



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS” ZACATENCO

**“PROTOTIPO DE TRANSECTOR ÓPTICO PARA
SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN DE CUBESAT”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA

PRESENTA

DAAN URIEL MEZA QUIROZ

ASESORES

M. EN C. ISMAEL GABRIEL COSME CISNEROS

DR. ISAAC MEDINA SANCHEZ



CIUDAD DE MÉXICO, MAYO DE 2023.

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
UNIDAD PROFESIONAL “ADOLFO LÓPEZ MATEOS”

TEMA DE TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA
POR LA OPCIÓN DE TITULACIÓN TESIS Y EXAMEN ORAL INDIVIDUAL
DEBERÁ (N) DESARROLLAR C. DAAN URIEL MEZA QUIROZ

“PROTOTIPO DE TRANSECTOR ÓPTICO PARA SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN DE CUBESAT”

REALIZAR UN PROTOTIPO TRANSECTOR ÓPTICO COMO MODELO DE PRUEBA, BAJO LAS CONSIDERACIONES, ESTÁNDARES CUBESAT, SIMULANDO SU FUNCIONAMIENTO ANÁLOGO EN ENLACE ASCENDENTE Y DESCENDENTE PARA EVALUAR EL ALCANCE, MODIFICANDO LA TASA DE TRANSFERENCIA DE BITS.

- ❖ **MARCO TEÓRICO**
- ❖ **DESARROLLO**
- ❖ **ANÁLISIS DE RESULTADOS**
- ❖ **CONCLUSIONES**

CIUDAD DE MÉXICO, A 18 DE MAYO DE 2023.

ASESORES


M. EN C. ISMAEL GABRIEL COSME CISNEROS


DR. ISAAC MEDINA SANCHEZ


M. EN C. JOSÉ LUIS BRAVO LEÓN
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
EN COMUNICACIONES Y ELECTRÓNICA



Autorización de uso de obra

Instituto Politécnico Nacional

P r e s e n t e

Bajo protesta de decir verdad el que suscribe **DAAN URIEL MEZA QUIROZ**, manifiesto ser autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "**PROTOTIPO DE TRANSEPTOR ÓPTICO PARA SUBSISTEMA DE COMUNICACIÓN DE CUBESAT**", en adelante "**La Tesis**" y de la cual se adjunta copia, en un impreso y un cd, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho de Autor, otorgo al **INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**, en adelante **EI IPN**, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales o en cualquier otro medio; para apoyar futuros trabajos relacionados con el tema de "**La Tesis**" por un periodo de **10 años** contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a **EI IPN** de su terminación.

En virtud de lo anterior, **EI IPN** deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "**La Tesis**".

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "**La Tesis**", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "**La Tesis**", por lo que deslindo de toda responsabilidad a **EI IPN** en caso de que el contenido de "**La Tesis**" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que puedan derivarse del caso.

Ciudad de México., a 31 de mayo de 2023.

Atentamente



DAAN URIEL MEZA QUIROZ

Agradecimientos

Quisiera aprovechar este espacio para expresar mi más sincero agradecimiento a todas aquellas personas e instituciones que han contribuido a la realización de este trabajo de investigación y que han dejado una huella imborrable en mi camino académico.

En primer lugar, deseo expresar mi gratitud al creador, esa fuerza misteriosa que impulsa el universo y nos brinda la oportunidad de explorar sus secretos más profundos. Es gracias a la complejidad y belleza del mundo que he encontrado la inspiración para realizar un trabajo tan emocionante.

En segundo lugar, deseo extender mi agradecimiento a la universidad que me ha brindado un entorno propicio para el crecimiento intelectual. A mi alma mater, una institución comprometida con la excelencia académica, y por supuesto al Centro de Desarrollo Aeroespacial del IPN, que alimento mis ideas y creatividad. Sus recursos, sus programas y, sobre todo, el apoyo constante de mis profesores y compañeros de estudio, han sido fundamentales para el desarrollo de esta tesis.

Sin embargo, no puedo pasar por alto el papel fundamental que mi madre y mis abuelos han desempeñado en mi camino hacia el éxito. Desde mi infancia, mi madre me ha inculcado el amor por el aprendizaje y la curiosidad innata que me ha impulsado a superar obstáculos y desafíos. Sus sacrificios y su inquebrantable apoyo han sido pilares fundamentales en mi desarrollo.

Asimismo, quisiera rendir un especial reconocimiento a mis abuelos, cuya sabiduría y experiencias de vida han sido fuentes de inspiración inagotables. Sus consejos, su cariño incondicional y su fe en mis capacidades me han impulsado en momentos de duda y han fortalecido mi convicción.

En resumen, este trabajo no habría sido posible sin el apoyo y la contribución de numerosas personas. Agradezco de corazón a cada una de ellas por su valiosa colaboración y por su confianza en mi capacidad para llevar a cabo esta tesis.

Finalmente, me comprometo a seguir dedicando mi vida al avance del conocimiento y a utilizar mis habilidades para hacer del mundo un lugar mejor. Que este reconocimiento sea un estímulo para continuar mi labor científica y contribuir al bienestar de la humanidad.

¡Que la búsqueda del conocimiento nunca se detenga!

Daan Uriel Meza Quiroz

Contenido

Contenido.....	i
Índice de ilustraciones	iii
Índice de tablas	iv
Introducción.....	1
Justificación	2
Objetivos.....	4
General.....	4
Particulares.....	4
Capítulo 1 Marco teórico	5
1.1 Cube-Sat.....	6
1.2 Categorías de los Cube-Sat	7
1.3 Sistema de Despliegue Orbital	8
1.3.1 Sistemas de Coordenadas P-POD	9
1.3.2 Características Mecánicas P-POD	9
1.3.3 Características Eléctricas P-POD.....	10
1.4 Pruebas de funcionamiento, estándares y normas de diseño.....	11
1.4.1 Pruebas finales.	12
1.4.2 Consideraciones de diseño para la PCB	13
1.4.2.1 Normas IPC.....	13
1.4.2.2 Estándar PC/104.....	14
1.5 Subsistemas.....	15
1.5.1 Subsistema de alimentación y potencia	15
1.5.2 Subsistema de control térmico.....	16
1.5.3 Subsistema de posicionamiento, orientación y apuntamiento	16
1.5.4 Subsistema de telemetría y comando.....	18
1.5.5 Subsistema estructural	18
1.5.6 Estación terrena.....	19
1.5.7 Subsistema de comunicación.....	19
1.6 Comunicación láser.....	21
1.6.1 Tasas de transferencia de datos.....	22

Capítulo 2 Desarrollo.....	25
2.1 Enlace óptico.....	27
2.1.2 Codificación empleada	27
2.2 Descripción del circuito de control	28
2.3 Descripción del láser.....	30
2.3.1 Características eléctricas.....	31
2.4 Descripción del fotodiodo.....	33
2.4.1 Amplificar de transimpedancia.....	33
2.5 Descripción de la visualización de los datos	34
2.6 Descripción de la alimentación.....	35
Capítulo 3 Análisis de resultados.....	37
3.1 Prototipo versión 1.0.....	38
3.2 Prototipo versión 2.0.....	39
3.3 Prototipo versión 3.0.....	40
3.4 Prototipo versión final 4.0	43
3.4 Trabajos futuros	47
Conclusiones	49
Referencias.....	50
Apéndice A	I
Cálculos matemáticos.	I
Etapa de potencia.....	I
Amplificador de transimpedancia	IV
Apéndice B	VI
Diagrama esquemático.....	VI
Diseño de la PCB.....	VII
Apéndice C	IX
Código del microcontrolador.	IX

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Orbita LEO.	6
Ilustración 2. P-POD.....	9
Ilustración 3. Orientación de sistema de despliegue.....	9
Ilustración 4. Características mecánicas P-POD.....	10
Ilustración 5. Características eléctricas P-POD.	11
Ilustración 6. Diagrama de pruebas para aprobación.....	13
Ilustración 7. Estándar PC/104 Dimensiones de PCB.	14
Ilustración 8. Estándar PC/104 modelo de conexión.....	15
Ilustración 9. Simulación y análisis del comportamiento térmico de un CubeSat.	16
Ilustración 10. Representación de enlaces de la OCSD.....	17
Ilustración 11. Subsistema estructural de un CubeSat.	18
Ilustración 12. Despliegue de antenas RF.....	20
Ilustración 13. Sistema de abordó OPALS.	23
Ilustración 14. OCSD.....	23
Ilustración 15. Método de ingeniería.	26
Ilustración 16. Diagrama a bloques del proyecto.	27
Ilustración 17. Codificación básica del UART.....	28
Ilustración 18. Microcontrolador PIC24FJ128GA202.	29
Ilustración 19. Conilustración de los puertos del microcontrolador.	29
Ilustración 20. Diagrama de flujo del programa del PIC24.....	30
Ilustración 21. Puntero láser.	31
Ilustración 22. Etapa de potencia para el diodo láser.	32
Ilustración 23. Circuito final, para la etapa de potencia del láser.....	32
Ilustración 24. Fotodiodo de VEMD5060X01.	33
Ilustración 25. Amplificador de transimpedancia.....	34
Ilustración 26. Pantalla Nextion, con páginas de la rutina de enlace.....	35
Ilustración 27. Regular de voltaje LD117AS33TR.	36
Ilustración 28. Diseño 3D del PCB prototipo versión 1.0	38
Ilustración 29. PCB's del prototipo 1 y pruebas de la pantalla nextion.	39
Ilustración 30. PCB's prototipo versión 2.0 y pruebas del enlace alcanzado.....	40

Ilustración 31. Diseño del PCB final del transceptor óptico.....	41
Ilustración 32. Diseño 3D de la PCB del láser y fotodiodo.	41
Ilustración 33. Prueba de exterior, láser verde.....	42
Ilustración 34. Circuito conmutador del láser.....	43
Ilustración 35. Circuito impreso del OPTXR rojo y verde.	43
Ilustración 36. Proceso de montaje del transceptor en su versión final.	44
Ilustración 37. PCB del circuito OPTXR.....	45
Ilustración 38. Ensamblado final del prototipo de pruebas.	45
Ilustración 39. Gráfica comparativa Longitud del enlace vs tasa de bits.	46
Ilustración 40. Etapa de potencia para la comunicación del láser.	I
Ilustración 41. Circuito equivalente para la región de corte del transistor MOSFET.	II
Ilustración 42. Circuito equivalente para la región de saturación.....	II
Ilustración 43. Circuito propuesto para la etapa de potencia del láser.	IV
Ilustración 44. Amplificador de Transimpedancia.	IV

Índice de tablas

Tabla 1 Tiempo de desarrollo de un CubeSat por fases.	7
Tabla 2 Banda RF y su aplicación.	21
Tabla 3 Tasa de transferencia de datos por misiones.....	24
Tabla 4 Resumen de resultados.	46
Tabla 5 Comparación de precios de los componentes.....	47

Introducción

Son varias las motivaciones que preceden al estudio y desarrollo de este proyecto, ligadas a la creciente necesidad de tecnologías más rápidas y eficientes, la saturación del espectro electromagnético y la implementación de alternativas a las soluciones convencionales con las cuales está dotada la industria de las comunicaciones hoy en día. Las aportaciones privadas que marcan las tendencias actuales exigen múltiples conexiones inalámbricas que interconecten cientos de miles de dispositivos, sensores, sistemas a internet y entre sí, esto es posible con tecnologías como Starlink y estándares como el 5G, las cuales funcionan bajo los principios de la radio transmisión de ondas electromagnéticas.

Si bien la eficiencia de estos sistemas es un paso fuerte al futuro, también desarrolla problemáticas en segundo plano que al no tratarse y buscar alternativas conducirán al estancamiento de las telecomunicaciones. Por ejemplo, las redes de wifi actualmente opera en la banda de los 2.5GHz, al igual que el bluetooth, y los 5GHz muy por encima a las bandas de radio comercial para la radio y TV que hemos usado por más de medio siglo. Para que estas tecnologías funcionen a la vez buscamos espectros separados por unos cientos o miles de Hertz siempre aumentando la frecuencia por lo que es necesario licitar o resguardar este espacio para usarlo libremente tramitando un permiso emitido por la ITU.

Como no es factible escalar en el espectro electromagnético infinitamente y el desarrollo tecnológico avanza poco más lento que nuestras necesidades, alternativas como las comunicaciones ópticas o lasercomm son una opción formidable para revolucionar y resolver temáticas actuales. Teniendo como ventajas el gran ancho de banda, la velocidad de transmisión, la inmunidad a la interferencia y la seguridad de enlace es lógico apuntar a estas tecnologías para resolver

Justificación

El desarrollo del estándar CubeSat marcó un hito en la forma de ejecutar nuevas misiones espaciales. Caracterizados por ser un sistema de bajo costo y de fácil acceso, ha permitido a países en vías de desarrollo, instituciones educativas y de investigación, a adentrarse en la carrera espacial. Combinando estos sistemas con el desarrollo actual de la tecnología, han permitido la implementación de misiones cada vez más sofisticadas en las ramas de investigación científica y proveedoras de servicios, su reducido tamaño y la facilidad de poner en órbita constelaciones completas, los convierten en la herramienta ideal para este tipo de aplicaciones.

La vanguardia tecnológica contemporánea exige a los operadores que requieran de tasas de transferencia elevadas, utilizar bandas de frecuencia más altas para las que hay poco hardware comercial disponible, debido a que presenta una ventaja a la hora de adquirir un volumen considerable de información en el menor tiempo posible, una de las desventajas presente en los CubeSat es el tiempo de visualización con la estación terrena, alcanzando tiempos promedios de visualización de 5 min al día [1] , aunado a esto las opciones comerciales actuales ofrecen velocidades de datos de hasta 5 Mbps. El desarrollo de radios de RF comerciales de alta velocidad puede proporcionar el hardware para soportar estos requerimientos, sin embargo, a medida que más nanosatélites entren en órbita esto presentará un desafío mayor para la concesión de licencias del espectro de RF superpoblado. Esto implica hallar una solución para las comunicaciones, que sea escalable y con una tasa de transferencia superior [2].

Para contribuir al estudio de esta área, es factible implementar un instrumento transceptor óptico, dado que presenta cualidades superiores a los sistemas de radiofrecuencia, por eso que nuestra pretensión principal es optimizar las etapas de transmisión y recepción en un solo dispositivo al construir y asentar las bases de un subsistema funcional, escalable, para ser empleado y avanzado en la siguiente generación de nanosatélites nacionales, siendo reflejo referente del mérito ingenieril politécnico. Delimitar el alcance de esta investigación es crucial para esclarecer nuestros objetivos y la operatividad del proyecto, de tal forma, que al sumarse como un subsistema se presentarán desafíos, especificaciones energéticas y

operativas con las que debemos cumplir, no obstante, existen requerimientos que van más allá de la intención y enfoque de este trabajo.

Objetivos

General

Realizar un prototipo transceptor óptico como modelo de prueba, bajo las consideraciones, estándares CubeSat, simulando su funcionamiento análogo en enlace ascendente y descendente para evaluar el alcance, modificando la tasa de transferencia de bits.

Particulares

1. Desarrollar el receptor y el transmisor ópticos, para establecer el canal de comunicación por láser.
2. Calificar el diseño del transceptor para determinar el cumplimiento de la norma PC/104, y asegurar la comunicación entre subsistemas.
3. Construir un transceptor homologado con base a los objetivos anteriores para simular el enlace CubeSat ↔ Estación Terrena. Evaluando el alcance con forme a la tasa de transferencia de datos.

Capítulo 1 Marco teórico

El presente capítulo conforma una base teórica para la comprensión del estándar CubeSat, abarca temas como la historia del surgimiento del estándar CubeSat, categorías en las que son construidos, tiempos de desarrollo, subsistemas que lo conforman, normas y características de diseño para las PCB empleadas en este estándar.

Asimismo, se incluye la información referente a las comunicaciones láser y las misiones exitosas que han implementado esta tecnología de comunicaciones láser en satélites que actualmente se encuentran orbitando el planeta, especificando las tasas de transferencia alcanzadas en cada misión.

1.1 Cube-Sat

El estándar Cube-Sat surgió de un proyecto colaborativo entre Jordi Puig, profesor de la Universidad Politécnica del Estado de California (Cal Poly) y Bob Twiggs, profesor del laboratorio de desarrollo de sistemas espaciales de la Universidad de Stanford, fue resultado de la evolución del programa de pico satélites desarrollado por la universidad de Stanford con su misión OPAL4 (*Optical Payload for Lasercomm Science*). El objetivo primordial del proyecto fue proporcionar un acceso asequible al espacio para la comunidad científica universitaria, dicho proyecto cumplió con su propósito. Hoy en día, gracias al desarrollo de este estándar muchas universidades de todo el mundo han logrado incursionarse en sus propios programas espaciales. Sin embargo, no solo las grandes universidades se han visto beneficiadas, escuelas medianas, escuelas privadas, incluso países han podido iniciar su programa espacial gracias a este estándar [3].

Los satélites siguen orbitas circulares o elípticas alrededor de la tierra. Estas orbitas son posibles gracias a equilibrio que existe entre la fuerza de atracción de la gravedad y la de escape generada en el lanzamiento. Estando en el vacío no existe fricción o rozamiento que altere ese equilibrio, logrando así una órbita estable. Usualmente los nanosatélites describen orbitas polares alrededor de la tierra, es decir, se mueven en sentido de los meridianos terrestres. Cuando un nanosatélite cumple con su misión o tiempo de operación, vuelve a la atmósfera y se desintegra en el reingreso.

Los CubeSat operan en órbita baja conocidas como LEO (del inglés *Low Earth Orbit*) circulares, como se muestra en la ilustración 1, entre 400 y 650 Km desde la superficie. Viajan aproximadamente a 8 Km/s. En esta orbita y a esa velocidad les toma 92 minutos completar su órbita, de tal forma que se consiguen de 14 a 16 orbitas completas por día. El motivo por el cual este tipo de satélites usan la órbita baja para sus operaciones, son mejores condiciones óptimas para observación terrestre o de comunicaciones, y mayor protección de la radiación solar y la radiación cósmica.

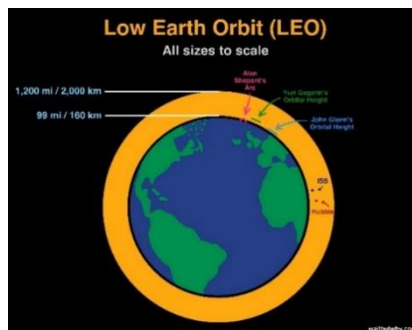


Ilustración 1. Órbita LEO.

Se muestra la órbita LEO resaltada en amarillo, con sus respectivos rangos medidos en Km.

