

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE ELECTROTECNIA



CÁMARA FOTOGRÁFICA PARA PEHUENSAT III

Proyecto Integrador Profesional presentado por

MACHT, LUCAS EDGARDO

Ante la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue para acceder al
título de

INGENIERO ELECTRÓNICO

Director:

Dr. Araoz, Marcelo Fabián

Neuquén, 23/04/2026

Agradecimientos

A lo largo de este increíble camino de enseñanzas, desafíos y crecimiento fueron muchísimas las personas que formaron parte de este camino en distintos momentos y circunstancias, siendo apoyo, compañía y soporte. A todos ellos, mis más sinceros agradecimientos.

A Marcelo, que en esta oportunidad me acompañó a realizar este proyecto, pero con quien tengo la suerte de tenerlo como profesor y guía desde hace varios años, en lo personal y lo académico. Por su dedicación y compromiso hacia todos los que formamos parte de esta carrera y de la Facultad de Ingeniería.

Al Dr. Jorge Lassig y a Agustín Lizarraga, por su desinteresada ayuda para realizar las pruebas a altas temperaturas del proyecto.

Al Tec. Eduardo Benotti y al Dr. Ceferino Steimbregger, por brindarme el espacio y la guía para realizar las pruebas a bajas temperaturas.

A la Dra. Laura Fernández, por guiarme y prestar el espacio para realizar las pruebas de vacío.

A mi familia: padres, hermanos y abuela. Por haber sido mi soporte y mi compañía durante estos años de carrera.

A mi novia, Sofía. Por haber sido mi compañera de estudio a cualquier hora, día y situación. Brindándome su apoyo en las buenas y en las malas.

A mis amigos. Por haberme permitido transitar, compartir y crecer junto a ellos en esta etapa.

Índice

Agradecimientos	2
1. Introducción.....	5
1.1 Contexto general del proyecto Pehuensat III	5
1.2 Procesos de despliegue de antenas y contrapeso	8
1.3 Propósito y funciones de una cámara fotográfica en la misión	10
1.4 Objetivos generales del proyecto	11
1.5 Metodología para la realización	11
1.5.1 Fases del proyecto	11
1.6 Estructura del documento	12
2. Fundamentos técnicos	13
2.1 Misiones CubeSat.....	13
2.2 Parámetros orbitales	14
2.3 Órbita LEO	16
2.3.1 Parámetros orbitales	16
2.3.2 Condición de vacío: características y afectaciones físicas	16
2.3.3 Condiciones de temperatura: características y afectaciones físicas	17
2.3.4 Condiciones de radiación: características y afectaciones físicas ..	18
2.4 Comunicaciones por vía inalámbrica en entorno espacial	19
2.4.1 Comunicaciones inalámbricas bajo estándares Wi-Fi	19
2.4.2 Propagación de las ondas	19
2.5. Modelo OSI	20
2.6 Baterías de Litio	22
2.7 Estándar JPEG.....	24
2.8 Parámetros de imagen	25
3. Diseño e implementación	28
3.1 Requisitos de diseño.....	28
3.2 Elección de cámara	30
3.3 Pruebas iniciales e integración hardware-software	32
3.4 Diseño e implementación del sistema de comunicaciones con la computadora de abordo	37

3.4.1 Elección de tecnología de transmisión inalámbrica.....	37
3.4.2 Elección de protocolo de comunicaciones	39
3.4.3 Flujo de trabajo para transmisión.....	39
3.4.5 Configuración de comunicaciones en microcontrolador	41
3.5 Proceso de captura de imagen: hardware y software.....	41
3.5.1 Hardware.....	41
3.5.2 Software.....	43
3.6 Tratamiento de imágenes.....	44
3.7 Gestión de la energía	45
3.8 Encendido mecánico, encapsulado y blindaje	52
3.8.1 Encendido mecánico: diseño y consideraciones	52
3.8.2 Radiación: como afecta y protección.....	53
3.8.3 Temperatura: como afecta y protección.....	54
4. Verificación funcional, pruebas experimentales y resultados	56
4.1 Enfoque adoptado para las pruebas.....	56
4.2 Pruebas funcionales de transmisión de imagen	56
4.3 Pruebas funcionales de consumo de corriente en distintos modos de operación.....	58
4.4 Pruebas en condiciones espaciales simuladas, armado del conjunto en contrapeso y encendido mecánico.....	60
4.4.1 Pruebas bajo condiciones de temperatura.....	61
4.4.2 Pruebas de transmisión con el conjunto ensamblado en contrapeso	66
4.4.3 Pruebas bajo condiciones de vacío.....	67
5. Conclusiones.....	70
6. Bibliografías.....	73
Anexos	75
Anexo A: Fotografías capturadas durante pruebas iniciales	75
Anexo B: Código programado en la placa cámara XIAO ESP32S3-Sense.....	78

1. Introducción

1.1 Contexto general del proyecto Pehuensat III

El satélite Pehuensat III es un proyecto de investigación, diseño y desarrollo de una misión espacial enmarcada dentro del estándar satelital de categoría pico 1U [1]. Se lleva a cabo de manera íntegra por alumnos y docentes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, específicamente de las carreras de Ingeniería Electrónica e Ingeniería Mecánica.

El proyecto Pehuensat se apoya en más de 20 años de experiencia que ha tenido la Universidad Nacional del Comahue en cuanto a desarrollos similares. Dentro de ellos se destaca el diseño y desarrollo del Pehuensat I junto al posterior diseño del satélite Pehuensat II.

La finalidad de la misión es la de operar como un servidor en órbita de información provista por sensores del tipo IoT (*Internet of Things*/Internet de las Cosas) dentro del territorio argentino. Se destinará y dará prioridad de uso a instituciones públicas que busquen llevar a cabo proyectos satelitales y para particulares que cuenten con mediciones en lugares remotos y con dificultad para comunicarse. En la figura 1.1 se muestra un despiece de los componentes principales de este.

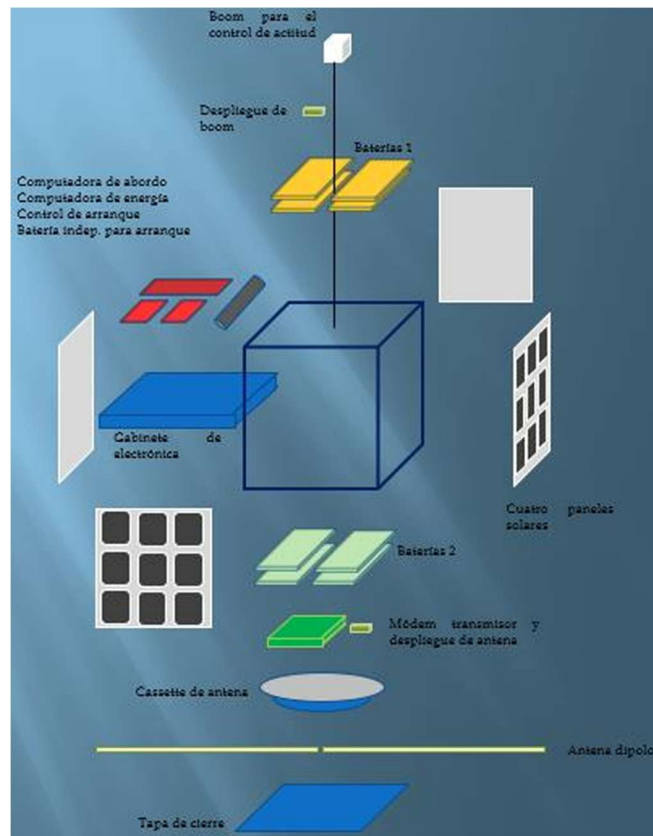


Figura 1.1: Despiece del satélite con todos sus componentes internos. Reproducida de [1].

El satélite tendrá una órbita LEO del tipo polar, alcanzando una altura de entre 400 y 600 km. La altura final estará determinada por la misión que se encargará de llevar al satélite hacia el espacio, la cual es ajena e independiente al proyecto en sí.

Una de las misiones específicas del Pehuensat será realizar un control pasivo de actitud de este. Para ello se despliega un contrapeso, que se separa del cuerpo principal sujeto a una cinta metálica y a una distancia de un metro. Por cuestiones inerciales mecánicas, se produce un equilibrio de fuerzas que mantienen al satélite en posición normal hacia la tierra.

Una vez ingresado en órbita, el satélite se valerá de dos sensores y del estado de las celdas solares para determinar cuál es el momento ideal para comenzar el despliegue del contrapeso.

Los sensores mencionados medirán el nivel de radiación infrarroja. Estarán ubicados en caras opuestas, estando uno de ellos colocado en la misma superficie desde donde será expulsado el contrapeso. En las circunstancias para

las cuales el sensor ubicado próximo al contrapeso reciba mayor energía que su opuesto, junto a que en las celdas solares se esté recibiendo energía, estarán dadas las circunstancias ideales para el despliegue del contrapeso y la computadora de abordo ordenará el inicio de esta acción. Cuando esto suceda, se encontrará con las condiciones de la figura 1.2: sistema de antenas orientado hacia la superficie terrestre, cara opuesta hacia el cenit.

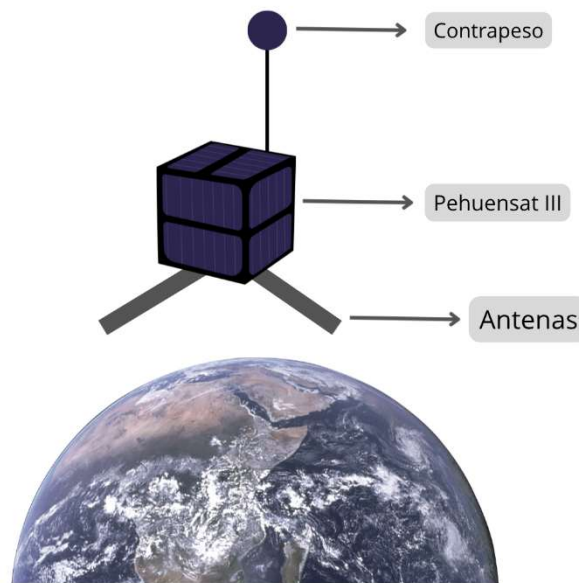


Figura 1.2: Diagrama ilustrativo de la orientación del cuerpo del satélite, el contrapeso y las antenas con respecto a la superficie terrestre en condiciones ideales.

La estación terrena, encargada de recibir los datos de posicionamiento del satélite y la información compartida por los usuarios del servicio, estará ubicada en el predio de la Universidad Nacional del Comahue. La comunicación con ella se llevará a cabo mediante una antena tipo dipolo ubicada en la cara opuesta a la del contrapeso, la cual viajará contenida en un compartimento y se desplegará cuando se establezca completamente el satélite.

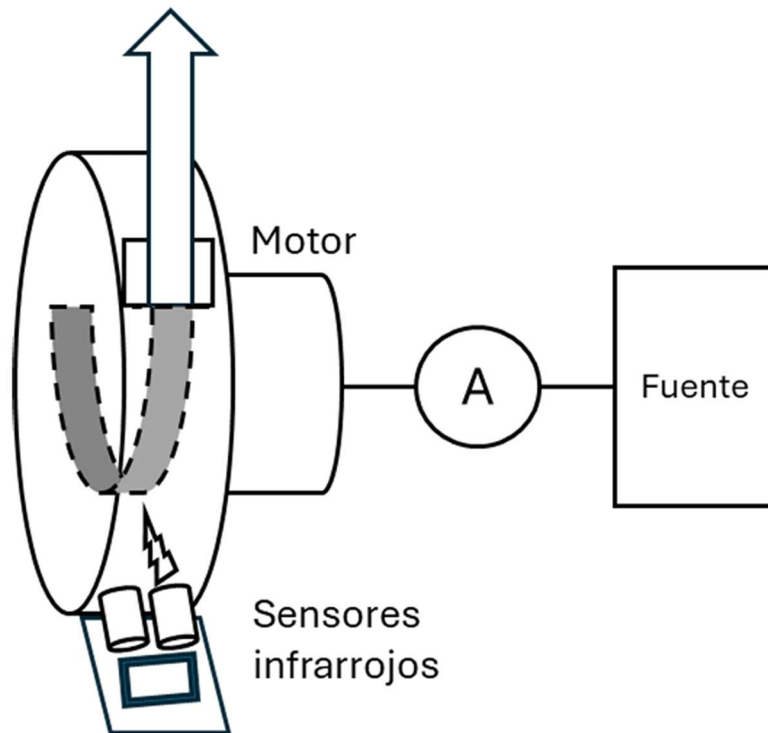
Todos los subsistemas, salvo la cámara fotográfica, podrán ser alimentados mediante baterías recargables que viajarán en el interior del cuerpo del satélite. La recarga será comandada mediante la computadora de energía, usando como fuente de energía un arreglo de celdas solares dispuestas en las caras exteriores del satélite.

1.2 Procesos de despliegue de antenas y contrapeso

En primera instancia, se liberará el contrapeso. Este estará contenido en un compartimento metálico junto con la cinta que lo une. Una vez dada la orden, se encenderá un motor de corriente continua conectado a la computadora de energía que permitirá que esta se desenrolle mientras sale expulsada del compartimento.

Para verificar el correcto despliegue del contrapeso, se contará con un sensor digital ubicado en el extremo que mantiene unidos al contrapeso con el cuerpo del satélite. Dicho sensor emite un haz de luz infrarrojo, el cual será absorbido por el material metálico de la cinta. Sobre el final del recorrido, la cinta tendrá un revestimiento de pintura negra, generando un reflejo en el haz e indicando de esta manera que ha llegado al tope.

De manera complementaria al sensor digital para el despliegue del contrapeso, habrá un sensor de corriente colocado entre la alimentación del motor y el sistema de energía. Este añadirá información sobre el estado actual de despliegue o alguna otra situación anormal a partir de los valores de corriente medidos en el tiempo. Si existiese algún valor de corriente elevado, antes del tiempo previsto que se tiene calculado para que llegue al final del despliegue, indicaría que ocurrió algún bloqueo o detención en el recorrido.



*Figura 1.3: Diagrama esquemático de despliegue y final de carrera del contrapeso.
Reproducida de [2].*

Las antenas consisten en cintas de acero al carbono de 16 centímetros de largo cada una. El compartimento que las almacena se mantiene cerrado gracias a un cordón de nylon. Al dar el comando de apertura, una corriente circulará por una resistencia que estará en contacto con el hilo y lo cortará debido a la elevada temperatura en el punto de contacto. Por acción de la energía elástica acumulada, las antenas se desplegarán de manera autónoma sin requerir ningún accionamiento adicional como en el caso de la antena.

Un switch eléctrico normal cerrado se encuentra en la estructura del boom haciendo contacto contra la estructura del satélite. Al desplegarse el boom, el switch vuelve a su posición original y se cierra el circuito que alimenta la cámara fotográfica con unas baterías propias.

La detección del despliegue de las antenas estará a cargo de un haz de luz infrarrojo, el cual será reflejado por la pintura en ellas. Mientras estén almacenadas se recibirá el haz de luz, cuando se desplieguen el haz será absorbido por el material del cuerpo del satélite y se recibe la señal de que abandonaron el compartimento.

Tanto el estado de despliegue de las antenas y del contrapeso, como la posición angular final del satélite son información de suma importancia para el éxito de la misión. Un incorrecto despliegue de las antenas al igual que una orientación final distinta a la esperada obligará a realizar un aumento en la potencia de transmisión de la estación terrena junto con ajuste en la sensibilidad del receptor del satélite, con la finalidad de establecer en enlace de comunicaciones a pesar de estas dificultades. La duración total de la misión dependerá en gran medida del posicionamiento que tendrán las celdas solares, ya que permitirá mayores ciclos de recargas en función del tiempo efectivo al cual estará recibiendo energía de los rayos solares.

1.3 Propósito y funciones de una cámara fotográfica en la misión

Si bien se cuenta con métodos para detectar el estado de los despliegues de ambos sistemas y la posición angular del satélite, por el hecho de ser sensores indicativos de dos estados, resultan insuficientes para tener un panorama completo del estado final de ellos. De aquí surge la necesidad de incorporar un método adicional para sumar más información de gran importancia para la misión. Para ello, se propone colocar una cámara fotográfica en el interior del contrapeso, con línea de vista hacia el cuerpo del satélite. Esto permitirá visualizar de manera clara en que posición angular se encuentra el satélite con respecto a la superficie terrestre, que tan alejado está el contrapeso del cuerpo y que posición adopta, junto con el despliegue final de las antenas.

Con respecto a la fotografía capturada, esta una vez tomada se enviará como archivo a la computadora de abordo. La imagen se almacenará en la memoria interna de esta última, a la espera de que el satélite tenga línea de vista con la estación terrena y permita la transferencia de información. El alcance del proyecto cubre hasta el envío del archivo fotográfico a la computadora de abordo, por lo que los protocolos empleados para la transmisión hacia la estación terrena, así como metodologías de almacenamiento y compresión escapan a la realización del proyecto.

1.4 Objetivos generales del proyecto

Este proyecto tiene por primer objetivo tomar una fotografía del satélite Pehuensat III desde la posición del contrapeso, de manera que permita visualizar el despliegue de las antenas y de la posición angular final de la misión una vez estabilizado. La calidad de dicha fotografía debe ser lo más baja posible, para permitir que el envío se pueda llevar a cabo en el menor tiempo.

El segundo objetivo es lograr que la electrónica asociada a la cámara fotográfica y su alimentación funcione durante, al menos, un mes en condiciones espaciales adversas: rango térmico entre -40°C y 150°C y radiación cósmica.

1.5 Metodología para la realización

Para su realización, se hará una investigación sobre modelos comerciales de cámaras integradas u optimizadas para microcontroladores y sus condiciones físicas. Luego, se procurará la captura y transmisión de fotografías hacia la computadora de abordo, con la premisa de obtener la mejor relación entre tamaño final de archivo y calidad de ella, debido a las limitantes de ancho de banda que presenta el sistema de comunicaciones con la estación terrena. Por último, se le realizarán pruebas de desempeño en cuanto a consumo energético y a como afectarán a estos las condiciones espaciales.

