



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS
AVANZADAS
PROTOCOLO
INGENIERÍA TELEMÁTICA



DTA-PPT-01

TÍTULO DEL PROTOCOLO			
Prototipo de una computadora a bordo satelital basada en arquitecturas electrónicas de bajo costo para nanosatélites CubeSat de 1 unidad.			
DATOS DEL PROTOCOLO			
Número de Revisión (Primera, segunda, tercera o Protocolo para Registro)	Registro	Semestre	2024-2
Número Proyecto Asignado (Número asignado por el profesor de Especialidad)	04	Fecha (Fecha programada)	17/06/2024
Confidencialidad (Público o confidencial, incluir documento que lo avale)	Público	Número de Hojas (Cantidad de Hojas del Protocolo)	36
Patrocinador (En caso de existir, incluir el nombre en caso contrario dejar en blanco)		Centro de Desarrollo Aeroespacial	
Número Convenio o Registro (Incluir número de convenio patrocinio o número de proyecto de investigación que patrocina)		SIP 20242752	

ALUMNO 1	
DATOS ALUMNO 1	FIRMA
Nombre del Alumno	
Número de boleta	
Teléfono	
Correo electrónico	
Alvarez Carranza Victor Hugo	
2020640644	
5515765345	
valvarezc1600@alumno.ipn.mx	

ALUMNO 2	
DATOS ALUMNO 2	FIRMA
Nombre del Alumno	
Número de boleta	
Teléfono	
Correo electrónico	
Ceja de Luna Manuel Andres	
2020640072	
5565740406	
mcejad1600@alumno.ipn.mx	

ALUMNO 3	
DATOS ALUMNO 3	FIRMA
Nombre del Alumno	
Número de boleta	
Teléfono	
Correo electrónico	

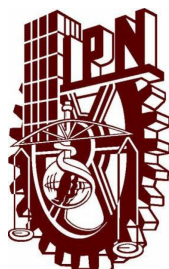
DATOS ASESOR 1		VISTO BUENO ASESOR 1
Nombre Asesor (Grado Académico)	M. en C. Gabriela Aurora Yáñez Casas	
Academia	Telemática Interno * Externo	
Cédula Profesional (Obligatorio)	13327752	
Correo electrónico	gyanezca@ipn.mx	

DATOS ASESOR 2		VISTO BUENO ASESOR 2
Nombre Asesor (Grado Académico)	Dr. Jorge Javier Hernández Gómez	
Academia	CDA-IPN Interno Externo *	
Cédula Profesional (Obligatorio)	13919251	
Correo electrónico	jihemandezgo@ipn.mx	

DATOS ASESOR 3		VISTO BUENO ASESOR 3
Nombre Asesor (Grado Académico)		
Academia	Interno Externo	
Cédula Profesional (Obligatorio)		
Correo electrónico		

NOMBRE DEL PROFESOR TITULAR	Dra. Mariana Mora Palacios
NOMBRE DEL PROFESOR DE ESPECIALIDAD	Dra. Susana Araceli Sánchez Nájera

AVISO DE PRIVACIDAD: Los datos en este formulario son confidenciales y están sujetos a la Ley de Protección de Datos Personales de la UPIITA-IPN. Los datos serán utilizados únicamente para el procesamiento de la solicitud de registro de tesis y no serán compartidos con terceros. El responsable de los datos es el Departamento de Tecnologías Avanzadas de la UPIITA-IPN. Los datos serán eliminados de la base de datos una vez que se haya completado el proceso de registro de tesis. Los datos serán eliminados de la base de datos una vez que se haya completado el proceso de registro de tesis. Los datos serán eliminados de la base de datos una vez que se haya completado el proceso de registro de tesis.



PROTOTIPO DE UNA COMPUTADORA A BORDO SATELITAL BASADA EN ARQUITECTURAS ELECTRÓNICAS DE BAJO COSTO PARA NANOSATÉLITES CUBESAT DE 1 UNIDAD.

PROTOCOLO DE TRABAJO TERMINAL

QUE SE PRESENTA PARA EL PROGRAMA DE

INGENIERÍA TELEMÁTICA

UNIDAD PROFESIONAL INTERDISCIPLINARIA EN INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS AVANZADAS

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ALUMNOS

ALVAREZ CARRANZA VICTOR HUGO

CEJA DE LUNA MANUEL ANDRES

ASESORES

MTA. GABRIELA AURORA YÁÑEZ CASAS

DR. JORGE JAVIER HERNÁNDEZ GÓMEZ

RESUMEN

Los CubeSat han presentado un gran avance en las aplicaciones satelitales, debido a su bajo costo, tamaño y flexibilidad. Estos satélites permiten a instituciones académicas, empresas y gobiernos acceder al espacio de una manera más asequible y rápida.

El cerebro de cada CubeSat se encuentra en la computadora a bordo (OBC), que es la encargada de la gestión y control de todos los subsistemas del satélite. Es por esto que la implementación de una OBC de bajo costo, eficiencia, confiabilidad y bajo las características de masa, tamaño y eléctricas requeridas para el estándar CubeSat, debe ser una prioridad al momento de implementar un nanosatélite.

En el presente protocolo de trabajo terminal, se diseña y se desarrolla un prototipo de una computadora a bordo (OBC) para un nanosatélite tipo CubeSat de 1U, cumpliendo con ciertas características del estándar CubeSat (masa, tamaño y eléctricas). Se hace uso de arquitecturas Commercial-off-the-shelf (COTS), además de la realización de una interfaz gráfica de usuario (GUI) que nos permite establecer una comunicación entre usuario-máquina y obtener la telemetría de los subsistemas que conforman la OBC. En este sentido, se presenta un prototipo funcional (dentro de sus limitaciones) de la OBC, donde se emula el intercambio de datos provenientes de los subsistemas del satélite. Además, se realizan mediciones de los parámetros eléctricos y de procesamiento (máxima capacidad de transferencia de datos en el bus y máxima capacidad de memoria en la OBC) del prototipo presente.

Palabras clave. Nanosatélite, CubeSat, computadora a bordo(OBC), subsistemas de una OBC, buses de comunicación, Interfaz gráfica de usuario (GUI), instrumentación electrónica, arquitecturas Commercial-off-the-shelf, procesamiento y consumo de potencia.

ABSTRACT

CubeSats have been a breakthrough in satellite applications due to their low cost, size and flexibility. These satellites allow academic institutions, businesses and governments to access space in a more affordable and faster way.

The brain of each CubeSat is the on-board computer (OBC), which is responsible for the management and control of all satellite subsystems. This is why the implementation of an OBC with low cost, efficiency, reliability and under the mass, size and electrical characteristics required for the CubeSat standard, must be a priority when implementing a nanosatellite.

In this terminal work protocol, an on-board computer (OBC) prototype is designed and developed for a 1U CubeSat type nanosatellite, complying with certain characteristics of the CubeSat standard (mass, size and electrical). Commercial-off-the-shelf (COTS) architectures are used, in addition to the development of a graphical user interface (GUI) that allows us to establish a user-machine communication and to obtain the telemetry of the subsystems that make up the OBC. In this sense, a functional prototype (within its limitations) of the CBO is presented, where the exchange of data coming from the satellite subsystems is emulated. In addition, measurements of the electrical and processing parameters (maximum data transfer capacity on the bus and maximum memory capacity) are performed.

Keywords. Nanosatellite, CubeSat, on-board computer (OBC), subsystems of an OBC, communication buses, Graphical User Interface (GUI), electronic instrumentation, Commercial-off-the-shelf architectures, processing and power consumption.

ÍNDICE

Resumen	1
Palabras clave	1
Abstract	I
Keywords	I
Índice	II
1. Glosario de términos y abreviaturas	1
1.1. Abreviaturas y siglas	1
1.2. Unidades y prefijos	3
2. Introducción	4
3. Planteamiento del problema	6
4. Propuesta de solución	7
5. Alcances	12
5.1. Alcances	12
5.2. Limitaciones	12
6. Objetivos	13
6.1. Objetivo general	13
6.2. Objetivos específicos	13
7. Estado del arte	14
7.1. Investigaciones y proyectos que se han realizado en el IPN	14
7.2. Investigaciones y proyectos de otras universidades y centros de investigación.	15
7.3. Estándares y normatividad entorno a nanosatélites tipo CubeSat	16
8. Marco Teórico	19
8.1. Conceptos espaciales	19

8.2. Tecnología satelital	21
8.3. Ingeniería a bordo	25
8.4. Computadora a bordo	28
9. Escenario de pruebas	30
10. Cronograma de actividades	32
Referencias	34

1. GLOSARIO DE TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

1.1. Abreviaturas y siglas.

Escuelas y centros de investigación del Instituto Politécnico Nacional.

CDA,	Centro de Desarrollo Aeroespacial
IPN,	Instituto Politécnico Nacional
UPIITA,	Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas

Normatividad, estándares y protocolos de comunicaciones.

SPI,	<i>Serial Peripheral Interface</i> (Interfaz Periférica Serial)
JTAG,	<i>Joint Test Action Group</i> (Grupo de acción de prueba conjunta)
SWD,	<i>Serial Wire Debug</i> (Depuración de cable serial)
UART,	<i>Universal asynchronous receiver-transmitter</i> (Receptor-transmisor asíncrono universal)
I2C,	<i>Inter-Integrated Circuit</i> (Circuito Interintegrado)
CDS,	<i>CubeSat Design Specification</i> (Especificación de diseño de CubeSat)

Informática, sistemas computacionales y arquitectura de computadoras.

CPU,	<i>Central Processing Unit</i> (Unidad Central de Procesamiento)
MCU,	<i>Microcontrolador</i>
MPU,	<i>Microprocesador</i>
FPGA,	<i>Field Programmable Gate Array</i> (Matriz de puertas lógicas programable en campo)
GPU,	<i>Graphics Processing Unit</i> (Unidad de Procesamiento Gráfico)
GUI,	<i>Graphical User Interface</i> (Interfaz Gráfica de Usuario)
RAM,	<i>Random Access Memory</i> (Memoria de Acceso Aleatorio)
COTS,	<i>Commercial-off-the-shelf</i> (Disponible Comercialmente)
IDE,	<i>Integrated Development Environment</i> (Entorno de Desarrollo Integrado)

Organizaciones, instituciones y agencias nacionales e internacionales.

