

Tabla de contenido

2. Antecedentes	1
2.1. Fundamentación y objetivos generales	1
2.1.1. Marco general	1
2.1.2. Objetivo general	2
2.1.3. Objetivos específicos	2
2.2. Hipótesis de trabajo y metodología	2
2.2.1. Supuestos	3
2.2.2. Infraestructura disponible	3
2.2.3. Hardware utilizado	3
2.2.4. Software utilizado	4
2.2.5. Plan de Trabajo	5
2.2.6. Elección del terreno de pruebas	5
2.3. Revisión Bibliográfica	6
2.3.1. Características de los satélites	6
2.3.2. Tipos de órbitas terrestres	7
2.3.3. El estándar CubeSat	8
2.3.4. CubeSats en Chile	11
2.3.5. Femtosatélites	12
2.3.6. Motivación	15
2.3.7. Consideraciones técnicas	16
2.3.8. Modulación y demodulación	19
2.3.9. Cálculo de radioenlace	22
3. Implementación	27
3.1. Desarrollo en terreno	27
3.1.1. Programación	29
3.1.2. Diseño de PCB	33
3.1.3. Reciclaje de baterías de litio	35
3.1.4. Montaje final	35
3.2. Desarrollo de la radiosonda	36
3.2.1. Pruebas preliminares	37
3.2.2. Diseño de PCB	39
3.2.3. Código para la radiosonda	39
3.2.4. Código para los receptores	41
3.2.5. Montaje de la radiosonda y los receptores	44

4. Evaluación y análisis de resultados	48
4.1. Pruebas en Parque O'Higgins	48
4.1.1. Resultados a 125 kb/s	50
4.1.2. Resultados a 38,4 kb/s	52
4.1.3. Resultados a 19,2 kb/s	53
4.1.4. Resultados a 2,4 kb/s	54
4.1.5. Resultados a 2 kb/s	55
4.1.6. Resultados generales	56
4.2. Pruebas a mayor distancia	58
4.3. Pruebas con la radiosonda	61
4.4. Cálculo de radioenlace final	64
4.4.1. Comunicación entre transeptores actualizada	67
4.4.2. Comunicación hacia la estación terrena actualizada	68
Conclusión	68
4.5. Posibles usos para el RFM22B	70
4.6. Trabajo futuro	70
Bibliografía	72
5. Anexo	75

Índice de Tablas

2.1.	Características generales del Arduino Due	4
2.2.	Consumo energético de los transceptores	17
2.3.	Tabla para la salida en MSK	21
2.4.	Potencia y sensibilidad de los transceptores	23
2.5.	Especificaciones de las antenas	24
2.6.	Potencias para el cálculo de enlace entre TRX RFM22B	25
2.7.	Potencias para el cálculo de enlace hacia la estación terrena	25
3.1.	Tabla de conexiones RFM22B - Arduino Due	28
3.2.	Consumo de corriente del GPS L80	37
3.3.	Conexiones entre el Arduino Due y el GPS L80	38
4.1.	Radios de zona de Fresnel	50
4.2.	Pruebas a 2.0 kb/s usando un atenuador de 30 dB	58
4.3.	Resultado efectivo considerando la atenuación	58
4.4.	Zonas de Fresnel en cerro La Pirámide (500 m)	60
4.5.	Distancia efectiva en cerro La Pirámide	61
4.6.	Potencias actualizadas para el cálculo de enlace entre TRX RFM22B	67
4.7.	Potencias actualizadas para el cálculo de enlace hacia la estación terrena	68

Índice de Ilustraciones

2.1. Distancias probadas en Parque O'Higgins	5
2.2. La ISS orbita la Tierra una vez cada 90 minutos.	7
2.3. Órbitas polares	8
2.4. 1U CubeSat Design Specification	9
2.5. Transceptor del SUCHAI	12
2.6. Diseño de un Sprite	13
2.7. Diseño conceptual del despliegue de Sprites	13
2.8. Femtosatélites de 1F y 3F	14
2.9. Diseños de los satélites PUCP-Sat-1 y Pocket-PUCP	15
2.10. Transceptor RFM22B	15
2.11. Modulación FSK	20
2.12. Espectros de FSK vs GFSK	21
2.13. Modulación MSK	22
3.1. Transceptor con placa adaptadora	27
3.2. Prototipado del proyecto	28
3.3. Diagrama de flujo general del TX	30
3.4. Diagrama de flujo de la función enviar	31
3.5. Impresión en pantalla de los aciertos	32
3.6. Diseño de PCB en KiCad	33
3.7. Placa de prueba	34
3.8. PCB fabricada para conectar el transceptor al Arduino Due	34
3.9. Baterías de litio	35
3.10. Transceptor más batería unidos al atril	36
3.11. Arduino más GPS L80 en protoboard	38
3.12. Diseño de PCB para incorporar el GPS	39
3.13. Componentes de la radiosonda	45
3.14. Armado de la radiosonda	45
3.15. Reforzamiento de la radiosonda	46
3.16. Antena yagi de la estación terrena	46
3.17. Setup de la estación terrena	47
3.18. Antena omnidireccional y antena Yagi	47
4.1. Zona de Fresnel (usada con permiso de la licencia <i>Creative Commons</i>)	49
4.2. Obtención de datos del transceptor al notebook	49
4.3. Datos recibidos correctamente a 125 kb/s	51

4.4. Tiempo utilizado para enviar 1000 paquetes a 125 kb/s	51
4.5. Datos recibidos correctamente a 38.4 kb/s	52
4.6. Tiempo utilizado para enviar 1000 paquetes a 38.4 kb/s	52
4.7. Datos recibidos correctamente a 19.2 kb/s	53
4.8. Tiempo utilizado para enviar 1000 paquetes a 19.2 kb/s	53
4.9. Datos recibidos correctamente a 2.4 kb/s	54
4.10. Tiempo utilizado para enviar 1000 paquetes a 2.4 kb/s	54
4.11. Datos recibidos correctamente a 2.0 kb/s	55
4.12. Tiempo utilizado para enviar 1000 paquetes a 2.0 kb/s	55
4.13. Datos recibidos correctamente	56
4.14. Tiempo utilizado para enviar 1000 paquetes	57
4.15. Atenuadores de potencia de 30 dB	58
4.16. Prueba en cerro La Pirámide	59
4.17. Línea de vista cerro La Pirámide	60
4.18. Trayectoria de la radiosonda en Google Earth. Los puntos azules representan datos obtenidos por la antena Yagi portátil con 30 dB de atenuación. Los verdes son los datos captados por la antena omnidireccional con 30 dB de atenuación. Morado la antena Yagi portátil sin atenuación. Rojo la estación terrena con la antena Yagi de 6 m y con 40 dB de atenuación. La distancia en tierra entre el inicio y la última posición captada fue de aproximadamente 11 km.	62
4.19. Paquetes de la radiosonda recibidos por la antena omnidireccional	63
4.20. Paquetes de la radiosonda recibidos por la estación terrena	64
4.21. Analizador de espectros	65
4.22. En azul el espectro del transceptor con modulación GFSK a 2 kb/s. En rojo el inicio y término del ancho de banda.	65
4.23. En azul el espectro del transceptor con modulación FSK a 2 kb/s. En rojo el inicio y término del ancho de banda.	66
4.24. En azul el espectro del transceptor con modulación OOK a 2,4 kb/s. En rojo el inicio y término del ancho de banda.	67