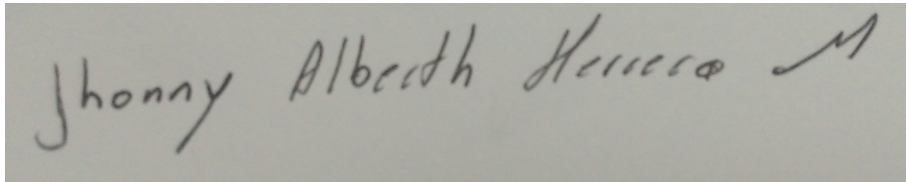


DECLARACIÓN ORIGINALIDAD

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad”. Art. 82 Régimen Discente de Formación Avanzada, Universidad Pontificia Bolivariana.

Att:



Jhonny Albeith Herrera M

**DISEÑO DE UN PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN
INALÁMBRICO PARA LA TRANSMISIÓN DE
INFORMACIÓN DE TELEMETRÍA
HIDROMETEOROLÓGICA UTILIZANDO RADIOS
RECONFIGURABLES USRP N210**

Jhonny Alberth Herrera Machado



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
POSTGRADOS ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN
MEDELLÍN
2016

**DISEÑO DE UN PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN
INALÁMBRICO PARA LA TRANSMISIÓN DE
INFORMACIÓN DE TELEMETRÍA
HIDROMETEOROLÓGICA UTILIZANDO RADIOS
RECONFIGURABLES USRP N210**

Jhonny Alberth Herrera Machado

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Tecnologías de la Información y la
Comunicación

Director

Leonardo Betancur A, PhD



UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
POSTGRADOS ESCUELA DE INGENIERÍAS
MAESTRÍA EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LA COMUNICACIÓN
MEDELLÍN
2016

NOTA DE ACEPTACIÓN

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Fecha: _____

“ Dedico inicialmente a Dios por brindarme la fuerza, salud y fe necesaria para lograr los objetivos planteados sin desfallecer en los problemas presentados. A mis padres Herlindo Herrera y Martha Nelly Machado por apoyarme, acompañarme durante todo este tiempo de trabajo e inculcarme grandes valores los cuales me permitieron crecer como persona tanto intelectual como moralmente. A mi esposa Girlesa Saldarriaga e hija Valeria Herrera por el apoyo, paciencia y amor brindado, los cuales fueron muy importantes para encarar y superar con dignidad los retos que se presentaron. A mis hermanos Milton Y Lady Herrera Machado por estar presentes apoyándome en esta dura labor. . . . ”

Agradecimientos

Inicialmente agradecer a la Universidad Pontificia Bolivariana sede Medellín por darme la oportunidad de estudiar y ser parte de ellos contribuyendo a mi formación educativa.

Agradezco a los distintos profesores durante el transcurso de esta maestría ya que aportaron su granito de arena para la culminación de esta.

Al profesor Leonardo Betancur asesor de trabajo de grado, por tan gran aporte educativo y su gran disposición a ayudarme a resolver los problemas, gracias a su ayuda fue posible la realización de este trabajo.

Por último a mi Jefe de trabajo Carlos Hoyos por permitirme asistir a las asesorías, brindar la motivación para salir adelante y permitir realizar este trabajo buscando una alternativa a la transmisión de información del SIATA.

Índice general

Índice General	VII
Índice de Figuras	X
Índice de Tablas	XII
Resumen	XIII
Planteamiento del Problema	XIV
Objetivos	XVI
1. Requerimientos del Sistema	2
1.1. Ubicación y Cobertura	2
1.2. Tasas de Velocidad	5
1.3. Legislación y Bandas de Operación	5
1.4. Arquitectura de Red	8
1.4.1. Red de SIATA	9
1.4.2. Monitoreo	9
1.4.3. Comunicación de las estaciones	10
1.4.4. Resumen de los Requerimientos Iniciales	12
2. Dimensionamiento de Red y Diseño del Protocolo	13
2.1. Dimensionamiento de Gran Escala	13
2.1.1. Modelos de Propagación	13

