL).

Terminando la configuración estos son el tipo de datos que proporciona el módulo de carga.



Figura 6: Programación de los sensores para el módulo de carga.

Fase 3:

Teniendo el circuito básico y la programación se procede a diseñar la placa de circuito impreso (PCB) correspondiente al módulo de carga y con ello hacer las pruebas de laboratorio y de campo, las figuras 7, 8 y 9 muestran los esquemáticos y prototipos conforme al estándar PCB. Después de realizar ajuste y correcciones se mandan a fabricar las placas finales.

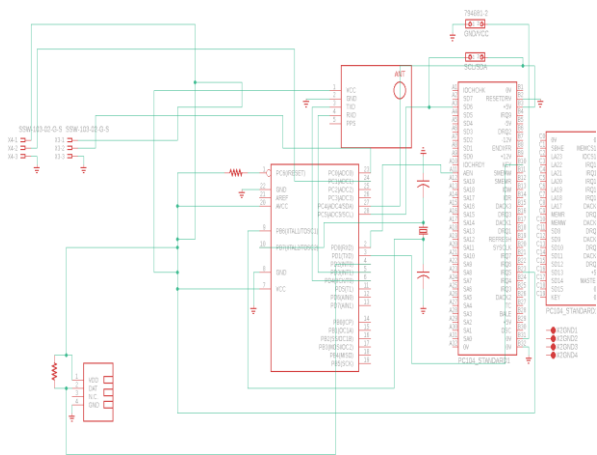


Figura 7: Diagrama esquemático del módulo de carga hecho en Eagle

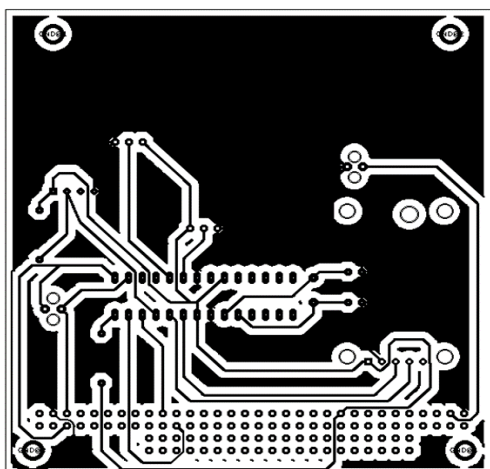


Figura 8: PCB del módulo de carga

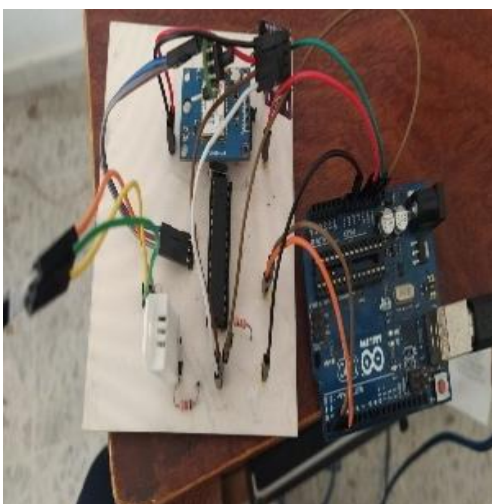


Figura 9: PCB montado con sus componentes

Pruebas y resultados

Con la finalidad de probar el prototipo en diferentes entornos de presión se tuvo la tarea de diseñar un prototipo de cámara de vacío.

Se sabe con certeza que a mayor altitud la presión tiende a descender por lo que esta se construyó reciclando un tanque de gas Boya para hacer una cámara de vacío y poder simular altitudes de hasta 40Km de altura y con ello simular las condiciones de presión y temperatura del módulo que pueda soportar.



Figura 10: Prototipo cámara de vacío

La prueba consistió en depositar el módulo de carga dentro de la cámara de vacío, con ayuda del sistema de interfaz se monitorean todos los datos arrojados por los sensores, en este caso se toma especial atención al magnetómetro y al sensor de presión, cuando el sensor de presión indique un rango bajo máximo se llegará a la conclusión que este es el rango máximo que soporta por lo que se dará por finalizada la prueba.

Los valores arrojados por el sensor de presión fueron dados en dos tipos de unidades, KiloPascuales (Kpa) y

Atmósferas (Atm) esto con el fin de poder ver sus equivalencias con la tabla de relación entre presión y altitud

Los siguientes datos, mostrados en la Tabla 2 fueron los máximos valores más bajos.

Atm	Kpa
0.337038	34.1504
0.337131	34.1598
0.337131	34.1598
0.337038	34.1504
0.336933	34.1398

Tabla 2: Valores mínimos de presión

En la figura 11 se muestra una gráfica de presión- altitud.



