

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
VICERRECTORÍA DE INVESTIGACIÓN Y EXTENSIÓN
DIRECCIÓN DE PROYECTOS

INFORME FINAL DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN
DOCUMENTO 1

Código del Proyecto: 1360040

Nombre del proyecto o actividad: GWSat: Prototipo de monitoreo de humedales a través de un sistema espacial tipo "Store & Forward"

Departamento Académico responsable: Escuela de Ingeniería Electrónica

Otras Escuelas participantes: Escuela de Ingeniería Forestal

Investigador(a) responsable: Adolfo Chaves Jiménez (2018-2020), Johan Carvajal Godínez (2021-2023)

Otros investigadores: Julio César Calvo Alvarado, Ana Julieta Calvo Obando, Vladimir Jiménez, Aníbal Coto Cortez.

Período cubierto: enero 2018 a enero de 2023

Resumen

El SETEC Lab se fundó en 2017 con el objetivo de impulsar la ciencia y la tecnología en el campo aeroespacial en el país. Entre sus capacidades, el laboratorio puede diseñar todas las etapas de una misión espacial, desarrollar sistemas espaciales con aplicaciones en monitorización ambiental y navegación satelital, y colaborar con compañías emergentes para el desarrollo de aplicaciones espaciales con valor comercial. La misión GWSat, se desarrolló en colaboración con la Universidad George Washington, y tiene como objetivo probar tecnología de propulsión y monitorizar las condiciones ambientales de los humedales en Costa Rica para minimizar el impacto del cambio climático. Para este proyecto, el SETEC Lab desarrolló un conjunto de paquetes de trabajo para el diseño de una estación remota para la recolección de datos y el subsistema de control de orientación del satélite, así como el desarrollo de un dispositivo para caracterizar las masas de agua del humedal. Por medio de trabajo de investigación, en su mayoría voluntario, se logró realizar una caracterización de la batimetría del humedal, un prototipo de un dispositivo electrónico para la medición de nivel de agua, el diseño de una estación terrestre remota, una carcasa para su protección y un conjunto de algoritmos para control de la orientación del segmento de vuelo. Se alcanzó un 95% de las metas propuestas para la misión científica y un 80% de las actividades propuestas para la misión tecnológica del proyecto.

Palabras clave: Humedal, Cubesat, Estación Remota, ADCS

Abstract

The SETEC Lab was founded in 2017 with the aim of promoting science and technology in the aerospace field in the country. Among its capabilities, the lab can design all stages of a space mission, develop space systems with applications in environmental monitoring and satellite navigation, and collaborate with emerging companies to develop commercially valuable space applications. The GWSat mission was developed in collaboration with George Washington University, and its objective is to test propulsion technology and monitor the environmental conditions of wetlands in Costa Rica to minimize the impact of climate change. For this project, the SETEC Lab developed a set of work packages for the design of a remote station for data collection and the satellite orientation control subsystem and the development of a device to characterize the wetland water masses. Through research work, mostly voluntary, it was possible to carry out a characterization of the bathymetry of the wetland, a prototype of an electronic device for the measurement of water level, the design of a remote ground station, a casing for its protection and a set of algorithms to control the orientation of the flight segment. 95% of the goals proposed for the scientific mission and 80% of the activities proposed for the technological mission of the project were achieved.

Keywords: Wetland, Cubesat, Remote Station, ADCS

Tabla de Contenido

Introducción	4
Objetivo General	5
Metodología	10
Resultados del proyecto	15
Discusión	37
Conclusiones	38
Recomendaciones	38
Referencias	39

Introducción

El SETEC Lab o Laboratorio de Sistemas Espaciales del Instituto Tecnológico de Costa Rica, se fundó en julio de 2017 por la Escuela de Ingeniería Electrónica con el propósito de impulsar la ciencia y la tecnología en el campo aeroespacial en el país, a través del desarrollo de proyectos y programas en colaboración con socios nacionales e internacionales.

Entre sus capacidades, el laboratorio cuenta con la habilidad de diseñar todas las etapas de una misión espacial, investigar y desarrollar sistemas espaciales con aplicaciones en sistemas de monitorización ambiental y de navegación satelital. También participa en el desarrollo de subsistemas y componentes de prueba y colabora con compañías emergentes para el desarrollo de aplicaciones espaciales con valor comercial. También tiene la capacidad de impartir cursos especializados en el área de la ingeniería de los sistemas espaciales [1].

El laboratorio SETEC Lab en conjunto con otras unidades del ITCR ha identificado necesidades y oportunidades del país en el sector espacial, siendo parte del equipo propulsor de la ley para la creación de Agencia Espacial Costarricense durante 2019-2021.

El SETECLab emprendió un programa de pequeños satélites para la monitorización ambiental, siendo el Batsú-CS1 el primer satélite Centroamericano que se desarrolló para el proyecto Irazú [2]. En otra colaboración destacada, el SETECLab se asoció con la Universidad George Washington de Estados Unidos para el desarrollo del proyecto GWSat. Este proyecto científico tiene como objetivo probar tecnología de propulsión, así como monitorizar las condiciones ambientales de los humedales del Parque Nacional Palo Verde en Guanacaste, Costa Rica, y entender la dinámica de la variación del agua en los humedales, en un esfuerzo por minimizar el impacto del cambio climático y asegurar un espacio habitable para la fauna y la flora del lugar, todo esto en el marco de los objetivos del desarrollo sostenibles de las Naciones Unidas.

El SETEC Lab y la Universidad George Washington trabajan juntos en el diseño del sistema de recolección de datos, establecimiento del enlace satelital y procesamiento de datos para el proyecto GWSat. Para ello el SETEC Lab desarrolla un conjunto de paquetes de trabajo para el diseño tanto de una estación remota para la recolección de datos (GRT/GST, por sus siglas en inglés), como el subsistema de control de orientación que va a bordo del satélite GWSat. En conjunto con Investigadores de la Escuela de Ingeniería Forestal se implementan una serie de actividades científicas relacionadas con el estudio de la dinámica del humedal, así como para el diseño de instrumentación electrónica que permita medir y almacenar variables ambientales en el sitio.

Para el desarrollo de este proyecto se ha trabajado apoyado con estudiantes de múltiples unidades académicas del ITCR, tanto de grado como de posgrado con el fin de promocionar la ingeniería espacial en Costa Rica como un área emergente, y de proveer oportunidades para que la comunidad estudiantil forme parte de la creciente comunidad científica en torno a la exploración de la tierra con tecnologías espaciales.

La figura 1 muestra la arquitectura de misión propuesta para implementar la los paquetes de trabajo de GWSat por parte del equipo en Costa Rica:

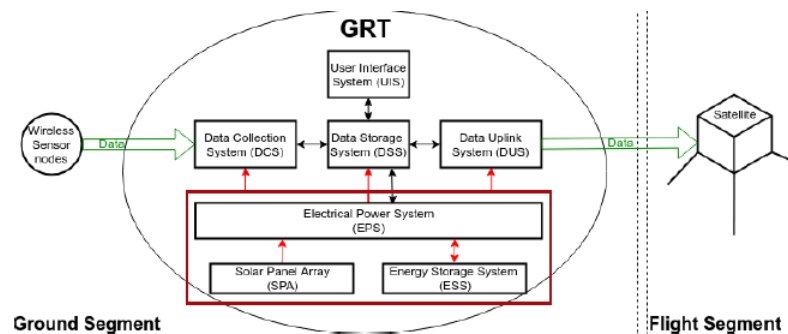


Figura 1. Elementos de la misión GWSat que están a cargo del Equipo de CR. [15]

Para el desarrollo del proyecto se plantearon los siguientes objetivos en el marco del proyecto de investigación dentro del ITCR.

Objetivo General

Contribuir a preservar la biodiversidad y el equilibrio hidrológico de los humedales de Costa Rica a través del mejoramiento de su monitoreo, ofreciendo las capacidades tecnológicas y científicas en el campo aeroespacial y ambiental del TEC en el desarrollo del satélite GWSat.

Del objetivo general se derivan los siguientes objetivos específicos (OE):

OE1. Misión Científica - segmento de tierra

Diseñar un prototipo de monitoreo de humedales que permita estudiar la hidrodinámica del área inundada y el efecto de la variabilidad climática en este ecosistema.

OE2. Misión Tecnológica - segmento de tierra

Diseñar un sistema espacial “Almacenar y Enviar” para el monitoreo de variables ambientales.

OE3. Misión Tecnológica- segmento de vuelo

Implementar un sistema de control que permita la captura de imágenes del sitio experimental utilizando una cámara en órbita.

Este documento resume los resultados obtenidos por el proyecto implementado en el TEC, y que forma parte del Proyecto GWSat que lidera la Universidad George Washington. Se divide el trabajo en lo que se denomina misión científica y misión tecnológica. Para ello se recopila y se resume la información desarrollada por medio de los trabajos de graduación de grado y posgrado propuestos a lo largo del proyecto, así como artículos científicos presentados como resultado del proyecto de investigación ejecutado. Se presenta ahora el marco teórico que resume los principales conceptos utilizados para el desarrollo de los entregables del proyecto.

Marco Teórico

Humedales en Costa Rica

Los humedales son ecosistemas de gran importancia en todo el mundo, incluyendo Costa Rica. Estos hábitats albergan una gran variedad de especies animales y vegetales, muchas de las cuales son exclusivas de estos ecosistemas. Además, los humedales tienen una función crucial en la regulación del ciclo del agua, previniendo inundaciones y sequías, y contribuyen a la mitigación del cambio climático al actuar como sumideros de carbono. Se ha afirmado que en el país alrededor del 7% del territorio continental está constituido por humedales. Incluso algunas investigaciones han contabilizado que existen alrededor de 350 a 400 humedales en el territorio nacional [3].

Costa Rica, en el 2016, se convirtió en el primer país del mundo en firmar un Pacto Nacional para el Avance de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS). Con esto se ha adoptado un compromiso nacional para cumplir con los ODS impulsados por las Naciones Unidas, con el objetivo de proteger y conservar los recursos naturales esenciales para las actividades humanas y no dejar a nadie atrás en la lucha contra el cambio climático [4]. En este sentido, la protección y conservación de los humedales del país, como el humedal del Parque Nacional Palo Verde, es esencial.

Este hábitat, conformado por pantanos, lagunas y llanuras de inundación a lo largo de la cuenca baja del río Tempisque, alberga una gran cantidad de aves y es una fuente hidrográfica para la península de Nicoya y sus zonas aledañas. La cobertura vegetal presente en este parque es variada ya que incluye ecosistemas como bosques secos deciduos, bosques ribereños, sabanas, humedales, entre otros [5]. Sin embargo, los humedales son ecosistemas frágiles y su protección y conservación es vital para la salud del ecosistema y para las actividades humanas de la región [6].

Históricamente, los humedales no han sido suficientemente valorados por la institucionalidad pública en Costa Rica. La falta de interés político, el cambio climático y el aumento de actividades agrícolas cerca de las costas han limitado su presencia a cuencas biológicas en áreas de conservación. Es necesario seguir trabajando en la protección y conservación de los humedales mediante la implementación de políticas y estrategias que promuevan su preservación y restauración. Además, es importante educar a la población sobre la importancia de estos ecosistemas y fomentar su participación en su protección y cuidado, para garantizar su preservación para las generaciones presentes y futuras.

Satélites del tipo Store and Forward

En términos generales, los CubeSats son pequeños satélites que pueden ser lanzados en órbita como parte de una misión espacial. Debido a su tamaño compacto y bajo costo, los

satélites de tipo Cubesat son cada vez más populares como herramientas para realizar misiones espaciales asequibles y de bajo costo [7].

Las misiones espaciales con CubeSats del tipo "store and forward" se refieren a un enfoque en el que los CubeSats actúan como nodos de almacenamiento y retransmisión de datos para permitir la comunicación entre diferentes partes de una red de comunicaciones en el espacio, con un conjunto de nodos en tierra llamadas estaciones remotas (GRT/GST).

El enfoque "store and forward" se refiere a la capacidad de los CubeSats para almacenar datos y retransmitirlos más tarde. Esto es especialmente útil en misiones espaciales donde la comunicación en tiempo real no es posible debido a la distancia y la latencia de la señal.

En una misión típica de CubeSats "store and forward", los CubeSats se lanzan en órbita y se colocan en una red de comunicaciones con otros CubeSats y con estaciones terrestres. Los CubeSats pueden entonces recopilar datos de sensores o dispositivos en la órbita o la superficie de un planeta y almacenarlos en su memoria interna. Los datos pueden ser retransmitidos posteriormente a través de la red de comunicaciones una vez que el CubeSat esté en línea de visión con una estación terrestre adecuada [8].

Este enfoque puede ser particularmente útil en misiones de exploración planetaria, donde los CubeSats pueden actuar como "repetidores" de comunicaciones para superar la limitación de la comunicación directa entre la nave espacial y la estación terrestre. También puede ser útil en misiones de monitoreo de la Tierra, donde los CubeSats pueden actuar como nodos de comunicación en una red de monitorización ambiental.

Segmentos de una misión espacial del tipo Cubesat

Una misión espacial con CubeSats, por lo general, se divide en los siguientes segmentos [9]:

Segmento de lanzamiento: El segmento de lanzamiento se refiere a la fase de la misión en la que los CubeSats son lanzados desde la Tierra hacia el espacio. Este segmento incluye el cohete lanzador y la plataforma de lanzamiento.

Segmento de órbita: Una vez que los CubeSats se encuentran en el espacio, entran en el segmento de órbita. Aquí, los CubeSats orbitan la Tierra y realizan las tareas para las que fueron diseñados. El segmento de órbita también incluye el seguimiento y la telemetría para monitorear y controlar los CubeSats mientras están en órbita.

Segmento de tierra: Este segmento consiste en las instalaciones terrestres desde donde se controla la misión. El segmento de tierra incluye estaciones de seguimiento y control, antenas, computadoras y personal de apoyo. Desde aquí, los controladores de la misión pueden enviar comandos y recibir datos de los CubeSats.

Para este proyecto, los alcances se centran en el diseño de una estación terrestre remota (Ground Remote Terminal o GRT por sus siglas en inglés) y su respectiva instrumentación para

recoger los datos del humedal (Ground Sensor Terminal o GST), procesarlos y enviarlos al satélite. También se trabajó en los algoritmos de control a bordo de la nave espacial (o ADCS por sus siglas en inglés) requeridos para apuntar al humedal y obtener un proceso de comunicación óptimo del satélite GWSAT con la GRT/GST. Se describen a continuación algunos conceptos relacionados a estos subsistemas para una mejor comprensión de los resultados obtenidos.

Arquitectura de una estación terrestre remota (GRT/GST)

En general, la arquitectura de una estación terrestre remota utilizada en misiones con CubeSats está diseñada para permitir la comunicación y el control de los CubeSats en órbita, así como para el procesamiento y análisis de los datos recibidos. Además, estas estaciones también cuentan con sistemas de energía, seguridad y respaldo para garantizar la continuidad de las operaciones incluso en caso de problemas técnicos o interrupciones [10].

La arquitectura de una estación terrestre remota utilizada en misiones con CubeSats puede variar dependiendo de la misión específica y las necesidades del cliente. Sin embargo, a continuación, se describen algunos de los componentes y características que comúnmente se encuentran en estas estaciones terrestres:

Antenas: Las antenas son un componente fundamental de las estaciones terrestres remotas utilizadas en misiones con CubeSats. Estas antenas se utilizan para comunicarse con los CubeSats en órbita y transmitir los comandos y datos necesarios. Las estaciones terrestres pueden contar con una o varias antenas dependiendo de la complejidad de la misión.

Sistemas de seguimiento y control: Las estaciones terrestres remotas también incluyen sistemas de seguimiento y control que permiten a los controladores de la misión monitorear y controlar los CubeSats en órbita. Estos sistemas pueden incluir software de seguimiento y control, sistemas de telemetría y monitoreo de estado, y otros sistemas especializados.

Equipos de procesamiento de datos: Los datos enviados por los CubeSats en órbita se reciben y procesan en la estación terrestre remota. Por lo tanto, estas estaciones también incluyen equipos de procesamiento de datos como computadoras y servidores para almacenar y analizar los datos recibidos.

