



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN
TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y SISTEMAS



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN EN UN GLOBO METEOROLÓGICO PARA EL
ESTUDIO DE LA TROPOSFERA BAJA**

HERRERA M. JOSE R.
PINTO G. ALEJANDRO J.

Bárbula, 16 de Mayo del 2014



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN
TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y SISTEMAS



**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN EN UN GLOBO METEOROLÓGICO PARA EL
ESTUDIO DE LA TROPOSFERA BAJA**

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO PRESENTADO ANTE LA ILUSTRE UNIVERSIDAD DE
CARABOBO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO DE TELECOMUNICACIONES

HERRERA M. JOSE R.
PINTO G. ALEJANDRO J.

Bárbula, 16 de Mayo del 2014



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN
TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y SISTEMAS



AVAL DEL TUTOR

Quien suscribe Carlos Mejías, titular de la cédula de identidad V-17.067.186, en mi carácter de TUTOR del Trabajo Especial de Grado titulado:

Diseño e Implementación de un Sistema de Comunicación en un Globo Meteorológico para el Estudio de la Troposfera Baja

Y presentado por los bachilleres HERRERA M. JOSE R., cédula de identidad V-19.320.209, PINTO G. ALEJANDRO J., cédula de identidad V-20.698.952, para optar al Título de Ingeniero de Telecomunicaciones, hago constar que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se le designe

Firma

Prof. CARLOS MEJÍAS

CI: V-17.067.186

TUTOR

Bárbula, 16 de Mayo del 2014



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN
TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y SISTEMAS



AVAL DEL CO-TUTOR

Quien suscribe Nelson Falcón, titular de la cédula de identidad V-6.101.724, en mi carácter de CO-TUTOR del Trabajo Especial de Grado titulado:

Diseño e Implementación de un Sistema de Comunicación en un Globo Meteorológico para el Estudio de la Troposfera Baja

Y presentado por los bachilleres HERRERA M. JOSE R., cédula de identidad V-19.320.209, PINTO G. ALEJANDRO J., cédula de identidad V-20.698.952, para optar al Título de Ingeniero de Telecomunicaciones, hago constar que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del jurado examinador que se le designe

Firma

Prof. NELSON FALCÓN

CI: V-6.101.724

CO-TUTOR

Bárbula, 16 de Mayo del 2014



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN
TELECOMUNICACIONES
DEPARTAMENTO DE SEÑALES Y SISTEMAS



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes miembros del jurado asignado para evaluar el trabajo especial de grado titulado “DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE COMUNICACIÓN EN UN GLOBO METEOROLÓGICO PARA EL ESTUDIO DE LA TROPOSFERA BAJA”, realizado por los bachilleres HERRERA M. JOSE R., cédula de identidad V-19.320.209, PINTO G. ALEJANDRO J., cédula de identidad V-20.698.952, hacemos constar que hemos revisado y aprobado dicho trabajo.

Firma

Prof. CARLOS MEJÍAS

TUTOR

Firma

Prof. GRECIA ROMERO

JURADO

Firma

Prof. AHMAD OSMAN

JURADO

Bárbula, 16 de Mayo del 2014

Dedicatoria

*A Dios, quien es mi guía espiritual,
A mi madre Alicia Mendoza por su apoyo incondicional
A mi padre José Herrera O. por ser mi modelo a seguir.*

HERRERA M. JOSE R.

*A mis padres,
Hermanos,
Y a mi abuela Elba...*

PINTO G. ALEJANDRO J.

Agradecimientos

Les damos las gracias especialmente y primeramente a Dios que nos dio la salud y la sabiduría junto con ésta oportunidad de lograr nuestra meta.

A nuestros Padres por su apoyo, contancia y consejos para la realización de este trabajo especial de grado.

A nuestros tutores quienes nos guiaron a desarrollar este proyecto.

A FONACIT por aportar el financiamiento para los equipos utilizados.

Al igual que a cada uno de los profesores que nos ayudaron aportando ideas y en especial a todas aquellas personas que de alguna manera colaboraron con nosotros en el desarrollo y culminación de este trabajo especial de grado.

Índice general

Índice de Figuras	XI
Índice de Tablas	XIII
Acrónimos	XV
Resumen	XVII
Introducción	1
I. El Problema	3
1.1. Planteamiento del problema	3
1.2. Justificación	4
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Generales	5
1.3.2. Específicos	5
1.4. Alcance	6
1.5. Recursos a utilizar	6
II. Marco Teórico	7
2.1. Antecedentes	7
2.2. Bases teóricas	8
2.2.1. Propagación troposférica	8
2.2.2. Descripción del medio de transmisión	9
2.2.2.1. Atenuación por gases atmosféricos	9
2.2.2.2. Atenuación por nubes	10
2.2.2.3. Atenuación por lluvia	12
2.2.2.4. Atenuación por granizo y niebla	12
2.2.2.5. Ruido térmico emitido por la troposfera	13
2.2.3. Comportamiento de las variables temperatura y presión en la troposfera baja	14
2.2.4. Protocolo Digimesh	15
2.2.5. Modelo de capas del Xbee Pro 900	17

2.2.6. Flujo de datos UART en el módulo Xbee Pro 900	18
2.2.7. Intercambios en la UART en modo API	19
2.2.8. Trama solicitud de transmisión	19
2.2.9. Trama estado de transmisión	20
2.2.10. Trama de paquete recibido	21
2.2.11. Zona lejana	21
2.2.12. Zona de Fresnel	23
2.2.13. Efecto Doppler Fizeau	23
2.3. Definición de términos	24
III. Marco Metodológico	27
3.1. Nivel de investigación	27
3.2. Diseño de la investigación	28
3.3. Técnicas de recolección y análisis de información	28
3.3.1. Instrumentos de recolección de datos	29
3.3.2. Técnicas de análisis de información	29
3.4. Procedimiento de la investigación	30
IV. Análisis, Interpretación y Presentación de los Resultados	33
4.1. Identificar los fenómenos atmosféricos que se presentan en la troposfera baja para el diseño del sistema de comunicación	33
4.2. Determinar los niveles de prioridad de las variables atmosféricas para la realización del protocolo de comunicación	34
4.3. Definir el módulo de comunicación que soporte las condiciones troposféricas con la finalidad de transmitir los datos bidireccionalmente desde el globo meteorológico a su receptor en tierra	38
4.4. Desarrollar el protocolo de comunicación que permita enviar los datos de acuerdo a la prioridad de las variables troposféricas a estudiar, asegurando la recepción de los datos mediante código de detección de errores	45
4.4.1. Montaje de los sensores	46
4.4.2. Unidad central de procesamiento	48
4.4.3. Almacenamiento de datos	51
4.5. Simular el protocolo de comunicación mediante un programa que contenga las especificaciones del módulo de comunicación seleccionado	53
4.6. Implementar el sistema de comunicación mediante el empleo de un globo meteorológico para la obtención de los datos sobre las características de la troposfera baja	57
4.6.1. Configuración de puertos	58
4.6.2. Configuración del MODEM para modo transparente	60
4.6.3. Transmisión de datos punto a punto	60
4.6.4. Configuración del MÓDEM en modo API 1	61

4.6.5. Transmisión de datos punto a punto modo API 1	62
4.6.6. Implementación del sistema de comunicación	63
V. Conclusiones y Recomendaciones	69
5.1. Conclusiones	69
5.2. Recomendaciones	71
Referencias Bibliográficas	73

Anexos

- A. Método para calcular la atenuación debida a gases atmosféricos por la UTI
- B. Método para calcular las estadísticas de atenuación debida a la lluvia
- C. Método para determinar el ruido en estaciones terrenas
- D. Hoja de datos conector SMA hembra
- E. Hoja de datos conector SMA macho
- F. Hoja de datos antena Log periódica LPY41
- G. Hoja de datos módulo Xbee Pro 900
- H. Tarjeta de circuito impreso del sistema de comunicaciones
- I. Código de programación para el procesamiento y envío de los datos
- J. Código de la interfaz gráfica para la recepción y almacenamiento de los datos
- K. Hoja de datos plataforma Xbee Explorer USB

Índice de figuras

2.1. Funcionalidad del módulo XBee [1]	17
2.2. Diagrama del sistema de flujo de datos en un entorno UART con interfaz [1]	18
2.3. Paquete de datos UART 0x1F (número decimal 31) que se transmite a través del módulo [1]	19
2.4. Intercambio en la UART en modo API [1]	19
2.5. Trama de solicitud de transmisión [1]	20
2.6. Transmisión de datos unicast [1]	21
2.7. Trama de paquete recibido [1]	22
4.1. Gráfica del comportamiento de la temperatura en un rango de 0 a 10km de altura sobre el nivel del mar.	35
4.2. Gráfica del comportamiento de la presión en un rango de 0 a 10km de altura sobre el nivel del mar.	36
4.3. Secuencia de los datos transmitidos en un ciclo de 90 segundos.	38
4.4. Dimensiones del Xbee Pro 900	43
4.5. Diagrama simplificado del funcionamiento del dispositivo diseñado.	46
4.6. Etapa para los sensores MQ-7 y MQ-4	46
4.7. Etapa para el sensor de presión MPX2202	47
4.8. Conexión básica para el sensor de temperatura AD595	48
4.9. Esquema Electrónico del sistema de comunicación	49
4.10. Estructura de la trama de datos UART	50
4.11. Montaje del sistema de comunicación sobre una tarjeta de circuito impreso (PCB)	51
4.12. Interfaz para observar el comportamiento en el tiempo de las variables	52
4.13. Almacenamiento de los datos en la carpeta Xbee creada en el disco local	53
4.14. Simulación del protocolo de comunicación	54
4.15. Ubicación de los módulos mediante el uso de Google Earth	55
4.16. Ubicación de los módulos en el radio enlace de 5,387km	57
4.17. Configuración de puertos y prueba de módem	59
4.18. Configuración del Xbee en modo transparente	60
4.19. Transmisión punto-punto con módulos en modo transparente	61

4.20. Configuración del Xbee en modo API 1	62
4.21. Habilitación del modo API	63
4.22. Transmisión inalámbrica punto a punto con módulo en modo transparente y módulo en modo API 1	64
4.23. Módulo 1 en el cerro el Casupo	67
4.24. Módulo 2 en el cerro La Cruz	68
4.25. Transmisión y recepción de los datos en el cerro La Cruz	68

Indice de tablas

2.1. Nomenclatura de Frecuencias y longitudes de ondas para las bandas de telecomunicaciones [2]	9
2.2. Coeficiente de atenuación unidireccional, K_1 en las nubes [3]	11
2.3. Atenuación causada por niebla o nubes a una temperatura de 0°C [4]	13
4.1. Módulos RF transmisor-receptor.	40
4.2. Presupuesto del enlace de potencia para el módulo YS-T86.	41
4.3. Presupuesto del enlace de potencia para el módulo YS-C30H	42
4.4. Presupuesto del enlace de potencia para el módulo Xbee XSC S3B	42
4.5. Presupuesto del enlace de potencia para el módulo Xbee Pro 900	42
4.6. Especificaciones técnicas de la antena Logi Log LPY41 [5]	44
4.7. Resultados de la simulación del radio enlace para un estudio similar a la troposfera baja	56
4.8. Resultados de la simulación del radio enlace para una distancia de 5,387km	58
4.9. Características de la implementación del radio enlace entre el cerro Casupo y el cerro La Cruz Prueba Radio Enlace Módulo Xbee Pro 900	65
4.10. Prueba N°1 paquete de un Byte	65
4.11. Prueba N°2 paquete de 4 Bytes.	66
4.12. Prueba N°3 paquete de 6 Bytes	66
4.13. Prueba N°4 paquete de 10 Bytes	66

Acrónimos

AES	Estandar de Encriptacion Avanzado
CUNABAF	Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias
FACYT	Facultad de Ciencia y Tecnología
FCC	Comisión Federal de las Comunicaciones
FONACIT	Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología
GPS	Sistema de Posicionamiento Global
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
ISA	Estándar Internacional de la Atmósfera
ITU	Unión Internacional de las Telecomunicaciones
NASA	Agencia Espacial Norteamericana
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
OSI	Interconexión de Sistemas Abiertos
UC	Universidad de Carabobo
USAF	Fuerza Aérea de los Estados Unidos de Norte América

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE
COMUNICACIÓN EN UN GLOBO METEOROLÓGICO PARA EL
ESTUDIO DE LA TROPOSFERA BAJA**

por

HERRERA M. JOSE R. y PINTO G. ALEJANDRO J.

Presentado en el Departamento de Señales y Sistemas
de la Escuela de Ingeniería en Telecomunicaciones
el 16 de Mayo del 2014 para optar al Título de
Ingeniero de Telecomunicaciones

RESUMEN

Para el estudio de la troposfera baja, los globos meteorológicos son utilizados como medio de transporte para los diferentes tipos de sensores que conforman la carga útil de globo, los cuales registran datos como temperatura, presión, monóxido de carbono, metano, entre otros. Estas variables son almacenadas en una memoria, que luego de la caída del globo, es rastreada por GPS. Ahora bien, esta metodología de trabajo genera demora en el procesamiento de los datos debido que el globo meteorológico puede descender en zonas inhóspitas haciendo irrecuperable su carga útil, trayendo como consecuencia pérdidas económicas y de tiempo. Por lo tanto, el objetivo general de esta investigación consistió en el diseño e implementación

un sistema de comunicación para un globo meteorológico que estudie la troposfera baja. Para el logro de este objetivo, primero se identificó que los fenómenos atmosféricos ocurridos en la troposfera baja como ruido térmico, gases atmosféricos, lluvia, niebla y nubes pueden afectar la amplitud, fase y ángulo de llegada de la señal enviada por el transmisor en el globo meteorológico, perturbando el enlace de comunicación. Luego se determinó el orden de prioridad para el envío de las variables de temperatura, presión, monóxido de carbono y metano. Una vez establecida dicha prioridad, se definió el transceptor Xbee Pro 900 como el módulo de comunicación para transmitir y recibir los datos desde la troposfera a la tierra. Seguidamente se desarrolló y simuló el protocolo de comunicación, tomando en cuenta el orden de prioridad de las variables y asegurando los datos mediante un código de detección de errores. Por último, se implementó el sistema de comunicación a una distancia de separación de 5,387km, logrando una transmisión de datos fiable con un porcentaje de efectividad del 81,7%.

Palabras Claves: troposfera, transmisión, datos, recepción, sistema, comunicación, globo meteorológico

Tutor: CARLOS MEJÍAS

Profesor del Departamento de Señales y Sistemas

Escuela de Telecomunicaciones. Facultad de Ingeniería

CoTutor: NELSON FALCÓN

Profesor del Departamento de Física

Facultad de Ciencia y Tecnología

Introducción

Los sistemas de comunicación son de gran importancia para la transmisión y recepción de información; además han evolucionado a tal punto de llevar consigo las telecomunicaciones más allá del espacio ultraterrestre, los cuales logran alcanzar grandes distancias en un corto plazo de tiempo. Un sistema inalámbrico permite establecer una comunicación en el cual los dispositivos físicos solo están presentes en los emisores y receptores de la señal, éstos pueden ser empleados en globos meteorológicos y establecer una comunicación para el intercambio de información. En la troposfera baja se encuentran grandes concentraciones de monóxido de carbono (CO) y metano (CH₄), la determinación del contenido de éstas variables es de gran importancia para los estudios del cambio climático y polución del aire. La implementación de un sistema de comunicación en un globo meteorológico permite obtener los datos de las variables de estudio de manera inmediata, anteriormente eran almacenados en memorias y rastreados por GPS, generando pérdidas de los mismos. La creación de un diseño e implementación de un sistema de comunicación en un globo meteorológico para el estudio de la troposfera baja permitiría transmitir las variables: monóxido de carbono, metano, temperatura y presión desde un módulo transmisor a una altura de 10km a un receptor dispuesto en la tierra para el almacenamiento de los datos, sin incluir el procesamiento de los mismos. La estructura de este trabajo se divide en cuatro capítulos. En el primer capítulo se analiza el marco problemático y se plantea el sistema de comunicación para el globo meteorológico. En el segundo capítulo se muestran los estudios recientes en la troposfera en Venezuela así como las bases teóricas respecto a los fenómenos atmosféricos que afectan las comunicaciones y el protocolo de comunicación utilizado.

El tercer capítulo plantea la propuesta del diseño y desarrollo del sistema de comunicación (módulo transmisor-receptor). Finalmente, en el cuarto capítulo se evalúa el sistema de comunicación realizando pruebas con diferentes antenas y a una cierta distancia para el análisis de los resultados obtenidos donde se concluye que el sistema puede ser implementado en el globo meteorológico y se plantean ciertas conclusiones y recomendaciones.

Capítulo I

El Problema

1.1. Planteamiento del problema

En el estudio de las características de la troposfera se utilizan globos meteorológicos como medios de transporte para los sensores que registran las variables como temperatura, presión, monóxido de carbono y metano, los cuales son comúnmente almacenados en una memoria y posteriormente rastreados por Sistemas de Posicionamiento Global también conocido como GPS; para luego proceder al procesamiento de los datos obtenidos. Sin embargo, este método de obtención de datos trae como consecuencia una demora significativa en el procesamiento de los mismos, ya que el globo meteorológico se encuentra limitado por la disminución de las presiones que causan su expansión, a tal punto que se desintegra y por lo tanto la carga útil que incluye los sensores y los datos pueden descender en bosques, mares, montañas dificultando su recuperación y en el peor de los casos, no se recuperan los datos, representando con ello que se produzcan pérdidas de tiempo y dinero si los instrumentos caen en zonas inhóspitas.

En Venezuela, en la Universidad de Carabobo, específicamente en la Facultad de Ciencias y Tecnología (FACYT) ubicada en Barbula Edo. Carabobo, existe un gran interés en estudiar las condiciones que tienen lugar en la troposfera baja y los procesos transitorios que ocurren en ella para el desarrollo del proyecto estratégico

«Caracterización de fenómenos transitorios en la Troposfera Baja: Electrometeoros, Litometeoros, microtornados y trombas marinas»; para esto se requiere medir las siguientes variables atmosféricas como temperatura, presión, monóxido de carbono, metano, además de la hora en que se toman estas variables ya que son de particular importancia para la comprensión del clima, del denominado cambio climático Global y de la prevención de desastres que no solo afectan la vida humana sino también la infraestructura y las actividades productivas [6].

Dentro de este mismo orden de ideas, cabe señalar que un sistema de comunicación puede transmitir los datos de manera continua o escalonada (datos enviados en fracciones de tiempo) a medida que los sensores van registrando las variables; estas transmisiones se hacen tomando en cuenta los fenómenos presentados en la troposfera como la atenuación por absorción atmosférica, las nubes, la lluvia o el granizo, llegando a despolarizar y producir ciertos cambios en la señal como la amplitud, la fase y el ángulo de llegada, minimizando de esta forma el riesgo de la pérdida de los datos al ser recibidos en una estación receptora en tierra [7].

Debido a lo anteriormente expuesto surge la necesidad de diseñar e implementar un sistema de comunicación que permita el envío de los datos obtenidos desde el globo meteorológico a la estación receptora en la tierra para el estudio de la troposfera baja.