2.1.2.	Selección del modelo a utilizar	20
2.1.3.	Presupuesto de Enlace	21
2.2.	Diseño de Pequeña Escala	28
2.2.1.	Parámetros de Canal	29
2.2.2.	Calculo de los parámetros de pequeña escala	32
2.3.	Diseño del Protocolo	35
2.3.1.	Capa Física	36
2.3.2.	Capa de Enlace	37
3.	Implementación	53
3.1.	Desarrollo del Transmisor	54
3.2.	Desarrollo del Receptor	62
3.3.	Decodificador de Canal	64
3.4.	Decodificador de Fuente	64
3.5.	Sincronización	65
3.6.	Implementación en Hardware	66
3.7.	Pruebas de Campo	69
3.7.1.	Parametros de configuración	69
3.7.2.	Resultados obtenidos en la prueba de campo	70
4.	Análisis de Resultados y Prototipado	73
4.1.	Desempeño del Transmisor	75
4.2.	Desempeño del Receptor	76
4.2.1.	Prototipo	79
5.	Conclusiones	85
	Bibliografía	89

Índice de Figuras

1.1. Distancia entre la estación central y de monitoreo	3
1.2. Cobertura de los operadores celulares Tigo y Claro en el AMVA	4
1.3. Petición de Datos Centro de Control a Monitoreo	10
1.4. Cambio de Parámetros de Centro de control a Monitoreo	11
1.5. Respuesta a petición de datos o cambio de parámetros de estación de monitoreo a central	11
2.1. Valores de A_{MU} y G_{Area}	15
2.2. Presupuesto de enlace	23
2.3. Paleta de Colores para análisis de potencia	24
2.4. Cobertura para altura de antena igual a 3m	25
2.5. Cobertura para altura de antena igual a 6m	25
2.6. Cobertura para altura de antena igual a 9m	26
2.7. Cobertura para altura de antena igual a 12m	26
2.8. Cobertura para altura de antena igual a 40m desde centro de control . . .	27
2.9. Ancho de Banda Coherente [1]	30
2.10. Tiempo de Coherencia [1]	30
2.11. Tipos de Desvanecimiento [2]	32
2.12. Trayectorias de las ondas	33
2.13. Difracción de las ondas	33
2.14. Protocolo Simple de enlace de datos	42
2.15. Protocolo Simple de enlace de datos con reenvío de trama sin llegar Ack en un tiempo	43

2.16. Protocolo Simple de enlace de datos con Ack Numerados	43
2.17. Funcionamiento del Nodo Central	50
2.18. Funcionamiento del Nodo de Monitoreo	51
2.19. Funcionamiento de los campos enviar o responder a Petición	51
2.20. Funcionamiento de los campos Llegó o respuesta a petición	51
2.21. Verificación de Trama	52
3.1. Proceso de comunicación digital	54
3.2. Trama	55
3.3. Conversión de la Trama en Bits	56
3.4. Código de redundancia Cíclica	57
3.5. Constelación QPSK	59
3.6. Código para Modulación QPSK	59
3.7. Salidas del Modulador QPSK	60
3.8. Programa para el manejo de Colas	61
3.9. Programa para configurar el transmisor USRP N210	62
3.10. Programa completo para la transmisión	62
3.11. Programa para configurar el Receptor USRP N210	63
3.12. Programa para la demodulación	64
3.13. Decodificación de canal y de fuente	65
3.14. Programa completo para la Recepción	65
3.15. Implementación en Hardware	66
3.16. Prueba de laboratorio	68
3.17. Ubicación de transmisor y receptor en prueba de campo	70
3.18. Pureba exitosa de Recepción	71
3.19. Prueba No Exitosa	71
4.1. Magnitud del Vector de Error	74
4.2. Señal Transmitida por el Radio USRP	75
4.3. Alcance teórico del transmisor	76

ÍNDICE DE FIGURAS

x

4.4. Recepción	77
4.5. Constelación en el Receptor	78
4.6. BER para QPSK	79
4.7. Esquema del Prototipo de Prueba	81
4.8. Esquema del Prototipo de Prueba	82