Energía y sistemas de respaldo: Las estaciones terrestres remotas también requieren sistemas de energía confiables y redundantes, así como sistemas de respaldo para garantizar la continuidad de las operaciones incluso en caso de interrupciones del suministro eléctrico o de otros sistemas.

Seguridad: Las estaciones terrestres remotas también incluyen sistemas de seguridad para proteger los datos y equipos críticos de la misión. Estos sistemas pueden incluir cámaras de seguridad, sistemas de control de acceso y otras medidas de seguridad física y digital.

Arquitectura de un subsistema de control de orientación (ADCS)

La orientación de un satélite en vuelo se determina mediante un sistema de control de orientación (ADCS), que utiliza sensores y actuadores para ajustar la posición y la orientación del satélite en relación con un punto de referencia, como la Tierra o las estrellas [11].

Los principales componentes del sistema de control de orientación incluyen:

Sensores: Los sensores a bordo del satélite miden la posición y la velocidad del satélite en relación con su entorno. Los sensores más comunes incluyen sensores inerciales, magnetómetros y sensores de estrellas.

Actuadores: Los actuadores son dispositivos que producen fuerzas o momentos para cambiar la orientación del satélite. Los actuadores más comunes son los propulsores, los torquers magnéticos y los dispositivos de control de momento.

Unidad de procesamiento: La unidad de procesamiento a bordo del satélite recopila datos de los sensores, calcula la posición y la orientación del satélite y envía comandos a los actuadores para ajustar la orientación del satélite.

Software de control de orientación: El software de control de actitud utiliza los datos de los sensores y las órbitas previstas del satélite para determinar los comandos que se deben enviar a los actuadores para mantener la orientación deseada del satélite.

Estimación y control de órbita y orientación a bordo de satélites pequeños

De acuerdo con [12], uno de los métodos más comunes para la estimación y control de la orientación de un CubeSat en órbita es mediante el uso de sensores inerciales, como giroscopios y acelerómetros. Estos sensores miden la velocidad angular y la aceleración lineal del satélite, respectivamente, y se utilizan para calcular la orientación y la velocidad de rotación del satélite. Los datos de los sensores inerciales se procesan mediante un algoritmo de control de actitud para generar comandos de control que ajustan la orientación del satélite.

Otro método común es el uso de magnetómetros, que miden el campo magnético terrestre para determinar la orientación del satélite en relación con el campo magnético. Los magnetómetros pueden ser útiles para ajustar la orientación del satélite en relación con la dirección de la Tierra, pero no son adecuados para misiones que requieren una alta precisión de orientación.

Además de los sensores inerciales y los magnetómetros, también se pueden utilizar otros sensores para la estimación y control de la orientación de un CubeSat, como cámaras y GPS. Las cámaras pueden utilizarse para obtener imágenes de la Tierra y los cuerpos celestes circundantes para determinar la orientación del satélite. El GPS también puede proporcionar información sobre la orientación y la posición del satélite en relación con la Tierra.

En cuanto al control de la orientación [13], se pueden utilizar diferentes tipos de actuadores, como ruedas de reacción, magnetorquers y propulsores. Los actuadores se utilizan para generar momentos de control que ajusta la orientación del satélite. Por ejemplo, las ruedas de reacción pueden acelerar o desacelerar para generar un momento de control, mientras que los magnetorquers pueden utilizar el campo magnético terrestre para generar un momento de control. Los propulsores también pueden utilizarse para cambiar la orientación del satélite, pero generalmente se utilizan solo en misiones específicas que requieren un alto grado de precisión de orientación [14].

Metodología

Para el desarrollo del proyecto se establecieron equipos de trabajo de acuerdo con los objetivos presentados en la introducción. Se establecieron tres grupos de trabajo liderados por los siguientes Investigadores:

OE1. Misión Científica - Análisis del Humedal y Diseño de la Instrumentación Remota - Dr. Julio Calvo Alvarado

OE2. Misión Tecnológica - Estación Terrestre Remota (GRT/GST) - Dr. Johan Carvajal Godínez

OE3. Misión Tecnológica- Conjunto de Algoritmos de Control - Dr. Adolfo Chaves Jiménez

Cada uno de los equipos de trabajo se apoyó por grupos de estudiantes, los cuales desarrollaron actividades por medio de asistencias de investigación o por medio de trabajo voluntario. Se hace un resumen de la lista de trabajos realizados durante el proyecto en el **Documento 2** del informe final.

Se establecieron reuniones bisemanales con los equipos de trabajo para dar seguimiento al progreso, así como para discutir los avances y retroalimentar a los equipos de trabajo.

A cada grupo de trabajo se le asignaron tareas que incluyeron el diseño, análisis e implementación de distintos componentes para cada uno de los subsistemas de la estación terrestre remota (GRT/GST), el nodo de medición del humedal, la carcasa de la estación terrestre y los algoritmos de control de orientación del satélite. Los estudiantes que desarrollaron trabajos finales de graduación recibieron retroalimentación de profesores especialistas en sus distintas carreras, lo que enriqueció el desarrollo del proyecto.

En la **tabla 1** se describe el plan de actividades aprobado y desarrollado para implementación del proyecto GWSAT. Este plan incluye únicamente las actividades llevadas a cabo por el equipo de investigadores del ITCR. Los resultados de estas actividades fueron reportados al gerente del proyecto en la Universidad George Washington de USA. Las reuniones de coordinación permitieron al equipo principal (core-team) integrar los resultados obtenidos al desarrollo de la misión y establecer requisitos de diseño para los componentes desarrollados en Costa Rica.

Tabla 1. Plan de actividades desarrolladas para la implementación del proyecto GWSat

Objetivo Específico	Actividades	Productos	Año en que se desarrolló	Comentarios sobre el estado final en enero 2023
<p>OE1. Misión Científica Diseñar un prototipo de monitoreo de humedales que permita estudiar la hidrodinámica del área inundada y el efecto de la variabilidad climática en este ecosistema.</p>	<p>A1: Desarrollo de un diseño de un dispositivo electrónico autónomo para el monitoreo del nivel y temperatura de agua de los humedales.</p>	<p>Fabricación, evaluación y calibración de al menos 3 dispositivos para ser evaluados en el campo.</p>	<p>2019-2020</p>	<p>Diseño terminado 100%, el mismo es conceptualizado por el Dr. Julio Calvo y se genera un prototipo físico de la carcasa para el instrumento de medición. Prototipo diseñado. No se logra caracterizarlo en campo. Participa Paulina Monge en el diseño del nodo.</p>
	<p>A2: Un prototipo construido, calibrado y funcional que permite medir el nivel del espejo de agua en humedales, así como la temperatura del agua.</p>	<p>Instalación y operación en el campo de tres dispositivos para medir el nivel de agua</p>	<p>2021</p>	<p>Se logra la implementación del prototipo del sistema, se caracteriza a nivel de laboratorio, pero no se logra llevar a pruebas de campo en el humedal.</p>
	<p>A3: Una base de datos de campo climáticos y de niveles y temperatura del agua del humedal para el estudio de su hidrodinámica y su relación a la variabilidad climática</p>	<p>Instalar y operar una estación climática completa conformada por: un pluviómetro, un medidor de temperatura, un medidor de humedad relativa, un anemómetro para la velocidad del viento, una veleta para la dirección del viento, dos sensores de radiación solar, dos</p>	<p>2018-2020</p>	<p>Este objetivo se logró mediante un convenio de uso de equipo de medición climática, Estación OET</p>

		sensores de radiación fotosintética activa (PAR) y un barómetro		
	A4: Un levantamiento de la batimetría del Humedal empleando sensores remotos y datos de nivel del humedal.	Análisis de imágenes satelitales y correlación con niveles de agua del humedal para construir y/o mejorar la batimetría preliminar del humedal.	2019-2021	Se utiliza la información previa de batimetría existente (LiDAR), además de coleccionar datos de profundidad con equipo topográfico, para el 2019. Evidencia tesis de maestría de Ana Julieta Calvo, cubre el punto de la creación del modelo batimétrico para finales del 2020.
	A5: Una base de datos de cobertura batimétrica del humedal empleando imágenes satelitales	Análisis de datos de batimetría y niveles del humedal para generar escenarios en función de datos de las estaciones meteorológicas.	2020	Evidencia tesis de maestría de Ana Julieta Calvo.
OE2.Misión Tecnológica Diseñar un sistema espacial "Almacenar y Enviar" para el monitoreo de variables ambientales.	A1. Diseño e implementación de una estación de comunicación remota para la transmisión diaria de datos científicos a un centro de investigación en el TEC vía satélite.	Estación de comunicación autónoma (estación terrestre ubicada en el humedal) de recolección de datos científicos, con capacidad de transmisión a satélites en órbita baja.	2021	Se logra el diseño y optimización de la estación de comunicación, pero no se logra su integración debido a las restricciones de la pandemia. Ver tesis de los estudiantes: Diego Gutiérrez y Jean Paul y Sharon Fuentes, Luis Alvarado, Rebeca Corrales, Andrés Quesada, José Pablo Acuña.

	A2. Definición de modos de operación satelitales para la implementación de un sistema satelital “Almacenar y Enviar”	Conjunto de algoritmos que permiten la recepción de datos científicos, almacenaje de estos datos en la memoria del satélite y la posterior transmisión.	2020	Se trabaja en la optimización tanto del software de la estación de operaciones como de la estación remota. Ver tesis de Alberto Zamora y Carlos Fernández
	A3. Pruebas de los modos de operación definidos en A2 utilizando el set de aviónica satelital del Laboratorio de Sistemas Espaciales (SETEC).	Un documento técnico detallando el diseño e implementación del sistema “Almacenar y Enviar” para el monitoreo de variables ambientales utilizando un CubeSat.	2021-2022	Se realizó por medio la tesis de Giancarlo Vargas Villegas
	A4. Recolección de datos científicos y satelitales utilizando una estación en tierra en el TEC.	Base de datos de telemetría y datos científicos recogidos con la misión	Por definir	Se reacondiciona la estación satelital de Irazú para este propósito. Se realizaron pruebas de comunicación a nivel de laboratorio. Debido a restricciones de operación por permisos requeridos por SUTEL no se logró completar el objetivo.

OE 3. Misión Tecnológica Implementar un sistema de control que permita la captura de imágenes del sitio experimental utilizando una cámara en órbita.	A1. Desarrollo y verificación de herramientas de software para el diseño de la misión espacial. Esto incluye funciones para calcular la cobertura del satélite, degradación de órbita, transmisión de datos, periodos de eclipse, entre otras cosas	Diseño de un sistema de orientación, navegación y control para un satélite tipo CubeSat con el sistema de propulsión de GWU.	2020	Simulaciones de los sistemas de control funcionando se realizaron en Matlab. Cálculos de cobertura y transmisión de datos por ejecutar
	A2. Elaboración de modelos dinámicos y de control para un satélite tipo CubeSat con sistema de propulsión y cámara.	Toolkit (software) para diseño de misiones espaciales de un pequeño satélite con sistema de propulsión	2019	Modelos del sistema de control funcionales. Modelo de sensores a realizar en 2020
	A3. Simulación computacional de los modelos definidos en A2 para verificar la efectividad de leyes de control utilizadas para la estabilización del satélite.	Modelos de control de tres ejes para un nano satélite.	2019	Modelo de control funcional. Modelo de sensores por realizar
	A4: Implementar el algoritmo de control en el hardware del satélite desarrollado por la GWU.	Valoración preliminar de las imágenes generadas desde el satélite.	2022	El desarrollo del satélite en GWU se ha retrasado y modelo de vuelo no se encuentra listo.

Resultados del proyecto

Los resultados generados por medio del proyecto GWSat se presentarán de manera ejecutiva según los objetivos planteados y las actividades definidas en la **tabla 1**. En caso de que los resultados se hayan desarrollado por medio de una tesis de grado o posgrado se mostrará evidencia del trabajo realizado, y se hará referencia al informe o documento de tesis respectivo, donde se desarrolla con mayor nivel de detalle.

OE1. Misión Científica - Análisis del Humedal y Diseño de la Instrumentación Remota.

Para la caracterización de las masas de agua del humedal el equipo científico estableció que era necesario conocer el nivel de agua, así como las características ambientales de la superficie de la masa de agua del humedal. A continuación, los principales resultados obtenidos.

OE1-A1: Desarrollo de un diseño de un dispositivo electrónico autónomo para el monitoreo del nivel y temperatura de agua de los humedales.

El investigador del ITCR Dr. Julio Calvo Alvarado propuso el siguiente diseño para el dispositivo electrónico para la monitorización del nivel de agua y de características ambientales. Según se muestra en la figura 2, el dispositivo consiste en un mecanismo de acceso a la masa agua, un nodo de recolección, preprocesamiento, almacenamiento, y transmisión de los datos denominado estación de sensado remoto en tierra. Esta estación debe tener autonomía energética para su operación continua a lo largo del periodo de operación.

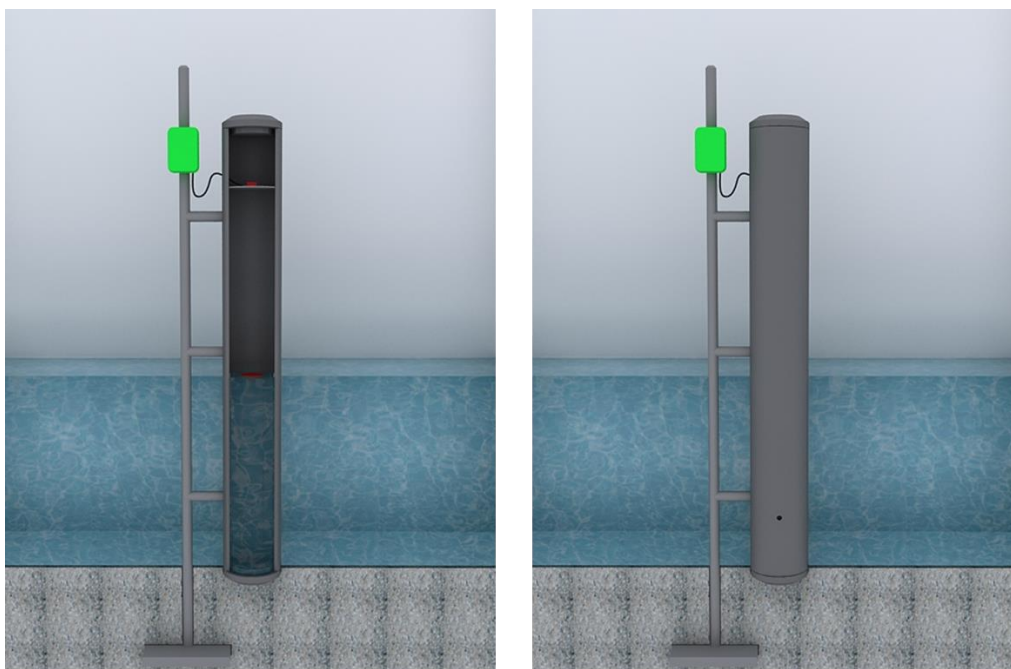


Figura 2. Propuesta de diseño para el dispositivo de monitorización de nivel de agua y de variables ambientales
(fuente: Dr. Julio Calvo Alvarado)

El diseño de los componentes electrónicos de la estación de sensado remoto en tierra estuvo a cargo de la Escuela de Ingeniería Electrónica. En [15], se muestra como sintetizó la siguiente arquitectura física para dispositivo electrónico de sensado mostrada en la figura 3.