1.2. Justificación

La implementación de un sistema de comunicación resulta importante ya que mediante el empleo de este, se pueden obtener los datos de interés, enviándolos a través de un módulo de comunicación inalámbrico a medida que los sensores van registrando las variables de la troposfera baja, minimizando el riesgo de la pérdida de los mismos debido a que fueron recibidos por un módulo receptor dispuesto en la tierra. Además es un sistema económico en comparación con los restantes métodos de recolección de datos, como el Sistema de Posicionamiento Global explicado anteriormente. Ahora bien, una correcta transmisión de los valores de las variables

como temperatura, presión, monóxido de carbono, metano; así como la hora en que se toman los datos, permite el fortalecimiento de los conocimientos para la ciencia en Venezuela en lo que respecta al estudio de la troposfera baja y de los procesos transitorios que ocurren en ella. Así mismo, estos estudios permiten tomar precauciones ante riesgos de desastres naturales, preservación de espacios naturales, control de contaminación, determinación de la calidad de aire, entre otros [8].

1.3. Objetivos

1.3.1. Generales

1. Diseñar e implementar un sistema de comunicación en un globo meteorológico para el estudio de la troposfera baja.

1.3.2. Específicos

1. Identificar los fenómenos atmosféricos que se presentan en la troposfera baja para el diseño del sistema de comunicación.
2. Determinar los niveles de prioridad de las variables atmosféricas para la realización del protocolo de comunicación.
3. Definir el módulo de comunicación que soporte las condiciones troposféricas con la finalidad de transmitir los datos bidireccionalmente desde el globo meteorológico a su receptor en tierra.
4. Desarrollar el protocolo de comunicación que permita enviar los datos de acuerdo a la prioridad de las variables troposféricas a estudiar, asegurando la recepción de los datos mediante código de detección de errores.
5. Simular el protocolo de comunicación mediante un programa que contenga las especificaciones del módulo de comunicación seleccionado.

6. Implementar el sistema de comunicación mediante el empleo de un globo meteorológico para la obtención de los datos sobre las características de la troposfera baja.

1.4. Alcance

Esta investigación tiene como alcance la transmisión fiable de variables obtenidas en la troposfera baja, tales como: temperatura, presión, metano y monóxido de carbono desde un módulo transmisor elevado a través de un globo meteorológico a una altura sobre la superficie terrestre de diez (10) km y un radio aproximado de diez (10) km hasta un receptor que estuvo dispuesto en la tierra para el almacenamiento de los datos (sin incluir el procesamiento de estos datos).

1.5. Recursos a utilizar

- Trabajos de Grados previos, monografías, textos, etc.
- Computador.
- Equipos: transmisor, receptor, antenas, batería, cables.
- Herramientas (pinzas, piquetas, cautín, estaño, destornilladores).
- Profesores, asesores, especialistas.
- Financiamiento por FONACIT a través del Proyecto Estratégico 2011-000326 «Caracterización de fenómenos transitorios en la Troposfera Baja: Electrometeoros, Litometeoros, microtornados y trombas marinas».

Capítulo II

Marco Teórico

El marco teórico que fundamenta esta investigación proporcionará una idea más clara acerca del medio de transmisión en la troposfera baja para su diseño e implementación en el globo meteorológico. Para «*la elaboración del marco teórico implica exponer y analizar las teorías, las conceptualizaciones, las perspectivas teóricas, las investigaciones y los antecedentes en general, que se consideren válidos para el correcto encuadre del estudio*». El marco teórico es un proceso y un producto. Un proceso de inmersión en el conocimiento existente y disponible que está vinculado a nuestro planteamiento de problema y un producto que a su vez es un producto mayor, el reporte de investigación [9] [10] [11] [12].

2.1. Antecedentes

En la Universidad de Carabobo dentro de la Facultad de Ciencias y Tecnología (FACYT), se desarrolló un proyecto especial de grado [13] dónde se elaboró el multisensor que registra y almacena los datos de la variables de monóxido de carbono (CO), metano (CH₄), temperatura, presión y hora, además de establecer la prioridad de las variables de monóxido de carbono y metano, los cuales influyen en los

cambios climáticos y en la polución del aire, almacenando los datos en un archivo plano. Éste antecedente es el complemento del equipo que fue utilizado para la transmisión de los datos, además de proporcionar las variables a trabajar.

Nelson Falcón [8] describió acerca de la microfísica en los fenómenos de transporte en la troposfera baja tales como: descargas eléctricas, calimas, tormentas de arena, trombas marinas, microtornados. Este artículo fundamenta la información necesaria para la identificación de los fenómenos atmosféricos que se presentan en la troposfera baja para diseñar el sistema de comunicación.

Fany Campo [14] en su proyecto especial de grado determinó los niveles de efecto sobre un sistema de comunicaciones por los fenómenos troposféricos, enfocándose principalmente en la atenuación por lluvia. Este antecedente contiene actividades similares a la presente investigación permitiendo definir las pérdidas aproximadas de la atenuación por lluvias.

Eladio Leyzeaga y Rodolfo Montoya [15] implementaron bajo el modelo OSI un sistema de comunicación para la transmisión de televisión en la troposfera. Este antecedente contribuyó en el estudio de la arquitectura de la red empleada en el protocolo de comunicación, así como también la información necesaria para las actividades de transmisión bajo la teoría de dispersión troposférica.

La compañía Digi International en su artículo [16] realizó pruebas de rango con módulos RF donde alcanzaron transmitir una data de 32Bytes en un enlace de 40km. Éste antecedente contiene actividades similares a ésta investigación aportando las recomendaciones necesarias para lograr un enlace de gran alcance.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Propagación troposférica

Las señales de radiofrecuencia comprendidas entre las bandas 8 (VHF) y 9 (UHF) por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) en su recomendación [2], establece que éstas son una de las mejores formas para la transmisión y recepción

Tabla 2.1: Nomenclatura de Frecuencias y longitudes de ondas para las bandas de telecomunicaciones [2]

Longitud de Onda	Frecuencia	Banda	Símbolo
10 – 1m	30 – 300MHz	8	VHF
1 – 0.1m	0.3 – 3 GHz	9	UHF
10 – 0.1cm	3 – 30GHz	10	SHF

de información en el medio troposférico cuando se tienen limitantes de potencia, debido a que a menor frecuencia las antenas son de gran tamaño y a mayores frecuencias la atenuación debida a los fenómenos troposféricos se incrementa. En la Tabla 2.1 se muestran las nomenclaturas de frecuencia y longitudes de onda para cada banda, establecido por la ITU. Para una vista más detallada de la distribución de las bandas de frecuencias en Venezuela se encuentra el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (CUNABAF) [17].

2.2.2. Descripción del medio de transmisión

En la troposfera baja donde se ubicó el globo meteorológico con el módulo transmisor, los equipos de comunicación pueden ser afectados por varios fenómenos troposféricos tales como:

2.2.2.1. Atenuación por gases atmosféricos

Los gases considerados como absorbentes en la troposfera baja son el vapor de agua (H₂O) y el oxígeno (O₂), las variaciones de estas absorciones se deben a los cambios de presión, temperatura, humedad y a la frecuencia con que se esté operando el sistema de comunicación. En este caso, la absorción por el vapor de agua es directamente proporcional a la humedad absoluta mientras que la absorción debida al oxígeno es más sensitiva a los cambios de densidad [3].

El mecanismo principal de interacción entre las ondas de radio y los componentes gaseosos, es la absorción de moléculas. La absorción de las ondas de radio

resulta a través de un cambio de nivel cuántico en la energía rotacional de las moléculas; ésta absorción ocurre cuando un sistema cuantizado, tal como una molécula interactúa con un campo de radiación electromagnética y produce una transición entre dos estados cuánticos del sistema [18].

En la troposfera baja también podemos encontrar otros gases como lo son el dióxido de carbono (CO₂) y argón (N₂), los cuales son gases estables y no absorben energía electromagnética en el rango de frecuencias de las microondas. Sin embargo colisiones entre sus moléculas cuando la densidad es razonablemente alta, el dióxido de carbono y el argón pueden llegar a generar dipolos e interactuar con las ondas de radio. Por otra parte, existen otros componentes como el ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂) y óxido de nitrógeno (N₂O) que también pueden producir líneas de absorción. No obstante, sus concentraciones son tan pequeñas que sus contribuciones pueden ser despreciadas en comparación al vapor de agua y el oxígeno. En el anexo A se encuentra un método completo para calcular la atenuación debida a los gases atmosféricos expuesto por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en su recomendación UIT-R P.676 para un rango de frecuencias de 1-350GHz. Este anexo contiene algoritmos simplificados para una estimación rápida y aproximada de la atenuación causada por los gases para un número limitado de condiciones meteorológicas y una variedad limitada de configuraciones geométricas.

2.2.2.2. Atenuación por nubes

Las gotas de nubes son consideradas como aquellas partículas de agua o hielo cuyo radio es más pequeño que unos 100 μ o 0,01cm. Para longitudes de ondas de radiación incidente en exceso de 0,5cm, la atenuación se convierte independiente de la distribución del tamaño de la gota. El contenido de humedad en contenido de agua líquida en una nube se expresa como (g/m₃) la concentración de agua líquida en una nube generalmente va en un rango de 1 a 2,5 (g/m₃) [19]. Al mismo tiempo en las nubes de hielo su concentración de agua raramente excederá los 0,5, por lo general es menor a 0,1 (g/m₃). La atenuación por gotas de nubes descrita por Gunn & East [20] se establece como:

Tabla 2.2: Coeficiente de atenuación unidireccional, K_1 en las nubes [3]

Temperatura (°C)		Longitud de Onda (cm)			
		0,9	1,24	1,8	3,2
	20	0,647	0,311	0,128	0,0483
Nubes de Agua	10	0,681	0,406	0,179	0,0630
	0	0,99	0,532	0,267	0,0858
	-8	1,25	0,684	0,34	0,112
	0	$8,74 \times 10^{-3}$	$6,35 \times 10^{-3}$	$4,36 \times 10^{-3}$	$2,46 \times 10^{-3}$
Nubes de Hielo	-10	$2,93 \times 10^{-3}$	$2,11 \times 10^{-3}$	$1,46 \times 10^{-3}$	$8,19 \times 10^{-3}$
	-20	2×10^{-3}	$1,45 \times 10^{-3}$	1×10^{-3}	$5,64 \times 10^{-4}$

$$K = K_1 M \quad (2.1)$$

Dónde, K representa la atenuación en (dB/Km), K_1 el coeficiente de atenuación en $((\text{dB m}^3)/(\text{Km g}))$ y M es el contenido de agua líquida en (g/m_3)

En la Tabla 2.2 los valores de K_1 para nubes de hielo y agua están dados para varias longitudes de ondas y temperaturas por Gunn & East.

De los resultados expresados por Gunn & East en la Tabla 2.2, se puede resumir que el aumento de longitud de onda produce un decrecimiento de la atenuación tanto en nubes de agua como de hielo debido a que en alta frecuencia (SHF) la longitud de onda es más pequeña y los campos electromagnéticos interactúan con las gotas de nube absorbiendo su energía. Los datos presentes también describen el incremento de la atenuación cuando la temperatura desciende. En las nubes de hielo la atenuación es un orden de magnitud más pequeño que la atenuación por nubes de agua, ambas del mismo contenido de agua. En este sentido, para el rango de frecuencias de las microondas la atenuación debida a nubes de hielo es despreciable en todos los propósitos prácticos.

2.2.2.3. Atenuación por lluvia

Si bien es cierto que la lluvia afecta a las comunicaciones de radio cuando se propaga en microondas produciendo pérdidas en el sistema, cuando el campo electromagnético incide sobre una gota de agua que absorbe la energía del campo en forma de calor, así mismo la lluvia es capaz de dispersar y cambiar el estado de polarización de la señal, todo dependiendo de la frecuencia de la señal en que se transmite y del diámetro de la gota. Se debe agregar que la absorción por lluvia también depende de la energía incidente y de la concentración de gotas de agua por unidad de volumen.

Para Ryde & Ryde [21] los efectos de absorción y dispersión de las gotas de lluvia son más pronunciados en frecuencias de microondas, donde la longitud de onda y el diámetro de las gotas de lluvia son comparables; en la banda de los 10cm y en longitudes de ondas más bajas los efectos son apreciables, pero por encima de los 10cm disminuyen considerablemente. Al mismo tiempo Laws & Parson [22] observaron la distribución del tamaño de las gotas para diferentes tasas de lluvia en una superficie horizontal, en el cual concluyen que a mayor intensidad de lluvia las gotas son más largas y anchas. De este modo la atenuación debido a las lluvias es un factor dominante en la determinación de la confiabilidad de un sistema de comunicaciones, especialmente en alta frecuencia.

En el anexo B se dispone de un método expuesto por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en su recomendación UIT-R P.618-8 para el cálculo de las estadísticas de atenuación a largo plazo debido a la lluvia, a partir de la intensidad de lluvia caída en un punto, el cual sirve para estimar las estadísticas que facilitan la atenuación debida a la lluvia sobre trayectos oblicuos en un determinado punto para frecuencias de hasta 55GHz.

2.2.2.4. Atenuación por granizo y niebla

En atención a lo expuesto anteriormente, la atenuación causada por el granizo es una centésima de la causada por la lluvia ya que las nubes de hielo no causan

Tabla 2.3: Atenuación causada por niebla o nubes a una temperatura de 0°C [4]

Visibilidad	Atenuación (dB/km)		
	$\lambda = 1,25\text{cm}$	$\lambda = 3,2\text{cm}$	$\lambda = 10\text{cm}$
30m	1,25	0,20	0,02
90m	0,25	0,04	0,004
300m	0,045	0,007	0,001

atenuaciones sensibles, además la nieve produce una atenuación muy pequeña aún cuando cae en tasas excesivas [7].

Por otra parte, el rasgo característico de la niebla es la visibilidad, ésta se define como la mayor distancia en una dirección dada en el cual es solo posible ver e identificar con la vista sin ayuda en el día un objeto prominente en contra del cielo en un horizonte y en la noche como una fuente intensa de luz desenfocada. La visibilidad puede ser usada para estimar la atenuación en las ondas de radio, Saxton y Hopkins en su fundamento [4] realizaron una serie de cálculos donde determinaron la atenuación presente en la niebla o nubes a una temperatura de 0°C. En la Tabla 2.3 se encuentran los cálculos hechos por Saxton y Hopkins a diferentes alturas para una visibilidad de 30, 90 y 300m.

En vista de los datos presentes en la Tabla 2.3, la atenuación debido a la niebla se encuentra en un orden mayor de magnitud a longitudes de onda por debajo de los 10cm, además cuando la visibilidad óptica cae alrededor de los 30m, en este caso, la atenuación debido a la niebla es un factor que debe considerarse.

2.2.2.5. Ruido térmico emitido por la troposfera

Por último es conveniente señalar que la temperatura del ruido térmico de la troposfera medida por una antena, dependerá explícitamente del ángulo, la frecuencia e implícitamente de las condiciones atmosféricas a lo largo de la trayectoria del rayo dando lugar a la atenuación y emisión de energía. A medida que aumenta la atenuación, aumenta el ruido de emisión, para las estaciones terrenas con etapas de entrada de bajo ruido, ese aumento de la temperatura de ruido puede tener mayor efecto en la relación señal/ruido resultante que la propia atenuación. En efecto

el sol y los diferentes gases atmosféricos son fuentes individuales de ruido y la temperatura de ruido térmico por lo general es llamada temperatura de brillo. Para la determinación del ruido del sistema de las estaciones terrenas a partir de las temperaturas de brillo pueden utilizarse las ecuaciones presentes en el anexo C por la Unión Internacional de Telecomunicaciones en su recomendación UIT-R P.372.

2.2.3. Comportamiento de las variables temperatura y presión en la troposfera baja

Entre las variables atmosféricas que registran los sensores están la temperatura y presión de los cuales se requiere conocer su comportamiento para establecer un orden de prioridad en el envío de los datos. Por consiguiente, el Estándar Internacional de la Atmósfera (ISA) [23] es un modelo atmosférico que permite conocer los cambios de temperatura y presión para un amplio rango de altitudes en la troposfera baja, sustenta que: La temperatura en la troposfera desciende a razón de aproximadamente 6,5 °C por kilómetro de altura, debido al comportamiento del gradiente térmico y las propiedades de la atmósfera a diferentes alturas. La troposfera tiene un espesor de 11km sobre el nivel de mar. Las variables a estudiar se encuentran en la troposfera baja, alrededor de los 5 - 6km de altitud, ya que hasta esta altura se encuentran las mayores concentraciones de monóxido de carbono y metano.

Cabe destacar que la temperatura de la troposfera también varía de acuerdo a la latitud, estación, hora del día o de la noche, las condiciones atmosféricas presentes, entre otros, por lo que diferentes organizaciones como la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA), la Agencia Espacial Norteamericana (NASA) y la Fuerza Aérea de los Estados Unidos de Norte América (USAF) han establecido una atmósfera estándar [24] con el fin de representar una atmosfera media por la variaciones mencionadas anteriormente.

La variación de la temperatura y presión en la troposfera puede ser determinada matemáticamente por la atmosfera estándar como:

$$T = T_0 \left(1 - \frac{h}{44329} \right) \quad (2.2)$$

$$P = P_0 \left(1 - \frac{h}{44329} \right)^{5,255876} \quad (2.3)$$

Dónde, h representa la altitud expresado en metros, $T_0=288,15^\circ\text{K}$ es la temperatura absoluta en el nivel del mar y $P_0=101.325(\text{Pa})$ presión estándar del aire a nivel del mar.

Las ecuaciones 2.2 y 2.3 son únicamente para medir las variaciones de temperatura y presión en un rango de altura desde los 0km sobre el nivel del mar hasta los 11km límite superior de la troposfera.

2.2.4. Protocolo Digimesh

Digi International es una compañía estadounidense que ofrece soluciones para la conectividad serial, alguno de estos bajo el estándar de la IEEE 802.15.4 y el modelo de referencia de la Organización Internacional de Estándares (OSI) debido a su relación con la conexión de sistemas que están abiertos a la comunicación con otros sistemas [25].

El protocolo de red Digimesh creada por Digi International, es una topología de red punto a punto creado para usarse en soluciones de conectividad inalámbrica. Su arquitectura está equipada con funciones de red avanzadas permitiendo que sea de fácil aplicación. Como protocolo portátil, Digimesh se puede implementar en una serie de productos inalámbricos para dar servicio a una amplia gama de aplicaciones [26].

Las redes de malla permiten enrutar datos; Digimesh como red homogénea posee un solo tipo de nodo en el cual todos éstos pueden enrutar datos e intercambiarlos entre sí lo que hace que la red se expanda con facilidad, además pueden configurarse como dispositivos de baja potencia ya que los nodos pueden entrar en un modo denominado «sleep» si no hay transferencia de datos y así alargar la vida

a las baterías, igualmente éste protocolo permite alcanzar distancias largas hasta de 64km.

En cuanto a la transmisión de datos puede llegar a alcanzar hasta 256 Bytes dependiendo del producto, su rendimiento mejora para las aplicaciones que envían grandes bloques de datos. Las frecuencias y tasas de datos RF soportadas por el protocolo Digimesh son de 900MHz para tasas de (10, 125, 150Kbps) y a 2.4GHz para (250Kbps). Para la seguridad de los datos se usa el estándar de encriptación avanzada (AES) que permite la autenticación y encriptación de las comunicaciones.