El tiempo estimado de desarrollo de un CubeSat puede variar según su misión principal, sin embargo, la guía básica para el desarrollo de una CubeSat establece ciertas marcas de tiempo en las que se puede desarrollar cada etapa del proyecto [3].

A continuación, se muestra la tabla 1 con las fases principales del desarrollo y los plazos típicos, para una misión completa.

Tabla 1Tiempo de desarrollo de un CubeSat por fases.

No.	Fases	Marca temporal típica (meses)
1	Desarrollo del Concepto	1-6
2	Aseguramiento de la financiación	1-12
3	Revisión del mérito y la viabilidad	1-2
4	Diseño del CubeSat	1-6
5	Desarrollo y presentación de la propuesta	3-4
6	Selección y Manifestación	1-36
7	Coordinación de la misión	9-18
Iniciada esta fase, el integrador proporciona un calendario para entrega de hardware y documentación		
8	Licencia	4-6
9	Desarrollo y presentación de la documentación específica del vuelo	10-12
10	Diseño, desarrollo y pruebas de la estación terrena	2-12
11	Fabricación y pruebas del hardware del CubeSat	2-12
12	Revisión de la preparación de la misión	Medio día
13	Integración y pruebas del CubeSat en el P-POD	1 día
14	Integración del P-POD en el vehículo de lanzamiento	1 día
15	Lanzamiento	1 día
16	Operaciones de la misión	20 años **

Fuente: Conceptos básicos y proceso para desarrolladores principiantes de CubeSat [3].

** Esto considerando una constelación de CubeSat, con espacios establecidos por la vida de cada CubeSat.

1.2 Categorías de los Cube-Sat

Actualmente, los satélites se construyen en una amplia variedad de tamaños y formas, pueden ser tan pequeños que quepan en la palma de la mano, o tan grandes como la Estación Espacial Internacional, pero son los cúbicos los que predominan por su versatilidad y ágil desarrollo.

Categorizamos las misiones de acuerdo la masa total del sistema, para satélites pequeños:

- Minisatélite, 100-500 kg
- Microsatélite, 10-100 kg
- Nanosatélite, 1-10 kg
- Picosatélite, Menos de 1 kg

De acuerdo con el tamaño, limitamos cada unidad a 10cm^3 donde, cada una de estas partes tendrá una masa de no más de **1.22kg**, cabe mencionar que las misiones de 3U resultan ser las más comunes por la relación tamaño-capacidad.

Las aplicaciones de estas herramientas son bastas, ya que emulan a sus predecesores de mayor tamaño, con la diferencia de que orientan sus capacidades reducidas, pero no obsoletas, a un par de objetivos concretos.

Estos pueden ser desde censo meteorológico, enlace de comunicaciones, seguimiento a desastres naturales, monitoreo militar, observación espacial y con fines educativos, científicos o de investigación.

1.3 Sistema de Despliegue Orbital

El Desplegador Orbital de Picosatélite P-POD (del inglés *Poly Picosatellite Orbital Deployer*), presentado en la ilustración 2, es el sistema estandarizado de despliegue de CubeSat de Cal Poly. Es capaz de transportar tres CubeSats estándar de 1U y sirve como interfaz entre los CubeSats y el vehículo de lanzamiento LV (del inglés *Launch Vehicle*). El P-POD es una caja rectangular con una puerta y un mecanismo de resorte. Una vez que el mecanismo de liberación del P-POD es accionado por una señal de despliegue enviada desde el LV, un conjunto de resortes de torsión en la bisagra de la puerta fuerza la apertura de esta y los CubeSats son desplegados por el resorte principal que se desliza sobre sus rieles y los rieles del P-POD. El P-POD está hecho de aluminio anodizado. Los CubeSats se deslizan a lo largo de una serie de rieles durante la eyección en órbita. Los CubeSats serán compatibles con el P-POD para garantizar la seguridad y el éxito de la misión [4].

Dentro del sistema de despliegue la misión principal del programa CubeSat es proporcionar acceso al espacio para pequeñas cargas útiles. La principal responsabilidad de Cal Poly, como desarrollador del P-POD, es:

- Proteger el vehículo de lanzamiento y la carga útil primaria ante cualquier interferencia mecánica, eléctrica o electromagnética, incluso en el caso de fallo catastrófico del CubeSat.
- Desplegar los CubeSats con un mínimo giro y baja probabilidad de colisión con el vehículo de lanzamiento o con otros CubeSats.
- El desplegador debe tener la capacidad de interactuar con una variedad de vehículos de lanzamiento con mínimas modificaciones y sin cambios en el estándar CubeSat.
- La masa del desplegador debe ser la mínima posible.
- Deberá constar con un diseño modular que permita lanzar diferentes números de CubeSats.
- Debe ser de fácil manufactura, fabricado de materiales no exóticos y técnicas de construcción costosas.

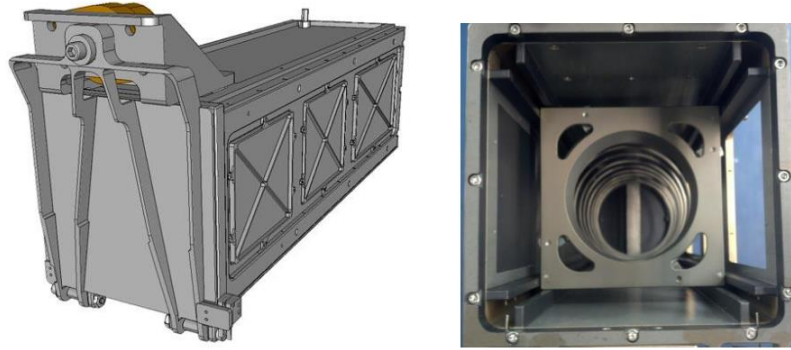


Ilustración 2. P-POD.

La ilustración muestra el modelo 3D general de un P-POD, y aun costado se muestra el muelle de expulsión, en una vista interna real de un P-POD [4].

1.3.1 Sistemas de Coordenadas P-POD

La ilustración 3 nos muestra el origen del sistema de coordenadas del P-POD, está centrado en la superficie exterior del panel trasero.

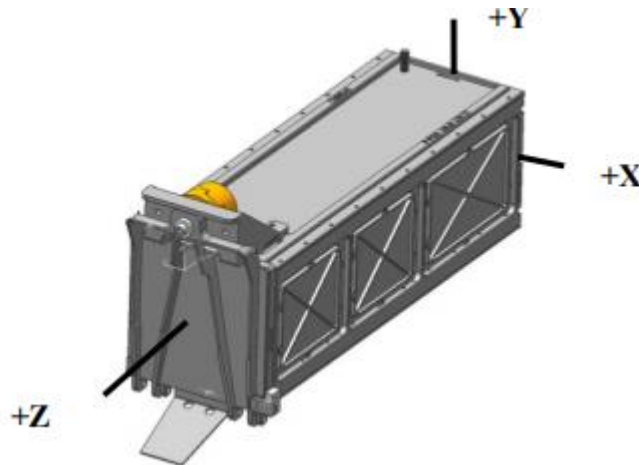


Ilustración 3. Orientación de sistema de despliegue.

La ilustración muestra el sistema de coordenadas tridimensional aplicado a la orientación de P-POD [4].

1.3.2 Características Mecánicas P-POD

El diseño tubular del P-POD realiza una trayectoria lineal predecible para los CubeSats que resulta en una baja tasa de giro en el momento del despliegue. Los satélites se despliegan desde el P-POD por medio de un muelle y se desliza por rieles planos y lisos al salir del P-POD. Después de enviar una señal de accionamiento desde el vehículo de lanzamiento al mecanismo de liberación de la puerta del P-POD, se abre una puerta accionada por un muelle y los CubeSats son desplegados por el muelle principal de despliegue.

El P-POD es capaz de montarse en el vehículo de lanzamiento o en un adaptador de tres superficies, en el panel inferior -Y o cualquiera de los paneles -X o +X, con una fijación por 8 tornillos. El P-POD está fabricado en aluminio 7075-t73, encierra a los CubeSats para garantizar la seguridad de la carga útil. Las superficies exteriores e interiores del acoplamiento están alojadas según la norma MIL-DTL-5541F Clase 3, para proporcionar resistencia a la corrosión y capacidad de conexión a tierra. El interior de P-POD está anodizado según la norma MIL-A-63576 Rev. A con un recubrimiento de teflón, lo que confiere resistencia a la soldadura en frío y proporciona una superficie lisa y deslizante sobre la que se montan los CubeSats durante el despliegue [4].

En la ilustración 4 observamos los puertos de acceso que están situados en los paneles laterales del P-POD permitiendo el acceso a los CubeSats después de la integración, usualmente para cargar las baterías y para ejecutar diagnósticos.

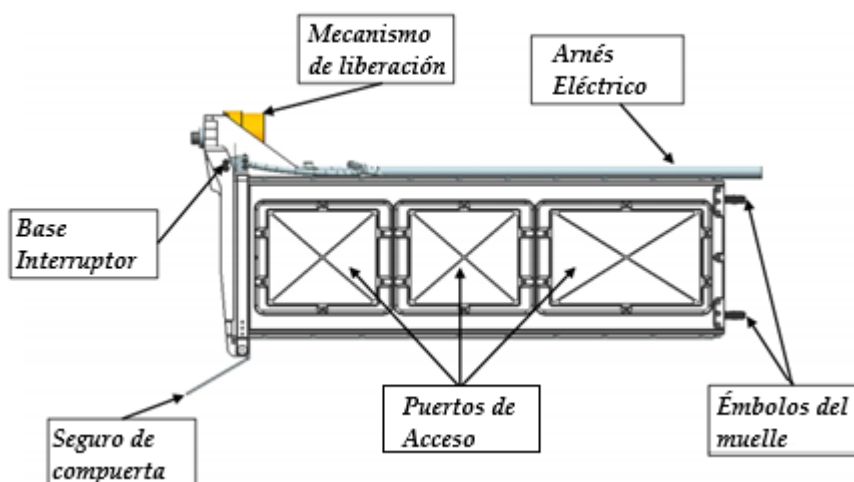


Ilustración 4. Características mecánicas P-POD.

Se muestran las características mecánicas del P-POD, señalizando su ubicación en su perfil derecho del plano [4].

1.3.3 Características Eléctricas P-POD

Las interfaces eléctricas del P-POD con el vehículo de lanzamiento incluyen el mecanismo de liberación de la puerta, un sensor opcional de la puerta y un conector. Se usan conectores cilíndricos, normalmente hay un par de pines para la señal de control primaria de mecanismo de apertura, un par más para la señal de accionamiento y un par más para la telemetría de sistema. El despliegue de los CubeSats se inicia mediante una señal eléctrica procedente de la banda de telemetría. La señal activa el mecanismo de liberación de la puerta del P-POD que a su vez permite abrir y desplegar los satélites. Para minimizar el impacto no se utiliza ningún tipo de pirotecnia. Tampoco se utilizan baterías ni electrónica de control a bordo para que el sistema funcione. La ilustración 5 ejemplifica la posición de los elementos eléctricos en la estructura del P-POD [4].

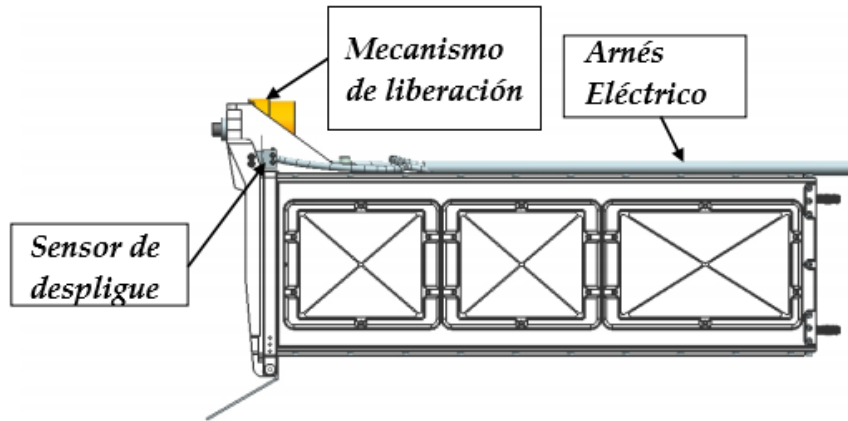


Ilustración 5. Características eléctricas P-POD.

Se muestran las características eléctricas del P-POD, señalizando su ubicación en su perfil derecho del plano [4].

1.4 Pruebas de funcionamiento, estándares y normas de diseño

El objetivo principal de las pruebas sobre cualquier emprendimiento de nanosatélites es el de garantizar el despliegue seguro de la unidad, así como prever futuras fallas y defectos de manufactura que pudiesen comprometer la misión principal.

Algunos de las pruebas a los que será sometida la maquinaria final, son realizados por el proveedor encargado de poner en órbita el sistema, con la finalidad de lograr el acople perfecto a la unidad lanzadera de despliegue P-POD.

Por ello es necesario que el diseño de cada subsistema este orientado bajo los estándares Cube-Sat. También podemos hacer uso de las recomendaciones y criterios impuestos por la NASA bajo la normativa **GEVS**, **GSFC-STD-7000** el cual es un estándar general del medio y también la **MIL-STD-1540** que es un estándar militar del Departamento de Defensa DOD (del inglés *Department of Defense*) que regula las verificaciones y requerimientos de despliegue de vehículos espaciales.

Algunos otros estándares internaciones que podremos integrar son:

- ECSS-E-ST-10-03c
- MIL-PRF-27401G
- MIL-PRF-27407D
- MIL-STD-1246C

1.4.1 Pruebas finales.

Una vez culminado el proceso de ensamblaje, la unidad integrada deberá ser sometida rigurosas pruebas hostiles que determinen si la misión podrá sobrevivir a las condiciones espaciales. Cabe mencionar que, una vez sean dictaminadas como exitosas, si se requiere hacer cualquier modificación, esta versión tendrá que ser sometida de nuevo a pruebas para garantizar que no se comprometió la integridad de la empresa.

Estas pruebas serán:

1. Prueba de vibraciones.

El satélite será sometido a oscilaciones mecánicas de distinta frecuencia para verificar que el ensamblaje no presenta deficiencias de montaje.

2. Prueba de termo-vacío.

Con el fin de garantizar la integridad de la estructura y la correcta respuesta de todos los subsistemas, el instrumento será sometida a una bóveda hermética que simula las condiciones de temperatura y vacío a las que tendrá que enfrentarse el satélite en el espacio.

3. Prueba de choque.

Simularan el entorno de choque asociado con eventos pirotécnicos, como las separaciones de la etapa del cohete, verificando que el Cube-Sat sobrevivirá a la puesta en órbita.

4. Inspección visual.

Consta de realizar chequeos, implementando máquinas de rayos x, infrarrojos, cámaras térmicas y el ojo humano para asegurar que no se presentan irregularidades mecánicas o eléctricas.

A continuación, se observa en la ilustración 6, el diagrama de aceptación del CubeSat dividido en etapas.

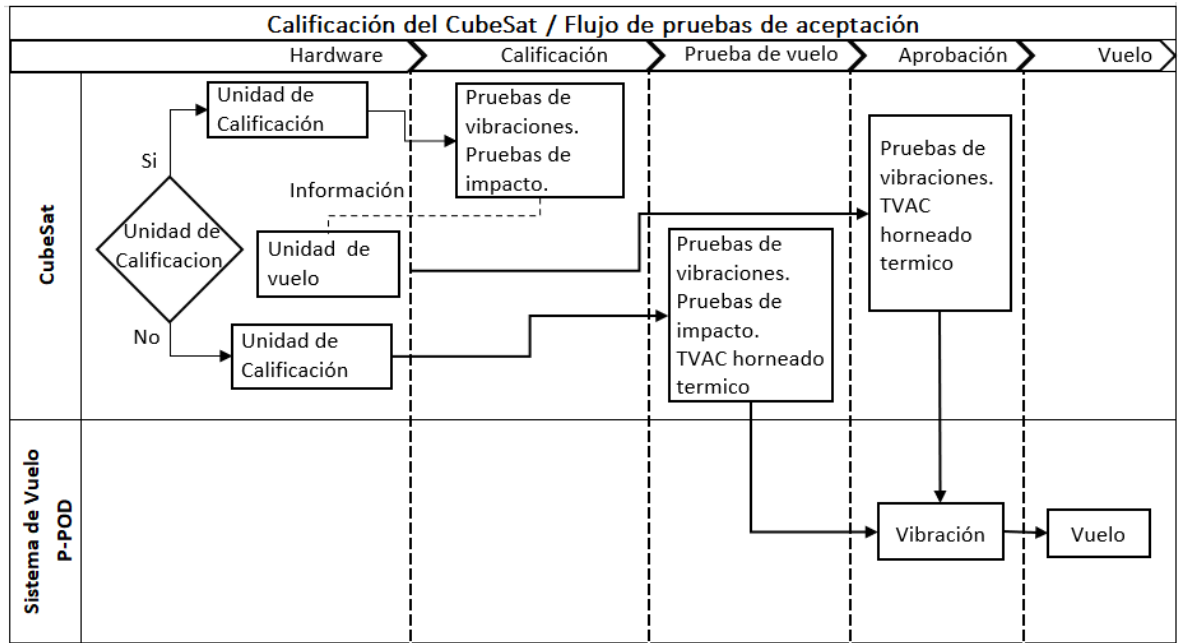


Ilustración 6. Diagrama de pruebas para aprobación.

La ilustración describe el diagrama de flujo de las pruebas a las que es sometido un CubeSat, para su aprobación y su autorización de vuelo [5].

1.4.2 Consideraciones de diseño para la PCB

Se tendrán en cuenta las normas necesarias para un diseño óptimo y estándar con la finalidad de lograr que el sistema sea reproducible, confiable, de fácil acceso y conexión. Para ello, las normas y estándares de diseño a seguir son las marcadas por el Instituto para los Circuitos Impresos **IPC** (del inglés *Institute for Printed Circuits*) y el estándar de conexión **PC/104** del Estándar de Arquitectura Industrial **ISA** (del inglés *Industrie Standar Architecture*).

1.4.2.1 Normas IPC

Catalogamos nuestro sistema como un circuito de clase 3 - productos electrónicos de alto rendimiento y confiabilidad incluye productos con un rendimiento y confiabilidad continuos, donde la demanda es crítica y las interrupciones no pueden ser toleradas. El uso final es comúnmente muy severo, y el equipo debe funcionar cuando se le requiere, tal como sistemas críticos.

La serie de normas a seguir son las siguientes:

- **IPC-2220 (Series)**
- **IPC-7351**
- **IPC-CM-C770**

Los requerimientos del diseño reflejan tres niveles de complejidad (Niveles A, B, y C) indicando geometrías más finas, mayores densidades, o más pasos en el proceso para elaborar

el producto. Son los lineamientos del proceso de ensamble de componentes para asistir en el diseño de la tarjeta de circuito impreso, que usualmente son incorporadas en el proceso de diseño y documentación [6].