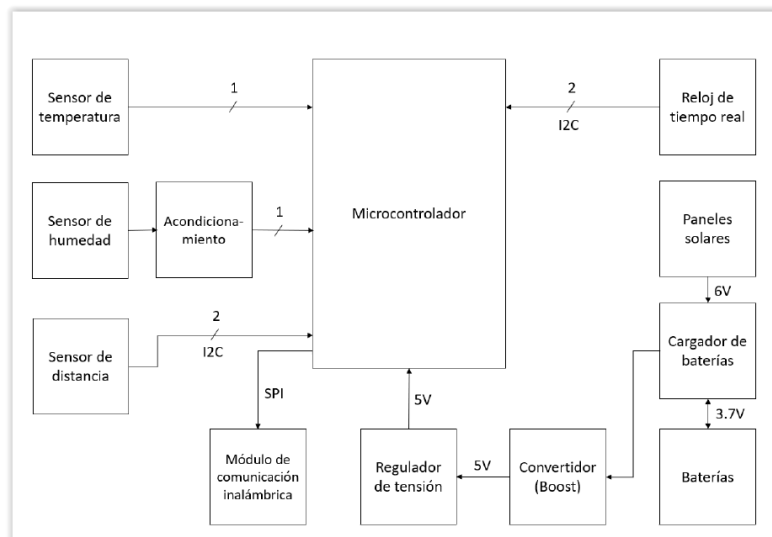


Figura 3. Arquitectura del nodo de medición de nivel de agua y variables ambientales para el humedal [15].

Logrando al final los siguientes resultados para el formato de la trama de datos capturada y para el error en las mediciones de distancia respectivamente como se muestran en la figura 4 y figura 5.



Figura 4. Formato de la trama de datos enviada del nodo de medición a la estación remota (GRT). [15]

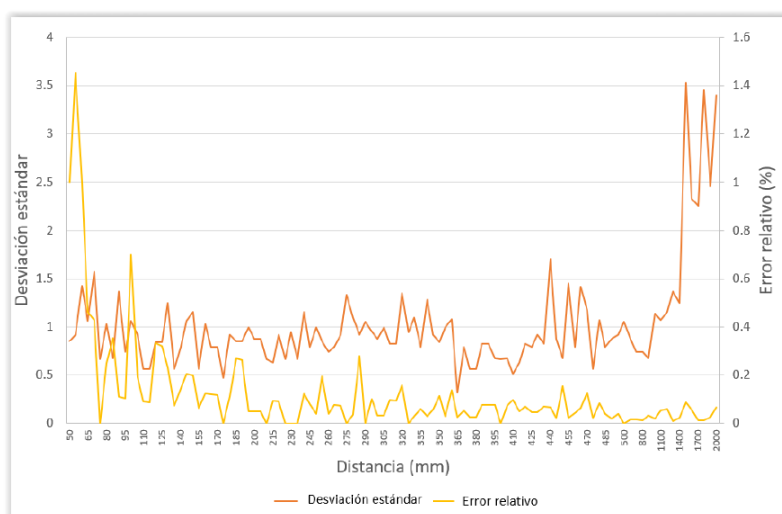


Figura 5. Desviación estándar y error relativo para el sensor de distancia utilizado para medir el nivel de agua del humedal. [15]

OE1-A2: Un prototipo construido, calibrado y funcional que permite medir el nivel del espejo de agua en humedales, así como la temperatura del agua.

Para la construcción y calibración del prototipo se utilizó un tubo de PVC, y un conjunto de láminas, y en la parte superior etiquetada con 1 en la figura 6 se instaló el nodo de medición diseñado y presentado en [15]. Este sistema se debía colocar en el humedal siguiendo la configuración mostrada en la figura 2. Se realizaron pruebas en el Laboratorio de Sistemas Espaciales del ITCR para caracterizar la precisión de las mediciones, donde se logró obtener un error de medición promedio del 10% para el sensor de nivel de agua, y de un 5% para los sensores de variables ambientales: humedad y temperatura. Las pruebas se hicieron validando las mediciones del nodo con mediciones manuales con cinta métrica y termómetro manual.



Figura 6. Componentes para implementación del prototipo del dispositivo de medición de nivel de agua y variables ambientales para el humedal **fuentes:** Dr. Julio Calvo Alvarado.

OE1-A3: Una base de datos de campo climáticos y de niveles y temperatura del agua del humedal para el estudio de su hidrodinámica y su relación a la variabilidad climática.

Esta actividad se logró mediante un convenio de uso de equipo de medición climática, Estación OET. Esta estación prestó el acceso a los datos que se usaron para el diseño del nodo. Se muestra un ejemplo de estos datos en la figura 7 donde se muestran los patrones de radiación usados para el diseño del sistema de alimentación del nodo en [15].

Además, la información, se participó con investigadores el consorcio académico OET (<https://tropicalstudies.org/landing/consorcio-academico-oet/>) para comprender necesidades de uso de los sistemas remotos, como la estación remota terrestre que se diseña más adelante.

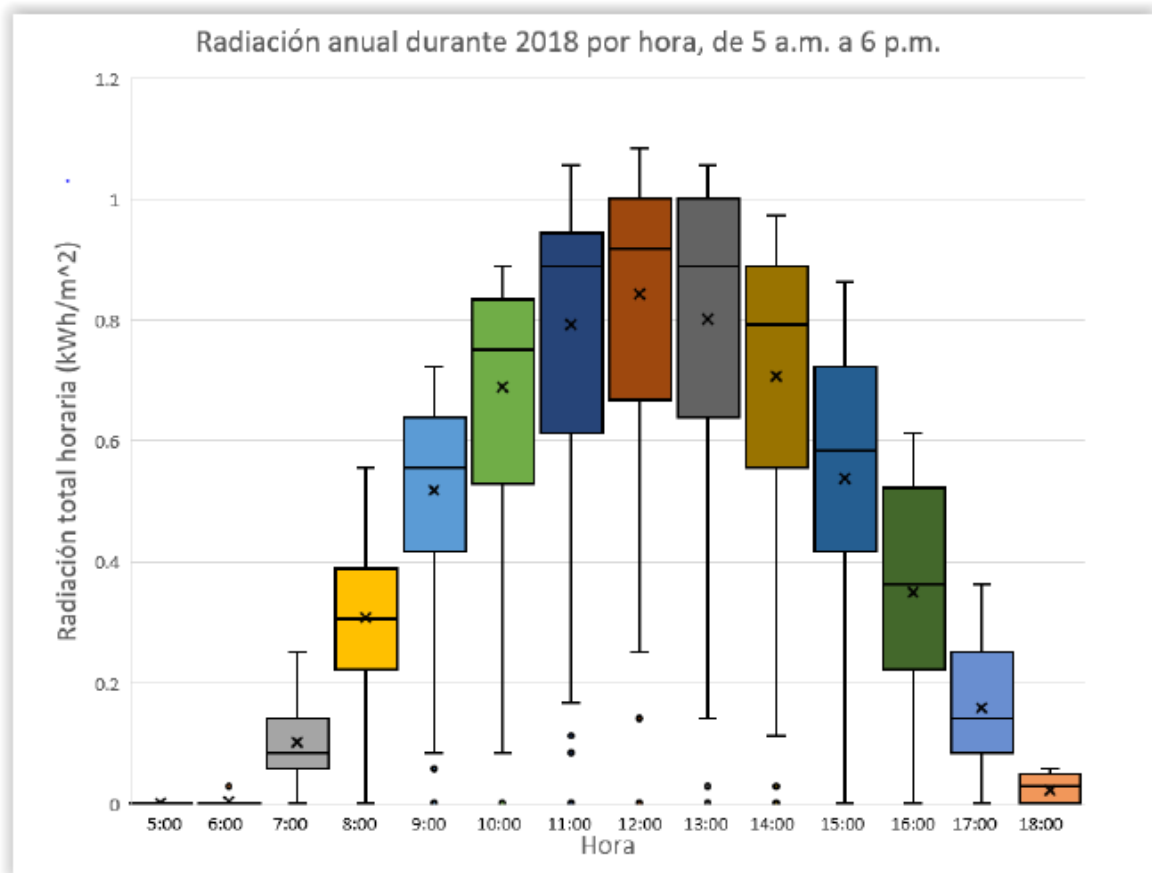


Figura 7. Radiación anual por hora para la zona geográfica de interés [15].

OE1-A4: Un levantamiento de la batimetría del Humedal empleando sensores remotos y datos de nivel del humedal.

Para ello se hizo un levantamiento de puntos de control para la batimetría del humedal con Teodolito y un receptor GNSS GS_15 como se muestra en la figura 8. Este levantamiento fue realizado con la ayuda de una estudiantes e investigadores de Ingeniería Forestal. Los detalles del levantamiento de información se describen en [16]. Posteriormente se usaron modelos de elevación digital para hacer una composición de la cobertura batimétrica del humedal.



Figura 8. Proceso de levantamiento de puntos de control para la batimetría del humedal Palo Verde. [16]

OE1-A5: Una base de datos de cobertura batimétrica del humedal empleando imágenes satelitales

A partir de los datos obtenidos en la actividad anterior y descritos con detalle en [16] se componen mapas de la batimetría del humedal. Se presenta en la figura 9 una imagen preliminar de la batimetría del humedal Palo Verde en el rango de 8 a 22 metros sobre nivel del mar con una precisión de 2 cm. Esta imagen fue compuesta a partir de la base de datos de datos batimétrica que se generó durante el proyecto y provee una vista de la distribución de la masa de agua del humedal. La figura 10 evidencia el proceso de clasificación de la imagen, donde se identifican los distintos componentes presentes en la masa del humedal Palo Verde.

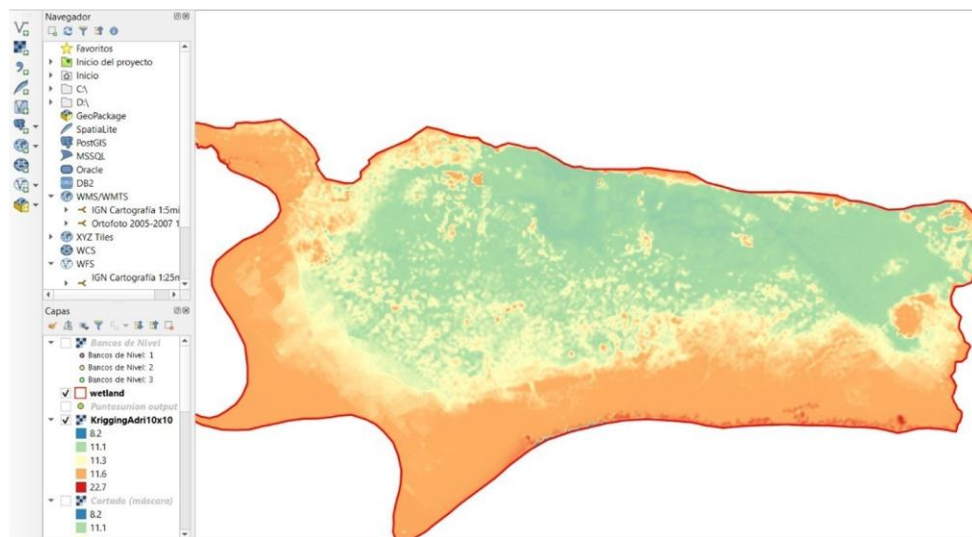


Figura 9. Batimetría del humedal Palo Verde a partir de la base de datos. [16]

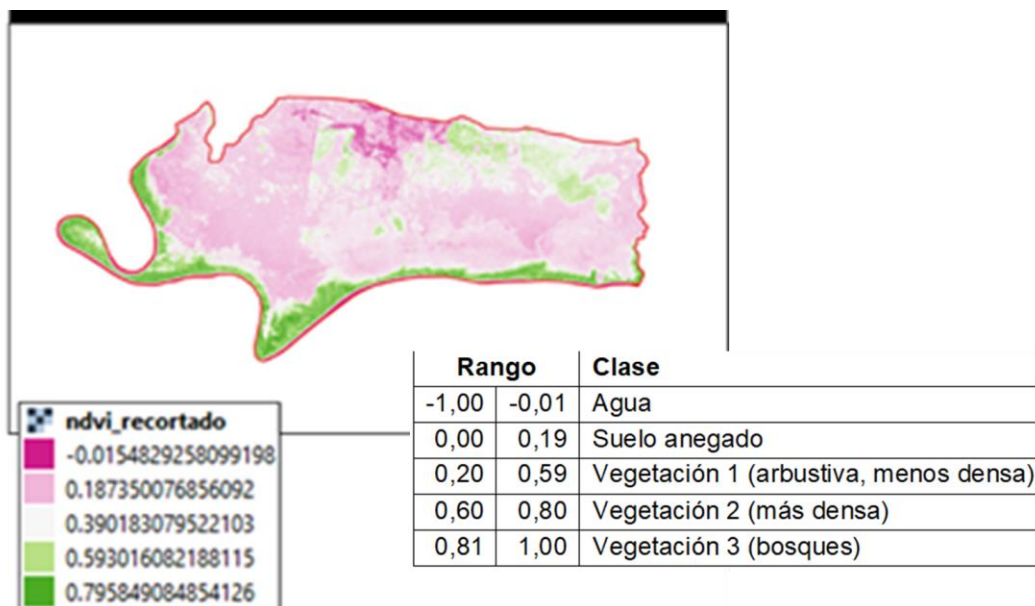


Figura 10. Clasificación de los componentes de la masa de humedal palo verde. [16]

OE2. Misión Tecnológica - Estación Terrestre Remota (GRT/GST)

OE2-A1. Diseño e implementación de una estación de comunicación remota para la transmisión diaria de datos científicos a un centro de investigación en el TEC vía satélite.

Antes de iniciar el proceso de diseño de la estación terrestre remota (GRT/GST) se realizó una visita al Parque Nacional Palo Verde para estudiar las condiciones de operación de la estación remota que se debió diseñar, donde se encontraron los siguientes requisitos de entrada.

Requisitos de diseño de la estación remota (GRT/GST):

- Disponibilidad de datos meteorológicos del lugar en estación de la OET.
- Selección de dos puntos de medición por parte de los socios científicos.
- Acceso a torre con disponibilidad de línea vista a los puntos de medición y acceso a electricidad.
- Verificación de ángulos de elevación para antenas GRT.
- Necesidad de nodos de sensado altamente independientes.
- Contacto con personal científico que ayude a validar requerimientos operativos del sistema.

A partir de los requisitos de diseño se produjo una arquitectura para la estación remota terrestre (GRT/GST) que se muestra a continuación en la figura 11:

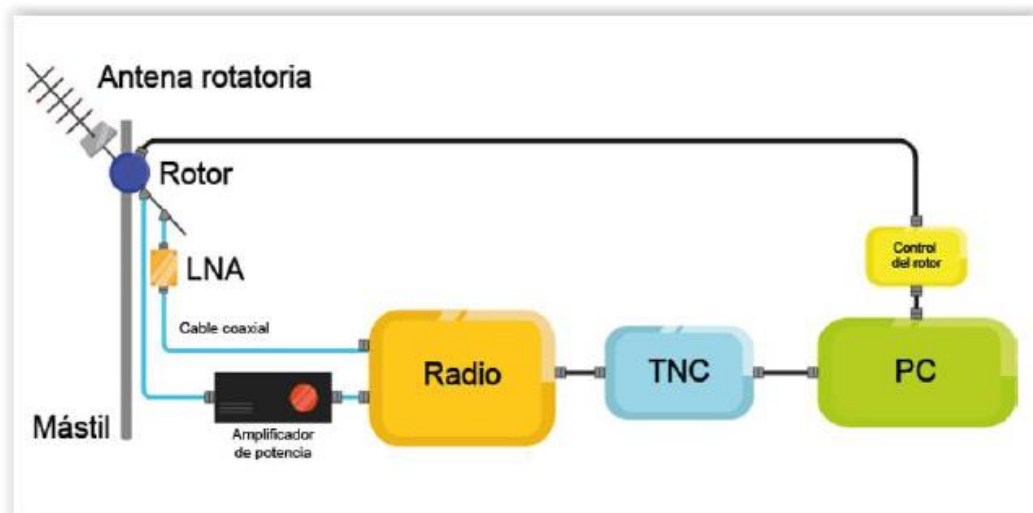


Figura 11. Arquitectura física de la Estación Remota implementada para el proyecto GWSat.

