



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Informática

Desarrollo e Implementación de un Sub-Sistema de
Comunicaciones para un Nanosatélite Universitario Tipo TubeSat

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de
Licenciado de ingeniería en computación

Presenta:
Saúl Zamora Hernández

Dirigido por:
Dr. José Alberto Ramírez Aguilar

Querétaro, Qro. Noviembre, 2021
México



Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Informática
Licenciatura en Ingeniería en computación

Desarrollo e Implementación de un Sub-Sistema de Comunicaciones para un Nanosatélite Universitario Tipo TubeSat

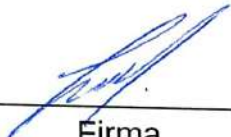
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el grado de **Licenciado de ingeniería en computación**

Presenta:
Saúl Zamora Hernández

Dirigido por:
Dr. José Alberto Ramírez Aguilar

Dr. José Alberto Ramírez Aguilar
Presidente


Firma

M.S.I. Dulce Carolina Sánchez Hernández
Secretario


Firma

Dra. Gabriela Xicotencatl Ramírez
Vocal


Firma

Dra. María Teresa García Ramírez
Suplente


Firma

M. en C. Julio Alejandro Romero González
Suplente


Firma

Centro Universitario, Querétaro, Qro.
Noviembre, 2021 México

Resumen

La comunicación es uno de los factores más importantes de cualquier misión espacial, ya que gracias a esto se puede tener contacto con el objeto que se encuentra en órbita. En México actualmente se encuentra una tendencia de incursionar una vez más en el ámbito espacial principalmente impulsado por las universidades, sin embargo la mayor parte de las opciones que se encuentran para subsistemas de comunicaciones para nanosatélites son componentes comerciales con precios elevados. El objetivo de ésta tesis es hacer un estudio de los requerimientos de un sistema espacial para establecer comunicación con un satélite así como brindar herramientas como son bibliotecas de software y referencia de hardware a otros estudiantes que deseen adentrarse a ésta rama de las ciencias de la computación y telecomunicaciones. El diseño del subsistema fue elaborado siguiendo normas IPC para diseño de PCB con recomendaciones especiales para tarjetas de grado espacial, mientras que la programación se guió para el funcionamiento con formatos de transmisión utilizados en radio amateur; AX.25 y CW. Las pruebas que se realizaron al software presentaron un porcentaje de error inferior al $0.8E-3$ mientras que al hardware se le realizaron pruebas de acoplamiento de impedancia en la línea de transmisión.

Palabras clave: Subsistemas de comunicaciones, nanosatélites, AX.25, CW, PCB

Abstract

Communication is one of the most important factors of any space mission, since thanks to this it is possible to have contact with the object that is in orbit. In Mexico, there is currently a trend to venture once again into the space field mainly driven by universities; however, most of the options found for communications subsystems for nanosatellites are commercial components with high prices. The objective of this thesis is to study the requirements of a space system to establish a communication link with a satellite, as well as to provide tools such as software libraries and hardware reference to other students who wish to enter this branch of computer science and telecommunications. The subsystem design was developed following IPC standards for PCB design with special recommendations for space grade boards, while the programming was guided for operation with transmission formats used in amateur radio; AX.25, CW. The tests that were performed on the software presented an error percentage lower than $0.8E-3$ while the hardware was tested for impedance matching on the transmission line.

Keywords: Communications subsystems, nanosatellites, AX.25, CW, PCB

Dedicatoria

A mis padres y mi hermano por todo el apoyo que siempre me han brindado y permitirme llegar hasta donde estoy ahora

Agradecimientos

A mi Madre Martina Hernández Morales
A mi Padre Ernesto Zamora Dorantes
A mi Hermano Mauricio Zamora Hernández

A la UAQ
A la facultad de informática

A mis profesores de carrera
A la Dra. María Teresa García Ramírez
A la M.S.I. Dulce Carolina Sánchez Hernández
Al Dr. Manuel Delgado Rosas
A mi asesor de tesis Dr. Alberto Ramírez Aguilar
A mi tutora y directora de la Facultad de Informática Dra. Gabriela Xicoténcatl Ramírez
A mis amigos que me apoyaron en todo el proceso de la realización de este trabajo
A Alexandra Elbakyan

Índice General

Resumen.....	2
Abstract.....	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimientos.....	5
Lista de Tablas.....	8
Lista de Figuras.....	9
Introducción.....	12
Proyecto KuauhtliSat	12
Subsistemas A Bordo	13
OBC	13
Telemetría	13
Comunicaciones	13
Potencia	14
Estructura	14
Carga Útil	14
Sub-Sistema De Comunicaciones	15
Planteamiento Del Problema	16
Justificación	16
Objetivos De La Tesis	16
Antecedentes.....	18
Plataformas nano-satelitales	18
TubeSat	27
Fundamentos De Enlace De Radio Para Transmisión Espacio-Tierra	29
Orbitas	32
Órbita LEO	32
Consideraciones legales	34
Componentes Típicos Del Subsistema De Comunicaciones	36
Operaciones Típicas Del Subsistema De Comunicaciones	43
Protocolo de transmisión de datos AX.25	50
Bit Error Rate para transmisión con AX.25	51
Estructura	52

Otras Consideraciones	62
Metodología De Desarrollo De Sistemas Espaciales	63
Los Procedimientos Técnicos Comunes En Ingeniería De Sistemas NASA	64
Metodología De Desarrollo De Placas PCB Para Uso Espacial	68
Consideraciones Para Lograr Integridad En La Señal	69
Consideraciones Para Lograr Integridad En La Potencia	69
Consideraciones Para Lograr Compatibilidad Electromagnética	70
Consideraciones Para Manejo De Disipación Térmica	70
Consideraciones Para Diseño De PCB De Radio Frecuencia	70
Metodología.....	71
Pre formulación	71
Estudio de concepto para la misión de KuauhtliSat: el Ulises II	71
Estudio de concepto para el subsistema de comunicaciones	74
Formulación	75
Desarrollo de concepto y tecnología	75
Concepto De Operación.	76
Diseño preliminar y terminación de tecnologías	78
Actualización De Diseño	90
Diseño De Software Para Codificación AX.25	94
Consideraciones Para Transmisión De CW Y Temporización De Símbolos	97
Diseño De Software Para Beacon	98
Diseño De Software Para Codificación De Housekeeping	110
Pruebas De Transmisión Y Ajustes En El Sistema	117
Resultados.....	129
Conclusiones.....	135
Productos	136
Trabajo A Futuro	136
Bibliografía.....	137
Anexos.....	140
Anexo A: Código Morse	140

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Abreviaturas y Acrónimos</i>	11
Tabla 2 <i>Clasificación de satélites por su masa en Kg</i>	18
Tabla 3 <i>División de Canales por Servicio en la Banda de Ultra Alta Frecuencia</i>	35
Tabla 4 <i>Ejemplos y Características de Rransceptores Utilizados en Nano-satélites</i>	38
Tabla 5 <i>Típos de Antenas mas Utilizadas en Nanosatélites y sus Características</i>	42
Tabla 6 <i>Lista de Nanosatélites Actívos que Hacen uso de Señal de Baliza CW</i>	46
Tabla 7 <i>Lista de Nanosatélites Actívos que Hacen uso de Señal de Baliza Diferente a CW</i>	47
Tabla 8 <i>Lista de Modulaciones Digitales y Algunas Características</i>	50
Tabla 9 <i>Construcción de Tramas de Servicio (S) y sin Numerar (U)</i>	53
Tabla 10 <i>Construcción de Tramas de Información (I)</i>	54
Tabla 11 <i>Campo de Direcciones sin Repetidores</i>	55
Tabla 12 <i>Ejemplo de Cabeceras de Trama sin Repetidores</i>	55
Tabla 13 <i>Estructura de Campo A7, Octeto de SSID, Subcampo de Dirección de Destino</i>	57
Tabla 14 <i>Estructura de Campo de Control Para Tramas Modulo 8</i>	57
Tabla 15 <i>Estructura de Campo de Control Para Tramas Modulo 128</i>	57
Tabla 16 <i>Estructura de Campo de Control Para Tramas S Modulo 8</i>	58
Tabla 17 <i>Estructura de campo de control para tramas S modulo 128</i>	58
Tabla 18 <i>Estructura de Campo de Control Para Tramas U</i>	60
Tabla 19 <i>Formato de Bits de Identificador de Protocolo Para Tramas I y UI</i>	61
Tabla 20 <i>Tabla de Fases del Ciclo de Vida de un Proyecto Espacial</i>	66
Tabla 21 <i>Lista De Instrumentos de la Estación Terrena Para el Proyecto</i>	73
Tabla 22 <i>Tabla de Características Operativas del Radio Transceptor TR2M-436.50</i>	79
Tabla 23 <i>Características Operativas del Amplificador de Potencia AFS2-436</i>	80
Tabla 24 <i>Tabla de Características Operativas del Microcontrolador PIC18F27K42</i>	83
Tabla 25 <i>Tabla de Características Operativas del Radio Transceptor RFM23BP</i>	91
Tabla 26 <i>Tiempo de una Unidad en Morse Para Diferentes Velocidades de Transmisión</i>	98
Tabla 27 <i>Tabla de Frecuencia de Aparición de Letras en Palabras en Español</i>	99
Tabla 28 <i>Código Morse con Longitud en Bits Considerados por Caracter</i>	111
Tabla 29 <i>Equivalencia Elegida en Hexadecimal a Código Morse Para Housekeeping</i>	113

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Diagrama de Integración de Subsistemas en el Satélite N-S1</i>	15
Figura 2	<i>Número de satélites lanzados entre 2012-2019 a nivel mundial</i>	19
Figura 3	<i>Número de Satélites Pequeños Lanzados Entre 2012-2019 a nivel mundial</i>	20
Figura 4	<i>Proporción de Satélites Pequeños Lanzados Entre 2012-2019 a Nivel Mundial</i>	21
Figura 5	<i>Proporción de Satélites Divididos por su uso Lanzados Entre 2012-2019</i>	22
Figura 6	<i>Número de Nano-satelites Lanzados entre 1998-2021 a Nivel Mundial</i>	23
Figura 7	<i>Número de Nano-satelites Fabricados Entre 1998-2021</i>	24
Figura 8	<i>Configuraciones de Escalado de la Plataforma Nanosatelital CubeSat</i>	25
Figura 9	<i>Número de Nano-satelites por su Tipo Lanzados Entre 1998-2021</i>	26
Figura 10	<i>Proporción de Nano-satelites Fabricados por Tipo a Nivel Mundial</i>	27
Figura 11	<i>Unidades Satelitales Tubesat de Interorbital Systems</i>	28
Figura 12	<i>Desplegador Tu-Pod Desarrollado por GAUSS y TetonSys</i>	29
Figura 13	<i>Diagrama de Bloques de Comunicación TT&C con un Satélite</i>	30
Figura 14	<i>Ilustración de Altitudes de Orbitas y su Cobertura</i>	32
Figura 15	<i>Ilustración de Orbita LEO Polar</i>	33
Figura 16	<i>Ilustración de Constelación IRIDIUM</i>	34
Figura 17	<i>Número de Nano-satélites Lanzados por Bandas de Frecuencia en la que Operan</i> . 36	
Figura 18	<i>Esquema de Transmisión de un Sistema de Comunicaciones Utilizando AX.25</i>	40
Figura 19	<i>Volumen de Información Generada en una Misión Nanosatelital</i>	44
Figura 20	<i>Representación de las Formas de Onda de los Tipos de Modulación Principales</i>	49
Figura 21	<i>Formato ISO 3309 para FCS</i>	62
Figura 22	<i>Diagrama De Ciclo De Vida De Proyecto Formato NPR 7120.8</i>	65
Figura 23	<i>Esquemático General de los Subsistemas a Bordo</i>	72
Figura 24	<i>Esquemático General de la Estación Terrena que Controlará el Sistema</i>	74
Figura 25	<i>Requerimientos del Subsistema de Comunicaciones</i>	75
Figura 26	<i>Componentes Generales del Subsistema de Comunicaciones</i>	76
Figura 27	<i>Diagrama de Bloques Concepto de Operación</i>	78
Figura 28	<i>Fotografía del Transceptor de Radio Multibanda Radiometrix TR2M-436.50</i>	78
Figura 29	<i>Diagrama De Pines Del Radiotransmisor TR2M-436.50 Y Sus Medidas</i>	79
Figura 30	<i>Amplificador de Potencia de 500mw Radiometrix AFS2-436</i>	80
Figura 31	<i>Diagrama de Pines del Amplificador de Potencia AFS2-436</i>	81
Figura 32	<i>Primer Concepto de Implementación Usando Equipos de Radiometrix</i>	82
Figura 33	<i>Diagrama del Encapsulado de 28 Pines del Microcontrolador PIC18F27K42</i>	83
Figura 34	<i>Segundo Concepto de Implementación Usando Equipos de Radiometrix</i>	85
Figura 35	<i>Tercer Concepto de Implementación Usando Equipos de Radiometrix</i>	86
Figura 36	<i>Esquemático De Tarjeta PCB De Radios Usando Equipos De Radiometrix</i>	87
Figura 37	<i>Ruteo de PCB de Radios Usando Equipos de Radiometrix</i>	88
Figura 38	<i>Esquemático de Tarjeta PCB de Computadora de Comunicaciones</i>	89
Figura 39	<i>Ruteo de Tarjeta PCB de Computadora de Comunicaciones</i>	90
Figura 40	<i>Radiotransmisor RFM23BP</i>	91

Figura 41	<i>Diagrama de Bloques de Definición de Rediseño del Subsistema.....</i>	<i>93</i>
Figura 42	<i>Diagrama de Biblioteca Generación de Tramas AX.25.....</i>	<i>95</i>
Figura 43	<i>Diagrama de Flujo Principal del Programa Para Transmisión de Baliza.....</i>	<i>100</i>
Figura 44	<i>Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras A, B, C Y D en Morse.....</i>	<i>103</i>
Figura 45	<i>Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras E, F, G Y H en Morse.....</i>	<i>104</i>
Figura 46	<i>Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras I, J, K Y L en Morse.....</i>	<i>105</i>
Figura 47	<i>Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras M, N, O Y P en Morse.....</i>	<i>106</i>
Figura 48	<i>Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras Q, R, S Y T en Morse.....</i>	<i>107</i>
Figura 49	<i>Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras U, V, W Y X en Morse.....</i>	<i>108</i>
Figura 50	<i>Diagrama de las Funciones Para Enviar das Letras Y y Z en Morse.....</i>	<i>109</i>
Figura 51	<i>Diagramas de Funciones de Estados Alto y Bajo Para el Código Morse.....</i>	<i>110</i>
Figura 52	<i>Diagrama de Flujo de Codificación de Housekeeping en Morse sin Espaciado.....</i>	<i>114</i>
Figura 53	<i>Prueba de Decodificación de Housekeeping en Morse sin Espaciado.....</i>	<i>115</i>
Figura 54	<i>Diagrama de Flujo de Codificación de Housekeeping en Morse con Espaciado.....</i>	<i>116</i>
Figura 55	<i>Prueba de Decodificación de Housekeeping en Morse con Espaciado.....</i>	<i>117</i>
Figura 56	<i>Montaje de Sistema de Radio Para Pruebas.....</i>	<i>118</i>
Figura 57	<i>Montaje de Sistema Mínimo Para Pruebas de Transmisión.....</i>	<i>119</i>
Figura 58	<i>Recepción de la Señal Utilizando un Analizador de Espectros.....</i>	<i>120</i>
Figura 59	<i>Comparación de Cambio del Estado de la Señal Transmitida.....</i>	<i>121</i>
Figura 60	<i>Diagrama de Medidas Línea de Transmisión con 1.6701mm de Ancho.....</i>	<i>123</i>
Figura 61	<i>Diseños de Tarjetas Para Pruebas de Impedancia de la Línea de Transmisión.....</i>	<i>124</i>
Figura 62	<i>Tarjetas Para Pruebas de Impedancia de Línea de Transmisión.....</i>	<i>125</i>
Figura 63	<i>Tarjeta Para Pruebas de Línea de Transmisión de 0.254mm de Ancho.....</i>	<i>126</i>
Figura 64	<i>Pruebas de Acoplamiento de Línea de Transmisión de 0.254mm.....</i>	<i>126</i>
Figura 65	<i>Tarjeta Para Pruebas de Línea de Transmisión de 0.5mm de Ancho.....</i>	<i>127</i>
Figura 66	<i>Prueba de Acoplamiento de Línea de Transmisión de 0.5mm de Ancho.....</i>	<i>127</i>
Figura 67	<i>Tarjeta Para Pruebas de Línea de Transmisión de 0.254mm de Ancho.....</i>	<i>128</i>
Figura 68	<i>Prueba de Acoplamiento de Línea de Transmisión de 0.254mm de Ancho.....</i>	<i>128</i>
Figura 69	<i>Prueba de Acoplamiento de Línea de Transmisión de 0.254mm de Ancho.....</i>	<i>129</i>
Figura 70	<i>Velocidad de Codificación de Housekeeping sin Espaciado Para Valores Altos.....</i>	<i>130</i>
Figura 71	<i>Velocidad de Codificación de Housekeeping sin Espaciado Para Valores Bajos....</i>	<i>131</i>
Figura 72	<i>Velocidad de Codificación de Housekeeping con Espaciado Para Valores Altos....</i>	<i>132</i>
Figura 73	<i>Velocidad de Codificación de Housekeeping con Espaciado Para Valores Bajos... </i>	<i>133</i>
Figura 74	<i>Diseño de Ruteo de Tarjeta PCB del Subsistema de Comunicaciones.....</i>	<i>134</i>
Figura 75	<i>Modelo 3D de Tarjeta PCB de Subsistema de Comunicaciones.....</i>	<i>135</i>
Figura 76	<i>Código Morse Versión Internacional (Actual) y Americana.....</i>	<i>140</i>

Tabla 1*Abreviaturas y Acrónimos*

Abreviación	Significado
FSK	Frequency Signal Keying
μC	Micro Controller
NRZI	Non Return Zero Inverse
UI	Unnumbered Information Frame
SSID	Service Set Identifier
FCS	Frame-Check Sequence
PID	Protocol Identifier
ARRL	American Radio Relay League
HDLC	High Level Data Link Control
ISO	International Standards Organization
OSI	Open System Interconnect
TC	Telecommand
TM	Telemetry
COTS	Commercial off-the-shelf
TNC	Terminal Node Controller
ITU	International Telecommunication Union
GEO	Geosynchronous Equatorial Orbit
MEO	Medium Earth Orbit
LEO	Low Earth Orbit
BER	Bit Error Rate
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SRS	Space Research Service
SOS	Space Operation Service
EES	Earth Exploration Service
ASS	Amateur Satellite Service
IARU	International Amateur Radio Union
AWGN	Additive White Gaussian Noise
UL	Uplink
DL	Downlink
FSK	Frequency-Shift Keying
AFSK	Audio Frequency-Shift Keying
GMSK	Gaussian Minimum Shift Keying
BPSK	Binary Phase-Shift Keying
MSK	Minimum Shift Keying
LSB	Less Significant Bit

Introducción

El presente trabajo forma parte de un proyecto multidisciplinario desarrollado en la Unidad de Alta Tecnología perteneciente a la facultad de Ingeniería de la UNAM campus Juriquilla en el cual se plantea el desarrollo de una plataforma satelital tipo TubeSat con el objetivo de realizar fotografías en el espacio.

En ésta tesis se desglosará el proceso de desarrollo y programación de un prototipo de un sistema de telecomunicaciones modular que cumpla con los requerimientos necesarios de hardware y software para establecer un enlace satelital capaz de descargar imágenes de baja resolución y telemetría desde una órbita LEO a cualquier estación terrena utilizando la banda de radioaficionados.

Proyecto KuauhtliSat

La principal misión del proyecto multidisciplinario consiste en la formación de recursos humanos en el área aeroespacial con el desarrollo de un nanosatélite tipo TubeSat por parte de estudiantes de diferentes instituciones de nivel superior. El nanosatélite está planeado para colocarse en órbita baja o LEO por sus siglas en ingles Low-Earth-Orbit a 350Km de altura aproximadamente, la cual le dará un tiempo estimado de 3 a 5 meses de vida útil en el espacio antes de desintegrarse por completo en la atmosfera.

Durante su tiempo de vida útil la misión principal del nanosatélite será la toma de fotografías del espacio en baja resolución con posibilidad de visión de la tierra, las cuales junto con la información del estado de los diferentes sensores del sistema (telemetría) será enviada a la tierra además de contar con la capacidad de enviar mensajes de baliza o Beacon en código morse utilizado para la identificar el satélite, el envío y recepción de ésta información será realizada por el sub-sistema de comunicaciones a bordo del nanosatélite en el modelo de vuelo, mientras que en segmento terrestre será captada la señal de radio frecuencia en UHF (Ultra High Frequency) con la información solicitada a través del uso de tele-comandos que serán enviados al espacio a través de la estación terrena ubicada en la Unidad de Alta

Tecnología de la Facultad de Ingeniería, en el campus Juriquilla, Querétaro (UAT-FI-UNAM, 2021).

Subsistemas A Bordo

La estructura interna de los micro/nano/pico satélites está distribuida por subsistemas que se encuentran interconectados a través de buses de entre los que destacan los siguientes módulos.

OBC

OBC, conformada por un micro-controlador o microprocesador tiene la función principal de la gestión central de todo el sistema, manejo de funciones, tiempos, almacenamiento así como gestionar a las capacidades de la carga útil, por lo que su hardware debe ser de muy alta confiabilidad así como flexibilidad éste subsistema controla, habilita o inhabilita los controladores de cada uno de los demás subsistemas a través de un bus al cual se encuentran conectados los demás controladores. Dicho control puede ser de forma indirecta o directa, ya sea que algunos de los demás subsistemas operen libremente mientras la computadora se encuentra en estado de espera, o de forma directa, donde la computadora se encarga de controlar directamente el modo de operación de cada uno de los demás subsistemas (National Defense Industry Press, 2018).

Telemetría

El subsistema de Telemetría tiene la función de medir parámetros de operación del satélite, para habilitar modos de operación así como para asegurar que el satélite está operando correctamente recibiendo y empaquetando los datos que posteriormente serán transmitidos por un enlace de radiofrecuencia a una estación terrena para su análisis (National Defense Industry Press, 2018).

Comunicaciones

Telecontrol es una pieza fundamental para la misión ya que permite que el sistema electrónico sea gestionado y controlado desde tierra para indicar algún cambio en el modo de operación, así como la transmisión de cargas útiles y datos de telemetría para su uso en tierra (National Defense Industry Press, 2018).

Potencia

El sistema de potencia es el encargado de hacer la gestión y administración de la energía utilizada por cada uno de los demás subsistemas del nanosatélite y mantenerlos operativos aún bajo las condiciones que surgen durante la misión, realizando funciones de captación de energía utilizando paneles solares, control del activación de flujo de energía y regulación de la energía que llegará a cada placa. (Angel-Rojas et al., 2017).

Estructura

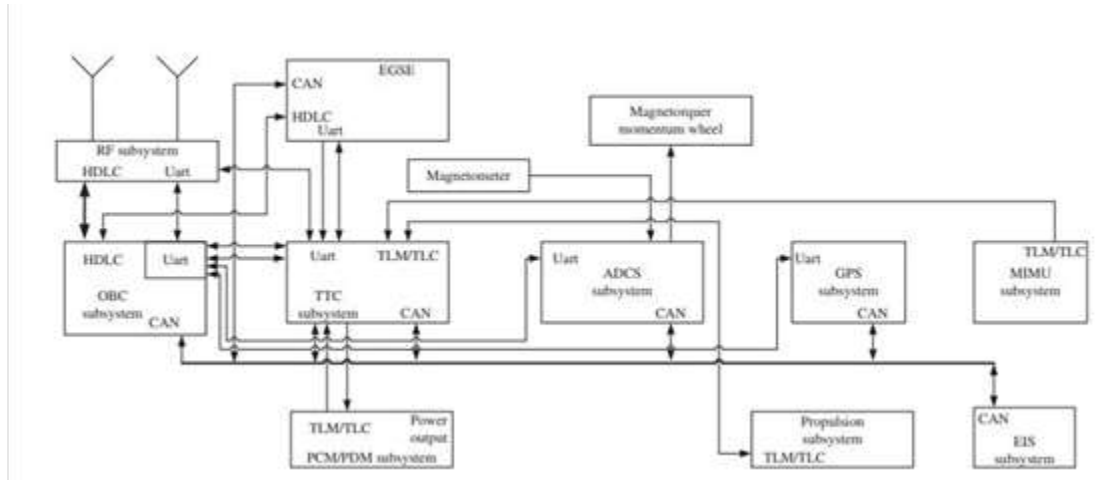
Éste subsistema es el encargado de asegurar la supervivencia de los demás subsistemas a bordo de choques y aceleraciones con el correcto estudio de los materiales de la estructura, la distribución de cargas así como el comportamiento dinámico de los equipos electrónicos y también asegurar la integridad de los paneles solares así como de brindar soportes estructurales para las tarjetas electrónicas, tanto para las fases de desarrollo como para calificación. (Zapico et al., 2005).

Carga Útil

Uno de los principales usos de los nanosatélites son aplicaciones relacionadas a la demostración científica, donde se hacen pruebas de capacidades de modelos o prototipos científicos e instrumentos espaciales, también para fines educativos, como lo es la captura de imágenes (Mhangara et al., 2020).

Figura 1

Diagrama de Integración de Subsistemas en el Satélite N-S1



Nota: Imagen extraída de (National Defense Industry Press, 2018)

Sub-Sistema De Comunicaciones

El subsistema de telecomunicaciones, el cual es utilizado para realizar las funciones de telemetría, rastreo y tele comando, o TT&C (por sus siglas en inglés, Telemetry, Tracking & Command) es el encargado de que se pueda conocer el estado operativo del satélite, los datos de la carga útil a bordo, identificar al satélite y permitir el control remoto de los subsistemas a bordo desde una estación terrena, convirtiéndolo en uno de los subsistemas principales de una misión satelital (Garrido et al., 2018).

Éste subsistema para cumplir con el objetivo de TT&C debe de contar con módulos de hardware y software dedicados a:

- Transmisión y Recepción de señales de radio en bandas de radio aficionado
- Transmisión de una señal de baliza para rastreo
- Gestión de paquetes de datos usando formato estándar

Estos son elementos indispensables para un enlace tierra-espacio y espacio-tierra utilizando señales de radio, debido a que hay varias formas de implementar dichas

funciones a bordo de un satélite (Abdelkarim, 2016) es necesario determinar cuáles serán los requerimientos de hardware y software para cubrir las necesidades de la misión del proyecto KuauhtliSat.

Planteamiento Del Problema

Hay que incentivar el desarrollo de sistemas espaciales para lograr la independencia tecnológica del país, haciendo más accesible, costeable y sencilla la implementación de los diversos sistemas que conforman un nanosatélite, en éste caso un subsistema de telecomunicaciones que permita a jóvenes poder desarrollar plataformas similares en pro de la innovación tecnológica.

Justificación

El desarrollo de software modular facilitará la configuración e implementación de protocolos de comunicación utilizados en la banda de radioaficionados (AX.25 y CW) para el control de paquetes que mantendrá la integridad de la información enviada y recibida con una estación terrena.

El desarrollo de un sistema basado en componentes centrados en micro controladores aumentará la reusabilidad del software de comunicación para proyectos similares principalmente conformados por estudiantes debido a que estará conformado por bibliotecas programadas en C.

Objetivos De La Tesis

Objetivo general:

- Programar una biblioteca de software para transmisión de tramas con protocolo AX.25 y CW embebido para el subsistema de comunicaciones de a bordo de un nanosatélite universitario tipo TubeSat.
- Desarrollar un prototipo de un sistema de telecomunicaciones que cumpla con los requerimientos necesarios para establecer un enlace satelital capaz de descargar información desde una órbita LEO.

Objetivos específicos:

- Definir los requerimientos de hardware y software necesarios para el cumplimiento de la misión considerando los recursos de hardware disponibles.
- Analizar los procesos de codificación y decodificación de los protocolos AX.25 y CW para implementarlos de la forma más conveniente.
- Aplicar los procedimientos necesarios en el diseño de las placas PCB para asegurar el cumplimiento de los requerimientos de la misión en cuanto a estándares de calidad para sistemas espaciales.

Antecedentes

Plataformas nano-satelitales

Se conoce bien que uno de los primeros satélites en haber sido puestos en órbita fue el Sputnik Ruso hace más de 60 años que junto con el Explorer Estadounidense se consideran satélites pequeños con una masa menos de 100 Kg ya que posteriormente se tendrían satélites con una masa mayor a los 2000Kg con un costo superior a los 10 millones de dólares con cada lanzamiento. El tamaño del satélite estaba directamente relacionado con la cantidad de recursos, tanto humanos como de materiales y energéticos necesarios para su desarrollo y debido a esto no es extraño que las principales ventajas de los satélites pequeños sean su bajo costo y tiempo corto de desarrollo, a lo que se le agregan otras ventajas tecnológicas como las constelaciones de satélites que aumentan la redundancia de la red al no ser un sistema centralizado (Shiroma et al., 2011).

En años recientes los satélites de menor tamaño han crecido en popularidad, siendo los nanosatélites una subdivisión de otra categoría más amplia llamada satélites pequeños o smallsats siendo éste el término utilizado para referirse a los satélites de menor tamaño, siendo el prefijo de la clasificación definido por la masa del objeto, aplicado tanto para vehículos, naves espaciales o satélites descrito en la tabla 2 (BRYCE, 2020).

Tabla 2

Clasificación de satélites por su masa en Kg

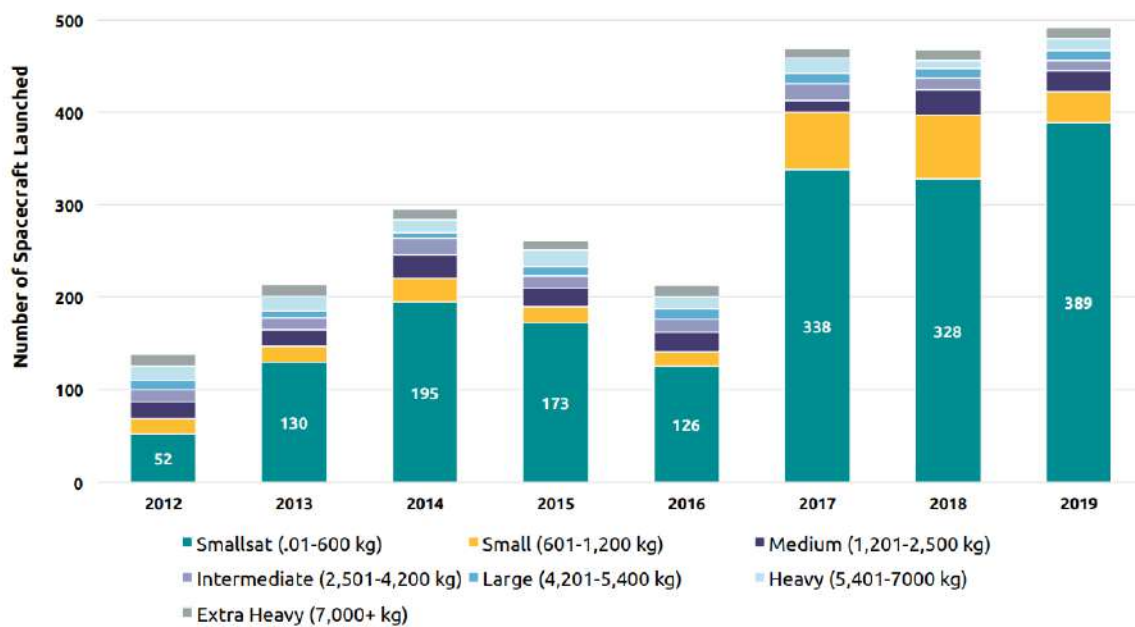
Nombre de la clase	Kilogramos (Kg)
Femto	0.01-0.09
Pico	0.1-1
Nano	1.1-10
Micro	11-200
Mini	201-600
Small	601-1200
Medium	1201-2500
Intermediate	2501-4200
Large	4201-5400
Heavy	5401-7000

(Federal Aviation Administration, 2018)

Fue a partir del 2012 que el uso de satélites pequeños comenzó a incrementar y hasta el 2019 se han lanzado más de 1700 satélites pequeños (Figura. 2), de los cuales poco más de 925 de éstos son nanosatélites (Figura 3), representando alrededor de más de un 53% del total de satélites pequeños lanzados entre esos años (Figura 4) (BRYCE, 2020).

Figura 2

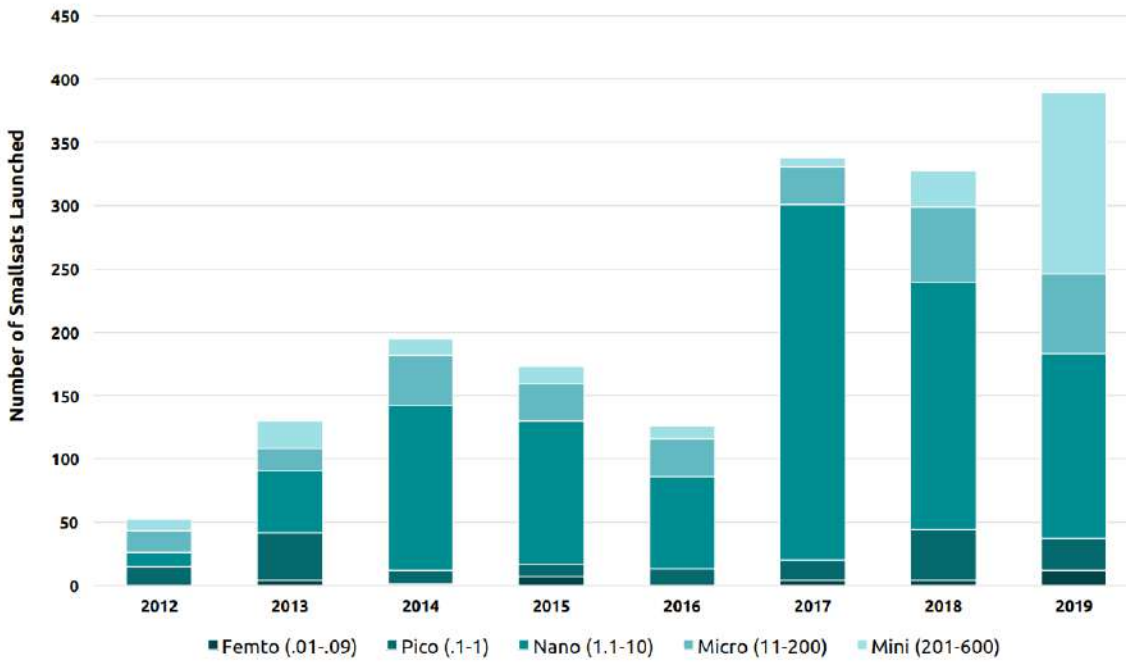
Número de satélites lanzados entre 2012-2019 a nivel mundial



Nota: Imagen extraída de (BRYCE, 2020)

Figura 3

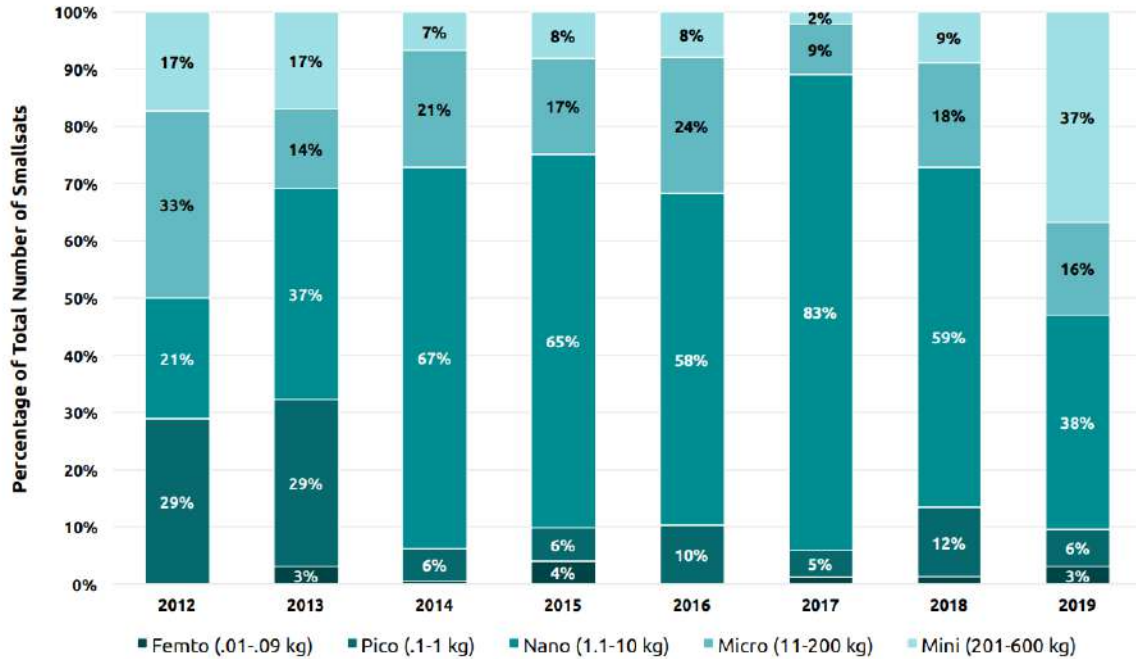
Número de Satélites Pequeños Lanzados Entre 2012-2019 a nivel mundial



Nota: Imagen extraída de (BRYCE, 2020)

Figura 4

Proporción de Satélites Pequeños Lanzados Entre 2012-2019 a Nivel Mundial

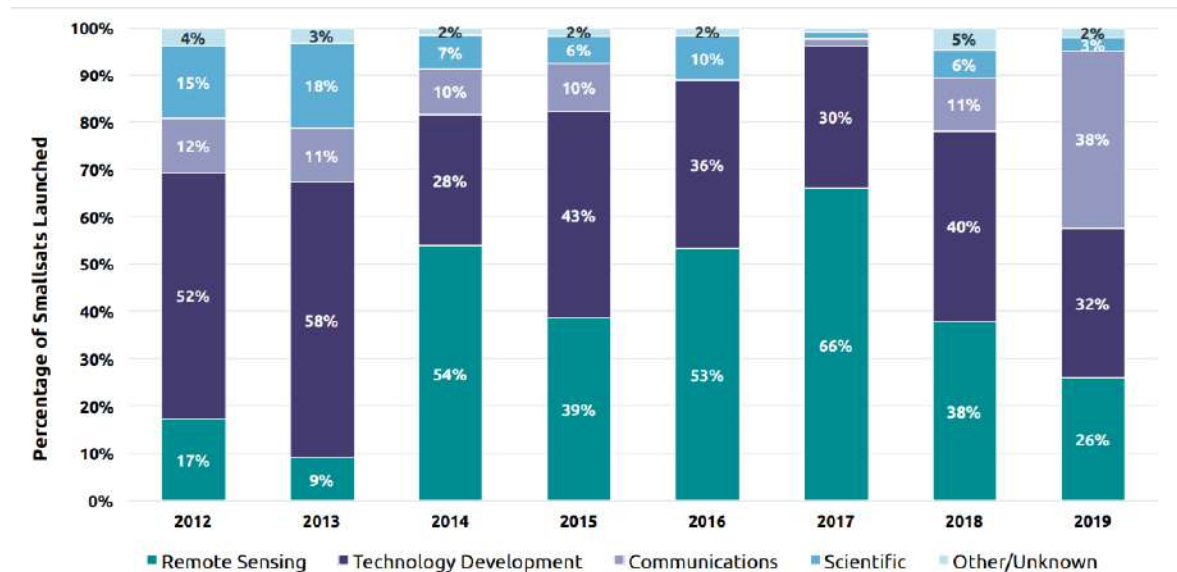


Nota: Imagen extraída de (BRYCE, 2020)

Los satélites pequeños lanzados entre los años 2012 a 2019 fueron principalmente utilizados para misiones de medición o percepción remota y desarrollo de tecnología, sin embargo los datos indican que la cantidad de unidades satelitales dedicadas a sistemas de comunicaciones o servicios de comunicaciones ha aumentado casi 4 veces respecto a años anteriores, siendo éste el principal uso dado a la tecnología en satélites pequeños en el año 2019, como se observa en la Figura 5 (BRYCE, 2020).