La arquitectura Digimesh consta de varios componentes en capas definidas por el modelo de referencia OSI como:

- Capa de aplicación: representa la interfaz utilizada para la transferencia y recepción de los datos como por ejemplo: HyperTerminal, X-CTU, entre otros.
- Capa de presentación: le corresponde la sintaxis y semántica de los datos transmitidos. En esta capa la estructura de los datos se pueden definir con una codificación para su transmisión, en este caso la encriptación AES.
- Capa de sesión: permite que los módulos establezcan sesiones entre ellos y así estar sincronizados para la transferencia de los datos.
- Capa de transporte: se aceptan los datos provenientes de las capas superiores y se dividen en unidades más pequeñas asegurándose de que todas las unidades de datos del protocolo de transporte (TPDU) lleguen correctamente al otro extremo.
- Capa de red: se controlan las operaciones de la subred, en esta capa se determina como se enrutan los paquetes desde su origen a su destino.
- Capa de enlace de datos: se transforma un medio de transmisión puro en una línea de comunicación y al llegar a la capa de red, éste aparece libre de errores de transmisión; acá los datos obtenidos de las variables a medir son fragmentados en tramas de datos y se transmiten de manera secuencial.

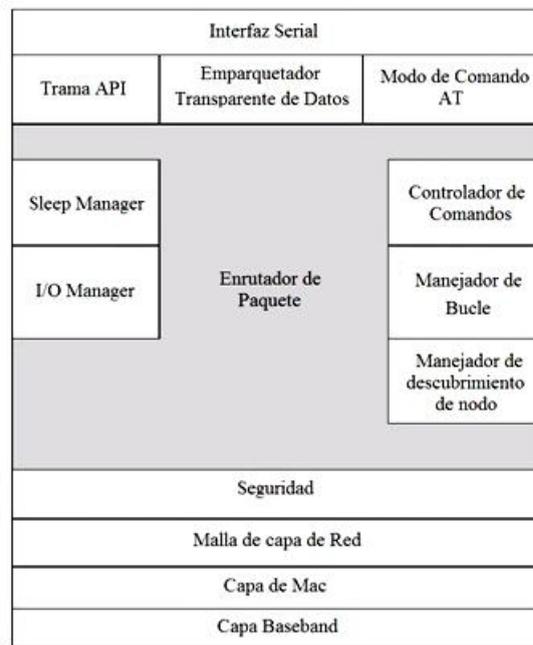


Figura 2.1: Funcionalidad del módulo XBee [1]

- Capa Física: se llevan a cabo las transmisiones de bits a través de un canal de comunicación. El diseño implica una transmisión correcta de los bits, de modo que, cuando el transmisor envíe los datos, éstos lleguen al receptor sin errores.

2.2.5. Modelo de capas del Xbee Pro 900

El módulo XBee proporciona una interfaz serial a un enlace de RF, éste puede convertir los datos serial a datos RF enviándolo a cualquier dispositivo en una red de RF. Además, el módulo proporciona una interfaz de software para interactuar con una variedad de funciones periféricas, incluyendo el muestreo de los pines entrada y salida (I/O), puesta en marcha y gestión de dispositivos. La Figura 2.1, ilustra la funcionalidad del módulo XBee.

En la Figura 2.1 se puede observar que el modulo Xbee Pro 900 está comprendido por varias capas. Este dispositivo puede operar en modo transparente donde

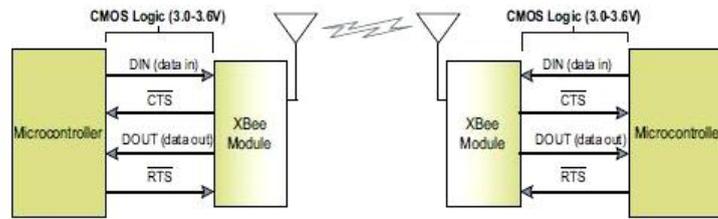


Figura 2.2: Diagrama del sistema de flujo de datos en un entorno UART con interfaz [1]

todos los datos que reciba el pin DIN inmediatamente son transmitidos, también puede ser configurado a modo API para utilizar tramas de datos y métodos de detección de errores en los datos enviados. Además, este dispositivo es capaz de realizar diferentes tareas como: capacidad de dormir (suspensión) lo que permite que el módulo RF entre en estado de bajo consumo de energía cuando no esté en uso, muestreo de entradas y salidas (I/O) para transmitir a un mando en una cierta tasa periódica, control de comandos AT y descubrimiento de otros nodos en la red. Entre las opciones de seguridad de los datos, el módulo Xbee Pro 900 posee comandos de seguridad como lo es el estándar de encriptación avanzada (AES), logrando la encriptación de 128bits. El protocolo Digimesh en el módulo Xbee Pro 900, permite crear redes de malla más robustas, logrando que estos dispositivos puedan establecer comunicaciones a grandes distancias para la transmisión de tramas de datos largas.

2.2.6. Flujo de datos UART en el módulo Xbee Pro 900

La conexión del módulo Xbee Pro 900 a un microcontrolador puede realizarse mediante un puerto serie asíncrono universal (UART). Los dispositivos con una interfaz UART se pueden conectar directamente a los terminales del módulo de RF.

En la Figura 2.2, se observa como los datos entran en el módulo del UART a través del pin DIN (pin 3) como una señal de serie asíncrono.

Cada byte de datos para una configuración en modo transparente consiste en un bit de inicio (bajo), 8 bits de datos (bit menos significativo en primer lugar) y

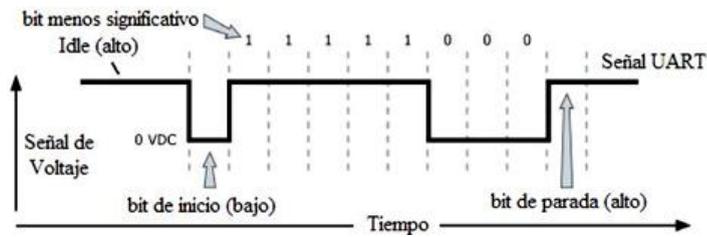


Figura 2.3: Paquete de datos UART 0x1F (número decimal 31) que se transmite a través del módulo [1]

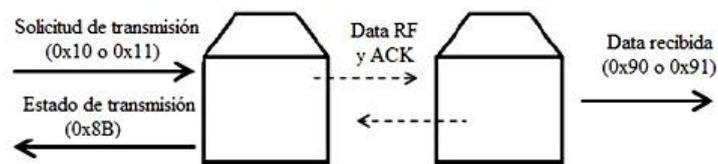


Figura 2.4: Intercambio en la UART en modo API [1]

un bit de parada (alto). La Figura 2.3, ilustra el patrón de bits en serie de datos que pasan a través del módulo.

2.2.7. Intercambios en la UART en modo API

La Figura 2.4, muestra los intercambios de API que se realizan en la UART al enviar los datos de RF a otro dispositivo. La trama de estado de transmisión se envía siempre al final de una transmisión de datos a menos que el ID se establezca en 0 en la solicitud de transmisión. Si el paquete no se puede entregar al destino, la trama de estado de transmisión va a indicar la causa de la falla.

2.2.8. Trama solicitud de transmisión

Una trama API de solicitud de transmisión permite que el módulo envíe datos como un paquete de RF al destino especificado. La dirección de destino de 64 bits se debe establecer en «0x000000000000FFFF» para una transmisión broadcast y para las transmisiones unicast el campo de dirección de 64 bits se debe establecer en

Frame Fields		Offset	Example	Description
A P I P a c k e t	Start Delimiter	0	0x7E	
	Length	MSB 1	0x00	Number of bytes between the length and the checksum
		LSB 2	0x16	
		3	0x10	
	Frame Type	4	0x01	Identifies the UART data frame for the host to correlate with a subsequent ACK (acknowledgement). If set to 0, no response is sent.
	Frame ID	5	0x00	Set to the 64-bit address of the destination device. The following address is also supported: 0x00000000000000FFFF - Broadcast address
	64-bit Destination Address	6	0x13	
		7	0xA2	
		8	0x00	
		9	0x40	
		10	0x0A	
		11	0x01	
	LSB 12	0x27		
	Reserved	13	0xFF	Set to 0xFFFFE.
	14	0xFE		
	Broadcast Radius	15	0x00	Sets maximum number of hops a broadcast transmission can occur. If set to 0, the broadcast radius will be set to the maximum hops value.
	Transmit Options	16	0x00	Bitfield: bit 0: Disable ACK bit 1: Don't attempt route Discovery. All other bits must be set to 0.
	RF Data	17	0x54	Data that is sent to the destination device
		18	0x78	
		19	0x44	
		20	0x61	
		21	0x74	
		22	0x61	
		23	0x30	
		24	0x41	
Checksum	25	0x13	0xFF - the 8 bit sum of bytes from offset 3 to this byte.	

Figura 2.5: Trama de solicitud de transmisión [1]

la dirección del nodo destino deseado. El campo reservado se debe establecer en «0xFFFFE», la Figura 2.5 muestra un ejemplo de una trama de solicitud de transmisión para saber si el modo API 1 se encuentra deshabilitado.

2.2.9. Trama estado de transmisión

Cuando se completa una solicitud de transmisión, el módulo envía un mensaje del estado de la transmisión. Este mensaje indica si el paquete fue transmitido con éxito o si se produjo un error. La Figura 2.6, muestra un ejemplo de una transmisión

Frame Fields		Offset	Example	Description	
A P P L I C A T I O N	Start Delimiter	0	0x7E		
	Length	MSB 1	0x00	Number of bytes between the length and the checksum	
		LSB 2	0x07		
	Frame-specific Data	Frame Type	3	0x8B	
		Frame ID	4	0x47	Identifies the UART data frame being reported. Note: If Frame ID = 0 in AT Command Mode, no AT Command Response will be given.
		Reserved	5	0xFF	Reserved.
			6	0xFE	
		Transmit Retry Count	7	0x00	The number of application transmission retries that took place.
	Delivery Status	8	0x00	0x00 = Success 0x01 = MAC ACK Failure 0x15 = Invalid destination endpoint 0x21 = Network ACK Failure 0x25 = Route Not Found	
				Discovery Status	9
Checksum		10	0x2E	0xFF - the 8 bit sum of bytes from offset 3 to this byte.	

Figura 2.6: Transmisión de datos unicast [1]

de datos unicast que se envió con éxito a un dispositivo de destino utilizando un identificador de trama de «0x47».

2.2.10. Trama de paquete recibido

Cuando el módulo recibe un paquete RF, éste envía una trama «0x90» con un mensaje de paquete recibido a través de la salida del UART. En la Figura 2.7, se observa un dispositivo con una dirección de 64 bits de «0x0013A200 40522BAA» que envía una transmisión de datos unicast a un dispositivo remoto con una carga útil de «RxData». Si «AO=0» en el dispositivo receptor, entonces se envía la trama de paquete recibido.

2.2.11. Zona lejana

La zona lejana de una antena constituye la zona de interés de la antena [27], tomando en cuenta que la dimensión de la antena es $D = 0,23\text{m}$ y su longitud

Frame Fields		Offset	Example	Description	
A P I P a c k e t	Start Delimiter	0	0x7E		
	Length	MSB 1	0x00	Number of bytes between the length and the checksum	
		LSB 2	0x12		
		3	0x90		
	Frame-specific Data	Frame Type	MSB 4	0x00	Identifies the UART data frame for the host to correlate with a subsequent ACK (acknowledgement). If set to 0, no response is sent.
			5	0x13	
		64-bit Source Address	6	0xA2	64-bit address of sender
			7	0x00	
			8	0x40	
			9	0x52	
			10	0x2B	
			LSB 11	0xAA	
		Reserved	12	0xFF	Reserved
			13	0xFE	
		Receive Options	14	0x01	0x01 - Packet Acknowledged 0x02 - Packet was a broadcast packet
			15	0x52	
		Received Data	16	0x78	Received RF data
			17	0x44	
			18	0x61	
	19		0x74		
	20		0x61		
Checksum	21	0x11	0xFF - the 8 bit sum of bytes from offset 3 to this byte.		

Figura 2.7: Trama de paquete recibido [1]

de onda $\lambda = 0,33\text{m}$, el límite de la zona lejana se muestra en la ecuación 2.4 y es determinada por la distancia más grande del conjunto.

$$r_z = \text{máx} \left\{ \frac{2D^2}{\lambda}, 50D, 20\lambda \right\} \quad (2.4)$$

Para el sistema de comunicación empleado se puede considerar a $r_{z1} \geq 50D$ ya que a una distancia menor se cometerían errores apreciables en la amplitud y no en la fase, debido que para antenas pequeñas el criterio de mayor peso es el error de amplitud [28].

2.2.12. Zona de Fresnel

Por otra parte, en una transmisión punto a punto además de tomar en cuenta la visibilidad directa entre las antenas, la zona de Fresnel es un volumen de despeje que hay que tener en consideración entre el transmisor y el receptor, de manera que el desfase de las ondas no llegue a superar los 180° evitando que las ondas lleguen en contrafase, ya que contribuyen negativamente. En la primera zona de Fresnel se encuentra gran porcentaje de la potencia de la señal, la cual aporta de forma positiva a la propagación de las ondas.

Para evitar que se generen pérdidas por obstrucción y desfase de la señal, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) en su recomendación [29] establece que las antenas deben estar a una cierta altura respecto al suelo para estar libre de obstáculos como se muestra en la ecuación 2.5, donde D es la distancia máxima entre las dos antenas y f la frecuencia de operación del sistema de comunicación.

$$r = 8,657 \sqrt{\frac{D}{f}} \quad (2.5)$$

De la ecuación 2.5 se obtiene que para una distancia máxima de 10km entre las antenas operando a 902MHz, éstas deben estar ubicadas al menos 23m sobre el suelo y así poder cumplir con un 80 por ciento de la zona de Fresnel.

2.2.13. Efecto Doppler Fizeau

Al mismo tiempo, el efecto Doppler Fizeau es un principio que afirma, si un foco emite energía con una longitud de onda λ y existe un desplazamiento con respecto a un observador o receptor, éste recibe la radiación con una longitud de onda λ' [30]. En la ecuación 2.6 se observa cómo puede existir este desplazamiento en la longitud de onda.

$$\lambda' = \lambda \left(1 + \frac{v}{c}\right) \quad (2.6)$$

Dónde, λ' es la longitud de onda con el desplazamiento, λ representa la longitud de onda de la transmisión, v la velocidad de desplazamiento del objeto y c la velocidad de la luz.

De lo expuesto en la ecuación 2.6 se tiene que para llegar a observar un desplazamiento en la longitud de onda en el sistema de comunicación, el globo debería desplazarse a una velocidad extremadamente alta, quiere decir para llegar a considerar una variación relativa de longitud de onda ($z = \frac{\lambda' - \lambda}{\lambda}$) de aproximadamente 0,1 éste debiera desplazarse a una velocidad de 30.000km/s por lo que el efecto Doppler Fizeau queda descartado como efecto de alteración.

2.3. Definición de términos

- Absorción: es el fenómeno por el cual los materiales no transparentes atenúan cualquier onda electromagnética que pasa por ellos.
- Atenuación: es la pérdida de potencia sufrida por una señal electromagnética al transitar por cualquier medio de transmisión. Ésta es medida en decibeles.
- Calima: bruma, neblina por evaporación de agua que se produce en verano.
- Campo electromagnético: es un campo físico producido por objetos cargados eléctricamente, es de tipo tensorial.
- Dipolo: es un sistema formado por dos cargas puntuales de igual magnitud y de signo opuesto separadas a una distancia.
- Dispersión: es un proceso de interacción en el medio entre las ondas electromagnéticas y varios objetos provocando que parte de la energía sea irradiada en numerosas direcciones diferentes.
- Energía rotacional: es la energía cinética de un cuerpo rígido que gira en torno a un eje fijo, depende del momento de inercia y de la velocidad angular del cuerpo. Mientras más alejado se encuentre la masa del cuerpo respecto al eje de rotación, se necesitará más energía para adquirir una velocidad angular.

- **Host:** Se refiere a los dispositivos conectados a una red, que proveen y utilizan servicios de él.
- **Longitud de onda:** es la distancia real que recorre una perturbación (una onda) en un determinado intervalo de tiempo.
- **Microondas:** son radiaciones electromagnéticas que pertenecen a la categoría de radiaciones no ionizantes y cuya propagación puede realizarse por el espacio o guías de ondas.
- **Polución:** contaminación intensa del agua, aire o medio ambiente, producida por los residuos de procesos industriales o biológicos.
- **Radiofrecuencia:** son radiaciones no ionizantes y abarcan en el espectro electromagnético desde los 3 kHz hasta los 300 GHz.
- **Refracción:** es un efecto que sufren las ondas cuando atraviesan de un medio a otro con densidad distinta causando una desviación de trayectoria en cierto ángulo, esto es producido por la diferente velocidad de propagación que tiene la onda en los diferentes medios.
- **TPDU:** acrónimo que se usa en el modelo OSI para referirse a la unidad de datos del protocolo de transporte, se utiliza para el intercambio entre unidades, contiene los datos del usuario principal.
- **Trama:** es un paquete de datos de la información que se envía por trozos, éstos constan de una cabecera donde van los protocolos de enlace, la información y al final un chequeo de errores.
- **Tromba marina:** es un embudo que contiene un flujo turbulento en rotación espiral con trayectorias de corriente cerradas sobre un cuerpo de agua, usualmente conectado a una nube.

Capítulo III

Marco Metodológico

Los procesos de investigación requieren una visión paradigmática, por lo que un paradigma expresa un conjunto de logros, en función de definir problemas y buscar soluciones legítimas. Estos paradigmas constan de técnicas que guían la actividad científica del investigador, excluyendo lo que no está dentro de su lógica. Este trabajo está sustentado en un paradigma de tipo cuantitativo, ya que la concepción cuantitativa establece relaciones causales que suponen una explicación y la finalidad de la presente investigación es dar solución al problema de la recuperación de los datos registrados en la troposfera baja mediante la transmisión de los mismos por medio de un sistema de comunicación [31].

3.1. Nivel de investigación

Según Arias, F [32] «el nivel de investigación se refiere al grado de profundidad con que se aborda un objeto o fenómeno» es por ello que el tipo de investigación utilizado es descriptivo, porque los objetivos del estudio y su dirección apuntan a la obtención de un conocimiento más conciso de la situación explorada, permitiendo caracterizar, precisar o determinar condiciones en el hecho o problema. Dankhe [33] recalca la condición de especificidad de estos estudios, que agotan el momento exploratorio cuando establece que estos buscan especificar las propiedades más

importantes de personas, grupos, comunidades o cualquier otro fenómeno que sea sometido a análisis.

3.2. Diseño de la investigación

El tipo de investigación utilizada para este trabajo de grado es una investigación aplicada, de campo, según Arias F. [32] la investigación de campo consiste en la recolección de datos directamente de la realidad donde ocurren los hechos, sin manipular o controlar variable alguna. Siendo factible ya que los datos son registrados por los sensores correspondientes al metano, monóxido de carbono, temperatura y presión los cuales se envían a través del sistema de comunicación y son almacenados en un archivo plano (.txt) junto a la fecha y hora en que fueron tomados.