1.4.2.2 Estándar PC/104

Siguiendo la documentación referente, este modelo arquitectónico está orientado a la interacción de sistemas embebidos, ya que permite que cualquier dispositivo se conecte apilando una tarjeta sobre otra para compartir buses de datos, alimentación, señales y planos de tierra. El estándar PC/104 presenta 2 variantes a considerar, las cuales difieren en el número de puertos y conectores definidos por la arquitectura del sistema a diseñar, ya sea de 8 bits para el *PC/104* o 16 bits para la *PC/AT* resaltando que estas son compatibles entre sí.

La versión mejorada de esta especificación, llamada *PC/104-Plus*, añade un conector de bus PCI que permite una tasa de transferencia de *132Mbps*, siendo ideal para aplicaciones de alta velocidad [7].

Además, la norma PC/104 sugiere que las dimensiones de la tarjeta sean de *90 x 96 mm*, como se observa en la ilustración 7 y 8, siendo óptimo para incorporar el diseño del subsistema a un Cube-Sat.

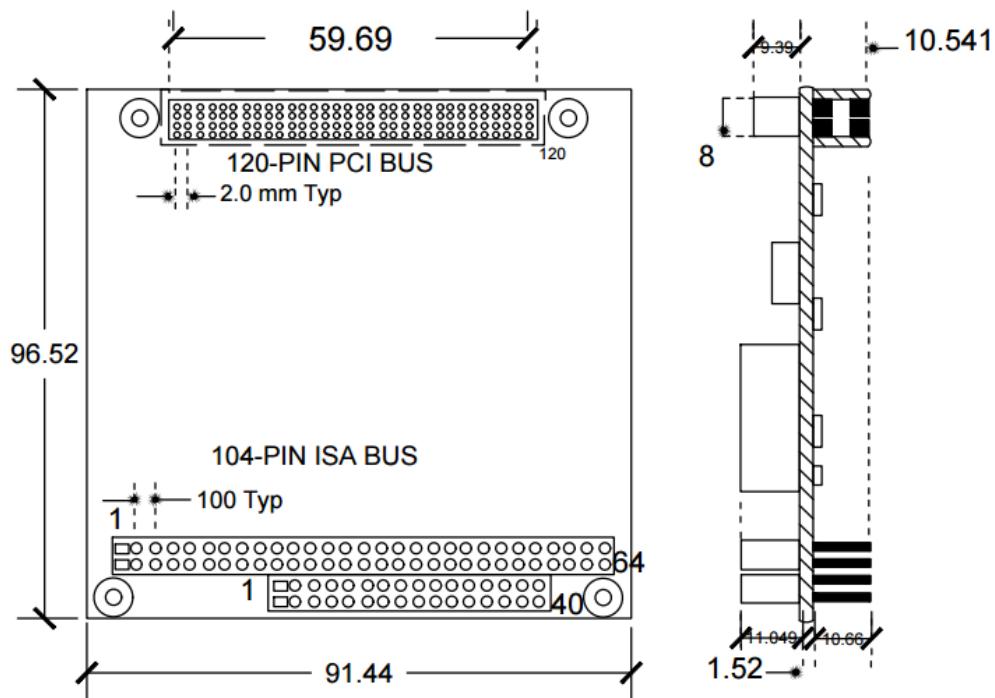


Ilustración 7. Estándar PC/104 Dimensiones de PCB.

Se muestra las especificaciones de dimensión del PCB y del bus de comunicaciones bajo el estándar PC/104 [7].

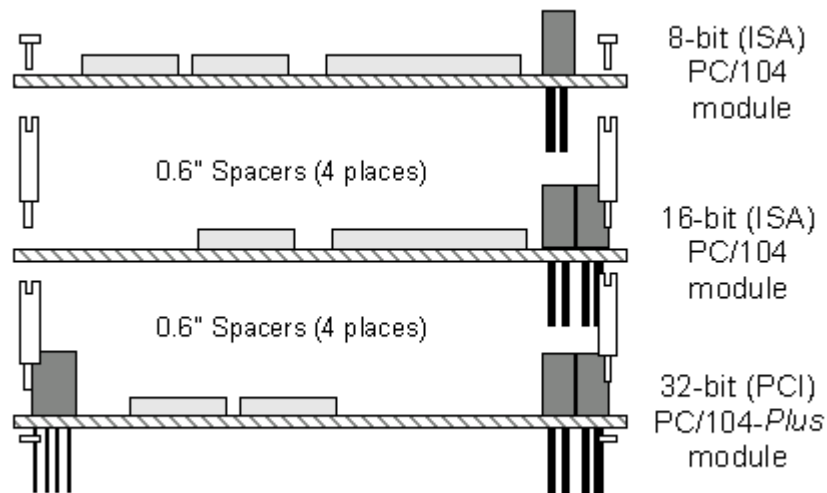


Ilustración 8. Estándar PC/104 modelo de conexión.

Se muestra la forma de conexión del bus de comunicación y las variantes existentes en relación con el número de bits.[7].

1.5 Subsistemas

Toda arquitectura satelital puede clasificarse en dos grandes secciones, la nave operativa y la carga principal. La nave integra todos los subsistemas que mantienen a la misión en condiciones saludables y brinda información vital, como es: telemetría y orientación, control térmico, niveles de alimentación y telecomunicaciones, mientras, la carga principal es el instrumento a través del cual la misión será útil, definido por el hardware específico, este tendrá un solo objetivo y será soportado por la infraestructura proporcionada por los subsistemas en conjunto.

1.5.1 Subsistema de alimentación y potencia

El objetivo primordial de este subsistema es proporcionar un flujo continuo de energía eléctrica a todos los componentes y subsistemas del satélite, para lograr este flujo sin variaciones se incorporan acondicionadores de potencia, pudiendo regular, convertir y proteger el resto de los componentes, en base a sus requerimientos eléctricos. Su principal fuente de energía proviene de la producida por las celdas solares, que se encargan de transformar la radiación solar en energía eléctrica. En la mayoría de los casos, las celdas solares no logran suministrar la suficiente energía para todo el conjunto de subsistemas, por ello que se implemente una fuente secundaria de alimentación. Esta fuente secundaria sustituye la operación de las celdas por baterías recargables. Usualmente las baterías se eligen de acuerdo con su relación rendimiento-masa, las más comunes son de Níquel- Cadmio y Litio-Ion [8].

1.5.2 Subsistema de control térmico

Teniendo en cuenta las condiciones extremas presentes en el espacio exterior, los cuerpos que orbiten la tierra serán víctimas de cambios bruscos de temperatura cuando se encuentren en eclipse o en órbita caliente, lo que supone un enorme riesgo para los instrumentos a bordo, es por lo que debemos dedicar un sistema a la regulación térmica.

El reto principal es el reducido espacio del que se dispone en una estructura nanosatélite, donde utilizar sistemas convencionales de regulación por medio de grandes radiadores penalizan la masa permitida para su despliegue.

Las soluciones viables constan de sistemas pasivos como los recubrimientos o blindajes metálicos llamados **MLI** (del inglés *Multi-Layer Insulation*) que reflejara la mayor parte de la radiación incidente sobre el cubo y transportando la energía sobrante para alcanzar el equilibrio térmico en toda la superficie, se proponen también estructuras de fibra de carbono-epoxi y se encuentran en desarrollo por las agencias espaciales más distinguidas, versiones modificadas de pequeños sistemas de tuberías, análogas a los sistemas de refrigeración de laptops, que transfieren el calor acumulado a donde no será comprometida la estructura ni el funcionamiento del emprendimiento. La ilustración 9 muestra el análisis y simulación del comportamiento térmico de un CubeSat.

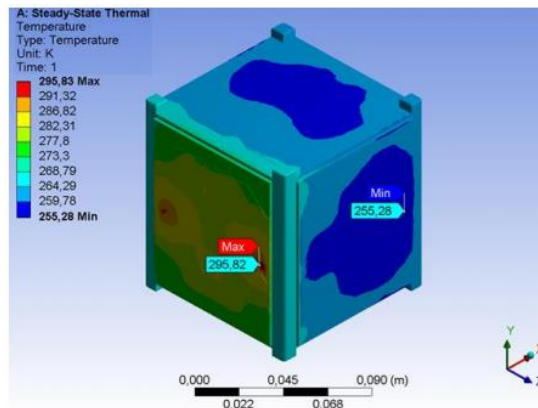


Ilustración 9. Simulación y análisis del comportamiento térmico de un CubeSat.

La ilustración muestra el comportamiento térmico de un CubeSat, a través de una simulación. Donde la temperatura mínima registrada 255.25 K y la máxima 295.83 K [9].

1.5.3 Subsistema de posicionamiento, orientación y apuntamiento

En toda misión espacial es indispensable controlar la posición y orientación global para lograr establecer y efectuar la comunicación, el subsistema de posicionamiento y orientación es el encargado de estabilizar y orientar al Cube-Sat en una dirección dada por medio de vectores de posicionamiento y restricción mediante el uso de sensores solares, estelares, inerciales, de detención de horizonte, que miden los datos, para luego procesarlos por el control de actitud, finalmente se envía la decisión a los actuadores como ruedas de reacción, paneles solares o propulsores.

Todos los dispositivos espaciales que se encuentran en órbita están expuestos a sufrir perturbaciones causadas por efectos gravitacionales, fenómenos magnéticos, presión por tormentas solares o arrastre atmosférico. Según el tipo de misión del CubeSat, el control de actitud es realizado por medios pasivos, aprovechando el fenómeno físico, de tal modo que no requiere procesamiento de información para su actuación o por medios activos que impliquen intervención por parte del hardware del subsistema de posicionamiento para disminuir las perturbaciones.

La técnica más utilizada desde misiones pasadas de comunicación láser para lograr una alta precisión de apuntamiento en la estación óptica terrestre y lograr establecer una canal de comunicación eficiente, es utilizar una baliza láser de enlace ascendente. La detección de balizas láser en tierra permite a la nave espacial adquirir directamente la ubicación de un objetivo en tierra y utilizar esta información para la determinación de la actitud referenciada en tierra, de manera que se puede establecer el enlace de comunicación láser. Ninguno de los satélites utilizados hasta ahora para la experimentación pertenece al estándar CubeSat, a excepción del proyecto OCSD/AeroCube ilustración 10, es un experimento que demostró un enlace de bajada eficiente desde LEO [10]. Este proyecto de 3U de 1.5 kg cada una, está equipado con sistema de apuntamiento que combina lo mejor de cada sensor de actitud y actuadores, realiza un apuntamiento utilizando rastreadores de estrellas, una baliza láser en tierra, giroscopios de 3 ejes en cada nave, 6 sensores solares de 2 ejes, 4 sensores de horizonte terrestre, varillas de torsión magnética, ruedas de reacción y sistema de propulsión. Todos estos actuadores y sensores de actitud combinan su operación para lograr un punto de precisión de aproximadamente 0.05° . Los resultados de los primeros experimentos fueron tasas de transferencia de datos de 50 Mbps, 100 Mbps y 200 Mbps de forma exitosa [11].



Ilustración 10. Representación de enlaces de la OCSD.

La ilustración describe a forma de resumen la misión OCSD de la NASA, se puede observar el enlace descendente y la tasa de transferencia alcanzada [12].

1.5.4 Subsistema de telemetría y comando

Uno de los sistemas críticos más importantes es el de telemetría, seguimiento y comando. Encargado de informar sobre la posición, órbita trazada, dirección, recursos y receptor de las órdenes desde tierra, se trata de la interfaz con la que se comunicara la tierra una vez se inicie la misión. Consta de un computador que procesara las órdenes terrenas para modificar su curso o indicar anomalías importantes en órbita haciendo uso de sensores, giroscopios, acelerómetros, incluso GPS, además, proporciona información vital del satélite como podrían ser fallas, niveles irregulares de alimentación, temperaturas extremas, desconexión de algún subsistema, en otras palabras, comunica el estado en tiempo real del Cube-Sat. Implementa por lo regular una antena omnidireccional de baja ganancia ya que las velocidades de transmisión no requieren ser extremadamente altas.

1.5.5 Subsistema estructural

Los CubeSat cuentan con una estructura estandarizada con dimensiones de 1U que mide 10x10x10 cm, esta puede ser extendida a 1.5, 2, 3, 6, hasta 12U, estas dimensiones dependen directamente del sistema de despliegue orbital P-POD. Dicha estructura tiene como objetivo alojar a todas las cargas útiles y a los subsistemas, asegurando su integridad durante la fase de lanzamiento. Debe estar diseñada para garantizar accesibilidad para inspecciones en la etapa de montaje, más demostrar un buen comportamiento térmico, mecánico, eléctrico y manteniendo el peso mínimo. El análisis estructural se realiza con la finalidad de asegurar cuanto puede soportar tal esfuerzo de carga en diferentes entornos. Para realizar este análisis se toma en cuenta la inspección del vehículo de lanzamiento, la elección del material, la decisión de dimensiones y la consideración de estándar CubeSat, como de los requisitos de las Especificaciones de Diseño CubeSat **CDS** (del inglés *CubeSat Desing Specification*) de Cal Poly [8], [13]. A continuación, la ilustración 11 ejemplifica el diseño estructural de un CubeSat.



Ilustración 11. Subsistema estructural de un CubeSat.

Como se aprecia en la imagen, el chasis del CubeSat es rígido compuesto de una aleación de aluminio y cuenta con la disposición para montar componentes y circuitos [8].

1.5.6 Estación terrena

Es la unidad de infraestructura, compuesta por software y hardware en la que se comandara una misión espacial desde un puesto en la tierra. Dependiendo de la órbita que describa el satélite y los requerimientos del emprendimiento, la estación podrá ser fija o montando en un vehículo móvil dotado de antenas para comunicarse, así como los receptores, servidores para almacenamiento, sistemas de alimentación y computadoras para enviar órdenes y recibir información.

Puede existir más de una estación o tele puerto en distintas localidades o hasta en otras partes del mundo que se comuniquen entre sí, con la finalidad de interceptar más de una vez en una órbita al satélite y así incrementar la vida útil de la misión.

Para aprovechar al máximo la comunicación por vía laser, es de vital importancia que el rastreo del satélite sea preciso, ya que se debe sincronizar con la estación en tierra y enlazar la transmisión y recepción, por lo que un parámetro de suma importancia es el tiempo de visualización, este hace referencia a la ventana de oportunidad en la que el CubeSat y la estación terrena pueden comunicarse. Mencionado con anterioridad el estándar CubeSat se ubica en LEO describiendo orbitas circulares o polares. Este tipo de orbitas presentan una desventaja significativa en el tiempo de visualización debido al movimiento de rotación del planeta, en cambio también ha sido un factor de motivación para la optimización de los canales de comunicación.

Lo anterior se fundamenta con el trabajo de simulación de orbita realizado por el Centro de Desarrollo Aeroespacial **CDA** del **IPN**, bajo las consideraciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones **ITU** y situados en el centro de la ciudad de México, donde a una velocidad teórica de desplazamiento de 456.76 km/min, a una altitud de 500 km y con un ángulo de 75° con respecto al ecuador, el pronóstico más alentador nos permitiría observar durante apenas 3.452 minutos nuestro cuerpo orbital [1]. Resulta de suma importancia conocer este parámetro específicamente para nuestro territorio nacional, ya que el presente trabajo busca generar las bases para su futura implementación en investigaciones que den marcha ha misiones espaciales nacionales, donde se implementen las comunicaciones laser como complemento para las comunicaciones RF y lograr aprovechar lo mejor de ambos sistemas.

1.5.7 Subsistema de comunicación

El subsistema de comunicaciones es crucial en cualquier misión, de él depende la eficiencia y desempeño de un satélite ya que tiene por objetivo recibir y transmitir información a la estación terrena. Comúnmente se destinan dos PCB's una para el transmisor y otra para el receptor para que operen de forma independiente. Sin embargo, esto resuelta en mayor espacio utiliza para un solo subsistema y por consiguiente más caro. Es por eso por lo que actualmente se opta por la implementación de un transceptor, el cuál realiza la recepción y transmisión de información desde un mismo dispositivo. La mayoría de los Cube-Sat, se comunican por medio de RF, por lo que las antenas comúnmente utilizadas son monopolo

con polarización omnidireccional para las bandas VHF en el enlace ascendente y UHF para el enlace descendente, las antenas monopolos utilizan un sistema de despliegue, este sistema se debe a los requisitos de P-POD y también están las antenas tipo parche con polarización circular estas son utilizadas para la comunicación en la banda S. En cuanto a la potencia que manejan los Cube-Sat es muy baja debido al tamaño de estos nanosatélites y se encuentran entre 100 mW a 1 W y cuenta con tasas de transferencia de datos de entre 1200 bps y 9600 bps [8].

1.5.7.1 Antenas RF

Existen múltiples diseños de antenas de radiofrecuencia, donde las dimensiones se definen por la ganancia requerida y la frecuencia de operación, considerando en primer lugar aquellas que sean lo más pequeñas que nos permitan un patrón de radiación omnidireccional para cumplir con las especificaciones Cube-Sat. Debido a esta razón, las innovaciones giran en torno a arreglos matriciales de pequeñas antenas. En la ilustración 12 se puede observar el sistema de despliegue de las antenas RF una vez el CubeSat se encuentre en órbita.

En cuanto a la frecuencia, suelen utilizarse espectros de VHF y UHF convencionalmente para telemetría y control (TT&C) y se experimenta a distintas frecuencias para aplicaciones específicas en la banda S, L, X y K como se muestra en la tabla 2:

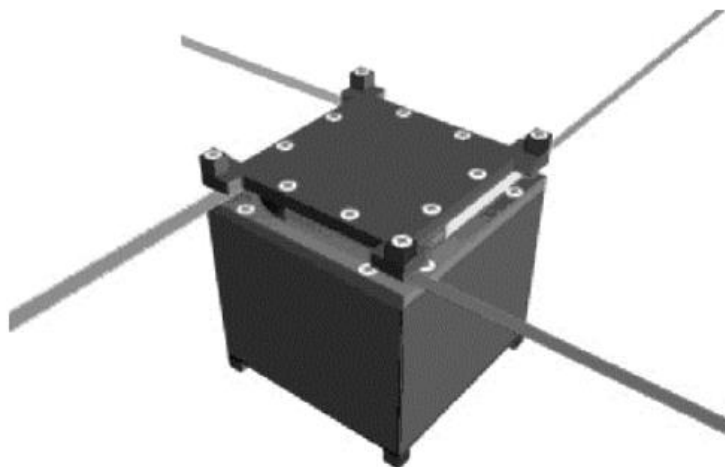


Ilustración 12. Despliegue de antenas RF.

La ilustración muestra la configuración típica del montaje antenas en un CubeSat [13].

Tabla 2 Banda RF y su aplicación.