1.5.1 Fases del proyecto

Las fases del proyecto a desarrollar son:

1. Implementar un modelo de cámara comercial integrado para la captura y transmisión inalámbrica de archivos fotográficos.
2. Implementar un conjunto de baterías que permita la duración de al menos un mes, desde su primer encendido, del sistema de cámara.
3. Lograr una fotografía de una calidad tal que permita una definición aceptable, de manera que se logre visualizar el satélite, sus partes, orientación angular con respecto a la superficie terrestre, estado de despliegue de antenas y contrapeso.
4. Lograr una fotografía de una calidad que, además de considerar el punto anterior, permita la descarga del archivo en su totalidad desde el satélite

hacia la estación terrena en hasta 10 pasadas con línea de vista. Para ello, se puso el límite de 30 kB de tamaño final de archivo.

5. Realizar mediciones y comparar los valores de consumo de energía que presenta el sistema de cámaras en los modos de transmisión, captura, procesamiento y bajo consumo. Comparar los consumos informados por el fabricante con los obtenidos en los ensayos.
6. Realizar mediciones de consumo y pruebas en condiciones de vuelo. Encerrado en el contrapeso, con línea de vista hacia la computadora de abordaje y a la distancia máxima a la que se encontraran estos dos en la misión.
7. Llevar a cabo ensayos del conjunto en condiciones de temperatura y vacío lo más cercanas posibles a las que habrá en la misión.

1.6 Estructura del documento

En el capítulo 2 se recopilan los fundamentos teóricos y técnicos sobre los cuales se lleva a cabo el proyecto, tanto para la misión satelital como para el sistema de comunicaciones, energía y los procesos propios de la captura de la imagen.

En el capítulo 3 se pone de manifiesto todo el proceso de realización del proyecto. Se detallan los requisitos particulares de la misión y las soluciones implementadas para resolver las problemáticas del proyecto.

En el capítulo 4 se muestran los resultados de las pruebas, se explica cómo se llevaron a cabo y que consideraciones se tuvieron para su realización.

Finalmente, en el capítulo 5, se discuten los resultados de las distintas pruebas experimentales. Se concluyen a partir de ellos, de todo lo expuesto y llevado a cabo a lo largo del proyecto, además de explorar posibilidades de mejora a futuro para el sistema de cámaras.

2. Fundamentos técnicos

2.1 Misiones CubeSat

El primer desarrollo de este tipo de tecnología para misiones espaciales nace de un trabajo conjunto de dos universidades [3]. En el año 1999 Jordi Puig-Suari, profesor en California Polytechnic State University junto a Bob Twiggs, profesor en Stanford University's Space Systems Development Laboratory, iniciaron este proyecto con la finalidad de proveer un medio económico accesible a las misiones espaciales. Además de universidades, tanto agencias gubernamentales como instituciones educativas de todos los niveles supieron aprovechar los beneficios del proyecto, gracias a que supone una barrera de acceso baja en cuanto a costos para la realización de estas actividades. Se estima que, hasta abril de 2025, se han lanzado y entrado en órbita más de 2500 misiones de este tipo [4].

El estándar consiste en un cubo de 10 cm x 10 cm x 10 cm de dimensiones y un peso total, incluyendo cargas útiles, de 1,33 kg [4]. Este estándar se denomina "1U". A partir de este, se establecen los estándares de mayor tamaño y peso total, tales como "1,5U", "2U", "3U" y demás, respondiendo a cuantas unidades por encima del estándar original se van a implementar.

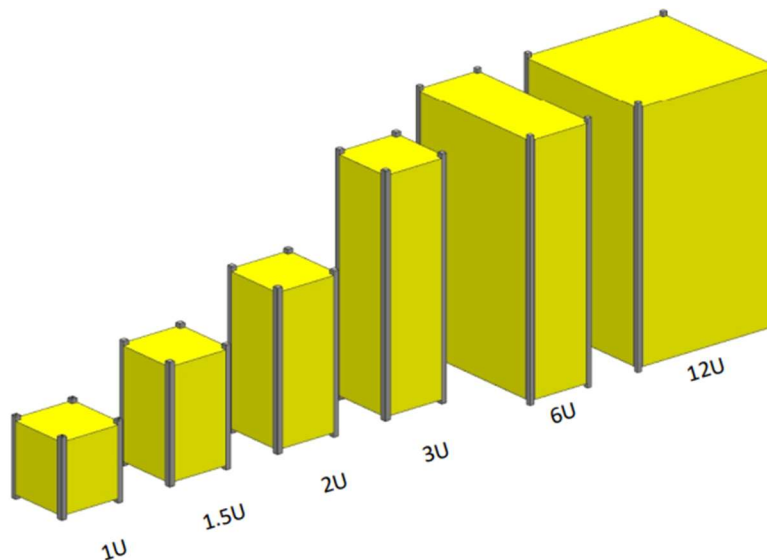


Figura 2.1. Representación cualitativa de los distintos tamaños del estándar CubeSat y comparativa entre ellos. Reproducida de [3].

2.2 Parámetros orbitales

Dentro de lo que se considera como parámetros orbitales ideales, sin ningún tipo de perturbación, existen seis de ellos definidos como característicos o keplerianos que clasifican a la trayectoria de la órbita. Estos en su mayoría toman como base los parámetros característicos con los cuales se clasifican a las elipses y son:

- **Semieje mayor (a):**
 - Marca la distancia del semieje mayor de la órbita elíptica con respecto al centro de la Tierra.
- **Excentricidad (e):**
 - Define la forma de la órbita.
 - $e=0$ órbita circular.
 - $0 < e < 1$ órbita elíptica.
 - $e=1$ órbita parabólica.
- **Inclinación (i):**
 - Ángulo de inclinación del plano que contiene a la órbita con respecto al plano ecuatorial.
- **Nodos ascendente y descendente:**
 - Son los puntos de la órbita en los cuales el satélite pasa a estar por encima y por debajo del plano ecuatorial.
 - Geométricamente son los puntos extremos de la línea que interseca al plano orbital con el plano ecuatorial.
 - El nodo ascendente es en el cual el satélite pasa a estar por encima del plano ecuatorial.
 - El nodo descendente es en el cual el satélite pasa a estar por debajo del plano ecuatorial.
 - La semirrecta que une a ambos puntos se denomina línea de nodos.
- **Punto de referencia aries (γ):**
 - Punto en el cual ocurre el equinoccio de primavera en el hemisferio norte.
- **Longitud del nodo ascendente (Ω):**
 - Toma de referencia al plano ecuatorial y al plano orbital.

- Mide el ángulo de inclinación que se forma entre la dirección de referencia aries con la línea del nodo ascendente.
- Argumento del perigeo (ω):
 - El perigeo es el punto de la órbita en el cual el satélite se encuentra a la menor distancia de la Tierra.
 - Su argumento, por ende, es el ángulo de recorrido, desde el nodo ascendente y en sentido antihorario, que existe entre el perigeo y el nodo.
- Anomalía verdadera (v):
 - Ángulo de recorrido actual del satélite, con respecto al nodo ascendente.

A modo de ejemplo, se muestra en la figura 2.2 una representación visual de la como se toman de referencia los parámetros orbitales, para un cuerpo celeste dado.

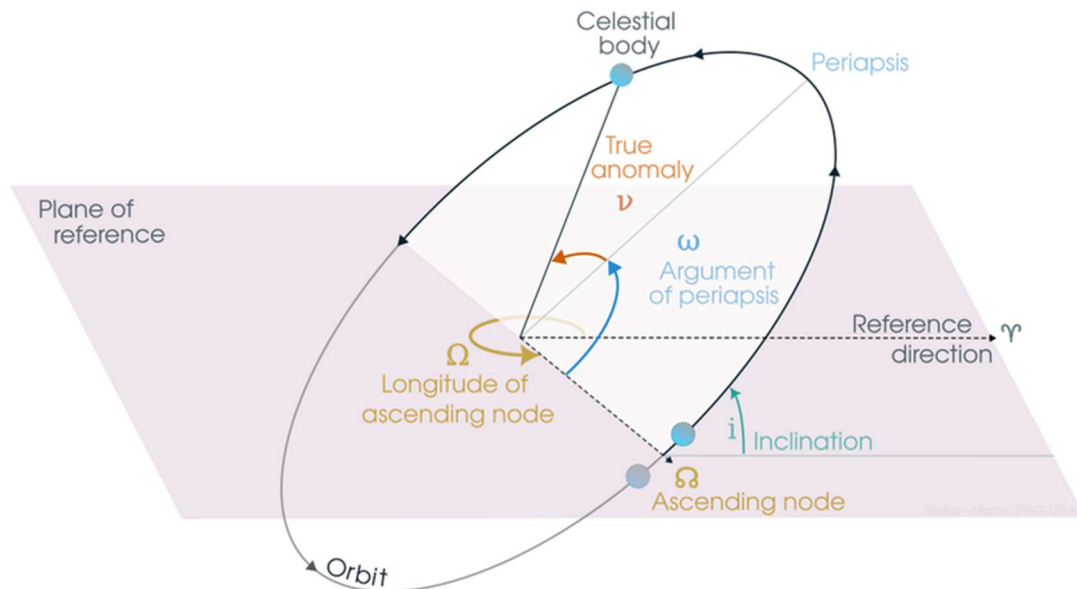


Figura 2.2. Esquema tridimensional de los parámetros orbitales keplerianos junto a los puntos de referencia. Reproducida de [5].

2.3 Órbita LEO

2.3.1 Parámetros orbitales

A partir de los parámetros orbitales, junto a la altura de esta, se definen los grandes grupos de órbitas satelitales:

- LEO (*Low Earth Orbit*): Altitudes de 160 hasta los 2000 km. con períodos orbitales de entre 90 y 120 minutos.
- MEO (*Medium Earth Orbit*): Altitudes de 2000 hasta 35678 km., con períodos orbitales entre 2 y 12 horas.
- GEO (*Geo-stationary Orbit*): Altitudes por encima de 35678 km., con períodos de 24 horas.

Dentro de la órbita LEO, en la cual se desarrollará la misión Pehuensat III, se destacan las siguientes condiciones atmosféricas:

- Vacío: Presiones del orden de $10E-8$ Pascales.
- Temperaturas: Valores de $-50^{\circ}C$ y de $+80^{\circ}C$, en función de la exposición solar y orientación.
- Radiación: Fotones UV y radiación en el espectro de rayos X, partículas ionizadas de manera esporádica.

2.3.2 Condición de vacío: características y afectaciones físicas

El vacío no genera efectos nocivos por sí solo en los componentes de la misión, sino que dicha condición induce degradaciones en los materiales. Al no existir la presión atmosférica, pequeñas cantidades de gases que permanecían contenidas buscan escape al entrar en órbita. Puede generar un aumento en la fragilidad de los materiales o hasta rotura [6]. La manera de reducir sus efectos es mediante la elección de elementos con baja capacidad de desgasificación o mediante un tratamiento con calor y vacío para generar ese fenómeno de manera controlada previo a la misión.

Otra problemática debido al vacío se da con la transferencia de calor. Al no existir gases atmosféricos, no es posible la transferencia mediante convección. Existe únicamente la posibilidad de lograr esa transferencia por radiación o por conducción. La radiación tendrá su origen por los rayos solares o, en mucho

menor medida, por algún elemento cuya temperatura sea mayor al cero absoluto, por lo que el tiempo de exposición a los rayos solares y la densidad de energía que sean capaces de absorber los elementos que componen al satélite es un parámetro de sumo interés. La conducción se da por contacto directo entre dos elementos con temperaturas distintas, hasta que ambos elementos alcancen el mismo valor. La elección de los materiales permitirá aumentar o disminuir el efecto de la radiación solar, ya sea permitiendo el paso en mayor o menor medida de estos o absorbiendo una mayor cantidad y haciendo interaccionar mediante contacto a las partes que se quiera mantener a una temperatura mayor.

2.3.3 Condiciones de temperatura: características y afectaciones físicas

Con respecto a las bajas temperaturas, el principal subsistema afectado es el de energía. Las baterías de litio, con temperaturas por debajo de 0°C aumentan su resistencia interna, disminuyendo la corriente máxima que entregan y reduciendo su capacidad de energía nominal. Estos efectos se profundizan cada vez más durante los ciclos de carga y descarga, ya que el movimiento de las cargas se reduce y la polarización aumenta. No hay que dejar de mencionar la fatiga generada en los materiales por factores térmicos que componen tanto a la placa como a las baterías, pudiendo llegar a generar roturas o agrietamientos.

Las altas temperaturas, con valores por encima de los 80 °C afectarán de maneras distintas a los elementos de la misión. Por un lado, la electrónica asociada a la placa del microcontrolador puede llegar a presentar fallos en el procesamiento debido a la presencia de ruido térmico y corrientes de fuga por la energía adicional que adquieren los electrones, llevando a malas lecturas o pérdidas de información. Para las baterías la misma agitación térmica en las cargas no permite conducir las de manera adecuada, aumentando su resistencia interna y disminuyendo la corriente máxima a poder entregar; por otro lado, existe el riesgo de la degradación de los materiales, generando una reducción en la capacidad nominal.

2.3.4 Condiciones de radiación: características y afectaciones físicas

La órbita LEO no es ajena a las radiaciones que se presentan de distintas fuentes, a pesar de su aparente cercanía con la superficie terrestre. La radiación solar, los rayos cósmicos y la cercanía con regiones terrestres de alta actividad magnética se ubican como los principales actores en este apartado.

La radiación solar tiene su origen en las tormentas solares. Estas liberan energía en forma de protones y electrones altamente cargados y acelerados, llegando a impactar contra las misiones que orbitan a esa altura. Puede llegar a presentar valores del orden de los MeV.

Los rayos cósmicos se componen de núcleos atómicos con carga neta positiva o negativa con energías mayores a los GeV. Tienen su origen en fenómenos que ocurren en el espacio profundo.

Debido a la presencia de la Anomalía Magnética del Atlántico Sur, las partículas que tienen origen en los cinturones de Van Allen llegan con mayor intensidad a los satélites que se encuentran orbitando por encima de esa región. Esto se debe a la debilidad del campo magnético terrestre en esa ubicación, por lo que son más proclives a recibir radiación al sobrevolarla [7]. Por ello, los satélites que orbiten en esta región de la superficie terrestre estarán expuestos a una mayor densidad de partículas cargadas.

La afectación que se genera en los elementos electrónicos se puede dar de tres maneras diferentes:

- Dosis Total Ionizante (TID): Es la energía total acumulada a lo largo de la vida del elemento. Esto genera cambios en las propiedades de los elementos semiconductores, produciendo corrientes de fuga y degradación general del rendimiento.
- Daño por desplazamiento de átomos (DD): Partículas energéticas rompen la red cristalina que forman los átomos, degradando los elementos transistores y con componentes optoacoplados.
- Eventos de partícula única (SEE): Son impactos de partículas individuales que pueden llevar a que se corrompa la información debido al cambio en un bit en la memoria.

2.4 Comunicaciones por vía inalámbrica en entorno espacial

2.4.1 Comunicaciones inalámbricas bajo estándares Wi-Fi

Wi-Fi es una familia de estándares que define las comunicaciones inalámbricas dentro del entorno de red local, comúnmente llamadas WLAN (Wireless Local Access Network). Los aspectos de este tipo de comunicaciones se enmarcan en los estándares IEEE 802.11.

A partir de un valor de frecuencia central, se divide en 11 subcanales separados entre ellos a 5 MHz cada uno.

Dentro del estándar 802.11b, la principal característica que permite su funcionamiento se basa en el Espectro Expandido por Secuencia Directa (DSSS en inglés). Al utilizar esta separación entre canales y al asignarle 20 MHz a cada uno de ellos normalmente ocurriría solapamiento de señales, pero el switch avisa previamente dentro del canal por cual porción de este se van a comunicar. Además de darle un mayor aprovechamiento al espectro asignado en el ámbito local, este tipo de comunicación permite enviar un gran volumen de datos impidiendo la aparición de ruido por el gran ancho de banda necesario para comunicarse, gracias a variar constantemente las porciones de canales a utilizar durante un período de tiempo muy reducido.

Por otro lado, el estándar 802.11g divide el ancho de banda de canal utilizando subportadoras espaciadas en frecuencia y ortogonales entre sí. El dispositivo que busca transmitir, primeramente, escucha en el canal antes de comenzar con la transmisión para ver si no está siendo utilizado actualmente por otro dispositivo. A continuación, inicia el envío de información utilizando alguna de las subportadoras dentro del canal.

2.4.2 Propagación de las ondas

Estos enlaces se llevan a cabo mediante ondas electromagnéticas. En el espectro radioeléctrico, están asignadas para esta tecnología las bandas de 2.4 GHz y 5 GHz.

A nivel de la Tierra, las ondas sufren atenuación, difracciones y reflexiones con distintos materiales, siendo los metales los que generen la mayor atenuación.

Sin embargo, a la hora de realizar el enlace en el espacio exterior, existirán elementos que pueden interferir en la línea de vista entre emisor y receptor, generando los fenómenos mencionados anteriormente. Además, al propagarse las ondas en el vacío, la atenuación generada por el aire como en la Tierra no se hará presente, por lo que en este sentido solo habrá atenuación por la propagación de la onda en el espacio libre, que se describe con la siguiente ecuación:

$$FSPL(dB) = 20 \log_{10}(d) + 20 \log_{10}(f) + 32,44$$

Donde d indica la distancia en kilómetros con la fuente de las ondas y f la frecuencia en MHz de la onda.

2.5. Modelo OSI

El modelo OSI (*Open Systems Interconnection*) es un modelo de capas el cual encapsula y delimita el alcance de cada uno de los protocolos necesarios para llevar a cabo una comunicación mediante dos dispositivos en una red.

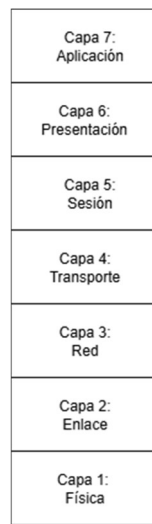


Figura 2.5 Modelo de capas OSI.