3.3. Técnicas de recolección y análisis de información

Entre las técnicas de recolección de datos que permitieron obtener la información fueron: técnica de análisis documental, entrevista no estructurada y observación directa. El análisis documental permitió la recolección, organización y empleo de documentos relacionados con los fenómenos presentados en la troposfera como la atenuación por absorción atmosférica, las nubes, la lluvia o el granizo, entre otros, que pudieran afectar la comunicación de los módulos de comunicación, sin dejar de lado los manuales, tutoriales, videos relacionados con el manejo de los mismos los cuales resultan imprescindibles para la configuración y transmisión de los módulos. Según Rodríguez N., Ochoa de Rigual y Pineda M. [31] la entrevista es una comunicación planificada, con objetivos y estrategias pre-determinadas; lleva como propósito definido la recopilación de información de uno o varios informantes, simultáneamente o no. Al ser no estructurada no tiene como formato una elaboración de preguntas sino más bien es una forma específica de interacción social que tiene por objeto recolectar datos para una indagación. Las entrevistas no estructuradas se realizaron de manera telefónica y personal, a los distribuidores de módulos de comunicación, asesores académicos y especialistas en el área de redes

de telecomunicación, con el objeto de obtener información acerca de los parámetros que influyen o puedan afectar en una comunicación vertical entre módulos. Finalmente la observación directa se realiza cuando un observador registra los datos en el momento y lugar donde ocurre el problema. Utilizándose este método de recolección de datos para determinar los posibles errores en la transmisión que puedan presentarse en el transcurso de las pruebas para la implementación del sistema de comunicación.

3.3.1. Instrumentos de recolección de datos

Sabino, C [34] señala que un instrumento de recolección de datos es, en principio, «cualquier recurso de que se vale el investigador para acercarse a los fenómenos y extraer de ellos información». En esta investigación se utilizaron los siguientes recursos: libros, artículos, tesis, revistas y laptops para la recaudación de información lo que permitió la orientación y comprensión de la elección del módulo y configuración del protocolo de comunicación. De igual forma, se utilizaron sensores como instrumentos de recolección de datos ya que éstos captaron las variaciones de las variables (monóxido de carbono, gas metano, temperatura y presión). Igualmente fueron empleados libretas de apuntes y lápices, donde se anotaron los datos de interés en las entrevistas no estructuradas y observaciones al momento de probar los módulos transmisores.

3.3.2. Técnicas de análisis de información

En el presente trabajo de investigación se tomó el análisis cuantitativo, Sabino, C [34] argumenta que este tipo de operación se efectúa naturalmente con toda la información numérica resultante de la investigación, luego del procesamiento se presentaron como un conjunto de cuadros, tablas y medidas, a las cuales se les han calculado sus porcentajes y presentado convenientemente.

El análisis de los datos se efectuó a través de la comprobación de los mismos en su recepción, mediante la concordancia de análisis con datos anteriores y su

representación gráfica con respecto al tiempo en que se tomaron las variables de metano, monóxido de carbono, temperatura y presión.

3.4. Procedimiento de la investigación

Los procedimientos seguidos, para el logro de los objetivos planteados se diseñaron en seis fases, que permitieron la recepción de los datos en forma organizada. Se especifican dichas fases:

Primera fase: Identificación de los fenómenos atmosféricos que se presentan en la troposfera baja para el diseño del sistema de comunicación

Se realiza mediante la documentación sobre los cambios climáticos actuales de la atmósfera y los fenómenos troposféricos presentes que puedan afectar la transmisión de los datos ya sea por efectos de absorción, retardo de propagación y dispersión, con la finalidad de conocer a que banda de frecuencia es posible transmitir desde la troposfera baja evitando la mayor cantidad de pérdidas que éstos fenómenos ocasionen.

Segunda Fase: Determinación de los niveles de prioridad de las variables atmosféricas para la realización del protocolo de comunicación

Las variables que registran los sensores son: temperatura, presión, monóxido de carbono (CO) y el metano (CH₄), teniendo éstas dos últimas particular importancia para los estudios del cambio climático y polución del aire. Para el diseño del protocolo de comunicación es necesario conocer el comportamiento de las variables en la troposfera baja, el tamaño de cada uno de los datos y el tiempo de respuesta de los sensores para establecer un orden de prioridad en la transmisión.

Tercera Fase: Definición del módulo de comunicación que soporte las condiciones troposféricas con la finalidad de transmitir los datos bidireccionalmente desde el globo meteorológico a su receptor en tierra

La elección del módulo es fundamental debido a que es el medio inalámbrico que transmite los datos desde la troposfera baja a la superficie terrestre. Es por ello que se seleccionan módulos de diversos fabricantes para comparar sus especificaciones técnicas y presupuesto de potencia en tablas, de esta manera se puede conocer si el módulo puede mantener una transmisión fiable desde la troposfera baja.

Cuarta Fase: Desarrollo del protocolo de comunicación que permita enviar los datos de acuerdo a la prioridad de las variables troposféricas a estudiar, asegurando la recepción de los datos mediante código de detección de errores

El protocolo de comunicación que administra el envío de datos es realizado y manejado bajo un microprocesador conectado al módulo transmisor-receptor, éste se programa en base a la segunda fase de este trabajo, asegurando la recepción de los datos mediante un código de detección de errores, por lo tanto, si algún dato es incorrecto el modulo receptor le indica al transmisor cual dato recibido es incorrecto y se solicita el reenvío hasta que llegue el dato sin errores. De esta manera el sistema de comunicación es bidireccional.

Quinta Fase: Simulación del protocolo de comunicación mediante un programa que contenga las especificaciones del módulo de comunicación seleccionado

El diseño del protocolo de comunicación es verificado mediante un programa de simulación con las especificaciones del módulo de comunicación seleccionado, para así realizar las pruebas del sistema de comunicación tales como sensibilidad, potencia, pérdidas, ganancia y alineación de antenas, distancias, zona de Fresnel.

Sexta Fase: Implementación del sistema de comunicación mediante el empleo de un globo meteorológico para la obtención de los datos sobre las características de la troposfera baja

Una vez realizadas las simulaciones necesarias de los módulos en zonas que se asemejen a las condiciones de la troposfera se procede a la implementación del módulo de comunicación para su puesta en funcionamiento.

Capítulo IV

Análisis, Interpretación y Presentación de los Resultados

En éste capítulo se da a conocer de forma detallada los resultados obtenidos en el desarrollo del trabajo de investigación, a través de las técnicas de recolección descritas en el marco metodológico, procesadas y analizadas para el cumplimiento del objetivo general.

4.1. Identificar los fenómenos atmosféricos que se presentan en la troposfera baja para el diseño del sistema de comunicación

Es importante conocer cuáles son los fenómenos atmosféricos presentes en la troposfera baja que pudieran afectar el sistema de comunicación, ya que permite determinar a que frecuencia de operación la señal resulta menos afectada en la transmisión de los datos. Éstos se pueden manifestar en las diferentes capas de la atmosfera como la troposfera, estratosfera, mesosfera, ionosfera y exosfera, generando cambios de fase en la señal, atenuación, dispersión, absorción. Existen fenómenos atmosféricos, como la rotación de Faraday, absorción auroral o casquete

polar, centelleo, gases atmosféricos, nubes y viento, lluvias, granizo, ruido térmico y niebla, los cuales, en su mayoría se presentan en la troposfera baja por ser la capa más cercana a la tierra y donde se encuentran grandes concentraciones de vapor de agua y gran parte de la masa gaseosa como nitrógeno, dióxido de carbono y oxígeno.

Debido a la presencia de estos gases, en la troposfera se producen nubes, fuertes vientos, precipitaciones (lluvia, granizo) y cambios de temperatura. Además, el ruido térmico y los gases atmosféricos afectan también los sistemas de comunicación que estén transmitiendo desde o hacia la troposfera baja, a diferencia de la rotación de Faraday y absorción auroral que son fenómenos que se manifiestan en la Ionósfera [3][4][7][18][19][20][21][22].

La atenuación experimentada por las ondas de radio es resultado de dos efectos como absorción y dispersión, por ejemplo, cuando una onda electromagnética incide en un objeto, en el cual sus propiedades dieléctricas difieren de las del medio que lo rodea, una proporción de la energía de la onda es absorbida por el objeto, calentando al material absorbente y la otra proporción de energía es dispersada, de esta manera la señal sufre cambios de dirección [7]. La absorción por gases atmosféricos es generalmente pequeña a longitudes de ondas mayores a unos centímetros, excepto a distancias muy largas que sobrepasan el espesor de la troposfera (transmisiones satelitales). La atenuación por nubes y lluvia tiene que ser considerada a longitudes de ondas menores a 10cm y es particularmente pronunciada en las inmediaciones de 1 y 3cm [7].

4.2. Determinar los niveles de prioridad de las variables atmosféricas para la realización del protocolo de comunicación

Para realizar el protocolo de comunicación es necesario conocer el nivel de prioridad de las variables, su comportamiento en la troposfera baja y la repuesta de los sensores que se empleen para su medición, de esta manera es posible saber cómo

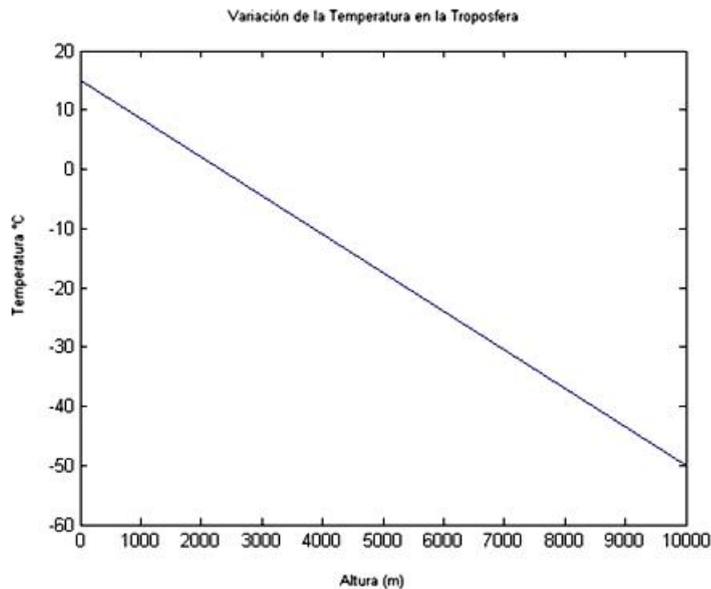


Figura 4.1: Gráfica del comportamiento de la temperatura en un rango de 0 a 10km de altura sobre el nivel del mar.

es la secuencia de los datos que se va a enviar y como se van a definir cada una de ellas. Por lo tanto, para lograr esta tarea, se graficó el comportamiento aproximado de temperatura y presión, en función de la altura, bajo los estudios de la Atmósfera Internacional Estándar (ISA). La Figura 4.1 presenta el comportamiento de la temperatura en la troposfera tomando en cuenta una temperatura absoluta sobre el nivel del mar de 288,15°K equivalente a 15°C.

Se puede observar de la Figura 4.1 que la temperatura se comporta de manera lineal y desciende con una pendiente de $-0,006501^{\circ}\text{C}$ por cada metro de altura, por lo que, en la troposfera baja la temperatura se encuentra aproximadamente a $-17,5^{\circ}\text{C}$ y entre el límite de la capa de la troposfera (10km), su temperatura ha descendido a -50°C . La ISA establece las variaciones del gradiente térmico debido a la latitud, estación, hora del día o de la noche y las condiciones atmosféricas presentes, llevando a un cálculo aproximado como se evidencia en la Figura 4.1. El sensor de temperatura utilizado es el amplificador monolítico AD595 del fabricante Analog Devices que va conectado a una termocupla, éste sensor posee un rango de medición de -55°C a 125°C y va configurado como un termómetro enviando una

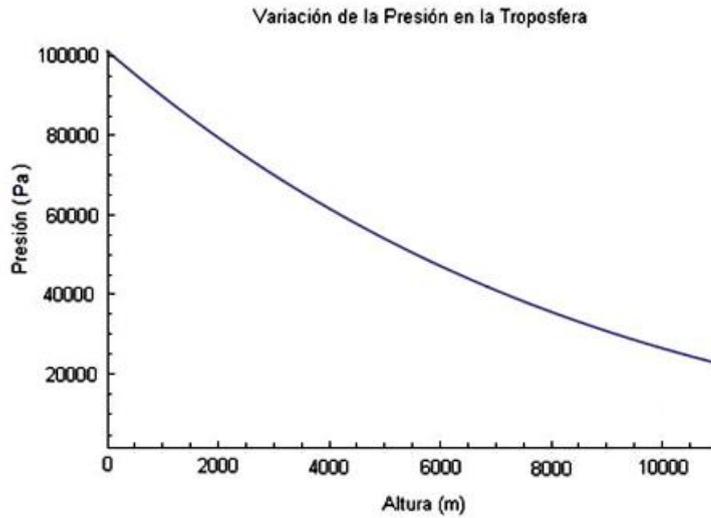


Figura 4.2: Gráfica del comportamiento de la presión en un rango de 0 a 10km de altura sobre el nivel del mar.

medición cada 13 segundos, esta variable se presenta en el archivo de datos con tres dígitos y cuatro decimales; sin embargo, está definida en el microprocesador como una palabra Float (4Bytes).

En la Figura 4.2 se observa el comportamiento de la presión, el cual es similar al de la temperatura. Tomando en cuenta que la presión atmosférica a nivel del mar es de 101.325Pa, para la troposfera la presión llega a descender con una pendiente de -7,489Pa por cada metro de altura, por lo que, la presión presente en la troposfera baja se encuentra aproximadamente a unos 54,01kPa y en el límite de la troposfera a 26,43kPa. El sensor utilizado para medir la presión fue el MPXM2202 del fabricante Motorola, el cual es un dispositivo que proporciona un nivel lineal de voltaje directamente proporcional a la presión aplicada y puede llegar a medir hasta 200kPa, operando en temperaturas desde los -25°C hasta 125°C. Ésta variable es enviada cada 13 segundos, la cual es definida en el microprocesador como una palabra Float (4Bytes) y se representa en el almacenamiento de los datos con 2 dígitos y tres decimales.

Para las variables de gas metano y monóxido de carbono se usaron los sensores

MQ-4 y MQ-7 respectivamente, del fabricante Sparkfun. Los sensores se configuraron para enviar cada 90 segundos un dato de CO y otro de CH₄, presentados en el almacenamiento de datos con 2 dígitos y tres decimales que representan el porcentaje de concentración de dichas variables. Cada variable se definió en el microprocesador como una palabra Float (4Bytes). De los 90 segundos entre dato y dato, se utilizan 60 segundos para el calentamiento de la bobina que permite liberar las partículas adheridas a los sensores y los otros 30 segundos al enfriamiento de la misma, necesarios para realizar una nueva medición. Por otro lado, se ajustó la sensibilidad de los sensores, recomendada por el fabricante, la cual fue de 5.000ppm de metano y 200ppm de monóxido de carbono para obtener los niveles de porcentaje de estos gases.

En el trabajo «*Diseño y construcción de sensores automatizados para la medición de gases de efecto invernadero en la baja troposfera*» [13] también fueron usados los sensores antes mencionados para medir los niveles de gas metano y monóxido de carbono logrando determinar que a un rango de concentración de 0 y 120 ppm (partes por millón) los sensores MQ-4 y MQ-7 mostraron una respuesta exponencial a los cambios de concentración de éstos gases, de modo que para concentraciones bajas de 0 a 15ppm la respuesta de éstos es lineal a la concentración de metano y monóxido de carbono, siendo el sensor MQ-4 más sensible.

Dicho lo anterior, se plantea que el orden de prioridad de las variables va determinado por el tiempo de respuesta de cada sensor utilizado, sin embargo las variables de Metano y Monóxido de Carbono son las de mayor de importancia para el estudio meteorológico, resultando la transmisión de la siguiente manera:

- Temperatura.
- Presión.
- Metano.
- Monóxido de carbono.

En consecuencia, cada medición es enviada con la hora, lo que permite conocer su variación en el tiempo, de esta manera la secuencia de los datos transmitidos resulta de la siguiente manera:

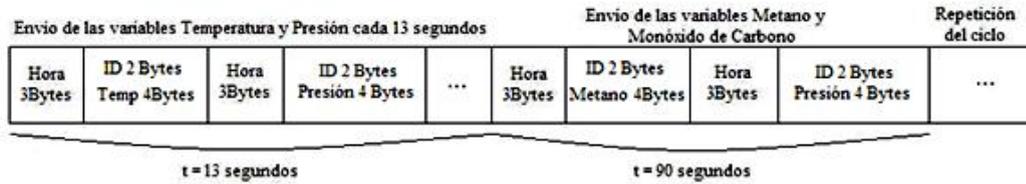


Figura 4.3: Secuencia de los datos transmitidos en un ciclo de 90 segundos.

Al iniciar la transmisión las variables de temperatura y presión se envían cada 13 segundos con un identificador (ID) para la recepción, posteriormente, transcurridos 90 segundos se envían las variables de metano y monóxido de carbono junto a sus respectivos identificadores (AT = temperatura, AP = presión, AM = metano, AC = carbono) de tal forma se repite el ciclo hasta detenerse la transmisión.

4.3. Definir el módulo de comunicación que soporte las condiciones troposféricas con la finalidad de transmitir los datos bidireccionalmente desde el globo meteorológico a su receptor en tierra

En una transmisión sin cortes en el enlace es necesario elegir módulos y antenas que permitan tener un margen remanente por encima de los 10dB en el presupuesto de potencia, para lograr establecer un enlace de comunicación de alta fiabilidad [35]. La elección del módulo fue fundamental por ser el dispositivo inalámbrico que permite transmitir datos desde la troposfera baja a la superficie terrestre a una altura máxima de diez (10) km. Se seleccionaron módulos con amplio alcance, bajo costo, fácil implementación y soporte de las inclemencias presentes en la tropósfera baja; es decir, un dispositivo que funcione a bajas temperaturas, cambios de presión y que su frecuencia de operación no genere atenuaciones adicionales ocasionadas

por lluvias, nubes u otros fenómenos atmosféricos. En el proceso de elección se hizo una comparación de sus características y presupuestos de potencia mediante tablas, tomando en cuenta la importancia del bajo consumo de potencia, operación en bandas de radio libres sin necesidad de licencias, pequeñas dimensiones, disponibilidad en el mercado venezolano y peso liviano (no más de 1Kg). Cabe destacar que la carga útil del globo meteorológico está ubicada en 1.050gr, por lo que la velocidad de ascenso será aproximadamente de 300 m/min, por lo tanto, a esta velocidad, los vientos alisios presentes en Venezuela producen poco desplazamiento horizontalmente del globo meteorológico. Así mismo el efecto Doppler Fizeau queda descartado como efecto de alteración.

En la Tabla 4.1 se muestran los módulos por modelos y diferentes fabricantes donde se detallan características como: frecuencia de operación, potencia de transmisión, sensibilidad de recepción, alcance, costo, entre otras especificaciones técnicas.

A partir de los módulos presentes en la Tabla 4.1 se realizó una comparación detallada de sus características y las mencionadas al inicio de esta fase, se evaluó el presupuesto de potencia para cada uno los módulos determinando si el radio enlace podía mantenerse sin cortes durante la comunicación.