APLICACIÓN	RANGO DE FRECUENCIA	BANDA DE COMUNICACIÓN A TIERRA	GANANCIA DE TRANSMISIÓN	TASA DE TRANSFERENCIA REQUERIDA
OBSERVACIÓN ESPACIAL Y TERRESTRE	Banda L – (1-2 GHz)	VHF 130-170 MHz UHF 400-450 MHz	17 dB	>9600 bps
PRONÓSTICO CLIMATOLÓGICO	Banda X - (8-12 GHz)	Banda S 2-4 GHz	26 dB & 37 dB	>400 Kbps
INVESTIGACIÓN ESPACIAL	Banda X - (8-12 GHz)	VHF 130-170 MHz UHF 400-450 MHz	17 dB & 37 dB	>32 Kbps
COMUNICACIONES	Banda K – (18-27 GHz)	Banda K 18-27 GHz	45 dB	>6 Mbps

Fuente: Bandas de frecuencia

1.6 Comunicación láser

Esta tecnología de comunicación láser *lasercomm* (del inglés *laser communications*) se ha vuelto clave en las comunicaciones ópticas de espacio libre FSO (del inglés *Free Space Optics*) dado que se postula como un método óptimo para proporciona enlaces de comunicación de alta tasa de transmisión. El uso de láseres es un concepto sencillo y similar al de las transmisiones ópticas con cables de fibra óptica, la única diferencia es el medio de transmisión. *Lasercom* consta de tres etapas, el envío de la radiación óptica que obedece la Ley de Beer-Lambert, la transmisión en el espacio libre donde pueden existir nubes, lluvia, humo, gases, variaciones de temperatura, niebla, y la recepción para el procesamiento de la señal. [14].

La comunicación láser en el espacio libre utiliza la propagación de un rayo láser en el espacio puede ser aire o vacío como una portadora de la señal, proporcionando enlaces de comunicación inalámbricos entre los terminales ópticos de transmisión y recepción. Los datos se modulan en haces láser de baja divergencia, lo que es posible gracias a la propiedad de difracción de las ondas electromagnéticas. El límite teórico de la difracción establece que la divergencia de haz de la onda electromagnética es proporcional a la longitud de onda e inversamente proporcional al diámetro de apertura. Dado que la longitud de onda utilizada es del orden de los μm , más corta que la longitud de onda de RF, los haces pueden alcanzar un ángulo de divergencia mucho más estrecho que los anchos de haz de radiofrecuencia. Como resultado la comunicación láser proporciona una mayor direccionalidad del enlace, reduciendo la potencia de transmisión necesaria

Otras ventajas son el ancho de banda de la señal, la casi nula regulación del espectro y la seguridad de canal. Debido a la elevada frecuencia de portadora de las señales ópticas, la relación ancho de banda-frecuencia de los canales ópticos es de ordenes de magnitud inferiores a los de radiofrecuencia, lo que proporciona una capacidad mayor al canal. El espectro de radiofrecuencia al ser un recurso limitado se encuentra bajo regulaciones y administración nacional e internacional, los enlaces ópticos en cambio no están sujetos actualmente a la asignación de espectro, lo que proporciona mayor disponibilidad de ancho de banda y un proceso de concesión de licencias más sencillo. Sin embargo, las desventajas o limitaciones de este sistema se deben principalmente a los efectos meteorológicos y a los estrictos requisitos de apuntamiento. Estas interferencias meteorológicas pueden ocasionar pérdidas del enlace de comunicación, por lo que este sistema se plantea temporalmente como un enlace adicional al sistema de comunicaciones RF. La presión de apuntamiento juega un papel de suma importancia en este sistema de comunicación, dado que exige que la mayor parte de la potencia de óptica pueda ser recibida. Cabe mencionar que esta tecnología se encuentra en etapa de experimentación y desarrollo, pese a todo, los experimentos realizados hasta el momento han expresado resultados positivos traducidos a la viabilidad de su implementación en futuros sistemas de comunicación. [15] Cabe mencionar que esta tecnología se encuentra en etapa de experimentación y desarrollo, pese a todo, los experimentos realizados hasta el momento han expresado resultados positivos traducidos a la viabilidad de su implementación en futuros sistemas de comunicación [15].

1.6.1 Tasas de transferencia de datos

Las implicaciones de usar sistemas de lasercomm se justifican porque la licitación del espectro queda fuera de las regulaciones de ITU ya que, al ser sistemas ópticos con longitudes de onda del orden de los $0.8 - 0.16\mu\text{m}$ cercanos al infrarrojo, y por su haz extremadamente direccionable y angosto, no interfieren con los dispositivos convencionales de RF.

El mayor reto por vencer es que, la propagación de laser queda a merced de las condiciones climatológicas de la zona donde se producen atenuaciones, cambios de fase y de señal, absorción, entre otros. Sin embargo, estos temas quedan resueltos al implementar más de una estación en tierra, obteniendo un 90% de eficiencia con 3 puntos de interconexión [2].

Actualmente, el éxito del lasercomm en sistemas de comunicación satelitales se fundamenta en misiones de las agencias espaciales más desarrolladas a nivel mundial, donde el mayor número de experimentos se realizan con satélites de tamaño convencional a excepción de uno, a pesar de todo dejan como precedente un entorno optimista y de oportunidad para alcanzar tasas de transferencia cada vez más altas, abriendo el horizonte para implementaciones en el estándar CubeSat, algunas de estas misiones y proyectos son:

- NASA. – **LLCD** (del inglés *Lunar Laser Communications Demonstration*) marco un récord en el 2013 al transmitir desde la órbita lunar datos con una tasa de 622 Mbps, 6 veces más que los predecesores sistemas de comunicación lunar.

- NASA **JPL** (del inglés *Jet Propulsion Laboratory*) en colaboración con la estación espacial internacional **ISS** utilizan el instrumento de abordaje, **OPALS** para transmitir video y este dispositivo los podemos observar en la ilustración 13.

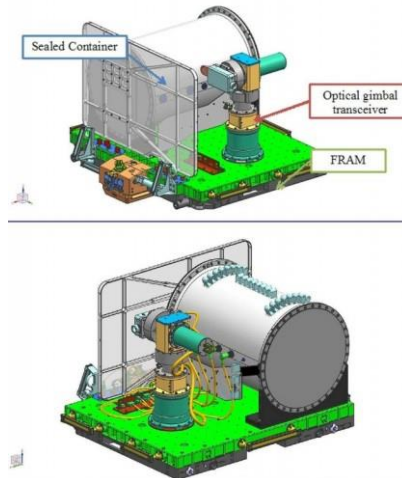


Ilustración 13. Sistema de abordaje OPALS.

Construcción del dispositivo de a bordo de la NASA.

- De nuevo el JPL integra sistemas lasercomm para conectar misiones interplanetarias en el emprendimiento comunicaciones ópticas de espacio profundo **DSOC** (*Deep Space Optical Communications*), planeada para el 2022, pretende utilizar esta comunicación para estudiar cuerpos celestes en nuestro cinturón.
- El programa de demostración de sensores y comunicaciones ópticas **OCSD** (*Optical Communications and Sensor Demonstration Program*) véase ilustración 14, de *Aerospac Corporation* es hasta a hora el satélite con mayor desempeño, alcanzando los 100 Mbps en la misión AereoCube 7-C.

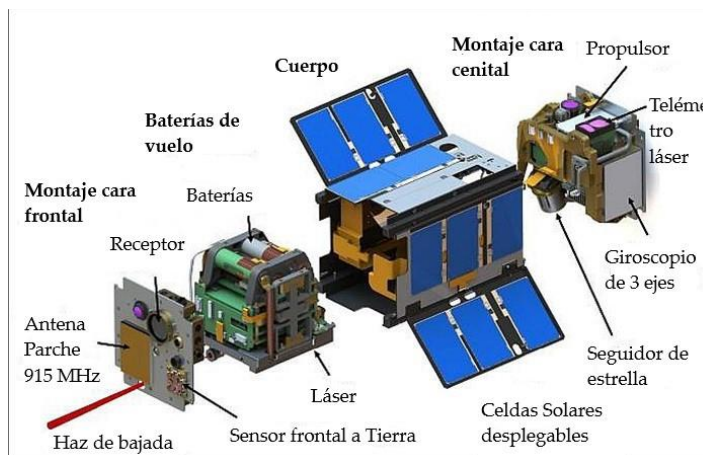


Ilustración 14. OCSD.

La ilustración muestra el desensamble de la misión lasercomm OCSD [12].

Otras misiones internacionales presentan las características que se ve en la siguiente tabla:

Tabla 3 Tasa de transferencia de datos por misiones.

AÑO	MISIÓN	ORGANIZACIÓN	TIPO DE ENLACE	TASA DE TRANSFERENCIA (GBPS)
2001	GeoLITE/ALEX	MIT	GEO a tierra	>1
2001	SILEX	ESA	LEO-GEO	0.05
2005	LUCE	JAXA	LEO-GEO/ LEO-tierra	0.05
2008	NFIRE/TerraSAR-X	Tesat Spacecom	LEO-LEO LEO-Tierra	5.65
2013	LLCD	MIT/NASA	Luna-tierra	0.622
2014	OPALS	JPL	ISS-tierra	0.05
2014	EDRS	Tesat Spacecom/ESA	LEO-GEO/ GEO-tierra	1.8

Fuente: Misiones

Dentro del IPN se han realizado investigaciones y trabajos relacionados a este tema, sin embargo, hasta el momento no se ha desarrollado un sistema completo de Lasercomm para profundizar en la investigación, la finalidad de este trabajo es realizar un prototipo transceptor óptico como modelo de pruebas en busca de conseguir tasas de transferencia aceptables, proporcionando un nuevo punto de partida para futuros desarrollos en esta área dentro del instituto.

Capítulo 2 Desarrollo

En lo que respecta a este capítulo, se desglosa toda la información referente a la metodología empleada para el desarrollo del prototipo. Aplicando el método tecnológico se describen los componentes elegidos para la construcción del prototipo, sus características de interés, sus configuraciones necesarias y los circuitos propuestos para ciertas etapas que requieren ser diseñadas.

En primera instancia se enfatiza que este trabajo se llevó a cabo considerando que el resto de los subsistemas están cumpliendo correctamente con su función, debido a que, el desarrollo de un CubeSat abarca múltiples subsistemas, factores y retos. De esta forma se limita el alcance del proyecto únicamente al desarrollo de un transceptor óptico como modelo de pruebas, con la finalidad de lograr los objetivos planteados, y establecer un análisis de los resultados, dando pie a que las generaciones siguientes tengan como base este proyecto, para mejorarlo y en un futuro llevarlo hasta el punto de implementación en una misión CubeSat del instituto. De la misma manera, se hace la aclaración, que las pruebas a las que será sometido este transceptor serán de forma análoga a un sistema de enlace ascendente y descendente, pero en pruebas terrestres.

El desarrollo de todo prototipo está basado en la implementación del método tecnológico, la ilustración 15 muestra el diagrama a bloques de dicho método. Este diagrama se toma como parte de la metodología utilizada para el desarrollo del prototipo.

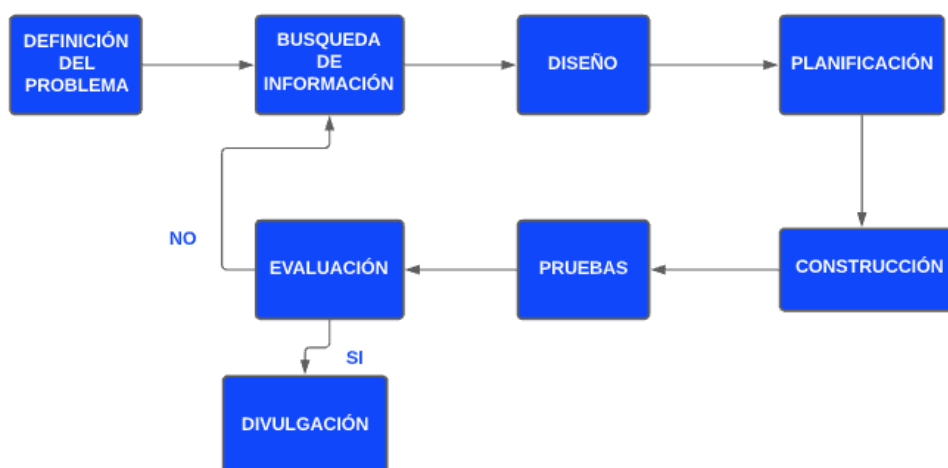


Ilustración 15. Método de ingeniería.

Se muestra el diagrama de flujo del método de ingeniería.

En este punto del trabajo se ha abarcado la definición del problema y la búsqueda de información referente al proyecto. Teniendo como referente esta introducción teórica al estándar CubeSat y sus necesidades, se procede a la fase de diseño, donde se plantea la composición del prototipo y los componentes que utilizaran para cumplir con los objetivos tanto general como particulares.

Parte de una etapa de diseño es aislar el algoritmo o realizar la descomposición por bloques del proceso, prototipo o programa que se vaya a diseñar. Es por lo que, a continuación, la ilustración 16. muestra el diagrama a bloques propuesto para la construcción del transceptor. Dicho transceptor está conformado, por un circuito de control, el cual será el encargado de enviar y recibir los datos, así como almacenar la rutina para la comprobación del enlace. Una

etapa de potencia encargada de hacer conmutar el láser a alta frecuencia, sin poner en riesgo la integridad del microcontrolador. Una etapa de acondicionamiento de la señal de entrada, esto con la finalidad de poder transformar la información representada por el haz láser en niveles de voltaje asequibles para su correcta interpretación, esta etapa se realizará con un amplificador de transimpedancia. La alimentación del prototipo requiere de dos niveles de voltaje distintos 5V y 3.3 V, por lo que se deberán tomar ciertas consideraciones para lograrlo. Finalmente se tiene una etapa de visualización de la información, no es necesaria para el tranceptor, pero su función principal, será como apoyo para la visualización de los datos en la transmisión y recepción.

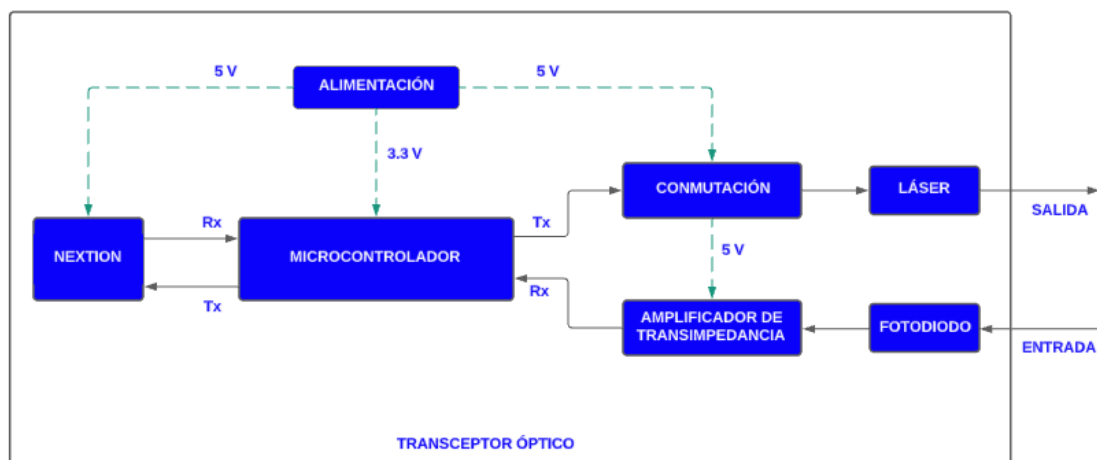


Ilustración 16. Diagrama a bloques del proyecto.

Diagrama propuesto considerando los módulos y etapas a desarrollar durante el proyecto.

2.1 Enlace óptico

Todo sistema de comunicaciones consta de tres componentes básicos, un transmisor, un canal de comunicación y un receptor. Los sistemas de comunicaciones ópticas no son la excepción, estos también cuentan con estos tres elementos básicos, donde el canal de comunicación se convierte en un haz que viaja por el vacío o por el espacio libre. Antes de dar paso a la implementación de la electrónica detrás del tranceptor óptico es necesario realizar el estudio del enlace óptico al que será sometido, para ello se describirán los detalles de cada etapa y sus componentes con los que fue implementado en el prototipo.

2.1.2 Codificación empleada

Derivado que este tema no es el objetivo primordial de este proyecto se optó por elegir a la codificación de transmisión de encendido y apagado presente en el UART (del inglés *Universal Asynchronous Receiver Transmitter*).

El protocolo de comunicación UART permite comunicar dos dispositivos sin la necesidad de una señal de reloj para sincronizar los bits de salida del transmisor con el del receptor. Un requisito fundamental para el correcto funcionamiento del protocolo UART es que ambos dispositivos deben configurarse a la misma velocidad de baudios, es decir, deben tener la misma velocidad para transferir la información al canal de comunicación. Bajo este contexto, la velocidad de baudios servirá como el número máximo de bits por segundo que se transferirán. De esta manera, se espera poder modificar fácilmente la tasa de transferencia de datos, esperando observar las variaciones existentes en el mensaje transmitido.

Esta configuración representa la manera más simple de codificar información en su representación de 1 y 0 binarios, véase ilustración 17, su facilidad de implementación nos permitirá enfocarnos en el desarrollo del transceptor para llevarlo hasta su etapa de correcto funcionamiento. Sin profundizar en la codificación segura ni modulación de los datos.

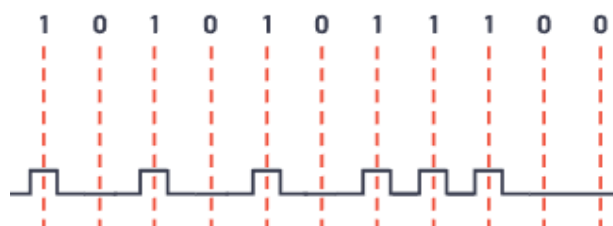


Ilustración 17. Codificación básica del UART.

La ilustración muestra la forma de la señal característica proveniente del UART.

2.2 Descripción del circuito de control

La función principal del circuito de control es proporcionar un almacenamiento de la rutina para comprobar el enlace del sistema. Para ello, debe de contar con los periféricos correspondientes, los cuales, realizarán el proceso de transmisión y recepción de los datos para su interpretación. Estas tareas, pueden ser fácilmente resultas con un microcontrolador. Del diagrama a bloques del transceptor, ilustración 16, se puede observar que una característica primordial, es que el microcontrolador cuente con al menos 2 periféricos UART. Aunado a esto, se eligió un microcontrolador de la familia PIC24 de la empresa Microchip, el cual tiene por número de matrícula PIC24FJ128GA202, ilustración 18. Dentro de las características principales de este microcontrolador están las siguientes: es un dispositivo de bajo costo, bajo consumo energético (3.3 V) ideal para nuestra limitación en

potencia del subsistema, una arquitectura de 16 bits, 4 periféricos para el protocolo UART, un convertidor analógico digital, entre otros.