Para la integración de los componentes de la estación terrestre remota (GST/GRT), se requirió desarrollar una plataforma de interconexiones, que adoptará los protocolos y las necesidades de consumo de potencia, de los distintos módulos de una estación remota bajo el contexto del proyecto GWSat, según se describen en [17]. El diseño a nivel de conexiones se puede visualizar en la figura 12. En donde se ilustra que se utilizaron 6 pines para los buses que van a soportar corrientes de 6A y 1 pin para todas las demás conexiones de 1A o menos. Además de las conexiones mencionadas se agregaron 4 GPIOs adicionales para acceso externo. Estos se colocaron en el extremo derecho superior del sistema, mediante estos puertos se puede acceder a cualquier módulo UART, SPI o algún otro protocolo.

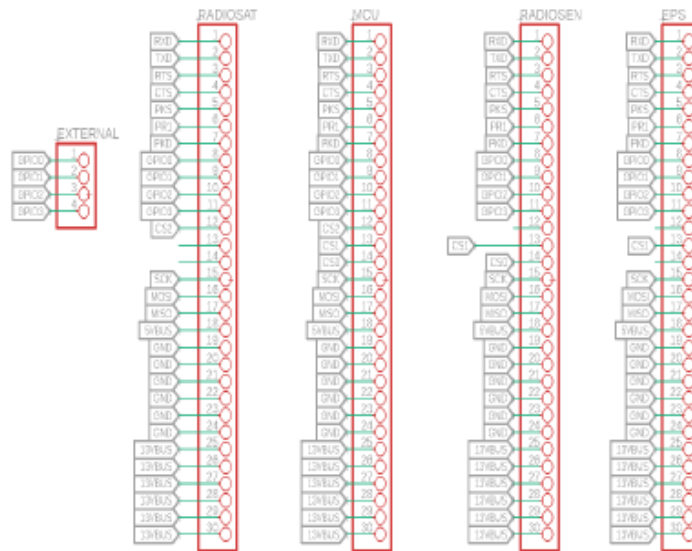


Figura 12. Diseño del módulo de interconexión a nivel de esquemático. [17]

El diseño final del circuito impreso tiene una dimensión de 12.065 cm de largo y 9.526cm de ancho con 4 orificios de 2.54mm de diámetro para colocar el eventual soporte mecánico de la GRT, como se observa en la figura 13.

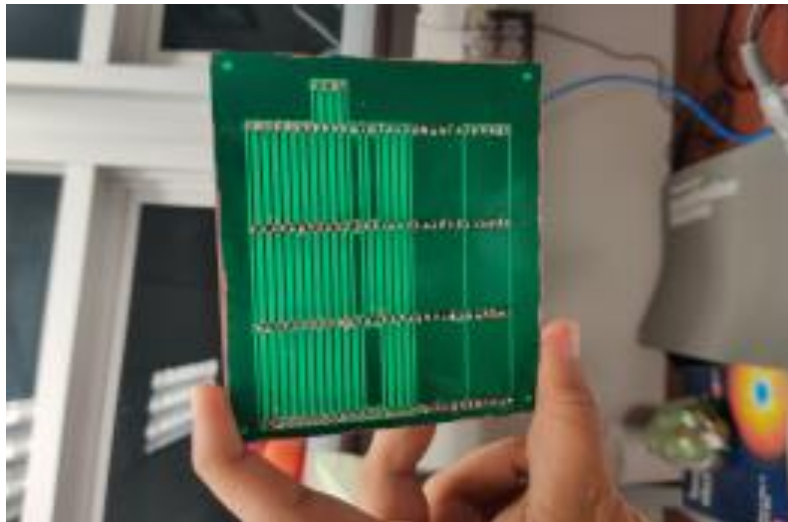


Figura 13. Vista lateral de plataforma de interconexiones. [17]

Para validar visualmente la correcta ejecución del protocolo a diferentes frecuencias se procedió a utilizar el analizador lógico HP 1651A. Los resultados obtenidos se ilustran en las siguientes figuras 14, 15 y 16.

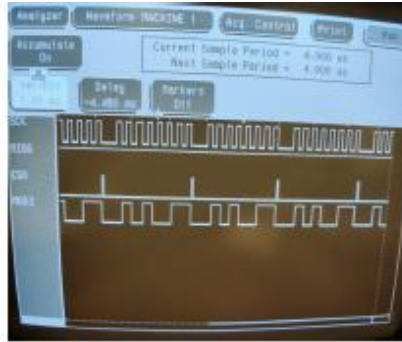


Figura 14. Protocolo SPI operando sobre la interfaz implementada a 6250 Hz. [17]

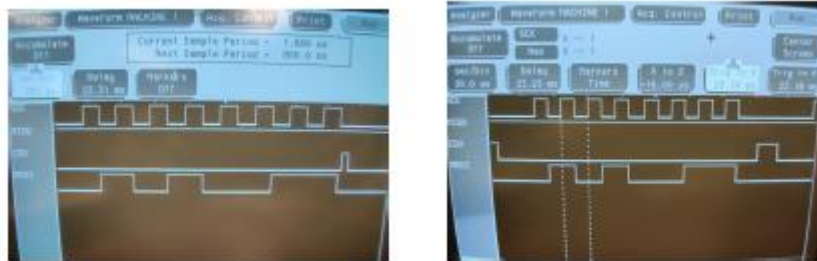


Figura 15. Protocolo SPI a 61 kHz (izquierda) y 488 kHz (derecha) [17].

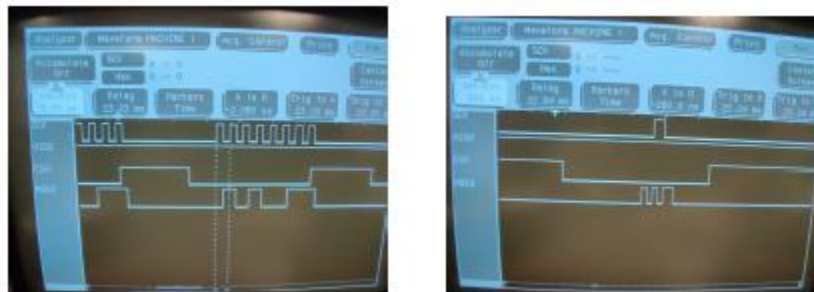


Figura 16. Protocolo SPI a 3.9 MHz (izquierda) y 7.8 MHz (derecha) [17].

Se debía, además, proporcionar un primer diseño para crear una estación terrestre que le permitiera poseer autonomía energética a la estación remota de comunicación satelital y se pudiera implementar en el humedal de Palo Verde. Este trabajo se implementó en [18]. Para ello se realizó una simulación donde se hicieron diferentes pruebas para observar el comportamiento y la respuesta del sistema, en primer lugar se realizaron simulaciones tanto para el mes de marzo 2018 como para el mes de octubre 2018, debido a que corresponden a los meses con mayor y menor radiación respectivamente, además, se implementaron diferentes cargas siendo las más significativas las cargas de 171Ω , que corresponde a cuando el sistema se encuentra en reposo y 1.2Ω , que sería la carga al realizar una transmisión. Además, se implementaron en la simulación paneles solares con diferente potencia, y al final se usó un panel de 35W y otro de 50 W.

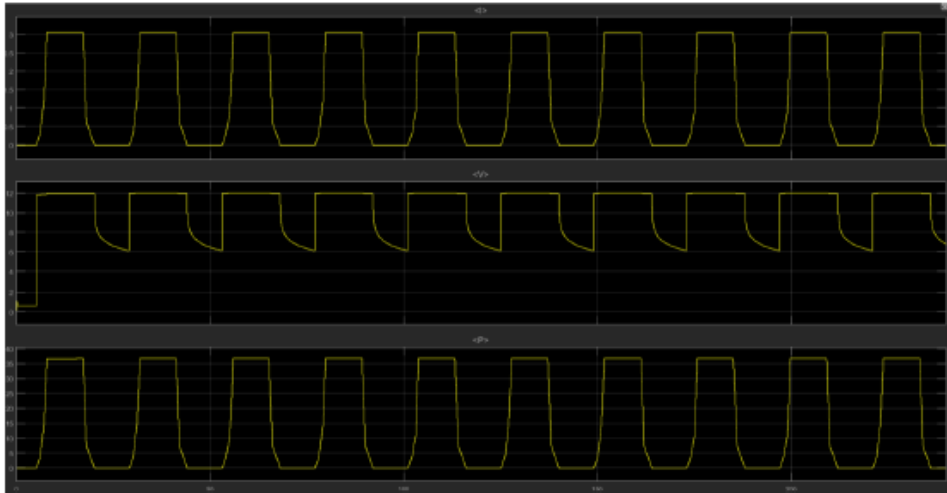


Figura 17. Comportamiento para el panel de 50W con una carga de 171Ω [18].

Seguidamente de las simulaciones, se realizó un proceso de metalización de la placa, desgaste de cobre, lijado, pintura, serigrafía y soldado para obtener la placa en físico que se puede observar en la figura 18. Para mayor detalle del proceso de fabricación del PCB se puede consultar el Apéndice D de [18].



Figura 18. Prototipo físico del módulo de potencia desarrollado para la estación remota de GWSat [18].

Para poder implementar los sistemas eléctricos dentro de la carcasa se requería diseñar un sistema modular que garantizará la estabilidad térmica de los componentes electrónicos para la estación remota de Palo Verde, como se describe en [19]. Previo a los experimentos formales, se realizaron pruebas preliminares, para determinar el comportamiento del radio, con el fin de establecer los valores de los parámetros en los experimentos de manera tal que se pudiera obtener la mayor cantidad de información posible, para lo cual se recurrió al micrófono de este, que de ahora en adelante se le conocerá como PTT (“Push to talk”); el cual permite simular una transmisión ya que tiene el mismo efecto sobre el módulo de potencia. En la figura 19 se puede observar el cambio de temperatura que presenta el radio durante su funcionamiento en transmisión.

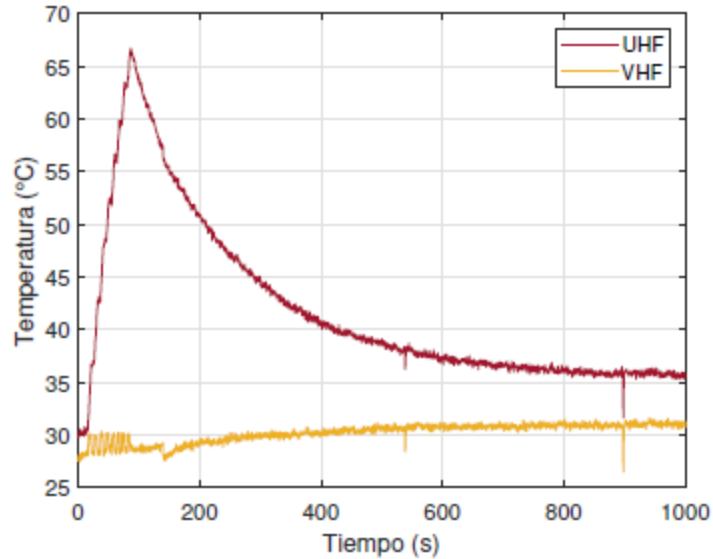


Figura 19. Gráfico Temperatura vs tiempo para los dos módulos de potencia [19]

Para la disipación de calor dentro del gabinete de la estación remota se diseñó un sistema modular que permitiera una estabilidad térmica dentro de este, el cual se observa en la figura 20.

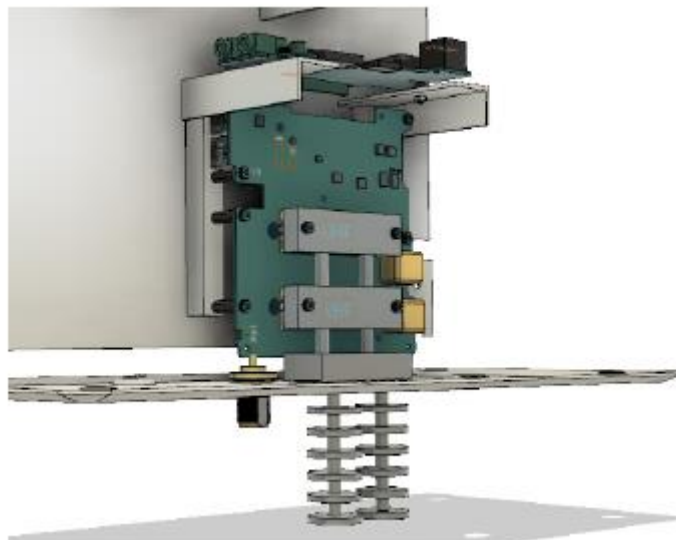


Figura 20. Diseño del sistema modular de disipación de calor de la estación remota [19]

Seguidamente se procedió a validar el sistema de transferencia de calor para la refrigeración del radio transmisor incorporado en la estación remota GWSat. Se realizó una simulación del sistema modular donde se evalúan diferentes materiales para creación del mismo. Para el sistema se modifica la geometría se obtiene el diseño de las aletas finales para el sumidero de calor además se obtuvo un coeficiente convectivo de $4.18 \text{ W/m}^2\text{°C}$ en las aletas, como se observa en [20]. En la figura 21 se muestra el diseño final del sumidero con las aletas y la simulación realizada. El prototipo realizado permite disipar la energía sin que la superficie de este llegue a una temperatura mayor de 60 °C para resguardar los componentes electrónicos de la estación de comunicación, este es en aluminio 6061 T6.

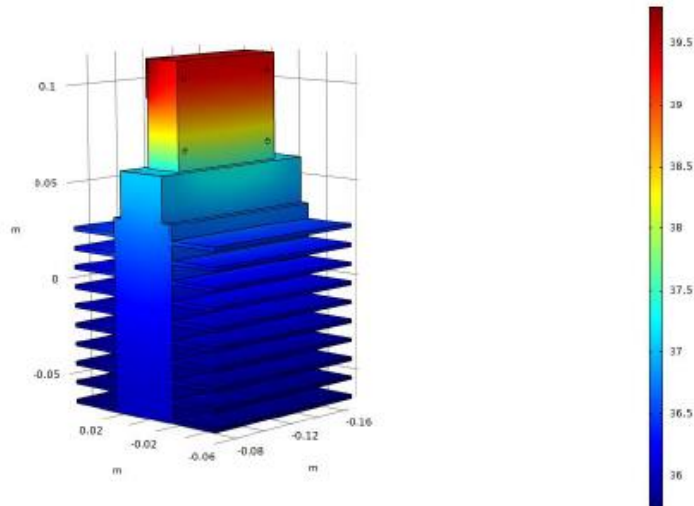


Figura 21. Diseño y simulación del sistema modular [20]

Para que la estación remota funcione adecuadamente se requería un diseño de la carcasa [21], además de un diseño de la estructura para la estación de comunicación remota que la soporte y la proteja contra la radiación solar [22]. En la figura 22 se observa el diseño de la carcasa esta permitirá proteger todos los componentes internos de factores como las altas temperaturas las cuales pueden llegar a 39°C a 40°C durante el día en temporada seca y ya que mayor exposición solar a temperaturas más altas, la exposición a la radiación solar también incrementa y esto cómo tiene como consecuencia el aumento de la temperatura de los componentes, que por sí solos tienen un problema de calentamiento, provocando que algunas veces el sistema se apague. Otro factor importante es la lluvia la cual puede provocar desgastes en la pintura y oxidar el aluminio, lo cual a largo plazo puede afectar los componentes internos, afectando su correcto desempeño y vida útil de la estación. Debe incorporar componentes externos y para la instalación se requiere que sea fácil de transportar y ensamblar, con un diseño intuitivo.



Figura 22. Diseño de la carcasa para la estación GRT/GST para GWSat [21].

Para el diseño de esta carcasa se utilizaron los requisitos de entrada presentados al inicio de la sección y se entrevistaron a potenciales usuarios. Se consideró la integración de la carcasa como parte del ambiente, y aspectos como disponibilidad local de materiales y técnicas de manufactura. Se sintetizó un diseño que fuera de fácil mantenimiento y fácil de transportar con capacidad de integración de paneles solares externos para alimentar los componentes electrónicos internos.