El presupuesto de potencia del radio enlace está determinado por tres elementos básicos, lo cuales son:

- Potencia de transmisión efectiva: Potencia de transmisión (dBm) - Pérdida de conector (dB) + Ganancia de Antena (dBi).
- Pérdidas de Propagación: Pérdidas del espacio libre (dB).
- Sensibilidad de recepción efectiva: Ganancia de Antena (dBi) - Pérdida de conector (dB) - Sensibilidad del receptor.

La señal sufre pérdidas de propagación, además de las descritas en la primera fase, debido a que la potencia de la señal se reduce por el ensanchamiento del frente de onda, el cual se incrementa a medida que la distancia entre el transmisor y el

Tabla 4.1: Módulos RF transmisor-receptor.

Numero	Modulo	Potencia Tx	Alcance	Especificaciones	Fabricante	Costo (Dolares)
1	YS-T86	0.5 - 5W	10Km	Interfaz RS232/RS485/TTL	Yishi Electronic	130
		Corriente Tx 1.6A		Tasa de datos 1200/2400/4800bps		
		Sensibilidad Rx -119dBm		Temperatura de operación -20~+60 °C		
2	YS-360D	5W	10Km	Voltaje de Operación 12V	Yishi Electronic	150
		Corriente Tx 1.6A		VHF 150Mhz / 230Mhz / 350Mhz		
		Sensibilidad Rx -119dBm		Interfaz TTL/RS232/485		
3	YS-C30H	5W	≤8Km (BER=10 ⁻³ @9600bps)	Tasa de datos 1200/2400/4800/9600/19200bps	Yishi Electronic	110
		Corriente Tx 1.6A		Medidas 90x58x19mm. Peso 40gr.		
		Sensibilidad Rx -119dBm		Temperatura de operación -35 ~ +75°C		
4	XBee XSC S3B	250mW	14 Km con antena dipolo	Voltaje de Operación 12V	DIGI	88
		Corriente Tx 215 mA		UHF 433Mhz		
		Sensibilidad Rx -106dBm		Interfaz USB o RS232		
5	XBee-PRO 900	50mW	10 Km	Tasa de datos 10kpbs/20kpbs	DIGI	69.95
		Sensibilidad Rx -100dBm		Temperatura de operación -40° C a +85° C		
				Voltaje de Operación 2.4 a 3.6 V		

Tabla 4.2: Presupuesto del enlace de potencia para el módulo YS-T86.

Potencia de transmisión efectiva	Potencia de transmisión	37 dBm
	Pérdida de cables y conectores TNC	1dB
	Ganancia de Antena Duck	2dBi
Pérdidas de propagación	Pérdidas en el espacio libre	- 103.3dB
	Ganancia de Antena Duck	2dBi
Sensibilidad de recepción efectiva	Pérdida de cables y conectores TNC	1dB
	Sensibilidad del receptor	-119dBm
	Total	-
		54.7dB

receptor aumenta; las pérdidas de propagación pueden ser reducidas, sin embargo, siempre estarán presentes en el enlace. Para calcular las pérdidas de propagación se utilizó la fórmula de Friis descrita en la ecuación 4.1.

$$L_p \text{ (dB)} = 92,45 + 20 \log_{10} f + 20 \log_{10} d \quad (4.1)$$

Dónde, f representa la frecuencia de operación y d la distancia de la transmisión en km. De modo que, para obtener un buen rendimiento del enlace de comunicación es necesario que la suma de estos tres elementos sea mayor a 10dB [35].

En el cálculo del presupuesto de potencia de la Tabla 4.2 se tomó en cuenta una distancia de 10km límite de la troposfera y una frecuencia de transmisión de 350MHz. El resultado indica que el enlace debería trabajar correctamente en sitios despejados y lineales; sin embargo, se trata de cálculos teóricos que representan el rendimiento máximo que puede alcanzar un sistema usando el módulo YS-T86. En la práctica, pueden ocurrir otras interferencias como otras fuentes de radio, antenas mal conectadas y diferentes fenómenos atmosféricos que pudieran existir en el momento de la transmisión.

En un enlace donde son usados los módulos YS-T86 o YS-C30H, se evidencia en el presupuesto de potencia un margen superior a los 30dB, esto se debe a su alta potencia de transmisión y sensibilidad de recepción, los cuales pueden llegar a operar en el sistema de comunicación para la transmisión de los datos.

Tabla 4.3: Presupuesto del enlace de potencia para el módulo YS-C30H

Potencia de transmisión efectiva	Potencia de transmisión	37 dBm
	Pérdida de cables y conectores TNC	1dB
	Ganancia de Antena Duck	2dBi
Pérdidas de propagación	Pérdidas en el espacio libre	- 105.15dB
Sensibilidad de recepción efectiva	Ganancia de Antena Duck	2dBi
	Pérdida de cables y conectores TNC	1dB
	Sensibilidad del receptor	-119dBm
Total	-	52.84dB

Tabla 4.4: Presupuesto del enlace de potencia para el módulo Xbee XSC S3B

Potencia de transmisión efectiva	Potencia de transmisión	24dBm
	Pérdida de conectores SMA	0.5dB
	Ganancia de Antena Duck GSM modelo-09	2dBi
Pérdidas de propagación	Pérdidas en el espacio libre	- 111.77dB
2dBi Pérdidas de propagación	Ganancia de Antena Duck GSM modelo-09	2dBi
	Pérdida de conectores SMA	0.5dB
	Sensibilidad del receptor	-106dBm
Total	-	21.23dB

Tabla 4.5: Presupuesto del enlace de potencia para el módulo Xbee Pro 900

Potencia de transmisión efectiva	Potencia de transmisión	17dBm
	Pérdida de cable y conectores SMA, BNC	0.5dB
	Ganancia de Antena Ramsey Logi Log Periodic LPY41	6dBi
Pérdidas de propagación	Pérdidas en el espacio libre	-111.53dB
Sensibilidad de recepción efectiva	Ganancia de Antena Ramsey Logi Log Periodic LPY41	6dBi
	Pérdida de cable y conectores SMA, BNC	0.5dB
	Sensibilidad del receptor	-100dBm
Total	-	16.47 dB

En la Tabla 4.4 se muestra que el módulo Xbee XSC S3B también puede ser implementado en el sistema de comunicación debido a su potencia de transmisión que le permite cubrir grandes distancias (mayor a 10km).

Se puede observar en la Tabla 4.5 que el modulo Xbee Pro 900 alcanza un margen de 16,47dB para una distancia de 10km, es decir, que también puede ser empleado en el sistema de comunicación; no obstante, debe mantenerse una línea de vista y cumplir con la zona de Fresnel para reducir las pérdidas por obstrucción que puedan generarse.

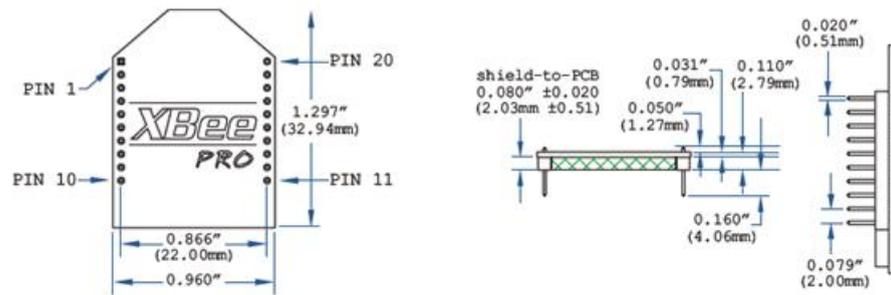


Figura 4.4: Dimensiones del Xbee Pro 900

En vista de que los módulos de la Tabla 4.1 cumplen con los elementos para mantener un enlace de comunicación sin cortes, operando a una distancia de 10km, se procedió a evaluar el costo y disponibilidad en el mercado venezolano.

En consecuencia, el módulo Xbee Pro 900 se definió como el módulo ideal ya que cumple con las características para su implementación en el globo meteorológico, es un dispositivo de bajo costo y el único disponible a la venta en Venezuela.

Este módulo trabaja a un rango de temperatura que oscila entre los -40°C y 85°C lo que lo hace excelente para trabajar bajo las variaciones de temperatura en la troposfera baja, su fuente de alimentación oscila entre 3,0V a 3,6V por lo que puede ser fácilmente alimentado bajo una interfaz USB, sus pequeñas dimensiones (24,384x32,94x6,09mm) hacen que sea un dispositivo fácil de implementar en el globo meteorológico.

La Figura 4.4 es una representación de sus dimensiones, imagen tomada de la hoja de datos.

Otra característica fundamental de este dispositivo es que cuenta con la técnica de espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS) con 8 patrones de salto sobre 1 o 12 canales, que le permite ser inmune a interferencias y ruido.

Es importante destacar que el módulo Xbee Pro 900 cuenta con la aprobación de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos [36] para transmitir en la banda ISM, una banda reservada internacionalmente para su uso con propósitos industriales, científicos, médicos y de telecomunicaciones. El rango

Tabla 4.6: Especificaciones técnicas de la antena Logi Log LPY41 [5]

Especificaciones	
Impedancia	50Ω
Frecuencia	400MHz -1GHz
Ganancia	6dBi
Polarización	Lineal Vertical
VWSR	<2:1
Potencia	10W
Temperatura de Operación	-20 ~ +60°C
Peso	136.08g
Dimensiones	230x285x1mm

de frecuencia de 902MHz a 928MHz está definido por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU) como banda ISM para uso en la región 2 (América) sin la necesidad de poseer licencias.

Por otro lado, el módulo está en condiciones de transmitir desde la troposfera baja ya que la longitud de onda (33,33cm) permite soportar las inclemencias descritas en la fase 1 a la altura en que se encuentre el globo. A esta longitud de onda la atenuación y dispersión generada por los fenómenos atmosféricos es relativamente mínima en todos los aspectos prácticos, ya que tiende a ser apreciable cuando opera a longitudes de onda por debajo de los 10cm.

Adicionalmente, el módulo permite conectar diferentes tipos de antenas por medio de los conectores Tipo-N, BNC, SMA o TNC. Las antenas que se utilicen no deben poseer una ganancia mayor a 15.1dBi, debido a que el dispositivo está diseñado para operar a un rango menor o igual a este. En el anexo D y E se encuentran las hojas de dato de los conectores SMA macho y hembra empleados para la conexión de las antenas.

Para este proyecto, se utilizaron antenas Log Periódicas modelo LPY41 del fabricante Ramsey Electronics ya que ésta antena es de banda ancha diseñada para transmisiones punto a punto, scanners, entre otros sistemas inalámbricos. Las especificaciones de la antena se muestran en la Tabla 4.6, las cuales fueron tomadas de la hoja de datos disponible en el anexo F.

Los gráficos del comportamiento de la relación de onda estacionaria VSWR medidos por el fabricante pueden ser detallados en el anexo F.

En síntesis, los módulos Xbee Pro 900 proveen un amplio rango en conexiones inalámbricas en dispositivos punto a punto y son ideales para aplicaciones inalámbricas que requieren una baja latencia y un aumento de rendimiento de datos, pudiendo ser operables bajo otros productos Xbee que utilicen la misma tecnología. En el anexo G se encuentra disponible la hoja de datos de éste dispositivo.

4.4. Desarrollar el protocolo de comunicación que permita enviar los datos de acuerdo a la prioridad de las variables troposféricas a estudiar, asegurando la recepción de los datos mediante código de detección de errores

A partir de la prioridad de las variables que se van a transmitir, se desarrolló el protocolo de comunicación que gestiona el envío de datos a través de un microprocesador programado en base a la segunda fase, asegurando la recepción de los datos mediante un código de detección de errores y una interfaz en el receptor que muestra el comportamiento de las variables en el tiempo mediante gráficas y hace posible observar si hay error en la medición o si el resultado de un dato es incorrecto, de ser así, se solicita el reenvío de éste mediante un botón ubicado en la interfaz gráfica realizada. De ésta manera el sistema de comunicación se comporta de forma bidireccional.

En el desarrollo del esquema circuital del sistema de comunicación se usó una herramienta computacional para observar el funcionamiento de los sensores y diseño de la tarjeta de circuito impreso, que permitió el montaje de los componentes, el cual se encuentra disponible en el anexo H. En este diseño se llevaron a cabo tres etapas las cuales se detallan en la Figura 4.5.

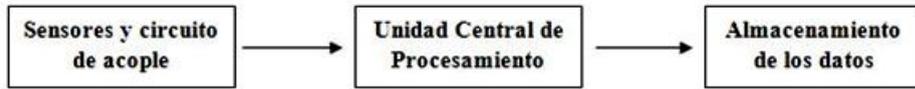


Figura 4.5: Diagrama simplificado del funcionamiento del dispositivo diseñado.

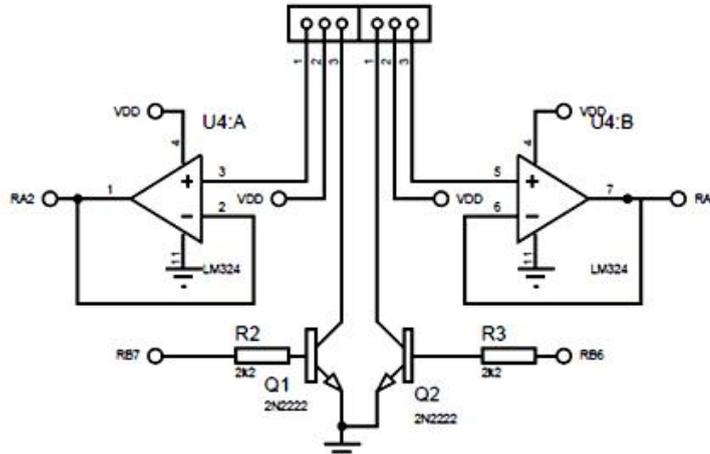


Figura 4.6: Etapa para los sensores MQ-7 y MQ-4

4.4.1. Montaje de los sensores

Los sensores usados para el gas metano y monóxido de carbono MQ-4 y MQ-7 respectivamente, utilizan bobinas de calentamiento para realizar las mediciones, de esta manera en su montaje se requirió variar los voltajes de entrada de éstos sensores y así generar el procedimiento para enviar un dato cada 90 segundos como se explicó en la segunda fase. El ajuste de sensibilidad recomendada por el fabricante Sparkfun para 5.000ppm de CH₄ y 200ppm de CO se logró ajustando una resistencia de 10Kohm a cada sensor.

La Figura 4.6 muestra el esquema de montaje de estos sensores, en el cual se encuentra un transistor para cada sensor que hace el proceso de calentamiento, de modo que cuando exista un voltaje lógico alto (1) circule corriente en los pines RB7 y RB6 y las bobinas puedan calentarse. Una vez realizada la medición, se coloca un voltaje lógico bajo (0) en dichos pines para apagarlos y permitir que las bobinas se enfríen, este proceso ocurre para cada medición. Luego los amplificadores LM324

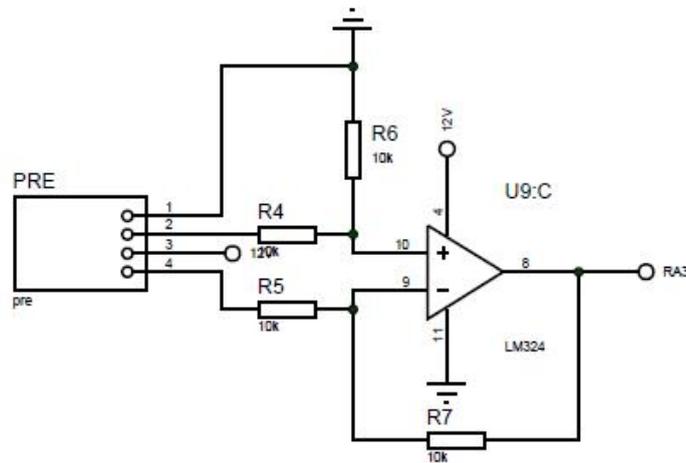


Figura 4.7: Etapa para el sensor de presión MPX2202

configurados como seguidores de tensión permiten una entrada de impedancia alta para los sensores y una impedancia baja para la entrada analógico digital del microprocesador determinada para los pines RA1 y RA2.

Para la variable de presión el sensor MPXM2202 proporciona un nivel lineal de voltaje directamente proporcional a la presión aplicada y su esquema de montaje se muestra en la Figura 4.7.

El amplificador operacional de éste circuito está configurado como diferenciador y tiene la finalidad de producir una salida igual a la diferencia de voltaje de las entradas de los pines 2 y 4 del sensor de presión, mientras que la entrada hacia el microprocesador va determinada por el pin RA3. La presión obtenida por éste sensor es absoluta, ya que se mide respecto a una referencia del vacío absoluto. A través de la fórmula barométrica 4.2, es posible calcular la altura en que se encuentre el globo meteorológico con el valor de presión obtenido.

$$P_h = P_0 \exp \frac{-mgh}{kT} \quad (4.2)$$

Dónde P_h es la presión en función de la altura, P_0 la presión atmosférica a nivel del suelo, m representa la masa de una molécula (29amu para el aire seco), g la

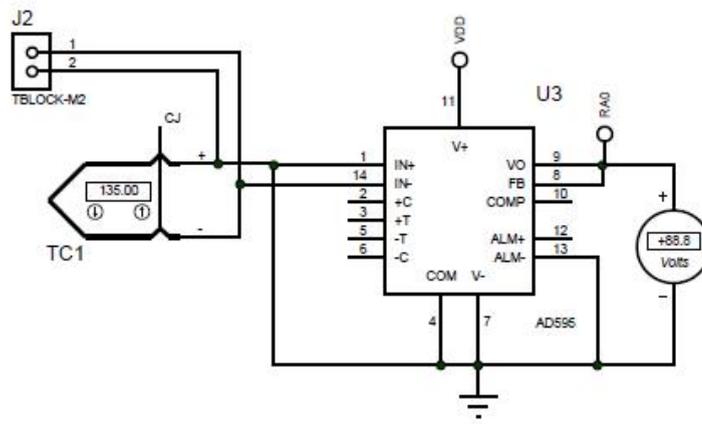


Figura 4.8: Conexión básica para el sensor de temperatura AD595

gravedad, h es la altura en que se encuentre el globo, k la constante de Boltzmann y T es la temperatura atmosférica.

Finalmente, el sensor de temperatura AD595 conectado a una termocupla se configuró como un termómetro para obtener la temperatura ambiente en la que esté situado el sistema de comunicación. Su esquema de montaje se muestra en la Figura 4.8.

Los pines 1 y 14 son las entradas del cable de la termocupla, éste sensor combina mediante un amplificador precalibrado internamente un punto de referencia de hielo junto a una señal proporcionada por la termocupla para generar un valor de temperatura nominal, con ésta configuración el sensor de temperatura posee un rango de medición de -55°C a 125°C , siendo RA0 la entrada hacia el microprocesador.

4.4.2. Unidad central de procesamiento

La información de los sensores es procesada por el PIC 18F2550 del fabricante Microship, el cual ofrece un alto rendimiento computacional, bajo costo, alta resistencia y operación a bajas temperaturas. El esquema electrónico para el sistema de comunicación se muestra en la Figura 4.9.