Ilustración 18. Microcontrolador PIC24FJ128GA202.

Se muestra el microcontrolador propuesto para el proyecto, en su empaquetado SPDIP-28.

La propia empresa Microchip pone al alcance de los diseñadores su software de programación de uso gratuito MPLAB® X IDE, el cual, se utilizó para realizar la configuración de los puertos del microcontrolador y la descripción de su programa con el lenguaje de programación C.

Este mismo software cuenta con una herramienta para realizar la configuración de los periféricos, MPLAB® Code Configurator ofrece una forma sencilla de acceder a los registros de los dispositivos para configurar cada uno de los periféricos por medio de una interfaz gráfica. A continuación, se muestra el microcontrolador, con los periféricos configurados, ilustración 19.

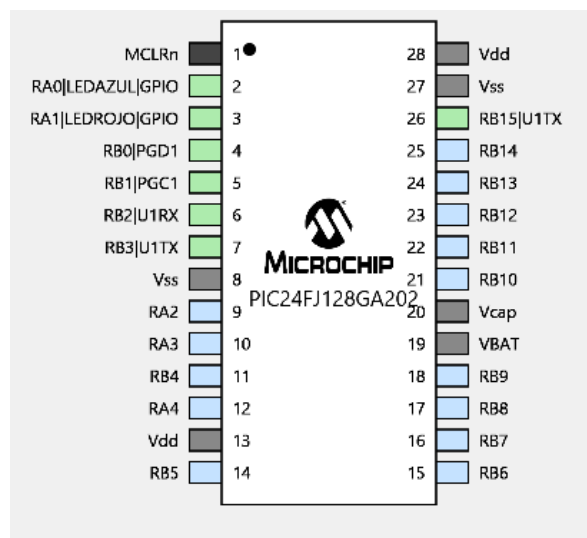


Ilustración 19. Configuración de los puertos del microcontrolador.

Se muestran los periféricos activados para las distintas funciones del microcontrolador.

Se configuró dos puertos UART, uno destinado a la escritura de los datos al bloque de conmutación y amplificar de transimpedancia. El segundo destinado para la comunicación entre la pantalla de visualización y el microcontrolador. Se configuraron dos puertos de propósito general, para la conexión de los LED's indicadores.

Para realizar el código del microcontrolador es necesario aislar el algoritmo bajo el cual funcionará. La ilustración 20 muestra el diagrama de flujo del programa. Para ver el código del microcontrolador consulte Apéndice C.

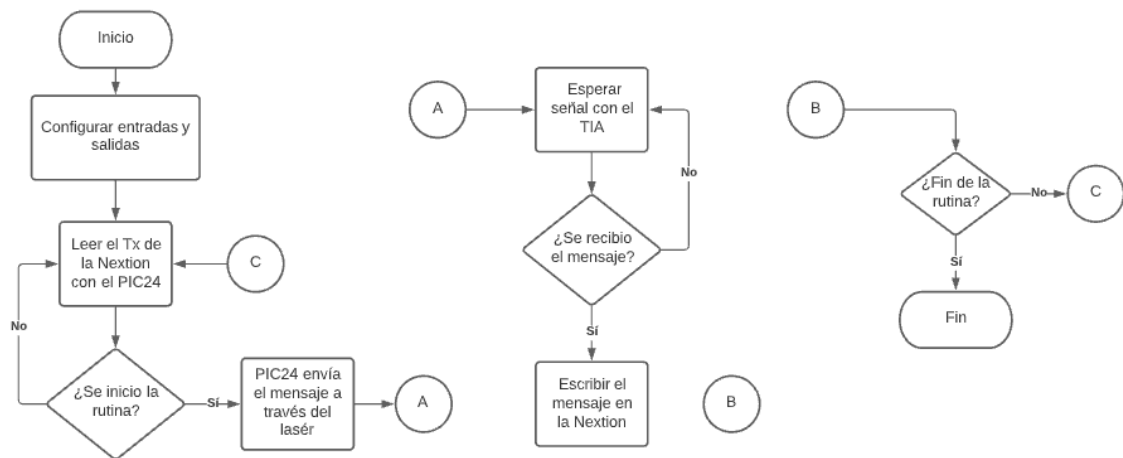


Ilustración 20. Diagrama de flujo del programa del PIC24.

Se muestra el algoritmo base para la elaboración del código del microcontrolador.

2.3 Descripción del láser

Al establecer el canal de comunicación con láser, se toman ciertas consideraciones para elegirlo correctamente. Algunas de estas consideraciones son las siguientes:

Longitud de onda. Idealmente el láser destinado a Lasercomm debería tener una longitud de onda mayor a los 650 nm, para evitar el uso de láser visibles y así aprovechar al máximo el ancho de banda proporcionado por longitudes de onda entre 700-1100 nm. Por motivo de presupuesto y facilidad de apuntamiento, se eligió utilizar un láser verde con longitud de onda de 532 nm y un láser rojo con longitud de onda de 650 nm.

Ángulo de divergencia. Este ángulo se refiere a que, en la propagación del haz, la misma cantidad de energía se disemina en un área mayor, de tal manera que provoca una disminución en la efectividad y potencia del haz. Es por lo que, se debe optar por un láser con un ángulo de divergencia bajo.

Potencia de operación. En todo CubeSat, cada subsistema es alimentado cuidadosamente por su subsistema de potencia, el cuál limita a cada subsistema a determinada potencia de operación. En este trabajo se tomó de referencia una potencia de 2 Watts por subsistema, por esto mismo, la elección de los componentes debe realizarse con sumo cuidado.

Se optó por un láser verde con longitud de onda de 532 nm, con una potencia baja en el orden de los 300mW y un voltaje de operación de 3.7 VCD.



Ilustración 21. Puntero láser.

Láser elegido para la transmisión de los datos, tiene una longitud de onda de 532nm.

2.3.1 Características eléctricas

Para controlar la conmutación del láser se propuso un circuito de potencia como el que se muestra en la ilustración 19. Este circuito cumple con la función de conmutar a alta frecuencia ya que su componente principal es un transistor de efecto de campo MOSFET, sumado a esto, el circuito propuesto nos permitirá controlar una mayor corriente para alimentar el láser, contra restando la sobredemanda de corriente en el microcontrolador.

El transistor MOSFET, realizara el cambio de región de su punto de estabilidad, pasando de la región de corte a la región de saturación, de modo que se genere una conmutación entre el drenador y la fuente del transistor, para que el láser represente los datos. El MOSFET debe cumplir ciertas condiciones para cada una de las regiones de operación.

En la región de corte, el transistor se comporta como un switch abierto, por lo que se debe asegurar que el voltaje entre la compuerta y la fuente no sobrepase el voltaje de umbral, con una corriente en el drenador idealmente sea cero, de esta forma se asegura la no conducción entre la fuente y el drenador del transistor:

$$V_{GS} \leq V_{GStH} \text{ con } I_D = 0 \quad \text{Ec. (1)}$$

En la región de saturación, el transistor se comporta como un switch cerrado, por lo que se debe asegurar de cumplir con que el voltaje entre la compuerta y la fuente sea mayor que el voltaje de umbral, esto hará que el dispositivo se encienda y pueda empezar a conducir, además de que el voltaje existente entre el drenador y la fuente debe ser igual o mayor que la diferencia entre el voltaje compuerta fuente suministrado en este caso por el microcontrolador y el voltaje de umbral del MOSFET.

$$V_{GS} > V_{Gsth} \quad V_{DS} \geq (V_{GS} - V_{Gsth}) \quad \text{Ec. (2)}$$

Cumpliendo con estas condiciones, se asegura el correcto funcionamiento del dispositivo en cada una de las regiones de interés (véase apéndice A).

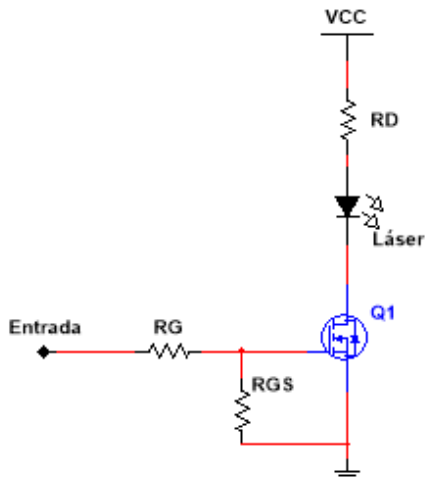


Ilustración 22. Etapa de potencia para el diodo láser.

Se muestra el circuito de conmutación para la activación del láser, usando un transistor MOSFET.

Se procedió a realizar el análisis del circuito anterior, para ello, se tomaron algunos datos del láser especificados por el fabricante, dando como resultado, los siguientes valores para las resistencias.

$$R_D = 16.04 \Omega$$

$$R_G = 5 \Omega$$

$$R_{GS} = 10K\Omega$$

El circuito final, se muestra a continuación en la ilustración 23.

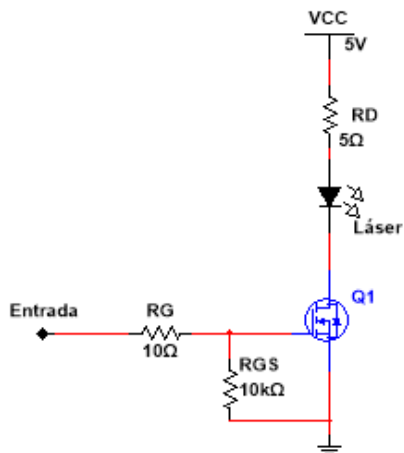


Ilustración 23. Circuito final, para la etapa de potencia del láser.

El circuito mostrado, permite trabajar al láser con una mayor corriente, que la suministra el propio PIC24.

2.4 Descripción del fotodiodo

El fotodiodo es un transductor electroóptico, que cumple con la función de convertir un haz de luz incidente en corriente eléctrica. Existen diferentes tipos de transductores electroópticos y distintos tipos de fotodiodo en base a su funcionamiento. Sin embargo, para este proyecto, el dispositivo de interés es un fotodiodo de polarización inversa. La luz que incide en el fotodiodo genera que la resistencia a la corriente de polarización inversa disminuya. Estos dispositivos por si solos no pueden proporcionar una corriente suficiente para una carga, por lo que, típicamente se utilizan junto con un amplificador de transimpedancia para convertir su salida de nivel bajo, a un nivel de voltaje aceptable. La ilustración 24. Muestra el fotodiodo elegido para este proyecto, se trata del dispositivo VEMD5060 de la empresa VISHAY. El cuál tiene como características de importancia, ser un dispositivo de amplio espectro, teniendo una sensibilidad espectral de 400 a 1100 nm, con un ángulo medio de sensibilidad de 65 °, de rápida respuesta y una ventana de 7.5 mm².

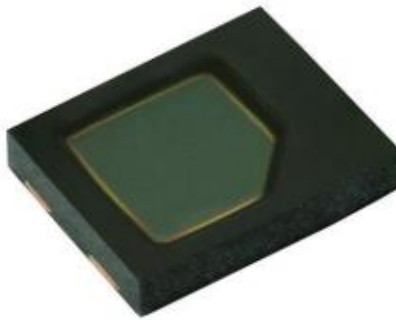


Ilustración 24. Fotodiodo de VEMD5060X01.

Se ilustra el fotodiodo de Silicio PIN elegido para la detección del haz láser. Su encapsulado está diseñado para montaje de superficie.

2.4.1 Amplificar de transimpedancia

Se mencionó con anterioridad que el fotodiodo proporciona a su salida una corriente, pero su nivel de corriente es tan bajo que no es posible tomar como referencia de una señal, es por lo que, usando un amplificador de transimpedancia se puede amplificar esa corriente a un nivel de voltaje alto, que sea asequible para su interpretación en el circuito de control. Esta tarea la realiza el amplificador de transimpedancia, debido a que presenta una baja impedancia de entrada en la terminal inversora y amplifica las pequeñas variaciones de corriente en la entrada en variaciones de mayor voltaje en su salida. El TIA (del inglés *Transimpedance Amplifier*) propuesto, está construido con un amplificador de entrada FET de la empresa Texas Instruments con número de matrícula TL082C. La ilustración 25. Muestra la configuración propuesta para el TIA, del análisis matemático se obtuvo lo siguiente (véase el Apéndice A):

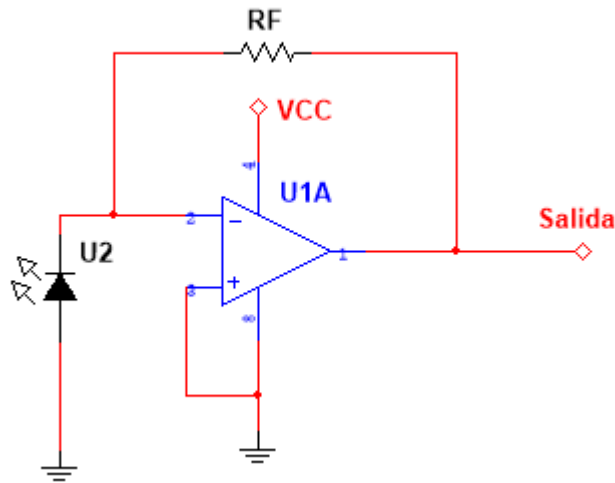


Ilustración 25. Amplificador de transimpedancia.

Se muestra el diseño del amplificador de transimpedancia, para la recepción de los datos.

El valor de la resistencia de retroalimentación es de $R_F = 1107.3828 \Omega$.

2.5 Descripción de la visualización de los datos

Esta etapa no es necesaria para el funcionamiento del dispositivo, sin embargo, es agregada como una herramienta de apoyo para poder observar los mensajes que se están transmitiendo de transceptor a transceptor. Este bloque está constituido con una pantalla táctil de la empresa Nextion, en la cual se mostraron las instrucciones y los botones para iniciar la rutina de comprobación del enlace establecido por los transceptores, realizando una interfaz hombre dispositivo. Esta pantalla funciona con el protocolo de comunicación serial, al igual que el microcontrolador que utilizaremos, por lo que, se podrá establecer la comunicación entre ambos dispositivos. Requiere de una alimentación de 5VCD, la cual podemos obtener del suministro del subsistema de potencia. Al igual que un par de diodos LED que funcionaran como indicadores cuando el dispositivo este transmitiendo y recibiendo información. Observé la ilustración 26. La primera pantalla mostrará una caratula con los datos relevantes en la fabricación de este prototipo. Al tocar la imagen del CubeSat presente en la pantalla principal, se abrirá la segunda página, donde se mostrará los botones que inician la rutina del programa. Dicha página, contiene 3 botones del lado izquierdo, permitiendo escribir los siguientes mensajes: primer botón (escribe un “IPN”), el segundo botón (escribe un “CDA”), el tercer botón (escribe un “EUREKA”), también está incluido un cuadro destinado a la recepción de los mensajes, dentro de este cuadro, se visualizará el mensaje recibido cuando el prototipo este escuchando y a su vez imprime el mensaje enviado cuando se encuentra transmitiendo.

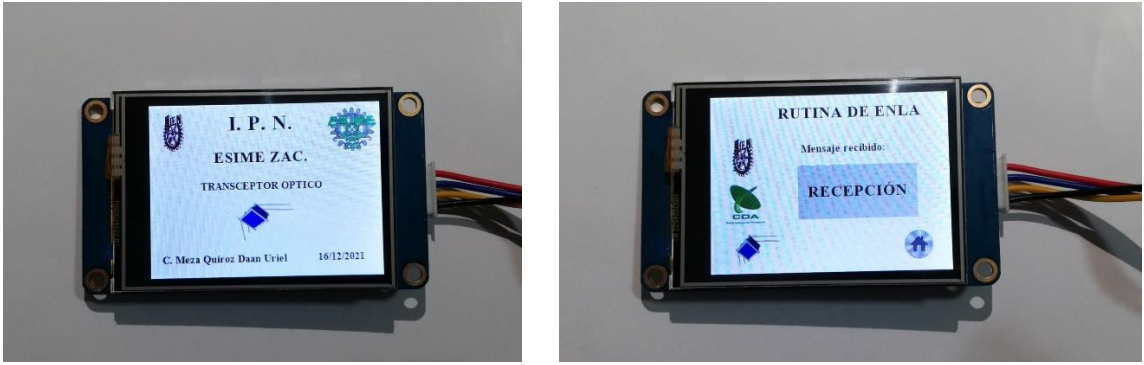


Ilustración 26. Pantalla Nextion, con páginas de la rutina de enlace.

Se muestra la pantalla táctil Nextion que servirá de interfaz para poder iniciar la rutina de comprobación del enlace.

2.6 Descripción de la alimentación

El subsistema de potencia es el encargado de suministrar la potencia necesaria al resto de subsistemas para su correcto funcionamiento. Dicho subsistema está diseñado principalmente para poder alimentar a la carga útil del CubeSat.

Como se mencionó al inicio del capítulo, es de suma importancia recalcar que el desarrollo de este prototipo de pruebas del subsistema de comunicaciones está siendo diseñado bajo la premisa que todos los subsistemas se encuentran en condiciones óptimas de funcionamiento. Por lo que, el subsistema de potencia estará alimentando a nuestro subsistema de comunicaciones, proporcionando una entrada de alimentación de 5 VCD a una potencia de 2 W.

Hasta este punto se han revisado, todos los requerimientos eléctricos de cada bloque de la ilustración 16. Por lo que, sabemos que la mayoría de los bloques funciona con una alimentación de 5 VCD proveniente desde el subsistema de potencia y únicamente el microcontrolador requiere una tensión de 3.3 VCD, para realizar esta tarea, se empleó un regulador de voltaje LD117AS33TR de la empresa STMicroelectronics, que recibe una tensión de entrada de hasta 15 VCD y a su salida entrega 3.3 VCD fijos con una corriente de hasta 1 A. La ilustración 27, muestra la conexión propuesta por el fabricante para una salida fija de 3.3V.

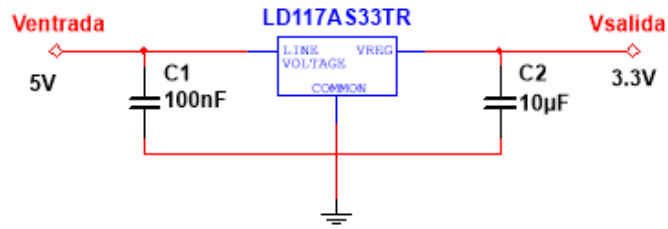


Ilustración 27. Regular de voltaje LD117AS33TR.