Índice de Tablas

1.1. Bandas para la ayuda a la Meteorología	7
1.2. Requerimientos Iniciales del Nodo Hidrometeorológico	12
2.1. Exponente de path loss, n	20
2.2. Comparativa entre los modelos de gran escala	21
2.3. Valores iniciales de Parámetros de Pequeña Escala	34
2.4. Parámetros de Pequeña Escala	34
2.5. Tiempos de trama para QPSK	35
2.6. Caracteres de control	38
2.7. Trama básica protocolos asíncronos	38
2.8. Protocolo Síncrono BISYNC	38
2.9. Protocolo Síncrono orientado a bit SDLC	39
2.10. Trama Protocolo Ethernet	39
2.11. Trama Protocolo PPP	40
2.12. Comparación entre las tramas	47
2.13. Diseño de la Trama	48
2.14. Conclusiones para el protocolo	49
3.1. Características del radio USRP N210	67
4.1. EVM	78
4.2. Costo por Estación del Prototipo de Prueba	80
4.3. Costo por Estación del Prototipo Recomendado	82

4.4. Equipos y parámetros del prototipo recomendado	83
4.5. Comparación entre la tecnología usada (Modems GPRS) y la estudiada en este trabajo basada en radio frecuencia	84

Resumen

La transmisión de información hidrometeorológica por parte del SIATA (Sistema de Alerta temprana Ambiental) se realiza utilizando módems GPRS con un plan de datos para cada estación; esta transmisión queda sujeta a el área de cobertura del operador celular a utilizar, limitando el monitoreo solo a las zonas de servicio disponible, dejando por fuera lugares de vital importancia para el sistema.

En este trabajo se propondrá un protocolo de comunicaciones acompañado de una tecnología de radio frecuencia implementados en un SDR para sustituir o complementar la tecnología GPRS, dando mayor cobertura a lugares críticos de monitoreo de las variables hidrometeorológicas para la toma de decisiones por parte de las entidades de socorro. Para esto se hará un estudio del canal de transmisión para determinar los diferentes parámetros requeridos y con estos desarrollar un protocolo de comunicaciones que se ajuste a las necesidades del SIATA y así llevar a cabo la implementación de un prototipo de monitoreo.

Planteamiento del Problema

La transmisión de información hidrometeorológica desde la estación de monitoreo hasta el centro de control, es de vital importancia para el Sistema de Alerta Temprana (SIATA), esta información se procesa y dependiendo de los valores en los que se encuentren se emitirán alertas a las entidades de atención a emergencias para que estas actúen oportunamente ante la presencia de un evento ambiental que pueda causar pérdidas materiales o de vidas humanas.

Los datos obtenidos provienen de sensores que monitorean variables como: humedad, temperatura, velocidad y dirección del viento, pluviosidad, niveles de ríos, presión atmosférica y humedad del suelo; luego esta información es procesada en tarjetas electrónicas y enviadas al centro de control mediante la utilización de módems y un plan de datos (obtenido de un operador celular y con un costo mensual) bajo el protocolo General Packet Radio Service (GPRS).

La información recolectada por la red de sensores, debe tener dos cualidades, confiabilidad y continuidad, por consiguiente, la pérdida de información o el no envío de esta oportunamente pueden ocasionar fallas en las alertas y acciones preventivas de las entidades de gestión del riesgo del valle de Aburrá.

Las estaciones hidrometeorológicas se ubican en lugares estratégicos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) lo que hace necesario que la tecnología empleada tenga cobertura en las zonas urbanas y rurales, cobertura que en ocasiones no está presente, trayendo inconvenientes para el sistema al restringir la instalación de las estaciones solo a lugares específicos, dejando por fuera lugares importantes para el monitoreo. La falta de cobertura también ocasionará discontinuidad en el envío de información.

La alternativa que se propone en este trabajo para la solución de estos problemas, es la implementación de un protocolo de comunicaciones en un nodo sensor que consta de una estación de monitoreo y una estación central cada una con su respectivo módulo de comunicación por radio frecuencia. Para tal fin, se debe realizar un estudio y determinar los diferentes parámetros de diseño para el protocolo y la transmisión inalámbrica, como ancho de banda necesario, frecuencia a utilizar, el esquema de modulación, las licencias o

permisos necesarios para usar, el presupuesto de enlace y las características de propagación del canal.