Figura 5

Proporción de Satélites Divididos por su uso Lanzados Entre 2012-2019



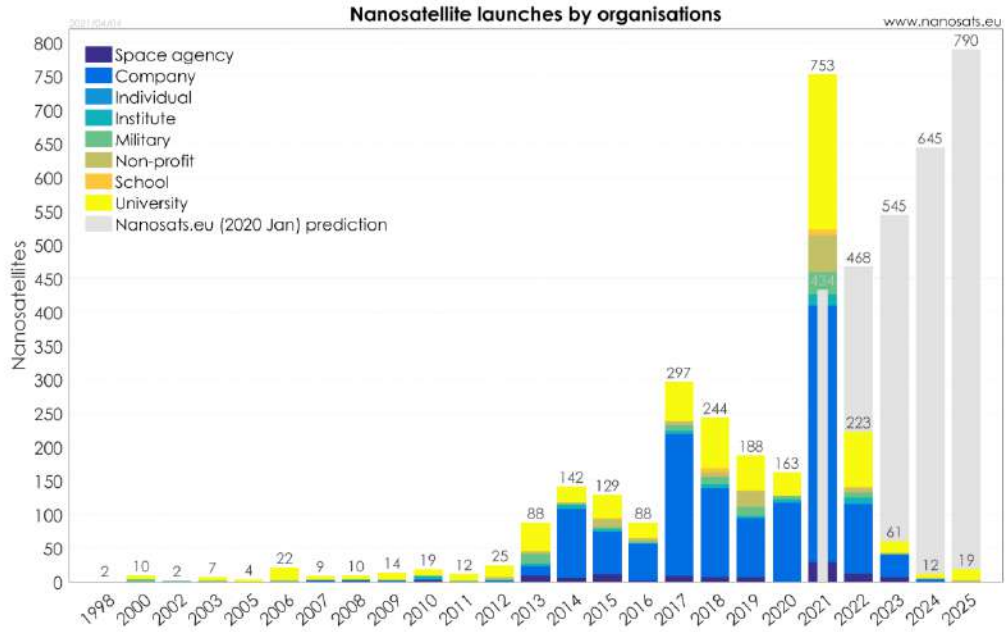
Nota: Imagen extraída de (BRYCE, 2020)

Los avances realizados en el campo de los nanosatélites en los últimos años han sido tales que más que ser solo una herramienta académica, hoy en día son concebidos como unidades prometedoras capaces de realizar misiones científicas reales como las destinadas a otras plataformas, como exploración de la tierra y objetos cercanos a ella utilizando órbitas terrestres, o exploración del sistema solar o misiones interplanetarias, desarrollando el interés por los nanosatélites por la fracción de tiempo utilizada para su desarrollo y el costo reducido en comparación con plataformas más grandes. (Perez et al., 2018) Siendo además de un medio asequible de acceso al espacio, una plataforma prometedora para el desarrollo de nuevas aplicaciones espaciales, por lo que se espera que la cantidad de dispositivos desplegados presentara un crecimiento exponencial en años próximos (Almonacid & Franck, 2017) .

Dichas predicciones se pueden observar en la cantidad de misiones nanosatelitales lanzadas hasta la fecha de ésta investigación con nuevas misiones agregándose a la lista de misiones confirmadas para los próximos años, ver la Figura 6.

Figura 6

Número de Nano-satelites Lanzados entre 1998-2021 a Nivel Mundial

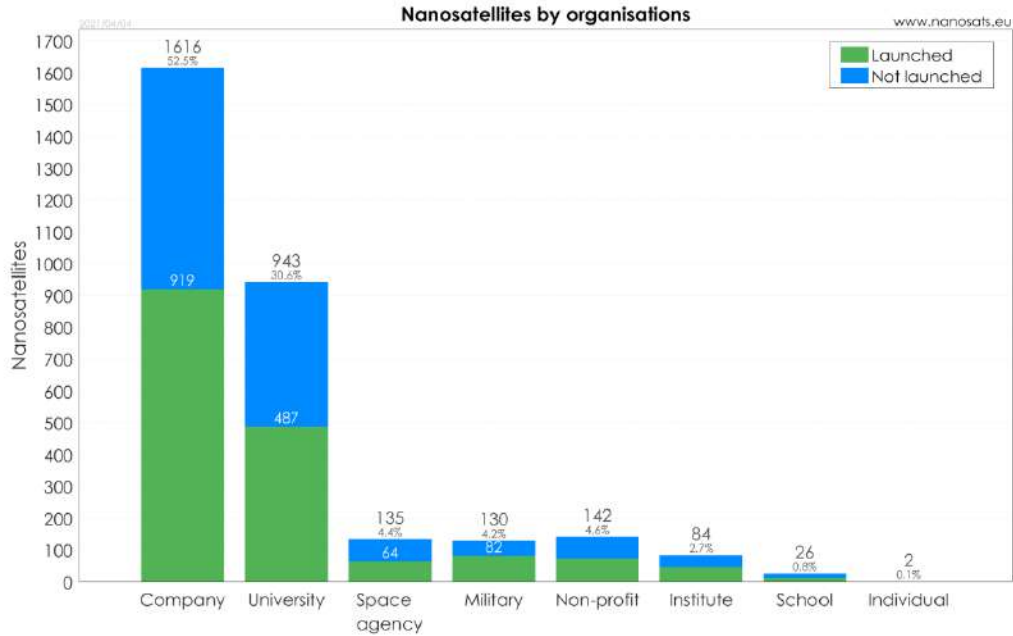


Nota: Imagen extraída de (Nanosats Database, s/f)

De los nanosatélites que han sido construidos la mayor cantidad de ellos han sido desarrollados por empresas privadas con un 52.5% del total de unidades nanosatelitales construidas seguido por las universidades con un 30.6% de las cuales, a nivel mundial, solo un 51.6% de las unidades construidas han sido lanzadas al espacio, ver la Figura 7.

Figura 7

Número de Nano-satelites Fabricados Entre 1998-2021

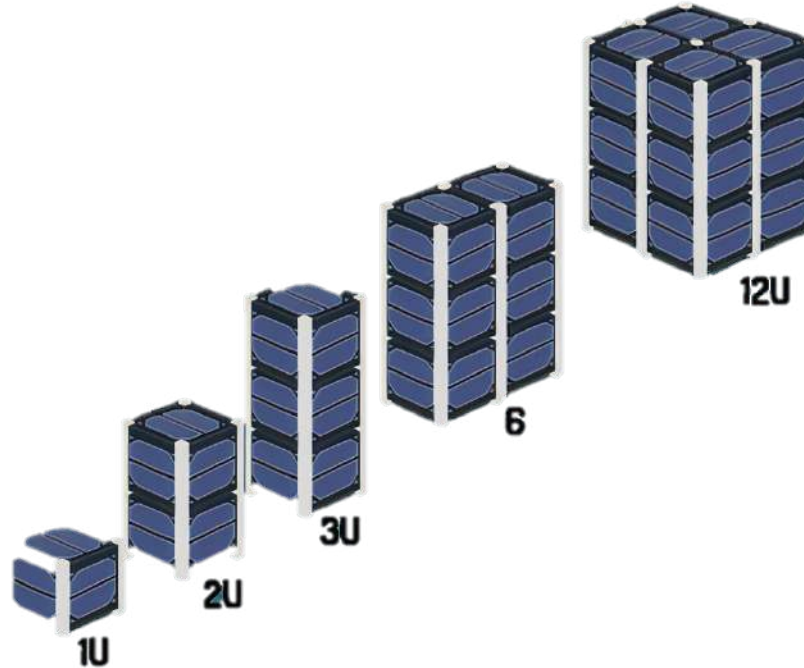


Nota: Imagen extraída de (Nanosats Database, s/f)

Uno de los factores que impulsó el incremento de las misiones espaciales con nanosatélites de manera considerable ha sido la introducción de los estándares CubeSat desde 1999 desarrollado por la Universidad Politécnica del Estado de California y la Universidad de Stanford buscando satélites más pequeños, más baratos y más rápidos de construir, esto aunado al avance tecnológico en materia de circuitos integrados, tanto en complejidad como en tamaño ayudando a cumplir con el propósito. Esto propició a que la tendencia en el desarrollo de satélites en la comunidad científica y universitaria, el formato CubeSat predominaría en misiones nano satelitales. Dicho estándar comprende dos componentes principales: la estructura CubeSat y el Desplegador Orbital Satélite Poly-Pico (P-POD). Siendo la primera un cubo con lados de 10 cm y un peso máximo de 1,33 kg. designado como unidad o 1U haciendo que al ser escalable el tamaño del satélite aumentando la altura de la unidad se pueden encontrar variaciones del formato como 1.5U, 2U y 3U, etc. (Tresvig & Lindem, 2014) ver la Figura 8.

Figura 8

Configuraciones de Escalado de la Plataforma Nanosatelital CubeSat

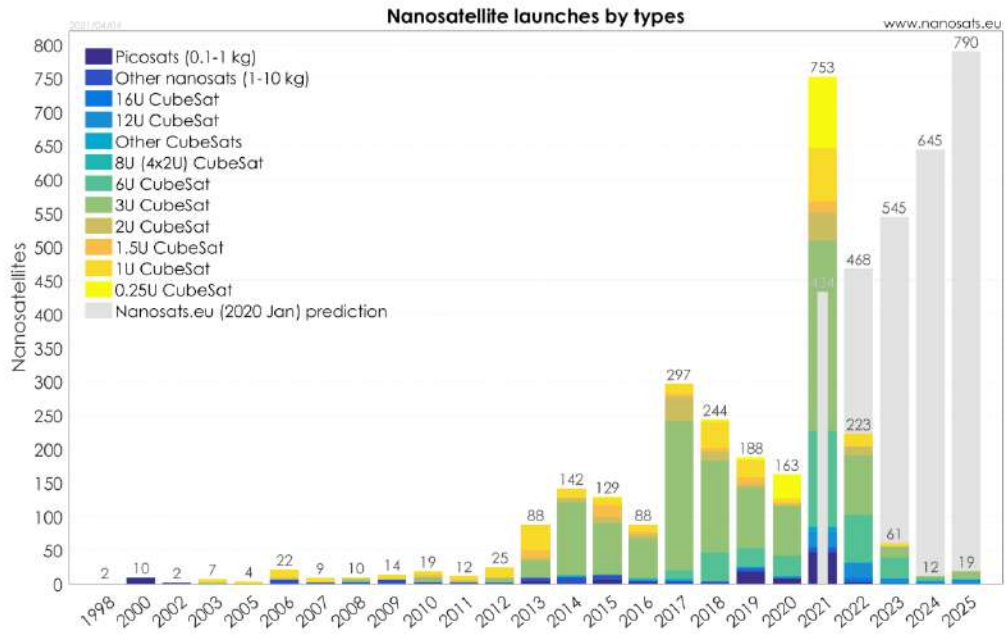


Nota: Imagen extraída de (Alen Space, s/f)

El lanzamiento es una de las fases más críticas de un proyecto espacial y existen varios formatos de sistemas espaciales y cargas útiles que no han sido probadas en el espacio debido los costos de adquisición del lanzamiento. Es común que los satélites pequeños sean lanzados como cargas útiles secundarias de manera simultánea en un llamado lanzamiento de clúster lo que hace más asequible el acceso al espacio por la reducción de costos, sin embargo, hasta hace algún tiempo, algunos satélites tampoco tenían la posibilidad de ser lanzados debido a la falta de sistemas de despliegue específicos para esas plataformas, como en el caso de los PocketQubes y los TubeSats, que fueron estándares de micro y nano satélites propuestos en los años recientes (Cappelletti et al., 2018) los cuales representan un 2.0% y un 0.2% del total de las unidades fabricadas entre los años, ver la Figura 9.

Figura 9

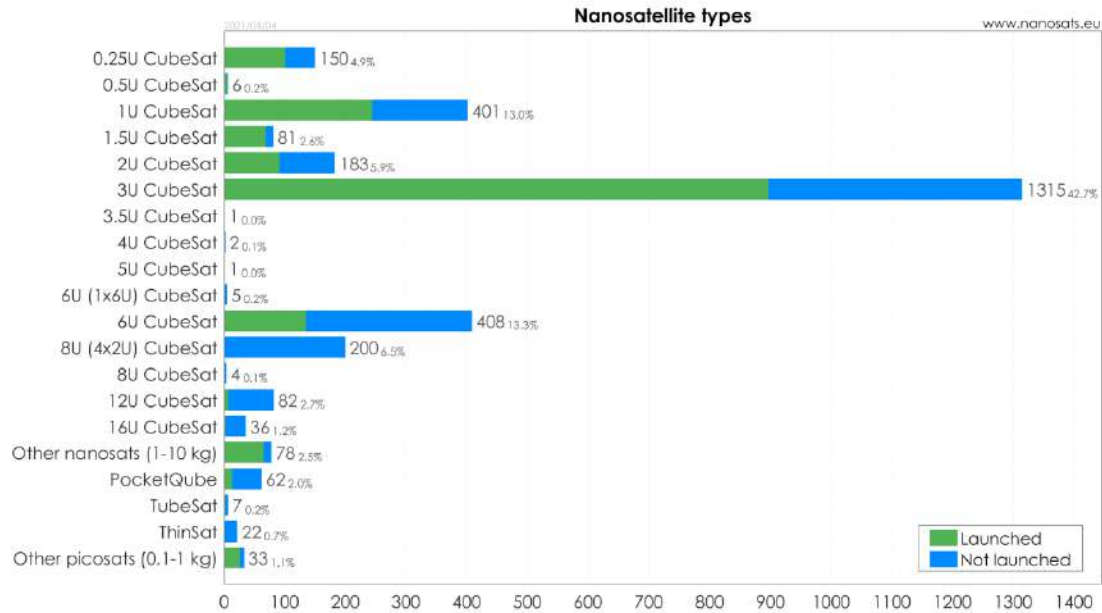
Número de Nano-satelites por su Tipo Lanzados Entre 1998-2021



Nota: Imagen extraída de (Nanosats Database, s/f)

Figura 10

Proporción de Nano-satelites Fabricados por Tipo a Nivel Mundial



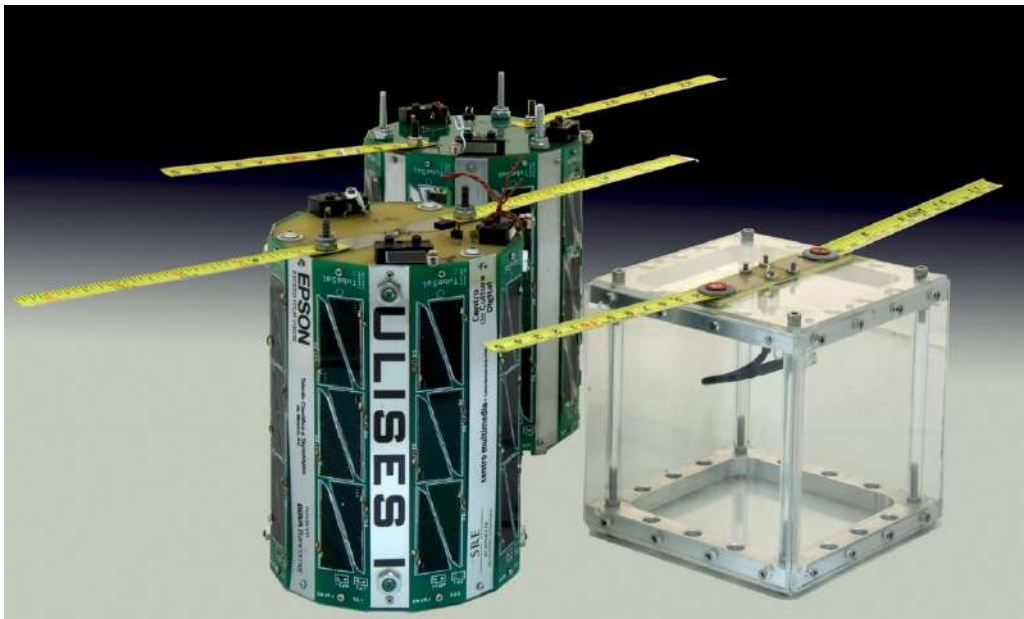
Nota: Imagen extraída de (Nanosats Database, s/f)

TubeSat

La plataforma TubeSat nació como una alternativa educativa al CubeSat gracias a una compañía llamada Interorbital Systems la cual asegura es el kit satelital de calidad profesional más económico del planeta para misiones de órbita baja o LEO (Low Earth Orbit) principalmente dirigido a instituciones educativas para la capacitación de estudiantes en diseño de naves espaciales y experimentadores amateur (Interorbital Systems, s/f), actualmente los TubeSats diseñado por Interorbital systems no muy populares pues la empresa también planea incluir el lanzamiento con la adquisición de sus productos, sin embargo aún está en fase de pruebas del cohete donde se lanzarán éstos dispositivos (Garcia, 2019).

Figura 11

Unidades Satelitales Tubesat de Interorbital Systems



Nota: Satélites Tubesat construidos con el kit de Interorbital Systems, siendo el de en frente ULISES I y su comparación con una estructura de un CubeSat de una unidad.

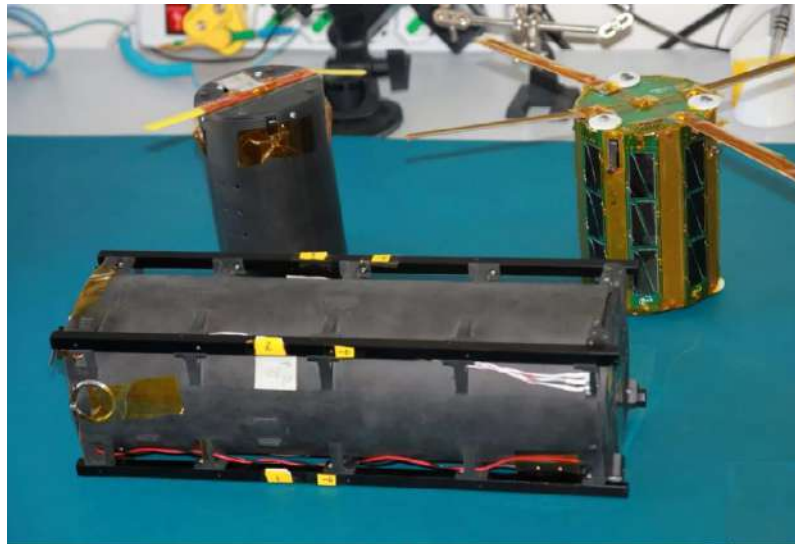
Imagen extraída de (Interorbital Systems, s/f)

TubeSat es una plataforma satelital con forma de hexadecágono cuya estructura está conformada por placas electrónicas de circuito impreso apiladas y sujetas por espaciadores. Puede ser clasificado como un pico satélite pues su peso está considerado que sea inferior a 0.75 Kg sin embargo, si llega a alcanzar 1.1 Kg o más, sería considerado nanosatélite, lo que puede ocurrir ya que ésta plataforma aún no está totalmente estandarizada como lo es CubeSat. Su estructura similar a un cilindro con un diámetro exterior de 8,94 cm y una altura de 12,57 cm aproximadamente. Sin embargo la forma cilíndrica de los TubeSats hace que sea incompatible para su acomodo dentro de un desplegador P-POD el cual es específico para CubeSat. Actualmente existe una propuesta de desplegador para TubeSats llamada Tu-Pod el cual es un análogo a un CubeSat de 3U, el cual logra adaptar 2 unidades TubeSat a un P-POD que eyectará a la unidad Tu-Pod para posteriormente, ésta despliegue los TubeSat, gracias ésta propuesta unidades TubeSat (concretamente las misiones

Tancredo-1 y ONSAT) han sido capaces de incursionar en la industria de formatos satelitales establecida principalmente para el formato CubeSat como se aprecia en la figura 12 (Cappelletti et al., 2018).

Figura 12

Desplegador Tu-Pod Desarrollado por GAUSS y TetonSys



Nota: TU-POD junto con los TubeSats Tancredo-1 (Derecha) y ONSAT (izquierda).

Imagen extraída de (Cappelletti et al., 2018).

Fundamentos De Enlace De Radio Para Transmisión Espacio-Tierra

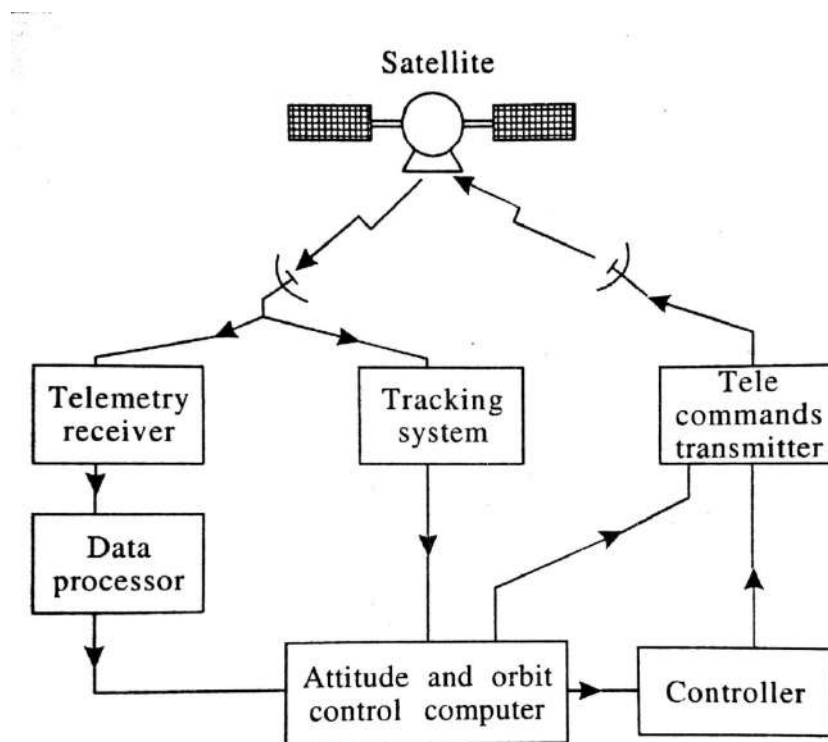
El poder comunicarse es algo clave estando en el espacio, y se utiliza equipo de radio específico para la comunicación entre ambos extremos del sistema, los cuales están conectados a una computadora, de uso particular en la estación terrena y a la computadora a bordo en el caso del segmento de vuelo. Esto convierte al subsistema de comunicaciones en un elemento crítico de la misión, ya que gracias a ésta conexión entre ambos segmentos, es posible realizar operaciones de Telemetría, Rastreo y Comando o Telemetry, Tracking & Commanding (TT&C) (Garrido et al., 2018).

Éste subsistema está conformado principalmente por tres partes, un controlador de nodo terminal o TNC (Terminal Node Controller) el cual se encarga de hacer la gestión

de paquetes de información que se reciben y que se envían a una estación terrena, ésta parte del subsistema se utiliza para la bajada de telemetría, datos de carga útil y para la recepción de telemandos para controlar remotamente la rutina del satélite, la segunda parte es el sistema de baliza gracias al cual se puede identificar al satélite en órbita gracias al envío de un identificador normalmente en morse o CW así como información del estado operativo del satélite también llamado housekeeping (HK) y por último, un transceptor de radio gracias al cual se podrá realizar un enlace tierra-espacio y espacio-tierra utilizando señales de radio (Abdelkarim, 2016)..

Figura 13

Diagrama de Bloques de Comunicación TT&C con un Satélite



Nota: Imagen modificada de (Chaithra N & AkhilV, 2016)

A la hora de implementar un sistema de telecomunicaciones a bordo de un satélite existen varias opciones a la hora de elegir como completar ésta misión, entre las que se encuentran:

Utilizar dispositivos comerciales o COTS, los cuales simplifican bastante el diseño del subsistema, ya que realizan gran parte de las funciones requeridas por el sistema siguiendo normalmente estándares, tanto de transmisión de datos, empaquetado, detección y corrección de errores o retransmisión. Estas implementaciones se centran principalmente en el transceptor que en ocasiones también puede incluir en el mismo dispositivo el amplificador de potencia e incluso el controlador de nodo terminal. Por otro lado, el uso de COTS en ocasiones implica utilizar estándares propios de la empresa que fabrica la pieza y es necesario implementar una unidad idéntica o del mismo fabricante en la estación terrena encargada del telecontrol del satélite para evitar problemas de compatibilidad (Abdelkarim, 2016) aunque también se ha optado por un diseño modular de las estaciones de comunicación para poder adaptar transceptores distintos, desde radios definidos por software hasta equipos más tradicionales mientras se asegure que pueda respaldar el seguimiento del satélite incluyendo también a estudiantes y público en general como son los radioaficionados (Kitts & Rasay, 2016) .

Sin embargo, al utilizar COTS es posible que se presenta la situación de que el dispositivo de radio haya sido fabricado para un uso en tierra y esto puede hacer difícil el acoplamiento a la plataforma satelital a pesar que sea de un tamaño reducido, ya sea por el tamaño, o forma, por lo que son necesarias ciertas modificaciones como remover carcasas y piezas innecesarias para reducir masa y tamaño, realizar orificios y adaptaciones para la sujeción o conectar otros dispositivos, como son amplificadores de potencia o realizar reprogramación del firmware por defecto. Sin embargo no siempre los dispositivos COTS a operar de las modificaciones y adaptaciones están fabricados para funcionar en un entorno extremo como lo es el espacio, lo que puede significar muchas veces que presenten problemas para funcionar o generar situaciones que en tierra no representan un problema, como son los sistemas de enfriamiento por convección integrados. También existen proyectos donde se opta por realizar la construcción completa del subsistema utilizando componentes individuales, lo que permite tener más control sobre las propiedades del sistema, principalmente utilizado por universidades como herramientas de aprendizaje para construcción de circuitos de

RF, transceptores, controladores de nodo terminal, sistema de transmisión de baliza o amplificadores, sin embargo su desventaja es que se pueden presentar errores y dificultades inherentes a la placa PCB o al diseño, lo que hace que resulten sistemas menos exitosos (Abdelkarim, 2016).

Orbitas

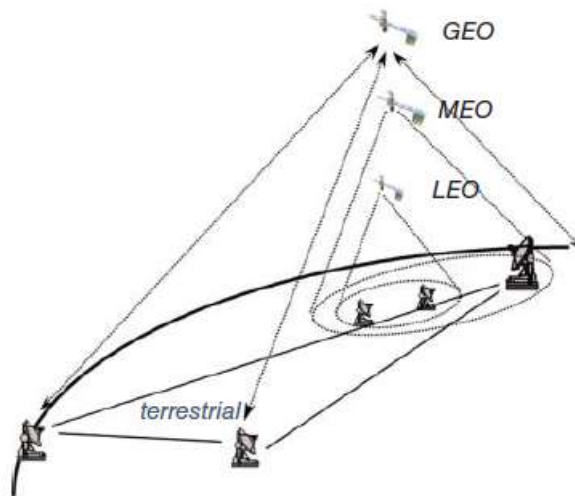
La órbita representa la trayectoria seguida por el satélite al moverse alrededor de la Tierra, la forma de esta trayectoria puede tener diferentes formas, lo que altera la distancia entre un satélite que se mueve a través de la órbita y una estación terrena dependiendo de qué tipo de órbita sea y en qué parte de la órbita se encuentre (Gerard et al., 2020)

Algunas de las órbitas más comunes usadas por satélites son:

- Órbita Geoestacionaria Ecuatorial (GEO) 35 786 km
- Órbita terrestre mediana (MEO) 10 000 km
- Órbita terrestre baja (LEO) <1000 km

Figura 14

Ilustración de Altitudes de Orbitas y su Cobertura



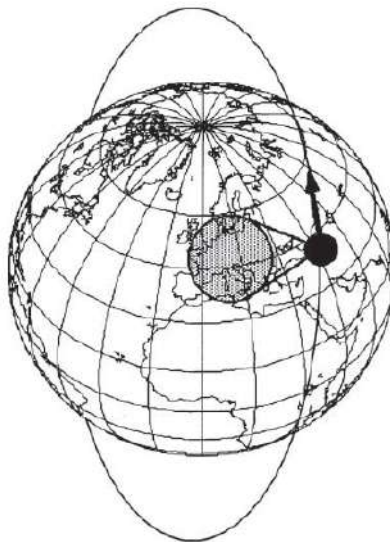
Nota: Imagen extraída de (Gerard et al., 2020)

Órbita LEO

Ésta órbita se encuentra a una altitud menor a los 1000 km en su parte más alta, pero en su parte más baja puede llegar hasta los 160 km. A diferencia de los satélites en órbita GEO los cuales solo tienen una órbita determinada, los satélites sobre una órbita LEO no siguen un único camino determinado, una de las ventajas es que al encontrarse dentro del rango de la estación espacial internacional (ISS) es más sencillo hacer viajes de ida y vuelta de la estación para hacer el despliegue de los satélites, (ESA, s/f) Otra ventaja es que es una buena órbita para misiones de percepción remota haciendo toma de fotografías por varios factores; la proximidad a la tierra hace posible tomar fotografías de mayor resolución y que el tiempo que tarda en dar una vuelta a la tierra es de 90 minutos hace posible tener cobertura total de la tierra en poco tiempo gracias a la rotación natural de la misma (Gerard et al., 2020).

Figura 15

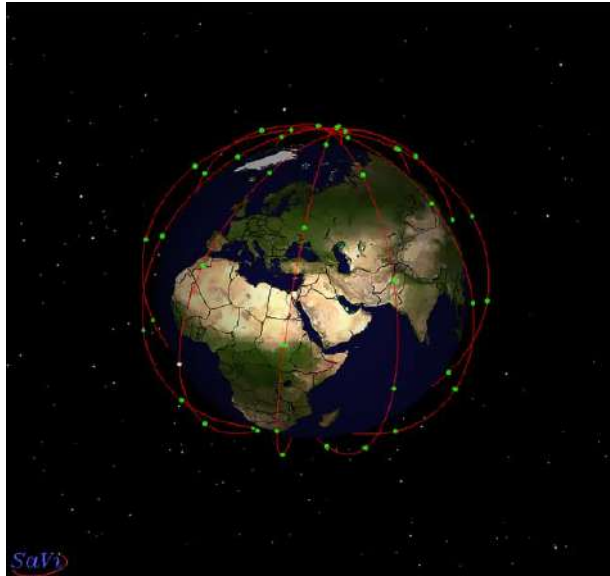
Ilustración de Órbita LEO Polar



Nota: Imagen extraída de (Gerard et al., 2020).

Figura 16

Ilustración de Constelación IRIDIUM



Nota: Ejemplo de orbitas LEO distintas. Imagen extraída de (Gerard et al., 2020).

Consideraciones legales

La unión internacional de telecomunicaciones (International Telecommunication Union ITU por sus siglas en inglés) es la encargada de la asignación, coordinación y designación del uso de frecuencias del espectro radioeléctrico, proporcionando estándares y recomendaciones, además de dividir el espectro radioeléctrico en bandas dependiendo de la frecuencia, de las cuales las principales son:

- Muy Alta Frecuencia (VHF) que considera las frecuencias entre 30 a 300 MHz
- Ultra Alta Frecuencia (UHF) que considera las frecuencias entre 300 MHz a 3 GHz
- Súper Alta Frecuencia (SHF) que considera las frecuencias entre 3 GHz a 30 GHz

Cada banda se divide en canales dependiendo del servicio para el cual se designan tales frecuencias, los servicios típicos para nanosatélites son (Atem de Carvalho et al., 2020).

:

- Servicio de exploración especial (SRS) para enlaces de carácter científico o investigación tecnológica
- Servicio de operación espacial (SOS) para enlaces de telemando y telecontrol de satélites
- Servicio de exploración terrestre (EES) para enlaces que comparten información de observación de la tierra con una estación terrena u otros satélites
- Servicio de satélites amateur (ASS) para enlaces utilizados con fines amateur sin fines de lucro

La banda de UHF tiene la siguiente división de canales de acuerdo al servicio que se maneja dependiendo del rango de frecuencias:

Tabla 3

División de Canales por Servicio en la Banda de Ultra Alta Frecuencia

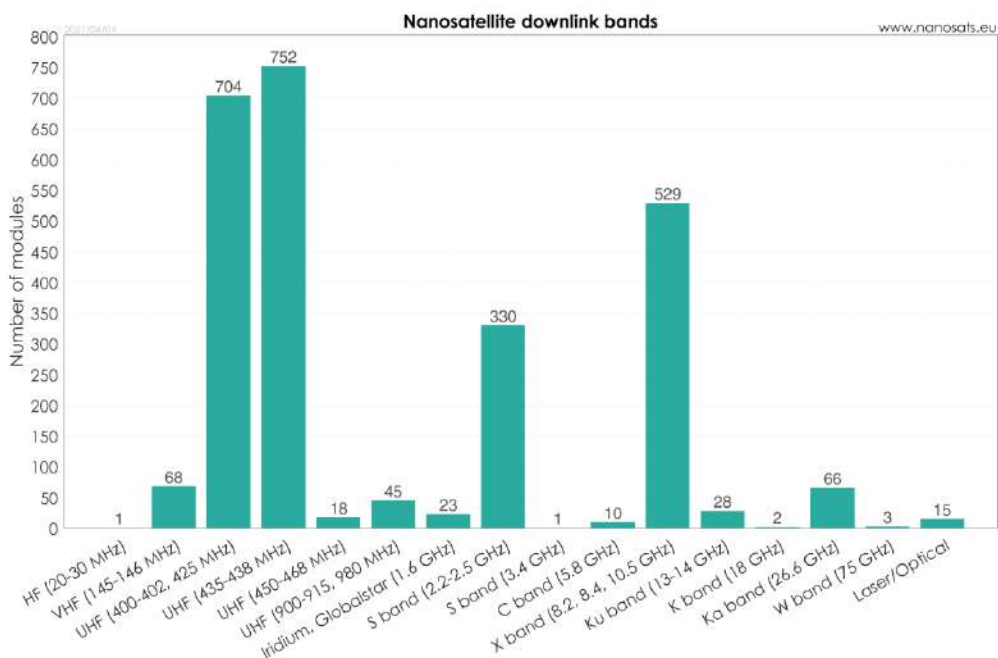
Banda	Rango de frecuencia (MHz)	Servicio(s)	Dirección
UHF	400.15–401	SOS, SRS	Descarga
	401–402	SOS, EES	Descarga
	402–403	EES	Carga
	410–420	SRS	Enlace inter-satelital
	430–440	ASS	Carga/Descarga
	449.75–440	SOS	Carga

(Atem de Carvalho et al., 2020).