Se muestra la conexión del regular de voltaje, para regular una entra de 5 VCD a 3.3VCD. Con todo lo anterior, se dio cumplimiento al bloque de diseño y planificación, se describieron los dispositivos a utilizar, sus principales características y sus diferentes configuraciones con las que operaran en el desarrollo del prototipo. Por esto mismo, se puede dar fin al capítulo dos, para adentrarse en la etapa del análisis de los resultados, y las diferentes fases que se tuvieron que cumplir para obtener el prototipo final.

Capítulo 3 Análisis de resultados

En el marco del capítulo 3, se engloba las etapas de construcción del prototipo, los resultados obtenidos en cada una de las versiones fabricadas del prototipo, las condiciones en las que se realizaron las pruebas y finalmente las mejoras que se pueden realizar en trabajos a futuro, derivado del análisis de resultados de todo el proyecto.

Retomando la idea inicial del capítulo anterior, se evoca que el proyecto fue desarrollado aplicando el método tecnológico, siendo este la base de la metodología para la fabricación del prototipo es por lo que, dentro del capítulo 3 se podrá observar cómo se abarca los bloques de construcción, pruebas y evaluación, dando pauta a la posibilidad de la divulgación de este proyecto.

3.1 Prototipo versión 1.0

Inicialmente se realizó una primera versión del prototipo, esta versión tenía la finalidad de probar la correcta configuración de los periféricos del microcontrolador. Véase ilustración 28.

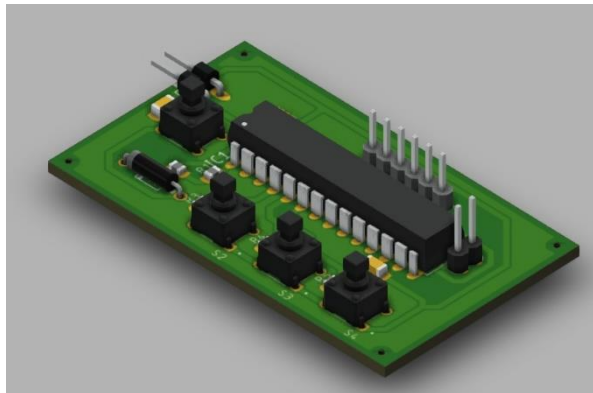


Ilustración 28. Diseño 3D del PCB prototipo versión 1.0

Se muestra el diseño 3D de la placa de circuito impreso, del primer prototipo.

Se realizó una placa de circuito impreso de pruebas, esta primera versión únicamente incluía el microcontrolador, con sus respectivos componentes para realizar su programación del microcontrolador, se configuró un solo periférico de comunicación UART, se colocaron 3 botones pulsadores conectados a puertos de propósito general configurados como entradas, estos botones cumplían la tarea de enviar un mensaje único predefinido en el código del PIC24. Al presionar cada uno de los botones, el código del microcontrolador escribía un mensaje a través del UART. Para la comprobación de su funcionamiento, se conectó la pantalla Nextion directamente en el transmisor del microcontrolador, permitiendo visualizar los mensajes en cajas de texto, de modo, que se obtuvo el resultado esperado. El siguiente paso lógico fue conectar al transmisor un puntero láser, teniendo como finalidad probar las capacidades del UART.

De la misma manera se realizó una PCB para probar el funcionamiento del TIA, con un fotodiodo en encapsulado TO-18, tenía la finalidad de servir como herramienta en la caracterización de los fotodiodos y para realizar cambios rápidos en la resistencia de retroalimentación. Se realizaron pruebas para comprobar el enlace, la configuración del UART se encontró a una tasa de baudios de 9600, y las pruebas se llevaron a cabo en una habitación cerrada iluminada con luz natural y luz artificial. La primera prueba consistió en asegurar la correcta transmisión del mensaje desde el láser, esto se comprobó conectando la

pantalla Nextion al puerto de transmisión como se mencionó con anterioridad. La segunda prueba fue comprobar que los valores obtenidos en los cálculos del TIA fueran las idóneas para obtener los niveles correctos de voltaje a su salida.

La prueba final a la que fueron sometidos estos prototipos fue una prueba de distancia, logrando establecer un enlace óptico de 15 cm. Este prototipo fue el primer resultado positivo en la etapa correspondiente a pruebas. Dio pauta para visualizar las deficiencias del sistema y resolver dudas sobre la operabilidad de ciertos dispositivos. Véase ilustración 29.

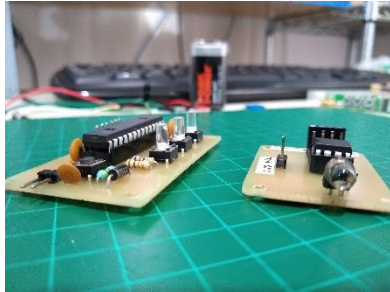


Ilustración 29. PCB's del prototipo 1 y pruebas de la pantalla nextion.

Se muestran las placas de circuito impreso de la primera versión, con los mensajes visualizados en la Nextion.

3.2 Prototipo versión 2.0

La presente versión del prototipo, integra el TIA en la misma placa de circuito impreso donde se encuentra el PIC24, de esta forma se tiene un referente espacial de las dimensiones del prototipo, tenía la función de comprobar el correcto funcionamiento del regulador de voltaje y de lograr un establecer un enlace para la transmisión del mensaje. La configuración del microcontrolador continuaba siendo la misma, un solo periférico para la comunicación serial a 9600 baudios y el mismo fotodiodo de la versión 1. Integra un solo botón pulsador, en la placa destinada a la transmisión, para enviar un mensaje y el resto de los botones en la pantalla Nextion.

Estas pruebas se realizaron con dos PCB una destinada al estudio de las funciones del transmisor y otra para el estudio de las funciones del receptor. Se implemento con un láser de mayor longitud de onda (850) para corroborar si existía una mejora en la distancia del enlace, se fabricó una placa de circuito impreso para montar el fotodiodo y el láser en posición horizontal y de esta forma empatar los dispositivos con mayor facilidad, sin embargo, el ángulo de divergencia del láser era significativo, dando como resultado una disminución considerable en el alcance del enlace. La prueba se realizó de la misma manera en una habitación iluminada con luz natural y artificial, esto sirvió para observar con mayor detalle el efecto de la corriente oscura producida por el fotodiodo en el TIA.

Se obtuvo un alcance mayor a 15 cm, el corto alcance del enlace se debe principalmente a dos fenómenos, uno de ellos es el ángulo de divergencia ya mencionado y el fenómeno mecánico del apuntamiento. Para lograr establecer el enlace se destacó la necesidad de que

el haz de luz incida en ángulo directo en la ventana del fotodiodo, a pesar de los inconvenientes en esta prueba se logró enviar el mensaje de manera exitosa.

Asimismo, se comprobó el buen funcionamiento del regulador de voltaje, pudiendo alimentar todos los dispositivos desde la misma PCB. Pese a esto, se logró visualizar las limitaciones que tenía el microcontrolador para suministrar la suficiente corriente al láser.

Proponiendo una mejora a esta versión, se esclareció la necesidad de una etapa de conmutación para suministrar una mayor cantidad de corriente al láser, a su vez de proteger al microcontrolador de una sobredemanda de corriente, la elección de un nuevo fotodiodo con mejores características físicas y eléctricas que el utilizado en las pruebas, y la elección de un láser que sea visible para facilitar el apuntamiento entre dispositivos.



Ilustración 30. PCB's prototipo versión 2.0 y pruebas del enlace alcanzado.

Se muestra el prototipo versión 2.0, dos PCBs, una enfocada a probar los sistemas de recepción y otra a probar los dispositivos del transmisor.

3.3 Prototipo versión 3.0

La configuración de la versión 3.0 está constituida por todos los bloques que conforman el diagrama a bloques de la ilustración 16. En una sola placa de circuito impreso, se encuentra el microcontrolador, el amplificador de transimpedancia, el circuito de conmutación del láser y el circuito regulador de voltaje. Esta PCB, está diseñada tomando como guía el estándar PC104, se acerca a los requerimientos de dimensiones de la placa de circuito impreso, para ser montada en un CubeSat de 1U, con nivel de complejidad A de baja densidad de componentes, al igual de que incluye el conector 40-PIN ISA BUS de 8 bits, para la comunicación entre subsistemas.

Se fabricó una PCB destinada únicamente para la conexión del láser y el fotodiodo (se nombró OPTXR), esto con la finalidad de poder montarlo en una superficie plana vertical. De tal manera que si ambas placas de los dos transceptores (él original y su homologado) se encuentran correctamente alineadas, se podrá disminuir el error del apuntamiento. Ambas PCB se interconectarán con la ayuda de un cable plano. A continuación, se muestra las

ilustraciones que detallan la construcción de estas PCB. Para consultar el diagrama esquemático completo y el diseño de la PCB vea el apéndice B.

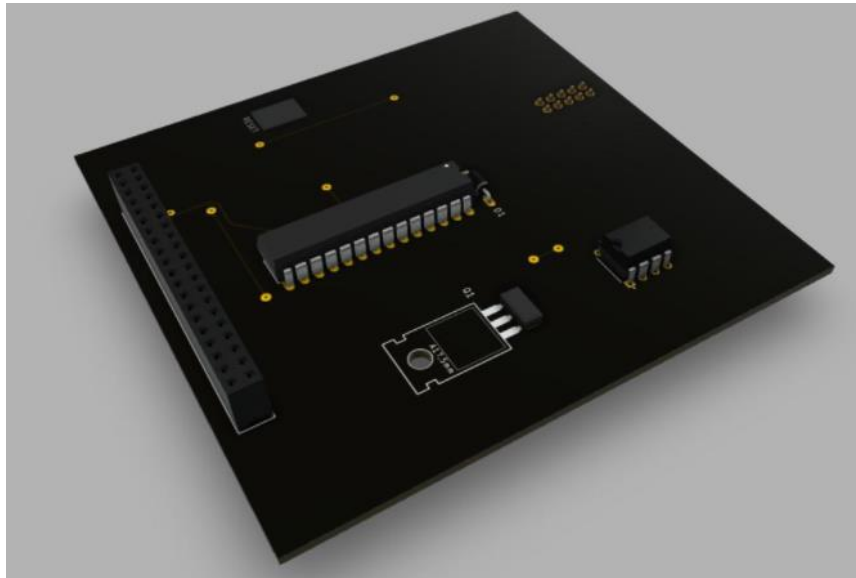


Ilustración 31. Diseño del PCB final del transceptor óptico.

Se muestra la placa de circuito impreso de la versión final del transceptor óptico.

La placa OPTXR del láser y la foto diodo se muestra a continuación.

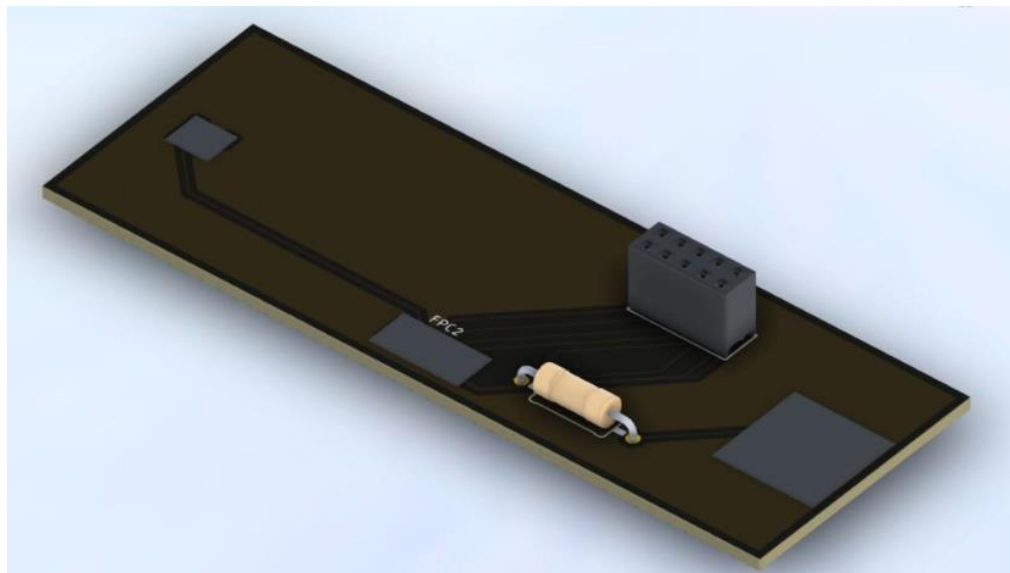


Ilustración 32. Diseño 3D de la PCB del láser y fotodiodo.

Se muestra la versión final de la placa para el láser y el fotodiodo.

Para la etapa de pruebas de esta versión el microcontrolador tiene configurados los dos periféricos de comunicación serial, dos puertos de propósito general configurados como salidas para los LED's indicadores.

Se hace la aclaración que las pruebas efectuadas, fueron con el circuito conectado en una protoboard, ya que la PCB final se encuentra en proceso de manufactura. Las pruebas se llevaron a cabo en interior (casa) y en exterior (azotea), ilustración 33, tenían la finalidad de comprobar el correcto funcionamiento del conmutador láser. En estas pruebas se observó como el valor de la ganancia del TIA cambia debido el cambio de la corriente oscura del fotodiodo, producto de radiación luminosa en el exterior y en el interior. Se probó establecer el enlace con el láser verde y con el láser rojo, obteniendo un alcance máximo de 16 m, a una tasa de baudios de 9600.

En el receptor se pudo observar un buen nivel de voltaje a la salida del TIA.



Ilustración 33. Prueba de exterior, láser verde.

Se muestra al prototipo final montado en una protoboard en pruebas en exterior, alcance máximo 16 metros.

Las siguientes imágenes muestra el circuito conmutador en etapa de pruebas.

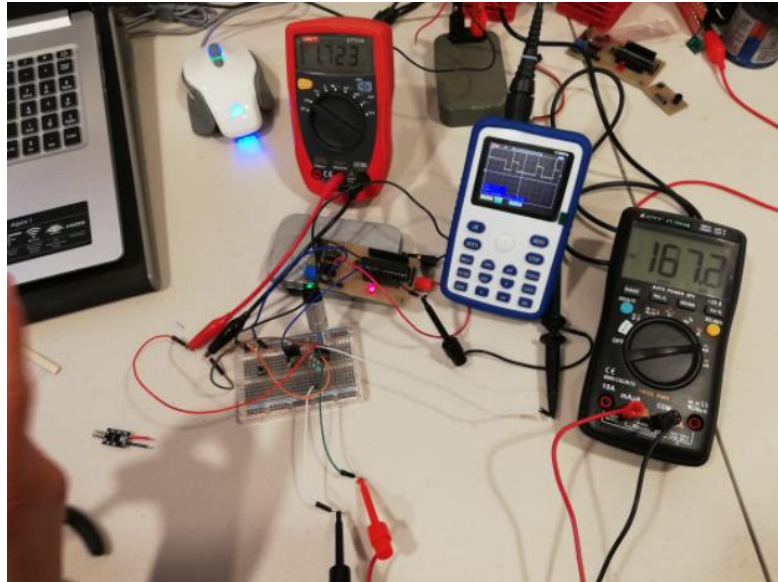


Ilustración 34. Circuito conmutador del láser.

Se muestra el circuito conmutador del láser en etapa de pruebas.

Para comprobar el buen funcionamiento del circuito conmutador, se conectó un osciloscopio a la salida del circuito conmutador, permitiendo visualizar la señal de salida para corroborar los niveles de voltaje adecuados para el láser, así como la frecuencia y estabilidad de la señal. Ilustración 34 y 35.

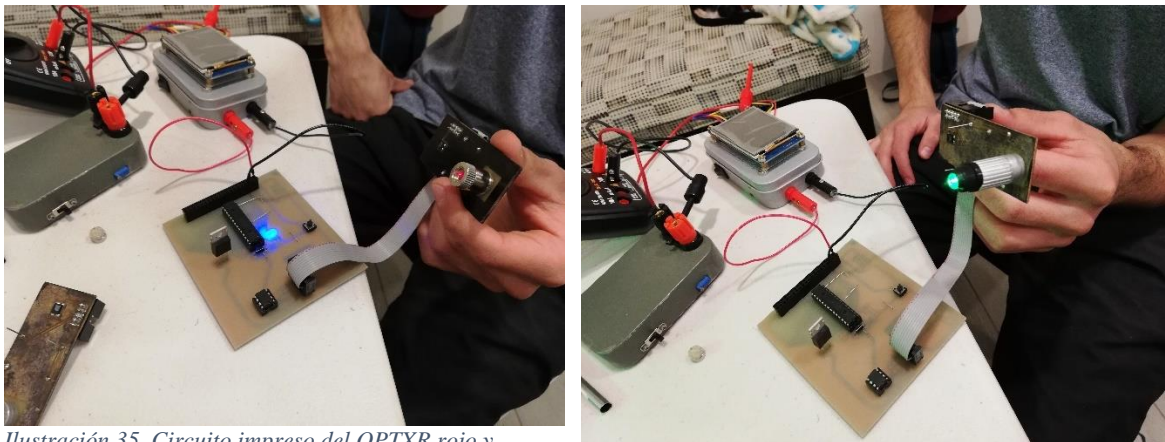


Ilustración 35. Circuito impreso del OPTXR rojo y verde.

Se muestra el circuito impreso de las versiones OPTXR para el láser rojo y verde.

3.4 Prototipo versión final 4.0

La PCB es considerada un componente del circuito electrónico, ya que provee de distintas características eléctricas y térmicas, dependiendo de su material de fabricación, al circuito

que en ella está montado. Es por lo que, para la versión final del prototipo, el trabajo práctico se orientó a mejorar la fabricación de este prototipo. Dotando a la versión 3.0 de un acabado más profesional en el tema de manufactura, así como, reducir los posibles daños que se presentan en las PCB artesanales de forma natural o por el desgaste provocado por las pruebas o cambio de componentes.

Esta versión 4.0 será la destinada a estar montada en una estructura de un CubeSat, con la finalidad como se dijo anteriormente de reducir considerablemente los errores de apuntamiento. Su diseño está fabricado en 2 caras, cuenta con las misma etapas y características que la versión anterior, una etapa de control, el amplificador de transimpedancia, el circuito de conmutación del láser y el circuito regulador de voltaje. De la misma manera, se tomó de referencia el estándar PC104, buscando el mayor acercamiento a las consideraciones de diseño que esto implica. Se monto en una estructura de un CubeSat de 1U, donde el subsistema de potencia está siendo representado por una batería recargable, ofreciendo una salida de 5V 10000mA. A continuación, se muestra el transceptor versión 4.0 y la PCB del OPTXR, ilustraciones 36 y 37.