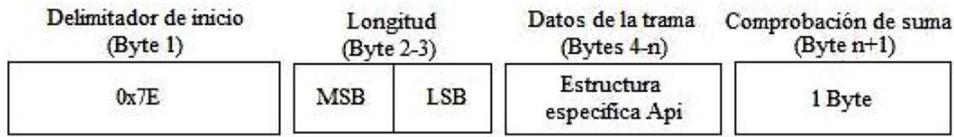


Figura 4.10: Estructura de la trama de datos UART

de comunicación inalámbrico. Ésta transmisión se logra por medio del transmisor-receptor asíncrono universal (UART) para la transferencia de información del PIC al módulo de comunicación configurado en modo transparente, logrando su eventual transmisión en RF. En la recepción, el módulo Xbee Pro 900 configurado como interfaz serial de aplicaciones (API modo 1), utiliza tramas de datos y métodos de detección de errores en los datos enviados, la estructura de trama de datos UART está definida en la Figura 4.10.

En la Figura 4.10, la estructura de la trama contiene varios campos, primero se encuentra el delimitador de inicio el cual indica el comienzo de la trama y está delimitado por el Byte 1, luego en el campo de longitud, los Bytes 2 y 3 se usan para el direccionamiento, identificando la estación que ha transmitido o que va a recibir, en éste campo se encuentran los Bytes más y menos significativos (MSB y LSB respectivamente). El campo de control e información se encuentra en los Bytes 4-n, en el cual se transportan los datos generados y la información para el control de flujo y errores; por último, el campo de comprobación de suma es el código de detección errores calculado sobre los bits de la trama, excluyendo el campo delimitador y la longitud. La estructura de las trama API se puede observar con mayor detalle en la hoja de datos del Xbee Pro 900 en el anexo G.

El montaje del sistema de comunicación se puede observar en la Figura 4.11.

El circuito mostrado en la Figura 4.11, es alimentado mediante una batería de 9V donde internamente se regula a una tensión Vdd de 5V para todo el sistema y 3V para el módulo Xbee Pro 900. Con este tipo de batería el dispositivo opera alrededor de una hora, tiempo suficiente para el envío de los datos ya que el globo meteorológico alcanza una altura de 10km aproximadamente en 33 minutos.



Figura 4.11: Montaje del sistema de comunicación sobre una tarjeta de circuito impreso (PCB)

4.4.3. Almacenamiento de datos

Todos los datos capturados por los sensores se envían al receptor donde se realizan las tareas de sincronización y comprobación de paridad. El método de detección de errores usado es el de comprobación de suma (Checksum) el cual viene programado en el Xbee Pro 900 en modo API, éste método permite detectar cambios accidentales en una secuencia de datos para proteger la integridad de los mismos, de igual forma, verifica que no exista discrepancia entre los valores obtenidos al hacer una comprobación al inicio y al final de la transmisión. Luego cada variable se visualiza en gráficas independientes mediante una interfaz, la cual fue diseñada para observar el comportamiento de éstas en el tiempo, lo que permite identificar la recepción de datos incorrectos o la pérdida de alguno de ellos y de esta forma, solicitar el reenvío del dato a través del botón «Reenvío» mostrado en la interfaz gráfica de la Figura 4.12.

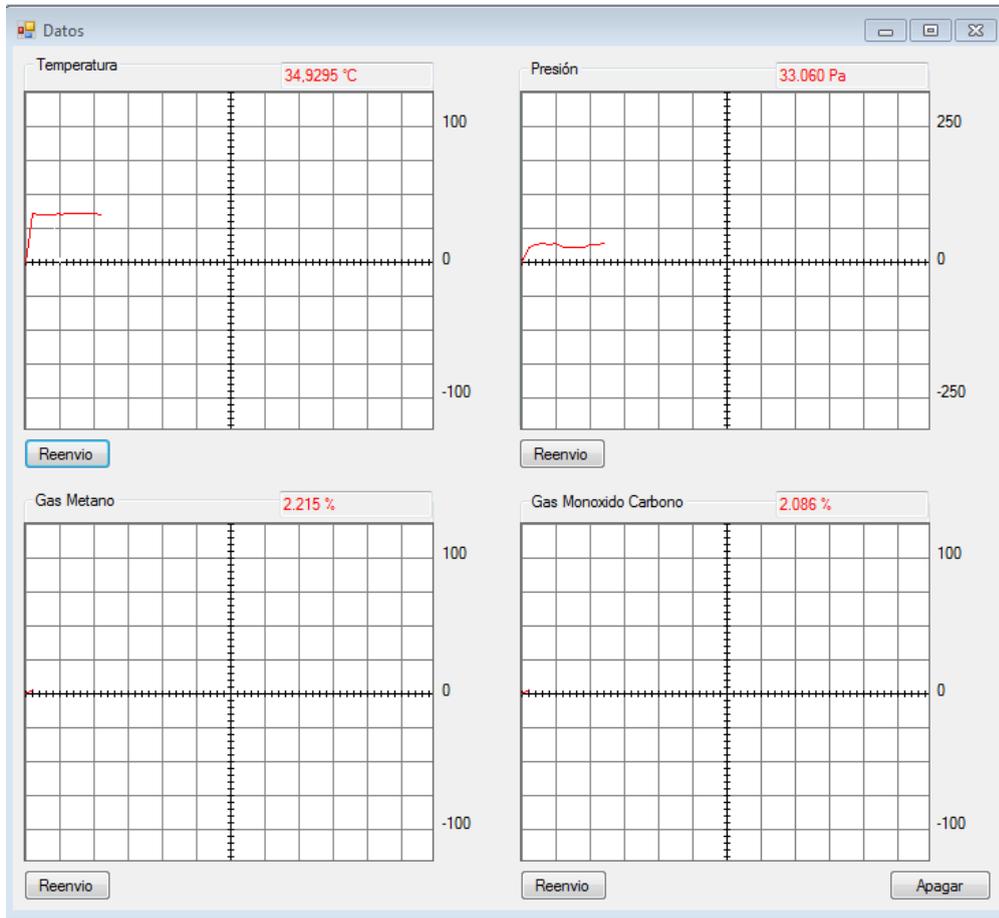


Figura 4.12: Interfaz para observar el comportamiento en el tiempo de las variables

Una vez finalizado el proceso de captura, los datos son almacenados conjuntamente con la hora en que fueron capturados en una carpeta llamada Xbee que se creó en el disco local del computador y contiene 4 archivos planos (.txt) correspondiente a cada variable, en la Figura 4.13 se observa el almacenamiento de los datos.

Los datos almacenados pueden ser procesados en programas de base de datos como Microsoft Office Excel. En los anexos I y J se encuentran los códigos de programación diseñados para el procesamiento y envío de los datos a través del PIC18F2550, así como el de la interfaz gráfica para recepción y almacenamiento de los mismos.

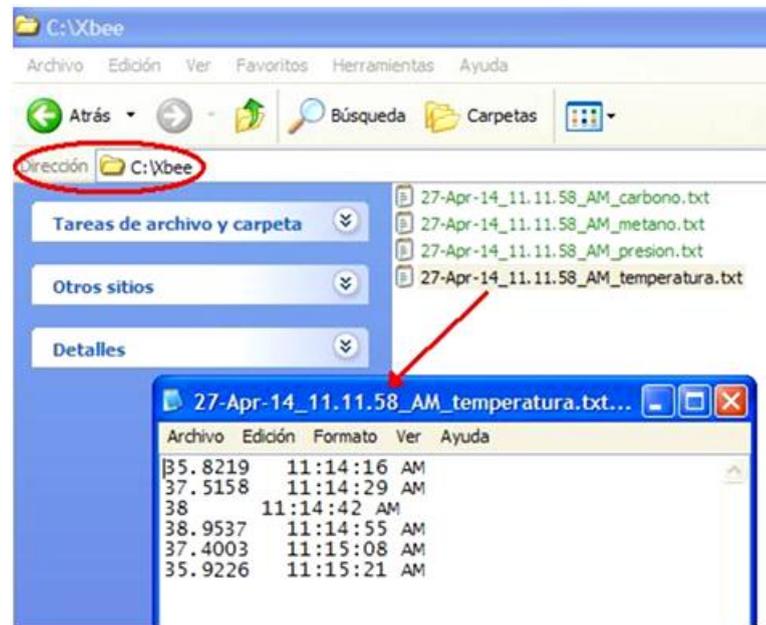


Figura 4.13: Almacenamiento de los datos en la carpeta Xbee creada en el disco local

4.5. Simular el protocolo de comunicación mediante un programa que contenga las especificaciones del módulo de comunicación seleccionado

Antes de llevar a cabo la implementación del sistema de comunicación, fue indispensable realizar simulaciones con las características del módulo, las antenas empleadas y una distancia similar al área de estudio, con la finalidad de observar el posible comportamiento del sistema de comunicación en la aplicación práctica. De esta manera se obtuvo un ensayo de las pérdidas en el sistema, la alineación de antenas, margen de desvanecimiento, permitiendo el análisis de los factores modificables para garantizar un alto rendimiento en el momento de su implementación.

El protocolo de comunicación desarrollado fue simulado mediante un software que permitió observar el funcionamiento de los sensores y el envío de datos en una pantalla serial, dicha simulación se muestra en la Figura 4.14.

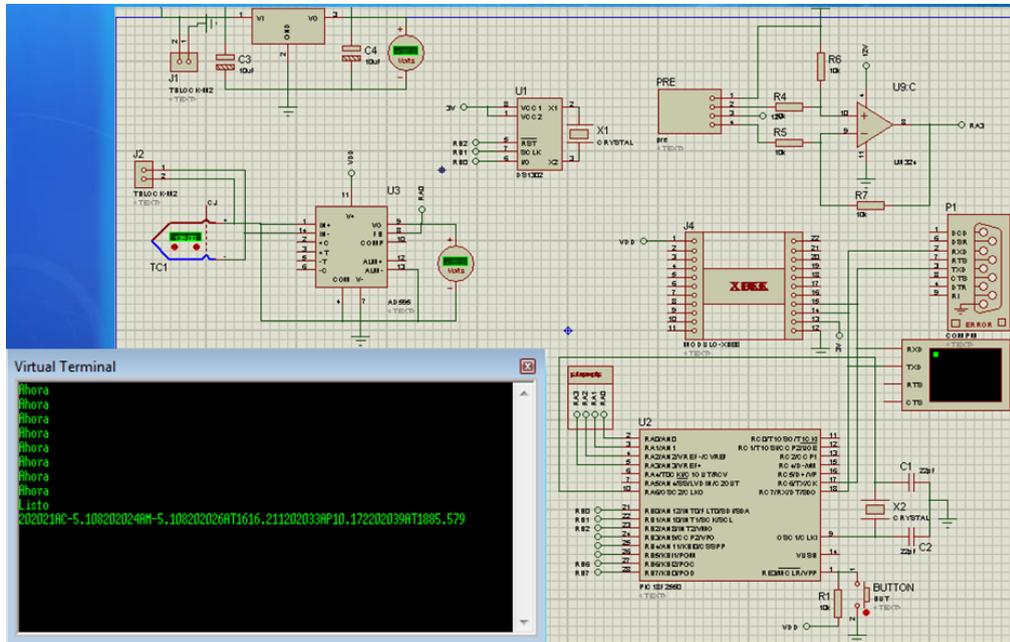


Figura 4.14: Simulación del protocolo de comunicación

En la Figura , 4.14 muestra en la pantalla terminal un mensaje con la palabra «Ahora» la cual indica que la unidad central de procesamiento se encuentra esperando la hora para iniciar el reloj DS1302 y así llevar las mediciones en el tiempo actual. Una vez enviada la señal de tiempo se inicia la transmisión de los datos, en la pantalla virtual se observan los valores obtenidos por los sensores con sus respectivos identificadores.

La simulación del sistema de comunicación se desarrolló mediante un software libre denominado Radio Mobile para predecir el rendimiento de un sistema de radio; mediante ésta prueba se estimó el comportamiento del módulo en una transmisión de larga distancia similar al de la troposfera baja, considerando un 80 por ciento de fiabilidad y una adecuada línea de vista.

En la Figura 4.15 se muestra la posición de los módulos mediante la herramienta Google Earth dónde el módulo 1 (Rx) se encontró en la cima del Cerro La Cruz cuyas coordenadas son Latitud: 10°14'13.92"N Longitud: 67°58'59.12.º y el módulo 2 (Tx) se ubicó en el mismo cerro con las siguientes coordenadas, Latitud:

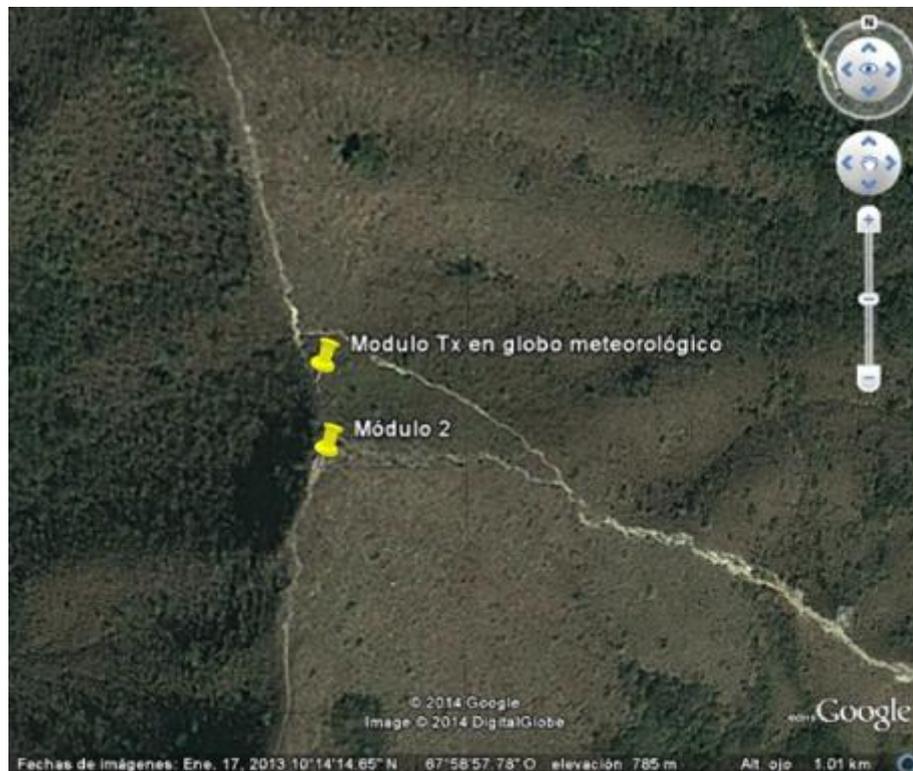


Figura 4.15: Ubicación de los módulos mediante el uso de Google Earth

10°14'14.69"N Longitud: 67°58'59.14.º, este escenario permite simular la comunicación entre la estación terrena y el globo meteorológico a una altura de 5,387km y distancia horizontal de 24m del módulo receptor, considerando que los vientos alisios presentes en Venezuela no afectan horizontalmente en el desplazamiento de dicho globo.

En la Tabla 4.7 se muestran las características del enlace y los resultados obtenidos de la simulación de Radio Mobile. Con las antenas totalmente alineadas, una adecuada línea de vista, se obtuvo en el proceso de simulación un margen de desvanecimiento de 11,54dB mediante la diferencia entre la señal recibida y la sensibilidad del receptor, lo cual indica que el enlace debería operar con alta fiabilidad en la troposfera baja. Dicho margen permite el soporte de los factores climáticos que se puedan presentar en la implementación del sistema de comunicación, por lo que es necesario para asegurar una disponibilidad adecuada y evitar cortes en el

Tabla 4.7: Resultados de la simulación del radio enlace para un estudio similar a la troposfera baja

Estudio del Radio Enlace 1	
Módulo Rx	Módulo Tx
Latitud: 10.237200°	Latitud: 10.237417°
Longitud: -67.983090°	Longitud: -67.983093°
Elevación del terreno: 789.7m	Elevación del terreno: 796.7m
Altura de Antena: 2m	Altura de Antena: 5387m
Azimut: 359.31°	Azimut: 179.31°
Inclinación: 89.74°	Inclinación: -89.74°
Sistema de Radio	Propagación
Potencia TX: 17dBm	Pérdida del Espacio Libre: 106,14dB
Pérdida de Línea TX: 0,50dB	Pérdida de Obstrucción: -0,54dB
Ganancia de Antena TX: 6dBi	Pérdida por Árboles: 0,00dB
Ganancia de Antena RX: 6dBi	Pérdidas por Urbano: 0,00dB
Pérdida de Línea RX: 0,50dB	Pérdida de Estadística: 10,87dB
Sensibilidad RX: -100dBm	Pérdida Total del Camino: 116,46dB
Rendimiento	
Distancia: 5,387 Km	Ganancia del Sistema: 128dB
Precisión: 10,0M	Señal Recibida: -88,46dBm
Frecuencia de Operación: 902,0MHz	Margen de Desvanecimiento: 11.54dB

enlace que el margen de desvanecimiento se encuentre sobre los 10dB.

Con la finalidad de realizar una implementación similar a las características de la troposfera baja, se realizó una simulación de un radio enlace con la misma distancia empleada anteriormente, pero ésta vez con los módulos situados a 2m de altura, cumpliendo con un 80 por ciento de la zona de Fresnel para evitar pérdidas por obstrucción. En la Figura 4.16 se muestra la posición de los módulos donde el módulo 1 se encontró en la cima del Cerro El Casupo cuyas coordenadas son Latitud: 10°13'23.91"N Longitud: 68° 1'48.88.° y el módulo 2 se ubicó en la cima del Cerro La Cruz de San Diego con las siguientes coordenadas, Latitud: 10°14'13.92"N Longitud: 67°58'59.12.° logrando una distancia de 5,387km similar a la simulación anterior.

En la Tabla 4.8 se muestran las características del enlace y los resultados obtenidos de la simulación de Radio Mobile. Al igual que la simulación anterior, las

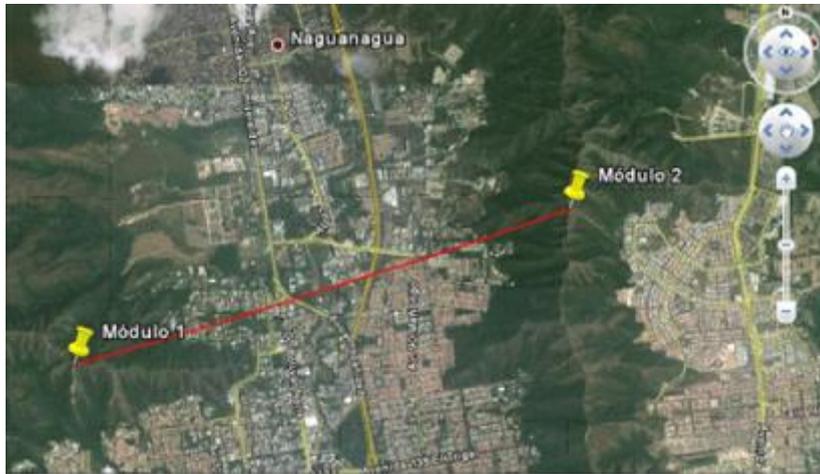


Figura 4.16: Ubicación de los módulos en el radio enlace de 5,387km

antenas están totalmente alineadas con una adecuada línea de vista, de tal forma en comparación a la simulación anterior, se obtuvo pérdidas de obstrucción de 4,89dB y un margen de desvanecimiento de 6,19dB, lo cual indica que el enlace debería operar con alta fiabilidad en la troposfera baja si se trata de reducir en lo posible las pérdidas por obstrucción que se pudieran presentar al momento de la implementación. Esta simulación permite observar que con este tipo de radio enlace se pueden obtener resultados equivalentes a la implementación real del sistema de comunicación en el globo meteorológico hacia la troposfera baja.