El rango de frecuencias entre 430 MHz a 440 MHz considerado para servicio de radio amateur está coordinado por la unión internacional de radio amateur (IARU) es el más utilizado para nanosatélites actualmente de acuerdo a la figura 17, ya que éste canal cuenta con la ventaja de que es de bajo costo.

Figura 17

Número de Nano-satélites Lanzados por Bandas de Frecuencia en la que Operan



Nota: Los datos constan de los nanosatélites lanzados entre 2012-2020 a nivel mundial. Imagen extraída de (Nanosats Database, s/f).

Componentes Típicos Del Subsistema De Comunicaciones

Transceptor. A bordo del segmento espacial uno de los elementos más importantes son los módulos de radio, encargados de realizar la modulación y demodulación; traducción de señales digitales a señales de alta frecuencia en el caso del transmisor y viceversa en el caso del receptor, un transceptor es solo dispositivo que realiza ambas acciones; transmisión y recepción de información de manera inalámbrica. Por lo tanto un transceptor es capaz de establecer una comunicación bidireccional, ya sea con alguna estación terrena o con otros satélites, proporcionando información de telemetría, seguimiento, tele comando o alcance. Estas soluciones integradas la mayoría de las veces contienen los componentes críticos de cada etapa por separado, lo que puede hacer posible que ambas partes funcionen a frecuencias

distintas al mismo tiempo. Usualmente la salida de la transmisión desde el transceptor se encuentra conectada a un amplificador de potencia.

(Atem de Carvalho et al., 2020) Actualmente existe una gran variedad de transceptores comercializados por varios vendedores, como se puede ver en la Tabla 4, siendo los radios diseñados para UHF y banda S los más populares. Sin embargo la naturaleza de la misión, sus limitaciones por regulación de frecuencias lo que determina cual es el equipo que se utilizará, no se puede usar el mismo transceptor para todas las misiones. A la hora de hacer la selección de componentes la mayoría de los satélites pequeños y CubeSat debido a su reducido tamaño no incluyen un segundo par de antenas ni transceptor a bordo a forma de redundancia (Cappelletti et al., 2020).

Típicamente en CubeSats y nanosatélites se utilizan transmisores de radio que funcionan a una frecuencia fija en altas frecuencias como es UHF, así como con una tasa de transmisión de datos fija, lo que reduce que el costo en comparación de otros radios con mayores capacidades de configuración (Jaswar et al., 2017).

Tabla 4*Ejemplos y Características de Rransceptores Utilizados en Nano-satélites*

Componente	Fabricante	Potencia de transmisión	Tasa de datos soportada	Banda de frecuencia	Modulación y codificación	Dimensiones	Masa
Lithium 1 radio	AstroDev	250mW a 4W	9.6 kbps 38.4 kbps 76.8kbps	130 MHz (UL) 450 MHz (DL)	FSK GMSK	10x33x65mm	52 g
UHF-VHF transmitter	Clyde Space	4 a 10W	9.6 kbps	420 a 450MHz (UHF) 130 a 150MHz (VHF)	GMSK AFSK	96x90x16mm	90 g
NanoCom U482C	Gom Space	1W	1.2 kbps 4.8 kbps 9.6kbps	435 a 438MHz (UL y DL)	MSK	95.4x90.15x18mm	80 g
VHF-UHF transceiver	ISIS	1.7W	1.2 kbps 2.4 kbps 4.8 kbps 9.6 kbps	400 a 450MHz (DL UHF) 130 a 160MHz (UL VHF)	BPSK AFSK	96x90x15mm	85 g

Nota: Los modelos listados son para Bandas de radioaficionados COTS. Fuente: (Cappelletti et al., 2020).

Amplificador De RF. Es un componente de hardware requerido por el transmisor para alcanzar comunicarse con una estación terrena y otros satélites, éste componente se conecta entre el transceptor o transmisor y la antena. (Atem de Carvalho et al., 2020) .

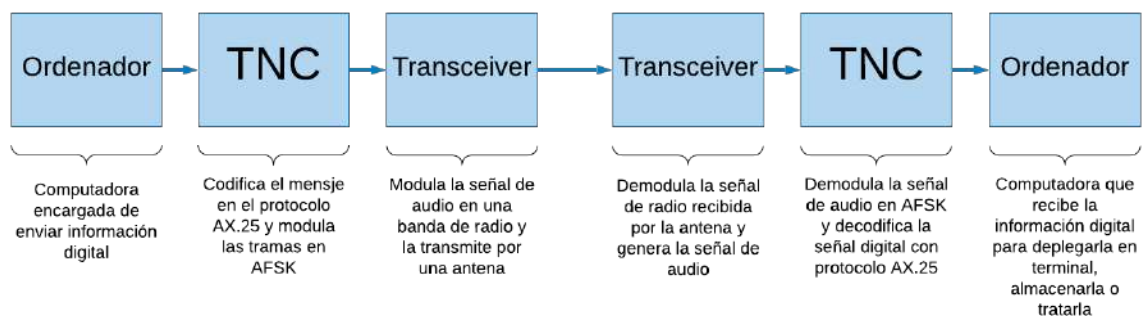
El amplificador de potencia se utiliza para asegurar el enlace de radio de acuerdo a la mayor distancia entre la estación terrena y el satélite, la cual es variable, ya que al encontrarse en una órbita baja (LEO) el satélite no tiene un movimiento relativo con la rotación de la tierra, el enlace de radio puede iniciarse desde que el satélite se encuentra en un ángulo de elevación superior a 0° desde el punto de vista de la estación terrena, una estación terrena para establecer un enlace normalmente tiene una elevación de antena que varía entre 5° y 90° , por lo que entre menor sea la elevación a la cual se establece el enlace mayor es la distancia a la que se encuentra el satélite de la estación, en consecuencia las pérdidas de espacio libre (FSL) estarán en su punto máximo. El amplificador de potencia al tener una potencia de transmisión de radiofrecuencia fija debe lograr la transmisión principalmente en éste punto máximo para garantizar la comunicación en el margen del enlace. (Jaswar et al., 2017). Muchos de los transceptores de radio comerciales, vienen con un amplificador de potencia integrado, la potencia radiada que comúnmente se utiliza puede observarse en la columna de "Potencia de transmisión" de la tabla 4.

Controlador De Nodo Terminal. Un controlador de nodo terminal o TNC como se le conoce por sus siglas en inglés (Terminal Node Controller) es un dispositivo que consta de dos partes principales, una parte digital que consta de un micro controlador encargado de implementar el protocolo de comunicación de capa 2, AX.25 codificando y decodificando paquetes de información utilizados en las estaciones de radio comunicación amateur utilizado para participar en redes de paquetes de radio y una parte analógica conformada por un modem que convierte la información digital a analógica y viceversa siendo éste dispositivo un puente entre la computadora y un transceptor de radio.

En éste caso muchos de los nanosatélites al ser desarrollados por universidades se opta por establecer los enlaces de descarga y carga de información en bandas de radio aficionados y dicha información debe ser compatible con el sistema que se esté utilizando en las estaciones terrenas normalmente basadas en COTS para poder recuperar la información de carga útil y/o telemetría. Sin embargo a bordo del satélite el uso de COTS pueden generar problemas de compatibilidad por detalles en la realización del empaquetado de las tramas por el software que varía dependiendo de los fabricantes, el cual no se puede cambiar, haciendo importante tener acceso al software y hardware de la TNC a bordo del satélite permite ajustar los problemas de compatibilidad con la estación terrena de comando durante el desarrollo y operación del satélite. (Ahmad et al., 2016).

Figura 18

Esquema de Transmisión de un Sistema de Comunicaciones Utilizando AX.25



Nota: Se muestra la conversión de datos por la codificación del canal. Imagen de elaboración propia.

La parte digital al estar compuesta de un micro controlador o microprocesador (con sus respectivas memorias para almacenar el programa y variables) en donde se implementa el protocolo AX.25 a la información que se recibe o se manda, es la que se encarga de empaquetar y desempaquetar las tramas de información en el formato correspondiente al protocolo que se utiliza como capa de enlace de datos.

Ésta implementación del protocolo debe ser estrictamente estándar pero existen algunas funciones que pueden ser implementadas de manera libre, siendo así que la

eficiencia del software dependa de que versión se está utilizando además de las características del hardware que se ha utilizado para su implementación, siendo que la capacidad de memoria de almacenamiento del micro controlador tiene un mayor impacto para la implementación de diferentes versiones de software en él, así como la implementación de un tamaño de ventana mayor antes del reconocimiento, al igual que aumenta la longitud y cantidad de tramas que se pueden manejar antes del reconocimiento.

Adicional a esto existe un factor que influye para poder lograr velocidades mayores de transmisión a 1.2kbps, siendo necesario implementar un circuito modem adicional al que implementa el protocolo AX.25 que sirva como un filtro analógico ajustable a la velocidad deseada implementado en software en otro dispositivo. (Zielinski, 2009).

Antenas. El tamaño de las antenas está relacionado con la frecuencia para la que fue diseñada, en el caso de las antenas para UHF y VHF, por el tamaño de las antenas en relación al tamaño del satélite, normalmente se consideran antenas desplegadas, entre menor es la frecuencia, antenas más grandes son requeridas. Así como el tamaño es un factor para la selección de antenas, el uso de las mismas también es importante, ya que el tiempo de cobertura de la estación terrena que opera el satélite varía dependiendo de la órbita en la que se encuentre el satélite, o de si el satélite cuenta o no con características como un sistema de apuntamiento, ya que según el tipo de antena el apuntamiento representa más o menos un factor decisivo para la comunicación debido a la forma de su patrón de radiación. (Cappelletti et al., 2020) Un sistema de comunicaciones debe de ser lo suficientemente robusto para prevenir cualquier caso en que se pueda perder comunicación con el sistema, debido a esto, contar con un sistema de antenas que requieran de control de actitud o apuntamiento para poder operar el satélite no es algo que se utilice a menudo. Una forma de lograr que el sistema tenga independencia de un sistema de control de actitud, es utilizar antenas omnidireccionales, a pesar de reducir la eficiencia que se tendría con antenas que requieren apuntamiento. (Atem de Carvalho et al., 2020) Las antenas más comunes utilizadas en nanosatélites se detallan en la tabla 5.

Tabla 5*Típos de Antenas mas Utilizadas en Nanosatélites y sus Características*

Antena	Banda de operación típica	Ganancia típica	Ancho de haz de potencia media Típicos	Polarización	Volumen Típico	Masa Típica
Monopolo	VHF UHF	0 - 3 dBi	Omni	Lineal o circular	10 mm (diámetro) x $\lambda/4$	< 20 g
Dipolo	VHF UHF	0 - 3 dBi	Omni	Lineal o circular	10 mm (diámetro) x $\lambda/2$	< 30 g
Parche	Banda S Banda X	5 - 8 dBi	60 °	Lineal o circular	10x10x0.1 cm (Banda S) 5x5x0.1 cm (Banda X)	< 50 g

(Cappelletti et al., 2020).

Operaciones Típicas Del Subsistema De Comunicaciones

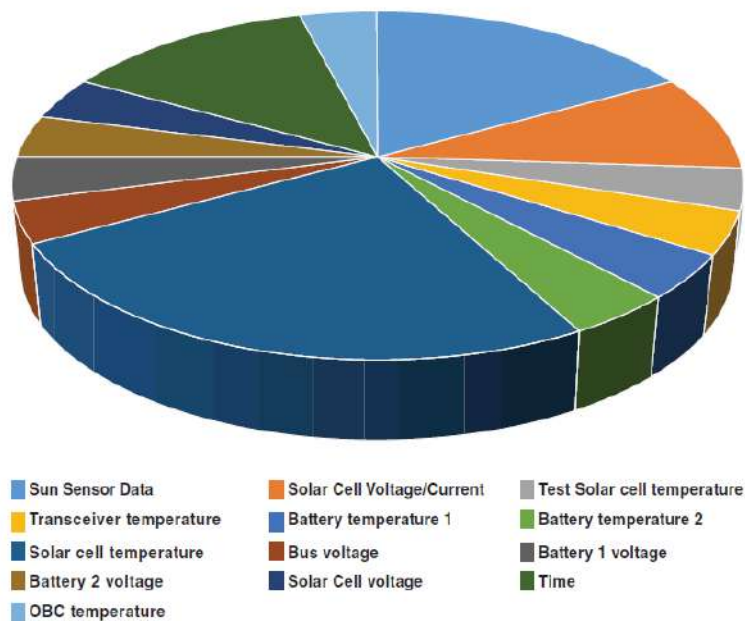
Telemetría. La telemetría es la información generada por diversos sensores acoplados en puntos estratégicos del satélite, un satélite genera principalmente dos tipos de información separada por el uso que se le dará, los cuales son información de “Housekeeping” y “science data”. La información de housekeeping es la información generada por los diferentes sensores acomodados a lo largo del satélite para conocer el estado operativo del sistema, ésta información es utilizada tanto por la computadora principal como por los operadores del satélite en tierra, para conocer el estado operativo del satélite así como para realizar toma de decisiones, siendo el control de los estados operativos y de control por la computadora principal de a bordo, o alguna maniobra o cambio ordenada por telemando desde tierra ya que no todos los problemas pueden ser resueltos en el espacio automáticamente, por lo que en ocasiones es requerida alguna intervención humana. Por otro lado la llamada “science data” es aquella información generada por los subsistemas de la carga útil, que suelen ser el principal motivo para realizar la misión, siendo las cámaras un dispositivo que muchas veces se encuentra entre el hardware destinado a la carga útil en nanosatélites (Atem de Carvalho et al., 2020).

Gracias a la telemetría también se pueden monitorear estados del subsistema utilizando bits solo para conocer estados operativos sin magnitudes cuantitativas, sin embargo la información generada por cada tipo de sensor es distinta y depende de la naturaleza del sensor, precisión de medición, tasa de datos y en el caso de las cámaras existen otros factores relacionados a la imagen como son tipo de sensor de imagen, resolución, formato y tasa de compresión, relación de bits por pixel y tasa de cuadros por segundo en caso de los videos. Debido a que ésta información es procesada por la computadora principal (OBC) y posteriormente es transferida al subsistema de comunicaciones para transmitirla hacia tierra, es necesario analizar la configuración de los sensores y la tasa de datos de cada uno considerando cuales son los objetivos de la misión y el volumen de información que se desea transmitir a tierra, que se ajuste a las capacidades del subsistema de comunicaciones previsto, o ajustar

las capacidades de dicho subsistema para adaptarse al presupuesto de información requerido por la misión (Atem de Carvalho et al., 2020).

Figura 19

Volumen de Información Generada en una Misión Nanosatelital



Nota: Imagen extraída de (Atem de Carvalho et al., 2020).

Señal De Baliza Y Rastreo. Una señal de baliza consiste en un mensaje repetitivo que ayuda a identificar la presencia de una estación de radio y que se encuentra disponible para entablar comunicación (Karn et al., 1985) en nanosatélites también ayuda a los operadores de la estación terrena a identificar su posición y su estado de salud después del lanzamiento. Es importante hacer un balance entre el consumo de energía utilizado y el mínimo de información requerido a transmitir a la hora de hacer el diseño de una señal de baliza, la manera más tradicional de implementar un mensaje de baliza es la transmisión de una señal de onda continua, también llamada por la abreviatura en inglés; CW, con la cual se transmite un mensaje en Morse, el cual puede ser el indicativo de la estación como se hace normalmente en radio amateur como se puede observar en las tablas 6 y 7 (Atem de Carvalho et al.,

2020) El rastreo se basa en mantener la dirección del haz de la antena orientado hacia donde se encuentra el satélite o estación terrena con el que se quiere establecer comunicación, el objetivo es minimizar en lo posible las pérdidas por apuntamiento, el método de apuntamiento dependerá de las características de la antena, como su ancho del haz y la forma del movimiento relativo con el objeto en cuestión, ya que el movimiento relativo a una estación terrena de un satélite geoestacionario con una ventana de comunicación de 24hrs no supera los $2^\circ/h$, comparado con un satélite situado en una órbita más baja, donde es requerido un apuntamiento más fino por parte de la antena de la estación terrena, para esto se ayuda de una señal de baliza la cual identifica al satélite y también puede ayudar a la orientación de la antena dependiendo de qué modo de rastreo se utilice. Los modos en que una estación terrena puede identificar el pasaje de un satélite son los siguientes:

Seguimiento Programado. La trayectoria de la antena es determinada utilizando los valores de azimut y ángulos de elevación esperados según la predicción del movimiento del satélite en la órbita, estos valores son fijos.

Seguimiento Computado. La trayectoria de la antena es determinada utilizando los valores de azimut y ángulos de elevación que van siendo actualizados según la progresión de la órbita cada determinado tiempo.

Seguimiento Automático De Lazo Cerrado. Éste método utiliza la intensidad de la señal de baliza, para determinar de dónde viene y hacia dónde se dirige, ésta técnica es utilizada principalmente para las estaciones móviles, ya que en las estaciones fijas es más sencilla la implementación de uno de los métodos anteriores. (Gerard et al., 2020).

Tabla 6*Lista de Nanosatélites Activos que Hacen uso de Señal de Baliza CW*

Fecha de lanzamiento	Nombre	Frecuencia (MHz)	Indicativo	Modo de Baliza
2003	CO-55 (CUTE-I)	436.8375	JQ1YCY	CW
2003	CO-57 (XI-IV)	436.8475	JQ1YCW	CW
2005	CO-58 (XI-V)	436.8475	JQ1YGW	CW
2008	CO-65 (CUTE1.7+APDII)	437.275	JQ1YTC	CW
2006	CO-66 (SEEDS-II)	437.485	JQ1YGU	CW, DigiTalker
2009	PRISM (HITOMI)	437.250	JQ1YCX	CW
2009	STARS (KUKAI mother)	437.305	JR5YBN	CW
2009	STARS (KUKAI daughter)	437.275	JR5YBO	CW
2009	KKS-1 (KISEKI)	437.385	JQ1YYY	CW
2009	ITU-pSat1	437.325	-	CW
2013	SOMP	437.503	DP0TUD	CW
2013	ZACube-1	14.099	123456	CW
2013	GOMX-1	437.250	-	CW
2014	SPROUT	437.525	JQ1ZJQ	CW
2014	PolyITAN-1	437.677	EM0UKP	CW
2015	ExoCube-1 (CP-10)	437.270	KK6HGC,XO3	CW
2015	CAS-3B (XW-2B)	145.725	BJ1SC	GMSK, CW
2015	CAS-3C (XW-2C)	145.790	BJ1SD	GMSK, CW
2015	CAS-3D (XW-2D)	145.855	BJ1SE	GMSK, CW
2015	CAS-3E (XW-2E)	145.910	BJ1SF	GMSK, CW
2015	CAS-3F (XW-2F)	145.975	BJ1SG	GMSK, CW
2015	Athenoxat-1	437.485	ATX1	CW
2016	AAUSAT-4	437.425	OZ4CUB	CW
2017	Aalto-1	437.220	OH2A1S	CW
2017	SUCHAI	437.229	SUCHAI	CW
2017	VZLUsat-1 (CZ02)	437.240	VZLUSAT	CW
2017	ROBUSTA-1B	437.325	FX6FR	CW
2018	STEP Cube Lab (STEP- 1)	437.485	-	CW
2018	EQUISat	435.550	-	CW, LED
2018	BIRD-MY (UiTMSAT-1)	437.375	JG6YKN	CW
2018	BIRD-MY (UiTMSAT-1)	437.375	JG6YKM	CW
2018	CP-7 (DAVE)	437.150	WI2XNR-1	CW
2018	Reaktor Hello World	437.775	OH2RHW1	CW
2018	MOVE-2	145.950	DB0MVE	CW
2018	JY1Sat (FUNcube-6,JO-	145.840	JY1SAT	CW

97)				
2018	Al-Farabi-2	-	UN1GWA	CW
2019	OrigamiSat-1 (FO-98)	437.497	JS1YAX	CW
2019	NEXUS (FO-99)	435.900	JS1YAV	CW
2019	BIRD-LKA (Raavana-1)	437.375	JG6YLG	CW
2019	BIRD-JPN (Uguisu)	437.375	JG6YLE	CW
2019	BIRD-NPL (NepaliSat-1)	437.375	JG6YLF	CW
2021	Tausat-1	436.400	TAUSAT-1	CW
2021	Tsuru (BIRDS-4)	437.375	JG6YMX	CW
2021	STARS-EC (A)	437.245	JJ2YVA	CW
2021	STARS-EC (B)	437.255	JJ2YVB	CW
2021	STARS-EC (C)	437.350	JJ2YVC	CW
2021	GuaraniSat-1 (BIRDS-4)	437.375	JG6YMZ	CW
2021	GRBALPHA	437.025	OM9GRB	CW
2021	DIY-1 (Arduiqube,DO-111)	437.125	-	CW
2021	SMOG-1 (MO-110)	437.345	-	CW
2021	BCCSAT-1	435.635	-	CW

Nota: Al primer semestre del 2021 (Wakita, s/f).

Tabla 7

Lista de Nanosatélites Activos que Hacen uso de Señal de Baliza Diferente a CW

Fecha de lanzamiento	Nombre	Frecuencia	Indicativo	Modo de Baliza
2013	AO-73 (FUNcube-1)	145.935	-	BPSK
2017	Nayif-1 (FUNcube-5,EO-88)	145.940	-	SSB
2017	Fox-1B (RadFxSat,AO-91)	145.960	-	DUV
2018	TY-2 (Tianyi-2)	2403.000/5833.000	-	OFDM
2018	TY-4 (Tianyi-4)	2409.000/5839.000	-	OFDM
2018	Zhou Enlai (Huai'An-1,HA-1)	437.350	BI4ST	BPSK
2018	Shaonian-Xing(Juvenile-1F)	436.370	MXSAT-1	BPSK

Nota: Al primer semestre del 2021 (Wakita, s/f).

Comando. Existen satélites donde se tiene una transmisión continua la estación terrena solo proporciona una conexión de enlace descendente al satélite para recibir datos, pero no un enlace ascendente para transmitir comandos al satélite desde la

estación terrestre. Por ejemplo, los CubeSats en Constelación de CubeSats de Virginia, se requiere una conexión de enlace ascendente el cual dará pauta para que los nanosatélites transmitan a la estación terrestre utilizando un enlace descendente la telemetría almacenada y los datos de posicionamiento, esto para que el CubeSat no emita constantemente información o transmita un beacon para establecer el enlace descendente (Cappiello et al., 2019) esto permite un ahorro de batería así como minimiza problemas de interferencia que se pueden dar en otras regiones. El formato del comando es designado por cada operador dependiendo de sus capacidades en cuanto a estación terrena y nanosatélite así como los requerimientos de la misión.

Modulación. La modulación es una técnica de transmisión de una onda o señal con información llamada onda moduladora sobre una onda sinusoidal que le ayuda a propagarse por el aire llamada onda portadora que ayuda al aprovechamiento del canal que se utiliza para la comunicación. Dependiendo del tipo de modulación que se utilice se obtienen diferentes características, capacidades y requisitos de transmisión de información.(Balmaceda et al., 2017). La forma general en que se puede describir una onda electromagnética es con la función:

$$y(t) = A * \sin (w * t + \phi)$$

Dónde:

- A es la amplitud de la señal transmitida
- w es la frecuencia de la portadora
- ϕ es el desplazamiento de fase

Dichas partes de la onda son candidatas para realizar el proceso de modulación por lo tanto existen 3 esquemas básicos de modulación, los cuales son: (Atem de Carvalho et al., 2020)

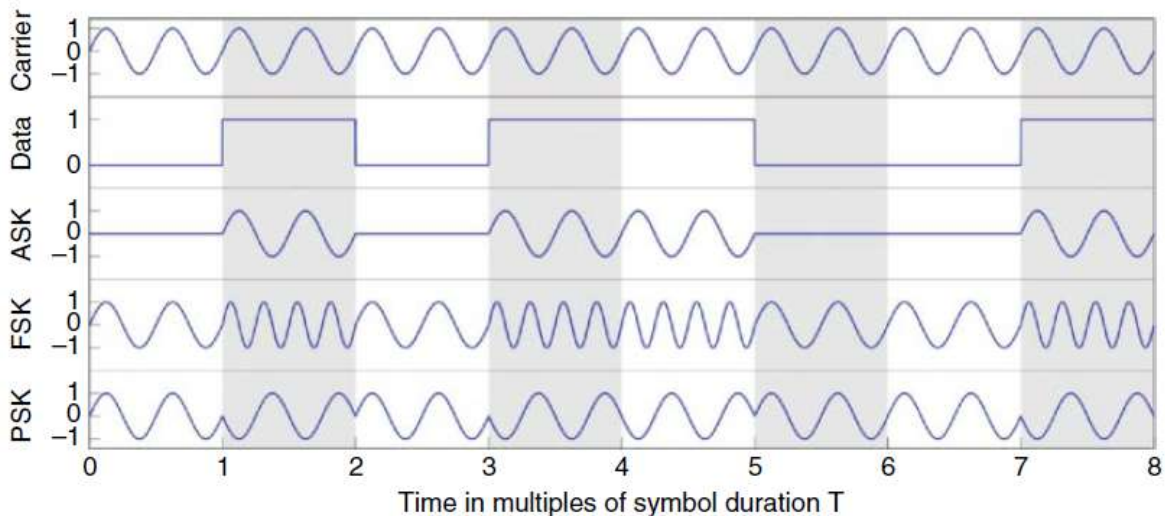
- modulación de Amplitud (AM) en modulación analógica y (ASK) en modulación digital.

- modulación de Frecuencia (FM) en modulación análoga y (FSK) en modulación digital.
- modulación de fase (PM) en modulación análoga y (PSK) en modulación digital.

También es importante conocer las características del tipo de modulación que se va a emplear tanto para la transmisión como para la recepción de las señales, puesto que a la hora de hacer la modulación en el trasmisor y la señal portadora ser modificada por la señal moduladora es necesario hacer el proceso contrario en el receptor con una modulación inversa. La señal portadora no tiene una relación directa con la información transmitida, solo es una herramienta que ayuda a que la señal con información se adecue a las propiedades físicas del canal de transmisión (Kleinschrodt et al., 2017) como se muestra en la figura 20.

Figura 20

Representación de las Formas de Onda de los Tipos de Modulación Principales



Nota: Imagen extraída de (Atem de Carvalho et al., 2020).

De éstas solo los modos digitales y sus variantes son relevantes para las comunicaciones satelitales las cuales se explican en la siguiente tabla (Atem de Carvalho et al., 2020). Dependiendo del tipo de modulación que se utilizará se presenta un requerimiento distinto de relación de energía por bit y densidad espectral de

potencia de ruido (E_b/N_0) para la tasa de error de bit esperada o BER por sus siglas en inglés, siendo que el hardware a bordo se relacionan directamente con la modulación deseada respecto a la capacidad de computación requerida para hacer éste proceso (Cappelletti et al., 2020).

Tabla 8

Lista de Modulaciones Digitales y Algunas Características

Modulación	Parámetros de modulación	Bits por símbolo	Eficiencia de ancho de banda	Sensibilidad a distorsiones no lineales
OOK (CW)	Amplitud (A)	1	Alta	Baja
AFSK	Frecuencia (w)	1	Baja	Baja
FSK	Frecuencia (w)	1	Baja	Media
MSK	Frecuencia (w)	1	Media	Media
GMSK	Frecuencia (w)	1	Alto	Medio
BPSK	Fase (ϕ)	1	Alta	Bajo
QPSK/OQPSK	Fase (ϕ)	2	Alta	Media
8-PSK	Fase (ϕ)	3	Alta	Alta
QAM	Fase (ϕ) Amplitud (A)	3+	Alta	Alta

(Atem de Carvalho et al., 2020)

Al utilizar el protocolo de comunicación por paquetes AX.25 se utiliza una tasa de datos baja, como es 1200 baudios al hacer uso de una modulación por desplazamiento de frecuencia de Audio (AFSK) la cual desde un inicio se utilizaba con tonos de audio a 1200Hz y 2200Hz para hacer la codificación de 1's y 0's respectivamente. También se utiliza con una tasa de transmisión más alta usando modulaciones como la modulación por desplazamiento de frecuencia (FSK) o la modulación por desplazamiento de mínimo gaussiano (GMSK). Éstos son los métodos de modulación comunes para sistemas de comunicación CubeSat que trabajan en bandas de radioaficionados (Ahmad et al., 2016).

Protocolo de transmisión de datos AX.25

Uno de los principales protocolos a destacar desde el inicio de misiones satelitales es AX.25 el cual cuenta con mucho soporte tanto por radio experimentadores así como

por su compatibilidad con la gran mayoría de radios comerciales de estantería o COTS, gracias a lo que alrededor del 30% de las pequeñas misiones satelitales no comerciales lo utilizan, seguido por el protocolo CW con un 16% y en tercer lugar los protocolos de propiedad, que han sido desarrollados para misiones en específico con un 15%, que en ocasiones son variaciones del mismo AX.25, sin embargo a pesar de que los nuevos protocolos tienen mayor flexibilidad gracias a la evolución de los dispositivos digitales utilizados en las estaciones terrenas y a bordo de los satélites que son popularmente radios definidos por software, aún no se da un cambio de paradigma en la comunidad a nivel general en cuanto a misiones no comerciales que transmiten en bandas de radioaficionados (Kleinschrodt et al., 2017).

En la misión CubeStar se aprecia la implementación de un protocolo de propiedad basado en AX.25 al implementar un sistema de detección de errores dentro de la trama, en el campo de datos sin alterar la estructura del protocolo, enviando bloques de 63 bytes y por cada uno un byte para detección de errores dentro del campo de información sin exceder los 256 bytes de información que el protocolo permite. De ésta forma, cada que se presenta una trama con un error en el campo de detección de errores o FCS, se aparta dicha trama para su post-procesamiento donde solo se elimina la sección de 63 bytes donde se encuentra el error, rescatando así el 75% de la información en caso de presentarse errores. Ésta técnica consume un 1.6% del ancho de banda del enlace que en condiciones normales se puede considerar insignificante, además de que aumenta la cantidad de información recibida en caso de un enlace con mucha interferencia.

Éste sistema de comunicaciones fue implementado en modo half-duplex con una modulación GFSK aplicada a la señal a una tasa de datos de 9600 bits por segundo (Tresvig & Lindem, 2014).

Bit Error Rate para transmisión con AX.25

El protocolo de comunicación AX.25 cuenta con un campo de detección de errores en su trama y al no tener un método de recuperación para las tramas recibidas con errores, éstas tramas terminan descartadas y se solicita su reenvío por parte del

receptor, Si el enlace de comunicaciones tiene una tasa de pérdida de bits o bit error rate (BER) igual o mayor a 5×10^{-3} existe una probabilidad de que el 100% de las tramas recibidas lleguen con algún error. Utilizando la ecuación de tasa de pérdida de paquetes o Packet Error Rate (PER):

$$PER = 1 - (1 - BER)^N \text{ Sea } N \text{ el número de paquetes}$$

Donde el rendimiento de los paquetes es inversamente proporcional a la tasa de error de bits dada por la ecuación:

$$\% \text{ de error} = (1 - PER) * 100\%$$

En condiciones normales el BER es menor a $10E-5$ logrando que menos del 2% de la información se pierda, siendo un ideal un BER de $10E-6$ o inferior considerando que hay muchos factores que influyen en la calidad del canal incluso un error de seguimiento del satélite, lo que hace que el enlace sea más susceptible al ruido, lo que aumenta la tasa de error de bits o BER (Cappiello et al., 2019) .

Estructura

La red de paquetes de radio utilizada por cientos de estaciones de radio amateur con el tiempo se convirtió en una sofisticada red a nivel global con una gran variedad dispositivos conectados, desde nodos, gateways, nodos de internet y enlaces satelitales. El protocolo de comunicación AX.25 proviene de una adaptación del protocolo de capa 2 (capa de enlace de datos) X.25 diseñado para el uso de operadores de radio, el protocolo no define una capa física de implementación pero en la capa de enlace se utilizan tramas de información codificada y se utiliza generalmente para establecer conexiones directas punto a punto entre estaciones de radio sin capas adicionales de red (Beech et al., 1997).

Existen 3 tipos generales de tramas en AX.25

- De Información (I)
- De Supervisión (S)

- De información no numerada (U)

Siendo que cada trama consta de 7 campos, comienza y termina con una bandera que es igual en ambos casos y en todas las transmisiones.

Los campos que componen a una trama son:

- **Dirección (DIR):** contiene los identificadores de las estaciones que conforman el enlace, o en éste caso, el satélite y la estación terrena.
- **Control (C):** identifica el tipo de trama que se está transportando y también lleva el conteo de dichas tramas.
- **Campo de identificador de protocolo (PID):** aparece solo en las tramas de información, numeradas o sin numerar (Tramas I y U) e identifica el protocolo de capa de enlace que se utiliza en la transmisión.
- **Información (I):** es donde se encuentra la información que se envía entre los extremos del enlace de radio.
- **Secuencia de verificación de tramas (FCS):** El campo de información La secuencia de verificación ayuda a que el receptor conozca si el mensaje contiene errores y esto permite identificar que tramas son correctas, siendo un campo de 16 bits y el número se calcula tanto en el emisor del mensaje como en el receptor.

Cada uno de estos tipos de trama está compuesto de campos más pequeños conformados por un número integral de octetos llamados cabeceras los cuales sirven para llevar el control de la transmisión incluyendo el control de errores.

Tabla 9

Construcción de Tramas de Servicio (S) y sin Numerar (U)

Flag	Address	Control	Info	FCS	Flag
01111110	112/224 bits	8/16 bits	N*8 bits	16 bit	01111110

Nota: Fuente:(Beech et al., 1997).

Tabla 10*Construcción de Tramas de Información (I)*

Flag	Address	Control	PID	Info	FCS	Flag
01111110	112/224 bits	8/16 bits	8 bits	N*8 bits	16 bit	01111110

Nota: Fuente: (Beech et al., 1997).

Banderas. Este campo tiene el tamaño de un octeto, su función es delimitar el inicio y el final de la trama, razón por la cual se debe de colocar al inicio y al final de la misma, dos tramas pueden compartir una bandera, lo que indicaría el final de una y el inicio de la siguiente. La bandera consiste de un cero seguido de seis 1's terminando con otro cero, "01111110" también denotado como "7E" en hexadecimal. Se diferencia del resto de la trama porque solo en la bandera está permitido que aparezca esta secuencia a lo largo de toda la trama. (Beech et al., 1997).

Dirección. Éste campo tiene el tamaño de 7 octetos y identifica tanto al emisor de la trama como al destinatario así como espacio para indicación de repetidores (en el caso de comunicación satelital no es necesario el uso de repetidores ya el emisor y receptor cuentan con línea de vista entre ellos), además también contiene la información de si lo que se está mandando es un comando o una respuesta entre los miembros de la comunicación. Si no se utilizan repetidores este campo consta de 2 sub-campos; el de la dirección de destino y la dirección de origen 7 octetos cada uno (112 bits totales), siendo el primer octeto en enviarse el A1 y el A14 el último. (Beech et al., 1997).

Tabla 11*Campo de Direcciones sin Repetidores*

Address Field of Frame													
Destination Address Subfield							Source Address Subfield						
A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14

Nota: Fuente: (Beech et al., 1997).

El nombre distintivo de la estación puede tener un largo de 6 caracteres ASCII estándar de 7 bits en mayúsculas que se colocarían del A1 al A6 en la dirección de destino y del A8 al A13 en la dirección de origen, si el distintivo tiene menos de 6 caracteres se debe de llenar el lugar con espacios, el octeto A7 y el A14 son conocidos como octeto de SSID (Secondary Station Identifier) (Beech et al., 1997).

Tabla 12*Ejemplo de Cabeceras de Trama sin Repetidores*

Octet	Ascii	Binary	Hex
Flag	None	01111110	0x7E
A1	N	01001110	0x4E
A2	J	01001010	0x94
A3	7	00110111	0x37
A4	P	01010000	0x50
A5	Space	00100000	0x20
A6	Space	00100000	0x20
A7 (SSID)	None	11100000	0xE0
A8	N	01001110	0x4E
A9	7	00110111	0x37
A10	L	01001100	0x4C
A11	E	01000101	0x45
A12	M	01001101	0x4D
A13	Space	00100000	0x20

A14 (SSID)	None	01100001	0x61
Control	None	00111110	0x3E
PID	None	11110000	0xF0
FCS	None	XXXXXXXX	0xHH
FCS	None	XXXXXXXX	0xHH
Flag	None	01111110	0x7E
Bit Position		76543210	

Nota: Fuente: (Beech et al., 1997)

El octeto de SSID se configura igual para el octeto A7 como para el A14 con la única diferencia del bit de extensión, éste octeto sirve para identificar está compuesto de varios campos los cuales son:

- **El bit de comando (C):** indica si la transmisión es un comando o una respuesta.
- **Bits reservados (R):** 2 bits que pueden ser utilizados en redes individuales de manera particular definida por el usuario, si no se implementa se mantienen ambos en uno.
- **El SSID (S):** un número de 4 bits que sirve para identificar las estaciones dentro de la misma zona (el SSID 0000 está reservado para la primera estación personal)
- **Bit de extensión HDLC:** es el bit menos significativo del octeto, el cual se define como 0 en todos los octetos del campo de direcciones desde el A1 hasta el A13, todos los bits dentro de los caracteres que conforman el nombre de las estaciones deben de ser recorridos un lugar a la izquierda terminando así todos los octetos con un 0 siendo el bit menos significativo del octeto A14 el único bit con un 1 indicando el final del campo de direcciones (Beech et al., 1997).