A continuación se hablará de las causas por las cuales surgen las necesidades de estudiar otro tipo de tecnología para la transmisión de información hidrometeorológica.

Causas

- Las estaciones hidrometeorológicas se encuentran ubicadas en zonas urbanas y rurales del Área Metropolitana, lo que hace necesario que haya una cobertura completa de todo el territorio por parte de los operadores celulares, sin embargo existen zonas donde dicha cobertura es muy poca o nula, limitando al sistema a instalar estaciones en zonas de cobertura, dejando por fuera lugares que pueden representar un monitoreo fundamental. Adicionalmente a esto se le suman los costos que requieren los planes de datos necesarios para cada estación y la falta de asesoría de los operadores para la configuración de los diferentes equipos utilizados en la transmisión GPRS.
- Pérdidas de transmisión de la información debido a la distancia de separación entre las estaciones y la ubicación de la red del operador celular, lo que ocasiona desconexiones de las estaciones de monitoreo dando pie al no envío de la información.

Efectos:

- La ubicación de las estaciones queda restringida a las zonas de cobertura celular, quedando por fuera zonas importantes para el monitoreo.
- La baja o nula cobertura ocasionara el no envío de información y el monitoreo y la emisión de alertas se verá afectado, ocasionando la no alerta temprana de una emergencia ambiental que pueda estar ocurriendo o a punto de suceder.
- Costos a cubrir debido al pago mensual de planes de datos de cada una de las estaciones, costo que irá incrementando su valor a medida que se instalen nuevas estaciones.
- La mala transmisión de información ocasionara errores en los datos dando pie a emitir falsos reportes

Nota

La parte más crítica en todo el proceso de comunicación del nodo sensor es la de transmisión de información por tal razón este punto será el foco de este trabajo, la parte de adquisición de los datos del sensor y su procesamiento no se profundizará debido a que este ya se encuentra diseñado por parte del SIATA.

Objetivos

Objetivo General

Diseñar un protocolo de comunicación inalámbrica para el transporte de información de telemetría de estaciones hidrometeorológicas del SIATA empleando radios reconfigurables USRP N210.

Objetivos Específicos

- Caracterizar los requerimientos y parámetros necesarios para la transmisión y recepción de información hidrometeorológica desde la estación de monitoreo ubicada en la vereda quebrada larga en san Antonio de prado hasta la estación central ubicada en la torre SIATA.
- Diseñar los esquemas de capa física y enlace para la transmisión y recepción de información hidrometeorológica del nodo conformado por la estación de monitoreo en san Antonio de prado y la estación central en la torre SIATA.
- Desarrollar un prototipo para la transmisión y recepción de información hidrometeorológica empleando radios reconfigurables USRP N210, en el escenario definido.
- Analizar el desempeño del prototipo desarrollado para la transmisión y recepción de información hidrometeorológica para realizar los procesos de validación.

Capítulo 1

Requerimientos del Sistema

1.1. Ubicación y Cobertura

La ubicación de las estaciones hidrometeorológicas de SIATA está basada en el estudio realizado por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), CORNARE, CORANTIOQUIA, y Universidad Nacional de Colombia en el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Río Aburrá (POMCA), cuencas en las cuales se estableció un nivel de riesgo por inundaciones y sobre 10 de estas cuencas empieza el diseño de una red comunitaria de observación hidrometeorológica y el diagnóstico geomorfológico y ambiental de las cuencas. [3]

Con el fin de monitorear dichas cuencas se instalaron en el año 2001, 24 pluviómetros ubicados en escuelas por parte del Sistema Municipal de Prevención y Atención de Desastres SIMPAD hoy Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGR). Con la información recolectada por dichas estaciones se realizaron estudios para los procesos naturales y así determinar la distribución de lluvias que permitirá prever eventos torrenciales, y a su vez conocer los umbrales correspondientes al desencadenamiento de movimientos de masa múltiples. [4]

En el 2009 con la modernización de la red por parte del SIATA se determina continuar con los sitios donde ya se tenían instalados los pluviómetros y adicionar monitoreo a las cuencas sobre las cuales no se tenían. Las estaciones son ubicadas en instituciones públicas en su gran mayoría escuelas y colegios aledaños a las cuencas con el fin de contar con seguridad para las estaciones.