AEM,	Agencia Espacial Mexicana (Comité Consultivo para Sistemas de Datos Espaciales)
UNAM,	Universidad Autónoma de México
UAM,	Universidad Autónoma Metropolitana
CSA,	<i>Canadian Space Agency</i> (Agencia Espacial Canadiense)
ESA,	<i>European Space Agency</i> (Agencia Espacial Europea)
IEEE,	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos)
ISO,	<i>International Organization for Standardization</i> (Organización Internacional de Normalización)
ITU (UIT),	<i>International Telecommunications Union</i> (Unión Internacional de Telecomunicaciones)
NASA,	<i>National Aeronautics and Space Administration</i> (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio)
CAL POLY,	<i>California State Polytechnic University</i> (Universidad Politécnica Estatal de California)
UNISEC,	<i>University Space Engineering Consortium</i> (Consortio Universitario de Ingeniería Espacial)

Tecnologías y ciencias aeroespaciales.

OBC,	<i>On-board Computer</i> (Computadora a bordo)
EPS,	<i>Satellite electrical power system</i> (Sistema Satelital de energía eléctrica)
ADCS,	<i>Attitude Determination and Control System</i> (Sistema de Determinación y Control de Actitud)

GEO,	<i>Geosynchronous Equatorial Orbit</i> (Órbita Geosíncrona Ecuatorial, Órbita Geoestacionaria)
GSO,	<i>Geosynchronous Orbit</i> (Órbita Geosíncrona)
LEO,	<i>Low Earth Orbit</i> (Órbita Baja Terrestre)
MEO,	<i>Medium Earth Orbit</i> (Órbita Media Terrestre)
IPC,	<i>Internal Power Control</i> (Control de energía interno)
CCP,	<i>Canadian CubeSat Project</i> (Proyecto Canadiense CubeSat)
GNSS,	<i>Global Navigation Satellite System</i> (Sistema global de navegación por satélite)
GPS,	<i>Global Positioning System</i> (Sistema de Posicionamiento Global)
P-POD,	<i>Poly Picosatellite Orbital Deployer</i> (Sistema de liberación de CubeSats)
MCC,	<i>Master Control Center</i> (Centro de Control Maestro)
CDH,	<i>Command and Data Handling</i> (Manejador de comandos y datos)
Flat Sat,	<i>Flat satellite</i> (Satélite plano)
Lean Sat,	<i>Satélite delgado</i>

Telemática.

ADC,	<i>Analog-to-digital converter</i> (Conversor analógico a digital)
DAC,	<i>Digital-to-analog converter</i> (Conversor digital analógico)
PWM,	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulación por ancho de pulsos)
UHF,	<i>Ultra High Frequency</i> (Frecuencia ultra alta)
VHF,	<i>Very High Frequency</i> (Frecuencia muy alta)

1.2. Unidades y prefijos.

Hz,	Hercio (Frecuencia)
b,	Bit
B,	Byte
bps,	Bit por segundo
Bps,	Byte por segundo
m,	Metro
s,	Segundo (Tiempo)
min,	Minuto (Tiempo)
g,	Gramo
rad,	Radián
U,	Unidad de CubeSat (cubo de 10cm × 10cm × 10cm)
V,	Voltios
n,	Nano (1×10^{-9})
μ ,	Micro (1×10^{-6})
m,	Mili (1×10^{-3})
k,	Kilo (1×10^3)
M,	Mega (1×10^6)
G,	Giga (1×10^9)
T,	Tera (1×10^{12})

2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, México y Latinoamérica enfrentan un rezago en el campo del estudio de la tecnología espacial a comparación con potencias aeroespaciales como Estados Unidos, que cuenta con 5184 satélites, Rusia con 181, China con 628 y otros países con 1572 [Sebastian, 2023]. Este rezago se atribuye a una serie de desafíos que obstaculizan el progreso en la región, como la escasez de recursos tecnológicos, la limitada inversión financiera en investigaciones espaciales, la marcada desigualdad social y las problemáticas políticas en curso [Plaisant, 2014].

Los satélites se pueden clasificar tanto por su misión (es decir, su objetivo), o bien por su masa. En las últimas décadas, los denominados nanosatélites (aquellos cuyas masas se encuentran en el rango entre 1 kg y 10 kg) y en especial aquellos creados bajo el estándar CubeSat, se han popularizado a tal grado, que hoy en día constituyen lo que se puede denominar el medio para democratizar el espacio [de Carvalho et al., 2020; Duarte, 2016]. En este sentido, un nanosatélite tipo CubeSat es un satélite altamente estandarizado, que es modular y cuyo módulo fundamental es una unidad (1U). Cada unidad tiene forma cúbica de $10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm}$ de volumen, y a pesar de tener restricciones geométricas, de tamaño y de masa (cada unidad no puede exceder 1kg), su objetivo es poseer todas las características de un satélite de mayor envergadura [Johnstone, 2020].

De esta manera, los satélites están compuestos por distintos subsistemas de ingeniería, entre los que destacan: subsistema estructural, subsistema de comunicaciones, subsistema de control térmico, subsistema de control de orientación, subsistema de potencia (energía), subsistema de carga útil (aquello que hará que un satélite cumpla con su misión), así como el subsistema de computadora a bordo (On-Board Computer por sus siglas en ingles, OBC) [Cappelletti et al., 2020; Peter Fortescue, 2002]. Como se puede observar, todos y cada uno de estos subsistemas son fundamentales para la supervivencia del satélite, la correcta ejecución y éxito de su misión espacial. En este trabajo se hace énfasis especial en la OBC que es la encargada de gestionar todos los recursos del satélite, jerarquizar tareas así como procesos y controlar de manera centralizada todas la operación del satélite, así como a cada uno de los subsistemas satelitales [Eickhoff, 2011].

Existen varios desafíos entorno al desarrollo y aplicación de OBCs en nanosatélites, y en particular en los CubeSat. Como puede imaginarse, al ser tan restrictivo el estándar CubeSat, ha dado pie en las últimas dos décadas y media de desarrollo a la generación de un mercado para satisfacer de manera inmediata

los requerimientos de los desarrolladores de este tipo de satélites, que a menudo son países en vías de desarrollo o instituciones de educación superior [Yost and Weston, 2024]. En el campo de la OBC, esto ha implicado el desarrollo de módulos listos para su uso tipo *plug and play*, no obstante, sus costos resultan ser elevadísimos para economías en vías de desarrollo [Yost and Weston, 2024]. La adquisición de una OBC de esta naturaleza, representa una inversión significativa para el desarrollo de nanosatélites. Por ejemplo, la empresa ENDUROSAT®, ofrece una estimación de costo para una OBC estándar en el rango de \$5,100 a \$11,700 USD [EnduroSat, 2024]. Asimismo, datos proporcionados por la empresa SPACE-MANIC®, los precios de la OBCs pueden variar desde €2,540 a €4,940 (euros) [Spacemaniac, 2024]. Estas cifras proporcionan una visión más completa del reto financiero que implica la implementación de una computadora a bordo, sin mencionar los gastos asociados al lanzamiento, mantenimiento continuo y personal especializado para su monitoreo, haciendo que el trabajo de integración de un satélite pequeño se complique mucho para instituciones de educación superior públicas o países en vías de desarrollo, haciendo poco viable la adquisición de estos componentes para su exclusiva integración.

No obstante, el hecho de que dichos dispositivos no se puedan adquirir (obviando su costo) deteriora el desarrollo de ingeniería/tecnología propias, lo que a su vez atenta contra la soberanía tecnológica y espacial de cualquier nación. En este sentido, se resalta la urgente importancia y necesidad de generar tecnología propia que comience a suplir estas necesidades, considerando las capacidades tecnológicas actuales de México así como los ajustados presupuestos existentes [Duarte, 2016; Plaisant, 2014].

De esta manera, se pueden identificar varias necesidades que deben abordarse para el desarrollo inicial de OBCs en el contexto nacional. Para esto, es fundamental guiarse por el nuevo paradigma de desarrollo de satélites pequeños que ha estado cobrando fuerza en los ámbitos académicos espaciales alrededor del mundo, que es el concepto de LeanSat (o Lean Satellite), que es un esfuerzo por desarrollar satélites pequeños (entre ellos, CubeSats), con los menores costes de desarrollo, lanzamiento y operación, así como contemplando para su desarrollo el uso de componentes *Commercial Off-The-Shelf (COTS)*, bajando drásticamente los costos de desarrollo a cambio de un proceso de validación más estricto [Cho et al., 2023, 2022]. Siguiendo esta filosofía, en este proyecto se buscan utilizar componetes COTS para desarrollar un prototipo de OBC que cumpla con las características necesarias para gestionar los recursos en un satélite tipo CubeSat de 1U, buscando optimizar tanto sus capacidades así como su consumo eléctrico, tamaño y masa, adaptandose adecuadamente a las restricciones que deben cumplir este tipo de satélites [Johnstone, 2020].

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Como se mencionó anteriormente, en el campo de los nanosatélites tipo CubeSat, existen numerosas opciones comerciales de OBC. Sin embargo, además de ser altamente costosas (muchas veces fuera del alcance de proyectos académicos actuales), suelen ser de propósito general, y por lo tanto, no son lo suficientemente genéricas para poder adaptarse a cualquier misión espacial. Así, muchas veces estarán sobradas o les faltará capacidad para una misión en específico.

Ante esta problemática, surge la necesidad de desarrollar una OBC que, además de ser de bajo costo, funcione de manera eficiente para su uso específico en un CubeSat de 1U de fabricación nacional. De esta manera, se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Cómo se puede desarrollar una OBC genérica de bajo costo a partir de componentes COTS, que cumpla con las siguientes características específicas: un tamaño menor a 10 cm x 10 cm, masa inferior a 300 gramos, y que los parámetros eléctricos y de procesamiento (máxima capacidad de transferencia de datos en el bus y máxima capacidad de memoria en la OBC) se limiten a aquellos encontrados en la literatura [[C3S ELECTRONICS DEVELOPMENT LLC, 2021](#)]?