Tabla 13

Estructura de Campo A7, Octeto de SSID, Subcampo de Dirección de Destino

SSID Encoding	CRRSSSS0	0x98
---------------	----------	------

Bit Position 76543210

Nota: Fuente: (Beech et al., 1997)

Control. Cada tipo de trama tiene su estructura para el octeto de control, por lo que existen diferentes formatos dependiendo del tipo de trama que se esté enviando, así como el número de tramas necesarias para enviar la información ya que el campo de control puede constar de 1 o hasta 2 octetos y su estructura es la siguiente (Beech et al., 1997):

Tabla 14

Estructura de Campo de Control Para Tramas Modulo 8

Control Field Type	Control-Field Bits							
	7	6	5	4	3	2	1	0
I Frame	N(R)	N(R)	N(R)	P	N(S)	N(S)	N(S)	0
S Frame	N(R)	N(R)	N(R)	P/F	S	S	0	1
U Frame	M	M	M	P/F	M	M	1	1

Nota: Fuente:(Beech et al., 1997)

Tabla 15

Estructura de Campo de Control Para Tramas Modulo 128

Control Field Type	Control-Field Bits															
	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
I Frame	N(R)	N(R)	N(R)	N(R)	N(R)	N(R)	N(R)	P	N(S)	N(S)	N(S)	N(S)	N(S)	N(S)	N(S)	0
S Frame	N(R)	N(R)	N(R)	N(R)	N(R)	N(R)	N(R)	P/F	0	0	0	0	S	S	0	1

Nota: Fuente: (Beech et al., 1997)

- **Bit 0:** todas las tramas de información (I) tienen inicializado el bit 0 en "0".

- **N(S):** indica el número de secuencia de envío del emisor (el número de trama que se está enviando), siendo el bit 1 el LSB,
- **N(R):** indica el número de secuencia recibida del emisor (el número de la siguiente trama esperado), siendo el 5 o el 9 (dependiendo el modulo) el LSB
- **S:** son los bits de supervisión que se encargan de reconocer tramas y de realizar la solicitud de reenvío de tramas de información (I), estas tramas no cuentan en el número de tramas de información enviadas pues no cuentan con información.
- **M:** son los bits modificadores de tramas no numeradas, son tramas encargadas establecer y terminar enlaces de transmisión. También son utilizadas para el envío y recepción de información fuera del control normal de tramas. (Beech et al., 1997)

Tabla 16

Estructura de Campo de Control Para Tramas S Modulo 8

Control Field Type	Control-Field Bits							
	7	6	5	4	3	2	1	0
Receive Ready (RR)	N(R)	N(R)	N(R)	P/F	0	0	0	1
Receive Not Ready (RNR)	N(R)	N(R)	N(R)	P/F	0	1	0	1
Reject (REJ)	N(R)	N(R)	N(R)	P/F	1	0	0	1
Selective Reject (SREJ)	N(R)	N(R)	N(R)	P/F	1	1	0	1

Nota: Fuente:(Beech et al., 1997)

Tabla 17

Estructura de campo de control para tramas S modulo 128

Control Field	Control-Field Bits							
---------------	--------------------	--	--	--	--	--	--	--

Type	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
Receive Ready (RR)	N(R)	N(R)	N(R))	N(R)	N(R))	N(R)	N(R))	P/F	0	0	0	0	0	0	0	1
Receive Not Ready (RNR)	N(R)	N(R)	N(R))	N(R)	N(R))	N(R)	N(R))	P/F	0	0	0	0	0	1	0	1
Reject (REJ)	N(R)	N(R)	N(R))	N(R)	N(R))	N(R)	N(R))	P/F	0	0	0	0	1	0	0	1
Selective Reject (SREJ)	N(R)	N(R)	N(R))	N(R)	N(R))	N(R)	N(R))	P/F	0	0	0	0	1	1	0	1

Nota: Fuente:(Beech et al., 1997)

El estatus de la TNC al otro lado del enlace puede solicitarse enviando una trama de comando RR, RNR, o REJ con el bit P en 1.

- **RR Receive Ready:** La estación que envía el RR está disponible para recibir más tramas de información (I) y reconoce que se han recibido correctamente las demás tramas hasta número de trama N(R)-1, también libera del estado RNR.
- **RNR Receive Not Ready:** La estación no está disponible para recibir más tramas ya que se encuentra ocupada, las tramas hasta la N(R)-1 se han recibido correctamente.
- **REJ Reject Frame:** Este comando solicita la retransmisión de tramas de información comenzando con N(R), las tramas anteriores a N(R)-1 han sido recibidas correctamente. Solo se permite un estado de REJ en cada dirección al mismo tiempo, una vez que se reciben las tramas de información hasta el N(R) que causó el REJ éste estado se libera.
- **SREJ Selective Reject:** Se utiliza para solicitar la retransmisión de una sola trama de información (I) numerada como N(R), si el bit P/F se encuentra en "1" las

tramas numeradas hasta N(R)-1 son consideradas como reconocidas, si se encuentra en "0" indica que no se reconoce la llegada de ninguna trama de información. Para liberar el estado de SREJ se debe de recibir la trama de información con N(S) igual al N(R) de la trama de control con SREJ. La TNC receptora puede transmitir más de una trama SREJ con diferente N(R) y el bit P establecido en "0", una trama de SREJ no se transmite si aún no se ha liberado un estado de REJ y viceversa.

- **P/F (Poll/Final):** es un bit presente en todos los tipos de trama utilizado para solicitar respuestas a tramas tanto de control como de información y no numeradas (Beech et al., 1997).

Tabla 18

Estructura de Campo de Control Para Tramas U

Control Field Type	Type	Control-Field Bits							
		7	6	5	4	3	2	1	0
Set Asynchronous Balance Mode Extended (SABME)	Command	0	1	1	P	1	1	1	1
Set Asynchronous Balance Mode (SABM)	Command	0	0	1	P	1	1	1	1
Disconnect (DISC)	Command	0	1	0	P	0	0	1	1
Disconnect Mode(DM)	Response	0	0	0	F	1	1	1	1
Unnumbered Acknowledge (UA)	Response	0	1	1	F	0	0	1	1
Frame Reject (FRMR)	Response	1	0	0	F	0	1	1	1
Unnumbered Information (UI)	Either	0	0	0	P/F	0	0	1	1
Exchange Identification (XID)	Either	1	0	1	P/F	1	1	1	1
Test (TEST)	Either	1	1	1	P/F	0	0	1	1

Nota: Fuente: (Beech et al., 1997)

Identificador De Protocolo. El identificador de protocolo o (PID) aparece en las tramas de información numerada y no numerada, sirve para identificar que protocolo de capa 3 se está utilizando incluso indica si se está utilizando alguno. Las X indican todas las combinaciones posibles reservadas para protocolos de capa 3 que se puedan implementar en el futuro, su uso deberá ser acordado por los miembros de la transmisión (Beech et al., 1997).

Tabla 19*Formato de Bits de Identificador de Protocolo Para Tramas I y UI*

HEX	Binary	Layer 3 Type
**	XX01XXXX	AX. 25 Layer 3 Implemented
**	XX10XXXX	AX. 25 Layer 3 Implemented
0x01	00000001	ISO 8208/CCITT X.25 PLP
0x06	00000110	Compressed TCP/IP Packet Van Jacobson (RFC 1144)
0x07	00000111	Uncompressed TCP/IP Packet Van Jacobson (RFC 1144)
0x08	00001000	Segmentation Fragment
0xC3	11000011	TEXNET Datagram Protocol
0xC4	11000100	Link Quality Protocol
0xCA	11001010	AppleTalk
0xCB	11001011	AppleTalk ARP
0xCC	11001100	ARPA Internet Protocol
0xCD	11001101	ARPA Address Resolution Protocol
0xCE	11001110	Flex Net
0xCF	11001111	NET/ROM
0XF0	11110000	No Layer 3 Protocol
0xFF	11111111	Escape Character Next octet contains more Layer 3 protocol Information

Nota: Fuente: (Beech et al., 1997).

Información. Es el cuarto campo para las tramas de servicio (S) y sin numerar (U) y el quinto para las tramas de información (I). Tiene una longitud predeterminada de 256 octetos y debe de contener un número integral de octetos siendo esto considerado antes del proceso de Bit-Stuffing.

Aquí se encuentra la información de los usuarios de manera transparente omitiendo la inserción de bits "0" en el proceso de Bit-Stuffing (Beech et al., 1997).

FCS. Es un número de 16 bits calculado en ambos lados de la comunicación, para asegurar que la trama no esté corrupta por el medio de transmisión, éste se calcula utilizando el polinomio $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$ de acuerdo a las recomendaciones en el documento de referencia de HDLC, ISO 3309, donde la información a transmitir se le agregan 16 ceros y se procede a realizar la división binaria de modulo-2 para obtener el numero CRC del residuo de la operación. (N. Williams, 1993).

Figura 21

Formato ISO 3309 para FCS

Packet Error Detection

Frame Check Sequence (FCS) ISO 3309

Two aspects are required to form a strong function:

1. **WIDTH:** A register width wide enough to provide a low a-priori probability of failure (e.g. 16-bits gives a 1 in 2^{16} chance of failure).
2. **CHAOS:** A formula that gives each input byte the potential to change any number of bits in the register.*

ISO 3309 Polynomial is $x^{16} + x^{12} + x^5 + 1$
or in binary 1000100000010001

$$\text{FCS} = \text{Remainder of } \frac{\text{Message in binary plus 16 0s}}{1000100000010001}$$

Nota: Imagen extraída de (N. Williams, 1993)

Bit De Relleno. Para evitar que la secuencia de la bandera “01111110” se presente dentro de la sección de información de forma accidental, en éste proceso la estación emisora se encarga de agregar un bit 0 después de cualquier incidencia de cinco 1’s consecutivos así como la estación receptora descarta cualquier bit 0 después de cinco 1’s consecutivos en la trama que esté recibiendo. (Beech et al., 1997).

Otras Consideraciones

Orden De Transmisión De Bits. Todos los bits de la trama serán transmitidos en el mismo orden siendo el LSB el primero en ser enviado a excepción del campo de FCS, en el que el MSB será el primero en ser enviado (Beech et al., 1997).

- **Tramas inválidas.** Una trama se considera inválida si presenta una de las siguientes situaciones; Contiene menos de 136 bits (17 bytes) incluyendo la bandera inicial y la final, No están presentes las banderas de inicio y fin, No hay una cantidad

integral de octetos considerando esto después de revertir el Bit-Stuffing (Beech et al., 1997).

Aborto De Transmisión De Tramas. Si una trama debe de ser abortada deben enviarse por lo menos quince 1's consecutivos sin Bit-Stuffing (Beech et al., 1997).

Relleno De Tiempo Entre Tramas. Siempre que sea necesario para una TNC mantener el enlace de transmisión mientras no se están enviando tramas, éste tiempo debe ser llenado con el envío continuo de banderas "01111110" (Beech et al., 1997).

Usos. En la red de radio amateur se utiliza el protocolo AX.25 para el envío de información como protocolo de capa dos, de enlace de datos, siendo éste una variante de otro ya existente llamado HDLC ampliamente conocido por los radioaficionados. AX.25 cuenta con mecanismos adicionales de capa de red y de la capa de transporte como el enrutamiento estático y control de flujo de paquetes respectivamente. Éste protocolo se creó a inicios de la década de los 80's cuando la red de telefonía e internet no eran lo suficientemente disponibles en la sociedad. Siendo así una de las pocas redes de largo alcance y de uso particular, sin embargo fuera de los radioaficionados no fue muy popular. Actualmente se utiliza éste protocolo principalmente para la transmisión de telemetría en conjunto del protocolo de APRS (Zielinski, 2009).

Metodología De Desarrollo De Sistemas Espaciales

Un sistema se entiende por la combinación de elementos que juntos poseen la capacidad de cubrir una necesidad, tales elementos incluyen hardware, software, instalaciones, personal, procesos y procedimientos. La ingeniería en sistemas se encarga de lograr el desarrollo de sistemas que cumplan con los requerimientos establecidos buscando un balance entre múltiples y a veces opuestas restricciones. Usualmente se presenta la tarea principal del desarrollo del concepto de operaciones y la arquitectura final del sistema.

Los Procedimientos Técnicos Comunes En Ingeniería De Sistemas NASA

Existen tres bloques de procesos comunes que se utilizan dentro del NPR 7120.8 que son las reglas de procesos y requisitos de ingeniería de sistemas para diseño del sistema y productos de la NASA (Shea, 2020).

Diseño del sistema. Definición de expectativa por parte de los interesados, Definición de requerimientos técnicos, Descomposición lógica, Definición de diseño de soluciones.

Realización del producto. Planeación técnica, Administración de requerimientos, Administración de riesgos técnicos, Administración de conjuración, Administración de información técnica, Evaluación técnica, Análisis de decisiones.

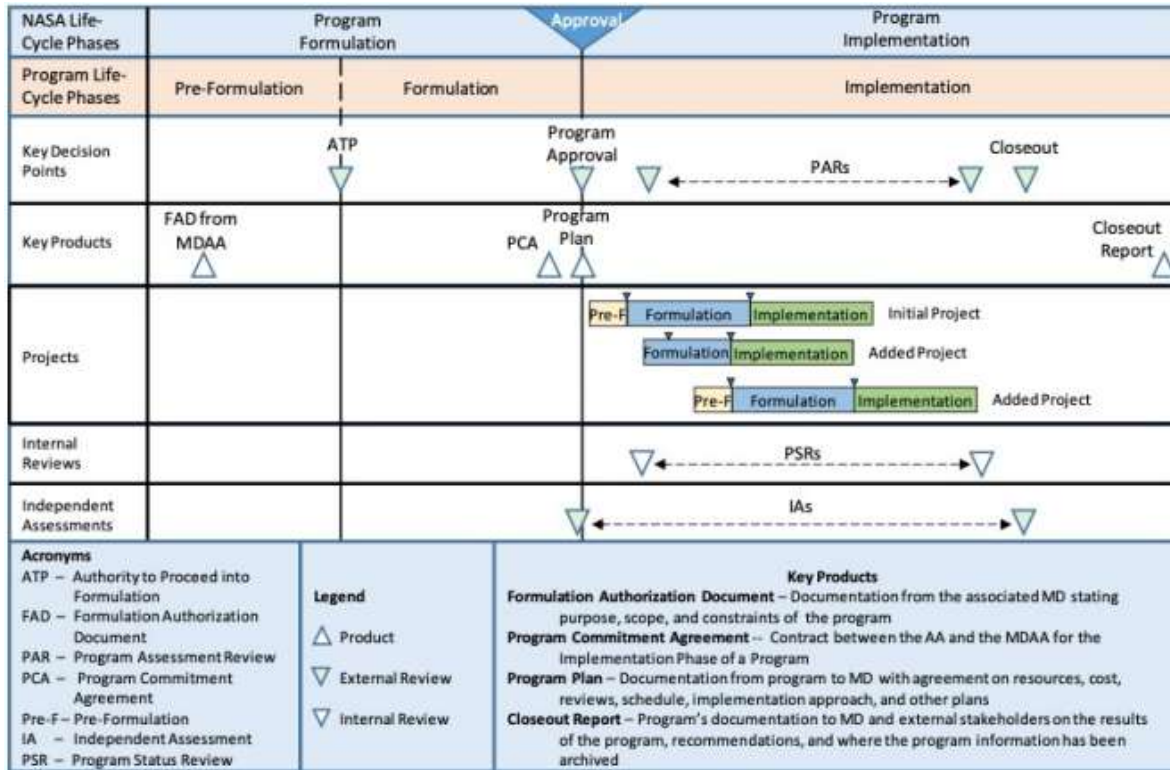
Administración técnica. Implementación del producto, Integración del producto, Verificación del producto, Validación del producto, Transición del producto.

Éstos procesos son implementados de manera recursiva e iterativa dentro del motor de desarrollo de ingeniería de sistemas de NASA, el cual separa las fases que definirán el ciclo del vida del proyecto, que será utilizado como referencia para determinar la madurez del sistema así como el progreso de desarrollo desde el concepto hasta el sistema implementado a través de 7 fases.

(Shea, 2020)

Figura 22

Diagrama De Ciclo De Vida De Proyecto Formato NPR 7120.8



Nota: Imagen extraída de (Hoffpaur, 2018)

Tabla 20*Tabla de Fases del Ciclo de Vida de un Proyecto Espacial*

Fase		Descripción	Propósito	Resultados
Pre-formulación	Pre-Fase A	Estudio de concepto	<ul style="list-style-type: none"> • Producir ideas y alternativas. • Determina la viabilidad del sistema deseado • desarrollar conceptos de la misión • borrador a nivel de requisitos del sistema • evaluar el desempeño, costo y factibilidad del cronograma • identificar posibles necesidades tecnológicas y alcances. 	Conceptos de sistema factible en la forma de simulaciones, análisis, informes de estudio, modelos, y maquetas
	Fase A	Desarrollo de concepto y tecnología	<ul style="list-style-type: none"> • Para determinar la viabilidad y conveniencia de una nueva propuesta del sistema • establecer compatibilidad inicial de referencia con los planes estratégicos de la NASA • Desarrollar el concepto final de la misión • Desarrollar los requerimientos a nivel de sistema • Desarrollar tecnología necesaria para desarrollo del sistema • Desarrollar los planes de manejo técnico del proyecto o programa. 	Definición del concepto del sistema en forma de simulaciones, análisis, modelos de Ingeniería, maquetas y estudio del mercado
Formulación	Fase B	Diseño preliminar y terminación de tecnología	<ul style="list-style-type: none"> • Definir el proyecto con suficiente detalle para establecer una base inicial que satisfaga las necesidades de la misión. • Desarrollar los requerimientos de la estructura del sistema del producto final • Generar un diseño preliminar para cada producto final de la estructura del sistema. 	Productos finales en forma de maquetas, estudio comercial resultados especificación e interfaz

	Fase C	Diseño final y fabricación	<ul style="list-style-type: none"> • Para completar el diseño detallado del sistema (y sus subsistemas asociados, incluidas sus operaciones sistemas) • fabricar hardware y codificar software. • Generar diseños finales para cada extremo de la estructura del sistema. 	documentos y prototipos Producto final Detallado diseños, producto final Componente fabricación, y software desarrollo
	Fase D	Ensamblaje, integración y pruebas de sistema Lanzamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Montar e integrar el sistema (hardware, software y humanos), con la confianza de que cumple los requerimientos del sistema • Lanzar y prepararse para operaciones. • Realizar el fin de la implementación del sistema, tanto en ensamblaje, integración, pruebas, y transición para su uso 	Listo para operaciones del sistema. Producto final con soporte relacionado a habilitar el producto Sistema deseado
Implementación	Fase E	Operación y soporte	<ul style="list-style-type: none"> • Llevar a cabo la misión y cumplir con los • Necesidad inicialmente identificada y mantener • apoyo para esa necesidad. Implementar el • plan de operaciones de la misión. 	
	Fase F	Cierre	<ul style="list-style-type: none"> • implementar el plan de desmantelamiento / eliminación del sistema desarrollado en la Fase E • Realizar análisis de los datos devueltos y cualquier muestras devueltas. 	Cierre de producto

Nota: Fuente: (Shea, 2020)

Metodología De Desarrollo De Placas PCB Para Uso Espacial

Algunos de los problemas que se presentan a la hora de hacer diseño de placas de circuito impreso están altamente relacionados con la densidad de componentes en la placa que genera diseños complejos, el ruteo de dichos componentes, el manejo dispositivos con una gran cantidad de pines muy delgados, conexiones intrincadas, uso de micro vías en sus diferentes configuraciones, así como problemas eléctricos, como son integridad de la señal, integridad de la potencia, compatibilidad electromagnética y manejo de la disipación térmica, los cuales son problemas y situaciones que también se presentan en los PCB diseñados para el espacio con algunas pequeñas diferencias, sin embargo éstos últimos deben ser diseñados considerando a demás otros factores relacionados al medio ambiente en el cual estarán funcionando, donde se presentan problemas como estrés térmico, radiación espacial y un nivel alto de vacío, lo que puede hacer que los circuitos fallen con facilidad o que los materiales presenten comportamientos diferentes que los que se presentan en la tierra mayormente por la protección que nos ofrece la atmosfera, así como estrés mecánico por choques y vibraciones a altas frecuencias debido a la lanzamiento en cohete. Por lo que existen recomendaciones para el diseño y evitar el malfuncionamiento de una placa de circuito impreso en el espacio los cuales se exponen a continuación (Bhatt et al., s/f):

- Evitar objetos que almacenen y acumulen carga como áreas aisladas de cobre y dieléctricos como FR4.
- Evitar el uso de Kapton que es un buen almacén de carga, en su lugar utilizar.
- Las pistas aisladas con una longitud mayor a 0.3 cm^2 deben ser conectadas a tierra.
- El material dieléctrico del PCB expuesto debe ser cubierto con cobre y aterrizado al plano de tierra.
- Se recomienda el uso de revestimiento conformal para el PCB.
- Es recomendable utilizar placas de alta densidad por su baja susceptibilidad a las partículas cargadas.

- Debe considerarse una reducción de un 66% de la capacidad de transporte de corriente de la pista en el espacio debido al vacío, a diferencia de un 25% que se considera en diseños comerciales para tierra.
- Las vías ciegas no son permitidas para el modelo de vuelo.
- Las vías through-hole deben ser platinados.
- No utilizar dispositivos con valores variables como capacitores en el modelo de vuelo.
- La distribución de componentes debe ser lo más simétrica posible para evitar torsiones en la tarjeta.
- Las zonas de patrones de conductores y dieléctricos deben tener un área mayor a 0.1mm para evitar que se desprendan.
- Las redes críticas deben ser colocadas en la misma capa o utilizando el número mínimo de vías.

Consideraciones Para Lograr Integridad En La Señal

Existen varios motivos por los que se puede perder la integridad en la señal, algunos de estos motivos son los siguientes; La alta frecuencia de operación puede causar que la pista comience a comportarse como una línea de transmisión debido a los armónicos que genera y generar problemas de interferencia. La reflexión de la señal puede ocurrir por un cambio o discordancia de la impedancia de la pista, para minimizar este efecto se recomienda mantener el ancho de las pistas constante, así como mantener un plano de tierra constante y utilizar terminaciones de líneas adecuadas. Y por último, para evitar interferencias entre capas se recomienda utilizar ruteo ortogonal de forma que las pistas de una capa se encuentren en una dirección distinta respecto a las de la capa contigua (Bhatt et al., s/f).

Consideraciones Para Lograr Integridad En La Potencia

Para circuitos de alta velocidad la fluctuación de corriente puede ocasionar errores de temporización, por lo que el voltaje se debe de mantener estable, para esto se utilizan capacitores de desacoplamiento que mantienen el voltaje dentro de las tolerancias esperadas en los pines de alimentación del circuito integrado, también se recomienda el uso de múltiples capacitores de desacoplamiento a forma de redundancia (Bhatt et al., s/f).

Consideraciones Para Lograr Compatibilidad Electromagnética

Las áreas donde se forman bucles son las principales causantes de radiación electromagnética en tarjetas PCB, siendo localizados en las pistas que transportan señales y la ruta de regreso, para minimizar éstos efectos se recomienda minimizar lo más posible el área interna del bucle, aislar componentes críticos de las pistas para minimizar los efectos de la radiación electromagnética, así como pistas con señales débiles como interrupciones, reset entre otras deben aislarse de las líneas de alta velocidad, así como haciendo la separación de zonas por grupos componentes como alta frecuencia/radio frecuencia de los componentes digitales y de los componentes analógicos, y por último hacer el ruteo de circuitos críticos alejado de circuitos de entrada/salida (Bhatt et al., s/f).

Consideraciones Para Manejo De Disipación Térmica

La disipación térmica es importante porque permite mantener los componentes en temperaturas aceptables para su operación, sin embargo el material dieléctrico de los PCB es un mal conductor térmico, a diferencia del cobre que puede ser utilizado como un disipador de calor pasivo por su buena conductividad térmica, por otro lado si el tamaño del patrón o pista no es adecuado para la cantidad de corriente puede ser una fuente más de generación de calor. Para una PCB de grado espacial, componentes que requieren disipar más de 1W deben incluir un disipador de calor ya que el calor puede generar problemas de uniones en soldaduras o roturas. Una opción para reducir esto es el uso de un plano metálico utilizado como disipador conectado por vías, teniendo el cuidado de no utilizarse para conexiones eléctricas (Bhatt et al., s/f).

Consideraciones Para Diseño De PCB De Radio Frecuencia

Existen algunas prácticas especiales y consideraciones que se deben de tomar para tarjetas de circuito impreso que van a utilizar dispositivos con radio frecuencia. (Bhatt et al., s/f)

- Se deben separar las entradas de las salidas en filtros y amplificadores así como funcionar en direcciones opuestas manteniendo la impedancia.
- Se deben proteger las señales débiles de radiofrecuencia blindando sus pistas de transmisión con cobre

- Se debe minimizar o evitar lo más posible el uso de vías
- No utilizar ruteo ortogonal
- Utilizar el mínimo número de capas
- Utilizar pads de alivio térmico
- Utilizar vías de tierra a ambos lados de pistas sensibles

Metodología

Pre formulación

Estudio de concepto para la misión de KuauhtliSat: el Ulises II

Descripción General. La misión del satélite consiste en tomar fotografías desde el espacio, la misión tiene una duración estimada de 4 meses de funcionamiento sobre una órbita baja polar aproximadamente entre 300 a 400 km de altura, la estructura que se utilizará para la protección de los subsistemas estará sujeta a la arquitectura TubeSat la cual cuenta con una forma cilíndrica, similar a la del nanosatélite Ulises 1, el cual contaba con un peso de 0.75 Kg, una altura de 12.7 cm y un diámetro de las caras superior e inferior de 9.25 cm.

Limitaciones A Bordo. El satélite debe sujetarse a limitaciones de masa, con lo que ésta debe ser inferior a 1Kg, una altura máxima de 20 cm y las caras superiores e inferiores de 10 cm de diámetro, otra limitación es que se cuentan recursos limitados para el financiamiento del satélite.

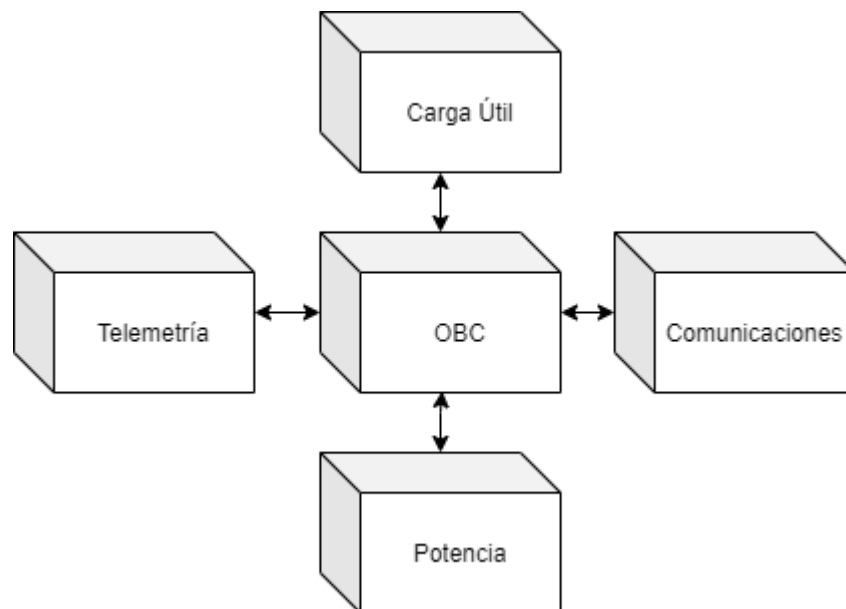
El subsistema está sujeto al funcionamiento en conjunto de otros 4 subsistemas, los cuales son; El subsistema de Carga útil, el cual realiza una captura de fotografías que va almacenando en una tarjeta de memoria SD, el subsistema de telemetría, el cual consta de varios sensores los cuales ayudarán tener un conocimiento del estado operativo del satélite y poder detectar posibles fallos, El subsistema de potencia el cual es el encargado de hacer la captación y gestión de la energía a bordo del satélite, el cual está conectado a cada uno de los demás

subsistemas para poder hacer la distribución de la energía y por último la computadora a bordo y OBC (On Board Computer), la cual se encarga de hacer la gestión de los modos de operación del satélite y realizar el procesamiento de los datos recibidos desde tierra, éste subsistema se conecta con cada una de las computadoras a bordo de cada uno de los demás subsistemas para hacer la coordinación de operaciones e incluso activar o desactivar subsistemas.

La comunicación principal entre subsistemas es utilizando el protocolo de comunicación digital I2C, siendo que la configuración que se tendría de los diferentes subsistemas se presenta en la Figura 23.

Figura 23

Esquemático General de los Subsistemas a Bordo



Nota: Elaboración propia.

Limitaciones En Tierra. El sistema debe estar contemplado para el funcionamiento coordinado con la estación terrena de la unidad de alta tecnología de la UNAM, la cual cuenta con elementos principales que se enlistan en la Tabla 21. Al ser el radio transceptor el dispositivo que se encargará de la sintonización de la señal,

modulación y demodulación de los comandos y de las señales recibidas, también cuenta con las capacidades para hacer la detección de tonos de CW emitiendo el sonido en una frecuencia audible al oído humano, además de contar con un TNC interno el cual realiza las funciones de manejo de paquetes utilizando el formato AX.25. El radio cuenta con una interface para conectarse a la computadora y ser utilizado utilizando una interfaz virtual para hacer el control de la configuración, así como transmisión y recepción de información a través de la tarjeta de audio de la computadora.

La antena está diseñada para trabajar en una banda de 70 cm, entre las frecuencias de 432 MHz y 440 MHz. El rotor permite hacer el control del servomotor con el cual es posible realizar apuntamiento con la antena en azimut y elevación para hacer el seguimiento del satélite durante su movimiento en órbita. La interfaz de control por computadora del rotor permite hacer el ajuste de la dirección de apuntamiento de la antena utilizando un software con la dirección de la trayectoria que seguirá el satélite en cada pasaje. De acuerdo a estos componentes la infraestructura general de la estación terrena se ilustra en la Figura 24.

Tabla 21

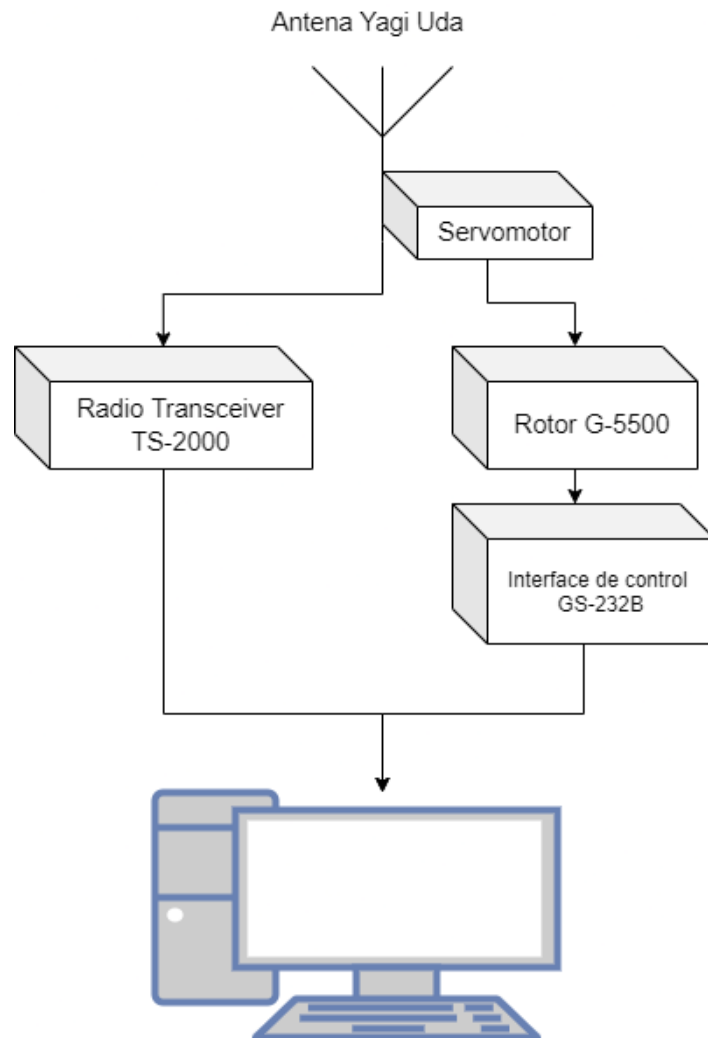
Lista De Instrumentos de la Estación Terrena Para el Proyecto

Tipo de instrumento	Marca	Modelo
Radio transceptor	Kenwood	TS-2000
Antena Yagi Uda	M2	436CP30
Rotor y Servomotor	Yaesu	G-5500
Controlador de Interfaz por computadora	Yaesu	GS-232B

Nota: Elaboración propia.

Figura 24

Esquemático General de la Estación Terrena que Controlará el Sistema



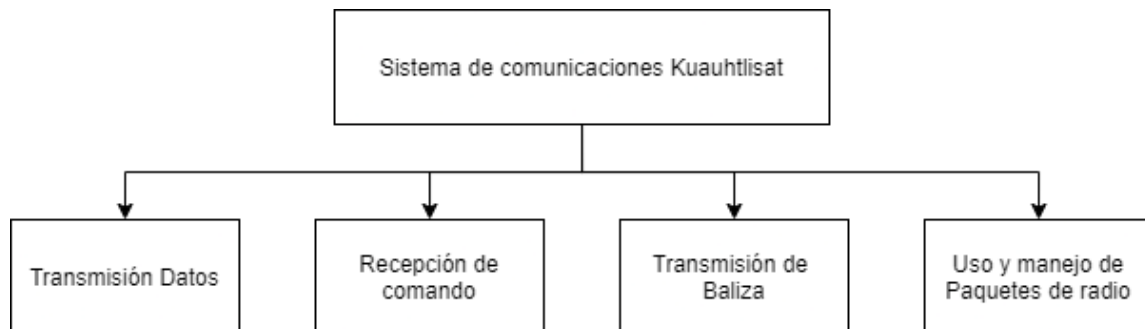
Nota: Elaboración propia.

Estudio de concepto para el subsistema de comunicaciones

Descripción General. Este subsistema deberá tener las capacidades de realizar la transmisión de información de la carga útil (fotografías) y telemetría utilizando paquetes de radio, transmisión de beacon para identificación del satélite y recepción de comandos.

Figura 25

Requerimientos del Subsistema de Comunicaciones



Nota: Elaboración propia.

Formulación

Desarrollo de concepto y tecnología

De acuerdo a los requerimientos establecidos anteriormente, para realizar las funciones de transmisión, recepción y manejo de datos, hay que tener varios aspectos a tomar en cuenta, como son las operaciones de trabajo a los que estarán sometidos los dispositivos, el concepto de operación, las configuraciones necesarias para entrar dentro de los estándares para la comunicación, y realizar un diseño viable para el subsistema de comunicaciones a nivel de funcionalidad como a nivel económico.

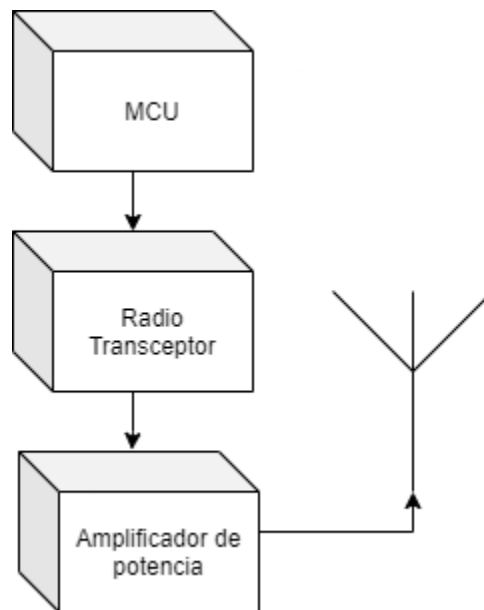
Los dispositivos básicos con que debe contar el subsistema son los siguientes; La computadora del subsistema, la cual está conformada por un micro controlador el cual realizará las funciones de comunicación con la computadora principal (OBC) para recibir las indicaciones para realizar cambios entre sus modos de operación y ejecutar dichas operaciones, otra de las funciones que tiene éste componente es el manejo y tratamiento de la información proveniente desde la computadora de a bordo, que puede ser información de telemetría o de la carga útil, así como de la información que reciba desde el dispositivo transceptor desde tierra y comunicarle a la OBC.