En orden ascendente en cuanto al número, las capas van cubriendo desde los aspectos físicos hasta los puramente protocolares en cuanto a la presentación de los archivos.

Los protocolos de la capa física tienen como función la transmisión y recepción de los bits de información durante su envío en el medio físico.

Los protocolos de capa enlace se encargan del orden y formato de como las señales eléctricas, correspondientes a la información a enviar, llegan de manera ordenada y comprensible para el receptor. Deben identificar a cada uno de los participantes de la comunicación, por lo que conocen y actualizan constantemente las direcciones MAC (*Media Access Control*) de cada uno de los equipos.

Los protocolos de capa de red se encargan de indicar el camino a seguir para la información por fuera de la red local. Las direcciones para esta capa se asignan a partir de las direcciones IP, asignándoles una identidad dentro de la red local y por fuera, tanto a los usuarios como a los dispositivos encargados de ser la ventana al mundo de la red local.

Los protocolos de capa de transporte se encargan de la segmentación, armado de paquetes y direccionamiento para el envío de información dentro y fuera de la red local, buscando el envío de manera segura, confiable y eficiente. La identificación que agrega esta capa es el de los puertos, que permite una segmentación de la información en función del uso final que tenga.

Los protocolos de capa 5, 6 y 7 a grandes rasgos se encargan de la encriptación de los mensajes, interacciones a un nivel más alto en función de lo que se busca enviar o recibir y estándares para los distintos tipos de archivos a intercambiar.

La familia de estándares 802.11 se encapsulan dentro de la capa 2 y la capa 1. Dentro de la capa de enlace maneja el control lógico de enlace y el acceso al medio solicitando reenvíos o habilitando los distintos usuarios para enlazarse. En la capa física implementa los métodos de modulación para las bandas asignadas de comunicación como OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexation*) o DSSS (*Direct-Sequence Spread Spectrum*).

En la capa de transporte, se distinguen dos grandes protocolos bien diferenciados en cuanto a funcionalidad: TCP y UDP.

El protocolo TCP (*Transport Control Protocol*) se dice orientado a la conexión. Se encarga del envío y control de tráfico con otros usuarios, mediante segmentación

de paquetes y agregado de comprobaciones para verificar el estado del paquete y el orden de este.

El protocolo UDP (*User Datagram Protocol*) no está orientado a la conexión. Su función principal es la de enviar los paquetes lo más rápido posible sin verificar su correcta recepción, generando también así paquetes más livianos al quitar la parte de comprobación. Está enfocado a aplicaciones donde es necesario tener una latencia baja y reducir al máximo el tiempo entre que se envía y se procesa, como puede ser streaming o telefonía.

El contraste en la longitud de las cabeceras de ambos protocolos es muy marcado. Mientras TCP genera una cabecera de más de 20 bytes, UDP solo tiene 8. Información como número de secuencia para armado posterior, prioridad para procesamiento, suma de comprobación y los parámetros de negociación con el receptor, solo se hacen presentes en TCP.

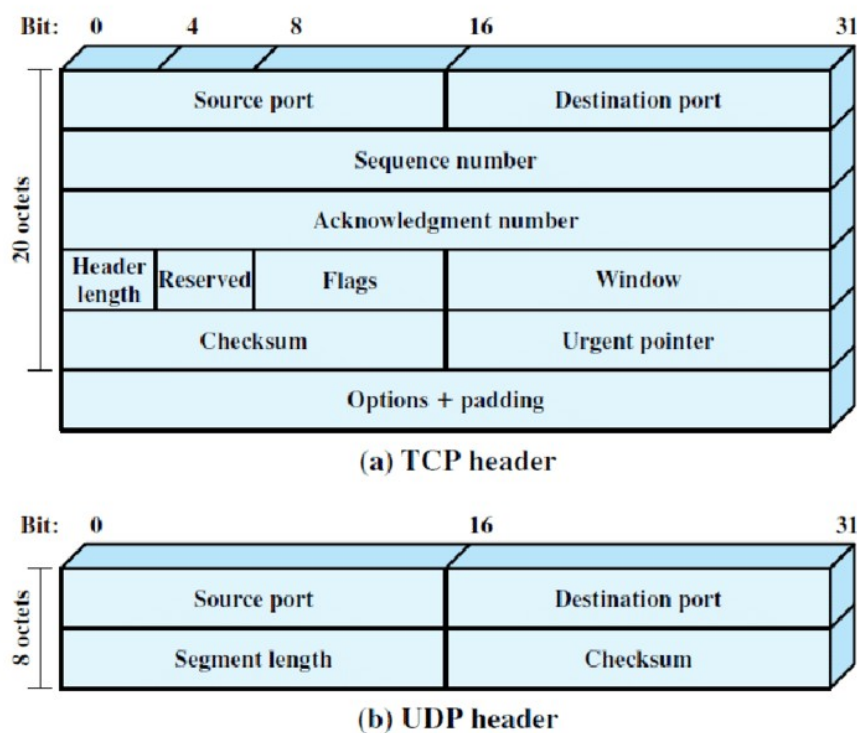


Figura 2.5.2 Cabecera de paquete TCP y paquete UDP. Reproducido de [8].

2.6 Baterías de Litio

La tecnología de baterías de litio en sus formas y composiciones hoy por hoy domina el mercado mundial de las baterías recargables. El uso y distribución está masificado, estando presente en pequeños dispositivos como relojes

inteligentes o auriculares hasta en vehículos o como respaldo de energía en grandes instalaciones.

Su masividad de uso se debe a su alta densidad energética (capacidad de almacenamiento de energía por cada kilogramo de masa), eficiencia de carga y descarga con degradaciones no mayores al 10% a lo largo de toda su vida útil y al amplio rango de temperaturas en los cuales pueden funcionar sin variaciones importantes en el desempeño.

Para misiones espaciales, dónde las dimensiones de los elementos son de suma importancia, este tipo de baterías son muy bien valoradas. Su densidad energética, capacidad de entregar valores constantes de corriente con poca dispersión, junto a su prolongada vida útil lo hacen de las opciones más difundidas.

La Estación Espacial Internacional culminó en 2021 el reemplazo de todo el sistema de baterías recargables de níquel-hidrógeno por baterías de tecnología de litio [9]. Esto se fundamentó en dos características importantes de este tipo de tecnología en comparación con níquel-hidrógeno:

- La densidad energética, cantidad de energía a almacenar por unidad de masa, logró reducir a la mitad el número de baterías instaladas para lograr la misma capacidad.
- La estabilidad en el valor de corriente entregada.

Durante los estadios espaciales, debido a las altas y bajas temperaturas que se presentan, se esperan degradaciones que, aunque tengan un origen distinto, se traducen como un mismo efecto negativo. Una disminución importante en la temperatura genera una ralentización en el flujo de las cargas por volverse más lento el proceso de ionización, traduciéndose como un aumento en la resistencia interna y menor corriente a entregar. En cambio, las altas temperaturas generan el aumento en la resistencia interna por una descomposición en la capa sólida que separa al electrolito del ánodo, permitiendo que se genere reacción entre ambas partes, pero de manera indeseada [10].

2.7 Estándar JPEG

El estándar JPEG nace en el año 1992 como un esfuerzo conjunto de la ISO (International Organization for Standardization) junto a la hoy ITU (International Telecommunications Union), con la finalidad de generar una normalización en la compresión de imágenes sin perder de vista la calidad percibida por los usuarios finales. Dado el contexto de las telecomunicaciones en ese entonces, junto a las capacidades de almacenamiento que se tenían, el hecho de reducir el tamaño de imágenes mediante compresión con pérdidas era un gran desafío a enfrentar.

El pilar fundamental de este estándar se basa en el tipo de transformación empleada: la Transformada Discreta de Coseno (DCT). Mientras la Transformada Discreta de Fourier almacena valores discretos reales y complejos de las componentes en frecuencia de la imagen, esta transformada discreta traduce la información únicamente empleando como base cosenos de componente real. Debido a que la gran mayoría de imágenes presentan transiciones suaves entre sus partes, tanto de color como de intensidad, estas tendrán su correspondencia transformada concentrada en las bajas frecuencias. Esta agrupación permite tener concentrada una gran cantidad de información en un número reducido de valores. Esta implicancia se traduce de manera directa como un tamaño de archivo menor comparado con otros estándares, sin mayores afectaciones a la percepción del observador. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 2.7 para una imagen en blanco y negro, únicamente considerando los niveles de brillo.

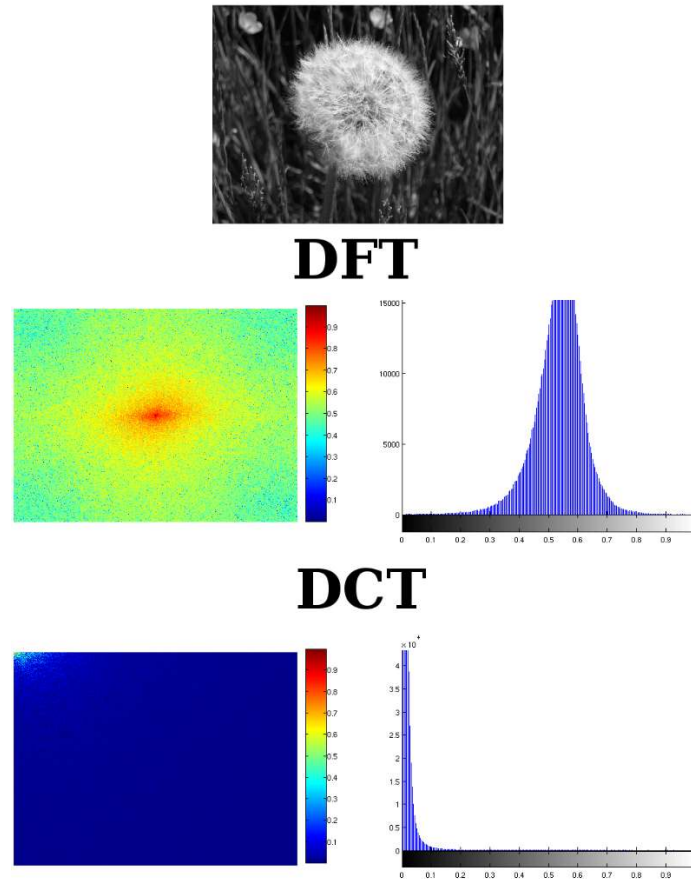


Figura 2.7. Representación de los módulos de los coeficientes en función de las frecuencias relativas de la luminancia de una imagen, empleando Transformada Discreta de Fourier (DFT) y Transformada Discreta de Coseno (DCT). En la DFT se evidencia la dispersión de valores en las bandas de frecuencias medias, mientras en la DCT la dispersión es menor y la concentración se da en las componentes de menor frecuencia. Reproducido de [11].

2.8 Parámetros de imagen

Para la captura de una fotografía, existen una serie de parámetros que determinan las características de la imagen. Cada uno de ellos permite el manejo de las componentes de ella.

Exposición: es la medida de la cantidad de luz que ingresa en la captura. Se compone de tres parámetros fundamentales, los cuales componen el triángulo de exposición: apertura del diafragma, velocidad de obturación y sensibilidad ISO. No se pueden analizar de manera separada, sino como un conjunto y cuando hay que realizar ajustes en uno de ellos, se debe compensar con los dos restantes a la vez. Matemáticamente, viene dada por la expresión 2.8:

$$\text{Exposición (EV)} = \log_2 \frac{N^2 100}{t \text{ ISO}} \quad (2.8)$$

En donde t es el tiempo de apertura del obturador en segundos, ISO hace referencia al parámetro ISO de la fotografía y N el ratio de apertura de la lente, comúnmente marcado como f/x.y.

- **Apertura del diafragma:** determina el grado de apertura de la abertura antepuesta al objetivo. Se mide en fracciones relativas de la distancia focal F del objetivo con el diámetro de apertura del diafragma D. La denotación típica de los valores se expresa como f/N, donde N es el cociente entre F y D. Por ejemplo, f/16 expresa una distancia focal F 16 veces mayor al diámetro de apertura D. Un N menor permite un mayor detalle al objeto, desenfocando el fondo.
- **Velocidad de obturación:** tiempo por el cual el obturador permite el ingreso de luz. A una mayor velocidad de obturación, se deja pasar menos cantidad de luz y viceversa. Esto permite lograr nitidez en una imagen capturada de un objeto con poca luz, hasta tomar fotografías de objetos que se desplacen a velocidades altas con respecto a la cámara. Se mide en fracciones de segundo y se indica en 1/X, donde X es cuantas fracciones de segundo es la velocidad.
- **Sensibilidad ISO:** sensibilidad o medida en la cual los sensores ópticos se excitarán ante la luz. Si configuramos un ISO dos veces mayor a otro, con únicamente la mitad de luz lograremos el mismo nivel de nitidez. Con un ISO dos veces menor a otro, se requiere el doble de luz para lograr la misma nitidez. Se mide en valores absolutos mayores a 0.

Contraste: función que acentúa las diferencias de colores o luminosidad. Cuando se tenga un valor más alto, la imagen capturada acentuará más esas transiciones abruptas.

Brillo: valor medio de luminosidad que agrega a todos los componentes de la imagen. A partir de la imagen dada, las zonas oscuras de verán con mayor claridad y las más claras se percibirán con un mayor nivel de blanco.

Balance de blancos: medida de la “calidez” de la fotografía. Relacionado directamente con la tonalidad anaranjada o azulada de la luz, valores más altos

van hacia blancos más fríos o azulados, mientras valores más bajos hacia blancos más cálidos o anaranjados.

La interrelación entre estos parámetros se explica a través del denominado “Triángulo de exposición de imagen”, tal como muestra la figura 2.8.1.

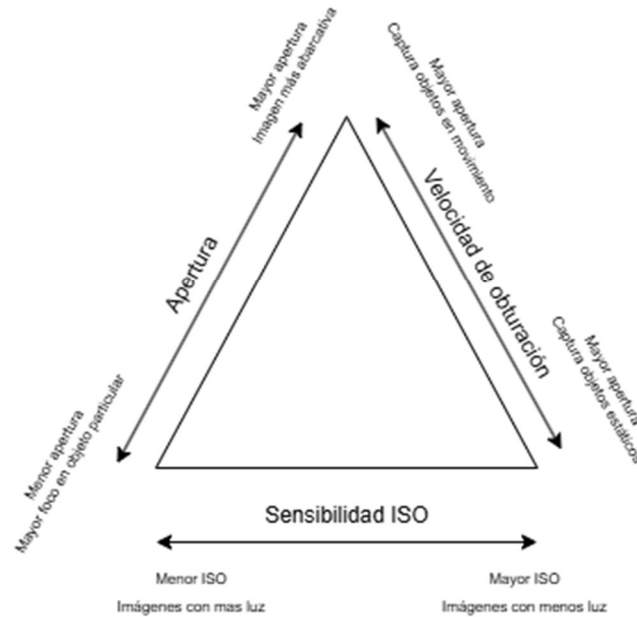


Figura 2.8.1 Triángulo de exposición de imagen, mostrando la interrelación entre relación de apertura, velocidad de obturación y sensibilidad ISO para capturar una fotografía.

3. Diseño e implementación

Este trabajo consiste en la búsqueda, implementación y adecuación de una cámara fotográfica comercial, programable. Sus características de peso, dimensiones y de consumo deben ser lo más bajas posibles con el fin de prolongar la duración de la carga de las baterías un periodo mayor a treinta días. Esto se debe a no contar con la posibilidad de ser recargadas. Se busca que el proyecto pueda entregar fotografías de una calidad aceptable y del menor peso de archivo posible, para tener la realimentación del estado final de despliegue de los componentes del satélite lo antes posible desde la entrada en órbita.

De manera secundaria, se tomarán fotografías a intervalos regulares cuando se encuentre orbitando por encima de la superficie del territorio argentino, lo que proveerá imágenes actuales del estado de la misión y con la posibilidad adicional de sumar imágenes a nuestro repositorio institucional.

3.1 Requisitos de diseño

Debido al hecho de que el sistema de cámara junto con sus baterías, viajarán en el interior del contrapeso, las condiciones físicas de este y los requerimientos que debe cumplir para lograr su objetivo se convierten en restricciones de diseño para el sistema.

El contrapeso es un cuerpo cilíndrico hueco, construido en aluminio T-6061. Las dimensiones de este son de 2 cm. de altura y un diámetro de 3,5 cm. El peso total del conjunto, incluyendo el sistema de cámara y las baterías, será de 100 g.

Una maqueta del contrapeso en madera se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1. Maqueta del contrapeso realizada en madera.

En cuanto al cuerpo del satélite, el mismo consta de un cubo de aluminio del mismo material que el contrapeso, con dimensiones de 10 cm x 10 cm x 10 cm. En caso de que, por cuestiones de diseño, no se pueda generar una hendidura para el paso de las ondas electromagnéticas provenientes del sistema de cámara, se deberá trabajar en la posición de la antena colocada en el boom para reducir al mínimo posible las atenuaciones al atravesar el material.

Sumado a la distancia hasta la antena de la computadora de abordó, y al atravesar las dos secciones de aluminio, hay que considerar la atenuación que sufrirán las ondas al atravesar el resto de los materiales que se encontrará en el camino: litio debido a las baterías, fibra de vidrio por las placas que lleven la electrónica y aislaciones térmicas que protejan a determinados componentes en el interior.

A modo de resumen, las limitaciones físicas que serán las condiciones de diseño máximas serán:

- Peso máximo para el conjunto: 80 g.
- Dimensiones máximas para el conjunto: 3,5 cm. de ancho y 2 cm. de altura. 19,24 cm³.
- Distancia máxima hasta la antena receptora de la computadora de abordó (considerando que se ubica en el extremo opuesto): 1,15 metros.

- Máxima atenuación estimada en el enlace: 60 dB. Debido únicamente a atravesar las superficies metálicas del cuerpo del satélite [12].