4. PROPUESTA DE SOLUCIÓN

En este proyecto se propone bajo un esquema de diseño propio, programar, simular y desarrollar los módulos que integran una OBC, de acuerdo a una investigación realizada previamente sobre una arquitectura para OBC's, de manera que se optimicen los recursos de dicha computadora, haciendo uso de las arquitecturas COTS y que sea de fácil implementación/programación para el usuario final, lo cual permitirá al usuario integrarla de una manera sencilla al nanosatélite. Tomando a consideración ciertas métricas como:

- **Almacenamiento:** Se refiere a la capacidad de guardar datos de misión, software operativo y registros de telemetría. Las OBCs típicamente emplean una combinación de memoria volátil (RAM) para almacenamiento temporal y memoria no volátil (Flash o EEPROM) para almacenamiento permanente. La memoria debe ser suficiente para manejar el almacenamiento de datos durante la misión y permitir actualizaciones de software. [[Fortescue et al., 2003](#)]
- **Distribución:** Se refiere al manejo y envío de datos a los distintos subsistemas y módulos del satélite. Un buen sistema de distribución asegura que los datos sean entregados de manera oportuna y eficiente, minimizando el retraso y evitando cuellos de botella en el flujo de información. Se utilizan buses de datos como CAN, MIL-STD-1553, y SpaceWire para esta tarea. [[Wertz et al., 2011](#)]
- **Confirmación:** implica la verificación de la correcta recepción y procesamiento de comandos y datos en la OBC. Esto se realiza mediante protocolos de comunicación que incluyen mecanismos de acuse de recibo y confirmaciones (ACK/NACK), y puede incluir técnicas de corrección de errores (ECC). [[Maral and Bousquet, 2009](#)]
- **Procesamiento de recepción:** Este aspecto abarca el manejo y procesamiento inicial de los datos recibidos por la OBC, incluyendo la validación y el almacenamiento temporal de los datos. El procesamiento de recepción asegura que los datos sean correctamente interpretados y que los comandos sean ejecutados conforme a los parámetros establecidos. [[Gordon and Morgan, 1993](#)]
- **Programación**
- **Modularidad:** Procesamiento de trama de datos estándar. Permite que diferentes módulos de la OBC procesen tipos específicos de datos de manera estandarizada y flexible. Esto facilita la integración y el mantenimiento del sistema. Los estándares como CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) definen formatos de tramas de datos utilizados en las comunicaciones espaciales. [[Consultative Committee for Space Data Systems, 2003](#)]

- **Simulación y emulación de enlace y procesamiento:** Son cruciales para probar la funcionalidad de la OBC bajo condiciones de operación realistas. Esto incluye la simulación de enlaces de comunicación y el procesamiento de datos para asegurar que el sistema funcione correctamente antes del lanzamiento. [Fortescue et al., 2011]
- **Operativas: Consumo, masa y tamaño.** Estas métricas, como el consumo de energía, la masa y el tamaño, son críticas en el diseño de una OBC debido a las limitaciones estrictas de los satélites. La OBC debe ser eficiente en términos de consumo de energía y estar diseñada para ocupar el mínimo espacio y peso posible sin comprometer su funcionalidad. [Sandau, 2010]

Se buscan obtener los siguientes datos asociados a las métricas:

- Saturación de procesamiento: Saturar la memoria RAM y determinar el tiempo para procesar el máximo proceso.
- Máxima capacidad del bus de datos: Es la máxima capacidad de información que puede distribuir por unidad de bus.
- Máxima capacidad de memoria: Saturación de la memoria de todos los microcontroladores y las memorias compartidas.

En la figura 1, se tiene la arquitectura que tiende a solucionar la problemática planteada anteriormente.

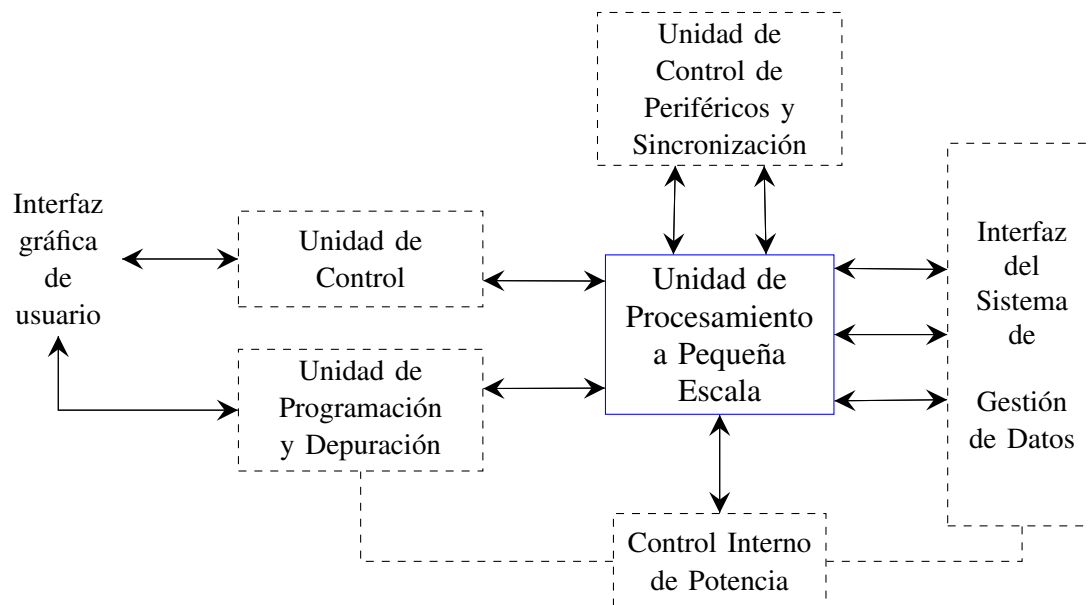


FIGURA 1. Propuesta de arquitectura OBC (autoría propia).

Dónde:

-
- **Interfaz gráfica de usuario:** La GUI es una interfaz de usuario que permite la interacción con dispositivos electrónicos a través de elementos gráficos y visuales como ventanas, íconos, menús y botones. Proporciona un entorno visual intuitivo que facilita el uso de las aplicaciones y sistemas operativos [[Techterms, 2019](#)], en este caso será para la OBC.
 - **Unidad de Control:** Es una parte esencial del procesador que se encarga de coordinar y controlar las operaciones de ejecución de instrucciones. Es responsable de interpretar y ejecutar las instrucciones del programa almacenadas en la memoria, así como de controlar el flujo de datos dentro del procesador [[Hennessy and Patterson, 2017](#)].
 - **Unidad de Programación y Depuración:** Esta unidad proporciona una interfaz entre la GUI y el microcontrolador o microprocesador objetivo.

Las funciones principales de una unidad de programación y depuración son:

 - **Programación:** Permite cargar el software (firmware) compilado en el microcontrolador o microprocesador. Esto se hace generalmente a través de algún protocolo de comunicación como JTAG, SWD, SPI, UART, etc.
 - **Depuración:** Facilita la depuración del software en ejecución en el microcontrolador o microprocesador. Esto implica funciones como establecer puntos de ruptura, observar variables en tiempo real, seguir la ejecución del código línea por línea, entre otros [[McConnell, 2004](#)].
 - **Unidad de Control de Periféricos y Sincronización:** Se refiere a diferentes aspectos de la arquitectura y funcionalidad de estos dispositivos.
 - **Unidad de Monitoreo:** Es responsable de supervisar y gestionar el funcionamiento general del microcontrolador o microprocesador. Esto puede incluir la gestión de eventos de interrupción, el manejo de errores, la gestión de la energía, y la ejecución de rutinas de inicialización y reinicio del sistema. Esta unidad es crucial para garantizar la estabilidad y la integridad del sistema, así como para mantener la seguridad en el funcionamiento del dispositivo.
 - **Periféricos:** Los periféricos son componentes adicionales integrados en el microcontrolador o microprocesador que brindan funcionalidades específicas. Estos periféricos pueden incluir convertidores analógico-digitales (ADC), convertidores digital-analógicos (DAC), módulos de comunicación (UART, SPI, I2C), temporizadores, PWM (modulación por ancho de pulso), entre otros. La programación de estos periféricos implica configurar sus registros internos,

manejar interrupciones relacionadas y utilizar sus funciones según sea necesario para cumplir con los requisitos del sistema.

- **Sincronización:** La sincronización se refiere a asegurar que las diferentes partes del microcontrolador o microprocesador operen en coordinación adecuada. Esto puede implicar sincronizar las operaciones de múltiples núcleos de CPU en un microprocesador multicore, garantizar que las operaciones de entrada/salida (E/S) se realicen en momentos específicos dentro del ciclo de reloj del sistema, o sincronizar la ejecución de tareas entre el procesador principal y los periféricos. Es esencial para evitar problemas como condiciones de carrera, donde múltiples componentes intentan acceder a recursos compartidos simultáneamente, lo que puede conducir a resultados impredecibles o incorrectos en el funcionamiento del sistema. [Stallings, 2015]
- **Interfaz del Sistema de Gestión de Datos:** Es fundamentalmente el medio a través del cual la OBC se comunica con otros sistemas dentro del dispositivo o con sistemas externos. Esta interfaz puede tomar diferentes formas dependiendo de la aplicación específica y los requisitos del sistema, pero típicamente implica la capacidad de recibir y enviar datos de manera confiable y eficiente. Algunas de las características incluyen: protocolos de comunicación, velocidad de transmisión, fiabilidad y tolerancia a fallos, seguridad, flexibilidad y escalabilidad [Elmasri and Navathe., 2016].
- **Control Interno de Potencia:** Tiene como característica principal gestionar y controlar su consumo de energía internamente de la OBC. Permite ajustar y controlar varios aspectos del funcionamiento interno del dispositivo para optimizar el consumo de energía. Esto puede incluir la capacidad de cambiar entre diferentes modos de energía (como modos de bajo consumo), ajustar la velocidad del reloj del procesador, apagar ciertos periféricos cuando no están en uso, y otras técnicas de gestión de energía para maximizar la eficiencia energética del sistema en general. El objetivo final del IPC es mejorar la vida útil de la batería o reducir el consumo de energía en la OBC sin comprometer el rendimiento o la funcionalidad [Murthy and Moorthi., 2016].
- **Unidad de Procesamiento a Pequeña Escala:** Es el componente de hardware diseñado para realizar tareas de procesamiento de datos de manera local en el satélite (el cual ya se encuentra creado y se toma para su uso).

La unidad está destinada a ejecutar operaciones específicas o cargas de trabajo dentro del sistema, como el control de dispositivos, la recopilación de datos, la navegación, la comunicación,

entre otras funciones. Estas unidades están optimizadas para operar en el entorno espacial, donde pueden encontrarse restricciones significativas en términos de energía, espacio y resistencia a la radiación. Está diseñada para ser compacta y eficiente en el consumo de energía . Es la unidad crítica que proporciona capacidades de procesamiento local para el control y la gestión de sistemas en el entorno espacial [[Heath, 2002](#)].

Este protocolo de investigación se vera respaldado por el apoyo económico proporcionado por el Centro de Desarrollo Aeroespacial (CDA) del IPN. Este financiamiento permitirá realizar pruebas exhaustivas, análisis detallados y garantizar la viabilidad técnica y económica de la solución propuesta.