El radio transceptor, el que es el encargado de realizar la conversión de la información digital a señales de radio, realizando operaciones de modulación y demodulación

dependiendo de la configuración dada por el micro controlador. El amplificador de potencia, el cual se encargará de aumentar la potencia de la señal transmitida para que pueda ser detectada en la tierra. La antena, antena, cuya función será la propagación de las ondas de radio que llevan la información deseada en el modo de transmisión y la captación de las ondas emitidas por la estación terrena que contienen comandos para el satélite.

Figura 26

Componentes Generales del Subsistema de Comunicaciones



Nota: Elaboración propia.

Concepto De Operación. El satélite al encontrarse en una órbita baja tendrá pasajes constantes sobre la estación terrena, que variarán en tiempo dependiendo del momento de la órbita en la que se encuentre, solo durante éste tiempo se podrá hacer contacto con el satélite, desde aparezca en el horizonte hasta que se oculte en el otro extremo del horizonte, ya que se encuentra dentro de la línea de vista para recibir señales.

El primer paso para establecer contacto con el satélite es ubicar en que parte se encuentra para poder realizar el apuntamiento adecuado de las antenas de la estación terrena, en cuanto se sepa que el satélite debe de estar por salir en el horizonte en la dirección del apuntamiento se comenzará con la transmisión del comando de activación, con el cual el satélite saldrá del modo de bajo consumo para ahorro de energía, inmediatamente el satélite comenzará con su rutina de comunicación de baliza, la cual es un mensaje que ayuda a identificar al satélite, también da a conocer el estado operativo del sistema como que el satélite puede recibir señales y se encuentra en funcionamiento. Una vez activado el faro del satélite, el mensaje con la identificación se transmitirá periódicamente dejando entre medias un espacio en modo recepción en espera de una respuesta en forma de comando de la estación terrena, éste ciclo debe tener una duración máxima de un periodo de avistamiento, ya que no se tiene permitido la transmisión fuera de la zona delimitada por los permisos de transmisión. Al recibir la señal de baliza en la estación terrena se sabe que el satélite está activo y en espera de recibir un comando, por lo que se procede a hacer la transmisión del comando haciendo una solicitud de imagen o de telemetría. El satélite al recibir un comando, interrumpirá la transmisión de la señal de baliza, tanto para hacer un ahorro de energía como para notificar que se recibió el comando correctamente, dicho comando será recuperado por el subsistema de comunicaciones y enviado a la computadora principal la cual realizará las operaciones indicadas, posteriormente regresará la información solicitada a la computadora del subsistema de comunicaciones la cual se encargará de realizar la construcción de las tramas de información y transmitir las de regreso a la tierra. Una vez concluido con éste proceso de transmisión el satélite volverá a su estado inicial de bajo consumo a espera de establecer un nuevo enlace. Este proceso es ilustrado en la figura 27.

Figura 27

Diagrama de Bloques Concepto de Operación



Nota: Elaboración propia.

Diseño preliminar y terminación de tecnologías

Para la selección de los dispositivos que formarán parte del subsistema se deben considerar las condiciones de temperatura a la que se estarán utilizando, por lo que se considerarán dispositivos con temperaturas de operación entre los -40 C° como mínima y $+90\text{ C}^\circ$ como máxima, entre mayores sean las temperaturas máximas de operación, mejor.

En un inicio se contempló el uso de un dispositivo de radio AFS2-436 con su respectivo amplificador de potencia TR2M-436.50-10-ARS que forman parte de un kit de desarrollo para nanosatélites tipo TubeSat procedente de Interorbital Systems, en torno a éste dispositivo se plantearon algunas propuestas preliminares de implementación de un sistema similar que se acoplara a los demás subsistemas del proyecto. Las características técnicas de dichos dispositivos se describen en la tabla 22 y 23.

Figura 28

Fotografía del Transceptor de Radio Multibanda Radiometrix TR2M-436.50



Nota: Fotografía propia.

Tabla 22

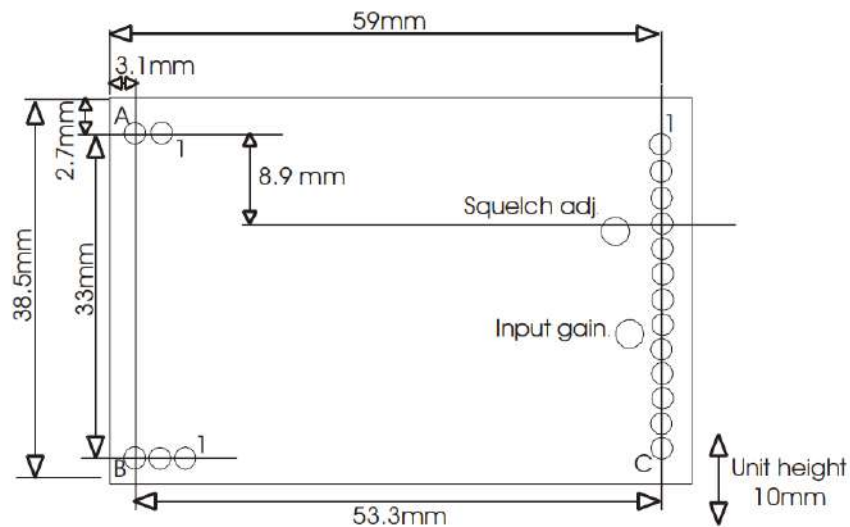
Tabla de Características Operativas del Radio Transceptor TR2M-436.50

Característica	Valor
Potencia de transmisión máxima	100mW (+20dBm)
Tipo de modulación	FM, FSK
Ancho de banda para modulación	3kHz
Frecuencia	458.5-459.1 MHz o 433-434MHz
Estabilidad de frecuencia	+/- 1.5 kHz
Pasos de sintonización	3 MHz
Rango de frecuencias de operación	420-475 MHz
Temperatura de operación	-10 a +60 °C
Temperatura de almacenamiento	-30 a +70 °C
Voltaje de operación	4.5-16 V
Consumo de corriente (transmisión)	110 mA
Consumo de corriente (recepción)	27 mA
Tamaño	59 x 38 x 10 mm
Formato de entrada de información	Analógica, compatible con CMOS/TTL
Sensibilidad	-118 dBm
Tasa de Datos máxima	10 kbps

Nota: Datos extraídos de (Radiometrix Ltd, 2015)

Figura 29

Diagrama De Pines Del Radiotransmisor TR2M-436.50 Y Sus Medidas



Nota: Imagen extraída de (Radiometrix Ltd, 2015)

Figura 30

Amplificador de Potencia de 500mw Radiometrix AFS2-436



Nota: Fotografía propia.

Tabla 23

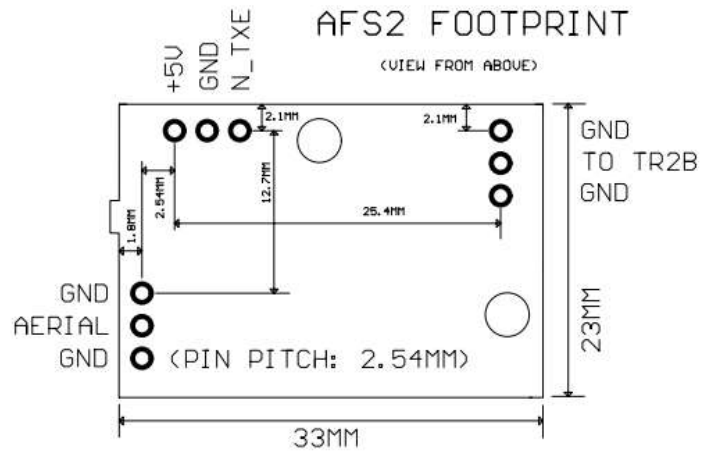
Características Operativas del Amplificador de Potencia AFS2-436

Característica	Valor
Potencia de entrada	100 mW
Potencia de transmisión	500 mW +/- 1dB
Frecuencia preestablecida	458 MHz
Pasos de sintonización para transmisión	10 MHz
Rango de frecuencias de operación	420 - 470 MHz
Temperatura de operación	-20 a +75 °C
Temperatura de almacenaje	-30 a +70 °C
Voltaje de operación	+5V
Consumo de corriente	250 mA
Tamaño	33 x 23 x 9 mm
Pérdidas de recepción y transmisión	<1 dB

Nota: Datos extraídos de (Radiometrix Ltd, 2007)

Figura 31

Diagrama de Pines del Amplificador de Potencia AFS2-436



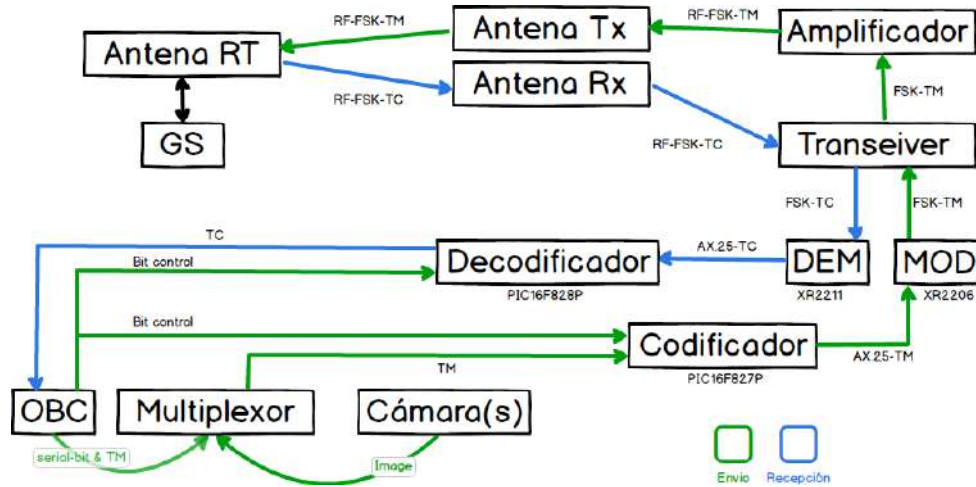
Nota: Imagen extraída de (Radiometrix Ltd, 2007)

El primer diagrama del concepto para el funcionamiento del subsistema se consideraban dos integrados para realizar las funciones de modem, principalmente el XR2211, ya que la hoja de especificaciones del radio transceptor no indicaba de qué tipo de demodulación se aplica a la información recibida. Así como que se consideraban dos microcontroladores para realizar las operaciones de codificación y decodificación del protocolo AX.25 por separado como se puede observar en la figura 32, éste modelo se basó en la configuración elegida basándose en la TNC utilizada por el equipo de Ulises I para la codificación de tramas en su estación terrena (Meza et al., 2015) pero en éste caso aplicándolo a la sección de vuelo.

Sin embargo tanto los integrados considerados para realizar la demodulación como el utilizar dos microcontroladores resulta algo redundante, ya que el radiotransmisor al establecer comunicación half-duplex únicamente no requiere de dos unidades para realizar transmisión y recepción simultánea, así como que en cuestiones de espacio y aumento de masa por componentes no es conveniente ésta configuración.

Figura 32

Primer Concepto de Implementación Usando Equipos de Radiometrix

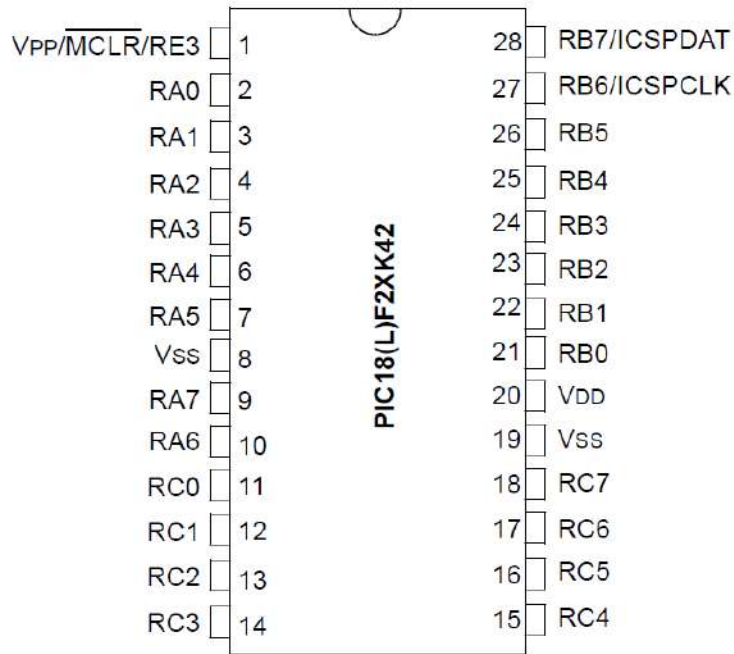


Nota: Elaboración propia.

Para la segunda propuesta del sistema se removieron los elementos mencionados anteriormente y se contempló un solo microcontrolador para realizar el manejo de las tramas para la comunicación en ambas direcciones así como para conectarse con las demás partes del subsistema, el microcontrolador fue seleccionado utilizando la herramienta de selección avanzada de partes de Microchip, buscando las cualidades principales de contar con las temperaturas de operación más altas, contar con puertos UART, I2C y SPI, tener una arquitectura de 8-bits para acoplarse mejor con las demás computadoras del sistema, tener opción de seleccionar modo de bajo consumo y tener la mayor cantidad de memoria disponible para el programa como memoria volátil, ya que la parte del software que se utilizaría aún no había sido definida en éste punto.

Figura 33

Diagrama del Encapsulado de 28 Pines del Microcontrolador PIC18F27K42



Nota: Imagen extraída de (Microchip Technology Inc, 2021)

Tabla 24

Tabla de Características Operativas del Microcontrolador PIC18F27K42

Característica	Valor
Familia	8-bit MCU
Tipo de CPU	8-bit PIC MCU
Velocidad Máxima de CPU	64 MHz
Voltaje de Operación	1.8 V – 5.5 V
Temperatura de operación	-40 a +125 °C
Número de pines	28
Tamaño de memoria de programa	128 KB
SRAM	8 KB
Tamaño de memoria EEPROM/HEF	1024 Bytes
Modo bajo consumo	5 uA a 32 kHz, 1.8 V

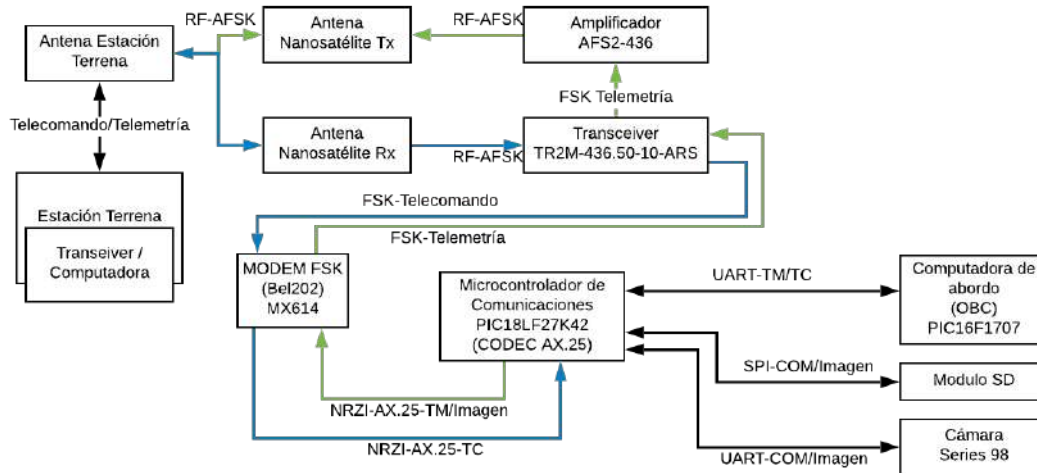
	65 uA a 65 MHz, 1.8 V
Número de puertos UART	2
Número de puertos SPI	1
Número de puertos I2C	2
Máximo de temporizadores digitales de 8 bits	3
Máximo de temporizadores digitales de 16 bits	4

Nota: Datos extraídos de (Microchip Technology Inc, 2021)

En ésta etapa del desarrollo se consideró que también se tendría acceso a la cámara para sacar fotografías, a la memoria SD para almacenar y leer fotografías, así como conectarse con la computadora principal para traspasar el comando de control recibido desde la estación terrena, así como la de la recepción de información que se desee enviar desde el satélite a la tierra para codificarla, como se puede observar en la figura 33, también se buscaron opciones más eficientes en cuestión de espacio y peso. En caso de requerir el uso de un modulador externo al radio transmisor, pues la documentación no indica claramente el tipo de modulador incorpora se contempló el modulador-demodulador MX614 que también fue utilizado en la TNC construida para Ulises I además que es un dispositivo que cuenta con herencia de vuelo, pues fue utilizado en la misión Cute-1 (Klofas, 2018).

Figura 34

Segundo Concepto de Implementación Usando Equipos de Radiometrix



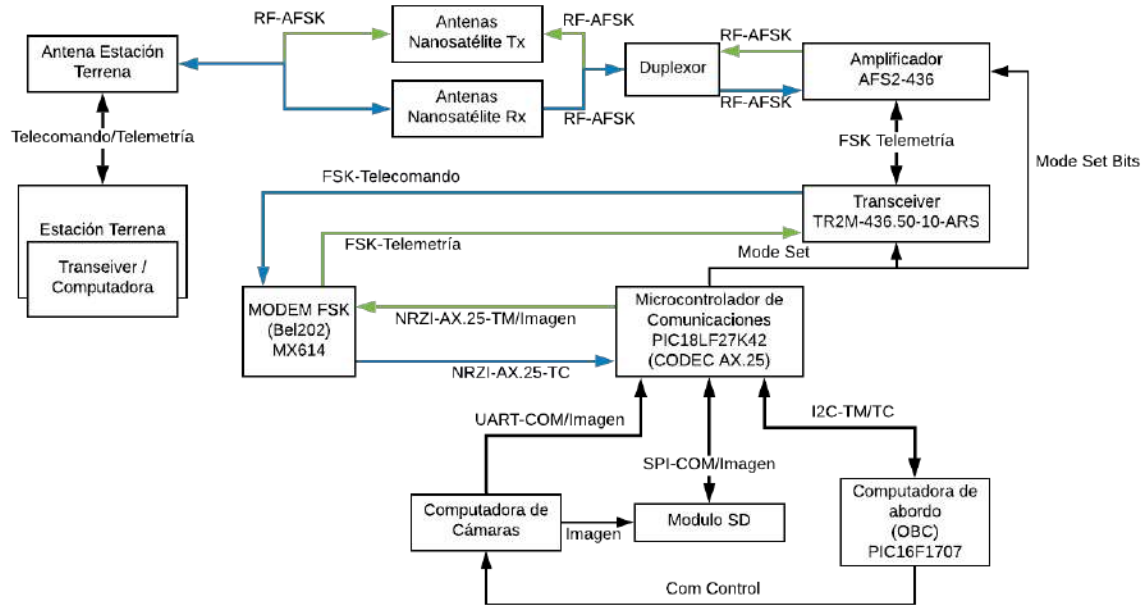
Nota: Elaboración propia.

.Desde el inicio del proyecto el modelo se consideró para el uso de dos antenas separadas, una frecuencia del enlace de radio de subida (uplink) en una frecuencia en una banda distinta a la del enlace de radio de descarga (downlink) para lo cual se debería utilizar un filtro duplexor para cada una de las frecuencias ya que el radio transmisor solamente cuenta con una sola línea de transmisión/recepción sin embargo el radio transmisor no tiene capacidades de hacer transmisión fuera de la banda de UHF por lo que se descartó ésa posibilidad de trabajar con 2 bandas de radiofrecuencia, aunque de igual manera se consideró trabajar con dos frecuencias distintas pero ambas dentro de la misma banda de frecuencias.

También se realizaron actualizaciones en el diagrama debido al cambio del protocolo de comunicación digital que sería utilizado por el microcontrolador central (OBC) para realizar la comunicación con los demás subsistemas, siendo I2C el protocolo seleccionado, como se puede observar en la figura 34.

Figura 35

Tercer Concepto de Implementación Usando Equipos de Radiometrix



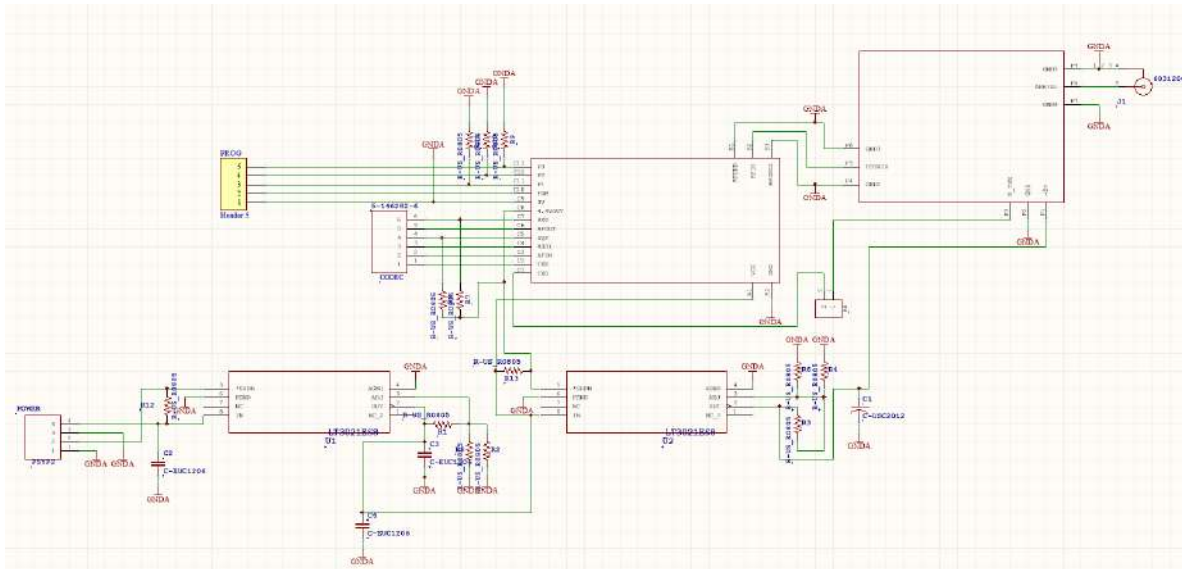
Nota: Elaboración propia.

La cantidad y el tamaño de los dispositivos de radio hacía pertinente el uso de realizar el diseño de dos tarjetas que en conjunto funcionarían como el subsistema de comunicaciones, usando como base la documentación encontrada en los archivos de proyectos de Colorado Space Grant Consortium (*TUBESAT_TX_RX_V2*, 2010) que presumiblemente puede formar parte de la documentación de un kit de TubeSat de Interorbital Systems, el diseño que se presenta en las figuras 36 y 37 presenta un cambio de interfaces y redistribución de elementos por el cambio de forma y medidas de la placa. Sin embargo la cantidad de partes que integraban al modelo presentó un problema para la asignación de rutas de las pistas utilizando una sola cara. El material contemplado para la fabricación de las tarjetas de circuito impreso (PCB) es FR4, el diseño se realizó con la menor cantidad de capas para reducir costos durante las

pruebas, por lo que solo se utilizó solo una capa de cobre con espesor de $1 \frac{oz}{ft^2}$.

Figura 36

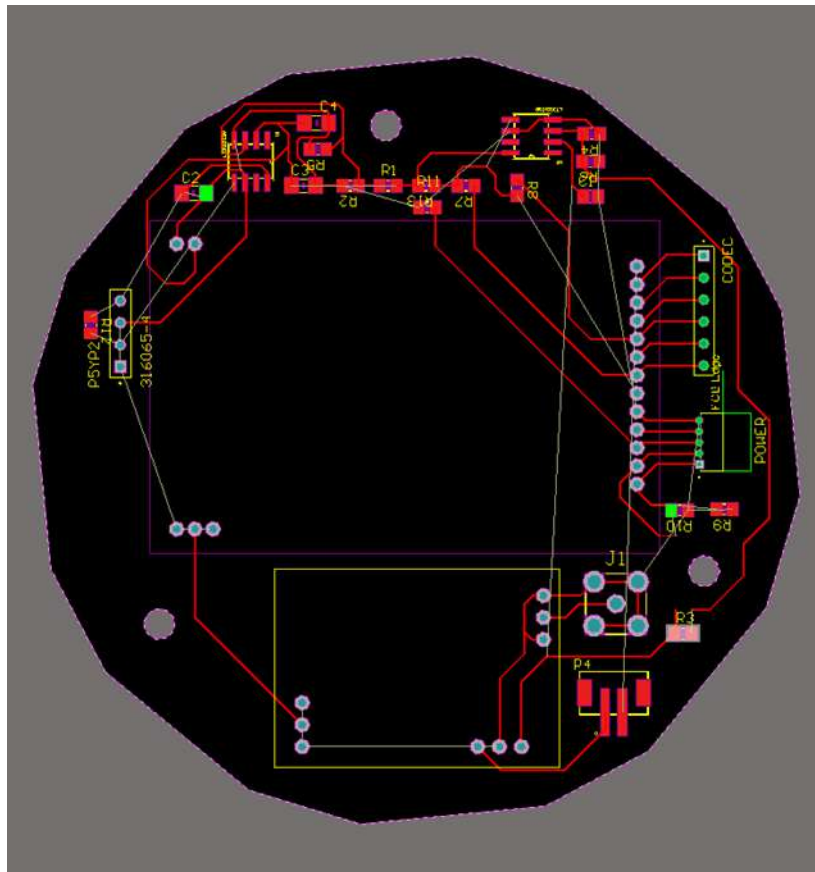
Esquemático De Tarjeta PCB De Radios Usando Equipos De Radiometrix



Nota: Captura de pantalla del diseño creado utilizando Altium Designer. Elaboración propia.

Figura 37

Ruteo de PCB de Radios Usando Equipos de Radiometrix



Nota: Captura de pantalla del diseño creado utilizando Altium Designer. Elaboración propia.

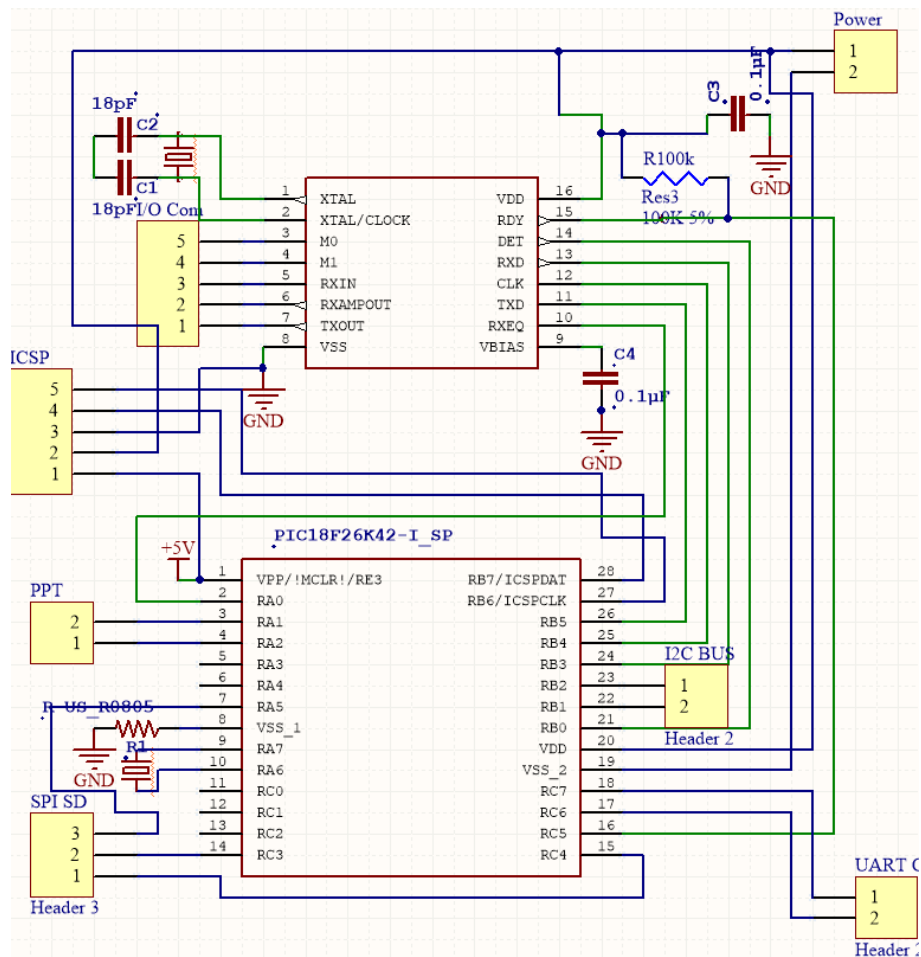
Para la placa de la computadora de comunicaciones se consideraron únicamente el modem MX614 y el microcontrolador PIC18F27K42 como componentes principales, la elección de las resistencias, cristales y capacitores fue asignado según la hoja de especificaciones de cada dispositivo con los valores recomendados para su operación típica (Microchip Technology Inc, 2021) (MX-COM INC, s/f).

Al separar el diseño en dos placas, una destinada a los dispositivos de radio y otra a la parte de computadora de comunicaciones provocó que para la placa de computadora

se tuvieron muy pocos elementos en la placa, por lo que se consideró el utilizar ésta placa en conjunto con el subsistema de OBC para hacer una mejor gestión del espacio, sin embargo, a pesar de el reducido número de componentes en la placa también se presentaron problemas para la asignación de rutas del modelo en una placa con una sola capa de cobre.

Figura 38

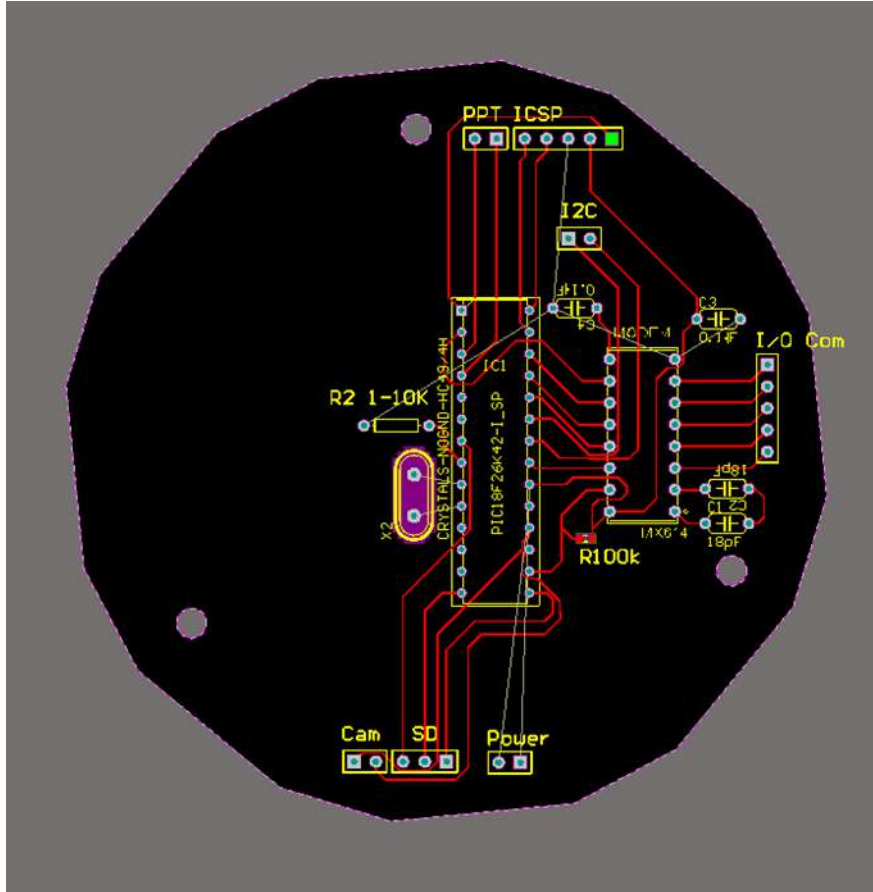
Esquemático de Tarjeta PCB de Computadora de Comunicaciones



Nota: Captura de pantalla del diseño creado utilizando Altium Designer. Elaboración propia.

Figura 39

Ruteo de Tarjeta PCB de Computadora de Comunicaciones



Nota: Captura de pantalla del diseño creado utilizando Altium Designer. Elaboración propia.

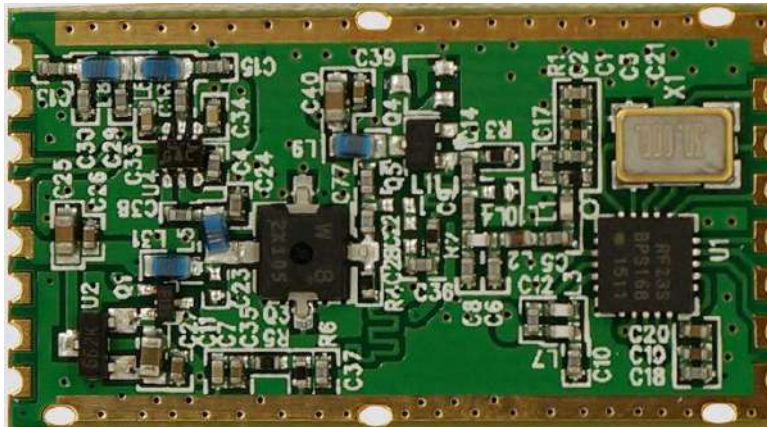
Actualización De Diseño

Debido a los problemas presentados para la integración de los dispositivos de radio en el diseño anterior, aunado a la documentación escasa para la configuración y uso de los radios, se exploró el uso de otro dispositivo de radio que permitiera reducir éstos inconvenientes así como el número de tarjetas y el peso, siendo el transceptor de radio RFM23BP que se observa en la figura 40 una opción recomendada, el cual presentó muchas mejoras a diferencia de los dispositivos anteriores, entre las que se encuentra

la potencia de transmisión, que a diferencia de los 500 mW que ofrece el TR2M, el nuevo radio especifica que cuenta con una potencia de salida de 1 W, lo que mejorará el enlace de radio de descarga, las características de éste radio se pueden observar en la tabla 25

Figura 40

Radio transmisor RFM23BP



Nota: Imagen extraída de (HOPERF ELECTRONICS, s/f)

Tabla 25

Tabla de Características Operativas del Radio Transceptor RFM23BP

Característica	Valor
Velocidad de operación de interface I2C	Hasta 400 kHz
Velocidad de operación maestro SPI	1.8 Mbps
Oscilador interno para SPI CLK	7.3MHz
Temperatura de operación	-55 a +125 °C
Potencia de salida	+30 dBm , 1W
Voltaje de operación	2.4 a 3.6 V
Corriente máxima de salida por GPIO en alto	8 mA
Corriente máxima de salida por GPIO en bajo	20 mA
Corriente máxima total de entrada/salida	120 mA
Disipación total de energía por encapsulado (calor)	1.5 W

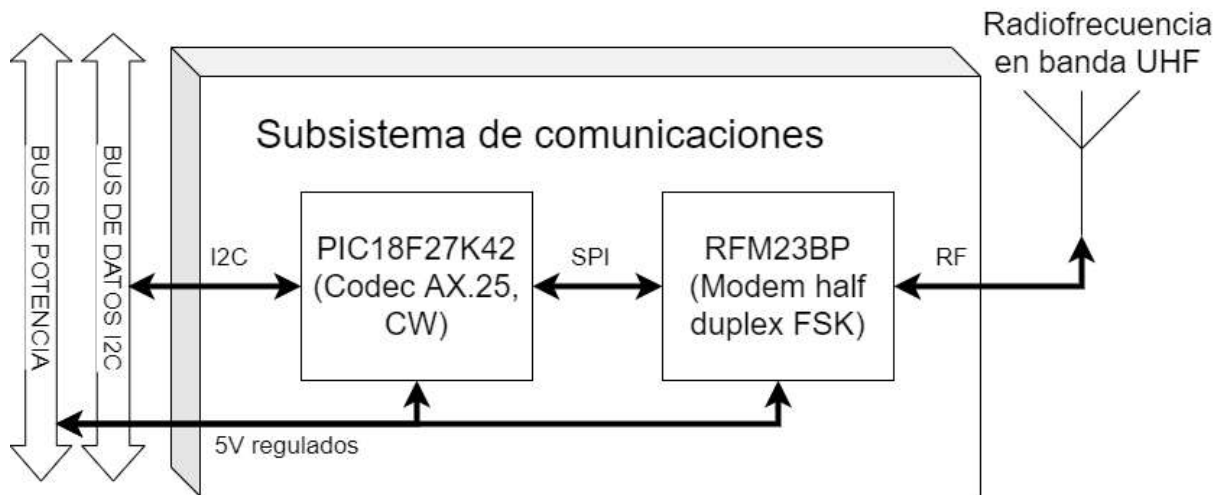
Consumo máximo a 7.3MHz a 3.6 V Vdd en modo operativo	Typ. 5.6 mA Max. 6.7 mA
Consumo máximo a 7.3MHz a 3.6 V Vdd en modo idle	Typ. 3.3 mA Max. 3.9 mA
Características	Modo de bajo consumo
Masa	< 1g
Precio	3.69 USD

Nota: Datos extraídos de (HOPERF ELECTRONICS, s/f)

El cambio del dispositivo de radio no cambia el concepto de operación del subsistema de comunicaciones, sin embargo la forma de conexión con la computadora del subsistema se ve modificada, ya que al contar con una interfaz de comunicación distinta se alteran los puertos disponibles de la computadora de comunicaciones para conectarse con los demás elementos del sistema, por lo que la nueva configuración que se considera se presenta en la figura 41 donde se cuenta con una sola antena, se utiliza el puerto SPI del microcontrolador para la comunicación bidireccional con el radio transceptor y se utiliza el puerto i2c para conectarse con las demás computadoras, tanto OBC como la computadora de cámaras que será la encargada de transmitir la información de las fotografías a la computadora de comunicaciones que se encargará únicamente de hacer la codificación de la información del canal de telemetría así como realizar las operaciones de beacon.