3.2 Elección de cámara

Tomando como punto de partida las condiciones físicas del apartado 3.1, la búsqueda del microcontrolador con la cámara integrada comienza con modelos de placas en el mercado local que contaran con conectividad Wi-Fi integrada, sin necesidad de usar un segundo microcontrolador externo para realizar el proceso de conexión. La placa que contenga el sistema de cámara y el módulo de conexión Wi-Fi, debe contar además con una antena externa, de manera que permita obtener un mayor rango de libertad para ubicar el conjunto y lograr una mejor línea de vista con la antena receptora de la computadora de abordó.

Como segundo factor, la cámara más la placa encargada del procesamiento debe tener dimensiones lo más reducidas posibles y con consumos energéticos tales que permitan al menos un proceso de encendido, captura y envío de fotografía. Dado que las baterías no cuentan con ningún medio para ser recargadas en la misión, se hace énfasis en la capacidad de carga, a fines de extender al máximo la duración del sistema.

Otro de los principales obstáculos que se presenta es cómo afecta la variación de temperatura a lo largo de la misión, producto de los estadios de luz y sombra solares. Se traduce como rápidas variaciones y un pronunciado perfil de temperaturas.

A la hora de la elección final de la placa de la cámara, el factor que se privilegia por encima del resto son las dimensiones. Esto permite ganar el máximo espacio para colocar las baterías que, por lo general, si se busca una capacidad más amplia tiene dimensiones mayores.

Los modelos que cumplen con las características mencionadas se muestran en la tabla 3.2.

Marca	Modelo	Dimensiones	Peso	Consumo energético	Optimizada para uso de cámara	Entorno de desarrollo multilenguaje
COMedia Ltd.	C328	28 mm largo x 20 mm ancho x 17 mm alto	No informado	60 mA operación normal 100 µA modo suspensión.	Si	Si, comunicación RS232 sin interfase
AI Thinker, Expressif Systems	ESP32-CAM	40,5 mm largo x 27 mm ancho x 4,5 mm alto	10 g	180 mA modo operativo 6 mA modo suspensión	Si	Si. Micropython, C++
Seeed Technology Co., Ltd. ;	XIAO ESP32-S3 Sense	21 mm largo x 18 mm ancho x 15 mm alto	7 g	45 mA modo Modem Sleep. 5,5 mA modo Light Sleep. 3 mA modo Deep Sleep	Si	Si. Micropython, C++,

Tabla 3.2. Comparativa de modelos comerciales de cámara durante fase de búsqueda del proyecto.

La placa que se ajusta más a las necesidades planteadas es la XIAO ESP32S3 Sense. La misma es un modelo comercial de la empresa Seeed Studio, montada sobre un ESP32S3 que incluye un módulo de expansión encastrable para la cámara y una memoria del tipo SD. Esta placa es compatible con conexión Wi-Fi y Bluetooth 5.0, cuenta con un bootloader integrado y una conexión para datos y programación mediante USB-C comercial. Cuenta con un regulador de tensión interno que lleva el nivel de alimentación a 3,3 volts, lo que permite trabajar con los modelos comerciales de baterías de Li-Ion y Li-Po cuya tensión de salida es de 3,7 V a máxima carga. La imagen de muestra del producto se muestra en la figura 3.2.

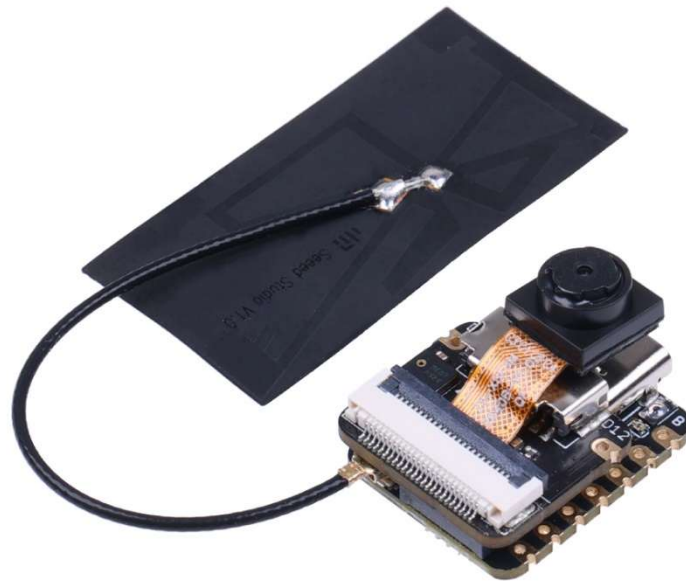


Figura 3.2. Fotografía de la placa de desarrollo XIAO ESP32S3 Sense, con antena WI-FI/Bluetooth conectada y módulo de expansión para cámara y memoria SD conectado.

Reproducida de [13].

Otro de los factores que influyeron en la toma de decisión por esta placa fue que el mismo fabricante cuenta con un soporte personalizado de rápida respuesta, permitiendo contar con una herramienta adicional a la hora de resolver dudas en el desarrollo o cuestiones específicas del desempeño de la placa.

3.3 Pruebas iniciales e integración hardware-software

Para llevar a cabo la programación del proyecto, se decidió utilizar el entorno de desarrollo Microsoft Visual Studio Code, junto a la herramienta PlataformIO. El fabricante en sus ejemplos recomienda el desarrollo a través del lenguaje C++, y fue este lenguaje la opción elegida. Sin embargo, también es compatible con Micropython, pero se mantuvo esta recomendación del fabricante dada la gran disponibilidad de librerías y ejemplos en dicho lenguaje.

Las primeras pruebas funcionales consistieron en iniciar la captura y seguir los pasos que este lleva a cabo mediante la sintaxis propia y funciones que el fabricante ofrecía para este proceso. Para los parámetros de captura, se buscó un formato tipo JPEG ya que es la opción primaria para este tipo de trabajos, por su gran capacidad de compresión y resultados visuales estudiados [14].

Para obtener un primer acercamiento en cuanto a tamaños de archivo, se captura una fotografía de gran contraste y cantidad de colores como muestra la figura 3.3.1, en resoluciones variadas, tanto en color como en blanco y negro. Los resultados de performance de las capturas se muestran en la tabla 3.3.1. Estas pruebas son de suma importancia ya que, en caso de que no se lograra un archivo de menos de 30 kilobytes, se debían buscar alternativas para la captura. Debido a que la tasa de transmisión de información para el envío de la fotografía hacia la tierra es de 1200 bps, un archivo de mayor peso demandaría más de 6 pasadas con línea de vista para esta tarea, volviéndola demasiada extensa en el tiempo.

Las fotografías capturadas en estas pruebas se muestran en el Anexo A.



Figura 3.3.1. Captura tomada con la placa XIAO ESP32S3 Sense y almacenada en la memoria interna. Tomada a una resolución de 640x480 pixeles con tamaño final de 33 kilo bytes.

Resolución de imagen en pixeles x pixeles	Blanco y negro/color	Tamaño de archivo en kilobytes	Calidad de imagen buena/aceptable/mala
919 x 690	Color	59,8	Buena
919 x 690	Blanco y negro	37,3	Buena
640 x 480	Color	33,2	Aceptable
640 x 480	Blanco y negro	22,9	Aceptable
240 x 240	Color	10,5	Mala
240 x 240	Blanco y negro	8,2	Mala

Tabla 3.3.1. Resultados de captura a imagen de alto contraste y gran variedad de colores ante distintas resoluciones y toma en blanco y negro/color.

Para la ponderación en cuanto a la calidad de imagen, se siguieron los siguientes lineamientos:

- Calidad buena: La fotografía permite apreciar claramente la diferencia de colores o de patrones de forma al objeto fotografiado.
- Calidad aceptable: La fotografía permite apreciar la figura del objeto fotografiado y los colores, pero se observa cierta borrosidad en general.
- Calidad mala: La fotografía permite distinguir formas y diferencias de colores de manera muy pobre. Serviría solo a modo de referencia en base a la diferencia de brillos y colores que presenta.

Luego de haber comprendido los parámetros de configuración de la cámara, como modificarlos y los tamaños y tipos de fotografías que generaba la cámara, se procede a probar el apartado de comunicaciones de esta última. Hasta ese momento, se habían capturado las fotografías vía comando serial y se habían almacenado en la memoria SD externa que este provee, utilizando el bus de comunicaciones SPI.

El fabricante de la placa fotográfica provee una tabla comparativa de consumos a la hora de usar la placa mediante Wi-Fi y mediante Bluetooth. Si bien, informa en modo activo una diferencia del 10% menor cuando se utiliza Bluetooth versus Wi-Fi, el tiempo requerido para el envío de datos por Wi-Fi es significativamente menor, traduciéndose en un menor consumo a lo largo del tiempo [15].

Como primer paso, de manera de reducir grados de libertad y posibles problemáticas por errores en la comunicación entre ambas placas, se realizan pruebas de conectividad desde la placa de cámara contra una computadora conectada a la misma red Wi-Fi. La finalidad de esta prueba preliminar es descartar posibles problemas de incompatibilidad entre las placas, ya que al implementar en un primer estadio una conexión con un equipo funcional y probado como una computadora, se podría atacar directamente problemas de configuración en ella.

Una vez realizada la prueba anterior, se procedió a establecer una comunicación con una computadora similar a la utilizada en el Pehuensat III, es decir, una Raspberry Pi Pico W. Dicha placa crea la red Wi-Fi y espera a que la placa fotográfica se conecte, ya que esta última se apaga y enciende en función de que se lo indique la computadora de abordo. En este caso, la computadora de abordo se estableció como un servidor TCP, esperando el envío de información

mediante el puerto 1234 designado arbitrariamente, compartiendo esta información también a la placa fotográfica.

A la hora de probar el envío, se realizan los siguientes pasos de manera secuencial:

- Se crea la red Wi-Fi y se configura como servidor TCP a la computadora de abordo.
- Se intenta establecer conexión desde placa de cámara.
- Se envía mensaje de conexión establecida.
- Inicia la segmentación de mensajes en paquetes.
- La placa cámara informa cantidad de paquetes, peso de cada uno, longitud total del archivo, el tipo de archivo de origen para la reconstrucción posterior en destino.
- Placa cámara envía paquete, checksum esperado y checksum a enviar.
- Computadora de abordo recibe paquete y se realiza comprobación de checksum esperado vs. recibido.
- Placa cámara toma decisión en función del estado del paquete
 - Si está ok, envía conformidad y placa cámara prosigue con el próximo paquete.
 - Si se recibió mal, computadora de abordo pide el envío nuevamente de ese paquete y placa cámara reenvía el paquete.

De esta manera, se asegura que la foto sea recibida y reconstruida. Durante las pruebas de envíos se observó que la falta de esta verificación derivó en una foto totalmente distorsionada.

Finalmente, sin importar el tamaño del archivo ni su configuración, el envío se pudo llevar a cabo. La comprobación final de los archivos se hace descargando la fotografía en una PC y abriéndola en un programa que permita la visualización de archivos tipo JPG.

El próximo paso en la implementación, es comandar el modo de operación de la placa fotográfica desde la computadora de abordo. Dado que la placa fotográfica tendrá alimentación independiente al sistema de baterías del satélite en sí, y que además no podrá ser recargado debido a las limitantes físicas que impone

colocarla en el contrapeso, se debe reducir su consumo ocioso lo máximo posible. Una vez que ocurra el despliegue del sistema de antenas y del contrapeso, luego de pasado un tiempo precautorio, la computadora de abordó enviará un comando a la placa fotográfica para que esta salga del modo ultra bajo consumo y comenzará el proceso de captura.

Para cuando reciba el comando de wake-up, la placa fotográfica solo tendrá encendido el módulo Wi-Fi, el cual consultará de manera periódica si hay un dato en el buffer esperando a ser procesado, retomando la línea de código en la cual se encontraba previo a entrar en este estado. Luego, una vez recibido el comando de wake-up, iniciará el proceso de encendido del módulo de captura fotográfica y configurará los parámetros de fotografía óptimos para la misión, los cuales ya estarán precargados en el mismo código. Capturará la fotografía para luego comenzar el proceso de envío y luego de esperar 5 segundos de inactividad, la placa entrará en el modo de ultra bajo consumo.

3.4 Diseño e implementación del sistema de comunicaciones con la computadora de abordó

3.4.1 Elección de tecnología de transmisión inalámbrica

Debido a la imposibilidad de realizar una conexión cableada hacia el sistema de cámara, el mismo deberá llevar a cabo las comunicaciones de manera inalámbrica.

La placa seleccionada, que integra el chip de comunicaciones en él, ofrece la posibilidad de realizar la comunicación y transferencia de datos mediante Wi-Fi o mediante Bluetooth. Esta segunda posibilidad de conexión ofrece, a priori, lograr la máxima eficiencia de la placa en cuanto al tiempo que permanece encendida, cuando se encuentra durmiendo y cuando se encuentra transmitiendo la imagen.

A la hora de la transmisión inalámbrica, el fabricante de la placa informa el consumo de corriente nominal para la transmisión mediante Bluetooth 5.0 y mediante Wi-Fi. Los resultados se visualizan en la tabla 3.4.1.1

Tecnología de transmisión	Consumo en modo de transmisión en mA
Bluetooth	102
Wi-Fi	110

Tabla 3.4.1.1 Comparación de consumo de corriente de Wi-Fi y Bluetooth de la placa XIAO ESP32S3-Sense en modo activo. Extraído de [13]

Si bien el fabricante informa un consumo mayor para la conexión vía Wi-Fi, se debe considerar la tasa de transmisión efectiva promedio que ofrece cada una de las tecnologías. En busca de la eficiencia en la transmisión y la máxima duración de la carga de las baterías, la comparativa entre ambas tecnologías debe ser la carga consumida durante una transmisión de fotografía promedio.

A partir de ello, considerando una transmisión de un archivo de 30 kilobytes de peso, la tabla 3.4.1.2 informa el consumo energético total a partir de la tasa de transmisión, consumo de corriente promedio y tamaño de archivo.

Tipo de tecnología	Consumo en modo de transmisión en mA	Velocidad de transmisión, en Mbps	Tiempo estimado para completar transmisión prueba, en segundos	Carga energética consumida para transmisión, en mAh
Bluetooth	102	2 Mbps	0,25	0,069
Wi-Fi	110	11 Mbps	0,02	0,013

Tabla 3.4.1.2. Comparativa de consumos de corriente, velocidad de transmisión, tiempo estimado para completar transmisión de archivo de 30 kilobytes y carga energética total consumida en el proceso de transmisión para tecnología Bluetooth y Wi-Fi.

Aunque la información brindada de velocidad de transmisión y consumo sea de manera promedio en casos ideales, evidencia en cuanto a que tecnología elegir para la transmisión. Elegir Wi-Fi para el envío de la fotografía representa un ahorro energético de casi un 81% contra Bluetooth y un tiempo de transmisión alrededor de 10 veces menor.

Por lo expuesto, se decide realizar el medio de enlace inalámbrico utilizando tecnología Wi-Fi.

3.4.2 Elección de protocolo de comunicaciones

Una vez evaluada y elegida la tecnología de comunicaciones a nivel físico que se implementó, se avanzó en vistas del protocolo de comunicación para el transporte.

Dentro de los protocolos a implementar para el envío de los paquetes de información que corresponden a la imagen, se encuentra UDP y TCP.

El protocolo UDP, debido a que no cuenta con control de envío y que tiene un tamaño de paquete menor para el enviar la misma cantidad de información, se vuelve impráctico en este caso. Por la sensibilidad de la información y debido a que se requiere que los paquetes lleguen lo más rápido posible junto a que no debe haber errores, UDP se vuelve la opción menos favorable.

En cambio, al implementar TCP, se asegura que los paquetes lleguen a la computadora de abordo. Gracias a que se tiene acuse de recibo, comprobación y retransmisión automática, se logrará llevar a cabo el envío de la información de la manera más confiable posible.

Por lo expuesto, se implementó **protocolo TCP** para realizar la comunicación.

3.4.3 Flujo de trabajo para transmisión

Luego de lograr la optimización en la transmisión, en función de las características del enlace y del tipo de información a transmitir, solo resta definir como se realiza el proceso de transmisión entre ambas partes de manera ordinaria.

La computadora de abordo se encarga de proveer la red Wi-Fi, la cual estará activa una vez que esta verifique que el satélite se encuentra en posición estable, sin rotación. Esta información se debe comunicar a la placa de la cámara, por lo que esperará la confirmación por parte de la computadora de abordo. A continuación, genera el servidor TCP y pre-inicializa el socket para generar el intercambio de información con la cámara.

En simultáneo a estos procesos, luego del despliegue la cámara entrará en modo de sueño ligero, solo inicializando el módulo de conexión Wi-Fi y manteniendo la condición de ahorro energético a la vez que está conectado a la red. Una vez

desplegadas las antenas y el contrapeso, en un lapso de algunos minutos recibirá un comando de **CAPTURE** codificado como mensaje ASCII hacia la cámara.

El modo de bajo consumo pregunta de manera periódica si hay un mensaje en el buffer esperando a ser procesado. Esto permitirá generar pequeños intervalos de encendido reduciendo aún más el consumo en stand-by.

A modo de comprobación, compara el mensaje del buffer con el esperado, el comando CAPTURE.

Una vez que se recibe ese mensaje, la placa inicializa el módulo encargado de la captura, alimentación y procesamiento de la imagen. Por medio de funciones propias de las librerías provistas por el fabricante, declara los puertos de transferencia de datos, alimentación y comandos. Luego, se configuran los parámetros de la fotografía para las condiciones espaciales: resolución, brillo, color y saturación.

Luego de procesada y capturada la fotografía, se almacena en la memoria PSRAM de la placa fotográfica. Comienza el envío hacia la computadora de abordo.

El envío en sí, a fines de dar mayor grado de seguridad y su posterior reconstrucción, se dividirá en tres secciones: tamaño total del archivo, archivo de la fotografía y suma de comprobación. El tamaño total permitirá dividir en paquetes la fotografía para enviarla y corroborar en la computadora de abordo.