5. ALCANCES

5.1. Alcances. Al tratarse de un prototipo se presentan ciertos alcances y limitaciones que es importante tener en cuenta. A continuación, se presentan los rangos de funcionalidad del prototipo.

- El prototipo de la OBC debe de cumplir con las características de masa, tamaño y eléctricas requeridas para un satélite tipo CubeSat de 1U.
- Se deberá poder controlar los subsistemas delimitados para el presente proyecto.
- Se desarrollará una interfaz gráfica de usuario capaz de comunicar la OBC con el usuario final, donde el usuario podrá obtener la telemetría de algunos subsistemas.
- Las pruebas de funcionamiento del prototipo se enfocaran en la adquisición y procesamiento de las señales provenientes de los subsistemas delimitados para este proyecto.
- Se emulara el intercambio de datos provenientes de los subsistemas del satélite.
- Únicamente se medirán los parámetros eléctricos y de procesamiento(máxima capacidad de transferencia de datos en el bus y máxima capacidad de memoria en la OBC) del prototipo.
- Los valores de los parámetros eléctricos y de procesamiento(máxima capacidad de transferencia de datos en el bus y máxima capacidad de memoria en la OBC) de la OBC se limitaran a aquellos reportados en la literatura.

5.2. Limitaciones.

- El proyecto no busca desarrollar una OBC completa.
- No se implementarán ni realizarán pruebas en ningún satélite en operación real, dada la imposibilidad de acceso a uno operativo.
- Al prototipo no se le realizaran las pruebas de vibración, vacío térmico, choque o alguna otra prueba propuesta por las especificaciones de Cal Poly.
- El sector de computadora a bordo no se va a probar en entornos similares a las de un entorno espacial.
- El proyecto no busca desarrollar algún microprocesador o microcontrolador completos.

6. OBJETIVOS

6.1. Objetivo general.

Desarrollar un prototipo de una OBC para un nanosatélite tipo CubeSat haciendo uso de arquitecturas electrónicas COTS (Commercial Off-The-Shelf).

6.2. Objetivos específicos.

- Determinar los requerimientos funcionales y no funcionales.
- Caracterizar unidades de procesamiento comúnmente utilizadas bajo el estándar CubeSat.
- Determinar los subsistemas satelitales a los cuáles se les brindara soporte.
- Diseñar los elementos de la capa lógica para el núcleo de procesamiento.
- Diseñar el sistema de la OBC, mediante la configuración tipo FlatSat.
- Elegir la arquitectura electrónica de procesamiento a utilizar.
- Programar la secuencia de operación lógica.
- Simular el diseño de OBC.
- Desarrollar una interfaz gráfica de usuario.
- Construir el prototipo.
- Realizar las pruebas correspondientes.

7. ESTADO DEL ARTE

A continuación se muestran investigaciones y proyectos de los que partimos como antecedentes para el fundamento y desarrollo de este proyecto.

7.1. Investigaciones y proyectos que se han realizado en el IPN.

Uno de los proyectos terminales relacionados en este tema de la tecnología aeroespacial en México, se encontró en la Biblioteca de la UPIITA del IPN, se titula “Proyecto Odisseo: caracterización de módulos que pertenecen a un nanosatélite y desarrollo de software de una estación terrena” publicado en la Ciudad de México en el año 2019, realizado por los ahora ya ingenieros Eslí Mújica Chigo y Miguel Ángel Acevedo Reyes, donde recibieron el asesoramiento por los doctores Víctor Barrera Figueroa y Luis Manuel Rodríguez Méndez, su objetivo general menciona el “caracterizar y, en su caso construir e implementar cinco módulos elementales de un nanosatélite, específicamente la carga útil, radio transceptor UHF, la estructura de soporte y un administrador de potencia; además de un módulo de la estación terrena, concretamente, la computadora de control terrena” [Mújica Chigo and Acevedo Reyes, 2019]. El enfoque que tiene este trabajo va más a la construcción de un satélite con una computadora de control terrena, no de una computadora a bordo para un nanosatélite.

Una investigación que se titula “A cluster based on 8 bit, flash based architecture microcontrollers” realizada por D L Sánchez-Cabadas, G A Yáñez-Casas, J J Hernández-Gómez and C Couder-Castañeda, que pertenecen a la CDA-IPN y UPIITA-IPN, lleva como objetivo “Utilizar la teoría de sistemas distribuidos, en microcontroladores CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) de 8 bits, más en particular, los dispositivos PIC16F887 de Microchip, que tienen una arquitectura reducida y limitada. De esta forma, se propone un sistema embebido de bajo consumo enfocado a la realización de múltiples operaciones y tareas, en las que, el tiempo es un elemento vital, como sistemas operativos en tiempo real, utilizando protocolos de comunicación embebidos cableados para lograr la correcta distribución de los datos” [D L Sánchez-Cabadas and Couder-Castañeda, 2022]. En este trabajo se hace uso de los sistemas embebidos los cuales se relacionan al tipo de sistemas a implementar en la OBC.

7.2. Investigaciones y proyectos de otras universidades y centros de investigación.

Por otro lado, existen trabajos de otra institución, el cual es de la UNAM, una tesis que lleva por nombre "Desarrollo de un sistema de percepción remota para un nanosatélite tipo cubesat" publicada en el estado de Querétaro, México en el año 2019, presentada por el licenciado en tecnología Daniel García Nuñez donde su director de asesoramiento fue el Dr. Rafael Guadalupe Chávez Moreno, donde su objetivo general menciona "Diseñar y desarrollar un prototipo de un sistema de percepción remota para la carga útil de un nanosatélite tipo CubeSat, utilizando componentes COTS. Además se implementaron y se validaron algoritmos de un seguidor de estrellas en un microprocesador para integrarlos como un sistema de determinación de orientación" [Nuñez, 2019]. Como se puede hacer notar, se hizo un uso de los componentes COTS para un tipo de sistema, no para un tipo de arquitectura electrónica de una OBC.

También se encuentra el trabajo de tesis titulado "Desarrollo del modelo de ingeniería del subsistema de observación espacial de baja resolución para un nanosatélite mexicano", publicado en el Estado de México, Cuatitlán Izcalli en el año 2022, presentado por el ya egresado Ing. Raúl Sánchez Alonso, donde obtuvo asesoramiento del Dr. José Alberto Ramírez Aguilar, se tiene como objetivo general "Desarrollar el modelo de ingeniería de un sistema de observación espacial de baja resolución utilizando componentes tipo COTS para un nanosatélite experimental, tomando como caso de estudio al nanosatélite experimental KuauhtliSAT que desarrolla se desarrolla en la Unidad de Alta Tecnología de la Facultad de Ingeniería de la UNAM [Alonso, 2022]. Para este proyecto, se centra más en el estudio del nanosatélite a diferencia de sólo el módulo como el de la OBC.

De acuerdo a una investigación nombrada "On-Board Computer and Testing Platform for CubeSat Development" extraída de IEEE JOURNAL ON MINIATURIZATION FOR AIR AND SPACE SYSTEMS, VOL. 4, NO. 2, JUNE 2023 199, realizada por los autores Koffi V. C. K. de Souza , Yassine Bouslimani , Mohsen Ghribi, y Tobie Boutot, habla acerca de "El diseño y desarrollo de una plataforma de pruebas CubeSat construida a partir de cero. La investigación se llevó a cabo en el marco del CubeSat (CCP), una iniciativa de la Agencia Espacial Canadiense (CSA) para apoyar el desarrollo de 15 CubeSats en todo Canadá. En este artículo se hace hincapié especialmente en tres subsistemas clave 1) Un ordenador de a bordo (OBC); 2) un sistema de navegación por satélite (GNSS); y 3) una tarjeta de comunicaciones, todo ello conectado a través de una tarjeta FlatSat. El software de la misión se ejecuta en un microcontrolador STM32 (MCU) se encarga de gestionar todas las actividades del CubeSat. El OBC se diseñó para cumplir

una serie de requisitos mecánicos, eléctricos y térmicos. En efecto, debido al intenso calor y a la radiación a los que estará expuesto el CubeSat en la órbita terrestre baja (LEO), el CubeSat puede experimentar muchas dificultades, que podrían conducir al fracaso de la misión [de Souza et al., 2023]. Por lo visto en este trabajo se puede concluir sobre el enfoque de haber construido la OBC era delimitarse a ciertas características para que sus funciones tuvieran éxito, así que para nuestro proyecto tendremos nuestras propias delimitaciones.

7.3. Estándares y normatividad entorno a nanosatélites tipo CubeSat.

Es importante hablar del desarrollo y la operación de nanosatélites CubeSat, ya que están sujetos a una serie de estándares y normativas que aseguran su compatibilidad, seguridad y eficiencia en misiones espaciales.

Estos estándares no solo facilitan la colaboración internacional, sino que también garantizan que los CubeSat cumplan los requisitos técnicos necesarios para operar en el espacio. Sin embargo es pertinente mencionar que en este proyecto no se busca cumplir toda la normatividad y estándares que conlleva la implementación de un nanosatélite CubeSat, ya que solo se tomaran estándares como la masa, tamaño y ciertas conexiones. A continuación se muestran algunos de los estándares y normas bajo las cuales se rige el estándar CubeSat

1. NMX-AE-001-SCFI-2018

- **Título:** Sistemas espaciales-Diseño de satélites cubesats-Requisitos y clasificación.
- **Descripción:** Esta norma establece los requisitos que deberán observarse para los satélites denominados "CubeSat" definiendo una clase única de pico y nanosatélites. Además, establece una clasificación para los diferentes tipos de CubeSat con base en sus principales características técnicas. Dicha norma es aplicable al desarrollo de: CubeSats, unidades de despliegue CubeSat y a términos y métricas relacionadas (verificación, desempeño y calidad de estas tecnologías).

2. ISO 17770:2017

- **Título:** Sistemas espaciales-Satélites cubo (CubeSats).
- **Descripción:** Define los CubeSats como nanosatélites ideales para proyectos educativos universitarios, con un enfoque en desarrollo espacial rentable. El estándar también aborda el desarrollo de desplegados estándar para liberar múltiples CubeSats como cargas secundarias en diferentes lanzadores, promoviendo la eficiencia y la interoperabilidad. Además, establece

controles normativos para pruebas de diseño y calificación específicas, incluida la adaptación de pruebas de entorno de lanzamiento para CubeSats.