Este trabajo se basa en un solo nodo hidrometeorológico el cual consta de una estación de monitoreo la cual está ubicada en la escuela quebrada larga del corregimiento de san Antonio de prado con coordenadas N 6,20558 W -75,68567,

esta estación hace parte de la instrumentación de la quebrada doña María la cual se encuentra calificada con nivel de riesgo alto según el POMCA. La otra estación que complementa el nodo es la central ubicada en la torre SIATA en el sector estadio del municipio de Medellín con coordenadas N 6,259215 W -75,58864.

Con la ayuda de las coordenadas geográficas planas se calcula la distancia en línea recta entre ambas estaciones la cual es de 12,28 Kms, como se aprecia en la figura 1.1.

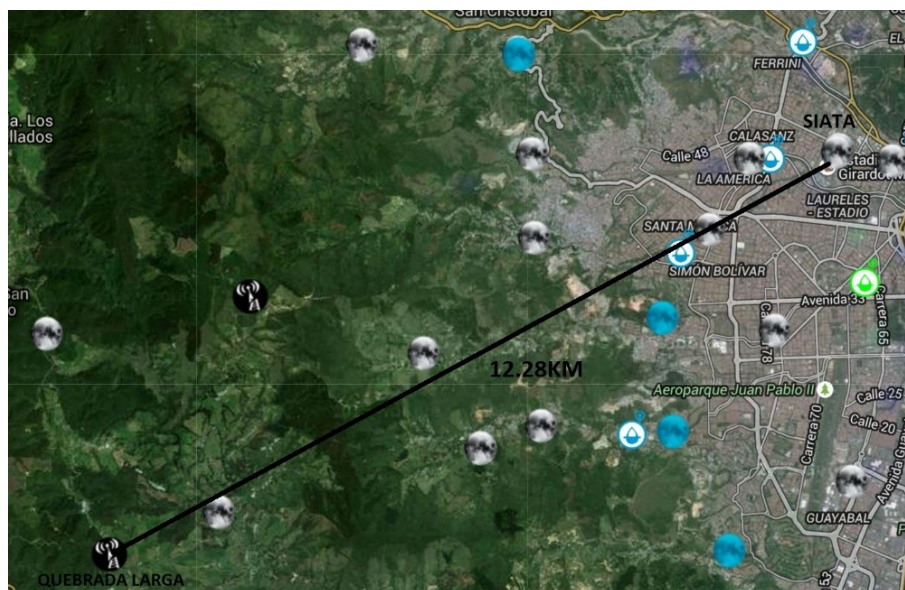
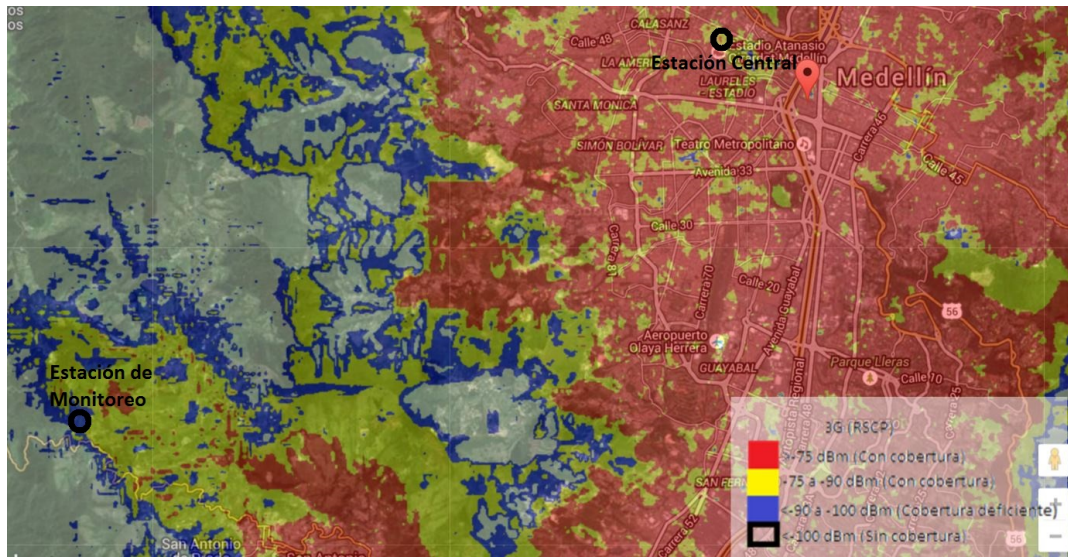