Con el objetivo de determinar la temperatura en condiciones reales y diseñar el sistema de protección de la carcasa, se realizaron simulaciones en dos condiciones, como se observa en la figura 23, con la radiación que se presenta en el lugar al medio día, y con la radiación incidente de manera lateral, que según la carta solar esto es entre las 6 a.m. y 9 a.m. [22], en ambos casos se aplicó la radiación máxima según los datos obtenidos. En el modelo se insertaron en el gabinete en la ubicación y dimensiones reales unas placas de circuitos impresos para evaluar la temperatura que alcanzan en cada condición.

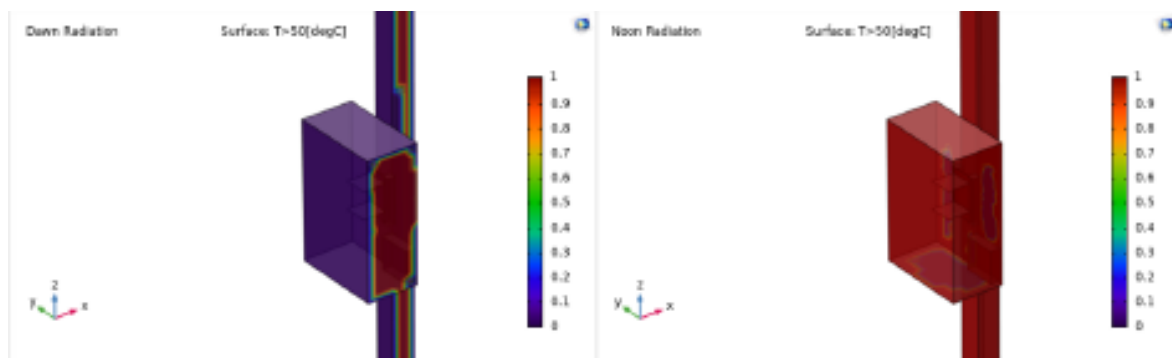


Figura 23. Fracción de temperatura al amanecer y al mediodía [22].

En la figura 24 se observa la simulación de la carcasa con un alero que se diseña para evitar la radiación directa del sol, y mantener la carcasa a una temperatura constante aproximadamente 40°C.

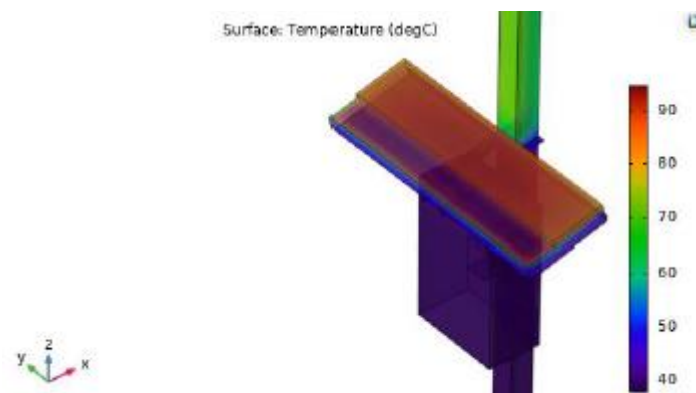


Figura 24. Temperaturas obtenidas en configuración del alero 3 con espuma de poliuretano. [22].

Finalmente, se realizó el análisis de la degradación de diferentes materiales para optimizar el uso de la carcasa utilizada para el proyecto GWSat, según las especificaciones de desempeño y durabilidad para estaciones remotas a la intemperie [23]. A continuación se detallan las características de desempeño de la carcasa:

1. Temperatura de servicio: La temperatura máxima alcanzada en Palo Verde para la estación seca es de 40°C. Considerando la conducción térmica de los materiales y la exposición a la radiación solar durante 12 horas continuas, se incluye un gradiente de 10°C para el material en el escenario de la temperatura máxima.

2. Durabilidad: se requiere que la carcasa tenga una durabilidad entre 6 meses y 5 años, por lo que se consideran importantes la resistencia al agua salada y a la radiación UV debido a la ubicación geográfica en la que se encuentra.

3. Propiedades físicas: El material debe ser liviano, densidad menor a 8000 kg/m³.

4. Resistencia a la corrosión: para el ambiente en el que va a estar expuesto el material es de vital importancia la resistencia a la corrosión.

5. Precio: SETECLab requiere que el precio de los materiales a utilizar sea bajo los 100,000 colones/kg.

6. Disponibilidad en Costa Rica: los materiales seleccionados deben estar disponibles en el país.

Como pruebas seleccionadas para el análisis de la configuración de materiales de la carcasa se realiza el envejecimiento en cámara UV de 16 muestras de las 24 que contienen recubrimiento, los 8 restantes se utilizan como parámetros de control. El estudio de corrosión en cámara niebla salina de las 36 probetas se realizó durante 400 horas y durante todo el proceso se realizó la toma de imágenes de las probetas. Es importante aclarar que, al ser ensayos acelerados que exponen los materiales a condiciones extremas, no tienen equivalencia al tiempo real de los materiales expuestos a la intemperie. Los materiales escogidos para realizar las pruebas son: acero inoxidable 304, aluminio 6061, acero al carbono 1020, PET. Los recubrimientos utilizados fueron: ZINGA y recubrimiento comercial. En la figura 25 se observa la tabla de resumen de los resultados obtenidos en el envejecimiento UV.

<i>Familia</i>	<i>Decoloración</i>	<i>Coloración amarilla</i>	<i>Fisuramiento</i>	<i>Ampollamiento</i>	<i>Buena Adherencia</i>
IR	x	x		x	
IZ					x
AR		x			
AZ	x				x
1020R					x
1020Z					x
PETR					x
PETZ			x		

Figura 25. Resumen de los resultados obtenidos en el envejecimiento UV [23].

En la figura 26 se observa el cambio en los materiales durante el estudio de corrosión en la cámara salina, y como la variación de horas del material expuesto repercute en cambios microestructurales del material.

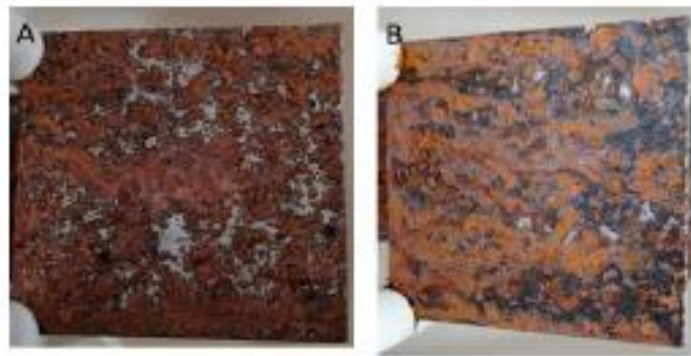


Figura 26. Acero bajo carbono 1020 natural. A) 25 horas B) 200 horas [23].

En la figura 27 se observa el porcentaje de corrosión que sufrieron los materiales según el material y el recubrimiento. Es importante aclarar que estos porcentajes se calculan de manera aproximada, utilizando la tabla 1 de la norma ASTM D610-08 2019 y utilizando la metodología de manera análoga con los materiales de la experimentación [23].

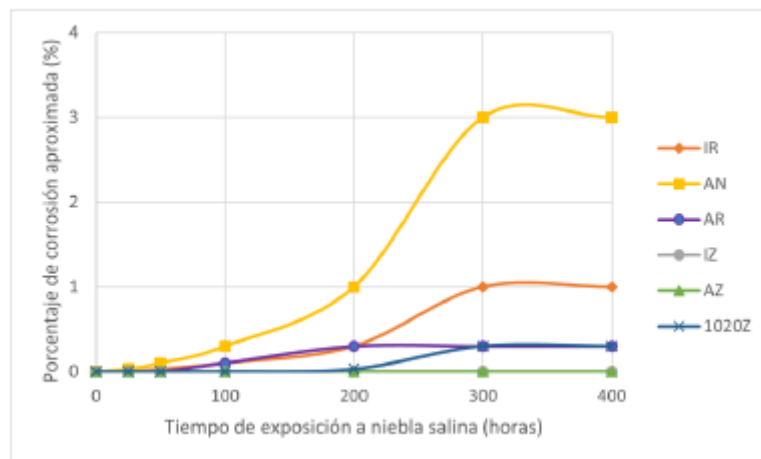


Figura 27. Porcentaje de corrosión aproximada vs Tiempo de exposición a niebla salina de las configuraciones que obtuvieron mejor desempeño en la prueba de cámara salina [23].

OE2-A2. Definición de modos de operación satelitales para la implementación de un sistema satelital “Almacenar y Enviar”

El desarrollo de modos de operación requirió en primera instancia que se desarrollarán las herramientas y el marco de trabajo para el software embebido a bordo del Satélite GWSat. Para esto se consideraron aspectos como el modularidad, la portabilidad para definir una arquitectura de desarrollo orientada a capas, según se presenta y se discute en [24], y que se muestra en la figura 28.

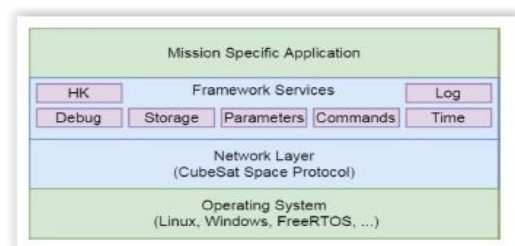


Figura 28. Arquitectura de software embebido para el desarrollo de los modos de operación de GWSat [24].

A nivel de la estación terrestre los modos de operación se abordaron en la implementación del software embebido de la estación remota (GRT/GST). En el trabajo [25] se describe con nivel de detalle el análisis de cobertura, tiempos de contacto, entre otros. Este trabajo tenía como objetivos: (1) Diseñar la arquitectura del enlace de comunicación de subida entre la estación remota terrestre y el satélite GWSat. (2) Diseñar el algoritmo de comunicación que permita realizar un enlace ascendente, entre la GRT y el GWSat mediante la obtención de las secuencias de las rutinas, tanto en la GRT como para el GWSat y (3) implementar el envío de datos hacia el satélite GWSat por medio del enlace de subida.

Los principales resultados de esta implementación se muestran en la figura 29, donde se presenta la arquitectura funcional implementada para el sistema de comunicaciones del proyecto GWSat.

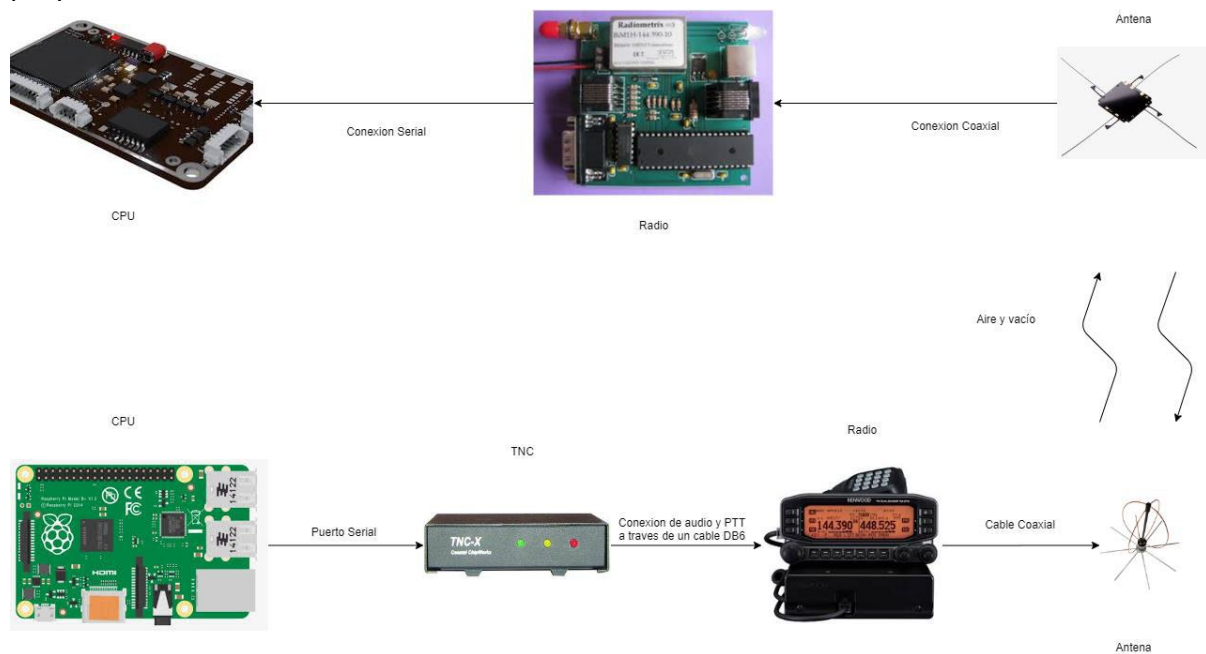


Figura 29. Arquitectura funcional para la implementación del esquema de comunicaciones de la estación remota (GRT/GST) y el segmento de vuelo del satélite GWSat [25]

OE2-A3. Pruebas de los modos de operación definidos en A2 utilizando el set de aviónica satelital del Laboratorio de Sistemas Espaciales (SETEC).

La implementación de los modos de operación para el satélite se realizó en dos fases. A nivel de los sistemas en tierra, la implementación del software embebido se hizo por medio de kits de desarrollo con Raspberry Pi, un TNC de hardware que se ensambló y se probó a nivel de laboratorio y por medio de uso de los radios adquiridos para el proyecto Irazú. Para el segmento de vuelo, el equipo de trabajo de GW University proveyó un kit de desarrollo que se usó para validar el trabajo desarrollado en [24], y se retomó su uso para la implementación de los algoritmos de control que se muestran en el objetivo específico 3 de este proyecto.

OE2-A4. Recolección de datos científicos y satelitales utilizando una estación en tierra en el TEC.

La figura 30 resume las características de la implementación del software embebido para la comunicación entre la estación terrestre remota (GST/GRT) y el satélite GWSat. Se muestra tanto la arquitectura de implementación, como el formato de trama AX.25 para su comunicación con el satélite. En las pruebas de comunicación dentro del campus del ITCR se simuló el satélite GWSat por medio de la estación de operaciones del ITCR (GOS, por sus siglas en inglés). Esta estación se encuentra en el edificio K1-325 del campus central del ITCR. Por medio del protocolo de pruebas se logró un porcentaje de recepción del 100% de las tramas con un tiempo entre cada transmisión de 30 s. Este tiempo se utilizó para estabilizar el consumo de potencia del radio de la GRT. La estación terrestre remota (GRT) se colocó en el Delta Lab que se encuentra dentro del Campus central del ITCR, desde donde se implementó el envío remoto de datos, simulando la estación que se debería colocar en el Humedal de Palo Verde. Este esquema se implementó de esta manera debido a que no se cuenta con un satélite operativo, ya que el irazú finalizó su misión en marzo de 2020, cuando aún el sistema estaba en desarrollo.