Figura 11: Relación entre presión en atm y altitud en metros

Se observa que en las primeras pruebas el módulo soportó una presión mayor a 5000 metros de altitud y que al retirar el módulo de carga, no presento ningún desperfecto físico, así como también sus

componentes por lo que se simulan condiciones aún más bajas de presión.

Conclusiones y perspectivas

Se diseñó, construyo un módulo de carga con los sensores seleccionados, a su vez se realizaron pruebas para comprobar la eficacia de dichos sensores.

Se realizaron pruebas de laboratorio con resultados óptimos.

Se demostró que el prototipo del módulo de carga puede ser adaptado a un CubeSat de 1U por medio del protocolo de comunicación I2C.

Actualmente se está en la búsqueda de un magnetómetro de tipo escalar ya que este es el más adecuado para los objetivos de la misión.

Agradecimientos.

Al CICTEG, por las facilidades de los laboratorios, instrumentos y adquisición de componentes electrónicos y computacionales para las evaluaciones y pruebas de los diferentes elementos que intervienen en los diseños propuestos. Al Dr. Antonio Alfonso Rodríguez Rosales director general del CICTEG por el asesoramiento e inversión de los recursos utilizados en el proyecto, al Profesor Cesar Augusto Sebastián Núñez por invitarnos a participar en el proyecto y su asesoramiento,

Al M. I. Rafael Prieto Meléndez del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología-UNAM por su gran apoyo en la realización de las placas de prueba (PCB) y al Dr. Mario Alberto Mendoza Bárcenas del Centro de Desarrollo Aeroespacial- IPN quien es el

coordinador general del proyecto
aeroespacial.

Bibliografía

[1]. WIKIPEDIA. (2020). CubeSat. 03 de enero del 2020, de WIKIPEDIA Sitio web: <https://es.wikipedia.org/wiki/CubeSat>

[2]. ALLEN SPACE. (2018). Guía básica de nanosatélites. 02 de enero del 2020, de ALLEN SPACE Sitio web: <https://allen.space/es/guia-basica-nanosatelites/>

[2]. WIKIPEDIA. (2020). ArduSat. 10 de febrero del 2020, de WIKIPEDIA Sitio web: <https://es.wikipedia.org/wiki/ArduSat>

[3]. Nano Avionics. (2020). Cubesat components - Flight proven subsystems. 22/08/2020, de Nano AVionics Sitio web: https://nanoavionics.com/cubesat-components/?utm_term=cubesat&utm_campaign=%5BS%5D+CubeSat&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2263695542&hsa_cam=11117151995&hsa_grp=117506837748&hsa_ad=464364630402&hsa_src=g&hsa_tgt=kwd-321596109319&hsa_kw=cubesat&hsa_mt=p&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gclid=Cj0KCQjwqrb7BRDIARIsACwGad6M Mvetz8rvzB8-STB6Qj9zUcgrjSe17wiCDOFn8Gjkt1hacW9hlawaAh8FEALw_wcB

[4]. FLOR HERNÁNDEZ. (2019). Tepeu-1: La primera misión espacial mexicana con fines científicos. 10 de febrero del 2020, de Newsweek Sitio web: <https://newsweekespanol.com/2019/03/tepeu-mision-espacial-mexicana-cientificos/>

[5]. WIKIPEDIA. (2020). Magnetómetro. 2 de abril del 2020, de WIKIPEDIA Sitio web: <https://es.wikipedia.org/wiki/Magnet%C3%B3metro#Tipos>

[6]. Teresa Martín Blas y Ana Serrano Fernández. (2017). Magnetismo. 18 de abril del 2020, de Universidad Politécnica de Madrid (UPM) - España. Sitio web: <http://www2.montes.upm.es/dptos/digfa/cfisica/magnet/campomag.html>

[7]. WIKIPEDIA. (2020). GPS. 4 de abril del 2020, de WIKIPEDIA Sitio web: <https://es.wikipedia.org/wiki/GPS>

[8]. Antony García González. (2014). DHT22: Sensor de humedad/temperatura de precisión para Arduino. 6 de abril del 2020, de PANAMA HITEK Sitio web: <http://panamahitek.com/dht22-sensor-de-humedadtemperatura-de-precision-para-arduino/>

[9]. WIKIPEDIA. (2019). Sensor de presión. 8 de abril del 2020, de WIKIPEDIA Sitio web: https://es.wikipedia.org/wiki/Sensor_de_presi%C3%B3n

[10]. HBM. (2020). ¿Qué es un sensor de presión?. 8 de abril del 2020, de HBM Company Sitio web: <https://www.hbm.com/es/7646/que-es-un-sensor-de-presion/>