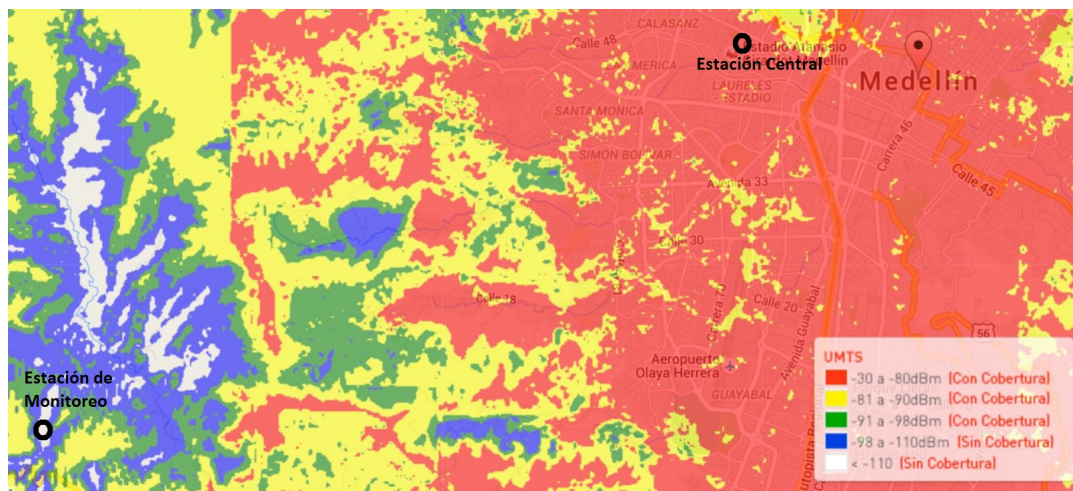
Figura 1.1: Distancia entre la estación central y de monitoreo

Las estaciones hidrometeorológicas se ubican en lugares estratégicos del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) lo que hace necesario que la tecnología empleada tenga cobertura en las zonas urbanas y rurales.

A continuación se mostrará los mapas de cobertura de los operadores usados para la transmisión bajo el protocolo GPRS los cuales son Tigo y Claro. Los mapas de cobertura se realizaron tomando como base la tecnología 3g que es la que remplaza a 2.5g en donde se ubica GPRS, esto se pueden observar en las siguientes figura 1.2



(a) Cobertura Tigo. Tomado de <http://www.tigo.com.co/mundo-tigo/mapa-cobertura>



(b) Cobertura Claro. Tomado de <http://www.claro.com.co/portal/co/pc/personas/ayuda/mapa-cobertura-movil/>

Figura 1.2: Cobertura de los operadores celulares Tigo y Claro en el AMVA

De la figura 1.2 se puede observar que ambos operadores tienen buena cobertura en las zonas urbanas, mientras que en las zonas rurales es deficiente. Esta mala cobertura trae inconvenientes para el sistema al restringir la instalación de las estaciones solo a lugares específicos, dejando por fuera lugares importantes para el monitoreo. En lugares donde la cobertura es regular ocasionará discontinuidad en el envío de información, dando pie a no alertar tempranamente de algún evento hidrometeorológico que pueda estar ocurriendo.

1.2. Tasas de Velocidad

En el año 2007 con el inicio de la red pluviométrica del SIATA la información era recolectada de forma manual con frecuencia de una vez por mes con la ayuda de una palm, para luego ser descargada en las bases de datos. En el año 2009 se cambia de tecnología adicionándoles a las estaciones módems GPRS para el envío y recepción de información al centro de control con una frecuencia de envío de 5 minutos con la ayuda de un plan de datos contratado con un operador celular.