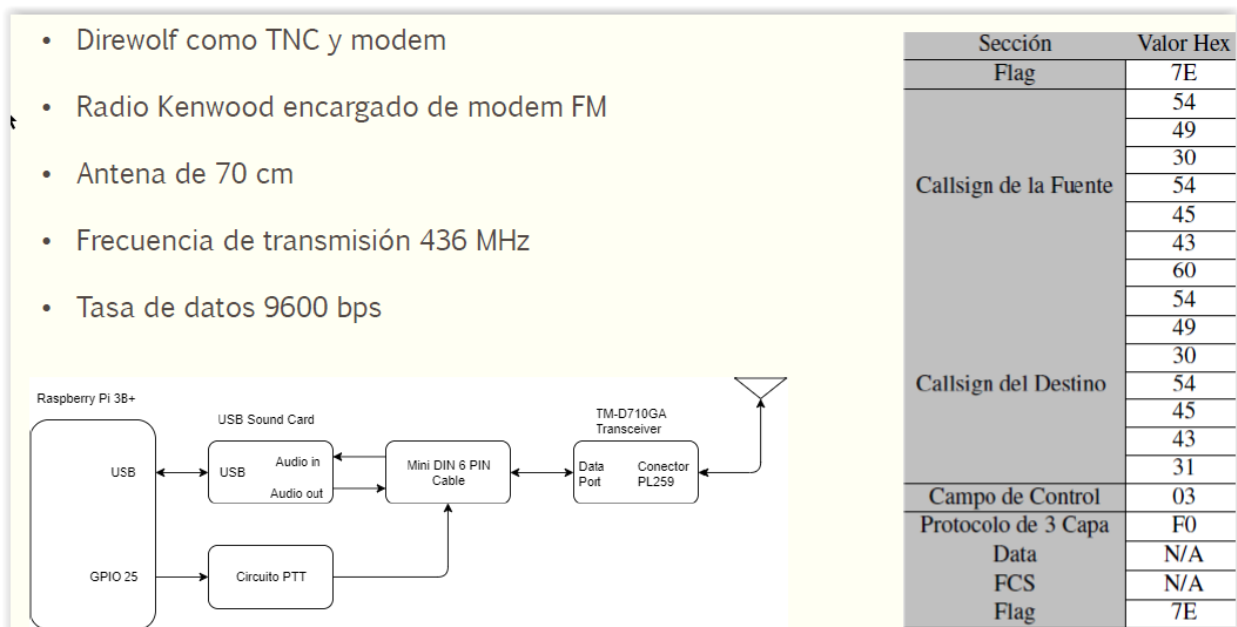


Figura 30. Arquitectura de implementación del sistema de comunicaciones de la estación terrestre remota (GST/GRT) [25]

Se trabajó adicionalmente, en mejorar las características de operación de la estación operaciones del ITCR (GOS) [27] y en explorar nuevos diseños de antenas para la estación terrestre remota [28].

El trabajo desarrollado en [27] permitió implementar un prototipo de un sistema de seguimiento de satélites que se muestra en la figura 31. Este proyecto permitió contar con un prototipo de sistema para el movimiento de una antena con control de direccionamiento cuya operación será óptima que la del sistema actualmente implementado en la estación terrestre del ITCR (GOS). Se logró llevar a cabo el prototipo, sin embargo, no fue posible su

implementación en el edificio K1 debido a las restricciones de acceso a los espacios del TEC ocasionados por la pandemia de COVID 19.



Figura 31. Prototipo del sistema de seguimiento de satélites para las operaciones de GWSat. [27]

En cuanto al mejoramiento del desempeño de las antenas de la estación terrestre remota (GRT), en el trabajo de [28] se propuso como meta contar con una propuesta de diseño de antenas en arreglo en fase por medio de software especializado para las estaciones remotas construidas por el SETEC-Lab. El diseño propuesto para la antena de arreglo de fase se muestra en la figura 32 y figura 33. Para este diseño teórico se logró satisfacer el 75% de los requerimientos establecidos. El 25% restantes fueron afectados directamente por las incidencias entre elementos y dimensiones físicas de los elementos base de la simulación. Debido a disponibilidad de tiempo de los investigadores se suspenden los esfuerzos prometedores para la manufactura y pruebas del diseño propuesto, por lo que se continúa trabajando con la topología actual de tanto la estación de operaciones GOS como de la estación remota GST/GRT.

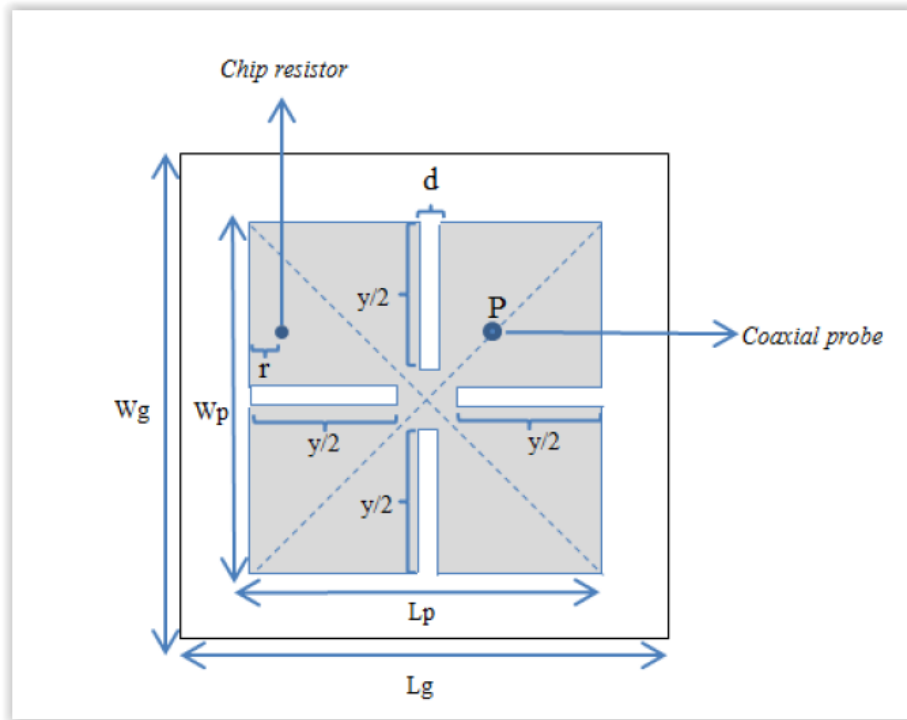


Figura 32. Vista del diseño de un elemento del arreglo de antenas de micro-parche propuesto para la estación remota de GWSAT. [28]

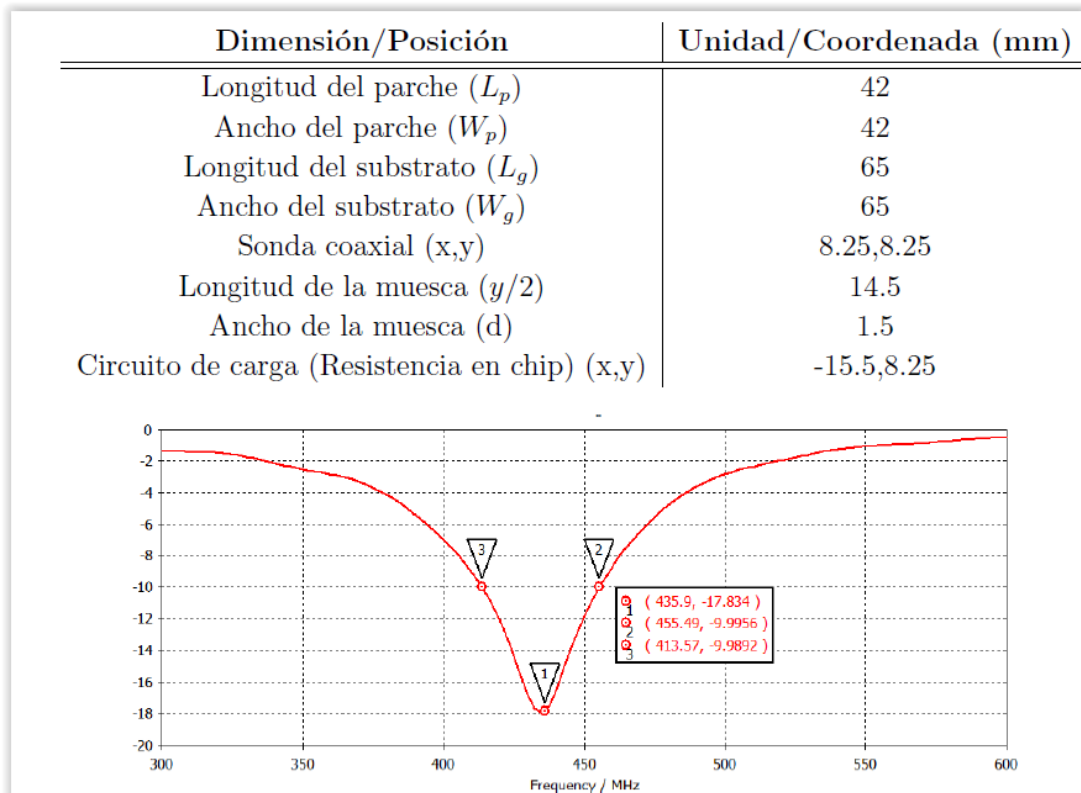


Figura 33. Características de diseño propuestas para cada elemento del arreglo según [28]

OE3. Misión Tecnológica - Conjunto de Algoritmos de Control

Este objetivo se desarrolló para el segmento de vuelo, es decir el Satélite GWSat, y se contó con pasantías de algunos de los estudiantes participantes del ITCR a la Universidad George Washington, con la finalidad de integrar los resultados de sus trabajos al equipo principal que integra el satélite en dicha universidad.

OE3-A1. Desarrollo y verificación de herramientas de software para el diseño de la misión espacial. Esto incluye funciones para calcular la cobertura del satélite, degradación de órbita, transmisión de datos, periodos de eclipse, entre otras cosas.

Al inicio del proyecto se implementaron distintos análisis de órbita con software comercial de análisis de misión *FreeFlyerTM* para calcular parámetros operativos de la misión. En el trabajo de [25] se implementó un presupuesto de enlace, así como un análisis de cobertura que consiguió demostrar los siguientes parámetros de desempeño de la misión respecto del tiempo de contacto y del volumen de datos a transmitir al satélite durante un mes de operación simulada.

Tiempo de contacto del satélite GWSat con la estación Terrestre Remota:

- Tiempo máximo 5 minutos y 22 segundos
- Tiempo promedio 4 minutos y 11 segundos
- Tiempo mínimo 1 minuto y 10 segundos

Cantidad de información Neta por pasada:

- Máxima 48.3 kB
- Promedio 37.65 kB
- Mínima 10.5 kB

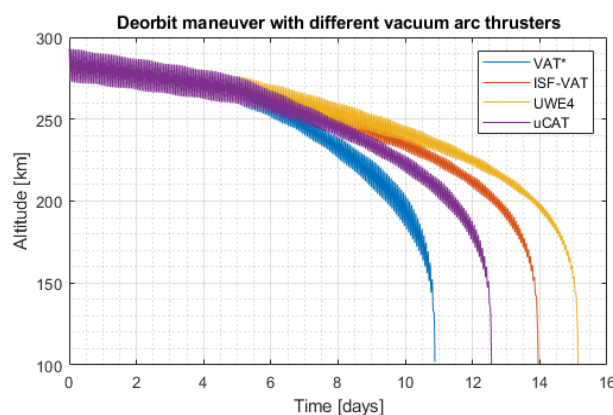


Figura 34. Simulación de la degradación de la altura de la órbita de GWSat al final de su vida útil. [32]

Adicionalmente, se desarrolló un estudio de la degradación de la órbita considerando las distintas tecnologías de propulsión que se quieren demostrar durante la misión y comparando su desempeño con otras tecnologías de propulsión como como los propulsores de arco de Plasma. En el trabajo de [32] se muestran los detalles de este análisis, y en la figura 33 se muestra el proceso de degradación de la altura de la órbita al final de la vida útil de la misión GWSat en comparación con distintas tecnologías de propulsión.

OE3-A2. Elaboración de modelos dinámicos y de control para un satélite tipo CubeSat con sistema de propulsión y cámara.

Para esta actividad se tomaron herramientas de modelaje y simulación de navegación de naves espaciales desarrolladas e implementadas por el Dr. Adolfo Chaves Jiménez, se capacitó a un grupo de estudiantes y se les asignaron distintos escenarios de operación según los modos de operación de la misión GWSat y los objetivos de esta.

El modo de “Station Keeping” fue diseñado e implementado en el trabajo de [29], donde se establecieron los siguientes objetivos: (1) identificar las características dinámicas del GWSat involucrado en el modo de mantenimiento de la estación, (2) diseñar un modelo de control de retroalimentación de orientación para el mantenimiento de la estación del nanosatélite GWSat utilizando propulsores de arco de micro cátodo y pares magnéticos como actuadores principales y (3) verificar el modelo de control de orientación para el modo de mantenimiento de la estación del satélite GWSat mediante herramientas de simulación. La figura 35 muestra el diseño en diagrama de bloques del modelo de simulación implementado para satisfacer los objetivos antes descritos.

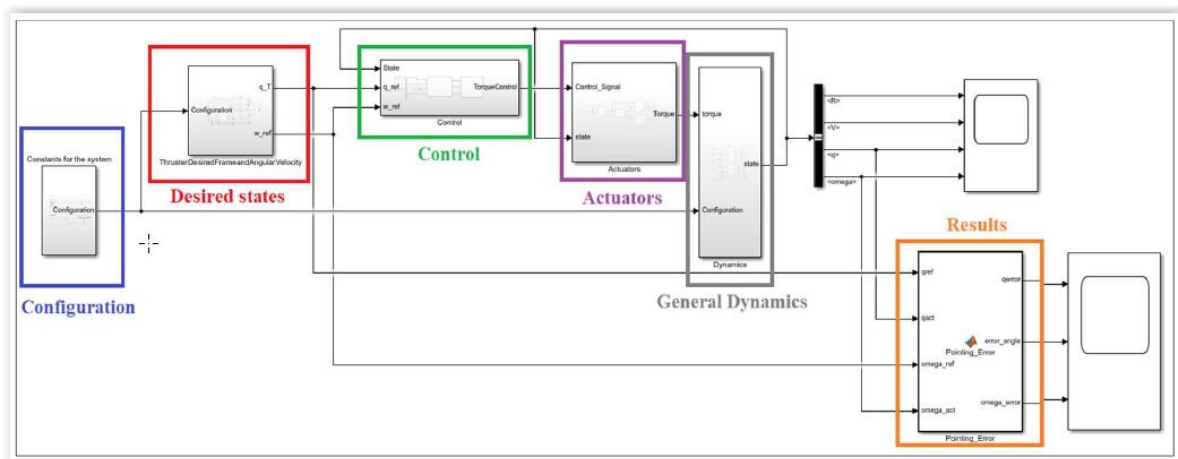


Figura 35. Diagrama de bloques del modelo de simulación implementado para GWSat [29]

En el trabajo de [30] se desarrolló el modo de control “ADCS/Pointing Mode” basado en actuadores μ CAT y MT con el propósito de dar orientación a GWSat. En la figura 36 se observa la ubicación de la cámara en el satélite, así como la definición de los ejes del satélite. De la misma manera que en el trabajo de [29] de modelar el entorno de operación del satélite, establecer un modelo de estimación del estado de la nave espacial. Luego se debió diseñar un controlador y verificar su operación por medio de herramientas de simulación con MATLAB Simulink.

Finalmente, en el trabajo de [31] se presenta una metodología para diseñar controladores clásicos e inteligentes para el nanosatélite GWSat. El objetivo final es integrar ambos controladores en un sistema híbrido. Se diseñaron dos controladores: uno utilizando el método de control LQR y otro utilizando el algoritmo de entrenamiento TD3 basado en aprendizaje por refuerzo profundo. El controlador LQR logró estabilizar el nanosatélite en un tiempo de 950 segundos, con un ángulo de error de 0.15 grados y un error en la velocidad

angular de 3×10^{-5} rad/s. Por otro lado, el controlador TD3 logró un tiempo de estabilización de 700 segundos, con un ángulo de error de 1.4 grados y un error en la velocidad angular de 7.3×10^{-6} rad/s.

Estos resultados sugieren que ambos controladores tienen un buen desempeño en el control del nanosatélite GWSat. El uso de un sistema híbrido que integre ambos controladores puede mejorar aún más el desempeño del sistema.

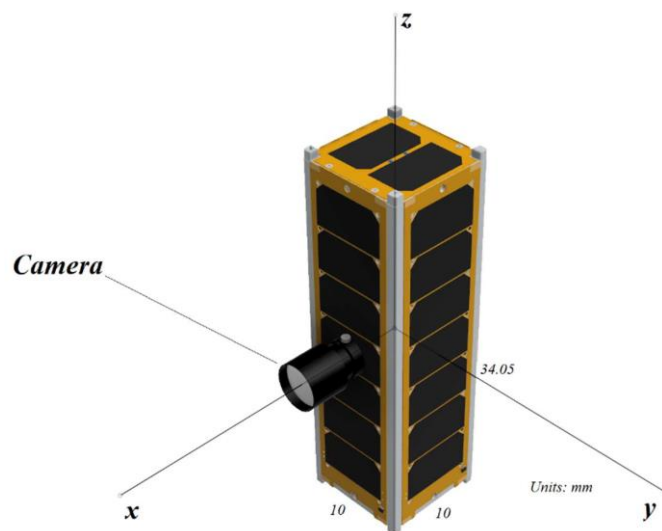


Figura 36. Diagrama de ubicación de cámara en el satélite GWSAT [30]

OE3-A3. Simulación computacional de los modelos definidos en A2 para verificar la efectividad de leyes de control utilizadas para la estabilización del satélite.