3. ISO 19683:2017

- **Título:** Sistemas espaciales-Pruebas de calificación de diseño y aceptación de pequeñas naves espaciales y unidades.
- **Descripción:** Establece métodos de prueba y requisitos para la calificación de diseño y aceptación de pequeñas naves espaciales y unidades. Se enfoca en garantizar la fiabilidad posterior al lanzamiento al espacio, manteniendo costos bajos y tiempos de entrega rápidos. Esta norma se aplica a satélites desarrollados con métodos no tradicionales y abarca diversas categorías de pequeñas naves espaciales, como mini-, micro-, nano-, pico- y femto-, incluyendo CubeSats desarrollados con procesos no convencionales.

4. Especificación de diseño de CubeSat - Cal Poly

- **Descripción:** El propósito de las especificaciones descritas en este documento es ayudar a garantizar el éxito y la seguridad de la misión, así como proporcionar los requisitos básicos para que los desarrolladores de CubeSat diseñen sus naves espaciales, de modo que sean compatibles con tantos dispensadores de CubeSat y oportunidades de lanzamiento como sea posible.

5. CubeSat101 - NASA

- **Título:** Conceptos y procesos básicos para Desarrolladores novatos de CubeSat.
- **Descripción:** El CubeSat101 cubre aspectos esenciales como el diseño, la fabricación, la integración, el lanzamiento y las operaciones de CubeSats. Además, ofrece orientación sobre cómo abordar los desafíos técnicos y logísticos asociados con el desarrollo de CubeSats, incluyendo consideraciones de diseño, selección de componentes y requisitos de lanzamiento.

Finalmente, es importante mencionar que ninguna de las normas y estándares presentados anteriormente impone restricciones específicas para el diseño y/o desarrollo de la OBC satelital, adicionales a la compatibilidad con tamaño y masa para un satélite CubeSat de 1U. Es por eso que el objetivo del trabajo actual es utilizar experiencias previas para generar tecnología propia.

TABLA 1. Estado del Arte

ítems	Título	Tipo	Procedencia	Año	Cualidades	Referencias
1	"Proyecto Odisseo: caracterización de módulos que pertenecen a un nanosatélite y desarrollo de software de una estación terrena"	Tesis Ingeniería	UPIITA	2019	Construcción de un satélite con una computadora de control terrena.	[Mújica Chigo Acevedo Reyes, 2019]
2	"A cluster based on 8 bit, flash based architecture microcontrollers"	Investigación	CDA-IPN, UPIITA	2022	Utilizar la teoría de sistemas distribuidos, en microcontroladores CMOS (Complementary Metal-Oxide Semiconductor) de 8 bits, particularmente, los dispositivos PIC16F887 de Microchip, que tienen una arquitectura reducida y limitada.	[D L Sánchez-Cabadas and Couder-Castañeda, 2022]
3	"Desarrollo de un sistema de percepción remota para un nanosatélite tipo cubesat"	Tesis Ingeniería	UNAM	2019	Diseñar y desarrollar un prototipo de un sistema de percepción remota para la carga útil de un nanosatélite tipo CubeSat, utilizando componentes COTS	[Nuñez, 2019]
4	"Desarrollo del modelo de ingeniería del subsistema de observación espacial de baja resolución para un nanosatélite mexicano"	Tesis Ingeniería	UNAM	2022	Desarrollar el modelo de ingeniería de un sistema de observación espacial de baja resolución utilizando componentes tipo COTS para un nanosatélite experimental	[Alonso, 2022]
5	"On-Board Computer and Testing Platform for CubeSat Development"	Investigación	IEEE JOURNAL	2023	Diseño y desarrollo de una plataforma de pruebas CubeSat construida a partir de cero	[de Souza et al., 2023]

8. MARCO TEÓRICO

Con el avance del tiempo, el número de sistemas de comunicación necesarios para la vida cotidiana del ser humano ha aumentado a medida que las poblaciones lo han hecho. Dentro de estos sistemas de comunicación los satélites cumplen un papel fundamental. En este capítulo se presentan algunos del contexto teórico y conceptual que servirán como introducción del trabajo terminal, como conceptos espaciales, clasificación de satélites, el estándar CubeSat, subsistemas de un satélite, partes que integran una computadora a bordo, etc.

8.1. Conceptos espaciales.

En términos astronómicos, los satélites naturales son aquellos cuerpos más pequeños (secundarios) que se encuentran orbitando alrededor de un cuerpo más grande (primarios). Por ejemplo, la Tierra es uno de los satélites naturales del Sol, y el único de los satélites naturales conocido hasta el momento de la Tierra es la Luna [Angelo, 2006]. Así mismo existen los satélites artificiales que son “vehículos” espaciales, que describen una órbita alrededor de la Tierra u otro cuerpo celeste. Dichos satélites son elaborados por el ser humano, permitiendo las comunicaciones a grandes distancias (véase la figura 2).

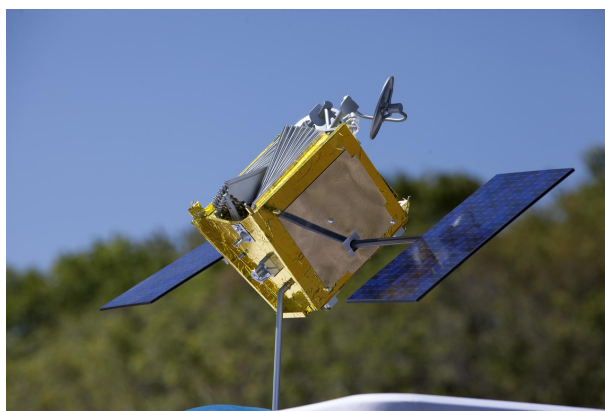


FIGURA 2. Satélite artificial One Web. Tomado de [National Aeronautics and Space Administration, 2017b].

La era espacial comenzó oficialmente con el lanzamiento del satélite Ruso *Sputnik I* en 1957 dando inicio a la era de los satélites artificiales (véase la figura 3). Desde entonces los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de una variedad de satélites, cada uno diseñado para cumplir tareas específicas, que van desde la observación terrestre, exploración científica en el espacio hasta las telecomunicaciones [Tomasi, 2003]. Con ello podemos hablar de una manera de clasificar los satélites con base a su trayecto (órbita), misión, tamaño y peso.



FIGURA 3. Un técnico haciendo las preparaciones finales en el Sputnik I antes de ser lanzado. [Uri, 2022]

■ Orbitas

Las orbitas son las trayectorias o el camino que sigue un satélite al rededor de un cuerpo astronómico. Cuando un cuerpo se mueve alrededor de otro cuerpo de mayor masa bajo la influencia de la fuerza gravitacional, el camino que toma se le llama órbita Angelo [2006]. Dentro de la clasificación de las orbitas podemos encontrar diversas, donde cada una se encuentra a distinta altura, inclinación y excentricidad. Según el catalogo de orbitas terrestres de satélites publicado por [Riebeek, 2009, Cap. 4] en Nasa Earth Observatory podemos clasificar las orbitas terrestres como: alta, media y baja. Según la clasificación la orbita alta terrestre (HEO por las siglas de: "High Earth Orbit") se encuentra a una altura aproximada de 42,164 km, su velocidad es igual a la de la rotación de la Tierra, se le denomina GEO por su nombre en ingles "Geosynchronous Earth Orbit"son ideales para misiones espaciales de monitoreo de clima y telecomunicaciones.

En la orbita media (MEO por las iniciales "Medium Earth Orbit". Dentro de la orbita media encontramos 2 tipos destacables: la orbita semi-síncrona y la orbita Molniya. En la orbita semi-síncrona los satélites tardan un promedio de 12 horas en dar una vuelta completa a la Tierra lo que la hace ideal para aplicaciones como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). A diferencia de la orbita Molniya los satélites también tardan un promedio de 12 horas en dar 1 vuelta a la Tierra, pero con la diferencia de su excentricidad, esta orbita tiene forma elíptica, lo que permite a los sistemas permanecer mas tiempo en los hemisferios, por lo que son útiles para comunicaciones en latitudes lejanas al Ecuador.

Finalmente, la orbita terrestre baja (LEO por sus siglas en inglés: "Low Earth Orbit") es utilizada

mayormente con fines científicos, debido a que existe una cantidad de retos menos complicados de enfrentar como lo son: las condiciones ambientales, altura y costo de los satélites. Por lo mencionado anteriormente permite el uso de componentes de bajo costo y fácil acceso (Components Off-The-Shelf mejor conocidos como COTS). Como principales misiones en esta órbita encontramos la observación terrestre [[Riebeek, 2009](#)].

8.2. Tecnología satelital.

La tecnología espacial depende directamente de la misión que el o los satélites vayan a desarrollar o de su masa. Desde una misión militar, hasta una investigación académica, como lo puede ser la recolección de datos del espacio o del planeta Tierra. Debido a la variedad de tamaños y capacidades de los satélites sera la misión que se vaya a desarrollar.

Es por eso que en esta sección se desglosara de manera general la clasificación de satélites dependiendo de su misión y/o tamaño, además de las tecnologías que se implementan comúnmente en el ámbito espacial.

- Clasificación de satélites por objetivo de misión espacial

Cuando hablamos de una misión espacial especifica, tenemos que pensar en la carga útil que el satélite llevará. En toda la bibliografía que se ha encontrado, se puede definir los satélites dependiendo de su misión [[Nuñez, 2019](#)], por ejemplo, existen satélites dedicados para la observación terrestre y del espacio, donde continuamente se están recabando datos con diversas tecnologías (percepción remota), hay satélites para la navegación y finalmente, satélites para las comunicaciones del planeta Tierra, los cuales normalmente son sistemas un poco mas complejos que otros. [[Capderou, 2005](#)]

- Clasificación de satélites por magnitud de masa

La clasificación por magnitud de masa en los satélites siempre ha dependido directamente de diversos factores, pero principalmente del costo del satélite y de su carga útil. Con el surgimiento de necesidades y de la curiosidad de la humanidad se ha requerido de diversos satélites que se adapten a una misión especial particular por ello podemos clasificar los satélites como: pequeños y grandes [[Buchen, 2014](#)].