En el año 2013 se mejora el tiempo de envío de información a 1 minuto con un nuevo cambio de tecnología, tiempo necesario para que el sistema interactúe con el ambiente, recolecte la información la procese y envíe al centro de control dando un conocimiento de lo que está pasando en la zona de monitoreo en dicho instante de tiempo.

Para este trabajo se utilizará una tasa de 1 minuto para la transmisión y recepción de la información.

1.3. Legislación y Bandas de Operación

Para hacer uso de la transmisión vía radio frecuencia se es necesario hacer uso del espectro radioeléctrico el cual es regulado en Colombia por la Agencia Nacional del Espectro (ANE).

La Agencia Nacional del Espectro publica el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencia CNABF, en el cual se establece que porciones del espectro radioeléctrico serán utilizadas para un determinado servicio.

Cada país cuenta con un Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias el cual debe encontrarse armonizado con las recomendaciones internacionales realizadas por organismos como la Unión Internacional de Telecomunicaciones para garantizar la interoperabilidad de servicios en las fronteras y al interior del mismo país. [5]

De la terminología presentada en el CNABF, para este trabajo se hará uso de las siguientes:

Telecomunicación

Toda transmisión, emisión o recepción de signos, señales, escritos, imágenes, sonidos o informaciones de cualquier naturaleza por hilo, radioelectricidad, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos (CS).

Servicio fijo

Servicio de radiocomunicación entre puntos fijos determinados.

Ondas radioeléctricas u ondas hertzianas

Ondas electromagnéticas, cuya frecuencia se fija convencionalmente por debajo de 3 000 GHz, que se propagan por el espacio sin guía artificial.

Servicio de ayudas a la meteorología

Servicio de radiocomunicación destinado a las observaciones y sondeos utilizados en meteorología, con inclusión de la hidrología.

Radiación (radioeléctrica)

Flujo saliente de energía de una fuente cualquiera en forma de ondas radioeléctricas, o esta misma energía.

Emisión, Radiación producida

O producción de radiación, por una estación transmisora radioeléctrica.

Ancho de banda necesaria

Para una clase de emisión dada, anchura de la banda de frecuencias estrictamente suficiente para asegurar la transmisión de la información a la velocidad y con la calidad requerida en condiciones especificadas.

Potencia de la portadora (de un transmisor radioeléctrico)

La media de la potencia suministrada a la línea de alimentación de la antena por un transmisor durante un ciclo de radiofrecuencia en ausencia de modulación.

Ganancia de una antena

Relación generalmente expresada en decibelios, que debe existir entre la potencia necesaria a la entrada de una antena de referencia sin pérdidas y la potencia suministrada a la entrada de la antena en cuestión, para que ambas antenas produzcan, en una dirección dada, la misma intensidad de campo, o la misma densidad de flujo de potencia, a la misma distancia.

Potencia Isótropa Radiada Equivalente (PIRE)

Producto de la potencia suministrada a la antena por su ganancia con relación a una antena isótropa en una dirección dada (ganancia isótropa o absoluta).

Interferencia

Efecto de una energía no deseada debida a una o varias emisiones, radiaciones, inducciones o sus combinaciones sobre la recepción en un sistema de radio, que se manifiesta como degradación de la calidad, falseamiento o pérdida de la información que se podría obtener en ausencia de esta energía no deseada. [6]

De acuerdo a las mediciones realizadas por SIATA, que son a variables hidrometeorológicas, en el CNABF se buscaron bandas de frecuencia con el nombre de ayudas a la meteorología. Estas bandas las podemos ver en la tabla 1.1:

Tabla 1.1: Bandas para la ayuda a la Meteorología

Bandas Ayudas a la Meteorología
8.3 Khz - 9 Khz
9 Khz - 11.3 Khz
27.5 Mhz - 28 Mhz
400.15 Mhz - 401 Mhz
401 Mhz - 402 Mhz
402 Mhz - 403 Mhz
403 Mhz - 406 Mhz
1668.4 Mhz - 1670 Mhz
1670 Mhz - 1675 Mhz
1675 Mhz - 1690 Mhz
1690 Mhz - 1700 Mhz
35.2 Ghz - 35.5 Ghz
35.5 Ghz - 36 Ghz

Para hacer uso de estas bandas de frecuencia se es necesario adquirir el permiso ante el ministerio de Tecnologías de la Información y las comunicaciones de Colombia (MinTIC).