Finalizado el envío y la recepción del archivo, la placa de la cámara entrará en modo de sueño profundo (*deep sleep*), el cual reducirá el consumo de los periféricos y de nuevo aguardará que llegue el comando para realizar una nueva fotografía, pasada la ventana de tiempo correspondiente.

El proceso mencionado en este apartado se ilustra en la figura 3.4.1.

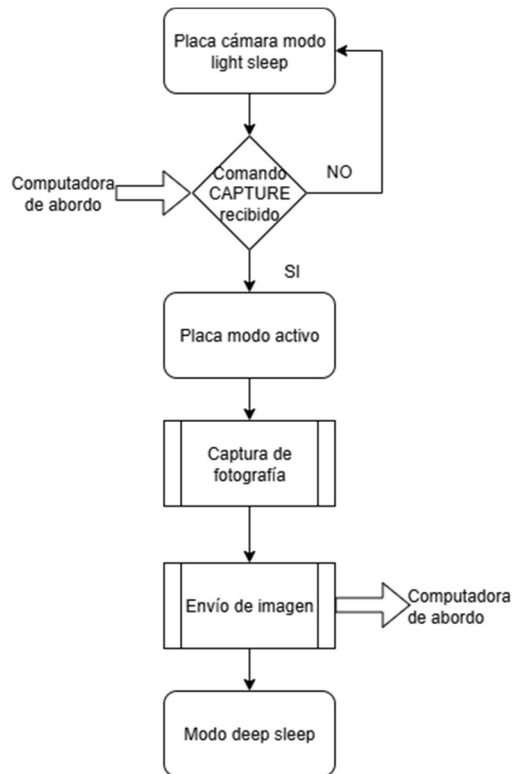


Figura 3.4.1. Diagrama de flujo de proceso de encendido y transmisión de la placa de cámara ante confirmación desde computadora de abordó durante el primer encendido.

3.4.5 Configuración de comunicaciones en microcontrolador

El apartado de las comunicaciones WiFi, a nivel microcontrolador, se realiza con la librería “Wifi.h” y “esp_wifi.h”.

A nivel configuración, se establece el SSID y contraseña para conectarse a la red WiFi creada por la computadora de abordó. Los comandos necesarios para realizar esta operación se muestran en el Anexo B, figura B.4.

3.5 Proceso de captura de imagen: hardware y software

3.5.1 Hardware

La placa de cámara, como tal, consiste en dos placas separadas con funciones distintas: la primera placa contiene al microcontrolador ESP32S3, su alimentación y componentes físicos que hacen posible su funcionamiento y por otro lado la que contiene la cámara y genera las conexiones físicas hacia la placa principal.

Para llevar a cabo la captura de la fotografía, a nivel hardware, se debe considerar y configurar los siguientes pines:

- *External Clock* (XCLK): Referencia de reloj.
- *Pixel Clock Pin* (PCLK): Indica que hay un dato correspondiente a información de un píxel listo para enviarse.
- *Data Pins* (D0-D7): La información del píxel viaja de manera paralela a través de ocho pines.
- *Vertical Sync* (VSYNC): Pin para indicar el sincronismo vertical de una nueva línea de datos.
- *Horizontal Reference* (HREF): Pin para indicar finalización de barrido horizontal.
- *Serial Data* (SDA): Pin para el indicar inicio de captura mediante protocolo I2C.
- *Serial Clock* (SCL): Pin que marca el sincronismo de reloj para el envío de información por I2C.

Estos pines, que van a cumplir una función unívoca para la cámara, quedan afectados únicamente a la operación de ella y los procesos que esta requiera, sin posibilidad de ser reconfigurados.

Para el apartado de la configuración de la imagen, la cámara ofrece la posibilidad de ajustar los siguientes parámetros:

- Resolución: Tamaño de imagen en píxeles.
- Calidad: Factor de compresión de la imagen solo para las imágenes en formato JPEG. Permite desde 0 hasta 63, siendo 0 la menor compresión y 63 la máxima.
- Contraste: Diferencia de brillo entre áreas de la imagen. Permite valores enteros entre -2 y 2.
- Brillo: Luminosidad que genera cada píxel de la imagen. Permite valores enteros entre -2 y 2.
- Saturación: Medida de que tan fiel se va a representar el color tal cual es. Permite valores enteros entre -2 y 2.
- Efecto especial: Permite aplicar filtros de color a las fotografías. En este caso, permite aplicar escala de grises para nuestra captura.

Tanto la declaración de pines como configuraciones iniciales de parámetros de captura se muestran en el Anexo B, figura B.3

3.5.2 Software

Una vez realizada la configuración, en su primer arranque, la cámara se mantiene inicializada a la espera de que se pida la fotografía. Cuando se solicite, se accede a la fotografía mediante el puntero que indica en que dirección de memoria se encuentra almacenada. Por defecto, la cámara realiza capturas de manera periódica y al realizar el llamado se accede a la última captura realizada.

Con el fin de ahorrar energía, se modifica el modo de captura para que sea únicamente bajo demanda. Esto se realiza con la configuración adicional de la propiedad **grab_mode**, asignando que la captura se ejecute solo cuando el buffer no tenga información y no generando la sobrescritura automáticamente, ya que esto está pensado para transmisión de video.

El proceso completo de configuración y captura que se llevará a cabo se muestra como diagrama de flujo en la figura 3.5.1.

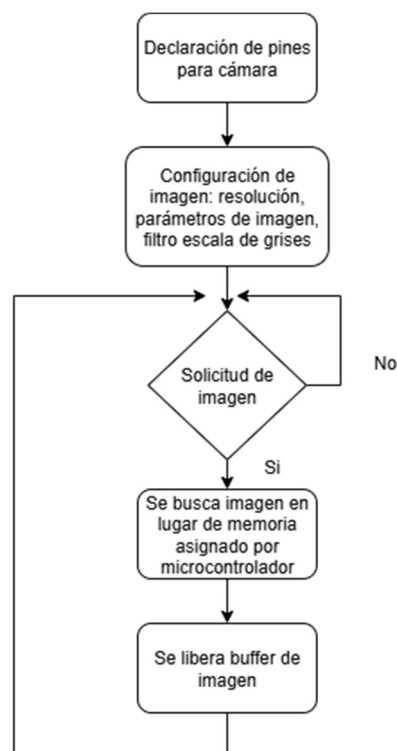


Figura 3.5.1. Diagrama de flujo de configuración y captura de imagen.

A nivel de la implementación, se hace uso de la librería `esp_camera.h` y la porción de código para este fin se muestra en el Anexo B, imagen B.6, línea 205.

Esta librería, en primera instancia, recibe la configuración de cada uno de los pines necesarios para la sincronización de la captura junto con la escritura del archivo.

Mediante la ejecución de la función "`esp_camera_fb_get()`" el puntero `fb` almacena la dirección de memoria donde se almacenan todos los parámetros de dicha fotografía, los cuales responden a la estructura `camera_fb_t` definida en la librería.

Una vez capturada, inicia el envío de la fotografía a la computadora de abordo junto a su correspondiente suma de comprobación *checksum*. Esto se realiza mediante el comando "`client.write`" apoyándose en las librerías WiFi empleadas. A partir de este punto, queda delegada la tarea del envío al módulo de comunicaciones.

3.6 Tratamiento de imágenes

La imagen, una vez capturada se entrega como un arreglo de matrices de datos. Consiste en tres matrices de $m \times n$ elementos, siendo m y n los píxeles horizontales y verticales que hacen a la imagen. Cada una de las matrices contiene las componentes de color rojo, verde y azul de cada uno de los píxeles.

En la memoria interna del microcontrolador se lleva a cabo el proceso de reconstrucción de la imagen, a partir de todos los bytes de información que se han enviado desde la cámara.

La placa permite la captura y formato final de imagen bajo los estándares RGB565 y YUV424. A efectos de este proyecto, se vuelven inviables dado la gran cantidad de información por píxel que proporciona. En búsqueda de obtener y trabajar con imágenes comprimidas para facilitar su envío a la estación terrena, se opta por usar el formato JPEG.

Como fundamentación adicional, el trabajo final de carrera llamado “Protocolos y técnicas de compresión de imágenes para la transmisión en entornos espaciales” investigó y concluyó que el formato JPEG es el óptimo para el envío con pérdida de información en entornos espaciales de órbita LEO [14].

3.7 Gestión de la energía

El microcontrolador ofrece distintos modos de bajo consumo, o modos de sueño. Dependiendo de las funcionalidades que se quieran mantener activas al momento de la implementación se selecciona cuál de ellos usar.

El modo de menor consumo energético se le denomina *Deep Sleep* o sueño profundo. Presenta un consumo informado de 3 mA. Este modo apaga todos los componentes del microcontrolador y habilita el uso del procesador de ultra bajo consumo. Para sacar al microcontrolador de esta configuración, se deberá: ingresar una señal en un pin de propósito general asignado para tal fin, finalizar el conteo de un temporizador preseteado de bajo consumo o cuando finalice una rutina configurada en el procesador de bajo consumo.

Ya en un consumo intermedio, se tiene el modo *Light Sleep* o sueño ligero. Presenta un consumo de 5,47 mA sin haber inicializado ni conectado ningún periférico. No apaga completamente la RAM y la CPU como hace *Deep Sleep*, pero permite suspenderlos de manera de reducir el consumo, haciendo que el código se ejecute al retornar desde el mismo punto de ejecución que finalizó. Apaga la radio Wi-Fi para generar ahorro, por lo que puede salir de este modo únicamente por variación en los pines de entrada determinados para tal fin, por finalización de conteo en reloj interno, por detección de comunicación UART o por finalización de rutina ejecutada en el procesador de bajo consumo.

El modo de *Modem Sleep* mantiene todas las funcionalidades activas de CPU y RAM, pero apaga las funcionalidades de comunicaciones inalámbricas. Se mantiene a la espera de que llegue algún paquete de comunicaciones para salir de este modo. Si bien el consumo es elevado, de alrededor de 44,57 mA, sigue siendo muy inferior a los casi 250 mA que puede llegar a consumir en modo activo. Por ello, este modo de funcionamiento permitirá ahorrar energía cuando

se esté esperando recepción de información como el comando desde la computadora de abordo.

Por lo expuesto, se vuelve indispensable usar una combinación de estos modos para extender al máximo la vida útil de la carga de las baterías.

Una vez desplegado el contrapeso y encendido el microcontrolador, se mantendrá en modo Modem Sleep a la espera del comando de captura inicial, el cual permitirá cumplir la función primaria de la misión de fotografiar el estado de despliegue de antena y orientación del satélite. Una vez capturada la fotografía y enviada a la computadora de abordo, el sistema ingresará nuevamente en modo Deep Sleep por un intervalo de tiempo de 24 horas, para de esta manera contar con la posibilidad de realizar una captura por encima del territorio argentino y contar con un intervalo de tiempo regular para las capturas, aguardando un nuevo comando desde la computadora de abordo para repetir el ciclo. El diagrama de flujo que muestra este proceso completo se muestra en la figura 3.7.1.

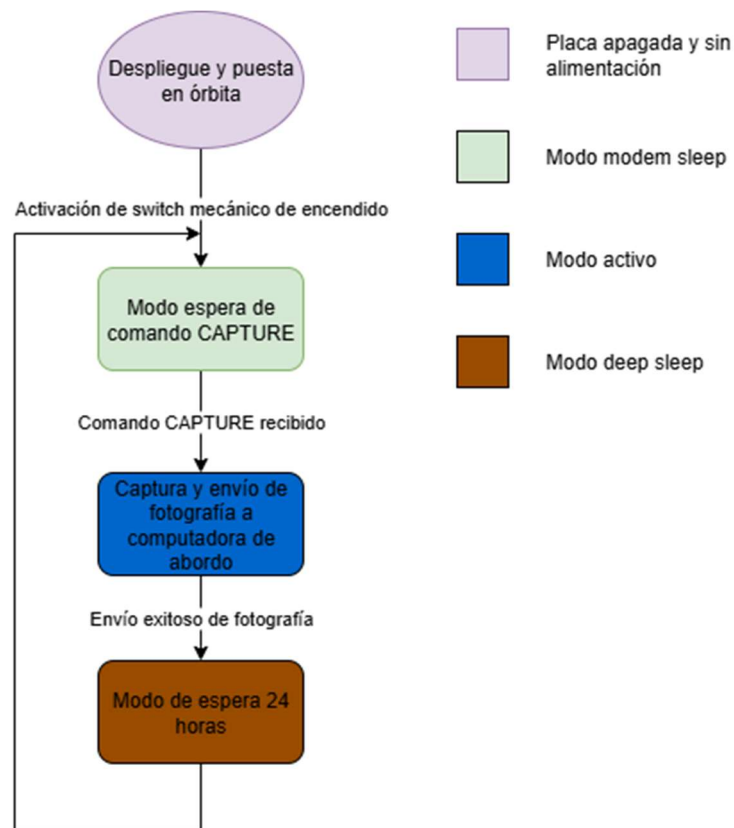


Figura 3.7.1. Diagrama de flujo de operación de placa de cámara durante misión primaria, captura de imagen para conocer estado de despliegue de antenas, boom y orientación final.

En la tabla 3.7.1 se muestran todos los consumos en cada uno de los estados de operación y cuánto tiempo se mantendrá cada uno de ellos durante el primer proceso de captura. Esto permite conocer la capacidad mínima que deben contar las baterías para poder realizar la misión primaria.

Modo de operación	Consumo de corriente en mA	Tiempo de operación durante misión primaria en minutos	Consumo energético en mAh
Apagado y sin alimentación	0	0	0
Light sleep	5,47	0	0
Modem sleep	44,57	15	11,14
Modo activo	110	5	9,17
Consumo total para la misión primaria	-	-	20,31

Tabla 3.7.1. Consumo de la placa cámara en cada uno de los modos de operación para la misión primaria, en función de tiempos estimados en base a pruebas realizadas y a tiempo de demora en despliegue máximo de las antenas.

Para el tiempo estimado en el cual se está en modo Modem Sleep, se consideró un período prudencial en el cual ocurre el despliegue del boom, el despliegue de las antenas y el envío del comando desde la computadora de abordó. El tiempo es de 15 minutos desde que ocurre el despliegue del boom.

Considerando el consumo calculado en la tabla 3.7.1, tenemos el requisito mínimo de capacidad que debe tener el conjunto de baterías para alimentar a la placa cámara durante toda la misión primaria. Esta capacidad mínima para las baterías resultó de **20,31 mAh**.

Para la misión secundaria, se evalúa la captura de una fotografía una vez cada intervalos regulares de tiempo. En la tabla 3.7.2 se evalúa el consumo energético total en estado de reposo para la cámara a lo largo de un mes.

Modo de operación	Consumo de corriente en mA	Cantidad de horas operativo por mes	Consumo total en un mes en mAh
Deep Sleep	3	720	2160

Tabla 3.7.2. Consumo de corriente de la placa cámara en modo Deep Sleep, la cantidad de horas operativas en este modo a lo largo de un mes y el consumo energético total en el mismo período.

Dada la finalidad de la misión secundaria, tomar imágenes en intervalos regulares de tiempo sobre el territorio argentino, es de suma importancia conocer cuando el satélite se encontrará sobrevolando el territorio argentino. La computadora de abordo contará con un sistema de detección de posicionamiento propio, el cual avisará a la placa cámara y permitirá la captura de la fotografía regular una vez se encuentre en el punto de la órbita deseado.

Dadas las características de los distintos modos de ahorro de energía que presenta la placa cámara, y en vistas de maximizar la eficiencia de la única carga de baterías, la placa permanecerá en modo Deep Sleep como condición normal. Cuando corresponda tomar la fotografía por haber pasado el período de tiempo establecido, conmutará al modo Modem Sleep durante una ventana de tiempo tal que permita estar disponible para enlazar comunicación con la computadora de abordo, para poder recepcionar el mensaje que informe que se encuentra encima del territorio argentino. Posterior al proceso de captura, procesamiento y transmisión de la imagen, volverá al modo Deep Sleep durante el mismo período a la espera de que pase el período de tiempo establecido para la próxima captura. El proceso completo se muestra en la figura 3.7.2

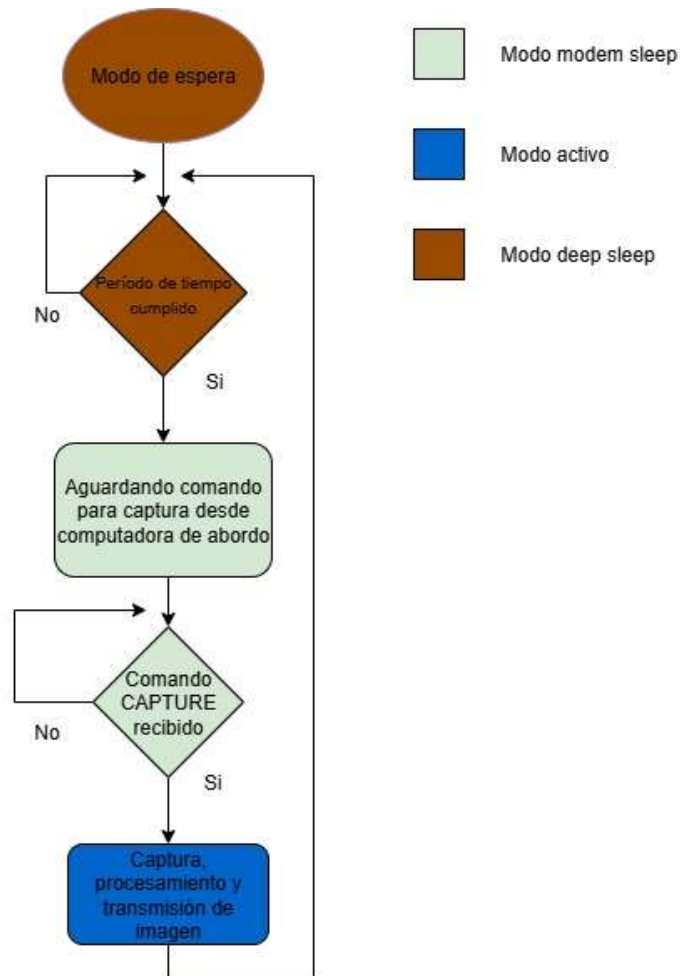


Figura 3.7.2. Diagrama de flujo de operación de placa de cámara durante la misión secundaria, captura regular de imagen.