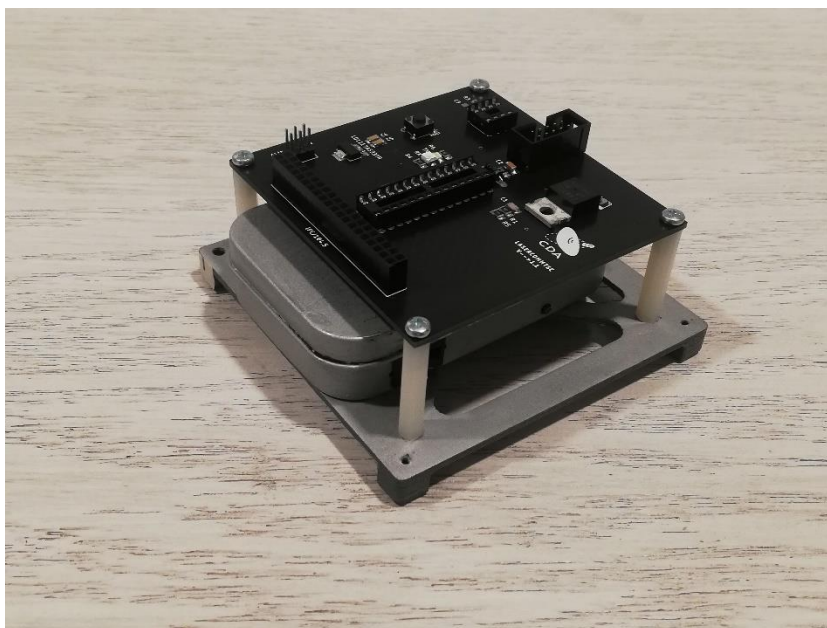


Ilustración 36. Proceso de montaje del transceptor en su versión final.

Se muestra el circuito transceptor en su versión final.



Ilustración 37. PCB del circuito OPTXR.



Se muestra el circuito de la OPTXR el cual está destinado para realizar la conexión de los dispositivos ópticos.

La principal finalidad de la PCB OPTXR es montar los componentes que tiene características ópticas, y permitir realizar cambios en estos prototipos sin la necesidad de modificar el circuito transceptor.

Para detallar la fase de pruebas de esta versión final del prototipo, es necesario recordar el funcionamiento del protocolo de comunicación UART y que no se empleó ningún tipo de modulación para enviar la señal. De esta forma, se puede concluir que la tasa de escritura de símbolos (baudios) es la misma que la tasa de transferencia de bits.

La prueba a la que fue sometido esta versión final (ilustración 38) del prototipo consistía en hacer variar la tasa de bits a diferentes magnitudes desde la configuración del dispositivo en el software MPLAB X®, y observar si existían cambios en la longitud del enlace efectivo. De las pruebas efectuadas, se tuvieron los siguientes resultados, véase la ilustración 39.



Ilustración 38. Ensamblado final del prototipo de pruebas.



Se muestra el acabado final del prototipo de pruebas.

La siguiente tabla resume los resultados de las pruebas de mayor interés en las versiones de los prototipos. Se puede observar que todos los prototipos cumplieron con establecer un enlace correcto, a su vez que ninguno cumplió con el estándar IPC104, sin embargo, tomarlo de guía de diseño, dio como resultado un prototipo de pruebas totalmente funcional y en condiciones ideales para su aprovechamiento en la evolución de este proyecto de investigación.

Tabla 4 Resumen de resultados.

<i>Prototipo</i>	Canal del Enlace	Estándar IPC104 (8 bits)	Tasa de transferencia de bits	Longitud del enlace
<i>Versión 1.0</i>	Sí	No	9600	30 cm
<i>Versión 2.0, 2.1, 2.2.</i>	Sí	No	9600	30 cm
<i>Versión 3.0</i>	Sí	No	9600	16 m
<i>Versión Final</i>	Sí	No	Variable	150 m

Si (Cumplió con lo establecido en su prueba de funcionamiento).

No (No cumple con su prueba).

La siguiente gráfica muestra la relación existente entre la tasa de transferencia de datos y el alcance obtenido en un enlace considerado correcto, donde se recibió el mensaje correctamente. Se realiza la comparación entre los dos láseres utilizados a lo largo del proyecto.

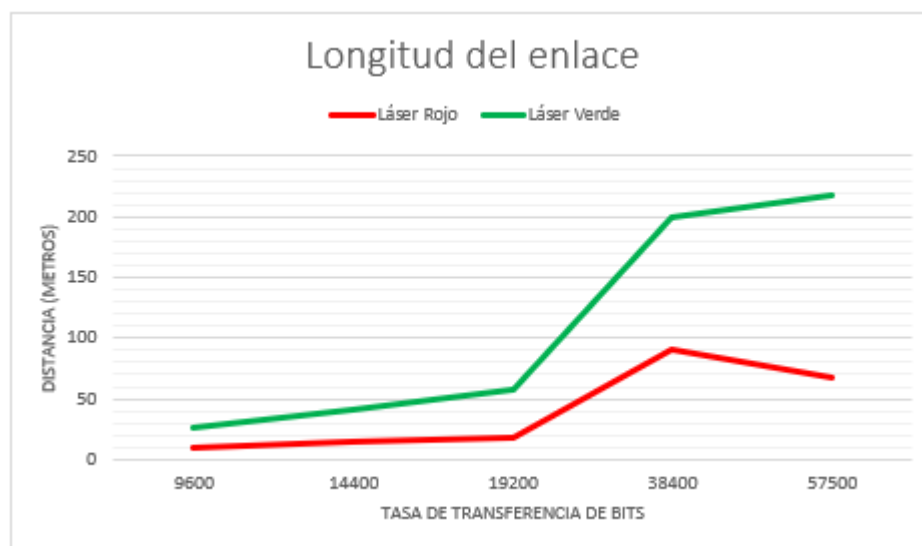


Ilustración 39. Gráfica comparativa Longitud del enlace vs tasa de bits.

La gráfica muestra la relación existente entre la tasa de transferencia de bits y el alcance logrado al establecer el enlace.

Por otra parte, el resumen financiero del costo total para la fabricación de este prototipo, considerando únicamente la versión 4.0, se muestra a continuación. De la misma forma se

realiza una comparación con materiales de mayor calidad, que podrían por sus características propias dotar de mejor rendimiento al prototipo.

Tabla 5 Comparación de precios de los componentes.

Componentes	Versión Bajo Costo		Versión Alto Costo	
	Matricula **	Precio	Matricula	Precio
Microcontrolador	PIC24FJ128GA202	\$ 75.00	PIC24FJ256GA702	\$142.00
Láser	Láser rojo	\$ 55.00	Láser OPV332	\$669.81
	Láser verde	\$ 250.00		
Fotodiodo	VEMD5060	\$ 41.00	BPX61	\$225.01
Amplificador	TL082C	\$ 8.00	ADA4622	\$26.00
Reguladores	LD117AS33TR	\$ 12.00	LD117AS33TR	\$12.00
Transistores	2N2222A	\$ 2.00	2N2222A	\$2.00
	IRF540N	\$ 16.00	IRF540N	\$16.00
Conectores	Flex	\$21.00	IPC104 Macho	\$160.00
	IPC104	\$13.00	IPC104 Hembra	\$158.99
Total		\$ 986.00		\$2823.62

Fuente propia. ** Los precios de los componentes son unitarios, pero el total considera los materiales x2. (MXN).

3.4 Trabajos futuros

Tras concluir con la fase de análisis de resultados, se pudieron observar ciertas mejoras en este prototipo. Una de ellas es que este transceptor no está empleando ningún tipo de modulación, esto se traduce a una limitación directa en la tasa de transferencia de datos. Por lo que, una posible mejora, es hacer uso del modulador de señal digital DSM (del inglés *Digital Signal Modulator*) el cual está integrado en el propio microcontrolador, permitiendo hacer uso de una modulación en la información a transmitir, escalando de esta forma la tasa de transferencia de datos.

De la misma forma que modular la señal, otra forma de escalar rápidamente la tasa de transferencia de bits es implementando un tipo de codificación de fuente, un ejemplo de esto puede ser la implementación de codificación Huffman en el código del microcontrolador, esto permitirá enviar información con el menor número de bits posibles.

En la parte mecánica, un problema frecuente en las comunicaciones ópticas es el tema del apuntamiento. Por lo que, implementar un sistema de apuntamiento efectivo, se traduciría en mejor funcionamiento del prototipo. De igual forma, hacer uso de una etapa opto mecánica con lentes para colimar el haz de láser, proporcionaría una mejora en la recepción del haz.

Finalmente, una mejorar significativa, pero que implica un mayor costo, es hacer uso componentes con mejores características que los empleados, por ejemplo, haciendo una implementación de un transceptor con FPGA.

Conclusiones

Producto del análisis de los resultados obtenidos, se puede mencionar que el prototipo de pruebas es totalmente funcional, esto debido a que al establecer un canal de comunicación efectivo se consideró como una misión exitosa. De la misma forma se observó que para este sistema que emplea la codificación proveniente del protocolo de comunicación UART, la detección del mensaje no depende totalmente de la coherencia del láser, si no que, existe una estrecha relación entre la coherencia y la intensidad lumínica necesaria para que el fotodiodo detecte la señal.

Como se mencionó anteriormente, este proyecto de investigación está enfocado en el desarrollo de un prototipo de pruebas o también llamado modelo de ingeniería, el cual consiste en que dicho prototipo se funcional y fácilmente adaptable. Es por lo que todo el proceso de diseño y elección de componentes estuvo basado bajo esta premisa. El transceptor está construido para que se tenga acceso a todos los puertos del microcontrolador, a través del conector que simula el puerto IPC104, así como los componentes ópticos que pueden ser fácilmente sustituidos para establecer nuevos parámetros de alcance. De esta forma permite a generaciones presentes y futuras utilizar este prototipo para realizar estudios, o diseñar sus propios experimentos que hagan uso comunicaciones láser.

La demanda del espectro electromagnético es una realidad, hoy en día existen más de 12000 CubeSat orbitando el planeta, para distintas tareas. Por lo que, el desarrollo de tecnología óptica para la transmisión de información es más que una necesidad. Múltiples instituciones tan públicas como privadas están invirtiendo en estos momentos en investigación y desarrollo de proyectos que contribuyan al estudio de las comunicaciones láser. En esta ocasión el Centro de Desarrollo Aeroespacial del Instituto Politécnico Nacional, me brindó la oportunidad de contribuir con este proyecto de investigación, poniendo a prueba todas mis capacidades y proporcionando una oportunidad para contribuir con mi trabajo a que nuevas generaciones se interesen en el área aeroespacial abordada desde la especialidad de electrónica.

Finalmente me entusiasma compartir con los lectores, que el desarrollo de este prototipo ha sido un éxito.

Referencias

- [1] I. Medina, J. J. Hernández-Gómez, C. R. Torres-San Miguel, C. Couder-Castañeda, M. G. Orozco-Del-Castillo, and J. I. Grageda-Arellano, “Artificial vision assisted ground fine pointing system for experimental optical link for CubeSat communications,” *J. Phys*, p. 12063, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1221/1/012063.
- [2] K. Riesing, “Development of a Pointing, Acquisition, and Tracking System for a Nanosatellite Laser Communications Module,” p. 127, 2015.
- [3] CubeSat Launch Initiative Nasa, “CubeSat 101: Basic Concepts and Processes for First-Time CubeSat Developers,” p. 96, 2019, Accessed: Apr. 04, 2021. [Online]. Available:
https://www.nasa.gov/sites/default/files/atoms/files/nasa_csli_cubesat_101_508.pdf.
- [4] P.-S. (Cal P. Dr. Jordi, “Poly Picosatellite Orbital Deployer Mk. III Rev. E User Guide.” Cal Poly, [Online]. Available:
https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/5806854d6b8f5b8eb57b83bd/1476822350599/P-POD_MkIIIRevE_UserGuide_CP-PPODUG-1.0-1_Rev1.pdf.
- [5] S. Mosteshar, *Small satellites and their regulation*, vol. 30, no. 4. 2014.
- [6] “IPC-A-610E SP.”
- [7] “PC/104 Specification Version 2.6 PC/104 Embedded Consortium PC/104 Specification Version 2.6,” 2008. Accessed: May 13, 2021. [Online]. Available:
www.pc104.org.
- [8] M. M. Laura Valentina and C. P. Karen Ximena, “Sistema de Comunicaciones para un CubeSat de Análisis de Imágenes Climatológicas,” Universidad Católica de Colombia, 2020.
- [9] L. Pablo, I. Olmedo Fernando, and I. Fernandez Edgardo, “Análisis y simulación del comportamiento térmico del sistema integrado, estructura y componentes electrónicos

del prototipo del nanosatélite Cubesat.”

- [10] I. Medina, J. J. Hernández-Gómez, C. T. S. Miguel, C. Couder-Castañeda, M. G. Orozco-Del-Castillo, and J. I. Grageda-Arellano, “Artificial vision assisted ground fine pointing system for experimental optical link for CubeSat communications,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1221, no. 1, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1221/1/012063.
- [11] T. S. Rose *et al.*, “Optical communications downlink from a 1.5U Cubesat: OCSD program,” in *International Conference on Space Optics — ICSO 2018*, Jul. 2019, vol. 11180, p. 18, doi: 10.1117/12.2535938.
- [12] “Optical Communications and Sensor Demonstration (OCSD) - Technologies for Proximity Operations & Data Transmission.” Accessed: Apr. 19, 2021. [Online]. Available: <http://www.nasa.gov/smallsats>.
- [13] K. Alemayehu Adde and L. Rezene Elias, “Finite Element Analysis of 3U CubeSat Structure,” *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 9, no. 6, 2018, Accessed: Apr. 04, 2021. [Online]. Available: <http://www.ijser.org>.
- [14] A. G. Alkholidi and K. S. Altowij, “Free Space Optical Communications — Theory and Practices,” in *Contemporary Issues in Wireless Communications*, InTech, 2014.
- [15] T. Nguyen and T. Nguyen, “Laser Beacon Tracking for Free-space Optical Communication on Small-Satellite Platforms in Low-Earth Orbit,” 2015.

Apéndice A

Cálculos matemáticos.

En este apartado, se encuentra el análisis teórico al que fueron sometidas las propuestas de los circuitos previo a su simulación y diseño, buscando una base fundamenta en los cálculos matemáticos para su respaldo.

Etapa de potencia

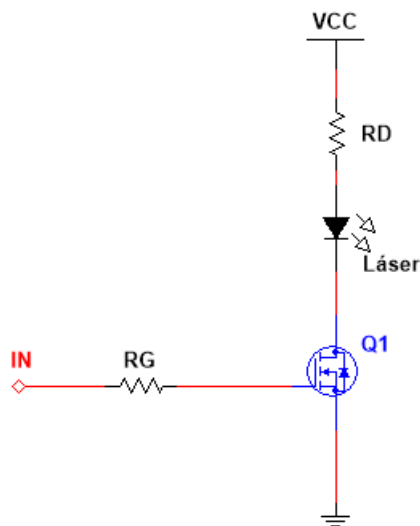


Ilustración 40. Etapa de potencia para la comunicación del láser.

Se muestra el circuito de conmutación para diodo láser, del cual se realizará el análisis matemático.

Para asegurar la conmutación del dispositivo, es necesario analizar su comportamiento en los estados de interés para la finalidad de esta etapa. Analizando el dispositivo en la región de corte ilustración 23, se debe cumplir con las condiciones de la ecuación 1.

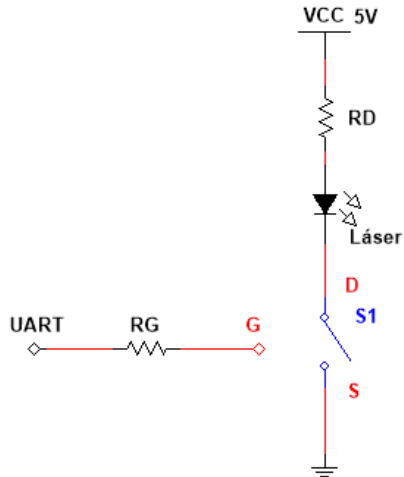


Ilustración 41. Circuito equivalente para la región de corte del transistor MOSFET.

El transistor MOSFET se comporta como un switch abierto cuando se encuentra en la región de corte.

Cuando en la compuerta del transistor existe un nivel bajo proveniente del UART del microcontrolador y considerando las especificaciones del fabricante para transistor, un $V_{Gsth} = 2 - 4 V$. La ecuación queda de la siguiente forma. Considerando un $V_{Gsth Typ} = 3V$.

$$0 V \leq 3 V \quad \text{con } I_D = 0$$

Se concluye que el cumplimiento de las ecuaciones es satisfactorio, reflejándose en la correcta operación en la región de corte, del transistor.

Para el análisis del transistor en la región de saturación se le debe dar cumplimiento a las ecuaciones 2, ilustración 25.

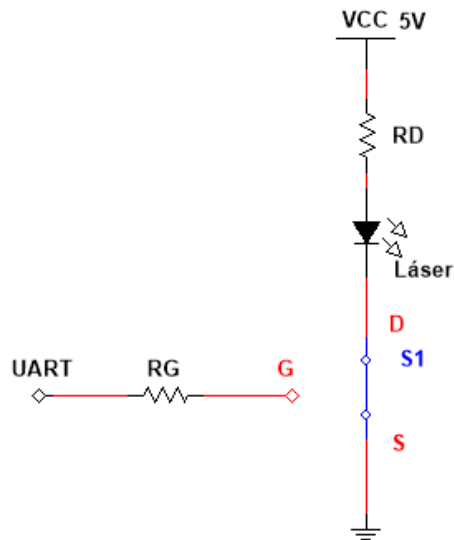


Ilustración 42. Circuito equivalente para la región de saturación.

Se muestra el circuito equivalente del transistor MOSFET, en la región de saturación, se comporta como un switch cerrado.

Tomando en consideración las especificaciones del fabricante para el transistor y el nivel del UART se encuentre en alto.

$$3.3 V > 3V \quad V_{DS} \geq (3.3 V - 3V)$$

La diferencia existente entre el voltaje de compuerta fuente y el voltaje de umbral es de $0.3 V$, de modo que el voltaje entre el drenador y la fuente supera fácilmente esa diferencia. Esto se puede entender como el correcto funcionamiento del dispositivo en su región de saturación.

Para el cálculo de la resistencia del drenador, partimos de las especificaciones eléctricas que requiere el láser. Con un voltaje de operación de $3.7 V$ y una potencia de operación $300mW$.