Este suceso marco el inicio de los satélites grandes, posteriormente en 1999 la Universidad Politécnica Estatal de California y la Universidad de Stanford desarrollaron el estándar CubeSat

para darle a los estudiante más oportunidades de involucrarse en la industria espacial, marcando un continuo avance en los satélites pequeños y el desarrollo de otras categorías como nanosatélites, micro-satélites, etc. [[National Aeronautics and Space Administration, 2017a](#)]

Los satélites cuya masa es mayor a 601 kilogramos son considerados satélites grandes con un límite mayor a 7001 kilogramos. Como se ha mencionado las tendencias van hacía la reducción de tamaño y de costos con el objetivo de construir satélites dedicados para una misión. Los satélites considerados como pequeños cuentan con una masa de entre 0.01 kilogramos siendo el satélite más pequeños registrado hasta una masa menor de 601 kilogramos. La Tabla 2 presenta la clasificación de satélites por rangos de masa desde los 0.01 kilogramos hasta los 7,001 kilogramos. [[Buchen, 2014](#)] Dentro de las clasificaciones encontramos los nanosatélites que es donde este proyecto se enfocara principalmente, particularmente en el estándar CubeSat.

TABLA 2. Rango de masas por clase de satélite [[Space and Technology, 2020](#)].

Nombre de la clase de masa	Kilogramos(kg)
Femto	0.01-0.09
Pico	0.1-1
Nano	1.1-10
Micro	11-200
Mini	201-600
Pequeños	601-1,200
Medianos	1,201-2,500
Intermedios	2,501-4,200
Grande	4,201-5,400
Pesado	5,401-7,000
Extra pesado	>7,001

■ Estándar CubeSat

Los nanosatélites tipo CubeSat, se refieren a un estándar de sistemas espaciales que surgió para ayudar e iniciar a los estudiantes de nivel licenciatura en el área aeroespacial. Actualmente, existen diferentes programas al rededor del mundo para el desarrollo de este tipo de satélites de bajo costo, así como diversas agencias gubernamentales (NASA) y grupos comerciales que se han unido al desarrollo de esta tecnología.

Como se menciona anteriormente el estándar CubeSat se desarrollo en la Universidad Politécnica Estatal de California en conjunto con la Universidad de Stanford, donde se definieron las características específicas que debe de presentar el estándar CubeSat, permitiendo llevar un control al momento de desarrollar un nanosatélite y favoreciendo costos en el uso de componentes, transporte y lanzamiento [[National Aeronautics and Space Administration, 2017a](#)].

Los nanosatélites CubeSat pueden venir en diversos tamaños, como lo son nanosatélites de 1U, 1.5U, 3U, 6U, 12U, etc. Estos nanosatélites están basados en el estándar “unit” que hace referencia a un CubeSat de 1U.

Cuando hablamos de un CubeSat de 1U, nos referimos a un nanosatélite con las siguientes características [[Johnstone, 2020](#)]:

Generales

1. El CubeSat no debe presentar ningún peligro para los CubeSat vecinos, ni para la carga útil primaria, ni para el vehículo de lanzamiento: todas las partes deberán permanecer unidas durante el lanzamiento, la eyección y la operación y no se les permite pirotecnia.
2. Siempre que sea posible, se recomienda el uso de materiales aprobados por la NASA o la ESA.
3. El CubeSat deberá estar sometido a las pruebas de aceptación y certificación de acuerdo con la especificaciones del lanzador.

Dimensiones de un CubeSat

1. Los CubeSat son nanosatélites en forma de cubo con una longitud nominal por lado de 100 mm.
2. Sus dimensiones deben ser $10 \times 10 \times 11.35$ cm (incluyendo los rieles para su expulsión a través del P-POD).

Masa de un CubeSat

1. Su masa no podrá ser superior a 1.33 Kg.
2. Su centro de masa debe estar dentro de 2 cm de su centro geométrico.

Ya definidas las características principales con las que debe de contar un nanosatélite CubeSat, los satélites de más de 2U hasta un máximo de 12U, deben de estar conformados por nanosatélites de 1U, para poder garantizar que se encuentran dentro del estándar establecido. La figura 4 muestra ejemplos de unos satélites CubeSat de 1U Y 3U [[Johnstone, 2020](#)].



FIGURA 4. CubeSat 1U(izquierda) y CubeSat3U(derecha) [[National Aeronautics and Space Administration, 2017a](#)]

En el desarrollo de satélites, especialmente en nanosatélites tipo CubeSat, se han adoptado varias metodologías y enfoques innovadores para optimizar el proceso de diseño, integración y pruebas. Algunos de estos enfoques son Flat Sat y Lean Sat, debido a la relevancia que han ganado en el ámbito espacial.

- Flat Sat

El término se refiere a una configuración de prueba donde todos los subsistemas de un satélite se montan y prueban sobre una superficie plana, dicha configuración permite la integración y pruebas en los subsistemas de los satélites bajo un entorno controlado antes de ser ensamblados en el satélite. La ventaja principal de un Flat Sat es facilitar el acceso a todos los componentes, lo que simplifica la resolución de problemas y la verificación de la interoperabilidad de los subsistemas. En el caso del Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) de la NASA, el uso de Flat Sat permitió realizar pruebas funcionales de interfaz, desarrollo de procedimientos y verificación preliminar de hardware y software, entre otras actividades [Wright \[2008\]](#).

- Lean Sat

Dicho concepto se centre en la filosofía de diseño y desarrollo óptimo para satélites, enfocándose en reducir costos y tiempos de desarrollo mediante el uso de componentes comerciales (COTS), iteraciones rápidas y procesos de manufactura simplificados. Esta metodología busca maximizar la eficiencia y minimizar los recursos necesarios, dejándonos construir satélites mas pequeños y económicos [Project \[2017\]](#).

Según la tabla de [Cho et al. \[2023\]](#), los estándares de prueba para constelaciones de satélites lean enfatizan la simplicidad y la eficiencia en el diseño y la operación de estos satélites. Esto incluye la utilización de componentes comerciales (COTS) y tecnologías no probadas para reducir costos y tiempos de desarrollo, lo cual permite una mayor flexibilidad y rapidez en la implementación de misiones espaciales. Dicho texto nos habla de ciertos parámetros que se deben de cumplir para llamar un satélite bajo la metodología Lean Sat, como lo son: costo total, tiempo de entrega del satélite, duración de la misión, lanzamiento, riesgos, numero de personas necesarias para operar el satélite, numero de desarrolladores para el satélite, etc.

8.3. Ingeniería a bordo.

El diseño y la ingeniería de los sistemas para un satélite, hablando particularmente de un CubeSat requieren una comprensión profunda de los principios únicos asociados con las misiones espaciales de pequeña escala. Estos principios incluyen la optimización de recursos limitados como energía, peso y espacio físico, así como la implementación de tecnologías resistentes al entorno espacial, como la radiación y las fluctuaciones térmicas.

Un sistema básico satelital consiste en un satélite (o satélites) en el espacio transmitiendo información a varios usuarios a través de las estaciones terrestres. Podemos encontrar que la información transmitida puede ser voz, datos, vídeo, imagen o el envío de los 4 simultáneamente. El satélite es controlado a través de una estación de control terrestre, la cual a menudo es llamada centro de control maestro (MCC por sus siglas en inglés), la cual es la encargada de proveer rastreo, telemetría, comando y el monitoreo del sistema [\[Ippolito Louis, 2017\]](#).

En esta sección se describe los subsistemas más básicos por los cuales esta conformado un satélite grande (segmento espacial). Podemos clasificar la parte del segmento espacial en dos subsistemas: El bus y la carga útil(payload), como se muestra en la figura 5.

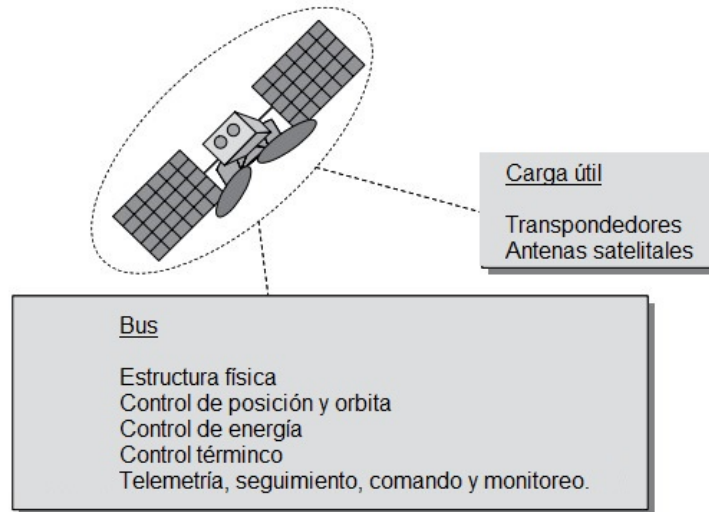


FIGURA 5. Subsistemas básicos de un satélite [Ippolito Louis, 2017]

■ Bus:

El bus está integrado por la estructura básica y los subsistemas que integran el satélite. Los subsistemas pertenecientes al bus son: la estructura física, subsistema de poder, subsistema de control orbital y de posición, subsistema de control térmico y subsistema de telemetría y comando [Ippolito Louis, 2017].

■ Carga útil:

La carga útil en un satélite hace referencia a la misión que este llevara a cabo, por ejemplo, para un satélite de comunicaciones la carga útil está formada de un equipo de telecomunicaciones que se encarga de transmitir y recibir, en otros casos como un satélite dedicado a la observación espacial la carga útil podría ser un arreglo de cámaras o sensores. [Ippolito Louis, 2017].

Como se mencionó la carga útil depende de la misión que el satélite llevara a cabo, pero los subsistemas que pertenecen al bus son aquellos que no pueden faltar en un satélite grande, ya que es importante mencionar que para satélites pequeños, como lo puede ser un CubeSat muchos de estos subsistemas no son requeridos ni fácil de implementar debido al tamaño que estos manejan. Es importante enfatizar en las funciones que realiza cada subsistema del bus, a continuación se describe su funcionamiento de cada subsistema:

1. Estructura física.

La estructura física es la encargada de proveer al satélite un lugar donde se puedan almacenar todos los subsistemas del satélites. Además, es el encargado de proveer estabilidad y proteger al satélite del ambiente espacial [[Angelo, 2006](#)].

2. Control de energía

La energía eléctrica para operar los equipos de un satélite de comunicaciones se obtiene principalmente de células solares, que convierten la luz solar incidente en energía eléctrica. Es el subsistema encargado de proveer energía eléctrica al satélite [[Pelton, 2012](#)].

3. Control de posición.

El control de posición es necesario para mantener una orientación en el espacio respecto a la tierra. Este subsistema es necesario para que la comunicación con la base terrestre sea eficaz, ya que muchas veces las antenas que los satélites tienen necesitan vista directa con la tierra.

4. Control de orbita [[Pelton, 2012](#)].

Subsistema encargado de mantener al satélite en la orbita la que pertenece.