4.6. Implementar el sistema de comunicación mediante el empleo de un globo meteorológico para la obtención de los datos sobre las características de la troposfera baja

Una vez realizadas las simulaciones necesarias en zonas que se asemejen a las condiciones de la troposfera se procedió a la implementación del módulo de comunicación para su puesta en funcionamiento. En el proceso de operatividad del sistema de comunicación, se realizó la configuración básica del módulo Xbee Pro 900 para establecer el enlace entre los dispositivos bajo el software libre X-CTU,

Tabla 4.8: Resultados de la simulación del radio enlace para una distancia de 5,387km

Estudio del Radio Enlace 2	
Módulo 1	Módulo 2
Latitud: 10,223310°	Latitud: 10,237200°
Longitud: -68,030250°	Longitud: -67,983090°
Elevación del terreno: 768,1m	Elevación del terreno: 789,7m
Altura de Antena: 2m	Altura de Antena: 2m
Azimut: 73,33°	Azimut: 253,34°
Inclinación: 0,21°	Inclinación: -0,25°
Sistema de Radio	Propagación
Potencia TX: 17dBm	Pérdida del Espacio Libre: 106,13dB
Pérdida de Línea TX: 0,50dB	Pérdida de Obstrucción: 4,89dB
Ganancia de Antena TX: 6dBi	Pérdida por Árboles: 0,00dB
Ganancia de Antena RX: 6dBi	Pérdidas por Urbano: 0,00dB
Pérdida de Línea RX: 0,50dB	Pérdida de Estadística: 10,78dB
Sensibilidad RX: -100dBm	Pérdida Total del Camino: 121,81dB
Rendimiento	
Distancia: 5,387 km	Ganancia del Sistema: 128dB
Precisión: 10,0M	Fiabilidad Requerida: 80,0 %
Frecuencia de Operación: 902,0MHz	Señal Recibida: -93.81dBm
Potencia Radiada Equivalente: 0,178W	Margen de Desvanecimiento: 6,19dB

el cual sirve de plataforma para dicha configuración y prueba de rango entre los dispositivos.

La conexión del módulo al computador se hizo a través la plataforma Xbee Explorer USB, cuya función es alimentar al módulo y simular que el Xbee Pro 900 esté conectado a un puerto serial mediante un driver llamado VCP (Virtual COM Port). En el anexo K se encuentra disponible la hoja de datos de ésta plataforma.

Pasos para la configuración del módulo Xbee Pro 900:

4.6.1. Configuración de puertos

Al iniciar el programa X-CTU se muestra una pestaña por defecto «PC Settings», en ésta se observa el módulo conectado a un puerto Com. Para verificar que éste

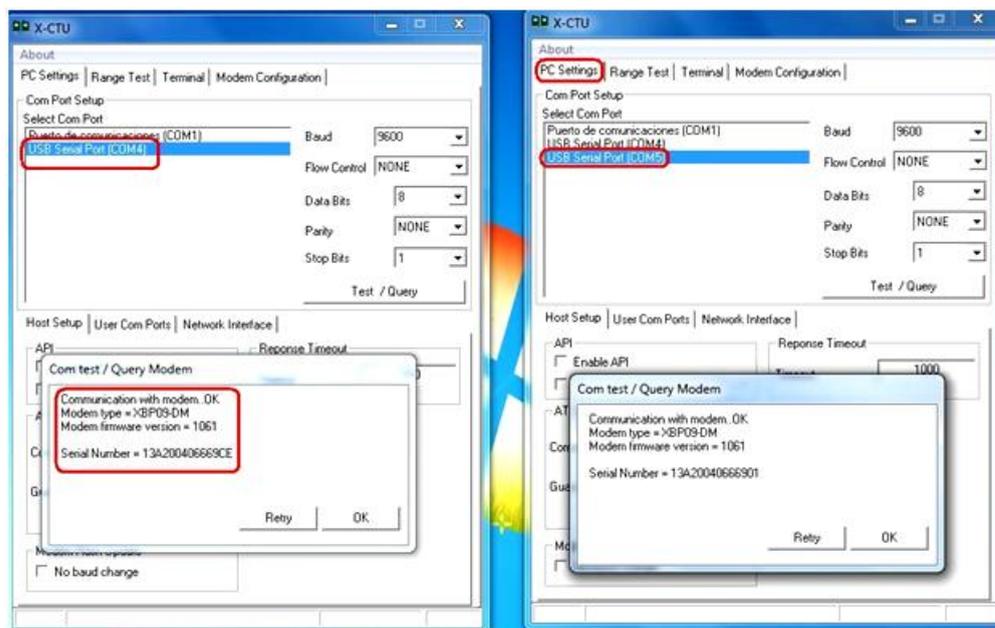


Figura 4.17: Configuración de puertos y prueba de módem

funcione correctamente se debe hacer clic al botón «Test/Query» inmediatamente aparece una ventana mostrando que la comunicación con el módem fue satisfactoria, de no ser así arroja una ventana con los posibles errores, por lo que, se debe hacer Reset al módulo Xbee Pro 900 ajustando un cable al pin de tierra con el pin de Reset y dejarlo hasta que la ventana de errores se cierre. La Figura 4.17 muestra la prueba de conexión de cada módulo.

En la Figura 4.17, el COM4 representa al módulo 1 y el COM5 al módulo 2; mediante el botón «Test/Query» es posible revisar si el módulo se comunica al computador, además de reflejar el tipo de módem, versión del firmware y el número de serial. Para el funcionamiento del Xbee Pro 900 debe estar configurado a un baudio de 9.600, módem tipo XBP09-DM y que el firmware esté en la versión 1061, de lo contrario hay que configurarlo como se muestra en la figura 4.18.

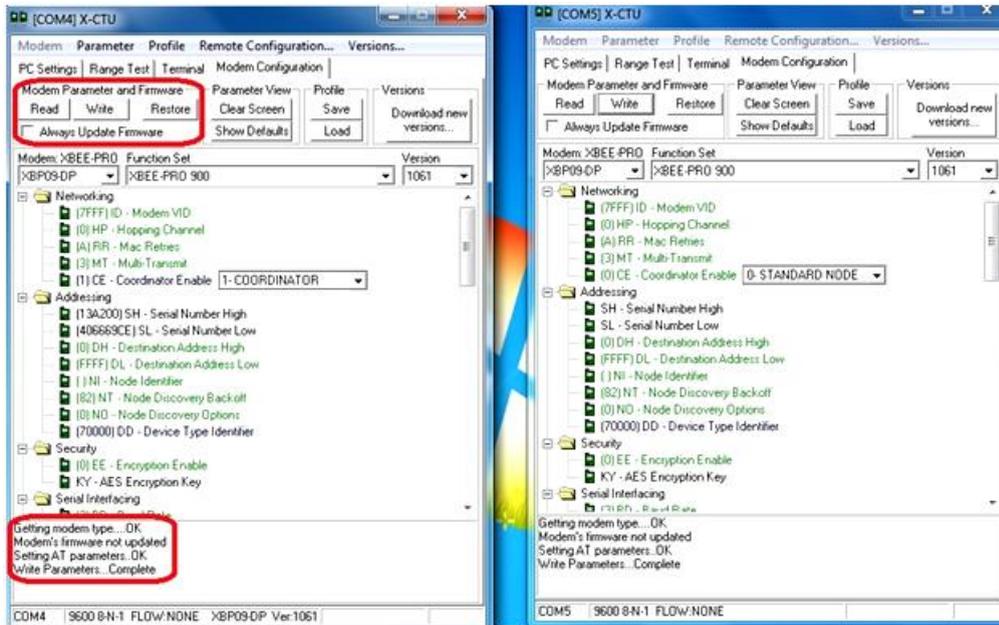


Figura 4.18: Configuración del Xbee en modo transparente

4.6.2. Configuración del MODEM para modo transparente

Para la configuración del módem se debe hacer clic a la pestaña «Modem Configuration» y hacer clic al botón «Read» para leer la configuración del Xbee Pro 900. En la Figura 4.18 se observa la configuración del módem para cada módulo.

En ésta sección se debe asegurar que cada Xbee Pro 900 esté configurado al módem de tipo XBP09-DP, su función fijada como XBEE-PRO 900 y el firmware se encuentra en la versión 1061. Una vez configurado éstos parámetros se debe hacer clic al botón «Write» para guardar la configuración y al final de la ventana se muestre que la escritura de los parámetros fue completada.

4.6.3. Transmisión de datos punto a punto

Una vez establecida la configuración de ambos módulos, es posible hacer una comunicación serial haciendo clic en la pestaña «Terminal» como se muestra en la Figura 4.19 para probar que los Xbee Pro 900 se comuniquen entre sí.

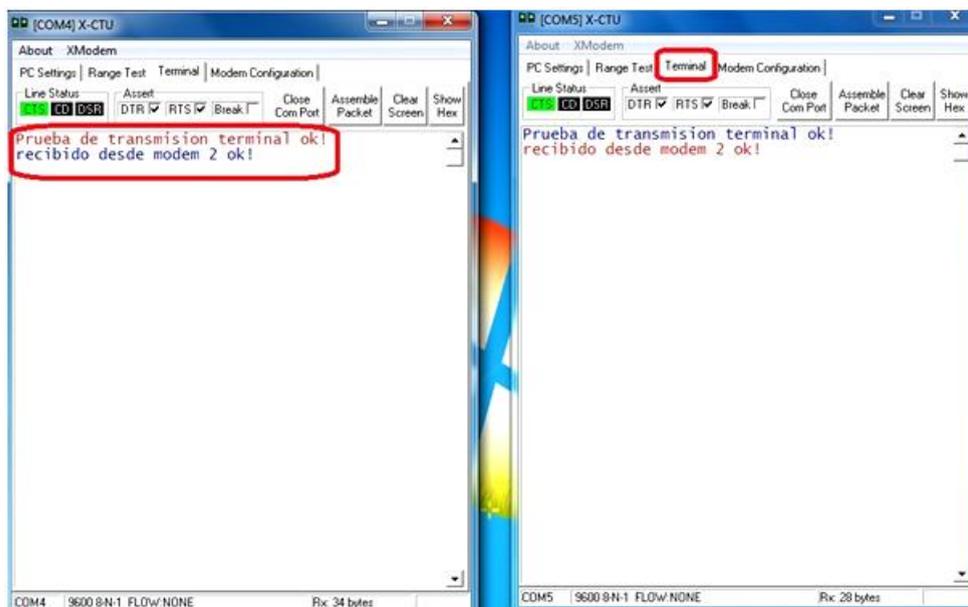


Figura 4.19: Transmisión punto-punto con módulos en modo transparente

En la Figura 4.19 se observa que el módulo 2 envía una data de 34Bytes al módulo 1. Las letras en color azul corresponden a la data enviada como paquete RF al módem destino, las de color rojo son las recibidas. De este modo toda la información que se quiera enviar por el pin DIN de un módulo será recibida inmediatamente por el receptor.

4.6.4. Configuración del MÓDEM en modo API 1

En la configuración del módem en modo API 1 se debe hacer clic a la pestaña «Modem Configuration» y al botón «Read» para leer la configuración del Xbee Pro 900. En la Figura 4.20 se observa la configuración del módem para modo API 1.

En ésta sección se debe asegurar que el módulo Xbee Pro 900 que será configurado en modo API 1 se encuentre como coordinador, luego en la carpeta de interfaz serial la configuración API se habilita en modo API 1, por último se debe verificar que el ID que se le asigne a los módems sea igual. Una vez configurado estos parámetros se hace clic en el botón «Write» para guardar la configuración en el módulo.

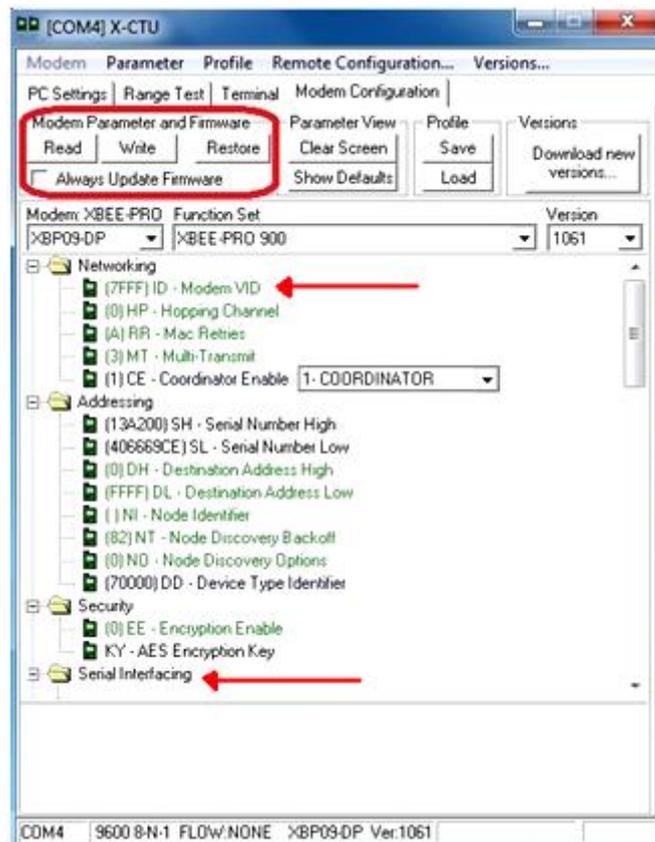


Figura 4.20: Configuración del Xbee en modo API 1

Por último para que el módem opere en modo API 1, se debe hacer clic a la pestaña «PC Settings» donde se habilita la configuración API a través de un clic. Este procedimiento se muestra en la Figura 4.21.

4.6.5. Transmisión de datos punto a punto modo API 1

Una vez establecida la configuración para el módulo receptor en API 1 y el módulo de la unidad central de procesamiento en modo transparente, es posible hacer una comunicación haciendo clic en la pestaña «Terminal» como se muestra en la Figura 4.19 para probar que los Xbee Pro 900 se comuniquen entre sí.

En la Figura 4.22, se observa la comunicación entre el módulo de la unidad central de procesamiento y el módulo de recepción, donde se observa el mensaje

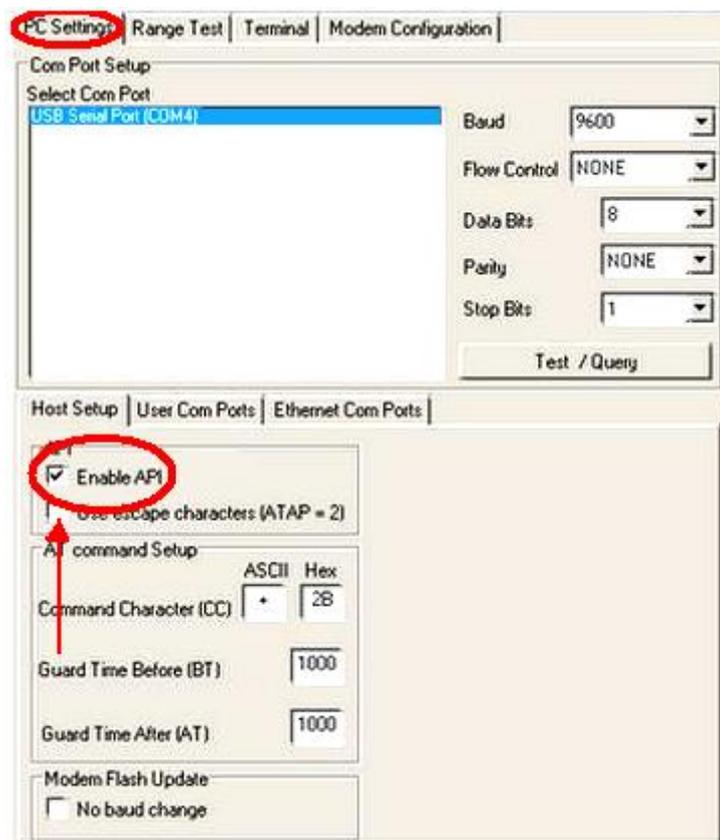


Figura 4.21: Habilitación del modo API

«Ahora» expresado en hexadecimal en la trama API como «41 68 6F 72 61», mensaje de espera hasta mandar la hora actual para el inicio de captura de los datos.

4.6.6. Implementación del sistema de comunicación

La implementación del sistema se realizó en el estado Carabobo, entre el Cerro El Casupo del municipio Valencia y La Cruz del municipio San Diego; los módulos se ubicaron con las mismas coordenadas de la simulación hecha en la quinta fase, la distancia total fue de 5,387km; se llevó a cabo con la finalidad de implementar en la práctica dicho sistema para evaluar su comportamiento.

Para la prueba de rango se utilizó el software X-CTU, configurado como un loopback en la pestaña de «Range Test», de modo que la data enviada por el módulo

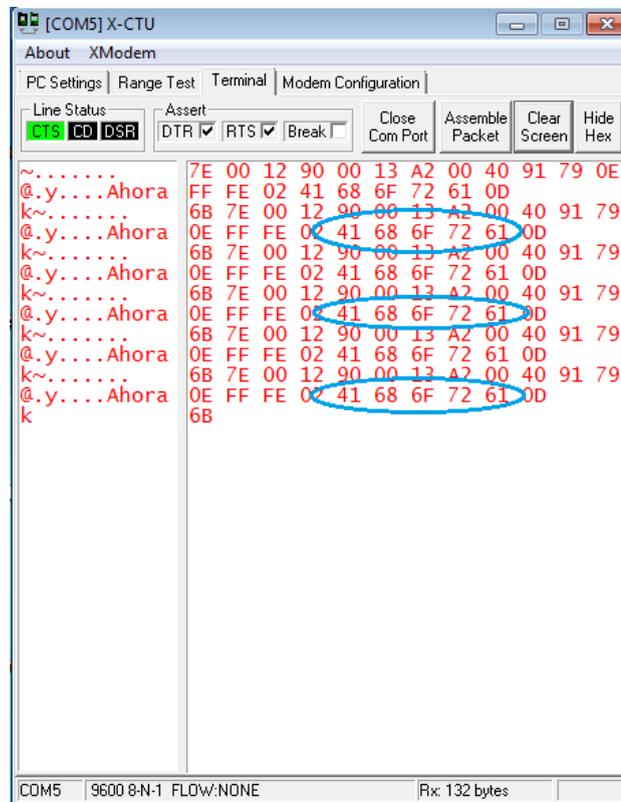


Figura 4.22: Transmisión inalámbrica punto a punto con módulo en modo transparente y módulo en modo API 1

1 (Tx) fue recibida en el módulo 2 (Rx) y posteriormente éste la reenvió al módulo 1.

En el proceso de transmisión, un paquete bueno fue considerado como aquél que se envió y se recibió nuevamente sin ninguna modificación en el tiempo de espera. Las características de éste radio enlace se muestran en la Tabla 4.9.