El proceso de control de tiempo lo llevará a cabo el mismo microcontrolador. A partir de las funcionalidades que conserva en el modo Deep Sleep. Como muestra el diagrama de bloques funcional del microcontrolador, en la figura 3.7.3, las funciones asociadas al Real Time Clock (RTC) continúan con un consumo reducido, permitiendo la reactivación pasado el periodo de tiempo establecido por programa.

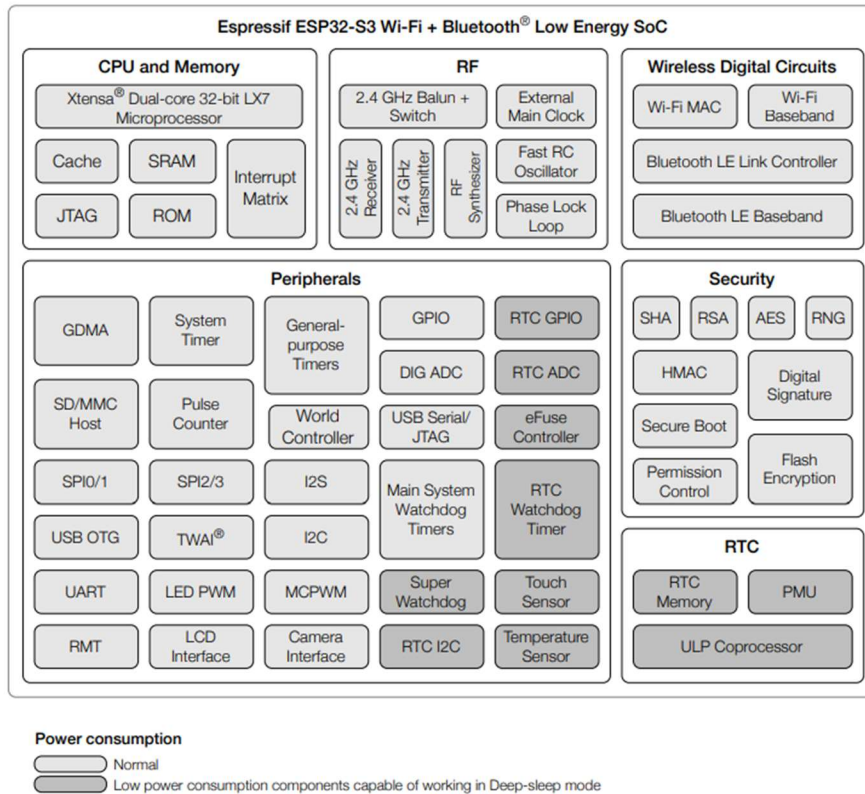


Figura 3.7.3. Diagrama de bloques funcional del microcontrolador ESP32-S3, mostrando las funcionalidades en modo activo (blanco) y modo Deep Sleep (gris). Reproducida de [15].

En las tablas 3.7.3 y 3.7.4 se calculan y consideran los escenarios en los que se capturará una fotografía cada quince días y siete días respectivamente. Se considera el tiempo de operación de cada uno de los modos durante un mes de misión, junto al consumo de corriente y energético que presentará cada uno.

Modo de operación	Consumo de corriente en mA	Tiempo de operación durante un único encendido en minutos	Consumo energético en mAh por encendido	Cantidad de encendidos durante un mes, considerando una fotografía cada 15 días	Consumo energético total en mAh en un mes
Deep Sleep	3	-	-	-	2160
Modem sleep	44,57	15	11,14	2	22,28
Modo activo	110	5	5,5	2	11
Consumo total en un mes	-	-	-	-	2193,28

Tabla 3.7.3. Consumo de corriente de la placa cámara en modo Deep Sleep Modem Sleep y activo a lo largo de un mes de misión, considerando dos capturas de imagen en dicho período de tiempo.

Modo de operación	Consumo de corriente en mA	Tiempo de operación durante un único encendido en minutos	Consumo energético en mAh por encendido	Cantidad de encendidos durante un mes, considerando una fotografía cada siete días	Consumo energético total en mAh en un mes
Deep Sleep	3	-	-	-	2160
Modem sleep	44,57	15	11,14	4	44,56
Modo activo	110	5	5,5	4	22
Consumo total en un mes	-	-	-	-	2226,56

Tabla 3.7.4. Consumo de corriente de la placa cámara en modo Deep Sleep Modem Sleep y activo a lo largo de un mes de misión, considerando cuatro capturas de imagen en dicho período de tiempo.

Teniendo en consideración el consumo aproximado de la misión secundaria en ambas simulaciones, junto a los modelos comerciales de baterías recargables que se encuentran en Argentina, se toma la decisión de **tomar una fotografía cada quince días** y utilizar **un arreglo de baterías de litio que alcance la capacidad requerida: 2193,28 mAh.**

La diferencia de valores entre el consumo total y la capacidad de ambas baterías en conjunto se debe a dos consideraciones: variaciones en los consumos imprevistas a nivel teórico y autodescarga. En el capítulo 4 se muestran los resultados de las mediciones realizadas para la placa en las distintas etapas de operación y condiciones ambientales que existirán en todos los estadios de la misión. La autodescarga entra en consideración debido a que, entre la última recarga de las baterías y el lanzamiento de la misión transportadora, habrá un intervalo de dos meses en los cuales la batería permanecerá totalmente apagada. El impacto se traducirá en que parte de la carga se pierda, debido a las características químicas de los materiales de la batería.

En el caso de este proyecto, la afectación por autodescarga solo será relevante hasta los momentos previos a la puesta en órbita. Debido a que ocurrirán más de 30 días entre que se hace entrega del satélite a la misión lanzadora y este se ponga en órbita, la autodescarga se vuelve un factor muy importante a considerar

debido a la reducción de la capacidad de carga útil que se dispondrá. En el vuelo, previo al despliegue del contrapeso, se prevé un periodo de quince minutos.

Considerando el fenómeno de autodescarga previo al lanzamiento, fundamentado en la información provista por un fabricante de baterías de las capacidades requeridas para implementar, se debe llevar a 1,1 veces la capacidad requerida para mitigar este fenómeno [16]. Por ello, **la capacidad del arreglo de baterías, considerando la autodescarga, debe ser de 2412,6 mAh como mínimo.**

En función de los modelos comerciales de baterías, el arreglo utilizado consiste en cuatro baterías de 600 mAh y una batería de 80 mAh. Esta elección, totaliza 2480 mAh, valor por encima del convenido en el párrafo anterior.

Dichas baterías deben tener una disposición espacial en el interior del contrapeso tal que permitan la interconexión entre ellas y con la cámara, junto a la consideración de la ubicación que necesita la cámara para la captura. Las dimensiones de las baterías se detallan en la tabla 3.7.5.

Capacidad de la batería	Longitud en centímetros	Ancho en centímetros	Espesor en centímetros
600 mAh	3,5	2,5	0,6
80 mAh	2	1,5	0,3

Tabla 3.7.5. Dimensiones de las baterías a utilizar para la alimentación de la placa cámara.

3.8 Encendido mecánico, encapsulado y blindaje

3.8.1 Encendido mecánico: diseño y consideraciones

Debido a que el contrapeso no se desplegará hasta un tiempo posterior a la entrada en órbita y estabilización, junto a la condición de que todos los sistemas electrónicos deben permanecer desconectados hasta el momento que se alcance la altura objetivo, se debe contar con un mecanismo de encendido para el sistema de cámara físico y asociado a dicha acción.

Para ello, se implementó un switch mecánico comercial normalmente cerrado (NC).

Debido a que el contrapeso permanecerá contenido en un compartimento hasta su despliegue, estará presionando el switch hasta que abandone el lugar.

El switch interrumpirá el paso de corriente entre las baterías y la placa en posición presionada. Al liberarse, habrá paso de corriente hacia la placa y comenzará la rutina mostrada en el apartado 3.7.

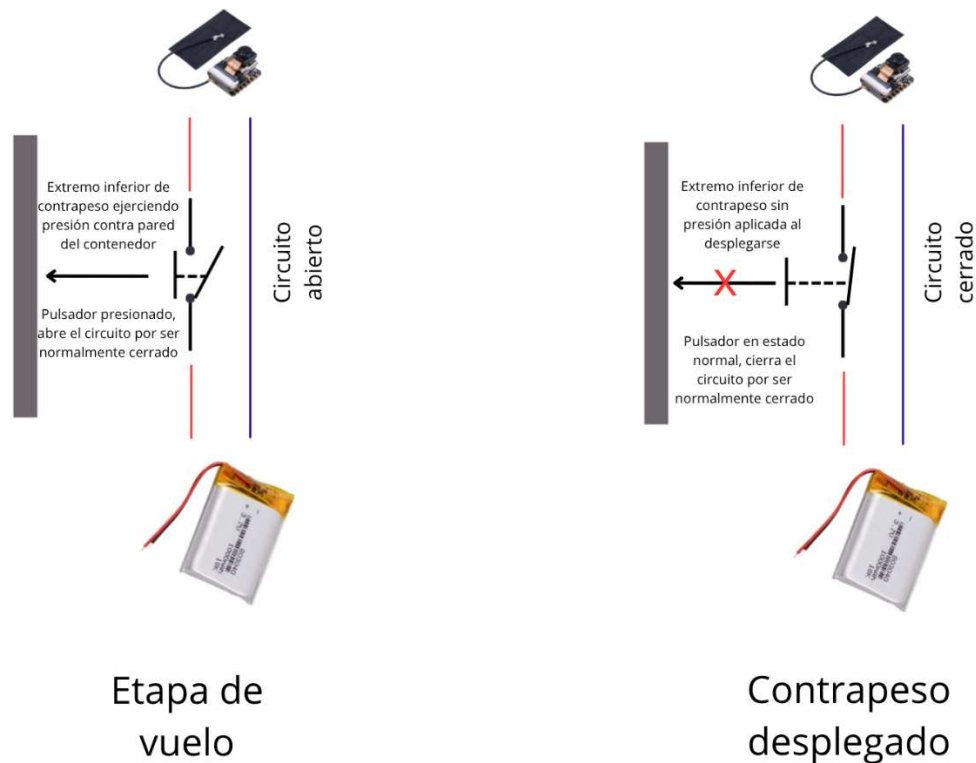


Figura 3.8.1. Bosquejo del conexionado de la placa al switch de encendido, vinculado mecánicamente a la tapa inferior en contacto del contrapeso con el compartimento contenedor.

3.8.2 Radiación: como afecta y protección

La radiación presente en el espacio, y en particular en la órbita LEO, se presenta como partículas cargadas de energía que impactan contra los chips. A nivel microscópico, el protón o ion interacciona con el transistor de efecto de campo o bipolar, generando cambios de estado en dicho componente, derivando en valores erróneos en las memorias o en la transmisión.

Para proteger al proyecto ante esto, se implementará dos medidas de protección: blindaje físico y detección/corrección de errores.

El blindaje físico contra la radiación consistirá en el mismo recubrimiento que provee la estructura del contrapeso hecha de aluminio T-6061, junto a una malla a modo de blindaje aún por definir para el proyecto. Este tipo de aluminio presenta una gran capacidad de absorción a la radiación electromagnética, logrando atenuaciones de hasta 93 dB para frecuencias en el orden de los GHz [17].

La detección/corrección de errores consistirá en una doble comprobación de la fotografía durante y finalizado el envío. Por un lado, el protocolo de transmisión TCP en cada uno de los paquetes genera una comprobación de la información enviada mediante un código CRC para cada uno de ellos, pidiendo el reenvío en caso de que haya sido vulnerado. Por el otro se genera por código una suma algebraica de los valores de cada uno de los bytes que componen a la fotografía, para su posterior contraste en la computadora de abordo una vez finalizada la transferencia.

3.8.3 Temperatura: como afecta y protección

Los rayos solares y la manera en que inciden sobre el satélite determinarán la totalidad del comportamiento térmico de la misión. En función de la densidad energética a la cual esté expuesta en ese momento, generará un aumento o disminución de temperatura debido a la radiancia de los rayos solares. El rango de temperatura al cual estará expuesto será de -50°C a 80°C , pudiendo ocurrir rápidas variaciones dentro de este intervalo, pero en ningún momento manteniendo estos valores durante períodos de tiempo prolongados.

El grado de afectación sobre la placa de cámara y baterías vendrá dado por el comportamiento que presenten sus partes. Por el lado del microcontrolador y componentes electrónicos de la placa habrá fatiga mecánica debido a las contracciones y dilataciones de los materiales externos por las variaciones de temperatura, aparición de corrientes de fuga debido a las altas temperaturas y aumentos significativos de ruido térmico. Para las baterías, junto a la fatiga térmica aparece el congelamiento de los electrolitos, generando disminución de la capacidad nominal de carga.

El último efecto para mencionar, son las corrientes de fuga y sobrecorrientes en las baterías debido a las altas temperaturas. Para mitigar estos efectos, se

implementa un blindaje físico y un circuito de conducción de calor. Se busca que todas las partes que componen al sistema de cámara estén en contacto, para que de esta manera la disipación de calor de la misma placa por la operación normal y de las baterías por entregar corriente ayude a mantener más estable y en un valor más elevado a la temperatura.

Al igual que para proteger de la radiación, se utilizará un recubrimiento de cinta aislante multicapa en el interior del contrapeso. La finalidad es proteger al conjunto de las variaciones bruscas de temperatura y de los valores extremos.

4. Verificación funcional, pruebas experimentales y resultados

Una vez definida la arquitectura de comunicaciones, los requisitos para el envío y la captura de la fotografía, junto a la gestión de la energía para llevar a cabo la misión primaria y secundaria, se realizan las pruebas de laboratorio.

Este capítulo presenta la metodología adoptada para realizar las pruebas sobre cada una de las partes del proyecto y sobre el conjunto en sí.

4.1 Enfoque adoptado para las pruebas

La validación del sistema se lleva a cabo por medio de una estrategia modular e incremental.

En primera instancia, se ensayan y prueban las funcionalidades asociadas a la captura en sí: tamaño de archivo final, tiempo de captura y transmisión para una fotografía con condiciones de imagen similares a las que habrá en órbita.

En segunda instancia, se evalúa el consumo energético del sistema bajo las diversas condiciones operativas previstas durante su funcionamiento. Se mide el consumo energético total y la condición de las baterías posterior a llevar a cabo estos procesos.

En tercera instancia se miden, instala y prueba el conjunto dentro del contrapeso. Se simulan las condiciones de misión, se prueba el sistema de encendido mecánico y posibles afectaciones tanto en el comportamiento como en los materiales.

4.2 Pruebas funcionales de transmisión de imagen

Se procede a realizar pruebas de envío en ambiente terrestre, con presión y temperatura normales. La distancia a la cual se coloca la placa de cámara con respecto a la computadora de abordo es un metro, la misma que habrá en la misión. La figura 4.2.1 muestra la disposición que tuvieron para las pruebas.

Al realizar esta prueba se deben considerar dos problemáticas. Por un lado, como responde el enlace ante la atenuación elevada que genera el atravesar el

cuerpo metálico del satélite. Por el otro, posibles complicaciones o afectaciones al tiempo de envío en estas circunstancias.

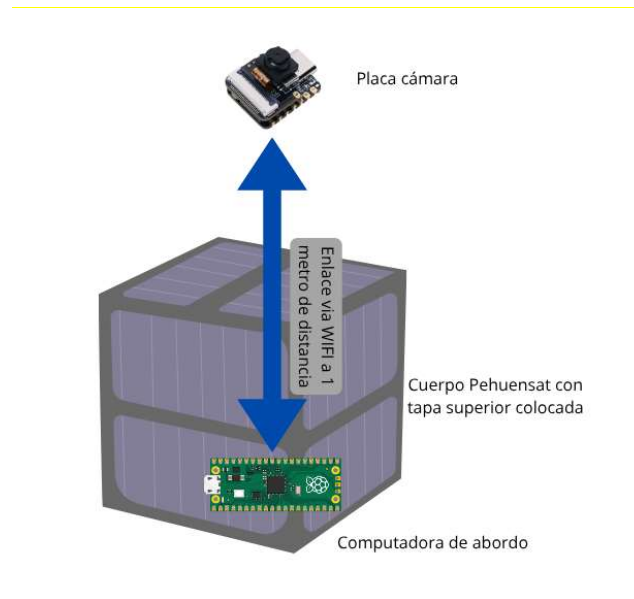


Figura 4.2.1. Esquema de trabajo para pruebas de envío de imagen con la computadora de abordo colocada en el interior del cuerpo del satélite y con la tapa cerrada.

La prueba concluye enviando y capturando todas las fotografías. La fotografía en varios intentos se pudo capturar y enviar a la computadora de abordo. La comprobación, nuevamente, se realiza de manera doble: por un lado, accediendo a la memoria interna de la computadora de abordo y visualizando el archivo con un programa de visualización de imágenes en la computadora; por el otro gracias a la comprobación empleada mediante código, la cual realiza una suma algebraica de los valores de luminancia de cada píxel, la almacena y al recibirse la fotografía realiza nuevamente la operación y compara ambos valores. Una de las imágenes tomadas se muestra en la figura 4.2.2.



Figura 4.2.2. Fotografía capturada desde la placa cámara y enviada mediante WI-FI a la computadora de abordo, ubicada dentro del cuerpo de satélite y con la tapa de intermedio, alimentado con cable color negro, para posterior descarga y visualización de imagen.

4.3 Pruebas funcionales de consumo de corriente en distintos modos de operación

Se realizan mediciones de corriente en cada uno de los modos de operación estipulados para la misión: *Light Sleep*, *Modem Sleep*, *Deep Sleep* y modo activo.