5. Control térmico.

Durante el trayecto que realiza un satélite, se enfrenta a periodos prolongados de temperaturas extremas, lo cual puede dañar algún subsistema, es por eso que debe de existir un control de esta temperatura, por ello la existen del control térmico [[Pelton, 2012](#)].

6. Control de seguimiento.

El control de seguimiento consiste en determinar la orbita, posición y el movimiento actual del satélite [[Eickhoff, 2012](#)].

7. Telemetría.

Este subsistema se encarga de la recolección de los datos proveniente de los sensores a bordo del satélite, además de la transmisión de estos mismos a la estación terrestre [[Angelo, 2006](#)].

8. Comando y monitoreo.

Este subsistema es complementario al mencionado anteriormente, ya que es el encargado de transmitir controles y operaciones especificas desde la tierra hasta el espacio [[Ippolito Louis, 2017](#)].

9. Computadora a bordo.

Este subsistema es probablemente el mas relevante dentro de un satélite, debido a que cumple con las funciones de control y gestión dentro del sistema completo, es por ello que la OBC debe de ser tolerable a fallos y siempre tener un plan alternativo si en algún momento llegara a fallar un subsistema del satélite [[Fortescue et al., 2003](#)]. De igual manera en la sección 8.4, se habla más a

sobre el subsistema de la OBC.

Una vez analizados los subsistemas más generales que un satélite puede tener, nos centraremos en el estándar CubeSat que a grandes rasgos y según el autor [de Souza et al. \[2023\]](#) podemos encontrar 5 bloques o subsistemas principales: comunicaciones, carga útil, sistema de energía eléctrica (EPS), Sistema de determinación y control de actitudes (ADCS) y la computadora a bordo (OBC) [[de Souza et al., 2023](#)]. La figura 6 muestra los subsistemas que integran a un nanosatélite tipo CubeSat.

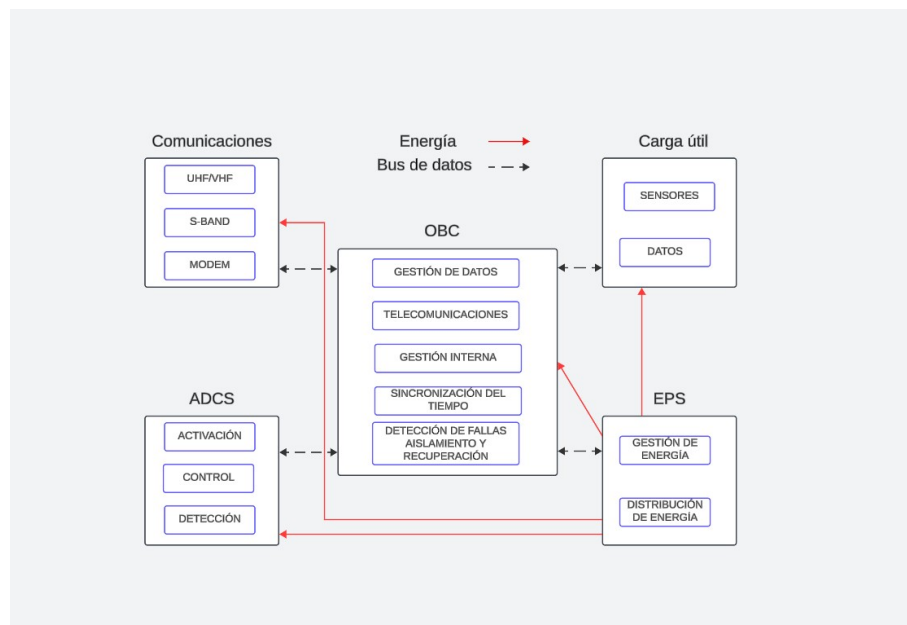


FIGURA 6. Diagrama a bloques de un nanosatélite CubeSat [[de Souza et al., 2023](#)]

Como se pueden observar en la figura 6, cada módulo de un satélite CubeSat está integrado por diversas funciones, por ejemplo podemos ver que la OBC realiza funciones como: gestión de datos, telecomunicaciones, gestión interna, sincronización de tiempo y detección de fallas. Podemos concluir que uno de los sistemas más importantes de un nanosatélite tipo CubeSat es la OBC ya que principalmente se encarga de la gestión y manipulación de los datos de todo el satélite.

8.4. Computadora a bordo.

Un componente crucial de un CubeSat es la computadora de a bordo (OBC), que aloja el software de la misión y supervisa todas las actividades del CubeSat. La OBC es la responsable de tomar decisiones importantes, monitoreo de los otros subsistemas y facilitar la capacidad de vuelo. Podemos encontrar que los principales componentes de la OBC son: procesador, memoria, interfaces de comunicaciones,

interfaces de servicio y un depurador [de Souza et al., 2023]. La OBC por estándar requiere un voltaje de entre 3.3V, en ciertas ocasiones ciertos componentes requieren de 5V [Europe, 2017]. El procesador debe de ser capaz de comunicarse con los otros subsistemas mediante buses de datos, manejar la distribución de energía en todo el satélite y en ocasiones dependiendo de la misión de la OBC existirán sensores especial. A continuación se desglosara de manera más específica lo que realiza cada subsistema de la OBC.

1. Procesador

Este componente es el cerebro de la OBC. Es el encargado de ejecutar las instrucciones del software y realizar los cálculos para el control y la gestión de las funciones del sistema. El procesador puede ser de diversos tipos y velocidades, dependiendo de los requisitos de la misión [de Asís López Fuentes, 2015].

2. Memoria

Es el componente donde se almacenan temporalmente los datos y las instrucciones que necesita el procesador para ejecutar tareas o para el almacenamiento de algún dato recabado por algún subsistema. Existen principalmente 2 tipos de memorias la memoria RAM (Random Access Memory), la cual se utiliza para almacenar datos de forma temporal mientras el sistema está en funcionamiento, y la memoria flash que se utiliza para almacenar de manera permanente el software del sistema y otros datos importantes que se deben conservar, incluso cuando exista un corte de corriente para la OBC [Eickhoff, 2012].

3. Interfaz de comunicación

Estas interfaces permiten que la OBC se comunique con otros subsistemas o dispositivos externos. Esto incluye puertos serie, puertos USB, puertos Ethernet y otros protocolos de comunicación como lo son I2C (Inter-Integrated Circuits) o SPI (Serial Peripheral Interface). Las interfaces son cruciales para el intercambio de datos entre los subsistemas del satélite [Europe, 2017].

4. Debug e interfaces de servicio

Estas interfaces proporcionan herramientas para la depuración y el mantenimiento de la OBC. Pueden incluir puertos de depuración para conectarse a un ordenador de desarrollo y realizar pruebas de software, así como interfaces de gestión remota para monitorizar el estado del sistema y realizar actualizaciones de software de forma remota [de Souza et al., 2023].

9. ESCENARIO DE PRUEBAS

Dado que es imposible acceder a un satélite en operación para probar el prototipo que aquí se busca desarrollar en un ambiente realista de operación, donde se recurre al concepto de *FlatSat* (satélite plano), que pretende validar las funcionalidades de un sistema espacial (satelital) en un entorno de escritorio, donde se disponen los elementos que lo componen, se interconectan y prueban [Reilly et al., 2022]. En la sección 8 se habla mas a fondo del concepto FlatSat.

Así, la OBC aquí desarrollada se probará en disposición parcial *FlatSat*, en cuyos buses de entrada se insertarán los flujos de datos y señales que se hayan levantado en los requerimientos como necesarios y suficientes para que sean gestionados por esta OBC (es decir, a qué subsistemas satelitales se les dará soporte). Posteriormente se conectarán en los buses y puertos de salida los elementos necesarios y suficientes, diversos equipos de medición eléctrica, así como puertos serie/usb o los que se determinen suficientes y necesarios que permitan verificar los flujos de información esperados después de su gestión y procesamiento por la OBC.

Bajo este contexto, los subsistemas satelitales que sean determinados en los objetivos, serán emulados por una computadora en la cual se ejecutará la IDE. La computadora se conectará a los buses de entrada - salida de la OBC mediante los cuales interactuará.

Adicionalmente, la fase de pruebas/validación permitirá, desde las simulaciones, establecer las métricas de procesamiento, almacenamiento, tamaño de buses, entre otros, de la OBC desarrollada, y se corroborarán en el prototipo físico. Esto permitirá describir de manera resumida las características del prototipo realizado, como en un datasheet, lo que permitirá al usuario final utilizarlo con mayor facilidad.

A continuación en la figura 7 se muestra en un diagrama a bloques, el flujo de trabajo que se llevará a cabo para las pruebas. No se omite mencionar que los flujos de entrada de cada subsistema se probarán primero de manera unitaria (uno a uno) y luego en combinaciones de ellos de manera simultanea, lo que simularía un entorno de operación más cercano al real.

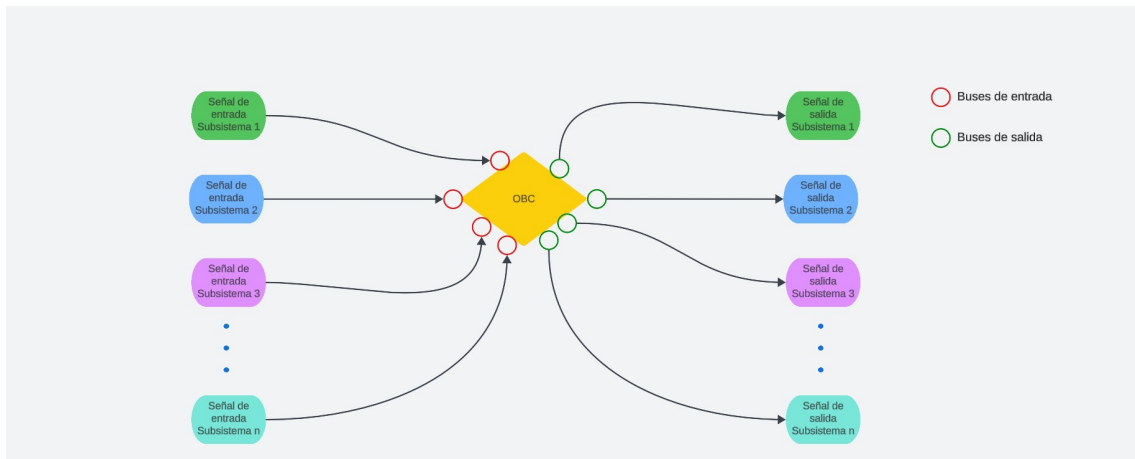


FIGURA 7. Diagrama a bloques del flujo de trabajo para las pruebas de la OBC.

10. CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

TABLA 3. Actividades por realizar en Proyecto Terminal I.

No.	Nombre de la actividad	Objetivo	Responsable	Resultados esperados
1	Investigación de conceptos espaciales	Reforzar los conceptos básicos en el tema espacial, tales como: espacio, satélites naturales, satélites artificiales y órbitas.	Alumno 1	Adentrarse en el lenguaje tecnológico para seguir la investigación previa a la construcción de la OBC.
2	Investigación de tecnología espacial	Observar la clasificación de satélites por objetivo de misión espacial y por magnitud de masa.	Alumno 2	Conocer principalmente las especificaciones de un nanosatélite de 1U.
3	Investigación de computadora a bordo	Enriquecer el conocimiento de que es una OBC, la manera en que está diseñada, módulos que la integran y su funcionamiento.	Alumno 1	Comprender lo que conlleva el construir una OBC para la realización de esta.
4	Búsqueda de las distribuciones de cómputo	Comparar las distribuciones que tiene una computadora para saber en cuál se puede basar nuestra OBC.	Alumno 2	Caracterizar la distribución a usar.
5	Búsqueda de las arquitecturas de cómputo	Comparar las arquitecturas de una computadora para saber cuáles pueden funcionar en la OBC.	Alumno 1	Caracterizar una arquitectura de cómputo para seguir en la búsqueda de la arquitectura a pequeña escala.
6	Búsqueda de las arquitecturas a pequeña escala	Comparar las arquitecturas a pequeña a escala para saber cuál podría ser más óptima a implementar en el nanosatélite	Alumno 2	Caracterizar la arquitectura a usar.
7	Investigación de los subsistemas de soporte del satélite.	Conocer de que se encarga cada subsistema del satélite para delimitar cuáles se van a implementar.	Alumno 1	Establecer los subsistemas a diseñar para la OBC.
8	Requerimientos funcionales y no funcionales	Determinar los requerimientos funcionales y no funcionales con los cuáles contará la OBC, ya que estos son clave para la especificación.	Alumno 2	Trabajar en cómo se van a implementar estos requerimientos.

No.	Nombre de la actividad	Objetivo	Responsable	Resultados esperados
9	Diseñar el sistema de la OBC	Realizar el diseño de los módulos, sistema y subsistemas que van a componer nuestra OBC, mediante diagramas de bloque.	Alumno 1 Alumno 2	y Obtener el diseño que se va a construir.
10	Elegir la arquitectura electrónica a utilizar	Buscar las arquitecturas electrónicas y comparar cuál se ajusta a la necesidad de la OBC para realizar la elección de componentes COTS	Alumno 1 Alumno 2	y Tener la decisión ya tomada de la arquitectura electrónica a utilizar.

Actividad No.	2024																					
	Agosto					Septiembre				Octubre				Noviembre				Diciembre				
	S1	S2	S3	S4	S5	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12	S13	S14	S15	S16	S17	S18	S19	S20	S20
Desarrollo de PT I																						
1																						
2																						
3																						
4																						
5																						
6																						
7																						
8																						
9																						
10																						
Redacción de capítulos																						
Metodología																						
Estado del Arte																						
Marco Teórico																						
Análisis																						
Diseño																						

REFERENCIAS

- Alonso, R. S. (2022). Desarrollo del modelo de ingeniería del subsistema de observación espacial de baja resolución para un nanosatélite mexicano.
- Angelo, J. A. (2006). *Encyclopedia of space and astronomy*. Facts on file.
- Buchen, E. (2014). Spaceworks' 2014 nano/microsatellite market assessment. *28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*.
- C3S ELECTRONICS DEVELOPMENT LLC (2021). C3s obc data sheet, v01 - 05/01/2022. Technical Report C1, C3S ELECTRONICS DEVELOPMENT LLC.
- Capderou, M. (2005). *Satellites Orbits and Missions*. Springer.
- Cappelletti, C., Battistini, S., and Malphrus, B. (2020). *CubeSat Handbook: From Mission Design to Operations*. Elsevier Science.
- Cho, M., Lepcha, P., Yamauchi, T., and Masui, H. (2023). Testing standard for lean satellite constellations. volume 2023-October. Cited by: 0.
- Cho, M., Tsuruda, Y., Furumoto, M., Miyata, K., Kitazawa, Y., and Kuwahara, T. (2022). Mission assurance handbook for university-based lean satellites. volume 2022-September. Cited by: 0.
- Consultative Committee for Space Data Systems (2003). Telemetry channel coding. Technical Report CCSDS 132.0-B-1, CCSDS.
- D L Sánchez-Cabadas, G A Yáñez-Casas, J. J. H.-G. and Couder-Castañeda, C. (2022). A cluster based on 8 bit, flash based architecture microcontrollers. *Conference Series*, pages 1–13. Cited by: 0.
- de Asís López Fuentes, F. (2015). *Sistemas distribuidos*. Universidad Autónoma Metropolitana.
- de Carvalho, R., Estela, J., and Langer, M. (2020). *Nanosatellites: Space and Ground Technologies, Operations and Economics*. Wiley.
- de Souza, K., Bouslimani, Y., Ghribi, M., and Boutot, T. (2023). On-board computer and testing platform for cubesat development. *IEEE JOURNAL ON MINIATURIZATION FOR AIR AND SPACE SYSTEMS*, VOL. 4, NO. 2.
- Duarte, C. (2016). CubeSats: la gran oportunidad para el acceso al espacio. *Hacia el Espacio*, pages 1–1. Cited by: 0.
- Eickhoff, J. (2011). *Onboard computers, onboard software and satellite operations: an introduction*. Springer Science & Business Media.
- Eickhoff, J. (2012). *Onboard Computers, Onboard Software and Satellite Operations An introduction*. Springer.

-
- Elmasri, R. and Navathe., S. B. (2016). *Fundamentals of Database Systems*. Pearson.
- EnduroSat (2024). Endurosat - class-leading satellites & space. <https://www.endurosat.com>. En línea. Visitado en Mayo 10, 2024.
- Europe, U. (2017). Cubesat subsystem interface definition: Csid (proposal) (v 1.0). Visitado en Marzo 8, 2024.
- Fortescue, P., Swinerd, G., and Stark, J. (2011). *Spacecraft Systems Engineering*. Wiley.
- Fortescue, P. W., Stark, J., and Swinerd, G. (2003). Spacecraft system design. In *Spacecraft Systems Engineering*, chapter Onboard Data Handling, pages 109–153. Wiley, Chichester, UK, 3rd edition.
- Gordon, G. D. and Morgan, W. L. (1993). *Principles of Communications Satellites*. Wiley.
- Heath, S. (2002). *Embedded Systems Design*. Newnes.
- Hennessy, J. L. and Patterson, D. A. (2017). *Computer Architecture: A Quantitative Approach*. Elsevier.
- Ippolito Louis, J. (2017). *Satellite Communications Systems Engineering - Atmospheric Effects, Satellite Link Design and System Performance*. Wiley.
- Johnstone, A. (2020). *CubeSat Design Specification Rev. 14*. The CubeSat Program, Cal Poly SLO.
- Maral, G. and Bousquet, M. (2009). *Satellite Communication Systems*. Wiley.
- McConnell, S. (2004). *Code Complete: A Practical Handbook of Software Construction*. Microsoft Press.
- Murthy, C. K. M. and Moorthi., S. M. (2016). *Power Management Techniques for Integrated Circuit Design*. Springer.
- Mújica Chigo, E. and Acevedo Reyes, M. A. (2019). Proyecto odiseo: caracterización de módulos que pertenecen a un nanosatélite y desarrollo del software de una estación terrena. *Unidad Profesional Interdisciplinaria en Ingeniería y Tecnologías Avanzadas*.
- National Aeronautics and Space Administration (2017a). Cubesat101 basic concepts and processes for first-time cubesat developers. *NASA CubeSat Launch Initiative*.
- National Aeronautics and Space Administration (2017b). One web satellites ground breaking. https://images.nasa.gov/details/KSC-20170316-PH_KLS01_0007. En Línea; Visitado en Marzo 31, 2024.
- Núñez, D. G. (2019). Desarrollo de un sistema de percepción remota para un nanosatélite tipo cubesat.
- Pelton, J. N. (2012). *Satellite Communications*. Springer.
- Peter Fortescue, John Stark, G. S. (2002). *Spacecraft Systems Engineering*. Wiley.
- Plaisant, G. O. (2014). Elefante blanco: Un nuevo medio de periodismo y divulgación de las ciencias espaciales. *XX Congreso Nacional de Divulgación de la Ciencia y de la Técnica, Morelia, Michoacán*,

pages 1–2.

Project, L. S. (2017). About lean satellites. Technical report, Lean Satellite Project.

Reilly, J., Murphy, D., Doyle, M., Walsh, S., Akarapu, S. K., De Faoite, D., Dunwoody, R., Erkal, J., Finneran, G., Mangan, J., et al. (2022). EIRFLAT-1: A FlatSat platform for the development and testing of the 2U CubeSat EIRSAT-1. In *4th Symposium on Space Educational Activities*. Universitat Politècnica de Catalunya.

Riebeek, H. (2009). Catalog of earth satellite orbits. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog>. Visitado en Marzo 31, 2024.

Sandau, R. (2010). *Small Satellite Missions for Earth Observation*. Springer.

Sebastian, K. A. (2023). Ucs satellite database. http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/space_weapons/technical_issues/ucs-satellite-database.html. Visitado en Marzo 10, 2024.

Space, B. and Technology (2020). Smallsats by the numbers 2020.

Spacemaniac (2024). Comunicación personal. Información obtenida por correo electrónico.

Stallings, W. (2015). *Computer Organization and Architecture: Designing for Performance*. Pearson.

Techterms (2019). Gui. <https://techterms.com/definition/gui>. En Linea; Visitado en Mayo 14, 2024.

Tomasi, W. (2003). *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*. Pearson Educación.

Uri, J. (2022). 65 years ago: Sputnik ushers in the space age. Visitado en Abril 7, 2024.

Wertz, J. R., Everett, D. F., and Puschell, J. J. (2011). *Space Mission Engineering: The New SMAD*. Microcosm Press.

Wright, M. (2008). Lunar reconnaissance orbiter flat sat. Technical Report NASA Technical Report 20080040717, NASA Goddard Space Flight Center.

Yost, B. and Weston, S. (2024). State-of-the-art small spacecraft technology. Technical report.