Figura 41

Diagrama de Bloques de Definición de Rediseño del Subsistema



Nota: Elaboración propia.

Diseño De Software Para Codificación AX.25

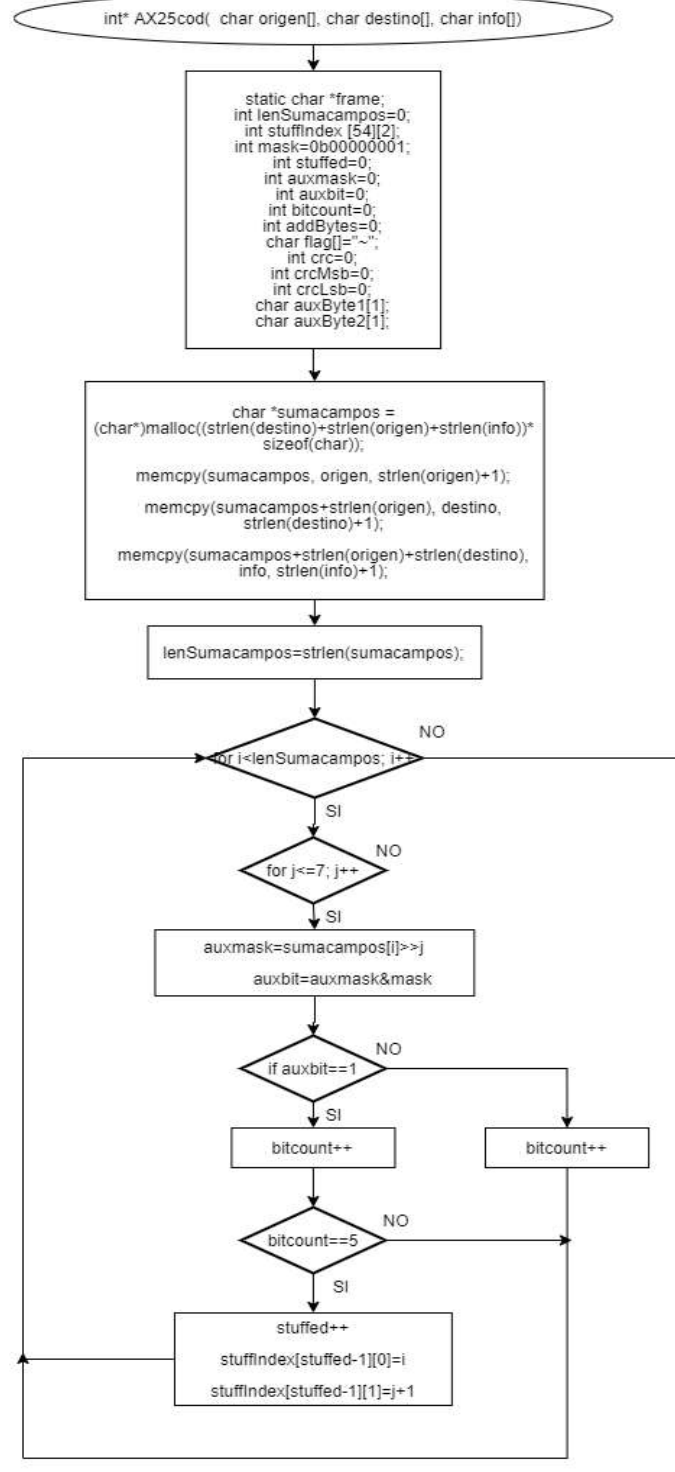
El uso principal del protocolo AX.25 a bordo es para la transmisión de la información de telemetría del satélite a la estación terrena utilizando el enlace de descarga de información, por lo que solo la función de codificar tramas de dicho protocolo será requerida, para la recepción de información se puede realizar de manera más sencilla utilizando las funciones de manejo de paquetes integrados dentro del radiotransmisor RFM23BP, que se utilizará para la transmisión y recepción de información. Para la transmisión de la información se realizará la codificación de los datos a enviar en tramas del protocolo AX.25, los cuales serán transmitidos al radiotransmisor, el cual a su vez empaquetará dicha información en su propio formato para realizar la transmisión de los paquetes utilizando el manejador de paquetes integrado, éstas cabeceras extra no serán reconocidas por el radio receptor en la estación terrena, que comenzará a decodificar hasta que se encuentre con una trama del protocolo AX.25 y nos permita recuperar la información a través de la computadora conectada al radio de la estación receptora. El proceso para la codificación de la información será manejado por funciones que podrán ser integradas al software principal en forma de biblioteca, lo que permitirá que se pueda utilizar en otros proyectos similares.

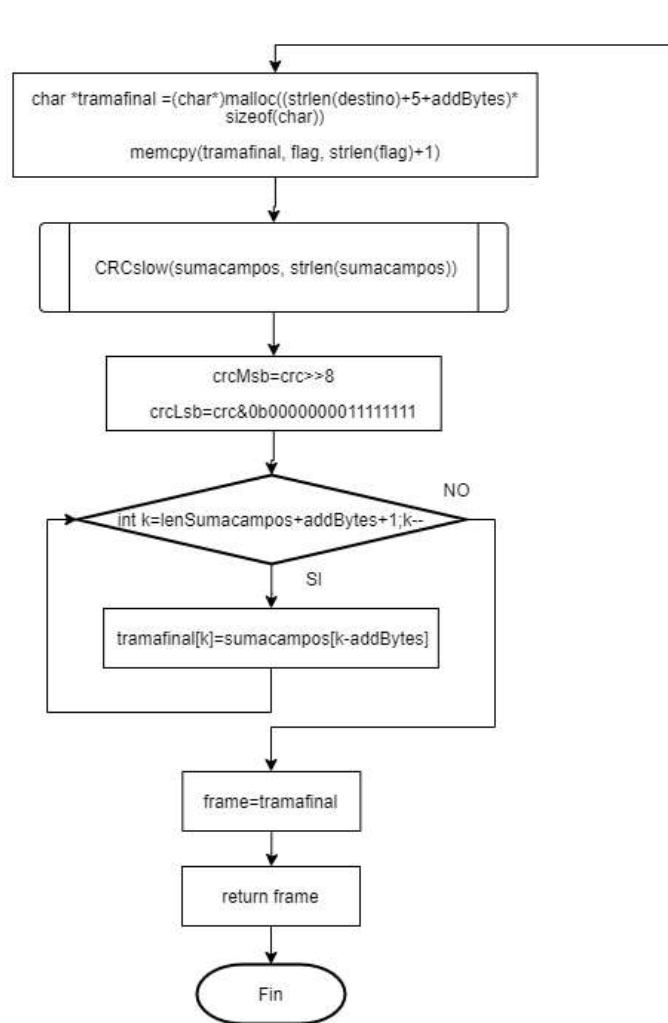
La función principal fue pensada de forma que genera una trama de AX.25 a la vez, por lo que para realizar envío de múltiples tramas se tendrá que generar la rutina por fuera de la función, evitando así problemas que se pueden dar por el manejo de información a forma de caja negra, la función recibe como máximo delimitado por el protocolo 256 bytes de información, también la longitud de los valores de remitente y destinatario están delimitados a un máximo de 8 caracteres cada uno por regla del protocolo.

El tipo de dato que devuelve la función es de tipo puntero, el cual tiene la dirección de inicio de la trama a partir del cual se puede proceder con el envío de la información haciendo uso del dispositivo de radio que se implemente en el subsistema. El diagrama de flujo general del empaquetado se puede observar en la figura 42.

Figura 42

Diagrama de Biblioteca Generación de Tramas AX.25





Nota: Elaboración propia.

Consideraciones Para Transmisión De CW Y Temporización De Símbolos

Para hacer la comunicación del estado operativo del satélite a la estación terrena se consideró el uso de código morse para la codificación de un mensaje de identificación del satélite y también para la comunicación del estado operativo de cada subsistema mediante una modulación CW que consta de interrupciones de un tono de radio en intervalos predeterminados para la representación de las letras de la codificación Morse.

Las reglas para la transmisión de código morse entendible están basadas en una unidad de tiempo definida por la velocidad de palabras por minuto a la que se desea transmitir, en el código morse se basa en el cambio de estado de una señal entre encendido y apagado, donde mantener el estado encendido durante una unidad de tiempo se considera como un "dit" o un punto y mantener el estado encendido tres unidades se considera como un "dah" o un guión, los espaciados entre los estados encendidos se manejan con estado apagado con diferente tiempo dependiendo de en qué parte se utilice, para el espaciado intra-carácter que es el espacio entre dit's y dah's en una letra se utiliza una unidad de tiempo, para el espaciado inter-carácter que es el espacio entre letras se utilizan 3 unidades de tiempo y para el espaciado inter-palabra que es el espacio entre palabras se utilizan 7 unidades de tiempo. El número de unidades típico por palabra es 43 considerando la palabra "PARIS" la cual se considera como palabra estándar sobre la cual se calcula el número de palabras por minuto (Carron, 1991) sobre el cual se realiza el siguiente cálculo para determinar la duración de la unidad dependiendo de la velocidad de transmisión en palabras por minuto.

$$\text{segundos por Dit} = t_{dit} = \frac{60 \text{ seg}}{43 * S_{wpm}}$$

43 es el número de dit's í picos por palabra S_{wpm} Número de palabras por minuto

Tabla 26*Tiempo de una Unidad en Morse Para Diferentes Velocidades de Transmisión*

Velocidad de transmisión	Tiempo duración dit en segundos
15 wpm	0.093
20 wpm	0.070
25 wpm	0.056
30 wpm	0.047
35 wpm	0.040
40 wpm	0.035
50 wpm	0.028

Nota: Recopilación propia de audios generados con la pagina

<https://morsecode.world/international/translator.html>.

Diseño De Software Para Beacon

Para la transmisión del mensaje de baliza se considera que el mensaje es estático y puede contener una cantidad variable de letras dependiendo del mensaje seleccionado para transmitir, dicho mensaje será iterado en una función switch para identificar que función de temporizado se llamará dependiendo de la letra seleccionada, como el mensaje está pensado que se maneje en español para el orden de búsqueda asignado en la función switch se realizó la siguiente investigación sobre la frecuencia de ocurrencia de las letras en palabras en español, la cual se cuenta como el número de ocurrencia entre cada 4.96 letras que es el promedio de longitud de las palabras en el idioma español como se puede apreciar en la tabla 27, tomando la consideración de que si se omite el artículo “el” ambas letras, L y E bajarían considerablemente de puesto, siendo la letra con mayor ocurrencia la A (Pratt, 1939), esto para reducir el tiempo de ejecución de la búsqueda de las letras dependiendo de su probabilidad de aparición en el mensaje que se pueda colocar para la identificación del satélite sin recurrir al uso de un algoritmo de búsqueda, éste orden de llamado de las funciones se puede apreciar en el diagrama de flujo para transmisión de beacon mostrado en la figura 43 el cual a su vez hace uso de la función de transmisión de Housekeeping que se transmitirá posterior a cada mensaje de baliza. En el algoritmo se considera que el

programa podrá ser detenido entre la transmisión de cualquiera de los caracteres al ser interrumpido por la señal de que se recibió un comando de la estación terrena sin dejar algún carácter a media transmisión.

Tabla 27

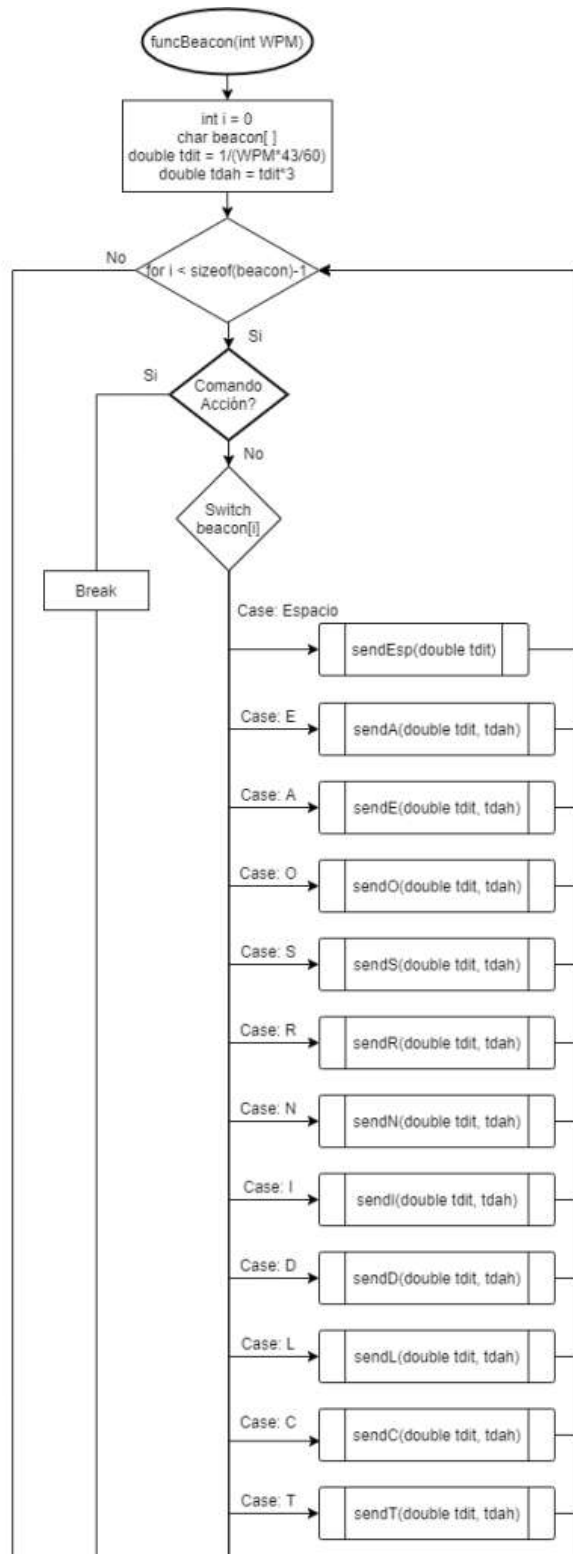
Tabla de Frecuencia de Aparición de Letras en Palabras en Español

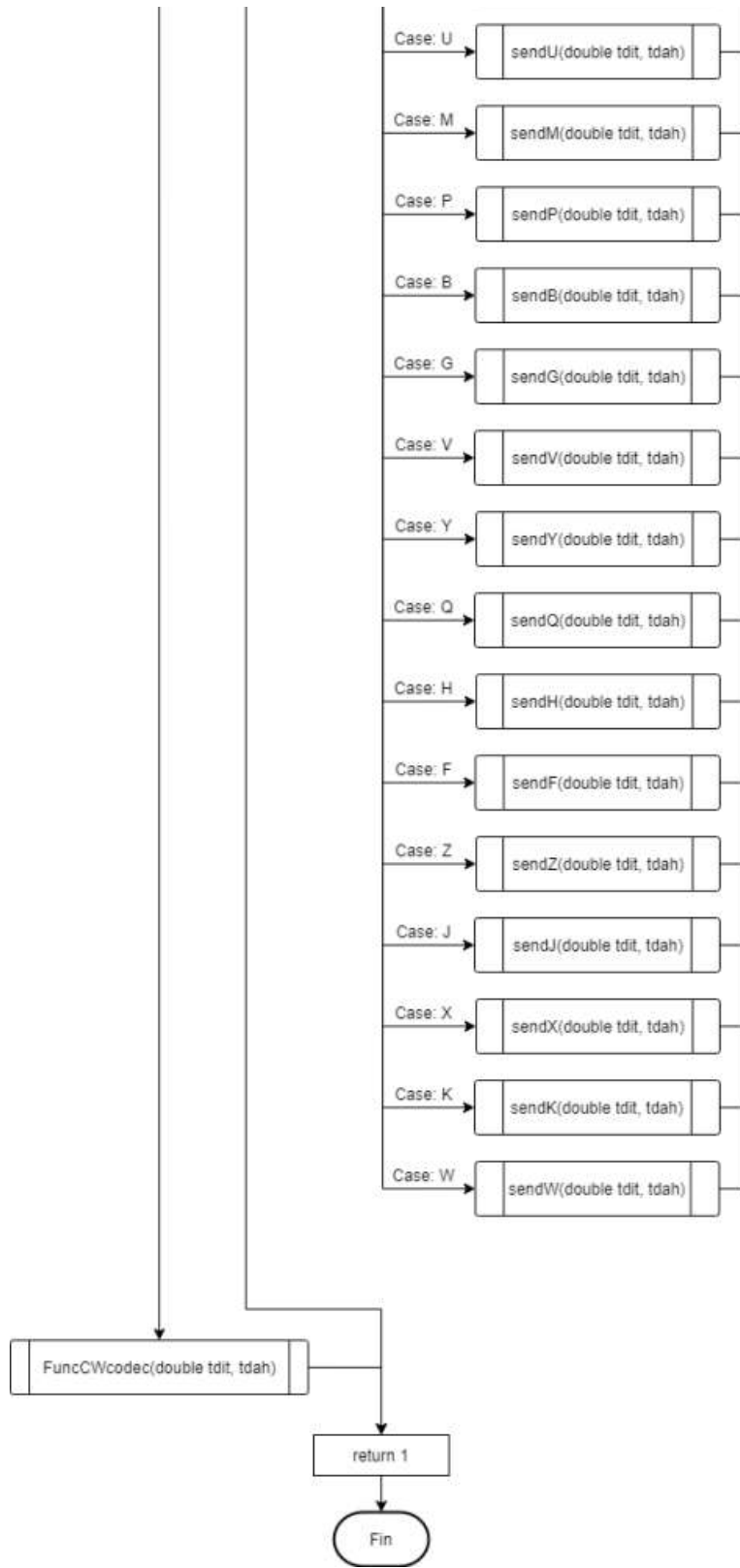
Letra	Frecuencia de ocurrencia en 1000 palabras
E	678
A	622
O	431
S	391
R	341
N	333
I	310
D	291
L	247
C	232
T	230
U	195
M	156
P	124
B	70
G	50
Y	44
V	44
Q	43
H	35
F	34
Z	26
J	22
X	11
W	1
K	0.5

Nota: Fuente: (Pratt, 1939)

Figura 43

Diagrama de Flujo Principal del Programa Para Transmisión de Baliza





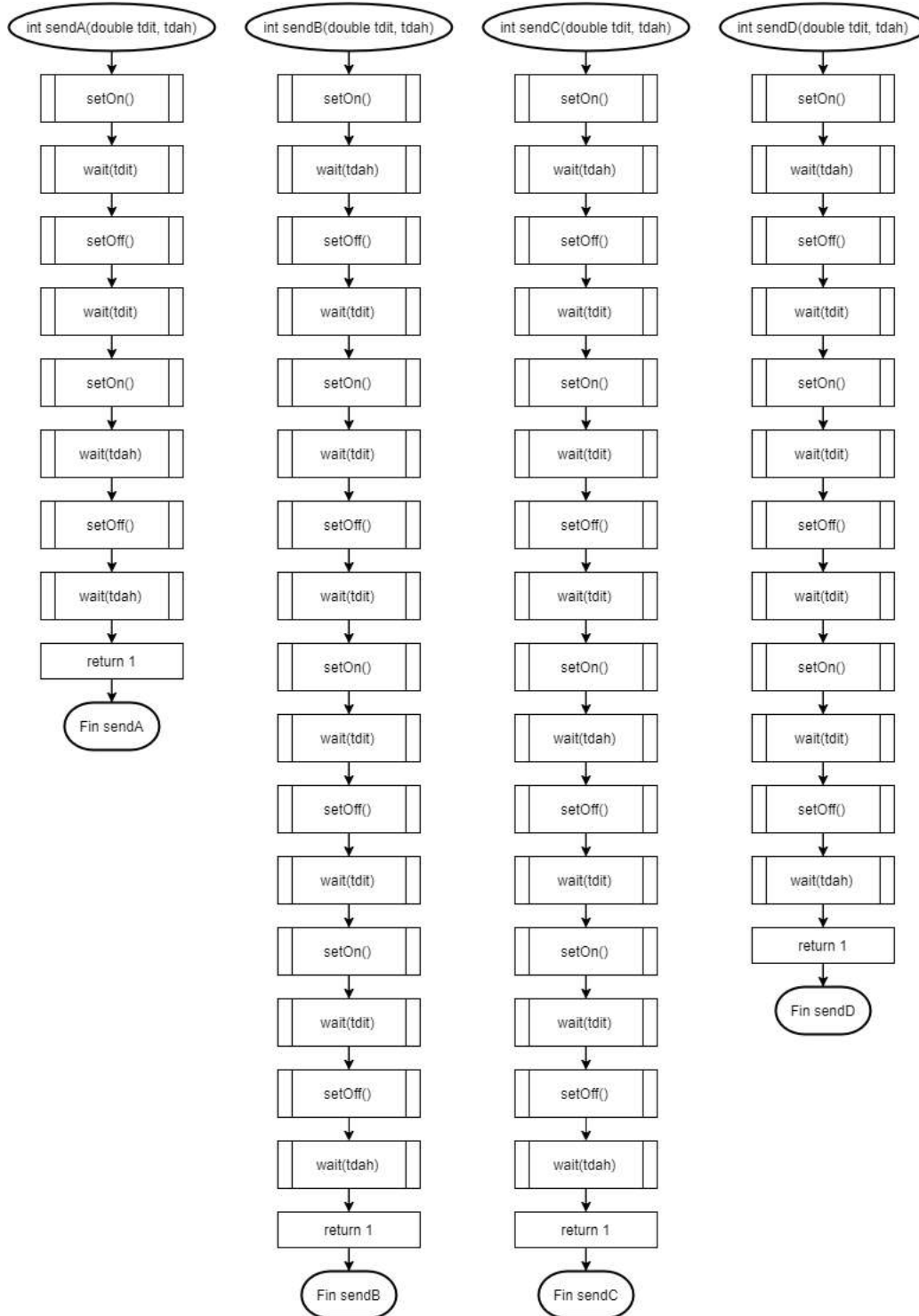
Nota: El mensaje a transmitir es definido por el usuario, Elaboración propia.

Las funciones con la temporización de encendido y apagado de la señal de baliza se consideraron para ser reutilizadas en el segmento de código que se encarga de la transmisión del mensaje de baliza estático como para la función de codificación de los valores del housekeeping, teniendo como parámetros de entrada los valores de tiempo para un punto y una línea del código morse pre calculados en la función principal de transmisión de beacon para evitar calcular dichos números cada vez que se llame una función independientemente.

Los diagramas de flujo de las funciones para la transmisión de las letras del alfabeto en código morse se pueden observar en las figuras de la 44 a la 50, las cuales a su vez llaman a dos funciones principales para hacer el cambio al estado encendido y estado apagado, donde el tipo de estado puede ser modificado dentro de cada una de estas funciones, lo que le da la flexibilidad de acoplarse a otro tipo de sistemas o modificar la forma en que transmitirá el código morse, como puede ser a través del control de un dispositivo de radio, algún actuador o un emisor lumínico. En éste caso éstas funciones serán utilizadas para el cambio de estado a un modo de transmisión de portadora sin modulación para indicar el estado encendido y un cambio al modo standby/recepción para indicar el estado apagado de la señal de baliza, mostradas en la figura 51.

Figura 44

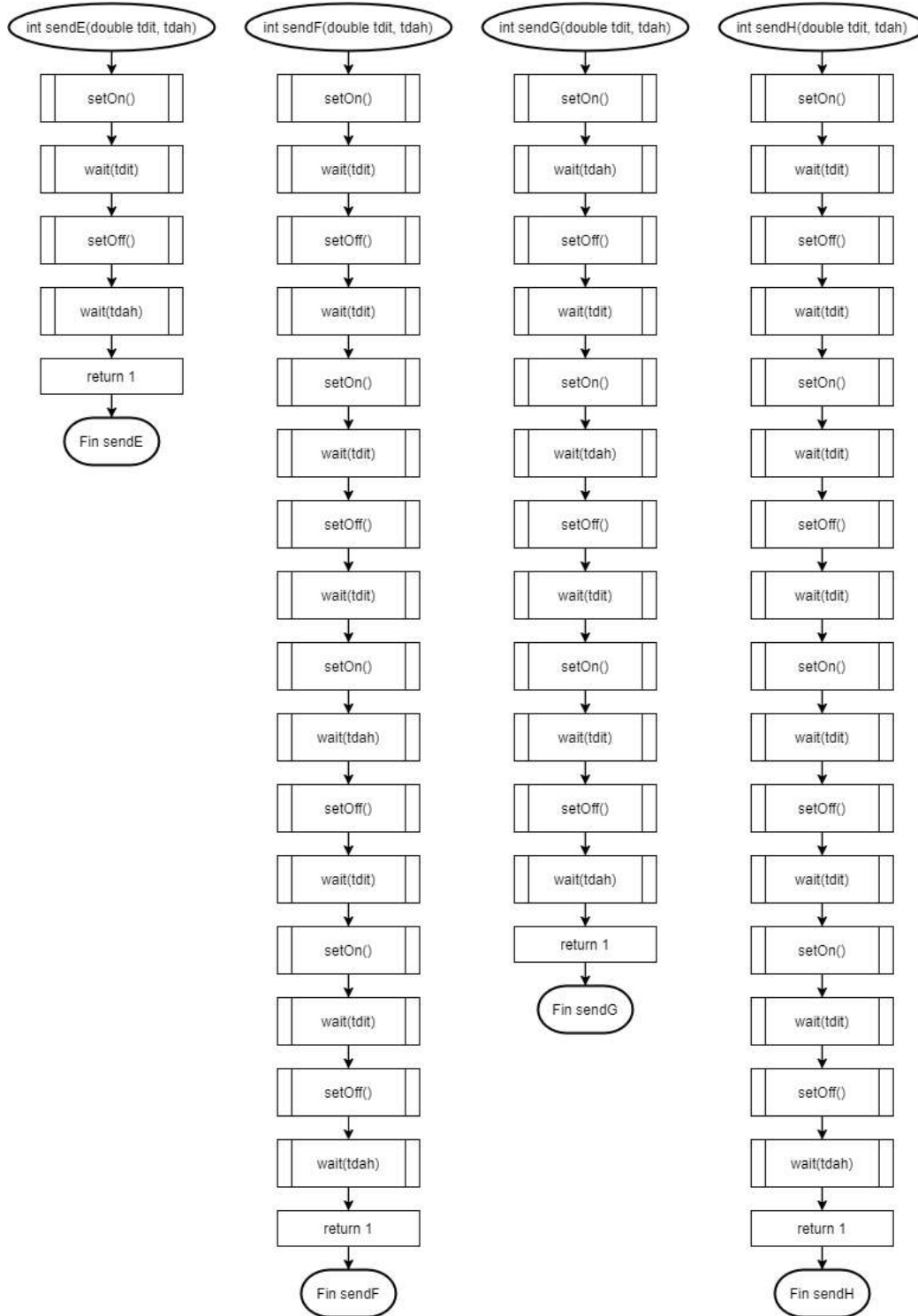
Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras A, B, C Y D en Morse



Nota: Elaboración propia.

Figura 45

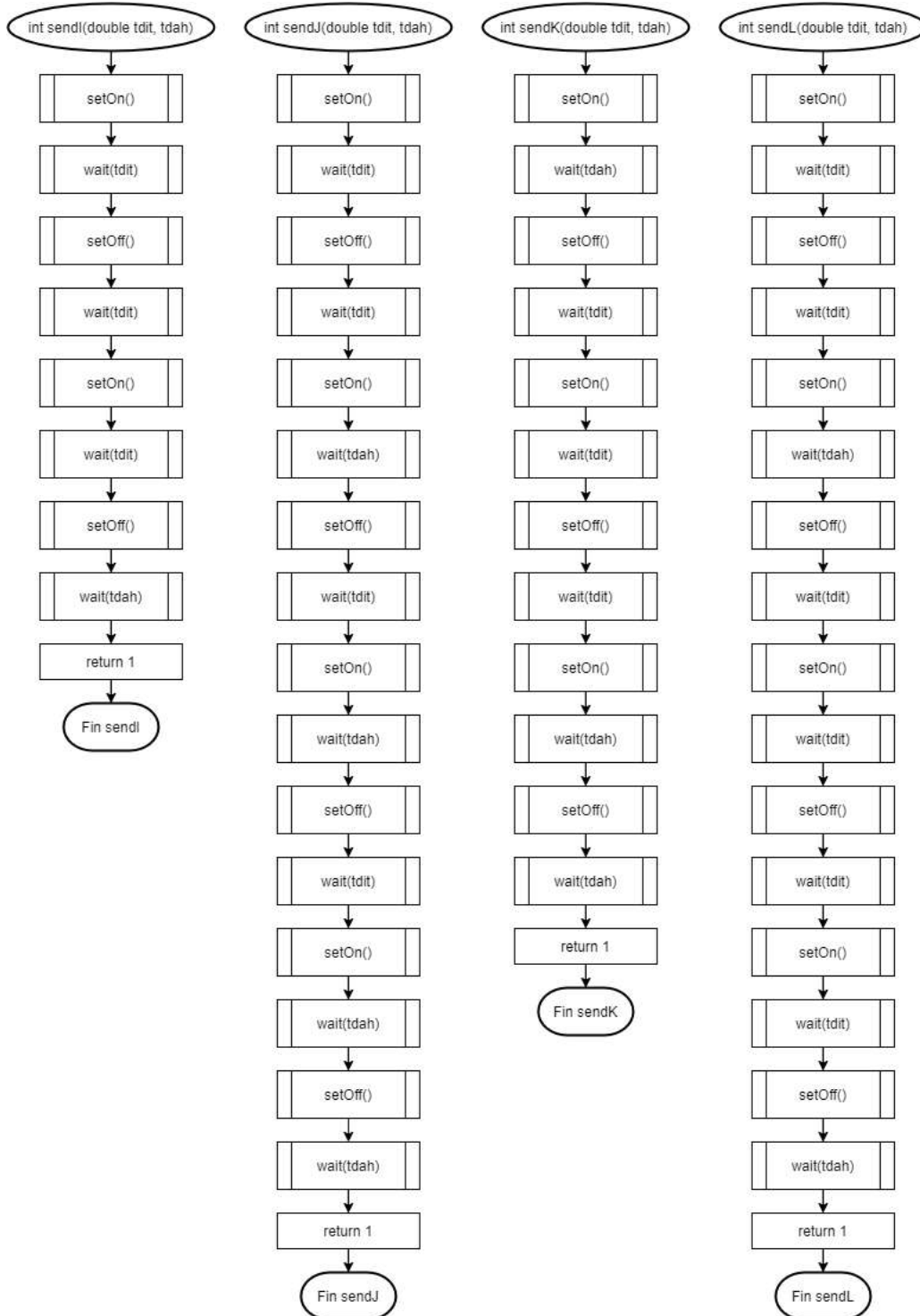
Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras E, F, G Y H en Morse



Nota: Elaboración propia.

Figura 46

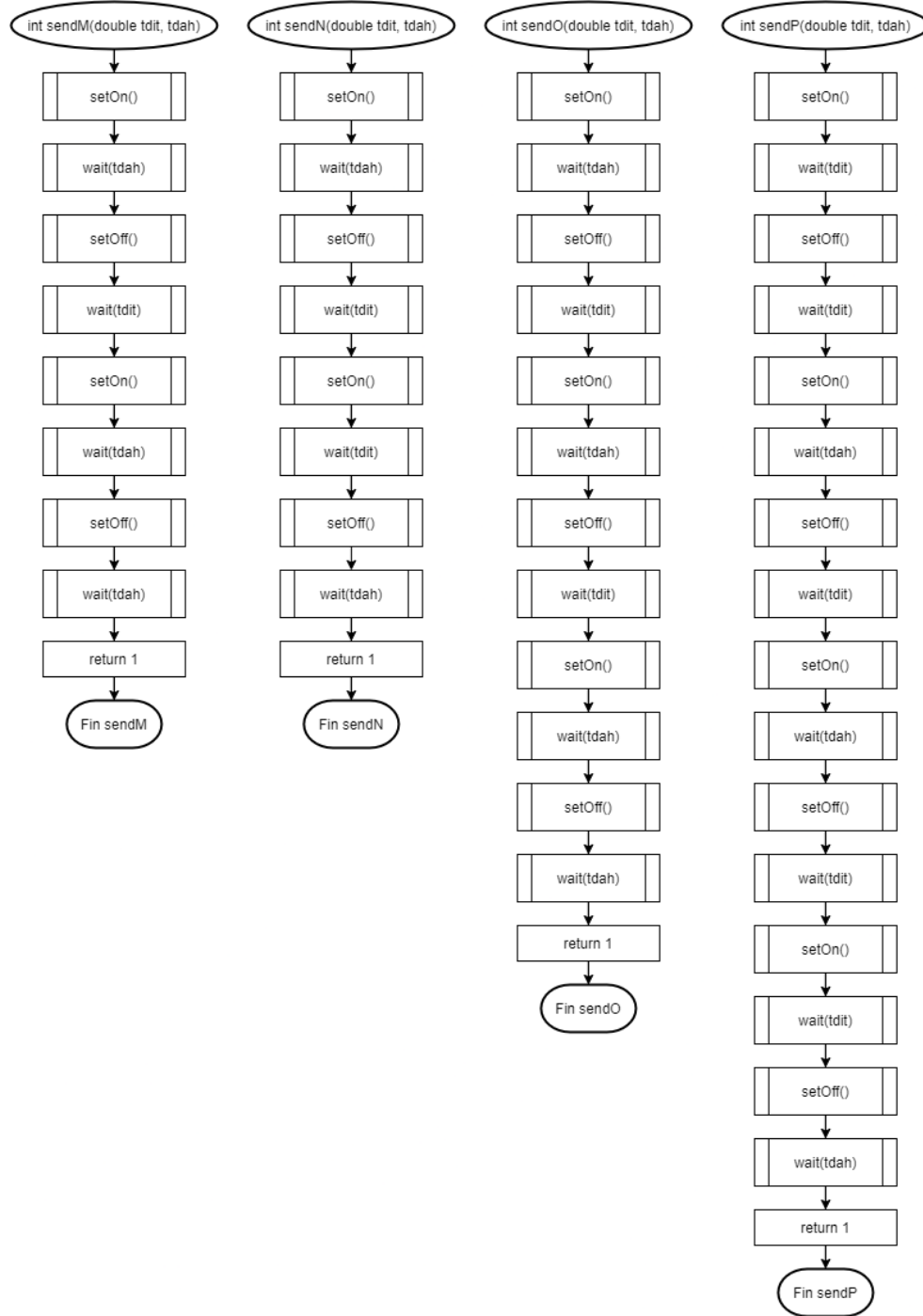
Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras I, J, K Y L en Morse



Nota: Elaboración propia.

Figura 47

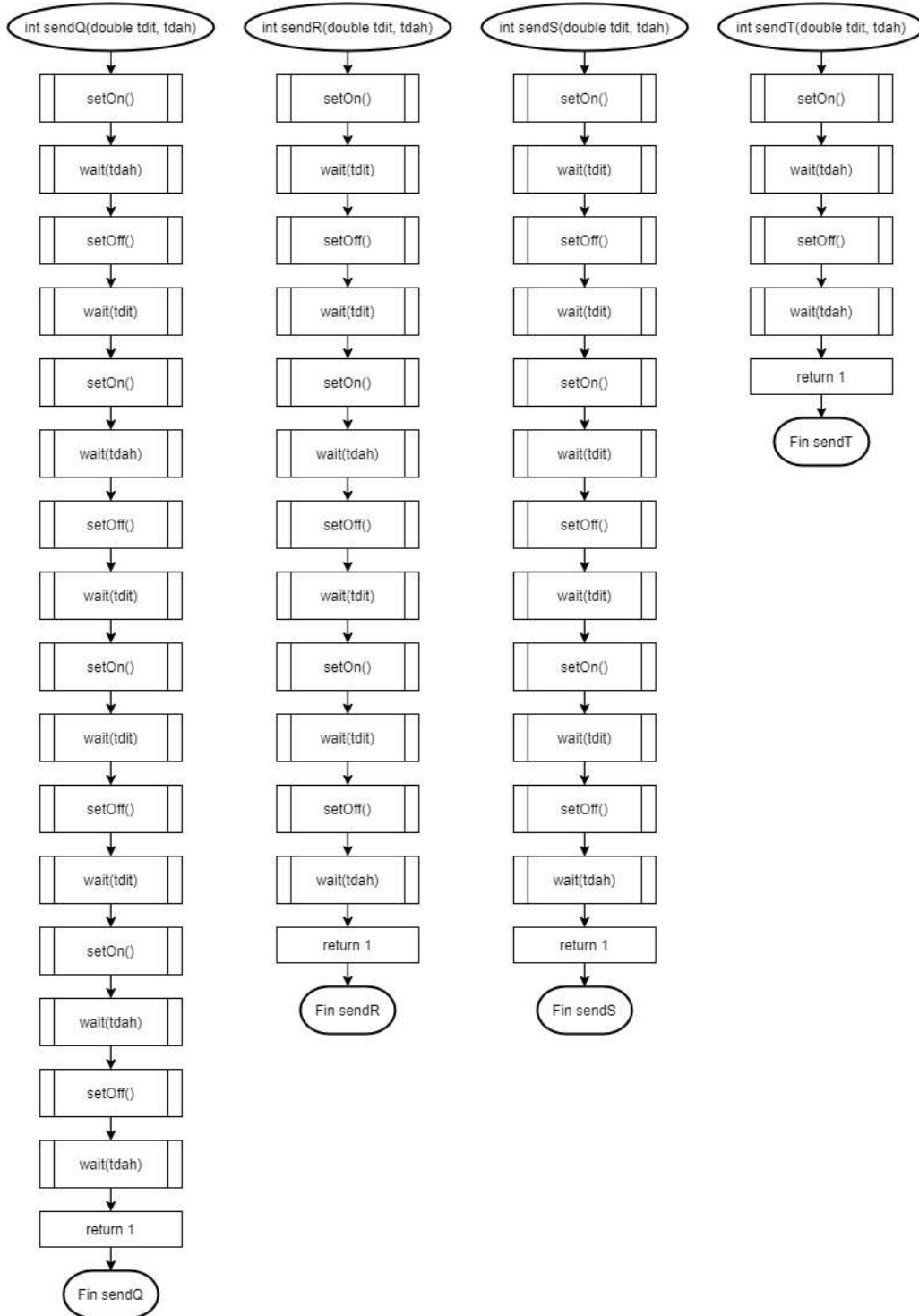
Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras M, N, O Y P en Morse



Nota: Elaboración propia.