Los resultados de las simulaciones se pueden consultar en los artículos [33] y [34] desarrollados a partir de los trabajos descritos anteriormente.

En [33] se muestra que la estabilización del satélite GWSat se realiza fijando la orientación deseada a una posición fija con respecto al marco de referencia inercial. En las condiciones de simulación, esto significa que el par que actúa sobre el satélite es del mismo orden de magnitud que el valor máximo del par producido por los propulsores de control. En algunos casos, esto puede conducir a una perturbación de magnitud igual a la mitad del valor del par de control, con una variación de un periodo aproximadamente igual a 3000 segundos.

A pesar de las perturbaciones del entorno, el sistema converge a su orientación deseada después de aproximadamente una órbita, lo que demuestra que los actuadores son una solución factible para el control de orientación siempre y cuando operen correctamente.

En el artículo [34] se logra demostrar las características y arquitecturas de implementación y de operación de los propulsores para las maniobras de de-órbita (que son necesarias para sacar de órbita el satélite al final de su vida útil) y se comparan múltiples tecnologías contra lo propuesto por esta misión.

Se demuestra que hay oportunidad de mejora contra tecnologías como los propulsores de plasma propuestos en el trabajo.

OE3-A4: Implementar el algoritmo de control en el hardware del satélite desarrollado por la GWU.

Para que el conjunto de algoritmos funcionara de la mejor manera fue necesario implementar el algoritmo de estimación diseñado en un lenguaje computacional compatible con el procesador dedicado del ADCS. Al tratarse de una implementación en hardware, existen ciertas consideraciones que deben tomarse al utilizar un MEKF secuencial. Estas consideraciones atacan problemáticas causadas por la naturaleza de los sistemas digitales, así como problemas de eficiencia en la ejecución del algoritmo. Se utilizó un factor de seguridad, y considerando que el satélite GWSat no debe operar a velocidades angulares mayores que 0.5 rad/s por cada eje, se pudo definir que la frecuencia mínima de operación del estimador MEKF es de 0.05 Hz (20 s).

Este sistema integró los modelos de propagación de órbita, los algoritmos de estimación y control propuestos arriba para integrarlos con la operación en el hardware de vuelo del satélite logrando así un sistema con **Hardware-in-the-loop** que demuestra la correcta operación de los algoritmos propuestos. La figura 37 muestra la arquitectura funcional obtenida finalmente para el satélite GWSat, donde se indican las características y especificaciones de cada uno de los componentes seleccionados para la implementación del segmento de vuelo de la misión GWSat.

En la figura 38 y 39 muestran el sistema de validación implementado en físico del algoritmo de estimación y control de orientación (ADCS) del satélite desarrollado para GWSat [26].

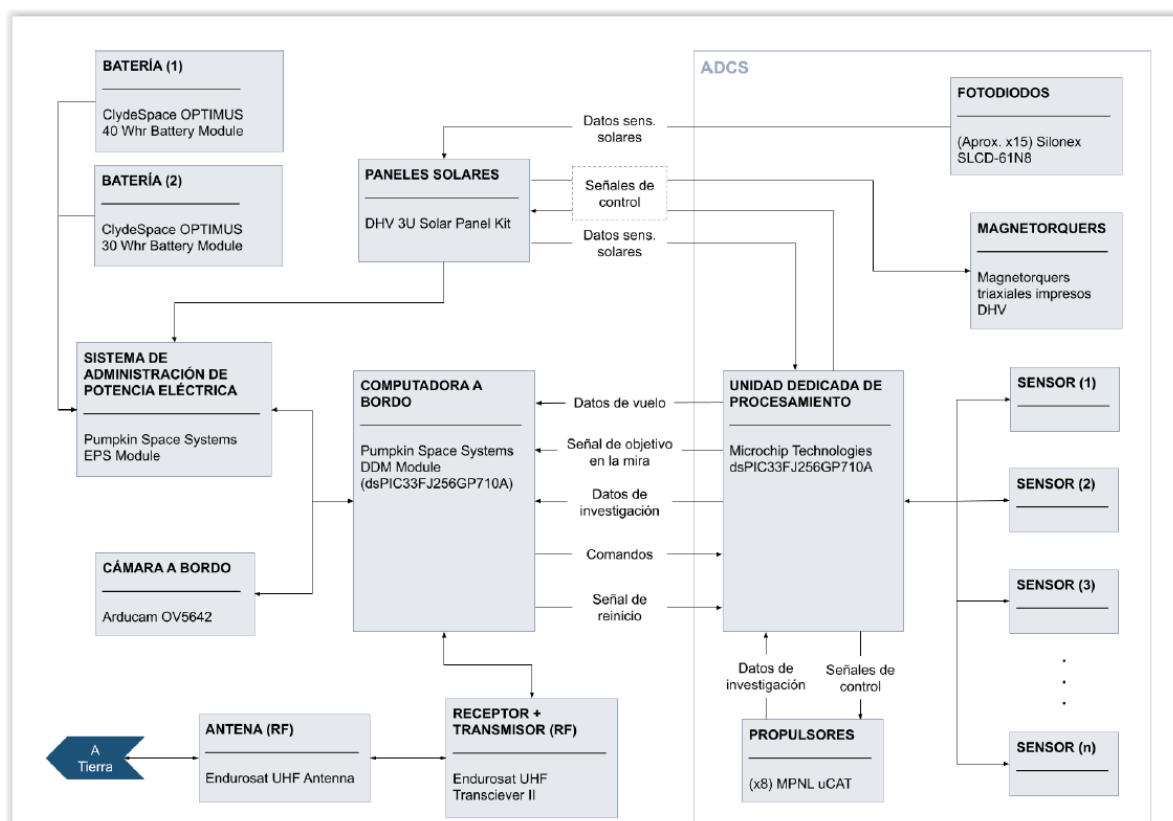


Figura 37. Arquitectura funcional del segmento de vuelo de GWSat. [26]

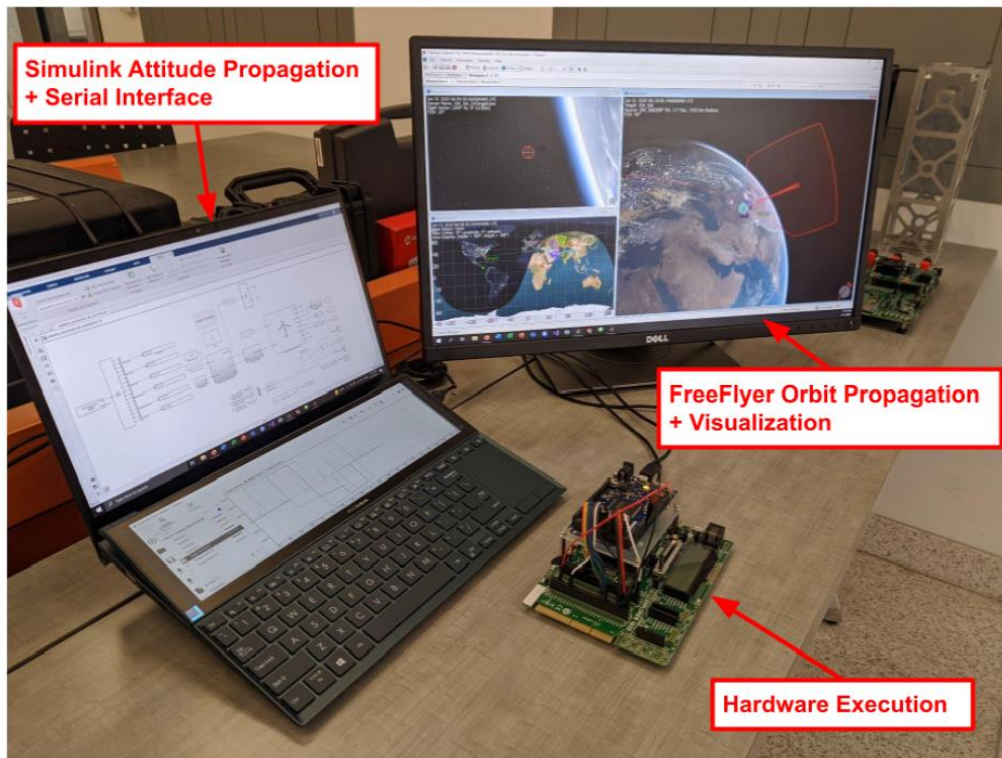


Figura 37. Sistema completo utilizado para la validación del ADCS diseñado [26]

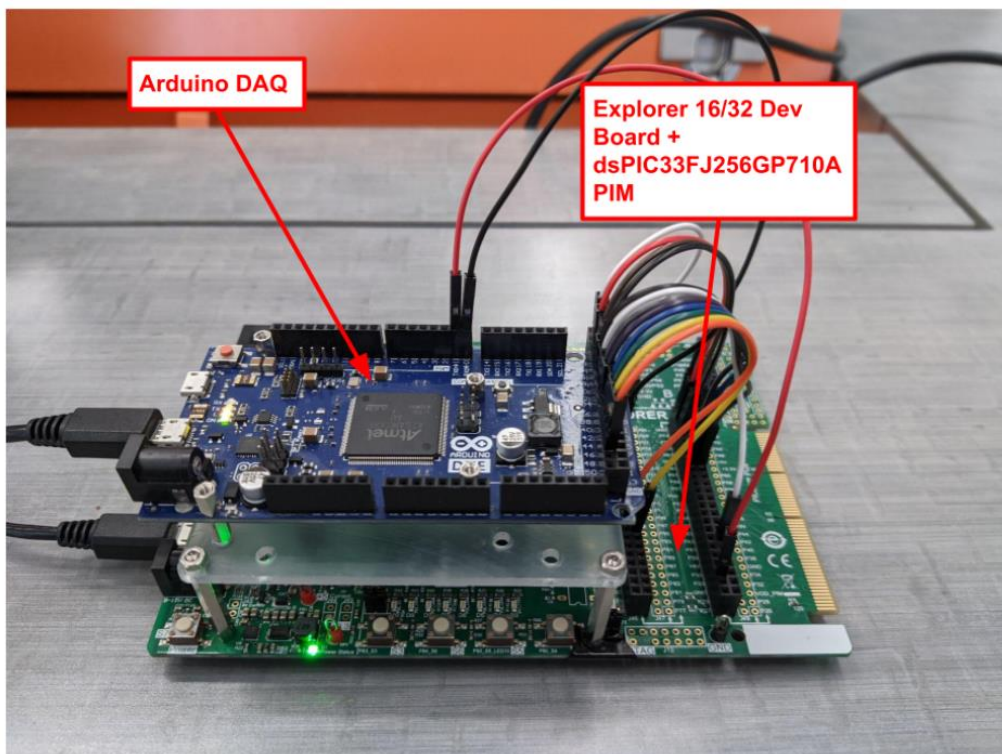


Figura 38. Hardware utilizado para la programación e integración del procesador dsPIC33FJ256GP710A en el sistema de validación [26]

Discusión

Dado que los distintos trabajos finales de graduación, así como los artículos generados y citados con este proyecto de investigación desarrollan su propia discusión respecto del nivel de alcance de las actividades realizadas, en esta sección se enfoca en hacer una discusión del nivel de cumplimiento de los objetivos planteado y presentados en la tabla 1.

Respecto de la misión científica el trabajo se desarrolló desde dos vertientes. La primera se enfocó en caracterizar el humedal de Palo Verde por medio de un levantamiento de la batimetría de la masa de agua y la clasificación de sus componentes usando sensores remotos. Se logró un levantamiento exitoso de los puntos, como se muestra en las figuras 9 y 10. Se muestra que se logra realizar una clasificación de los distintos componentes del humedal y se pudo crear una modelación con alta precisión con curvas de nivel a 0.25 cm, lo cual provee una resolución óptima para la caracterización de la masa de agua del humedal. Desde el punto de vista los objetivos de relacionados con el estudio del humedal se cumplieron a cabalidad. La segunda vertiente de la misión científica fue relacionada con el desarrollo de la tecnología para caracterizar la masa de agua del humedal por medio de métodos indirectos, es decir, usando la medición del nivel de agua y las variables ambientales en la superficie del humedal. Para esto se logró un diseño funcional y la manufactura de un prototipo que se caracterizó a nivel de laboratorio. Se logró una precisión del 90% para las mediciones de nivel de agua con sensores ópticos, y un 95% de nivel de precisión para los instrumentos de medición de variables ambientales. No se pudo llevar el prototipo al campo debido a las restricciones ocasionadas por la pandemia y la falta de recursos para la implementación final del proyecto.

Con respecto a la misión tecnológica, esta se abordó desde el desarrollo de soluciones para el segmento de tierra, en la estación terrestre remota (GST/GRT) descrito a nivel de bloques en la figura 1, y para el segmento de vuelo o mejor llamado el Cubesat de 3U GWSat, que se muestra en la figura 36 y que responde a la arquitectura física descrita en la figura 37.

Para la implementación de la estación remota terrestre se tomó como base el diseño utilizado para el proyecto Irazú y los esfuerzos se centraron en mejorar la gestión de potencia eléctrica, el sistema de encapsulado o carcasa, el sistema de transferencia de calor, la eficiencia del empaquetado de la información, por medio del sistema de modulación, el sistema de antenas, las especificaciones de materiales para la manufactura y la integración física de componentes. Se lograron importantes avances, por ejemplo, el diseño de la carcasa propuesto en la figura 22 integró aspectos de ventilación y de acceso que mejoran las posibilidades de sobrevivencia a entornos hostiles como lo son los humedales. La selección de materiales de manufactura requirió experimentos de envejecimiento y vida acelerada que condujeron a una selección óptima de los materiales de manufactura. Por medio de la implementación de técnicas de gestión de transferencia de calor se descubrió que durante la transmisión se superaba el nivel de corriente de la fuente del sistema, lo cual producía una operación intermitente de la estación, la cual se había observado también en el proyecto Irazú. Con este hallazgo se pudo

establecer una serie de nuevos requisitos para diseñar una fuente para la estación que fue manufacturada a nivel de prototipo y que se muestra en la figura 18.

Respecto de la gestión de los datos capturados en el humedal se logró establecer un formato de trama de datos adecuado, consolidar la información diaria y transmitirla desde la estación remota (GRT) hasta la estación de operación de la misión (GOS). Se implementó un banco de pruebas en el campus del ITCR de Cartago que demostró la correcta transmisión de las tramas capturadas en un esquema de simulación de una pasada del satélite. Esto porque el satélite aun no ha sido lanzado. También se realizó un proceso de simulación de la misión que permita establecer tiempos de contacto de entre el segmento de vuelo GWSat y la estación remota (GRT) en un rango de 3-10 min por pasada considerando además las características topográficas de Costa Rica.

En relación con el segmento de vuelo, el equipo de la misión tecnológica se enfocó en desarrollar una estrategia de implementación de software a bordo usando una arquitectura de capas que facilita la modularidad y la escalabilidad de las funciones como se muestra en la figura 24. Esto permitió una implementación de los modos de vuelo más eficiente. El desarrollo de los modos de operación para el sistema de control de orientación para el satélite mostró que es viable alcanzar un apuntado correcto del humedal, así como de mantener la orientación o realizar las maniobras de desorbitación. Para desarrollar estos modos se utilizaron técnicas de ingenierías de sistemas basadas en modelos (MBSE).

A nivel de simulación se mostró la viabilidad para la implementación de estos modos, así como características de desempeño como el error de apuntado, tiempo de estabilización de la órbita entre otros.

Finalmente se logró implementar y demostrar el software de estimación y control de orientación del satélite por medio del uso de hardware-in-the-loop. Las figuras 37 y 38 evidencian la demostración de software embebido desarrollado por el equipo.