Para diferentes tamaños de data, tiempo de espera, polarización de la antena y nivel de intensidad de señal recibida (RSSI), los resultados fueron registrados en las siguientes Tablas 4.10, 4.11, 4.12 y 4.13.

El primer periodo de la prueba se inició para un paquete de un Byte, tiempo de espera de 10 segundos en los módulos y antenas polarizadas a 0°, esto originó que se recibieran una gran cantidad de paquetes buenos, sin embargo, al rotar la

Tabla 4.9: Características de la implementación del radio enlace entre el cerro Casupo y el cerro La Cruz Prueba Radio Enlace Módulo Xbee Pro 900

prueba radio enlace módulo Xbee Pro 900			
Locación	Edo. Carabobo - Venezuela		
Coordenadas GPS de los Módulos	Tx	Latitud: 10.223310° Longitud: -68.030250°	
	Rx	Latitud: 10.237200° Longitud: -67.983090°	
Distancia	5,387km		
Condiciones Climáticas	Despejado, parcialmente soleado.		
Elevación del Terreno	Tx	768.1m	
	Rx	789.7m	
Sistema de Radio			
Frecuencia de Operación	902 – 928Mhz		
Tipo de Antenas utilizadas	Tx	Log Periódicas LPY41	Ganancia: 6 dBi
	Rx	Log Periódicas LPY41	Ganancia: 6 dBi
Alturas de Antenas	Tx	2m	
	Rx	2m	
Orientación de Antenas	Tx	Azimut	73.33°
		Inclinación	0.21°
	Rx	Azimut	253.34°
		Inclinación	-0.25°
Potencia de Tx	17dBm		
Sensibilidad de Rx	-100dBm		

Tabla 4.10: Prueba N°1 paquete de un Byte

Polarización de la antena Rx	Tiempo de espera	Porcentaje de paquetes buenos
0°	10 segundos	80,9 %
45°	10 segundos	45,2 %
90°	10 segundos	12,5 %
180°	10 segundos	63,6 %

polarización de la antena de recepción se produjeron pérdidas de paquetes; al alcanzar los 90° existieron muchas pérdidas en la transmisión y con una polarización inversa se logró recibir una gran parte de paquetes buenos.

Posteriormente, se procedió a realizar una segunda prueba, esta vez con un paquete de 4 Bytes, variaciones en el tiempo de espera e igual polarización en las antenas, además se habilitó la opción del nivel de intensidad de señal recibida.

Los resultados expresados en la Tabla 4.11 permiten evidenciar que a un tiempo de espera menor a 15 segundos se recibió una mayor cantidad de paquetes buenos y

Tabla 4.11: Prueba N°2 paquete de 4 Bytes.

Tiempo de espera	RSSI	Porcentaje de paquetes buenos
15 segundos	-80dBm	69,2 %
10 segundos	-78dBm	68,4 %
7 segundos	-81dBm	94,1 %

Tabla 4.12: Prueba N°3 paquete de 6 Bytes

Tiempo de espera	RSSI	Porcentaje de paquetes buenos
10 segundos	-87dBm	93,8 %
5 segundos	-87dBm	87,1 %

Tabla 4.13: Prueba N°4 paquete de 10 Bytes

Tiempo de espera	RSSI	Porcentaje de paquetes buenos
5 segundos	-87dBm	81,7 %

el nivel de intensidad de la señal se encontró a niveles estables. Los valores típicos de una señal recibida son -100dBm (nivel de señal bajo), el cual indica que está muy lejos de la estación base y -60dBm (nivel de señal alto) que está muy cerca de la estación base [37].

En los módulos los valores de RSSI variaban a medida en que las antenas se movían, además, estos valores incluyeron la potencia total recibida, sumado a la interferencia de otras fuentes. Para asegurar que la señal recibida llegara con suficiente intensidad, lo ideal fue mantener un nivel de potencia entre un rango de -75dBm y -80dBm.

Por último, se realizaron dos pruebas para una data de 6 y 10 Bytes con diferentes tiempos de espera.

Los resultados obtenidos en las Tablas 4.12 y 4.13 evidencian que para una transmisión de paquetes de 6 y 10 Bytes a una distancia de 5,387km, se obtuvo una comunicación fiable con la recepción de más del 80% de paquetes buenos.

Las Figuras 4.23 y 4.24 muestran las posiciones de los módulos y el apuntamiento de las antenas en cada uno de los cerros.



Figura 4.23: Módulo 1 en el cerro el Casupo

En la Figura 4.23 se observa la presencia de árboles y condiciones en la que se transmitió con el módulo 1 a una altura de 2m

De la Figura 4.24 se observa la antena del módulo 2 alineada al cerro Casupo para la transmisión de los datos.

Por último, en la Figura 4.25 se muestra que el módulo 2 se encontraba casi en su totalidad despejado, lo que permitió el cumplimiento de la primera zona Fresnel y una adecuada línea de vista para la implementación del sistema de comunicación entre el cerro Casupo y el cerro La Cruz, lo que evitó pérdidas por obstrucción y las pérdidas por urbano que afectarían de manera considerable la comunicación entre los módulos.



Figura 4.24: Módulo 2 en el cerro La Cruz

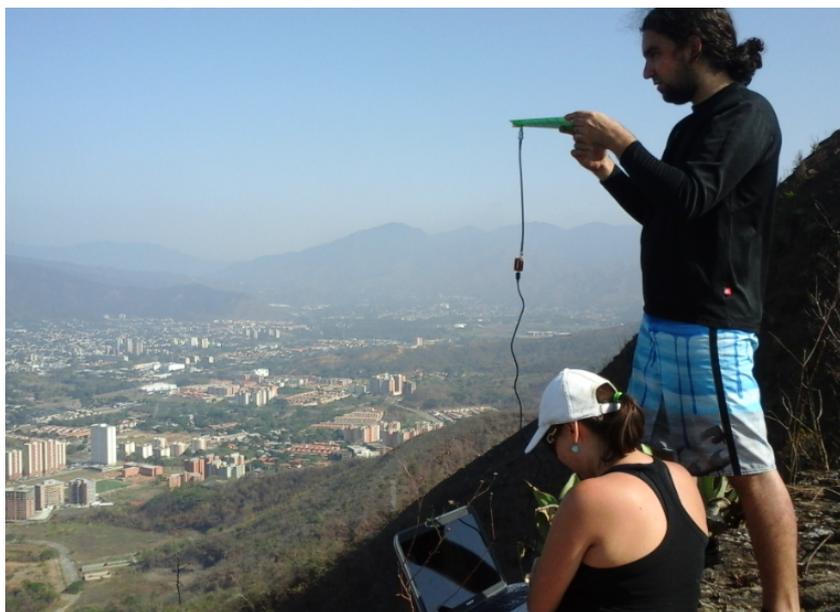


Figura 4.25: Transmisión y recepción de los datos en el cerro La Cruz

Capítulo V

Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

A partir de las documentaciones de los fenómenos atmosféricos, se determinó que los fenómenos presentes en la tropósfera son: gases atmosféricos, lluvias, granizo, ruido térmico, niebla, nubes y viento, los cuales afectan las comunicaciones ocasionando en la señal atenuación, dispersión y cambios de fase.

Los fenómenos atmosféricos afectan considerablemente los sistemas de comunicación si se transmite en altas frecuencias. En la banda SHF (3-30GHz) se pueden apreciar atenuaciones por nubes, lluvia y niebla de aproximadamente 1dB/km a longitudes de ondas por debajo de los 10cm, a largas distancias como las transmisiones satelitales los gases atmosféricos son un factor de atenuación que deben ser tomados en cuenta.

El orden de prioridad de las variables atmosféricas se determinó a través del tiempo de respuesta de los sensores empleados, de tal manera, los sensores AD595 y MPXM2202 para las variables de temperatura y presión respectivamente, presentaron un tiempo de respuesta igual, enviando un dato cada 13 segundos, mientras que los sensores MQ-4 de metano y MQ-7 de monóxido de carbono, presentaron un tiempo de respuesta mayor a los de temperatura y presión, enviando un dato cada 90 segundos.

El metano y el monóxido de carbono representan las variables de mayor importancia para el estudio meteorológico, sin embargo, el orden de prioridad de las variables enviadas fue de la siguiente manera: temperatura, presión, metano y monóxido de carbono. Estas fueron enviadas con la hora en que fue tomada la medición, de tal manera fue posible determinar su comportamiento en el tiempo.

El módulo de comunicación Xbee Pro 900 definido como el dispositivo inalámbrico para la transmisión y recepción de las variables, por sus pequeñas dimensiones, ligero peso, bajo costo, capacidad para cubrir grandes distancias (10km), bajo consumo de potencia y disponibilidad en el mercado venezolano, resultó ser un dispositivo ideal para implementarlo en un globo meteorológico.

El Xbee Pro 900 transmite en la banda ISM (902 – 928MHz), por lo que no es necesaria ninguna licencia, ya que esta banda está reservada para usos industriales, médicos, científicos y de telecomunicaciones. Además, el rango de frecuencia en que operó el sistema de comunicación, permitió que las atenuaciones generadas por los fenómenos atmosféricos resultaran ser relativamente mínimas.

El módulo Xbee Pro 900 configurado en modo API permitió utilizar tramas de datos y métodos de detección y corrección de errores en los datos enviados.

El desarrollo de un sistema de comunicación bidireccional permitió observar si existió algún error de medición o una mala transmisión en la recepción, por lo que se pudo solicitar el reenvío de dicho dato a través de un botón en la interfaz de la recepción. Es necesario manejar un margen de desvanecimiento por encima de los 10dB para garantizar un radio enlace de alta fiabilidad.

La simulación de un radio enlace horizontal resultó ser similar a la simulación del radio enlace vertical, en ambas simulaciones el transmisor y receptor estaban distanciados a 5,387km, donde se obtuvo un margen de desvanecimiento similar. Dicha simulación hizo posible observar cómo sería el comportamiento del sistema de comunicación en el globo meteorológico.

En una transmisión de data de 10 Bytes para un radio enlace de 5,387km, equivalente a la troposfera baja, se obtuvo un porcentaje de efectividad del 81,7.

5.2. Recomendaciones

Transmitir en las mejores condiciones climáticas, preferiblemente con un cielo despejado y una adecuada línea de vista entre el transmisor y el receptor, para evitar en lo posible las atenuaciones por los fenómenos atmosféricos. Operar a longitudes de ondas por encima de los 10cm, permite que las atenuaciones por lluvia, nubes y neblina sean mínimas.

La implementación de sensores más sensibles para las mediciones de temperatura, presión, metano y monóxido de carbono, permite obtener resultados más precisos y un menor tiempo de respuesta.

Estudiar otros tipos de sensores para el estudio de los gases restantes en la troposfera baja como: dióxido de carbono (CO₂), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x) y ozono (O₃), ya que son variables de gran importancia para los estudios atmosféricos. El uso de otros módulos con mayor potencia de transmisión y mayor sensibilidad de recepción, aumenta la ganancia del sistema, obteniendo un gran rendimiento en el radio enlace a grandes distancias (10 – 40km).

Implementar una antena de 15dBi en el Xbee Pro 900 permite obtener un enlace comunicación estable para la recepción de los datos desde la tropósfera baja a la superficie terrestre.

El diseño de una grilla o esquina (Corner) para las antenas Log periódicas LPY41 logra optimizar la ganancia de las antenas, llegando a obtener aproximadamente entre 10 - 12dBi. Mediante la configuración API del Xbee Pro 900, a través de la trama UART de datos es posible agregar a la interfaz gráfica el nivel de intensidad de la señal recibida (RSSI) ya que a este nivel de potencia, se puede observar si se producen pérdidas en la señal o si ésta es idónea con tasas de transferencia estables.

Promover la revisión del contenido bibliográfico, tomar acciones correctivas si se requiere y proseguir con esta línea de investigación, para aumentar el conocimiento e información que permita mejorar los sistemas de comunicación en los diferentes estudios de meteorología en Venezuela.

Referencias Bibliográficas

- [1] DIGI. *Manual Xbee Pro 900*. URL <https://www.sparkfun.com/datasheets/Wireless/Zigbee/XBee-900-Manual.pdf>.
- [2] Recommendation itu-r v.431-7, . URL <http://webs.uvigo.es/servicios/biblioteca/uit/rec/V/RREC-V.431-7-200005-I!!PDF-S.pdf>.
- [3] JH Van Vleck. The absorption of microwaves by oxygen. *Physical Review*, 71 (7):413, 1947.
- [4] John Arthur Saxton and HG Hopkins. Some adverse influences of meteorological factors on marine navigational radar. *Proceedings of the IEE-Part III: Radio and Communication Engineering*, 98(51):26–36, 1951.
- [5] *Logi Log Periodic PCB Antenna 400-1000 MHz, Assembled*. Ramsey Electronics, 2012. URL <http://www.ramseyelectronics.com/Logi-Periodic-Antenna-400-1000-Assembled/dp/B0002NRK8K>.
- [6] R. Velázquez Araguayán. *Meteorología y Física Atmosférica*, chapter Meteorología y Climatología. Universidad de Carabobo, 2007.
- [7] B. R. Bean and Dutton E. J. *Radio Meteorology*. Dover Publications, 1966.
- [8] N. Falcón. Proyecto estratégico caracterización de fenómenos transitorios en la troposfera: electrometeoros, litometeoros, microtornados y trombas marinas. Fonacit, Universidad de Carabobo, Facultad de Ciencias y Tecnología, 2011.
- [9] R.R. Soriano. *Guía para realizar investigaciones sociales*. Colección Folios universitarios. Plaza y Valdés, 1995. ISBN 9789688562642. URL <http://books.google.co.ve/books?id=lNHY5Yet-xQC>.

- [10] J.W. Creswell. *Educational Research: Planning, Conducting, and Evaluating Quantitative and Qualitative Research + Video-enhanced Pearson Etext Access Card*. Pearson Education, 2014. ISBN 9780133831535. URL <http://books.google.co.ve/books?id=6kk-nwEACAAJ>.
- [11] Donna M Mertens and John Adams McLaughlin. *Research and evaluation methods in special education*. Corwin Press, 2004.
- [12] R.H. Sampieri, C.F. Collado, and P.B. Lucio. *Metodología de la investigación*. MacGraw-Hill/Interamericana, 2006. ISBN 9789701057537. URL http://books.google.co.ve/books?id=4_-kPwAACAAJ.
- [13] J. Palacios. Trabajo especial de grado «diseño y construcción de sensores automatizados para la medición de gases de efecto invernadero en la baja troposfera» para obtener el título de lic. en física. Universidad de Carabobo, Facultad de Ciencias y Tecnología, 2011.
- [14] Campo C. Fany M. Trabajo especial de grado «efectos de la troposfera en los radio enlaces: difusión por lluvia» para obtener el título de ingeniero electricista. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, 1985.
- [15] Rodolfo A. Montoya Eladio H. Leyzeaga. Trabajo especial de grado «transmisión de televisión en sistemas de radio por dispersión troposférica» para obtener el título de ingeniero electricista. Universidad de Carabobo, Facultad de Ingeniería, 1975.
- [16] *Xbee Pro 868 Range Validation*. Digi International, Estados Unidos, 2008. URL http://www.digi.com/pdf/wp_xbeepro868range.pdf.
- [17] *Distribución de las bandas de frecuencias en Venezuela. (Cuadro Nacional de Bandas de Frecuencias)*. Comisión Nacional de Telecomunicaciones (CONATEL), 2012. URL [http://www.conatel.gob.ve/files/Cunabaf%202012%20\(web%20Conatel\).pdf](http://www.conatel.gob.ve/files/Cunabaf%202012%20(web%20Conatel).pdf).
- [18] JW Waters. Absorption and emission by atmospheric gases. In *Astrophysics. Part B: Radio Telescopes*, volume 1, pages 142–176, 1976.

- [19] Ralph J Donaldson Jr. The measurement of cloud liquid-water content by radar. *Journal of Meteorology*, 12(3):238–244, 1955.
- [20] Kenrich Lewis Stuart Gunn and Thomas William Russell East. The microwave properties of precipitation particles. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 80(346):522–545, 1954.
- [21] JW Ryde and D Ryde. Attenuation of centimetre and millimetre waves by rain, hail, fogs and clouds. *General Electric Co. Rep*, 8670, 1945.
- [22] J Otis Laws and Donald A Parsons. The relation of raindrop-size to intensity. *Transactions, American Geophysical Union*, 24:452–460, 1943.
- [23] Standard atmosphere, iso 2533, 1975.
- [24] Us standard atmosphere, 1976. URL <http://scipp.ucsc.edu/outreach/balloon/atmos/1976%20Standard%20Atmosphere.htm>.
- [25] A.S. Tanenbaum. *Redes de computadoras*. Editorial Alhambra S. A. (SP), 2003. ISBN 9789702601623. URL <http://books.google.co.ve/books?id=WWD-4oF9hjEC>.
- [26] The digimesh networking protocol. Technical report, Digi International, 2012. URL <http://www.digi.com/technology/digimesh/>.
- [27] Rafael Albornoz. Introducción a las antenas. Universidad de Carabobo, 1998.
- [28] Rafael Albornoz. Trabajo práctico del laboratorio de antenas. Universidad de Carabobo, 1982.
- [29] Recommendation itu-r p.526, .
- [30] Jose Angel Docobo Durantez. Estrellas dobles. *Biblioteca de Divulgación Científica. Serie Astronomía, Madrid: Equipo Sirius*, 1, 1992. URL <http://www.usc.es/astro/dobles/>.
- [31] Pineda M. Rodríguez Noriega Y., Ochoa de Rigual N. *La Experiencia de Investigar*. Dirección de Medios y Publicaciones de la Universidad de Carabobo, Venezuela, 3rd edition, 2010.

- [32] F.G. Arias. *El Proyecto de Investigación. Introducción a la Metodología Científica*. Fidas G. Arias Odón, 5ta edition, 1999. ISBN 9789800785294. URL http://books.google.co.ve/books?id=y_743ktfK2sC.
- [33] GL Dankhe. Investigación y comunicación. Fernández Collado, C. y GL Dankhe (comps.), *La comunicación humana: ciencia social*. México: McGraw-Hill, 1989.
- [34] Carlos A Sabino. *El proceso de investigación*. Caracas: Panapo, 1992.
- [35] Simon Saunders and Alejandro Aragón-Zavala. *Antennas and propagation for wireless communication systems*. John Wiley & Sons, 2007.
- [36] Federal Communications Comission. URL <http://www.fcc.gov>.
- [37] Martin Sauter. *From GSM to LTE: an introduction to mobile networks and mobile broadband*. John Wiley & Sons, 2010.

Anexo A

Método para calcular la atenuación debida a gases atmosféricos por la UTI

Anexo B

Método para calcular las estadísticas de atenuación debida a la lluvia

Anexo C

Método para determinar el ruido en estaciones terrenas

Anexo D

Hoja de datos conector SMA hembra

Anexo E

**Hoja de datos conector SMA
macho**

Anexo F

**Hoja de datos antena Log periódica
LPY41**

Anexo G

**Hoja de datos módulo Xbee Pro
900**

Anexo H

**Tarjeta de circuito impreso del
sistema de comunicaciones**

Anexo I

Código de programación para el procesamiento y envío de los datos

Anexo J

Código de la interfaz gráfica para la recepción y almacenamiento de los datos

Anexo K

**Hoja de datos plataforma Xbee
Explorer USB**