Se calcula la corriente necesaria del láser. La cual deberá ser igual a la corriente del drenador para su correcto funcionamiento.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{300mW}{3.7 V} = 81mA$$

Conociendo la corriente de drenador y considerando la resistencia interna del transistor $44m\Omega$, se puede realizar el cálculo de la resistencia de drenador, para tener un voltaje de operación de 3.7 para el láser.

$$\begin{aligned} V_{cc} - V_{RD} - V_{láser} - V_{DS} &= 0 \\ V_{cc} - I_D R_D - V_{láser} - I_D R_{DS(on)} &= 0 \end{aligned}$$

Despejando la resistencia del drenador.

$$\begin{aligned} R_D &= \frac{-V_{láser} + V_{cc}}{I_D} - R_{DS(on)} \\ R_D &= \frac{-3.7 V + 5 V}{81 mA} - 44m\Omega = 16.0053 \Omega \approx 16\Omega \end{aligned}$$

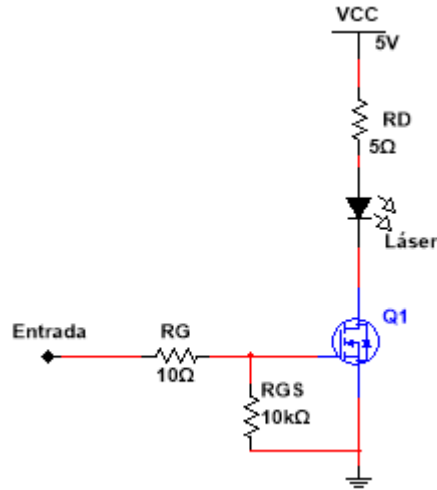


Ilustración 43. Circuito propuesto para la etapa de potencia del láser.

Se muestra la etapa de potencia del láser.

Amplificador de transimpedancia

El amplificador se encuentra en configuración inversora de lazo cerrado con la resistencia de realimentación R_F . La corriente de entrada representa la corriente suministrada por el fotodiodo que necesita ser convertida. Observe la ilustración 27.

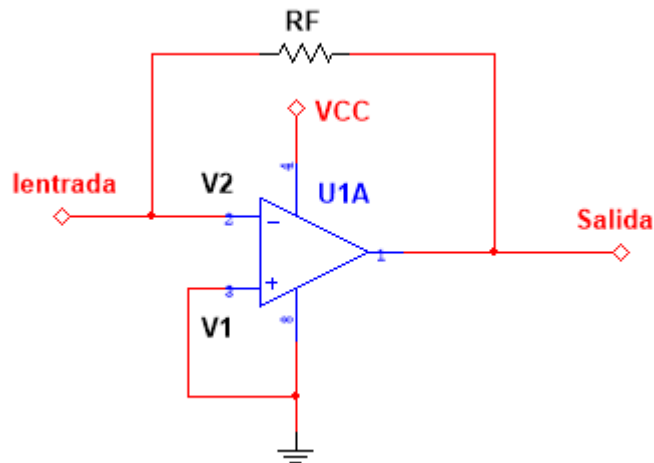


Ilustración 44. Amplificador de Transimpedancia.

Se muestra la configuración del amplificador de transimpedancia, denotando su entrada y salida.

Teóricamente el amplificador operacional tiene una impedancia de entrada infinita, por lo que, al tener la entrada no inversora del amplificador conectada a tierra, se puede asumir que el voltaje en la terminal no inversora $V_1 = 0$, esto implica que el voltaje $V_1 = V_2$.

Realizando el análisis del circuito, se obtiene la siguiente ecuación.

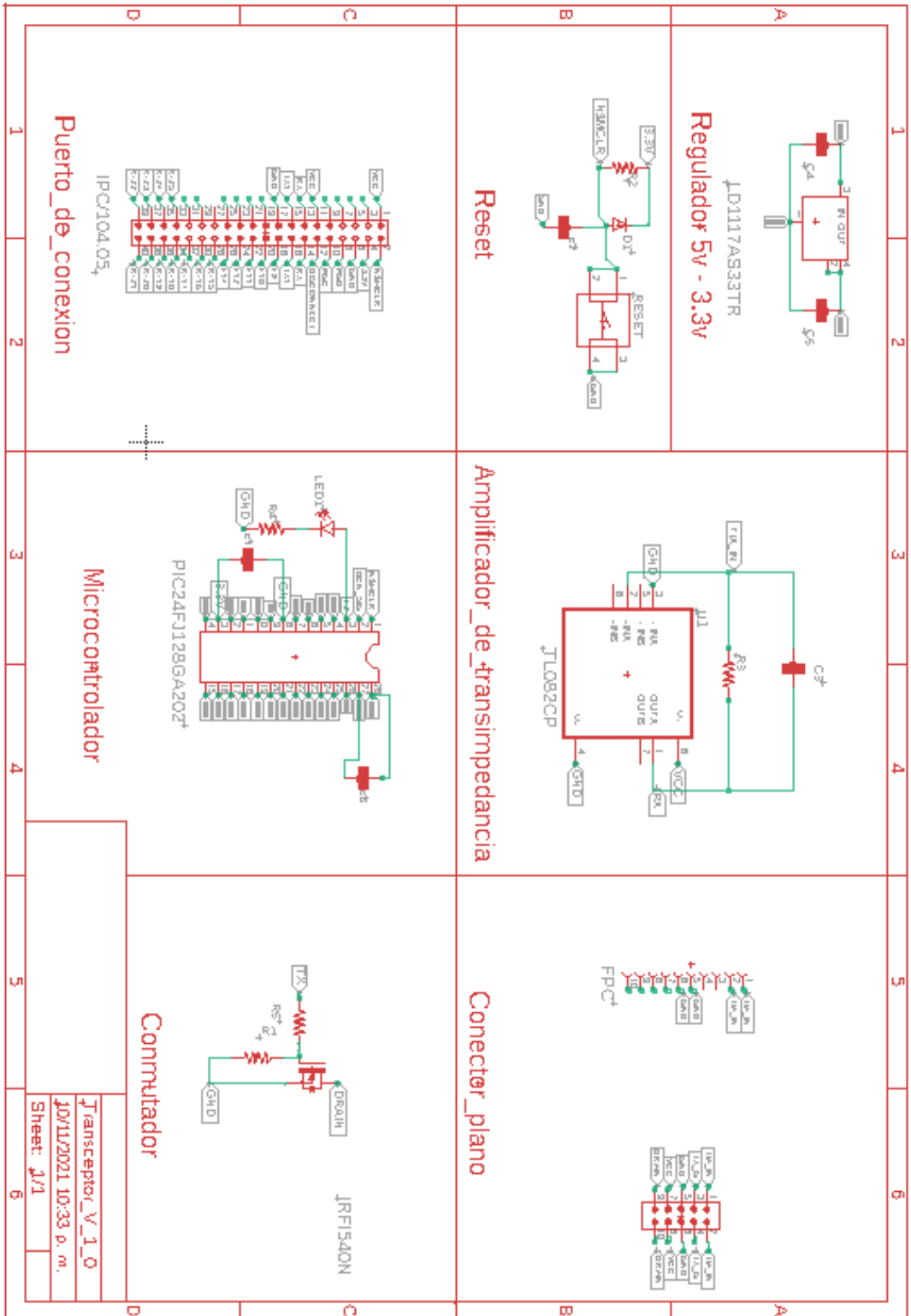
$$V_{out} = -I_{entrada}R_F \quad \text{Ec. (3)}$$

Despejamos R_F para calcularla y proponemos un voltaje de salida de $3.3 V$, para la correcta interpretación por el PIC24. La corriente de entrada estará definida por el valor medido en la caracterización del fotodiodo al incidir el haz láser sobre su superficie. El fotodiodo genera una corriente oscura, correspondiente a la corriente producida por la radiación lumínica natural.

$$R_F = \frac{V_{out}}{I_{entrada} - I_{oscura}} = \frac{3.3 V}{3mA - 20\mu A} = 1,107.3828 \Omega$$

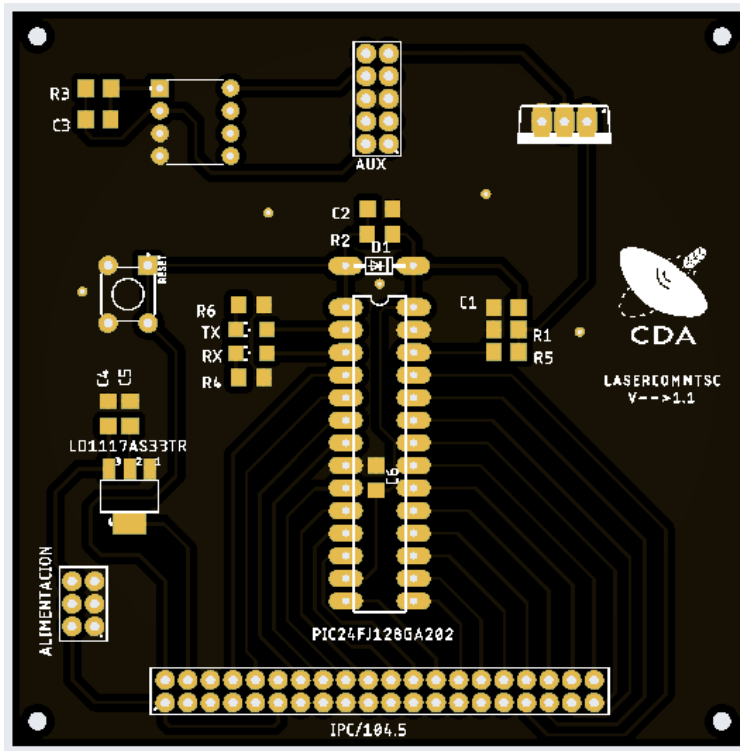
Apéndice B

Diagrama esquemático

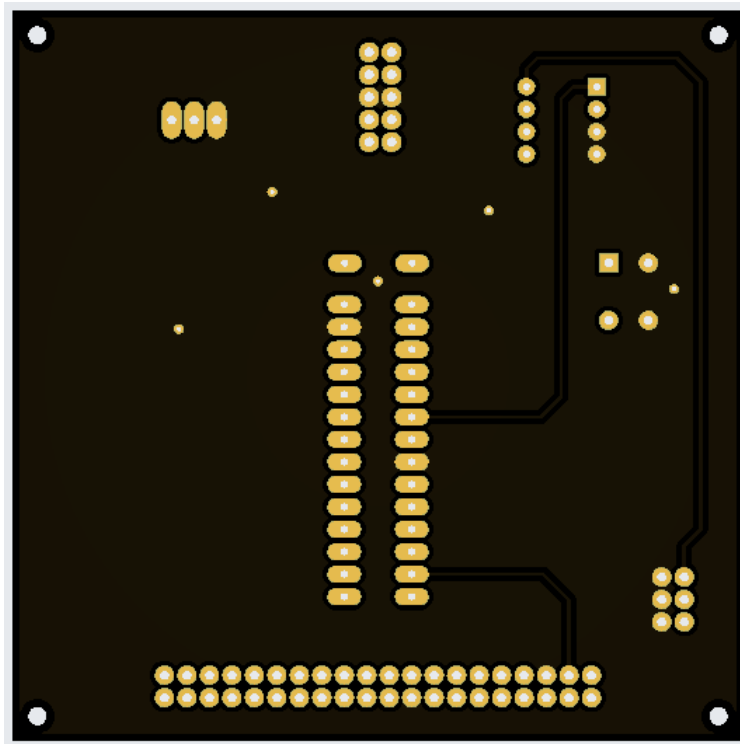


Diseño de la PCB

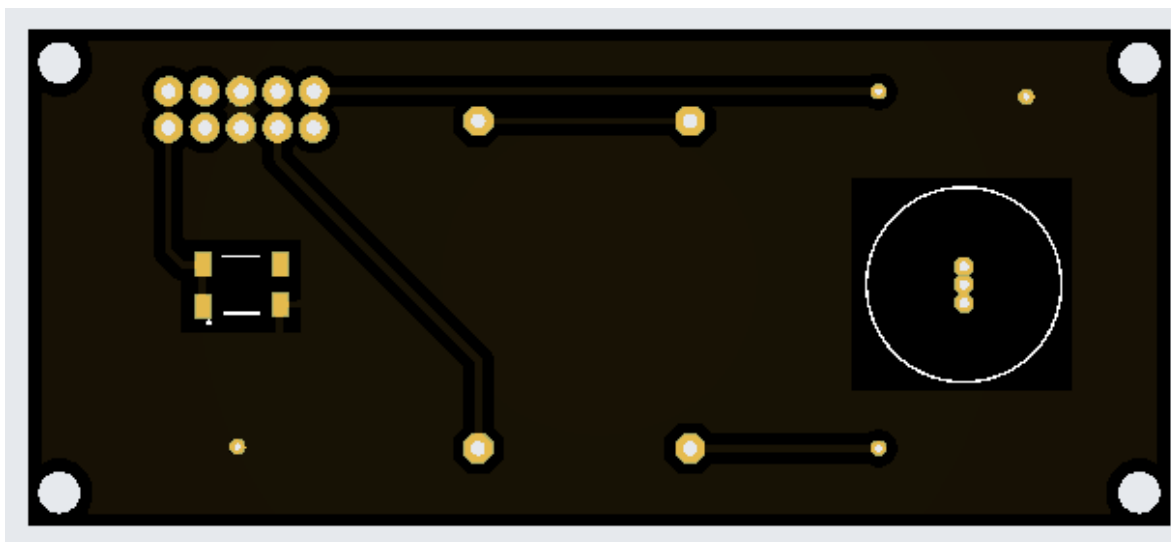
Para la vista superior del transceptor.



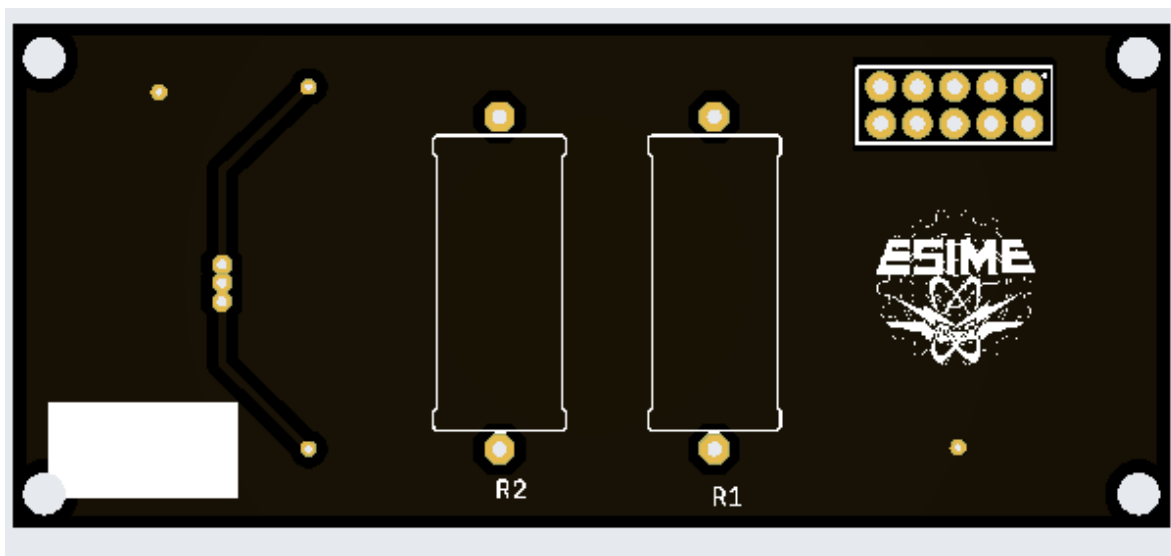
La vista inferior del transceptor.



Para la vista superior del OPTXR.



La vista inferior del OPTXR.



Apéndice C

Código del microcontrolador.

```
45  /**
46  * *****INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL*****
47  * ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA *
48  *          UNIDAD ADOLFO LÓPEZ MATEOS
49  * ESPECIALIDAD DE ELECTRÓNICA
50  * TÍTULO: PROGRAMA TRANSCPTOR
51  * VERSIÓN: FINAL
52  * DESCRIPCIÓN: REALIZA LA RUTINA DE ENLACE DEL TRANSCPTOR, ENVIA 3 MENSAJES
53  * DISTINTOS, CUANDO LOS BOTONES EN LA PANTALLA NEXTIÓN SON PRESIONADOS.
54  * ASI COMO EL CONTROL DE LOS LEDS INDICADORES PARA TRANSMISIÓN (AZUL)
55  * RECEPCIÓN (ROJO).
56  * FECHA: 10/11/2021
57  */
58  #include "mcc_generated_files/system.h"
59  #include "mcc_generated_files/mcc.h"
60  #include <libpic30.h>
61
62  /*
63  APLICACIÓN PRINCIPAL
64  */
65  int main(void)
66  {
67      // INICIALIZACIÓN DEL DISPOSITIVO
68      SYSTEM_Initialize();
69      Led_BlinkA();
70      Led_BlinkR();
71      __delay_ms(500);
```

```

73     while (1)
74     {
75
76         if (UART1_Read()==0x41) //LECTURA DEL UART ESPERANDO EL DATO ENVIADO POR EL PRIMER BOTON
77         {
78             printf("t0.txt=%c%c%c%c%c", 0x22, 0x49, 0x50, 0x4E, 0x22); //IMPRIME IPN
79             UARTW();
80             Led_BlinkA();//ENCIENDE EL LED AZUL DE TX
81         }
82         else if (UART1_Read()==0x42) //LECTURA DEL UART ESPERANDO EL DATO ENVIADO POR EL SEGUNDO BOTON
83         {
84             printf("t0.txt=%c%c%c%c%c", 0x22, 0x43, 0x44, 0x41, 0x22); //IMPRIME CDA
85             UARTW();
86             Led_BlinkA();//ENCIENDE EL LED AZUL DE TX
87         }
88
89         else if (UART1_Read()==0x58) //LECTURA DEL UART ESPERANDO EL DATO ENVIADO POR EL TERCER BOTON
90         {
91             printf("t0.txt=%c%c%c%c%c%c%c", 0x22, 0x45, 0x55, 0x52, 0x45, 0x4B, 0x41, 0x22); //IMPRIME EUREKA
92             UARTW();
93             Led_BlinkA();//ENCIENDE EL LED AZUL DE TX
94
95         }
96         else
97         {
98             Led_BlinkR();//ENCIENDE EL LED ROJO DE RX
99         }
100     }
101
102
103
104
105

```

```

106     return 1;
107
108 }
109
110 void UARTW()//DEFINE EL FIN DE LA ESCRITURA DEL UART
111 {
112     UART1_Write(0xFF);
113     UART1_Write(0xFF);
114     UART1_Write(0xFF);
115 }
116
117 void Led_BlinkA()//ENCIENDE EL LED AZUL
118 {
119     LEDAZUL_SetHigh();
120     __delay_ms(500);
121     LEDAZUL_SetLow();
122 }
123 void Led_BlinkR() //ENCIENDE EL LED ROJO
124 {
125     LEDROJO_SetHigh();
126     __delay_ms(500);
127     LEDROJO_SetLow();
128 }
129
130 /**
131  *FIN DEL PROGRAMA
132  */

```