Figura 48

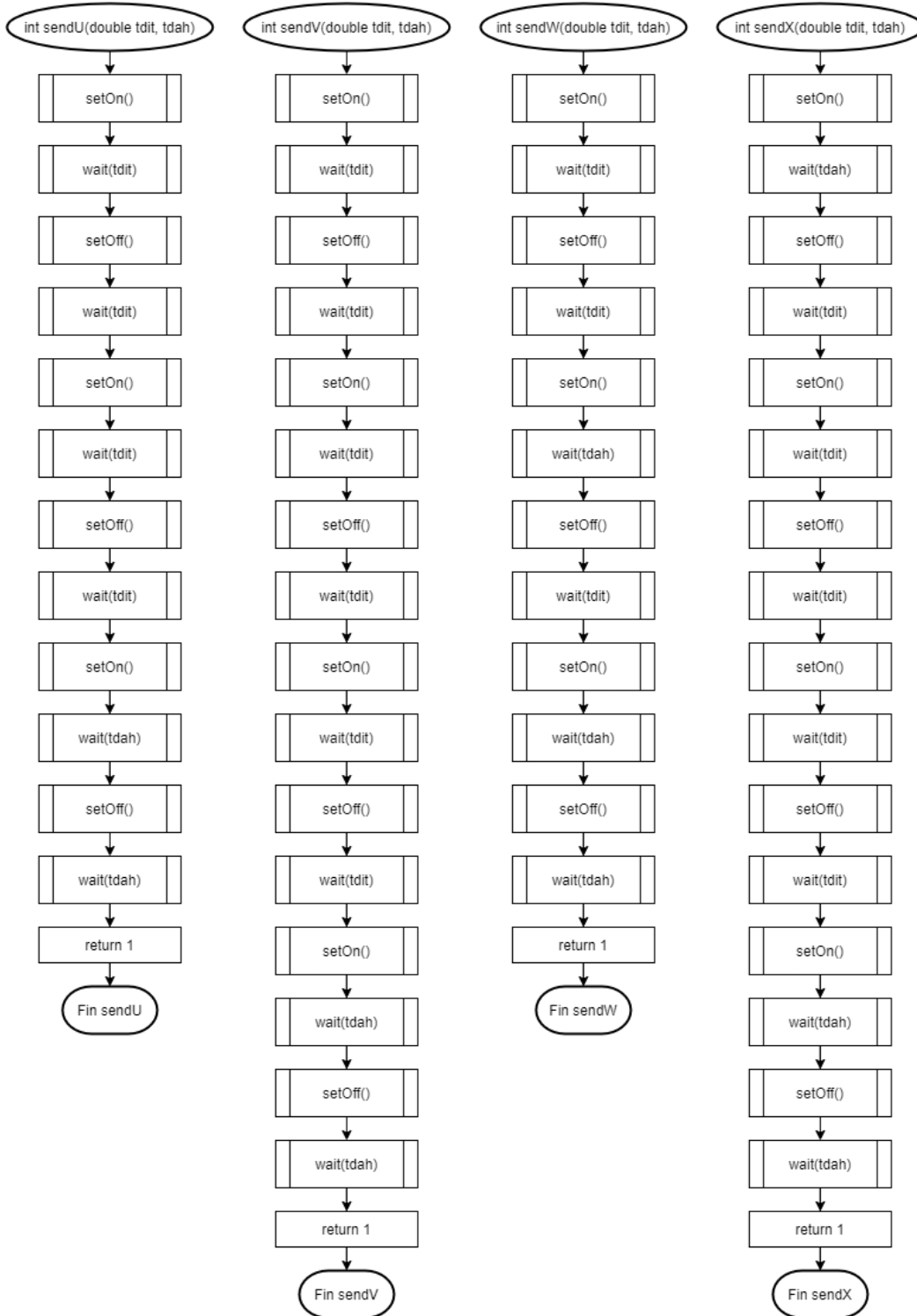
Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras Q, R, S Y T en Morse



Nota: Elaboración propia.

Figura 49

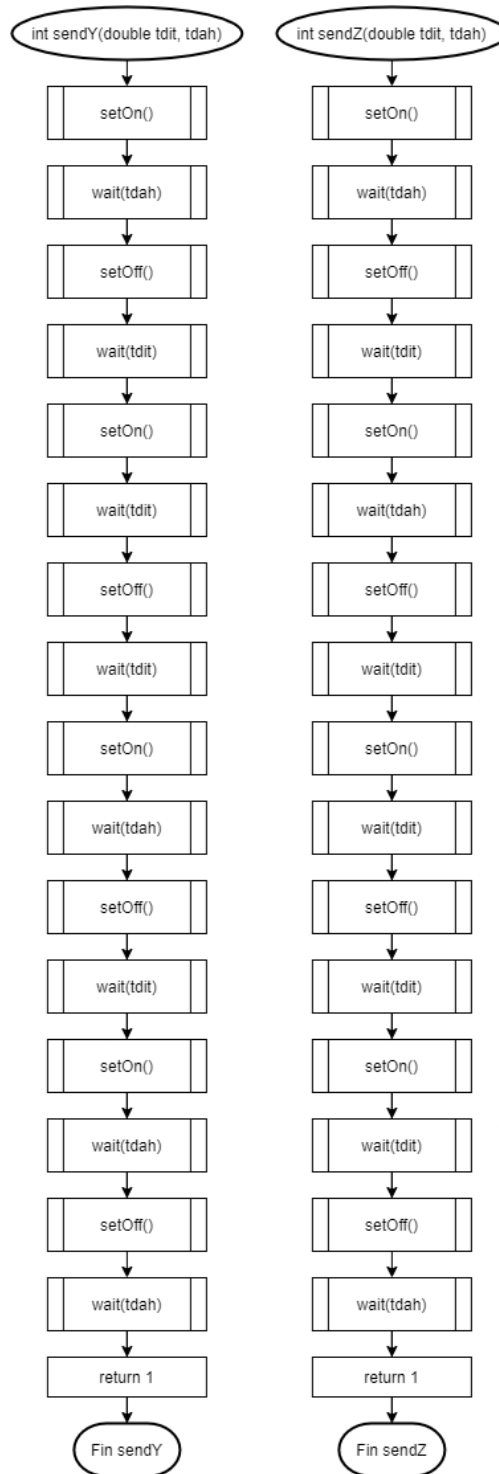
Diagrama de las Funciones Para Enviar las Letras U, V, W Y X en Morse



Nota: Elaboración propia.

Figura 50

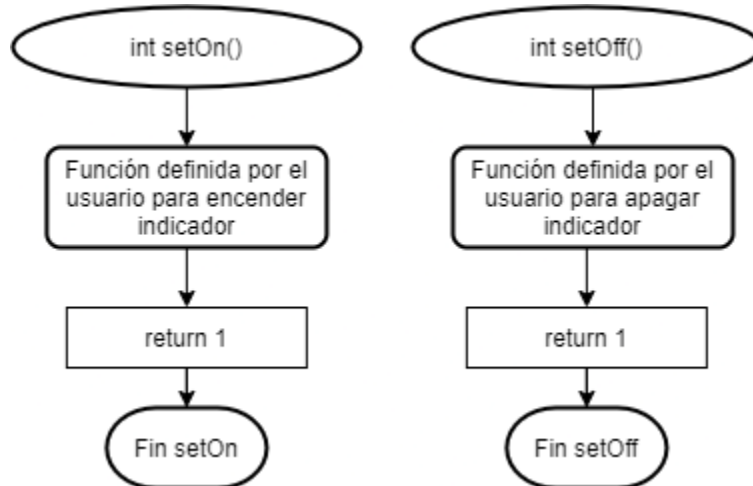
Diagrama de las Funciones Para Enviar das Letras Y y Z en Morse



Nota: Elaboración propia.

Figura 51

Diagramas de Funciones de Estados Alto y Bajo Para el Código Morse



Nota: Modificables por el usuario para indicar la función deseada dependiendo del actuador que se utilice. Elaboración propia.

Diseño De Software Para Codificación De Housekeeping

El housekeeping que se transmitirá en conjunto con cada mensaje de baliza se codificará también en código morse y es deseable utilizar la menor cantidad de información posible para agilizar la transmisión de los datos, debido a que la longitud de la codificación de cada uno de los caracteres es de distinta longitud como se puede apreciar en la tabla 27 se realizó una selección de los caracteres de menor longitud para igualar su uso como cada carácter utilizado para representar valores en el sistema hexadecimal como se puede apreciar en la tabla 28, ya que el housekeeping a utilizar en el proyecto estará en formato numérico, considerando que entre más alto sea el número a codificar el código morse correspondiente será lo más corto posible.

Tabla 28*Código Morse con Longitud en Bits Considerados por Caracter*

Letra	Código	dit x bit	Tamaño
A	.-	11101	5
B	-...	101010111	9
C	-...-	10111010111	11
D	-..	1010111	7
E	.	1	1
F	...-	101110101	9
G	--.	101110111	9
H	1010101	7
I	..	101	3
J	.----	1110111011101	13
K	-.-	111010111	9
L	.-...-	101011101	9
M	--	1110111	7
N	-.	10111	5
O	---	11101110111	11
P	.-...-	10111011101	11
Q	---.-	1110101110111	13
R	...-	1011101	7
S	...	10101	5
T	-	111	3
U	...-	1110101	7
V-	111010101	9
W	...-	111011101	9
X-	11101010111	11

Y	- . - -	1110111010111	13
Z	- - . .	10101110111	11
.	. - - - -	1110101110101110 1	17
,	. . - - . .	101011101110101	15
1	. - - - -	1110111011101110 1	17
2	. . - - -	111011101110101	15
3	. . . - -	1110111010101	13
4 -	11101010101	11
5	101010101	9
6	-	10101010111	11
7	- - . . .	1010101110111	13
8	- - - . .	101011101110111	15
9	- - - - .	1011101110111011 1	17
0	- - - - -	1110111011101110 111	19

Nota: Elaboración propia.

Tabla 29*Equivalencia Elegida en Hexadecimal a Código Morse Para Housekeeping*

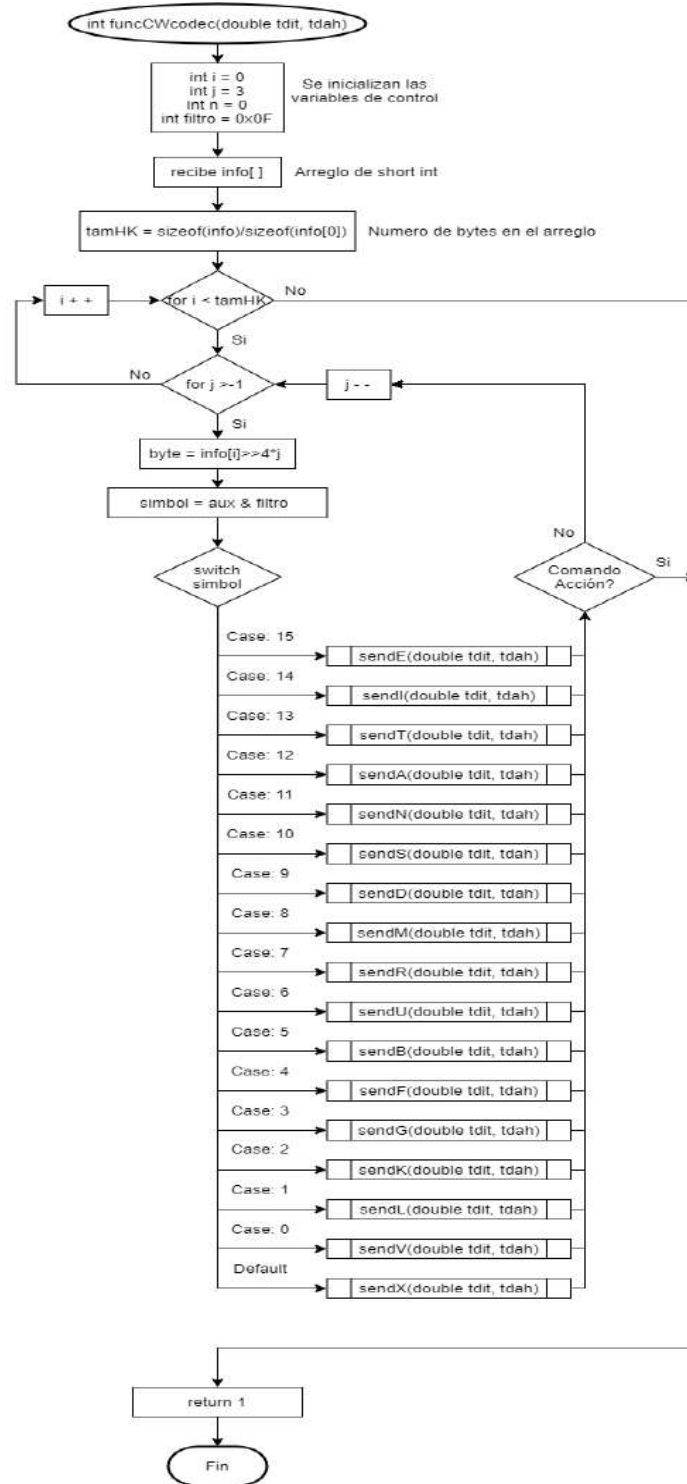
Sistema Hexadecimal	Código Morse	Longitud de bits en código Morse
0	V	9
1	L	9
2	K	9
3	G	9
4	F	9
5	B	9
6	U	5
7	R	5
8	M	5
9	D	5
A	S	5
B	N	5
C	A	5
D	T	3
E	I	3
F	E	1

Nota: Elaboración propia.

Para el almacenamiento de la información numérica que se utilizará como housekeeping se recomienda para el uso del software utilizar un formato de short int para el mejor aprovechamiento del registro de memoria, logrando de esta forma almacenar dos bytes de información en hexadecimal por cada posición del arreglo destinado a almacenar toda la información de housekeeping, en la figura 52 se puede apreciar el diagrama de flujo donde se realiza la identificación de cada segmento del valor leído por posición del arreglo realizando un desplazamiento de bits y utilizando una máscara para identificar a que número corresponde dentro del sistema hexadecimal.

Figura 52

Diagrama de Flujo de Codificación de Housekeeping en Morse sin Espaciado

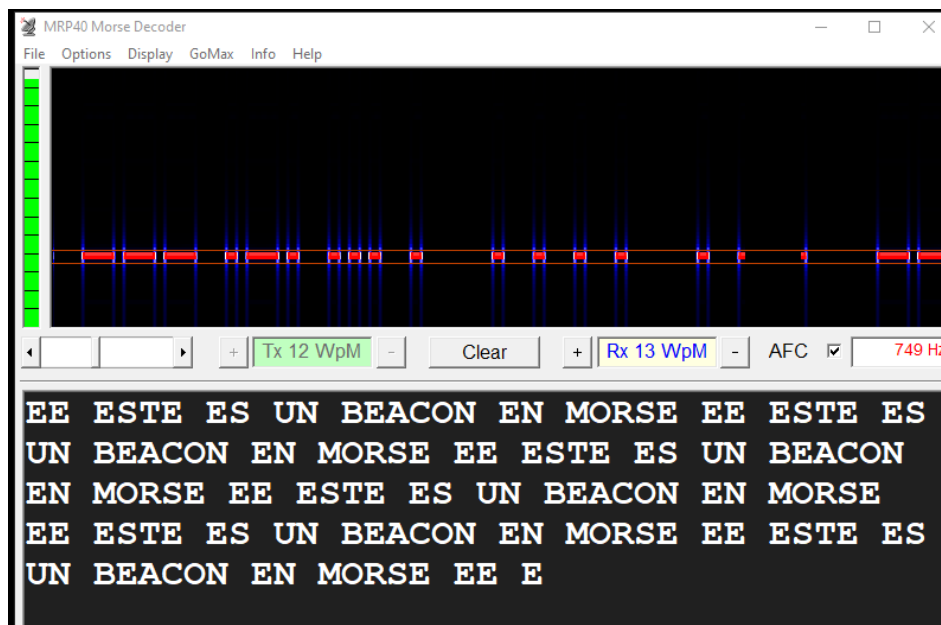


Nota: Elaboración propia.

Sin embargo a la hora de realizar pruebas de decodificación se presentaron problemas para la identificación del caso donde se mandaba el mejor de los caos en cuanto a longitud del mensaje, en éste caso se utilizó un mensaje de baliza de prueba “ESTE ES UN BEACON EN MORSE” seguido de 4 bytes de información de housekeeping de prueba en el mejor de los casos “EEEE EEEE” donde con una separación después del segundo byte, teniendo como resultado que solo se logró la detección de los primeros caracteres luego de un espacio, siendo que solo se recuperó un 25% de la información como se observa en la figura 53. Debido a esto se agregó al programa la función de espacio en morse para agregar un espaciado entre cada uno de los caracteres codificados del housekeeping, esto se puede apreciar en la figura 54 y los resultados de las pruebas utilizando el mismo mensaje de baliza y valor de housekeeping se logró realizar una decodificación del 100% de la información utilizando el espaciado entre cada carácter como se puede observar en la figura 55.

Figura 53

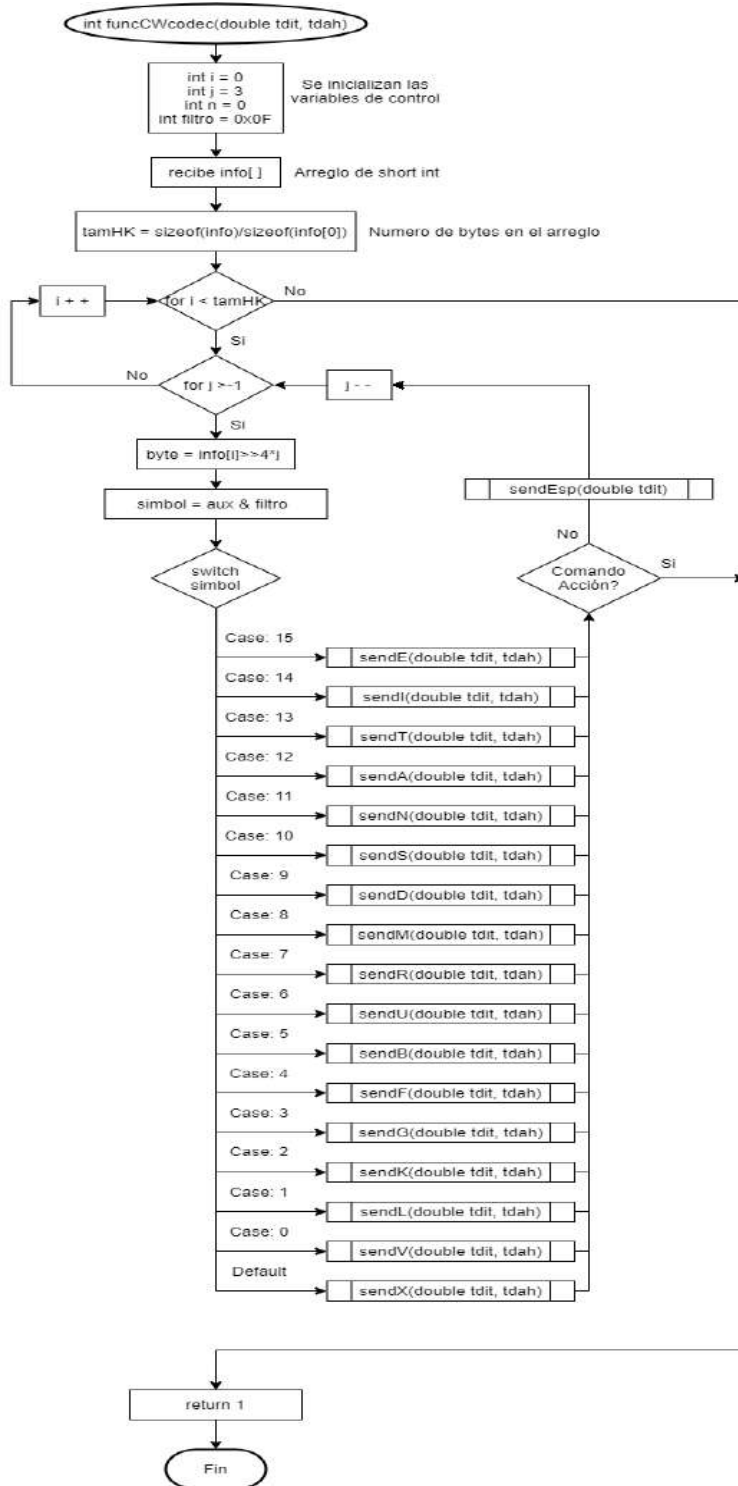
Prueba de Decodificación de Housekeeping en Morse sin Espaciado



Nota: Impresión de pantalla de la prueba de audio utilizando el programa MPR10 Morse Decoder

Figura 54

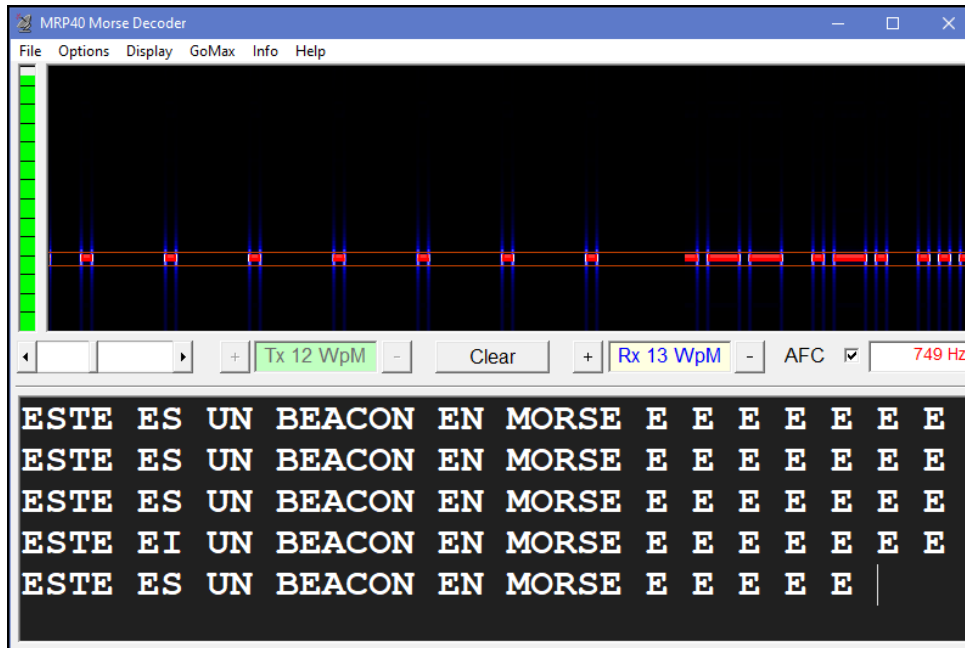
Diagrama de Flujo de Codificación de Housekeeping en Morse con Espaciado



Nota: Elaboración propia.

Figura 55

Prueba de Decodificación de Housekeeping en Morse con Espaciado



Nota: Impresión de pantalla de la prueba de audio utilizando el programa MPR10 Morse Decoder

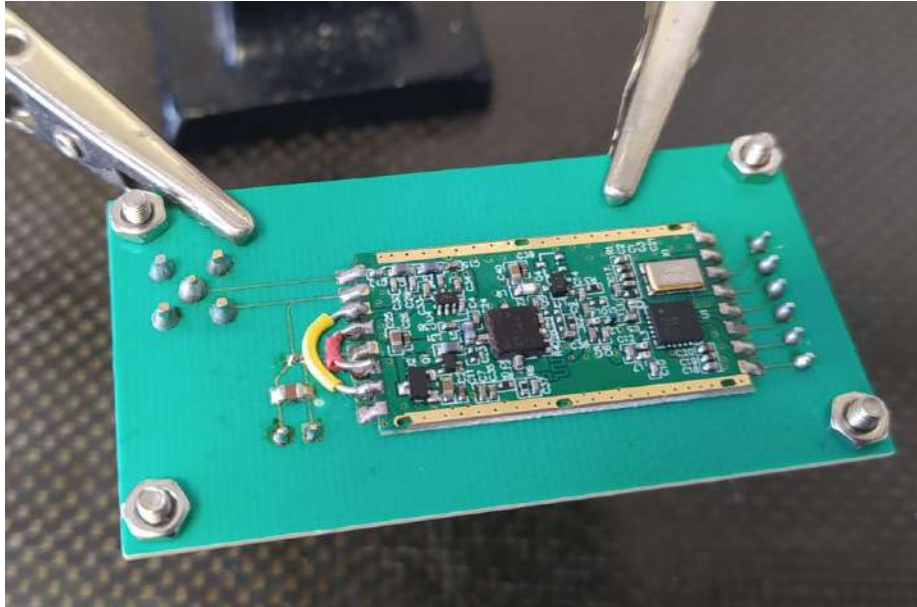
Pruebas De Transmisión Y Ajustes En El Sistema

Para realizar pruebas de transmisión con el módulo de radio y verificar el funcionamiento por partes del subsistema se realizó el diseño de una placa para montar un sistema mínimo que se observa en la figura 56, otro motivo para la fabricación de la placa fue que al tratarse de un dispositivo de montaje superficial era necesario montarlo en una placa para poder conectar el radiotransmisor a una antena y a un microcontrolador como se observa en la figura 57. Para realizar la medición de la señal y constatar que la señal se transmitía a la frecuencia correcta y que la temporización de tonos funcionó adecuadamente se utilizó un analizador de espectros a una distancia de aproximadamente 2.5m como se observa en la figura 58 donde claramente se observó un cambio en los estados de los tonos en morse así como que la frecuencia de transmisión también era correcta como se aprecia en la figura 59, la

frecuencia que se utilizó para la prueba fue de 434 MHz que se encuentra dentro del rango permitido de frecuencias para asignación de permisos de transmisión en banda UHF con calidad de radio experimentador.

Figura 56

Montaje de Sistema de Radio Para Pruebas



Nota: Fotografía propia.

Figura 57

Montaje de Sistema Mínimo Para Pruebas de Transmisión



Nota: Pruebas de transmisión dentro de la cámara anecoica. Fotografía propia.

Figura 58

Recepción de la Señal Utilizando un Analizador de Espectros



Nota: Fotografía propia.

Figura 59

Comparación de Cambio del Estado de la Señal Transmitida



Nota: Señal de baliza a una frecuencia de 434 MHz utilizando un analizador de espectros. Valor leído configurando el radio en Off (Izquierda). Valor leído configurando el radio en On (Derecha). Fotografía propia.

Las líneas de transmisión de cualquier sistema de comunicaciones deben ser diseñadas de tal forma que su impedancia coincida con los demás elementos que conforman la línea de transmisión, como son cables y conectores, a esto se le conoce como un sistema con acoplamiento de impedancia, en caso de tener un sistema no acoplado se pueden presentar problemas como ruido, eco e incluso reflexión de la potencia transmitida, que puede dañar el equipo de radio (Bhatt et al., s/f).

Para esto se debe realizar un cálculo de la impedancia de la línea de transmisión desde la salida del radiotransmisor hasta la huella del conector SMA que se utilizará para conectar una antena y poder determinar sus características y aplicarlas a la hora de realizar el diseño de la placa de circuito impreso final.

Éstos cálculos se realizaron considerando que las placas constarán de una sola cara, fabricadas con material dieléctrico FR4 y con una capa de cobre de $1\text{ oz}/\text{ft}^2$

. El cálculo se realizó utilizando la fórmula para calcular la impedancia de un cable coaxial para lo cual se consideraron por separado las impedancias de la pista respecto a tierra y del pad central del conector SMA respecto a tierra como se observa en la figura 60.

$$Z_0 = \sqrt{L/C} = \sqrt{\frac{\left(\frac{\mu}{2\pi}\right) \ln\left(\frac{D}{d}\right)}{\frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{D}{d}\right)}}}$$

Dónde:

$$\text{Permeabilidad magnética } (\mu) = 4\pi E^{-7} \text{ H/m}$$

$$\text{Permitividad eléctrica } (\epsilon) = 8.85 E^{-12} \frac{C^2}{N * m^2}$$

Calculo de impedancia del pad respecto a tierra:

$$\text{Dí ametromenorexterno } D1 = 1.45 \text{ mm} + 2 * 0.525 \text{ mm} + 2 * 0.38 \text{ mm} = 3.26 \text{ mm}$$

$$\text{Dí ametromayorinternod } d1 = 1.45 \text{ mm} + 2 * 0.525 \text{ mm} = 2.5 \text{ mm}$$

Aplicando la fórmula para D1 y d1:

$$Z_{01} = \sqrt{\frac{\left(\frac{4\pi E^{-7} \text{ H/m}}{2\pi}\right) \ln\left(\frac{3.26 \text{ mm}}{2.5 \text{ mm}}\right)}{\frac{2\pi * 8.85 E^{-12} \frac{C^2}{N * m^2}}{\ln\left(\frac{3.26 \text{ mm}}{2.5 \text{ mm}}\right)}}} = \sqrt{5.2395 E^{-7} / 2.0949 E^{-10}} = 50.010809 \Omega$$

Calculo de impedancia de la pista respecto a tierra:

$$\text{Dí ametromenorexterno } D2 = 1.6701 \text{ mm} + 2 * 0.254 \text{ mm} = 2.1781 \text{ mm}$$

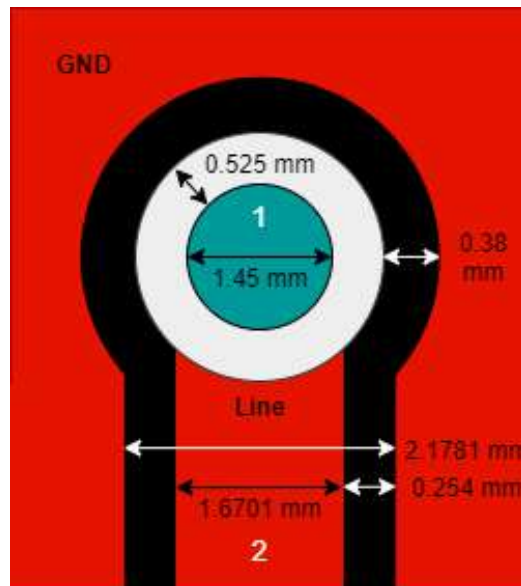
$$\text{Dí ametromayorinternod } d2 = 1.6701 \text{ mm}$$

Aplicando la fórmula para D2 y d2:

$$Z_{o2} = \sqrt{\frac{\left(\frac{4\pi E^{-7} H/m}{2\pi}\right) \ln\left(\frac{2.1781 \text{ mm}}{1.6701 \text{ mm}}\right)}{\frac{2\pi * 8.85 E^{-12} \frac{C^2}{N * m^2}}{\ln\left(\frac{2.1781 \text{ mm}}{1.6701 \text{ mm}}\right)}}} = \sqrt{5.2421 E^{-7} / 2.0938 E^{-10}} = 50.03586 \Omega$$

Figura 60

Diagrama de Medidas Línea de Transmisión con 1.6701mm de Ancho



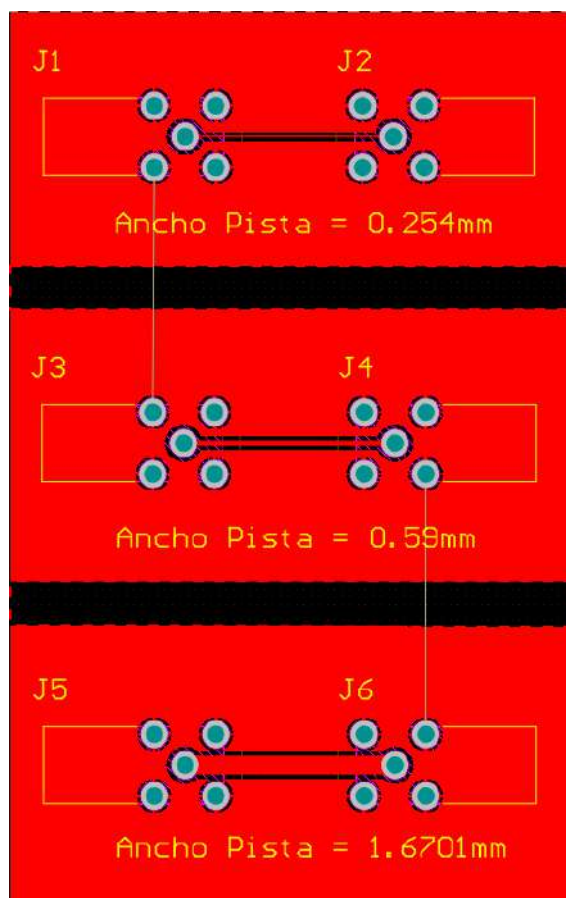
Nota: Elaboración propia.

Las medidas obtenidas en los cálculos se aplicaron al diseño de una pista para hacer las mediciones del acoplamiento y validar que la pista tenga una impedancia de 50 ohm, para lo cual se diseñaron otras dos pistas de prueba para tener un punto de referencia, la pista más delgada se mantuvo con los valores predeterminados de todas sus medidas, la cual tiene un grosor de 0.254 mm, la pista intermedia se modificó el

ancho de la pista para hacerlo ligeramente más grueso con un ancho de 0.59 mm, éstos diseños se pueden apreciar en la figura 61 y luego de su manufactura en la figura 62.

Figura 61

Diseños de Tarjetas Para Pruebas de Impedancia de la Línea de Transmisión



Nota: Captura de pantalla del diseño creado utilizando Altium Designer. Elaboración propia.

Figura 62

Tarjetas Para Pruebas de Impedancia de Línea de Transmisión



Nota: Fotografía propia.

Se realizaron las pruebas de acoplamiento utilizando un analizador de redes vectoriales utilizando una carga de 50 ohm como se puede apreciar en las figuras 63, 65 y 67 para las pistas con un ancho de 0.254 mm, 0.59 mm y 1.6701 mm respectivamente para medir la impedancia de las líneas de transmisión, las pruebas se realizaron con un intervalo de frecuencias entre 420 MHz y 450 MHz. Los resultados obtenidos en las cartas de Smith indicaron que las dos pistas más delgadas presentaron una impedancia superior a los 50 Ohm debido a que la marca se encuentra recorrida a la derecha del punto central de la carta como se puede observar en las figuras 64 y 66, para la pista que se realizaron los cálculos se obtuvieron resultados satisfactorios, utilizando un intervalo de entre 420 MHz y 450 MHz se obtuvo una impedancia de 50.060 ohm como se observa en la figura 68, mientras que para un intervalo de entre 436 MHz y 438 MHz el cual considera la frecuencia a la que se realizaron las pruebas de transmisión en la cámara anecoica, se obtuvo una impedancia de 49.501 ohm como se observa en la figura 69.

Figura 63

Tarjeta Para Pruebas de Línea de Transmisión de 0.254mm de Ancho



Nota: Fotografía propia.

Figura 64

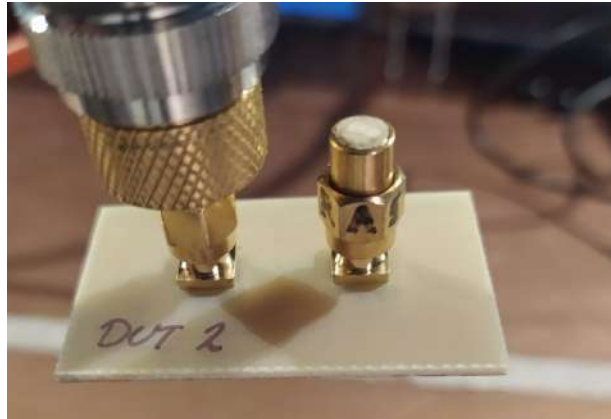
Pruebas de Acoplamiento de Línea de Transmisión de 0.254mm



Nota: con 30 Mhz de Ancho de Banda. Fotografía propia.