Este proyecto funcionó como un espacio de trabajo para estudiantes de grado y posgrado del ITCR, en el que se demostró la capacidad de aprender y aplicar múltiples técnicas y herramientas para la gestión y el desarrollo de sistemas espaciales. Además, permitió proyectar el que hacer del ITCR a la comunidad por medio actividades de divulgación, de diplomacia científica y de impacto alineadas con el desarrollo de los objetivos de la Naciones Unidas.

Conclusiones

A partir del trabajo realizado se pueden sintetizar las siguientes conclusiones (principales) respecto al desarrollo del proyecto GWSat para los paquetes de trabajo propuestos para el equipo de Costa Rica:

- Se diseñó e implementó una plataforma flotante dentro de un tubo de PVC capaz de medir la distancia entre la plataforma del humedal y el nivel de agua de este para la estimación apropiada de la masa de agua.
- Se mostró la funcionalidad del prototipo del dispositivo para medir el nivel del espejo de agua en humedales, así como la temperatura del agua a nivel de laboratorio, más no su calibración ni puesta en marcha en el humedal.
- La investigación fue capaz de generar curvas de nivel a 0,25 cm, por tanto, se puede concluir que sí es posible construir una modelación hidrológica óptima a partir de datos de sensores remotos ya existentes con verificación topográfica de campo.
- Se logró estandarizar la interfaz de conexiones para los eventuales módulos a incorporar a la estación terrestre remota. Para ello se diseñó una arquitectura tipo *backplane*, pensando en dar soporte a 4 módulos funcionales y a un puerto de acceso para monitoreo externo.
- Se comprobó por medio de simulaciones que el sistema es capaz de brindar la potencia necesaria para el funcionamiento adecuado de todas las cargas eléctricas de la estación remota. El prototipo construido para el sistema de potencia es un dispositivo replicable debido a que incorpora en su diseño arquitecturas y topologías que se pueden encontrar de forma abierta.
- Se determinó que el radio transmisor representa un elemento crítico a nivel térmico dentro de la estación remota. Se realizó el diseño de una solución térmica pasiva, a través de un disipador o sumidero de calor para el radio transmisor que mantiene al radio dentro del rango de operación térmica.
- Se diseñó un sistema de transferencia de calor que permite disipar 10 W de potencia de forma estacionaria bajo los parámetros de funcionamiento técnicos y ambientales. El prototipo realizado permite disipar la energía sin que la superficie del mismo llegue a una temperatura mayor de 60 °C para resguardar los componentes electrónicos de la estación de comunicación.
- Se diseñó un gabinete con el objetivo de proteger los componentes de factores externos. Se verificaron todas las posibilidades de ventilar el gabinete sin comprometer la entrada de insectos o animales que aniden dentro. Se disminuyó la emisividad del gabinete mediante color, textura y sombra para las horas centrales.
- Se determinó un diseño funcional que vela por la integridad tanto de cada elemento mecánico como de cada componente electrónico.
- Se seleccionó la configuración de materiales para construcción del gabinete a partir de acero bajo carbono 1020 con recubrimiento de ZINGA para la manufactura de la carcasa de la estación remota del proyecto GWSat.

- No se logró integrar carcasa de la estación remota terrestre (GRT) debido a problemas de acceso ocasionados por los cierres de la pandemia de COVID-19.
- Al utilizar el protocolo Bell 202 o G3RUH se asegura un BER menor o igual a 0.0001.
- El protocolo AX.25 asegura que los datos lleguen solo al destinatario deseado. El protocolo AX.25 contiene un FCS que permite determinar si la trama es correcta. El programa Direwolf evita el uso de un TNC en hardware lo que reduce el espacio requerido. La elevación mínima para asegurar el funcionamiento del enlace es 15°. Cambiando el periodo de pausa entre tramas se puede realizar un control de temperatura sencillo.
- Se logró demostrar la comunicación de la estación terrestre en condiciones de laboratorio dentro del campus del ITCR.
- Se diseñó un sistema de determinación de orientación capaz de estimar la posición relativa del satélite GWSat con un promedio de 0.1895 ° (3σ) de error de actitud en condiciones nominales. Este hace uso de un MEKF secuencial, en conjunto con un arreglo de sensores que permiten determinar todos los parámetros necesarios para la ejecución de maniobras de control.
- El ADCS es capaz de proveer los errores de orientación necesarios para cada una de las modalidades de control del satélite GWSat. En promedio, el error angular de estimación de los vectores de referencia es de 0.1144° para el apuntamiento al objetivo en tierra, 0.1217° para el apuntamiento solar, 0.1178° para el apuntamiento orbital y aerodinámico, y 0.1209° para el apuntamiento superficial.
- Se implementó un prototipo para un sistema automático de seguimiento de satélites para la estación de operaciones del SETECLab, sin embargo, no se pudo poner en marcha por los efectos de la pandemia de COVID-19.
- Se logró generar una propuesta de diseño de arreglo de antenas para la estación remota y se ha analizado en el software de HFSS Ansys.
- Se logró una arquitectura de software en capas para la implementación del software embebido a bordo del satélite que facilita la integración de los distintos módulos requeridos para la operación de GWSat.
- Se logró el diseño y simulación de los modos de “apuntado” y de “mantenimiento de estación” para el satélite GWSat.
- Se propusieron distintas estrategias de control para la orientación del satélite GWSat, tanto siguiendo métodos clásicos (LQR), como con métodos de reforzamiento de datos y port-hamiltonianos.
- Se propusieron distintas alternativas para las tecnologías de propulsión del satélite, incluyendo propulsores de arco de plasma que demostraron ofrecer ventajas de desempeño para maniobras de desorbitación del satélite.
- No se logró recolectar datos de la misión, ya que el satélite no se pudo lanzar aún y el proyecto fue forzado a su cierre técnico por parte del ITCR.
- Se logró un nivel de cumplimiento general del 95% para la misión científica y un 80% para la misión tecnológica planteadas por este proyecto de investigación.

Recomendaciones

Debido a las temperaturas promedio en Palo Verde, se recomienda analizar la temperatura que puedan alcanzar los dispositivos electrónicos con el fin de no sobrecalentar el sistema. Para esto, se pueden disponer de disipadores o en caso de ser necesario un sistema de enfriamiento.

Por las condiciones de la laguna que contiene una vegetación densa no se recomienda realizar una batimetría ya que el instrumento tradicional como la ecosonda no podría generar un barrido del fondo, y el realizar un fondeo de manera manual en el área de la laguna implicaría cuantiosos recursos de tiempo y dinero, por lo cual este MDT puede ser utilizado para obtener información de campo valiosa y eventualmente para planificar futuros muestreos estratificados en función de la topografía del humedal.

Para la comunicación interna de los módulos de la GRT solo se consideró el uso de los protocolos SPI y UART. Se debe de comparar estos protocolos con otros como CAN o I2C para determinar si existe algún otro que sea más eficiente que simplifique aún más las conexiones del backplane.

Se debe construir una bobina que soporte al menos 24 A de corriente, debido a que no se encuentran bobinas comerciales con estas características, y, por lo tanto, resulta imposible conectar la batería a 21 Ah. Además, se debe implementar otro tipo de controlador, por ejemplo, el microcontrolador PIC18F450 debido a que, con este componente, además, de disminuir el consumo de potencia, se puede aumentar la frecuencia de funcionamiento, que no está limitada a 32 KHz como en el caso del Arduino.

Se debe considerar el consumo energético del radio, así como el voltaje de alimentación de este, de manera tal que la fuente de energía soporte los altos picos de corriente que el radio consume.

Se recomienda crear un diseño donde se integren de un solo los componentes, y así no tener que preocuparse por los problemas de calentamiento que causa el gabinete sino buscar soluciones más directas y personificadas.

Al tratarse de una zona en un humedal, se recomienda hacer estudios de cómo la humedad ambiental puede afectar el funcionamiento de la Estación, visto desde la perspectiva de transferencia de calor como en el área de la electrónica. Además, se recomienda realizar una valoración para ofrecer durabilidad al material propuesto, donde se podría evaluar diferentes recubrimientos que inhiben los efectos de la oxidación

Se recomienda hacer un experimento de exposición de las configuraciones analizadas en las pruebas de degradación acelerada en un ambiente de operación real en el Parque Nacional Palo Verde.

Utilizar un radio más específico para disminuir el espacio y la potencia requerida. Utilizar un esquema de modulación más actual para maximizar la eficiencia del enlace. Diseñar un sistema más robusto que contenga los protocolos de comunicación, así como el hardware requerido para la capa física del sistema.

Para el caso de las maniobras de estabilización (desaceleración) se recomienda deshabilitar la observación del magnetómetro para la corrección del estado estimado del sistema debido a que estas maniobras utilizan magnetorquers para reducir la velocidad angular del satélite. Este tipo de actuador es capaz de inducir grandes cantidades de ruido en el sistema, reduciendo su desempeño.

El arreglo de antenas propuesta puede desarrollarse más a profundidad con la implementación de circuitos de activos de control para controlar el seguimiento del lóbulo hacia el satélite y además poder aumentar la ganancia del sistema.

Referencias

- [1] Chaves-Jiménez, A., Carvajal-Godínez, J (2021). Introducing space engineering to engineering undergraduates: Design of a “Introduction to Space Engineering” course for non-aerospace engineering students in Costa Rica.
- [2] Gómez-Jenkins, M., Calvo-Alvarado, J., Julieta-Calvo, A., Chaves-Jiménez, A., Carvajal-Godínez, J., Valverde-Salazar & Carrasquilla-Batista, A. (2016). Irazú: CubeSat mission architecture and development.
- [3] Umaña, P. (2017). Los humedales contribuyen a mitigar el impacto de fenómenos naturales. Universidad de Costa Rica.
- [4] Rodríguez, A. (2019). Fortalecimiento del diálogo en la estructura de gobernanza de la agenda 2030 a través de la oficina de la coordinadora residente del sistema de Naciones Unidas en Costa Rica. Universidad Nacional.
- [5] Stern, M., Quesada, M. & Stoner, K. E. (2002). Changes in Composition and Structure of a Tropical Dry Forest Following Intermittent Cattle Grazing. *Rev. Biol. Trop.*, 50 (3/4): 1021-1034.
- [6] Rodríguez, E., Pollack, L., Alvitez, E., Mora, M. (2017). Los humedales costeros de la región la libertad (Perú) son ecosistemas frágiles que necesitan planes de conservación urgente. 5(2): 231 – 270. 2017.
- [7] Poghosyan, A., & Golkar, A. (2017). CubeSat evolution: Analyzing CubeSat capabilities for conducting science missions. *Progress in Aerospace Sciences*, 88, 59-83.
- [8] Verspieren, Q., Obata, T., & Nakasuka, S. (2017, June). Innovative approach to data gathering in remote areas using constellations of store and forward communication cubesats. In *Proceedings of the 31st International Symposium on Space Technology and Science, Matsuyama, Japan* (pp. 3-6).
- [9] Cappelletti, C., Battistini, S., & Malphrus, B. (Eds.). (2020). *Cubesat handbook: From mission design to operations*. Academic Press.
- [10] Lepcha, P., Malmadayalage, T. D., Örgör, N. C., Purio, M. A., Duran, F., Kishimoto, M., ... & Cho, M. (2022). Assessing the Capacity and Coverage of Satellite IoT for Developing Countries Using a CubeSat. *Applied Sciences*, 12(17), 8623.
- [11] Abbas, N. N., Xiao, H., Jun, L. Y., & Raza, M. (2012). An Architecture Analysis of ADCS for CubeSat: A Recipe for ADCS Design of ICUBE. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 110, pp. 5397-5404). Trans Tech Publications Ltd.
- [12] Xia, X., Sun, G., Zhang, K., Wu, S., Wang, T., Xia, L., & Liu, S. (2017, May). Nanosats/cubesats adcs survey. In *2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC)* (pp. 5151-5158). IEEE.
- [13] Li, J., Post, M., Wright, T., & Lee, R. (2013). Design of attitude control systems for CubeSat-class nanosatellite. *Journal of Control Science and Engineering*, 2013, 4-4.
- [14] Krejci, D., & Lozano, P. (2018). Space propulsion technology for small spacecraft. *Proceedings of the IEEE*, 106(3), 362-378.

- [15] Monge Leiva, P (2019). Diseño de una interfaz de adquisición y procesamiento de datos ambientales para una estación satelital remota bajo el contexto del proyecto de GW-Sat. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [16] Calvo Obando, A.J, Ibarra Vargas, A (2020). Caracterización topográfica y estimación de la biomasa, carbono y dióxido de carbono equivalente, mediante el uso de sensores remotos, en la laguna palo verde, parque nacional palo verde, Guanacaste, Costa Rica. Universidad Nacional.
- [17] Araya Gamboa, E.A (2019). Diseño e implementación de una plataforma de interconexiones para una estación satelital remota bajo el contexto del proyecto GW-Sat. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [18] Cordero Fallas, K.I (2019). Diseño, simulación e implementación del subsistema de potencia para estación terrestre remota satelital en el proyecto GW-Sat. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [19] Gutiérrez-Alfaro, D. (2020). Diseño del sistema termo-mecánico para la estación remota de monitoreo del Parque Nacional Palo Verde de la misión científica GW-Sat. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [20] Quesada Quirós, J.A. (2021). Diseño y validación del sistema de Transferencia de calor para la estación remota de monitoreo de la misión científica GWSat: Prototipo de monitoreo de humedales a través de un sistema espacial tipo store & forward. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [21] Fuentes Ruiz, S.J. (2020) Diseño de carcasa de la estación de comunicación remota para la misión GW SAT desarrollada en el Laboratorio de Sistemas Espaciales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [22] Acuña Vidaurre, J. P. (2021). Diseño de la estructura de soporte para la estación de comunicación remota para el Proyecto GWSat: Prototipo de monitoreo de humedales a través de un sistema espacial tipo "Store & Forward". Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [23] Corrales-Brenes, R. (2021). Análisis de degradación de los materiales utilizados en una carcasa expuesta a la intemperie usada en el proyecto GWSat: Prototipo de monitoreo de humedales a través de un sistema espacial tipo Store and Forward. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [24] Quiros-Jimenez, O; d'Hemecourt, D. (2019) Development of a flight software framework for student CubeSat missions. Tecnología en Marcha. Edición especial. Movilidad Estudiantil 6, 2019. Pág. 180-197. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [25] Jiménez Arias, J.P. (2020). Diseño e implementación del sistema de transmisión de datos en el enlace de comunicación hacia el satélite GW. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [26] Vargas Villegas, G. (2023). Diseño de un sistema de estimación de actitud para el satélite GWSat. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [27] Alvarado Brenes, Luis. (2019). Diseño e implementación de prototipo para un sistema de movimiento de antena. Instituto Tecnológico de Costa Rica.

- [28] Fonseca Cruz, J. (2021). Propuesta de prototipo de un arreglo en fase de antenas para las estaciones remotas del SETECLab. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [29] Fernández Cerdas, C.A. (2019). Attitude control design for station keeping mode in the GWSat nanosatellite. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [30] Zamora Mendieta, A.F. (2019). Design of the Attitude Control System for the Pointing Mode of GW-Sat satellite. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [31] Alba Romero, G. (2020). Diseño de un sistema de navegación avanzado para el nanosatélite GWSat. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [32] Jiménez Coronado, J.M. (2021). Diseño de arquitectura de micro-propulsor de plasma para la remoción de nanosatélites no operativos. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- [33] Chaves-Jiménez, A., Vargas-Villegas, G., Zamora-Mendieta, A., Fernández Cerdas, C.A., Kolbeck, J., Muñoz Arias, M. (2022). Design of ADCS system for Earth Observation using a 3-unit CubeSat. Conference: IAA-LA 2022 5th IAA Latin American CubeSat Workshop and 3rd IAA Latin American Symposium on Small Satellites
- [34] Carvajal-Godínez, J., Jiménez Coronado, J.M. (2022). Vacuum Arc Thruster architecture for green orbit maintenance with small satellite missions. 73rd International Astronautical Congress (IAC), Paris, France, 18-22 septiembre 2022.