Estas mediciones, si bien contemplan el gasto energético de cada uno de los modos, es importante mencionar que se llevarán a cabo encendiendo y empleando cada periférico correspondiente, simulando las condiciones de la misión.

Las condiciones de cada uno de los modos son:

- Modo activo: módulo de comunicaciones Wi-Fi y de cámara encendidos y funcionando al cien por cien de capacidad.
- Modo *Modem Sleep*: módulo de comunicaciones Wi-Fi encendido parcialmente, solo activado cuando hay un mensaje a procesar en el buffer de recepción. Módulo de cámara totalmente apagado debido a que se encenderá posterior al procesamiento de dicho mensaje.

- Modo *Deep Sleep*: módulo de comunicaciones Wi-Fi y de cámara totalmente desenergizados. No se apagarán por software debido a que el operar esta placa en este modo genera un reinicio de manera automática.

Las mediciones se llevarán a cabo con el instrumento multímetro OWON OW18A, cuyos parámetros metrológicos quedan especificados en su manual de instrucciones [18] y se detallan en la tabla 4.3.1. Este instrumento pertenece al pañol del Departamento de Electrotecnia de la Facultad de Ingeniería.

Marca	Modelo	Parámetro metrológico	Rango de medición	Resolución	Cota de error
OWON	OW18A	Corriente Continua	600 μ A- 6000 μ A	0,1 μ A	$\pm 0,8\%$ medición + 2 dig
			60 mA – 600 mA	0,01 mA	$\pm 0,8\%$ medición + 2 dig
		Tensión continua	20,000 V	1 mV	$\pm 0,1\%$ medición + 2 dig

Tabla 4.3.1. Rango de medición, resolución y cota de error para mediciones de corriente continua del multímetro OWON OW18A. Extraído de [18].

En la tabla 4.3.2 se muestran los resultados de las mediciones de corriente:

Modo de operación	Deep Sleep	Light Sleep	Modem Sleep	Activo
Consumo de corriente en mA	1,97	3,7	34,92	200

Tabla 4.3.2. Mediciones de corriente de la placa en cada uno de los modos de operación con los periféricos correspondientes encendidos.

Simulando una prueba funcional de encendido, captura y transmisión con los modos mencionados, se midieron caídas de tensión del orden del diez por ciento de la tensión nominal de las baterías. Este valor se midió una vez finalizada la

prueba con el mismo instrumento configurado con el modo de medición de tensión continua.

En los minutos posteriores a la primer medición de tensión posterior a la prueba operativa, se midió la tensión de las baterías nuevamente para observar la variación de esta magnitud. La tensión volvió a ser el valor original antes de energizar la placa y realizar las pruebas de consumo.

4.4 Pruebas en condiciones espaciales simuladas, armado del conjunto en contrapeso y encendido mecánico

Se realizan pruebas con enfoque a cómo será la respuesta del conjunto de cámara y baterías ante las situaciones ambientales de la misión:

- Temperatura máxima de 85 °C.
- Temperatura mínima de -30 °C.
- Transferencia de temperatura únicamente por radiación y conducción.
- Radiación solar.
- Vacío.

El principal factor que condicionará la duración en el tiempo de la misión será su respuesta ante los valores de temperatura y a como esta varíe. Este fenómeno afecta directamente debido a la densidad de energía recibida por los rayos solares. En función de la altura final de misión, tipo de órbita, grado de inclinación y tiempo en el cual estará expuesto a los rayos solares, mediante un modelo diseñado y evaluado por estudiantes de Ingeniería Mecánica se genera el modelo que predice los valores de temperatura mencionados en el párrafo anterior.

El modelo empleado para estimar los valores de temperatura citados en el párrafo anterior fue diseñado y evaluado por estudiantes de Ingeniería Mecánica, participantes del equipo térmico del Pehuensat III. Este modelo utiliza los siguientes parámetros para realizar las estimaciones: altura final de misión, tipo de órbita, grado de inclinación de órbita y tiempo en el cual estará expuesto a los rayos solares.

Los valores de los parámetros orbitales necesarios para la estimación son:

- Altitud.
- Inclinación.
- Periodo orbital
- Razón día/noche.
- Hora local del nodo descendente.
- Excentricidad.

Las pruebas funcionales en el aspecto mecánico que se realizan en las condiciones ambientales descritas consisten en:

- Encendido en valor de temperatura más bajo.
- Operación en valor de temperatura más bajo.
- Encendido en valor de temperatura más alto.
- Operación en valor de temperatura más alto.

A continuación de dichas pruebas, se muestran los resultados de testeado del conjunto armado dentro del contrapeso y la transmisión llevada a cabo con ello. Permite conocer la degradación de la señal debido a la atenuación generada de atravesar el aluminio. Se registra la potencia de salida del emisor y la de entrada en el receptor y dicha diferencia resulta en la atenuación por estos materiales, ya que la generada por la transmisión en el aire es despreciable en contraste con las otras dos.

Por último, se prueba el mecanismo de encendido físico en condiciones similares a la que presentará en el despliegue. La finalidad es evaluar su implementación y posibles puntos de mejora.

4.4.1 Pruebas bajo condiciones de temperatura

Prueba en frío

Se ensaya el encendido y operación de la placa de cámara en una temperatura ambiental de -30 °C.

Para llevar a cabo estas pruebas, se hizo uso del congelador ubicado en el Laboratorio de Propiedades Mecánicas, perteneciente al Departamento de

Mecánica de la Universidad Nacional del Comahue. Los detalles cuantitativos de la prueba se mencionan en la tabla 4.4.1.1

Congelador	
Temperatura alcanzada (ambiental)	Tiempo de exposición a temp.
-30°C	10 min

Tabla 4.4.1.1. Temperatura alcanzada y tiempo de enfriamiento del dispositivo encargado de enfriar la placa y baterías para pruebas en frío.

La experiencia consiste en introducir el conjunto de placa y baterías en el congelador durante diez minutos, para lograr uniformidad en la temperatura que alcanza cada uno de los puntos del conjunto.

Durante la experiencia, se coloca en contacto directo la batería con el área de disipación térmica de la placa. Esta configuración se realiza con la finalidad de mantener más alta la temperatura de la batería durante la experiencia.

La prueba de funcionalidad se realiza con el módulo dentro del congelador, sometido a la temperatura buscada. Fuera del congelador, se halla la placa que simula la computadora de abordo, proveyendo la red Wi-Fi a la cual se va a conectar. El monitoreo de la placa se realiza mediante una laptop conectada a la misma red Wi-Fi, debido a que la imagen que devuelve la cámara es totalmente oscura por realizar las pruebas con la tapa cerrada del congelador.

Se realiza en dos etapas: la primera consiste en verificar mediante conexión wifi la operación de la placa y la segunda transmitiendo la imagen en tiempo real.

En la primera etapa, cada intervalos regulares de tiempos se enviaba un comando a la placa para constatar que siguiera encendida, al igual que la consulta tipo “ping” enviada mediante Wi-Fi.

En la segunda etapa, empleando la misma red Wi-Fi, se consulta mediante comando “ping” la operación de la placa y transmitiendo en directo lo que se está visualizando y se modificaban en tiempo real los parámetros de fotografía. Esta etapa, a diferencia de la primera, involucra una mayor disipación de potencia de

parte de la placa, por lo que se preveía un mejor desempeño gracias a que permitiría mantener la temperatura de la batería en un valor mayor.

Los resultados de la prueba fueron:

- En ambos casos las pruebas pudieron concluir exitosamente, permitiendo medir y transmitir durante el tiempo establecido.
- Al retirar la placa y medir temperatura de manera instantánea, la superficie de contacto batería-placa logró una temperatura mínima de 5°C positivos, muy por arriba de los -30°C los cuales se encontraba el congelador.

La figura 4.4.1.1 muestra la disposición empleada para las pruebas. Se utilizó la computadora como intermediario para consultar el estado de envío de paquetes y de información desde la placa cámara.



Figura 4.4.1.1. Disposición de equipo de trabajo para las pruebas en frío, llevadas a cabo en el congelador del Laboratorio de Propiedades Mecánicas.

Pruebas en altas temperaturas

En el siguiente ensayo se testea el desempeño del conjunto de placa cámara junto a las baterías de la tecnología elegida.

Para llevar a cabo estas pruebas, se hace uso de una lámpara infrarroja de 250 W y un diámetro de 125 milímetros. La misma es capaz de entregar una potencia

de 5 watts a una distancia de 4 centímetros. Las características del instrumento de medición de temperatura se mencionan en la tabla 4.4.2.

Marca	Modelo	Parámetro metrológico	Rango de medición	Resolución	Cota de error
Mastech	MS8229	Temperatura	0 °C - 400°C	1°C	±2°C

Tabla 4.4.1.2. Rango de medición, resolución y cota de error para mediciones de temperatura del multímetro Mastech MS8229. Extraído de [19].

La experiencia consiste en colocar el conjunto dentro de una maqueta del contrapeso de aluminio, la cual se expone de manera directa a la luz de la lámpara. La cara externa está ubicada enfrente de la fuente de energía, mientras que el cuerpo hueco contiene la batería, la cámara y dos sensores de medición de temperatura: uno ubicado en contacto con la cara externa expuesta a la fuente de luz, y la otra entre medio de la batería y la placa, las cuales están colocadas espalda con espalda. Un acercamiento particular a la cámara y los componentes que se alojan en el interior del cuerpo que simula el contrapeso se muestra en la figura 4.4.1.2. La disposición de los elementos para las pruebas se muestra en la figura 4.4.1.3.



Figura 4.4.1.2. Disposición de cámara y batería espalda contra espalda, en el interior del volumen usado para simular el contrapeso, junto con su antena correspondiente y sonda de medición de temperatura.

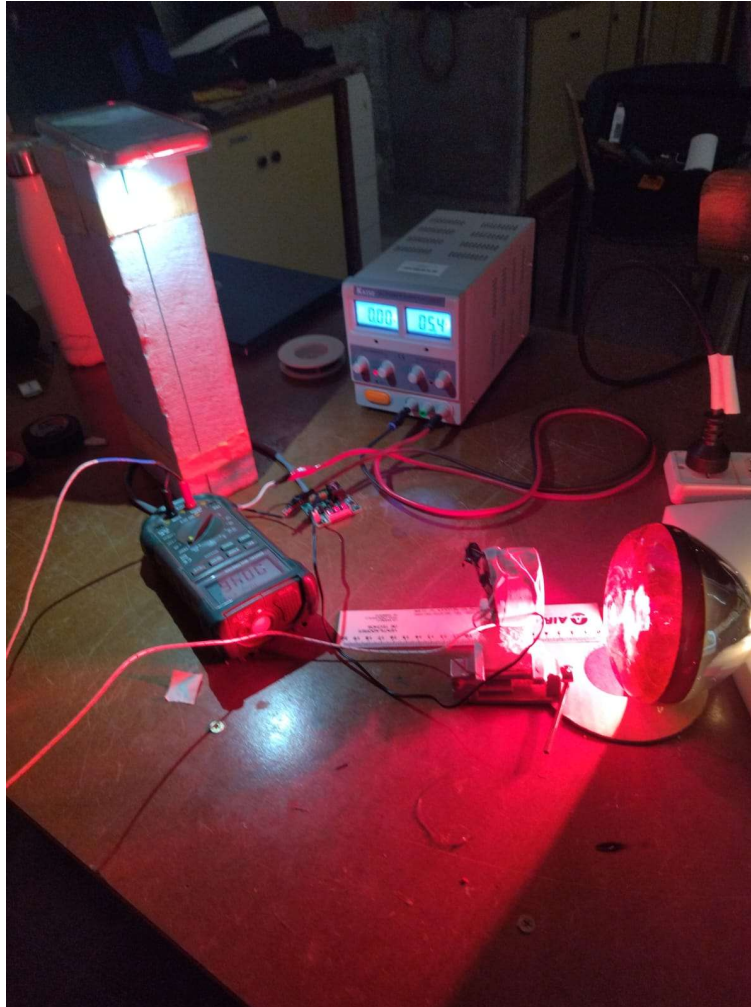


Figura 4.4.1.3. Prueba de ensayo térmico expuesto ante lámpara infrarroja. En la parte derecha se visualiza la lámpara, a continuación, la maqueta del contrapeso con una de sus caras expuesta a la fuente energética.

El objetivo es evaluar el desempeño de la placa, el suministro energético de las baterías (encendido/apagado y mantenerse encendido) y contrastar el comportamiento térmico del contrapeso y del conjunto de elementos de este proyecto.

Los resultados de la prueba fueron:

- La placa mantiene comunicación en todo momento. Permite la comunicación, recibe y procesa respuestas de la placa de computadora de abordaje en todo momento. Realiza el envío de fotos de manera satisfactoria.

- La interfaz batería-cámara presenta una inercia térmica mayor que la cara del contrapeso expuesta a la fuente de luz. Mientras la superficie metálica supera los 100°C, la interfaz llega a 80°C varios minutos después.
- Al desenergizar la lámpara y evaluar la respuesta, se comprobó la misma tendencia que el punto anterior: la inercia térmica de la superficie exterior era menor a la de la interfaz del conjunto. La comunicación y envío de datos se mantuvo operativa en todo momento a lo largo de este proceso.

4.4.2 Pruebas de transmisión con el conjunto ensamblado en contrapeso

En condiciones de temperatura y presión ambientales terrestres, se realiza la transmisión de un archivo de imagen entre la placa cámara y la computadora de abordaje dentro de sus respectivos armazones.

La finalidad de esta prueba es medir tanto en el receptor como el emisor las potencias de transmisión y recepción. Debido a la existencia del material metálico de los armazones, existe una degradación de la señal por el paso de las ondas electromagnéticas a través de estos materiales, despreciando la atenuación del espacio libre por ser mucho menor a la que genera la penetración en los elementos metálicos.

Para la medición, se hace uso de la medición nativa que genera la placa cámara a partir de su chip de comunicaciones.

Las pruebas se llevan a cabo colocando ambos elementos a una distancia de 1 metro, tal cual será una vez puesto en órbita. La disposición es la misma que se utilizó en se muestra en la figura 4.2.1.

Los resultados de la medición arrojaron los siguientes resultados:

- Potencia de transmisión: -10 dBm.
- Potencia de recepción: -50 a -60 dBm.
- Atenuación total del enlace: 50 dB.

- Sensibilidad del receptor Wi-Fi Raspberry Pi Pico W: -70 a -96 dBm (54 Mbps y 1Mbps respectivamente)

Con el desempeño mostrado del enlace, se logra calificar el apartado de comunicaciones con respecto a las potencia de transmisión. Se descarta el uso de elementos activos adicionales que la aumenten. La fotografía fue recibida en todas las iteraciones de las pruebas llevadas a cabo.

4.4.3 Pruebas bajo condiciones de vacío

Se somete a la placa y a las baterías a las condiciones de vacío para evaluar posibles deformaciones en los materiales y afectaciones al desempeño. Durante esta evaluación, no estarán conectadas las placas ni alimentadas, por lo que solo consiste en un ensayo sobre las características física y posibles variaciones. Se contrasta dichas características antes y después de la exposición a las condiciones de vacío.

Las pruebas consisten en colocar a los elementos dentro de una cámara de vacío durante un periodo de treinta minutos. Este periodo de tiempo se elige para simular el espacio temporal en el cual entraría en órbita la misión, se estabilizaría y desplegaría el contrapeso y las antenas.

Las pruebas se llevaron adelante en el laboratorio del Departamento de Química, con asistencia de la Dra. Laura Fernandez. El equipo utilizado es una cámara de vacío marca O.R.L, la cual permite variar la temperatura y presión interna.

En el día de la realización de las pruebas, el estado del tiempo provisto por AIC indicaba una presión atmosférica en Neuquén de 754,46 mmHg. El equipo de vacío indicaba una presión relativa de -520 mmHg y 30°C de temperatura, generando por ende una presión dentro de ella de 234,46 mmHg. Por cuestiones de degradación del equipo debido al uso no se alcanzaba niveles mayores de vacío, sin embargo, en una estimación simple, este nivel de presión corresponde a una altura de 9 km sobre el nivel del mar.

Para evaluar las posibles deformaciones y afectaciones al desempeño de los elementos, se tomaron las medidas de las baterías y la tensión, tanto de manera previa como posterior a la experiencia. Se eligió este enfoque ya que resultaba

imposible realizar las mediciones en la condición de vacío como tal, debido a llevarse a cabo en una cámara cerrada. Los resultados se muestran en la tabla 4.4.3.

	Batería 1	Batería 2
Tensión previo a pruebas de vacío	3,56 V	3,54 V
Tensión posterior a pruebas de vacío	3,56 V	3,54 V
Medidas previo a pruebas de vacío	24,3 mm de ancho x 5,5 mm espesor	24,3 mm de ancho x 5,5 mm espesor
Medidas posteriores a pruebas de vacío	24,3 mm de ancho x 5,5 mm espesor	24,3 mm de ancho x 5,5 mm espesor

Tabla 4.4.3. Resultados de mediciones para baterías y placa cámara al ensayar en cámara de vacío.

Al finalizar las pruebas, no se encuentran variaciones en ninguna característica física de las baterías ni en su nivel de tensión.

Para evaluar a la placa cámara, se ensaya posteriormente una prueba de encendido, captura y envío de fotografía con alimentación externa y con alimentación de baterías. En ambos casos la prueba concluyó correctamente.



Figura 4.4.3. Cámara de vacío realizando el ensayo, con las baterías y placa cámara en su interior.

5. Conclusiones

En este trabajo se diseñó e implementó un sistema de cámara fotográfica con alimentación propia y conexión inalámbrica con la computadora de a bordo del satélite Pehuensat III. Este sistema permite la captura de imágenes que realimentarán el estado de despliegue del sistema de antenas, del contrapeso y posición angular final del satélite una vez estabilizado gracias a la acción del contrapeso. El sistema se diseñó e implementó dentro de las condiciones de tamaño y peso establecidas para el contrapeso, críticas para que este elemento logre su función principal de detener la rotación angular del satélite.