Figura 65

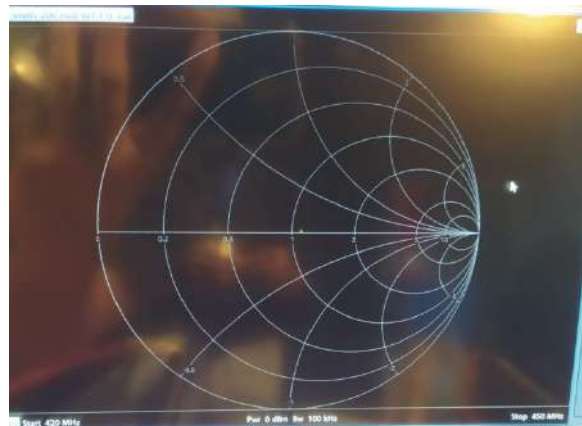
Tarjeta Para Pruebas de Línea de Transmisión de 0.5mm de Ancho



Nota: Fotografía propia.

Figura 66

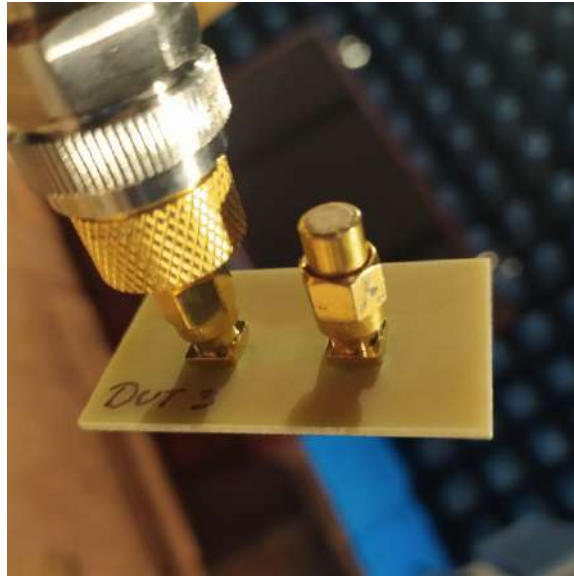
Prueba de Acoplamiento de Línea de Transmisión de 0.5mm de Ancho



Nota: Con 30MHz de ancho de banda. Fotografía propia.

Figura 67

Tarjeta Para Pruebas de Línea de Transmisión de 0.254mm de Ancho



Nota: Fotografía propia

Figura 68

Prueba de Acoplamiento de Línea de Transmisión de 0.254mm de Ancho



Nota: Con 30MHz de ancho de banda. Fotografía propia.

Figura 69

Prueba de Acoplamiento de Línea de Transmisión de 0.254mm de Ancho



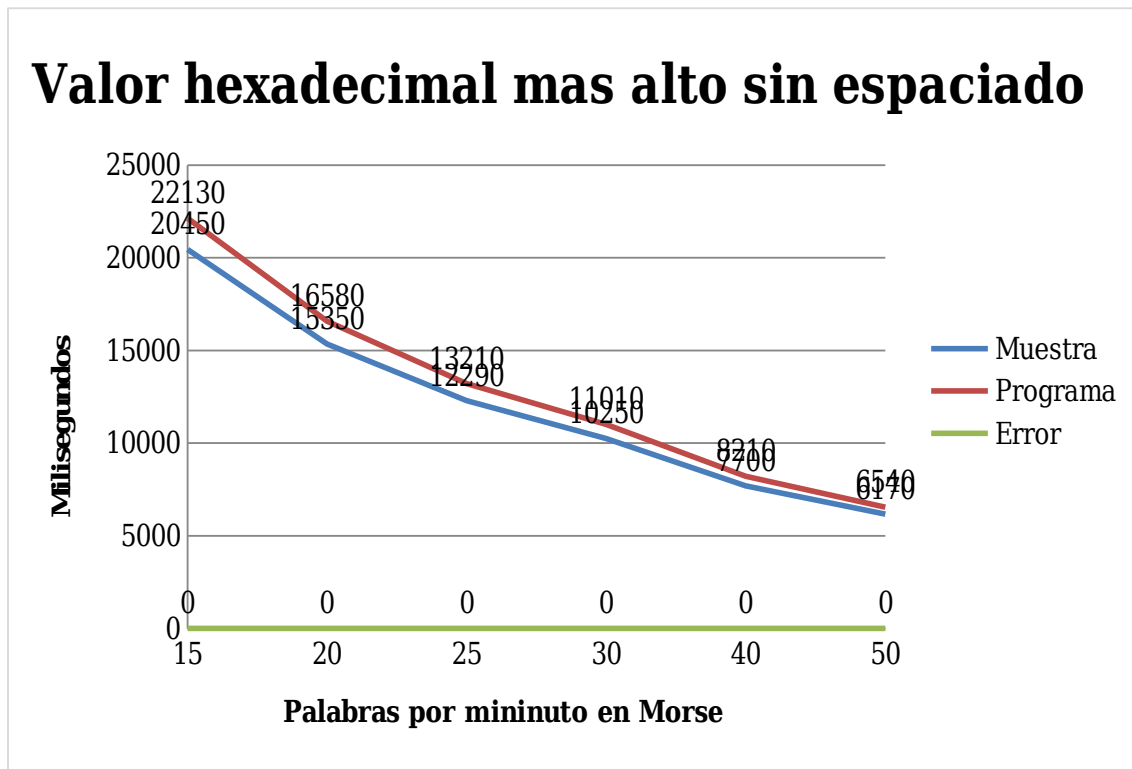
Nota: Con 2MHz de ancho de banda. Fotografía propia.

Resultados

Para realizar una validación numérica de que el software coincide con la temporización esperada se realizó una gráfica comparativa entre el tiempo que tarda la transmisión de un mensaje predeterminado contra la duración de una muestra de audio generada con los parámetros esperados y el mismo mensaje, las pruebas se realizaron para el mejor y peor de los casos, siendo el mejor donde se codifica el número en hexadecimal más alto en el equivalente a morse de menor duración como se observa en la figura 70 y el peor de los casos donde se codifica el numero hexadecimal más bajo en el equivalente a morse de mayor duración de los caracteres elegidos para la codificación como se observa en la figura 71 donde de ambos casos el mayor porcentaje de error fue de $8.215 E^{-4}$ presentándose en el mejor de los casos en las velocidades más bajas de transmisión.

Figura 70

Velocidad de Codificación de Housekeeping sin Espaciado Para Valores Altos



Nota: Elaboración propia.

Figura 71

Velocidad de Codificación de Housekeeping sin Espaciado Para Valores Bajos

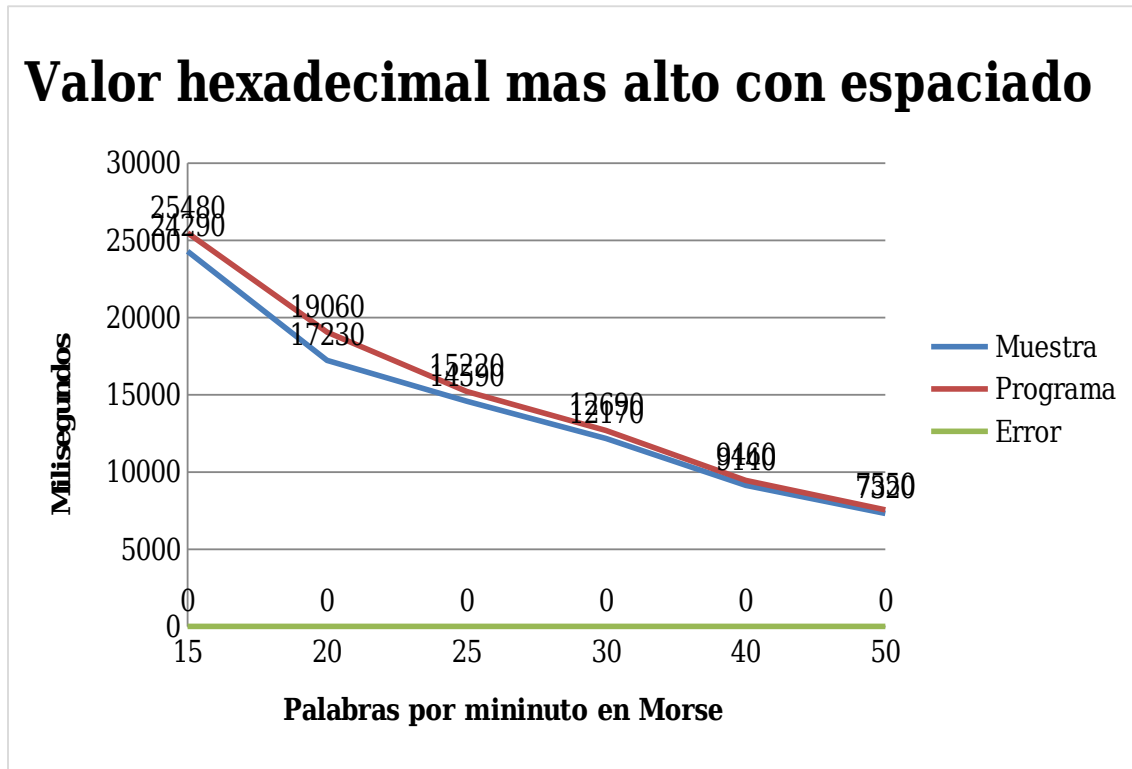


Nota: Elaboración propia.

Se volvió a realizar la medición de tiempos de la transmisión de un mensaje predeterminado contra la duración de una muestra de audio generada con los parámetros esperados y el mismo mensaje pero ésta vez agregando el espaciado en la codificación del housekeeping, las pruebas se realizaron igualmente para el mejor y peor de los casos, el mayor porcentaje de error obtenido de $1.062E^{-3}$ que se volvió a presentar en velocidades bajas para el mejor de los casos, esto se aprecia en las figuras 72 y 73.

Figura 72

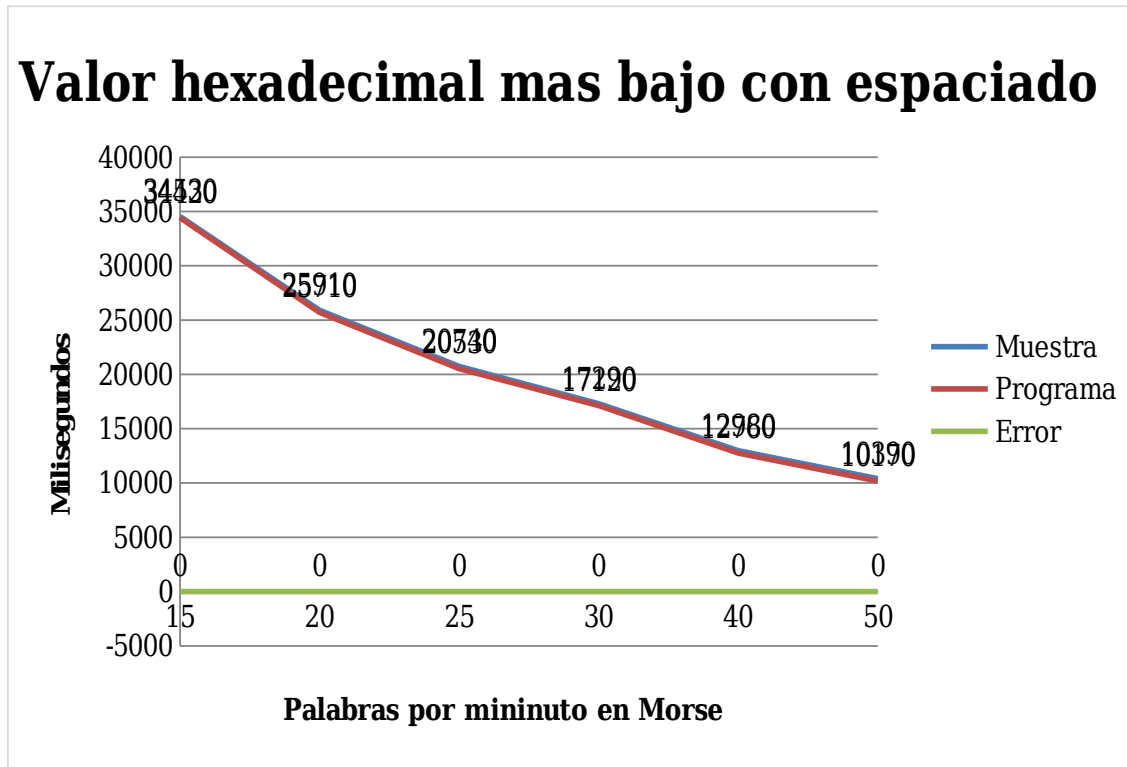
Velocidad de Codificación de Housekeeping con Espaciado Para Valores Altos



Nota: Elaboración propia.

Figura 73

Velocidad de Codificación de Housekeeping con Espaciado Para Valores Bajos

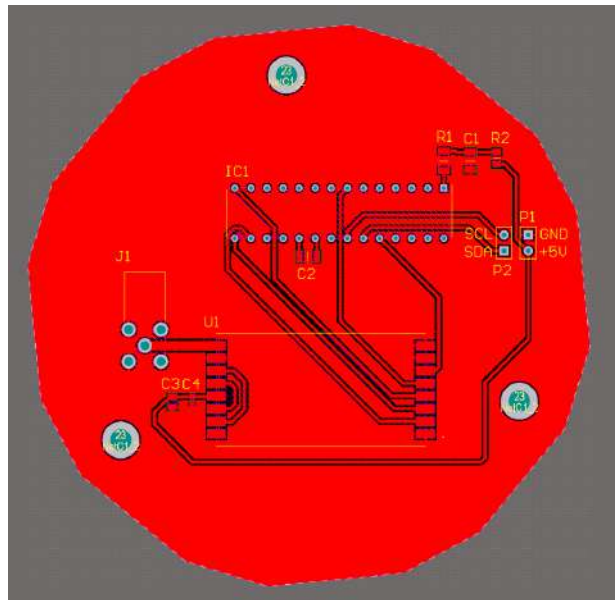


Nota: Elaboración propia.

Las reglas para el ruteo se modificaron desde el primer diseño de la placa, ésta vez usando como base las normas IPC para diseño de tarjetas de circuitos impresos, así como las recomendaciones y consideraciones para el diseño de PCB de grado espacial mencionadas en el capítulo 2 dando como resultado los diseños expuestos en la figura 74 en su vista de pistas y en la figura 75 en su vista de modelo 3D para su manufactura.

Figura 74

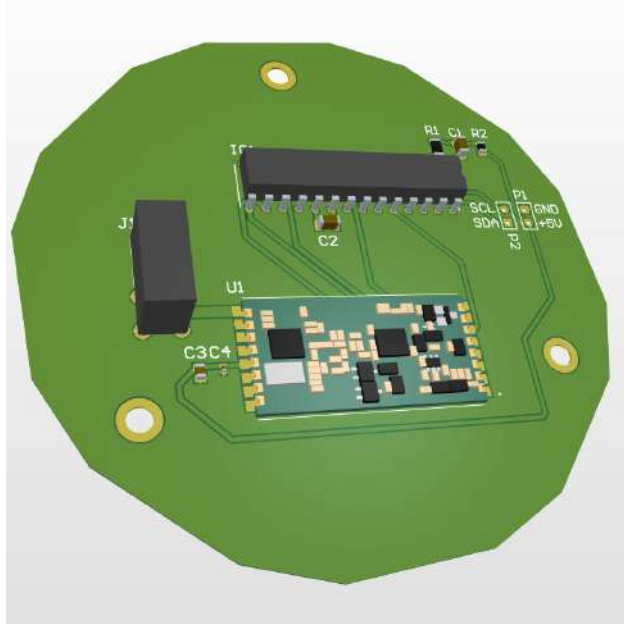
Diseño de Ruteo de Tarjeta PCB del Subsistema de Comunicaciones



Nota: Captura de pantalla del diseño creado utilizando Altium Designer. Elaboración propia.

Figura 75

Modelo 3D de Tarjeta PCB de Subsistema de Comunicaciones



Nota: Captura de pantalla del diseño creado utilizando Altium Designer. Elaboración propia.

Conclusiones

Los datos obtenidos en las pruebas indican que el diseño de la biblioteca permite mantener la velocidad de transmisión esperada para diferentes configuraciones de palabras por minuto, con la facilidad de poder adaptarse a otros actuadores o bibliotecas de software para hacer la codificación de la señal de baliza manteniendo la simpleza para su implementación.

El diseño de la placa PCB y la selección de componentes facilitan la implementación de un sistema de comunicaciones con diferentes funciones de software pudiendo adaptarse a misiones distintas para la que se diseñó por las altas capacidades del microcontrolador seleccionado y las recomendaciones de diseño para PCB para sistemas espaciales.

Productos

Se deja una base que sirva como precedente para futuros proyectos de nanosatélites universitarios para impulsar esta rama en la formación de recursos humanos en el país.

Se deja el diseño de una biblioteca reusable para transmisión de señales de baliza estática para identificación de satélites y transmisión de telemetría de housekeeping para decodificar información numérica en código morse de forma dinámica.

Se deja el diseño de una biblioteca reusable para transmisión de datos utilizando tramas de packet radio para recepción de telemetría en estaciones de radio terrenas que utilicen el protocolo AX.25

Se deja el diseño de una placa de circuito impreso para el subsistema de comunicaciones para el proyecto KuauhtliSat

Trabajo A Futuro

Este trabajo solo consta del diseño conceptual de un sistema funcional, el cual está sujeto a errores que serán claramente vistos a la hora de ser sometido a pruebas de pre certificación como son; vibraciones, compatibilidad electromagnética y termo-vacío, donde dependiendo de los resultados que se obtengan se realizarán las correcciones y mejoras necesarias para lograr pasar dichas pruebas de manera exitosa.

Debido a la pandemia mundial se presentaron retrasos para lograr la fabricación del modelo de ingeniería, así como para realizar pruebas con los demás subsistemas activos y poder detectar posibles problemas de compatibilidad o de funcionamiento, por lo que una parte del trabajo a futuro también es la fabricación y pruebas del modelo de ingeniería para proceder con la fabricación de un modelo de vuelo que cumpla con los requerimientos necesarios para poder sobrevivir al ambiente espacial y pasar las pruebas de certificación, para posteriormente ser integrado con el resto de los subsistemas y ser puesto en órbita.

Bibliografía

- Abdelkarim, A. A. Y. (2016). Nano-satellite communication subsystem design and implementation. *Proceedings - 2015 International Conference on Computing, Control, Networking, Electronics and Embedded Systems Engineering, ICCNEEE 2015*, 318–323. <https://doi.org/10.1109/ICCNEEE.2015.7381385>
- Ahmad, Y. A., Nazim, N. J., & Yuhaniz, S. S. (2016). Design of a terminal node controller hardware for CubeSat tracking applications. *IOPscience*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/152/1/012031>
- Alen Space. (s/f). *Guía básica de nanosatélites*. Recuperado el 22 de mayo de 2021, de <https://alen.space/es/guia-basica-nanosatelites/>
- Almonacid, V., & Franck, L. (2017). Extending the coverage of the internet of things with low-cost nanosatellite networks. *Acta Astronautica*, 138, 95–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.05.030>
- Angel-Rojas, D., Pérez-Barbosa, D., González-Llorente, J., & Acero-Nino, I. (2017, julio 14). Analysis and design of the power conditioning unit of a nanosatellite. *2017 3rd IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications, PEPQA 2017 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/PEPQA.2017.7981662>
- Atem de Carvalho, R., Estela, J., & Langer, M. (2020). *Nanosatellites Space and Ground Technologies, Operations and Economics*. (pp. 115–142). John Wiley & Sons.
- Balmaceda, J., Aubert, J., & Arias, M. R. (2017). Performance analysis of radio link implementation for low cost deployed WiMAX networks. *2017 IEEE 37th Central America and Panama Convention (CONCAPAN XXXVII)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/CONCAPAN.2017.8278516>
- Beech, W. A., Nielsen, D. E., & Taylor, J. (1997). *AX.25 Link Access Protocol for Amateur Packet Radio Version 2.2*.
- Bhatt, D. J., Bindal, A., & Makani, K. (s/f). *Space Qualified PCB Design Techniques*.
- BRYCE. (2020). *Smallsats by the Numbers 2020*. https://brycetech.com/reports/report-documents/Bryce_Smallsats_2020.pdf
- Cappelletti, C., Battistini, S., & Graziani, F. (2018). Small launch platforms for micro-satellites. *Advances in Space Research*, 62(12), 3298–3304. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.05.004>
- Cappelletti, C., Battistini, S., & Malphrus, B. (2020). *Cubesat Handbook: From Mission Design to Operations*. Academic Press.
- Cappiello, A. G., Popescu, D. C., Harris, J. S., & Popescu, O. (2019). Radio Link Design for CubeSat-to-Ground Station Communications Using An Experimental License. *2019 International Symposium on Signals, Circuits and Systems (ISSCS)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/ISSCS.2019.8801767>
- Carron, L. P. (1991). *Morse Code_ The Essential Language*. American Radio Relay League.
- Chaithra N, & AkhilV. (2016). *Telemetry, Tracking, Command and Monitoring on Ground Station Parameters for Satellites*.
- ESA. (s/f). *Types of orbits*. Recuperado el 27 de junio de 2021, de https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits
- Federal Aviation Administration. (2018). *The Annual Compendium of Commercial Space Transportation: 2018*. FAA Office of Commercial Space Transportation. https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/2018_ast_compendium.pdf
- García, E. (2019). *Software de control per a un nanosatèl·lit*.
- Garrido, J., Zamorano, J., Alonso, A., & de la Puente, J. A. (2018). Timing Analysis of the UPMSat-2 Communications Subsystem *. *IFAC-PapersOnLine*, 51(10), 217–222. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.265>

- Gerard, M., Bousquet, M., & Zhili, S. (2020). *Satellite Communications Systems: Systems, Techniques and Technology* (6th ed.). John Wiley & Sons Inc.
- Hoffpauir, D. (2018). *NASA Procedural Requirements NPR 7120.8A COMPLIANCE IS MANDATORY FOR NASA EMPLOYEES NASA Research and Technology Program and Project Management Requirements (Updated w/Chage 2)*. <https://nodis3.gsfc.nasa.gov>.
- HOPERF ELECTRONICS. (s/f). *R F M 2 3 BP RFM23BP ISM TRANSCEIVER MODULE*. Recuperado el 11 de octubre de 2021, de <https://www.hoperf.com/data/upload/portal/20190307/RFM23BP.pdf>
- Interorbital Systems. (s/f). *TubeSat Kits*. Recuperado el 22 de mayo de 2021, de <https://www.interorbital.com/TubesatKits>
- Jaswar, F. D., Rahman, T. A., Hindia, M. N., & Ahmad, Y. A. (2017). *Design of an adaptive CubeSat transmitter for achieving optimum signal-to-noise ratio (SNR) Related content Design of an adaptive CubeSat transmitter for achieving optimum signal-to-noise ratio (SNR)*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/270/1/012016>
- Karn, P. R., Price, H. E., & Diersing, R. J. (1985). PACKET RADIO IN THE AMATEUR SERVICE. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications, SAC-3*(3), 431–439. <https://doi.org/10.1109/jsac.1985.1146214>
- Kitts, C., & Rasay, M. (2016). A university-based distributed satellite mission control network for operating professional space missions. *Acta Astronautica, 120*, 229–238. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.10.020>
- Kleinschrodt, A., Freimann, A., Christall, S., Lankl, M., & Schilling, K. (2017). Advances in modulation and communication protocols for small satellite ground stations. *Proceedings of the International Astronautical Congress, IAC, 9*, 5859–5867. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85051366646&partnerID=40&md5=9180446e172672d23431aaa7e5a9af27>
- Klofas, B. (2018). *CubeSat Communications System Table*. <https://www.klofas.com/comm-table/table.pdf>
- Meza, J., Gutiérrez, C., Torres, J. A., & Morales, A. (2015). *Reporte del proyecto “Terminal Node Controller” (TNC) para el Nanosatélite ULISES 1*. <https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/1166/1/MezaPJ3.pdf>
- Mhangara, P., Mapurisa, W., & Mudau, N. (2020). Image interpretability of nSight-1 nanosatellite imagery for remote sensing applications. *Aerospace, 7*(2). <https://doi.org/10.3390/aerospace7020019>
- Microchip Technology Inc. (2021). *PIC18(L)F26/27/45/46/47/55/56/57K42 datasheet*. https://www.mouser.mx/datasheet/2/268/PIC18_L_F26_27_45_46_47_55_56_57K42_Data_Sheet_400-2079756.pdf
- MX-COM INC. (s/f). *MX614 DATA BULLETIN Bell 202 Compatible Modem*. Recuperado el 11 de octubre de 2021, de https://www.cmlmicro.com/wp-content/uploads/2017/06/MX614_ds.pdf
- N. Williams, R. (1993). *A PAINLESS GUIDE TO CRC ERROR DETECTION ALGORITHMS*. https://ceng2.ktu.edu.tr/~cevhers/ders_materyal/bil311_bilgisayar_mimarisi/supplementary_docs/crc_algorithms.pdf
- Nanosats Database. (s/f). *Constellations, companies, technologies and more*. Recuperado el 22 de mayo de 2021, de <https://www.nanosats.eu/>
- National Defense Industry Press. (2018). Micro/Nano Satellite Integrated Electronic System. En *Space Microsystems and Micro/nano Satellites* (pp. 115–146). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-812672-1.00004-7>
- Perez, F., Modenini, D., Vázquez, A., Aguado, F., Tubío, R., Dolgos, G., Tortora, P., Gonzalez, A., Lasagni Manghi, R., Zannoni, M., Nazeeruddin, A., Melozzi, M., & Carnelli, I. (2018). DustCube, a nanosatellite mission to binary asteroid 65803 Didymos as part of the ESA AIM mission. *Advances in Space Research, 62*(12), 3335–3356.

- <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.06.019>
- Pratt, F. (1939). *Secret and urgent - The story of codes and ciphers*. (Original). Bobbs-Merrill. <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=90bbc8bca1ca9e0ed99b0ff5ef4f8be4>
- Radiometrix Ltd. (2007). *AFS2-458 datasheet*. <https://datasheetspdf.com/pdf-file/620606/Radiometrix/AFS2-458/1>
- Radiometrix Ltd. (2015). *TR2M-458-5 datasheet*. <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1132663/Radiometrix/TR2M-458-5/1>
- Shea, G. (2020). *NASA Systems Engineering Handbook Rev-2*. National Aeronautics and Space Administration. <https://www.nasa.gov/seh/index.html>
- Shiroma, W. A., Martin, L. K., Akagi, J. M., Akagi, J. T., Wolfe, B. L., Fewell, B. A., & Ohta, A. T. (2011). CubeSats: A bright future for nanosatellites. *Central European Journal of Engineering*, 1(1), 9–15. <https://doi.org/10.2478/s13531-011-0007-8>
- Tresvig, J. L., & Lindem, T. (2014). Design of a Communication System for a Nanosatellite Space Weather Mission. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 29(11), 22–29. <https://doi.org/10.1109/MAES.2014.130177>
- TUBESAT_TX_RX_V2. (2010). https://spacegrant.colorado.edu/COSGC_Projects/RockSat-X_2013/teams/CDR/WVU_CDR/Schematic_PDFs/PicoSat_Transceiver.pdf
- UAT-FI-UNAM. (2021). *Proyecto de Nanosatélite Universitario Experimental “KauuhtliSAT el Ulises 2.0”*. <https://www.ingenieria.unam.mx/kuauhtliSAT/>
- Wakita, M. (s/f). *Satellites and Frequencies*. 2021. Recuperado el 15 de julio de 2021, de <http://www.ne.jp/asahi/hamradio/je9pel/satslist.htm>
- Zapico, E. N., Torresán, G. J., & Garay, R. J. (2005). *ANÁLISIS ESTRUCTURAL PRELIMINAR DE UN NANOSATÉLITE LANZADO POR CAÑON ELECTROMAGNÉTICO*.
- Zielinski, B. M. (2009). Effective transmission speed in AX.25 protocol. *IEEE EUROCON 2009*, 1763–1768. <https://doi.org/10.1109/EURCON.2009.5167882>

Anexos

Anexo A: Código Morse

Figura 76

Código Morse Versión Internacional (Actual) y Americana

INTERNATIONAL MORSE	AMERICAN MORSE																																																																																																								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 10%; text-align: right;">A</td><td style="width: 90%;">• —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">B</td><td>• — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">C</td><td>• — — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">D</td><td>• — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">E</td><td>• • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">F</td><td>• • — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">G</td><td>• — — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">H</td><td>• • — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">I</td><td>• • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">J</td><td>• — • — —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">K</td><td>• — • —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">L</td><td>• — • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">M</td><td>• — — —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">N</td><td>• — • —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">O</td><td>• — — —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">P</td><td>• — • — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Q</td><td>• — — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">R</td><td>• — • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">S</td><td>• • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">T</td><td>• — — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">U</td><td>• • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">V</td><td>• • • —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">W</td><td>• — • — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">X</td><td>• — — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Y</td><td>• — • — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Z</td><td>• — — • •</td></tr> </table>	A	• —	B	• — • •	C	• — — •	D	• — • •	E	• • •	F	• • — •	G	• — — •	H	• • — • •	I	• • • •	J	• — • — —	K	• — • —	L	• — • • •	M	• — — —	N	• — • —	O	• — — —	P	• — • — •	Q	• — — • •	R	• — • • •	S	• • • •	T	• — — •	U	• • • •	V	• • • —	W	• — • — •	X	• — — • •	Y	• — • — •	Z	• — — • •	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 10%; text-align: right;">A</td><td style="width: 90%;">• —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">B</td><td>• — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">C</td><td>• — — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">D</td><td>• — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">E</td><td>• • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">F</td><td>• • — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">G</td><td>• — — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">H</td><td>• • — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">I</td><td>• • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">J</td><td>• — • — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">K</td><td>• — • —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">L</td><td>• — • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">M</td><td>• — — —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">N</td><td>• — • —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">O</td><td>• — — —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">P</td><td>• — • — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Q</td><td>• — — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">R</td><td>• — • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">S</td><td>• • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">T</td><td>• — — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">U</td><td>• • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">V</td><td>• • • —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">W</td><td>• — • — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">X</td><td>• — — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Y</td><td>• — • — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">Z</td><td>• — — • •</td></tr> </table>	A	• —	B	• — • •	C	• — — •	D	• — • •	E	• • •	F	• • — •	G	• — — •	H	• • — • •	I	• • • •	J	• — • — •	K	• — • —	L	• — • • •	M	• — — —	N	• — • —	O	• — — —	P	• — • — •	Q	• — — • •	R	• — • • •	S	• • • •	T	• — — •	U	• • • •	V	• • • —	W	• — • — •	X	• — — • •	Y	• — • — •	Z	• — — • •
A	• —																																																																																																								
B	• — • •																																																																																																								
C	• — — •																																																																																																								
D	• — • •																																																																																																								
E	• • •																																																																																																								
F	• • — •																																																																																																								
G	• — — •																																																																																																								
H	• • — • •																																																																																																								
I	• • • •																																																																																																								
J	• — • — —																																																																																																								
K	• — • —																																																																																																								
L	• — • • •																																																																																																								
M	• — — —																																																																																																								
N	• — • —																																																																																																								
O	• — — —																																																																																																								
P	• — • — •																																																																																																								
Q	• — — • •																																																																																																								
R	• — • • •																																																																																																								
S	• • • •																																																																																																								
T	• — — •																																																																																																								
U	• • • •																																																																																																								
V	• • • —																																																																																																								
W	• — • — •																																																																																																								
X	• — — • •																																																																																																								
Y	• — • — •																																																																																																								
Z	• — — • •																																																																																																								
A	• —																																																																																																								
B	• — • •																																																																																																								
C	• — — •																																																																																																								
D	• — • •																																																																																																								
E	• • •																																																																																																								
F	• • — •																																																																																																								
G	• — — •																																																																																																								
H	• • — • •																																																																																																								
I	• • • •																																																																																																								
J	• — • — •																																																																																																								
K	• — • —																																																																																																								
L	• — • • •																																																																																																								
M	• — — —																																																																																																								
N	• — • —																																																																																																								
O	• — — —																																																																																																								
P	• — • — •																																																																																																								
Q	• — — • •																																																																																																								
R	• — • • •																																																																																																								
S	• • • •																																																																																																								
T	• — — •																																																																																																								
U	• • • •																																																																																																								
V	• • • —																																																																																																								
W	• — • — •																																																																																																								
X	• — — • •																																																																																																								
Y	• — • — •																																																																																																								
Z	• — — • •																																																																																																								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 10%; text-align: right;">1</td><td style="width: 90%;">• — — — —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">2</td><td>• • — — —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">3</td><td>• • • — —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">4</td><td>• • • • —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">5</td><td>• • • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">6</td><td>• — • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">7</td><td>• — — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">8</td><td>• — • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">9</td><td>• — — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">0</td><td>• — — — —</td></tr> </table>	1	• — — — —	2	• • — — —	3	• • • — —	4	• • • • —	5	• • • • •	6	• — • • •	7	• — — • •	8	• — • • •	9	• — — • •	0	• — — — —	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 10%; text-align: right;">1</td><td style="width: 90%;">• — — — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">2</td><td>• • — — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">3</td><td>• • • — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">4</td><td>• • • • —</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">5</td><td>• — — — •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">6</td><td>• — • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">7</td><td>• — — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">8</td><td>• — • • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">9</td><td>• — — • •</td></tr> <tr><td style="text-align: right;">0</td><td>• — — — •</td></tr> </table>	1	• — — — •	2	• • — — •	3	• • • — •	4	• • • • —	5	• — — — •	6	• — • • •	7	• — — • •	8	• — • • •	9	• — — • •	0	• — — — •																																																																
1	• — — — —																																																																																																								
2	• • — — —																																																																																																								
3	• • • — —																																																																																																								
4	• • • • —																																																																																																								
5	• • • • •																																																																																																								
6	• — • • •																																																																																																								
7	• — — • •																																																																																																								
8	• — • • •																																																																																																								
9	• — — • •																																																																																																								
0	• — — — —																																																																																																								
1	• — — — •																																																																																																								
2	• • — — •																																																																																																								
3	• • • — •																																																																																																								
4	• • • • —																																																																																																								
5	• — — — •																																																																																																								
6	• — • • •																																																																																																								
7	• — — • •																																																																																																								
8	• — • • •																																																																																																								
9	• — — • •																																																																																																								
0	• — — — •																																																																																																								
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 10%;">Period (.)</td><td style="width: 90%;">• — • • • —</td></tr> <tr><td>Comma (,)</td><td>• — — • • —</td></tr> <tr><td>Interrogation (?)</td><td>• — • — • •</td></tr> <tr><td>Colon (:)</td><td>• — • — • •</td></tr> <tr><td>Semicolon (;)</td><td>• — • — • •</td></tr> <tr><td>Hyphen (-)</td><td>• — • — • •</td></tr> <tr><td>Slash (/)</td><td>• — • — • •</td></tr> <tr><td>Quotation marks ("")</td><td>• — • — • •</td></tr> </table>	Period (.)	• — • • • —	Comma (,)	• — — • • —	Interrogation (?)	• — • — • •	Colon (:)	• — • — • •	Semicolon (;)	• — • — • •	Hyphen (-)	• — • — • •	Slash (/)	• — • — • •	Quotation marks ("")	• — • — • •	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 10%;">Period (.)</td><td style="width: 90%;">• • — — • •</td></tr> <tr><td>Comma (,)</td><td>• — — • • —</td></tr> <tr><td>Interrogation (?)</td><td>• — • — • •</td></tr> <tr><td>Colon (:)</td><td>• — • — • •</td></tr> <tr><td>Semicolon (;)</td><td>• — • — • •</td></tr> <tr><td>Hyphen (-)</td><td>• — • — • •</td></tr> <tr><td>Slash (/)</td><td>• — • — • •</td></tr> <tr><td>Quotation marks ("")</td><td>• — • — • •</td></tr> </table>	Period (.)	• • — — • •	Comma (,)	• — — • • —	Interrogation (?)	• — • — • •	Colon (:)	• — • — • •	Semicolon (;)	• — • — • •	Hyphen (-)	• — • — • •	Slash (/)	• — • — • •	Quotation marks ("")	• — • — • •																																																																								
Period (.)	• — • • • —																																																																																																								
Comma (,)	• — — • • —																																																																																																								
Interrogation (?)	• — • — • •																																																																																																								
Colon (:)	• — • — • •																																																																																																								
Semicolon (;)	• — • — • •																																																																																																								
Hyphen (-)	• — • — • •																																																																																																								
Slash (/)	• — • — • •																																																																																																								
Quotation marks ("")	• — • — • •																																																																																																								
Period (.)	• • — — • •																																																																																																								
Comma (,)	• — — • • —																																																																																																								
Interrogation (?)	• — • — • •																																																																																																								
Colon (:)	• — • — • •																																																																																																								
Semicolon (;)	• — • — • •																																																																																																								
Hyphen (-)	• — • — • •																																																																																																								
Slash (/)	• — • — • •																																																																																																								
Quotation marks ("")	• — • — • •																																																																																																								

Nota: (Carron, 1991)