La implementación de baterías, cámara y electrónica, sujeto a los eventos que puedan ocurrir y desempeño real de la misión, logrará funcionar durante, al menos, 30 días en cuanto a la provisión de energía y protección de la electrónica asociada.

Se midieron las características de consumo del conjunto de la placa ante distintas situaciones de funcionamiento. Se ensayó el ensamblado de las baterías y la cámara dentro del compartimento asignado para la misión. Se comparó su desempeño real en contraposición a lo informado de manera teórica.

Se evaluó el desempeño de la cámara ante situaciones adversas, lo más próximas posibles a las condiciones reales de funcionamiento en misión, sujeto al equipamiento e instalaciones disponibles. Se ensayó el encendido, respuesta del sistema y transmisión de imágenes ante condiciones individuales, no simultáneas, de temperaturas ambientales de -30°C , 100°C y presión de 234,66 mmHg. En estas condiciones, el sistema mostró ser robusto y cumplió con los objetivos pactados para las características orbitales. Si bien las condiciones de presión se encuentran lejanas a las que presentará en órbita, la buena respuesta ante temperaturas críticas permite tener un excelente acercamiento del comportamiento que la misión tendrá una vez entrado en funcionamiento.

La simultaneidad de condiciones vacío-temperaturas altas y vacío-temperaturas bajas, no se pudieron evaluar de manera directa, pero ello no quita que cuando se presenten la respuesta no sea satisfactoria. El peso sobre la degradación de

los materiales y el comportamiento de las cargas eléctricas es mayor en el caso de la temperatura que en el del vacío, infiriendo que el desempeño del sistema será correcto cuando ocurran estas condiciones.

Se ensayó el encendido y transmisión para obtener una fotografía de una calidad aceptable según los parámetros establecidos, tal que permitirá discernir el satélite, la superficie terrestre, las antenas desplegadas y la posición angular final del satélite. Esta imagen, tiene un peso de archivo menor a 30 kilobytes, lo que permitirá su descarga en hasta diez pasadas con línea de vista con la estación terrena junto con una calidad de imagen satisfactoria.

Si bien se diseñó un sistema de encendido mediante medios físicos, empleando un interruptor mecánico asociado al compartimento en el que viajará el contrapeso, quedan pendientes las pruebas que simulen esta condición.

El mecanismo de estabilización térmica consistirá únicamente en mantener en contacto la superficie disipadora de calor de la placa a alguna de las caras de las baterías. La misma disipación generada por los elementos y el mantenerlos en contacto hará más robusto el conjunto de elementos y brindará una inmunidad mayor a las bajas temperaturas.

Al quedar aún por definir en detalle las características del recubrimiento para proteger de las bajas temperaturas y de la radiación, será necesario evaluar las modificaciones que la implementación de estos conllevará a las dimensiones del interior del contrapeso. Se deberá evaluar si es necesario una nueva disposición para las baterías y la placa cámara, junto a la mejora que introducirá en cuanto a la inmunidad a la radiación electromagnética.

El desarrollo y evaluación de este sistema, en el apartado de pruebas térmicas, abre la puerta a replicar la metodología llevada a cabo para los demás subsistemas electrónicos que componen al proyecto Pehuensat III.

A raíz de lo trabajado a lo largo del presente proyecto, surgen puntos de mejora, desarrollos e investigaciones posteriores, en vista de optimizar distintos aspectos:

- Investigación más exhaustiva de desempeño de baterías: en este trabajo se abordó y eligió la tecnología de polímero de litio para emplearla en las baterías de alimentación. Si bien esta tecnología está contrastada y existen casos concretos documentados de su uso en ámbito espacial, un seguimiento mayor y evaluación de desempeño a lo largo del tiempo en las condiciones de misión conduciría a información mucho más certera del desempeño que se tendrá en la órbita.
- Explorar otros modelos de cámaras compatibles con microcontrolador ESP32: se desarrolló y probó en este proyecto las capturas y programación sobre un microcontrolador ESP32S3 de la marca XIAO. Además de ofrecer una gran respuesta y facilidad para su configuración, tiene como contraparte consumos en modos de ahorro elevados. Esto tuvo como consecuencia la imposibilidad física de aislar el paso de corriente desde la regulación de tensión al subsistema de la cámara. En búsqueda de lograr un consumo menor y con ello, reducir el tamaño de baterías o aumentar la duración del suministro de energía, se puede optar por elegir otro modelo de placa con cámara integrada. La misma debe ofrecer la posibilidad antes mencionada o emplear de manera directa, mediante los protocolos correspondientes, vincular la captura y transmisión interna del archivo de la fotografía.
- Explorar otros medios de estabilización térmica. Sujeto a la posibilidad de ampliar el espacio libre dentro del contrapeso, se puede incorporar un sistema de conducción de calor con elementos activos, de manera que permita elevar a un valor de temperatura mayor y estable a lo largo del tiempo y los ciclos de luz/sombra.

6. Bibliografías

- [1] C. Ochoa, M. Araoz, "Anteproyecto para el diseño de un nanosatélite Cubesat de IOT," en *XII Congreso Argentino de Tecnología Espacial*, Mendoza, Argentina 2023.
- [2] F. Sanchez, F. Alvarado, L. Macht y M. Araoz, "Pehuensat III: Circuitos adicionales e integración de etapas del satélite," en *XIII Congreso Argentino de Tecnología Espacial*, Buenos Aires, Argentina, 2025.
- [3] E. Kulu, "NanoSats Database," *NanoSats Database*. Consultado: Abr. 17, 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.nanosats.eu/>.
- [4] The CubeSat Program, California Polytechnic State University, *CubeSat Design Specification Rev. 14.1*. San Luis Obispo, CA, EE. UU, 2022. Consultado: Abr. 17, 2026. [En línea]. Disponible en: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf
- [5] Shelar & Moore, "Parámetros orbitales de un cuerpo celeste," en *Circumstellar and Circumbinary Discs in Multiple Stellar Systems*, ResearchGate, 2023. Consultado: Abr. 17, 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/388633877_Circumstellar_and_circumbinary_discs_in_multiple_stellar_systems
- [6] B. McKissock, P. Loyselle y E. Vogel, "Guidelines on Lithium-ion Battery Use in Space Applications," Nasa Glenn Research Center, Cleveland, OH, EE. UU, 2009. Consultado: Abr. 17, 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20090023862/downloads/20090023862.pdf>
- [7] M. A. Van Zele, "Influencia de la anomalía geomagnética del Atlántico Sur (SAMA) en las variaciones geomagnéticas debidas a compresiones magnetosféricas súbitas por el viento solar," *GEOACTA*, vol. 35, pp. 25-39, 2010. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Departamento de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales (UBA), Buenos Aires, Argentina.
- [8] W. Stallings, *Data and Computer Communications*, 10.^a ed., Nueva Jersey, EE. UU.: Pearson, 2014.
- [9] A. Delleur, S. Korn, S. Tipler y P. Dalton, "International Space Station Li-ion Battery Change out Experience through 2021," presentado en *Space Power Workshop*, NASA Glenn Research Center, 2021. Consultado: Abr. 17, 2026. [En línea]. Disponible en: <https://ntrs.nasa.gov/citations/20210011240>
- [10] Luo, H.; Wang, Y.; Feng, Y.-H.; Fan, X.-Y.; Han, X.; Wang, P.-F. "Lithium-Ion Batteries under Low-Temperature Environment: Challenges and Prospects". *Materials*, vol.15, no. 22, pp. 8166. 2022. DOI: 10.3390/ma15228166.

- [11] A. Damato, *Dandelion clock quarter dft dct.png*, imagen, 13 May 2006. Wikimedia Commons. Consultado: Abr. 17, 2026. [En línea]. Disponible en: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dandelion_clock_quarter_dft_dct.png
- [12] “Wi-Fi Signal Attenuation”, *Wavlink Blog – Technical News*, 2022. Consultado: Abr. 17, 2026. [En línea]. Disponible en: <https://blog.wavlink.com/en-us/article/TechnicalNews/92442c2444eaa02541dd27fe90bed782.html>
- [13] Seeed Studio, *Getting Started with Seeed Studio XIAO ESP32S3 Series*. Seeed Studio Wiki, 2023. Consultado: Abr. 17, 2026. [En línea]. Disponible en: https://wiki.seeedstudio.com/xiao_esp32s3_getting_started/
- [14] R. J. Ricotta, “Protocolos y técnicas de compresión de imágenes para la transmisión en entornos espaciales”. Proyecto Integrador Profesional, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina, 2010.
- [15] Espressif Systems, *ESP32-S3 Series Datasheet Version 2.0*, Espressif, 2023. Consultado: Abr. 17, 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.espressif.com/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf
- [16] Honcell Energy Co., Ltd., *Li-ion Polymer Rechargeable Battery Specification Sheet, Part No. HCP602535ZC*. Consultado: Abr. 17, 2026. [En Línea]. Disponible en: https://www.honcell.com/Public/Uploads/uploadfile/files/20240628/DATASHEET_HCP602535ZC3.7V500mAhPACK2024.pdf
- [17] S. Budumuru, M. Satya Anudarha. “Electromagnetic shielding and mechanical properties of AL6061 metal matrix composite at X-band for oblique incidence”. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, Vol 4. pp 1113-1121. 2022. DOI: 10.1007/s42114-021-00338-6.
- [18] Fujian LILLIPUT Optoelectronics Technology Co., Ltd., *OW Series Digital Multimeters Technical Specifications*. Consultado: Abr. 17, 2026. [En línea]. Disponible en: https://files.owon.com.cn/probook/OW18_Series_Digital_Multimeter_USER_MANUAL.pdf.
- [19] MASTECH, MS8229 Digital Multimeter Operation Manual. Consultado: Abr. 17, 2026. [En Línea]. Disponible en: <https://www.mastech-group.com/global/en/productattachment/download/index/id/157/>.

Anexos

Anexo A: Fotografías capturadas durante pruebas iniciales



Figura A.1. Imagen capturada con cámara durante pruebas iniciales con resolución con resolución 910x690 en color.



Figura A.2. Imagen capturada con cámara durante pruebas iniciales con resolución 910x690 en escala de grises.



Figura A.3. Imagen capturada con cámara durante pruebas iniciales con resolución 640x480 en color.



Figura A.4. Imagen capturada con cámara durante pruebas iniciales con resolución 640x480 en color.



Figura A.5. Imagen capturada con cámara durante pruebas iniciales con resolución 240x240 en color.



Figura A.6. Imagen capturada con cámara durante pruebas iniciales con resolución 240x240 en escala de grises.

Anexo B: Código programado en la placa cámara XIAO

ESP32S3-Sense

```
1 //Sección N°1: Inclusión de librerías y credenciales WiFi
2 #include <WiFi.h>
3 #include <esp_wifi.h>
4 #include <esp_sleep.h>
5 #include <esp_camera.h>
6 #include <SD.h>
7 #include <SPI.h>
8 #include <FS.h>
9 #include <Preferences.h>
10 Preferences preferences;
```

Figura B.1. Librerías incluidas en el proyecto.

```
20 // Flag para cuando ocurra la espera de quince días, inicializa en false.
21 //La bandera como tal se almacena en la memoria interna no volátil, para guardar el valor despues de reinicio
22 bool flag_sleep = false;
23 void flag_escritura(bool true_false){
24     preferences.begin("estado_placa", false);
25     preferences.putBool("flag_sleep", true_false);
26     preferences.end();
27 }
28 bool flag_lectura(){
29     preferences.begin("estado_placa", false);
30     valor_leido = preferences.getBool("flag_sleep", false);
31     preferences.end();
32     return valor_leido;
33 }
34 //15 días * 24 horas * 60 minutos * 60 segundos * 1E6 microsegundos.
35 //El cronómetro de tiempo para modo sleep lee en microsegundos
36 uint64_t sleep_timer = 15ULL * 24ULL * 60ULL * 60ULL * 1000000ULL;
```

Figura B.2. Declaración de funciones para lectura y escritura en variable "flag_sleep" alojada en la memoria no volátil de la placa.

```
88 void configuracion_camara(void){
89     // Asignación de pines
90     camera_config_t config;
91     config.ledc_channel = LEDC_CHANNEL_0;
92     config.ledc_timer = LEDC_TIMER_0;
93     config.pin_d0 = Y2_GPIO_NUM;
94     config.pin_d1 = Y3_GPIO_NUM;
95     config.pin_d2 = Y4_GPIO_NUM;
96     config.pin_d3 = Y5_GPIO_NUM;
97     config.pin_d4 = Y6_GPIO_NUM;
98     config.pin_d5 = Y7_GPIO_NUM;
99     config.pin_d6 = Y8_GPIO_NUM;
100    config.pin_d7 = Y9_GPIO_NUM;
101    config.pin_xclk = XCLK_GPIO_NUM;
102    config.pin_pclk = PCLK_GPIO_NUM;
103    config.pin_vsync = VSYNC_GPIO_NUM;
104    config.pin_href = HREF_GPIO_NUM;
105    config.pin_sccb_sda = SIOD_GPIO_NUM;
106    config.pin_sccb_scl = SIOC_GPIO_NUM;
107    config.pin_pwdn = FWDN_GPIO_NUM;
108    config.pin_reset = RESET_GPIO_NUM;
109    config.xclk_freq_hz = 20000000;
110    config.frame_size = FRAMESIZE_VGA; //Formato de 640x480 que vamos a utilizar para capturar las fotos
111    config.pixel_format = PIXFORMAT_JPEG; //
112    config.grab_mode = CAMERA_GRAB_WHEN_EMPTY;
113    config.fb_location = CAMERA_FB_IN_PSRAM;
114    config.jpeg_quality = 4;
115    config.fb_count = 1;
116
117    // Inicialización de cámara
118    esp_err_t err = esp_camera_init(&config);
119    if (err != ESP_OK) {
120        Serial.printf("Inicialización de cámara falló con error 0x%x", err);
121        return;
122    }
123    Serial.println("Camara inicializada correctamente");
124    sensor_t *s = esp_camera_sensor_get();
125    //s->set_special_effect(s, 2); // Configuramos la imagen con el filtro N°2, que se corresponde con escala de grises
126    //s->set_brightness(s, 2); // Brillo máximo
127 }
```

Figura B.3. Declaración de parámetros para configuración de cámara, empleando librería esp_camera.h

```

139 void conexion_wifi(void){
140     WiFi.begin(ssid, password);
141     WiFi.setSleep(true);
142     esp_wifi_set_ps(WIFI_PS_MIN_MODEM);
143
144     Serial.print("Conectando a red WiFi...");
145     while (WiFi.status() != WL_CONNECTED) {
146         delay(500);
147         Serial.print(".");
148     }
149     Serial.println("");
150     Serial.print("Conectado a red WiFi: ");
151     Serial.println(WiFi.SSID());
152
153     Serial.println("");
154     Serial.print("IP Asignada: ");
155     Serial.println(WiFi.localIP());
156 }

```

Figura B.4. Declaración de parámetros para conexión a red Wifi, usando el modo de mínimo consumo "MIN_MODEM", empleando librería WIFI.h.

```

158 void setup() {
159     flag_sleep = flag_lectura();
160     if (flag_sleep() == false) {
161         Serial.begin(115200);
162         Serial.setDebugOutput(true);
163         Serial.println();
164
165
166         //Sección N°2: Configuración inicial de la placa, cámara e inicialización
167
168         configuracion_camara();
169
170
171         //Sección N°5: Inicialización de módulo SD mediante SPI
172         //inicializacion_SD();
173
174         //Sección N°6: Conexión a WiFi y inicio de servidor
175         conexion_wifi();
176     }
177     if (flag_lectura() == true){
178         flag_escritura(false);
179         esp_err_t esp_sleep_enable_timer_wakeup(sleep_timer); //Inicia el modo deep sleep para quince días
180     }
181 }

```

Figura B.5. Declaración de void_setup para acciones en función del valor de la variable "flag_sleep". Para el modo sleep, emplea la librería esp_sleep.h.

```

186 void loop() {
187     flag_sleep = flag_lectura();
188     if (flag_sleep == false){
189         Serial.println("Intentando conectar al servidor TCP...");
190
191         if (client.connect(server_ip, server_port)) {
192             Serial.println("Conectado al servidor. Esperando comando...");
193
194             while(client.connected()){
195                 if (client.available() >= 7){
196                     char comando[8] = {0};
197                     int bytesRead = client.readBytes(comando,7);
198
199                     if (bytesRead == 7) {
200                         comando[7] = '\0';
201
202                         if (String(comando) == "CAPTURE") {
203                             Serial.println("Comando CAPTURE recibido, iniciando captura...");
204
205                             camera_fb_t* fb = esp_camera_fb_get();
206
207                             if (!fb) {
208                                 Serial.println("Error al capturar imagen");
209                             }
210                             else {
211                                 uint32_t checksum = 0;
212                                 for (size_t i = 0; i < fb->len; i++){
213                                     checksum +=fb->buf[i];
214                                 }
215
216                                 uint32_t file_size = fb->len;
217                                 client.write((const uint8_t*)&file_size, sizeof(file_size));
218                                 client.write(fb->buf, fb->len);
219                                 client.write((const uint8_t*)&checksum, sizeof(checksum));
220
221                                 Serial.println("Imagen y checksum enviados");
222                                 esp_camera_fb_return(fb);
223                             }
224                             break;
225                         }
226                     }
227                 }
228             }
229             client.stop();
230             Serial.println("Conexión cerrada");
231             flag_escritura(true); //Se pone en 1 la bandera de que pudo capturar foto, ahora puede iniciar modo sleep
232             esp_restart(); //Se reinicia la placa, vuelve a ejecutar el código de cero para que no consuma energía la cámara
233         }
234         else {
235             Serial.println("No se pudo conectar. Reintentando...");
236         }
237     }
238 }

```

Figura B.6. Declaración de void_loop, condicionada al valor de flag_lectura para acciones en función del valor de la variable "flag_sleep". Espera el comando "CAPTURE" enviado por WiFi e inicia el proceso de captura de fotografía. Emplea librerías Wifi.h, esp_camera.h.