Como el objetivo de SIATA es alertar de manera oportuna de la ocurrencia de un evento hidrometeorológico que pueda generar una situación de emergencia, para MinTIC bajo este objetivo de SIATA se es necesario hacer el trámite como permiso para el uso del Espectro Radioeléctrico para la atención y prevención de situaciones de emergencia.

Este permiso es el mecanismo a través del cual el Ministerio de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones otorga o modifica permisos para el uso del espectro radioeléctrico para la defensa nacional, atención y prevención de situaciones de emergencia y seguridad pública en las bandas y rangos de frecuencias según la disponibilidad y planeación del espectro. [7]

Para esta solicitud se deben seguir los siguientes pasos:

- Reunir los documentos y cumplir con las condiciones establecidas para el trámite
- Presentar la solicitud y los documentos requeridos
- Notificarse del resultado del trámite en el punto de atención presencial

La normatividad asociada a todo el proceso son las siguientes:

- Decreto 1212 de 2004. Artículo 12
- Resolución 2877 de 2011. Artículo 2
- Decreto 4392 de 2010. Artículos 9, 10, 11
- Ley 1341 de 2009. Toda

El rango de frecuencias soportadas por el radio USRP N210 se encuentra entre 50 Mhz y 2200 Mhz, en este rango se cuenta con una gran variedad de bandas de frecuencia que se pueden utilizar, de acuerdo a la tabla 1.1. Para este trabajo se usará las bandas disponibles alrededor de los 400 Mhz en condiciones de laboratorio debido al no licenciamiento de esta.

1.4. Arquitectura de Red

Este trabajo está basado en el diseño de un protocolo de comunicaciones inalámbrico para la transmisión de información hidrometeorológica y será un

protocolo que se adapte a las necesidades de comunicación de las estaciones de SIATA, por esta razón y por qué se usaran estaciones de SIATA para llevar a cabo las pruebas de comunicación, se es necesario hablar de cómo está conformada la red de SIATA y como es su funcionamiento.

1.4.1. Red de SIATA

El SIATA (Sistema de Alerta Temprana Ambiental de Medellín y Valle de Aburrá) es un proyecto del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), la alcaldía de Medellín, en cabeza del Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo DAGRD, EPM e ISAGEN. Constituye una de las principales estrategias de gestión de riesgo con las que cuenta el DAGRD y los CLOPAD de los diferentes municipios de la región.

El objetivo principal del proyecto es alertar de manera oportuna a la comunidad sobre la probabilidad de ocurrencia de un evento hidrometeorológico extremo que pueda generar una situación de emergencia y así reducir los impactos de los fenómenos mediante la implementación de medidas de respuesta ante una amenaza inminente. Adicionalmente, el SIATA tiene como objetivos el monitoreo de cuencas y microcuencas hidrográficas, la modelación hidrológica y meteorológica regional, generando información vital para la gestión ambiental y de riesgo. [8]

1.4.2. Monitoreo

A partir del monitoreo constante y confiable de las variables atmosféricas, las cuencas y las laderas de la región a través de la red pluviométrica, meteorológica, red de sensores de nivel, red de humedad del suelo, red acelerográfica, y el radar hidrometeorológico, se emiten alertas certeras a la comunidad. Las estaciones que componen las redes están distribuidas a lo largo y ancho del valle de Aburrá y operan bajo un estricto proceso de calibración, y mantenimiento correctivo y preventivo que garantiza su funcionamiento constante.

Con el conocimiento del comportamiento de las lluvias, la temperatura, la humedad relativa del ambiente, la dirección y velocidad del viento, el nivel de las quebradas y el nivel de saturación del suelo, se pueden generar alertas mucho más confiables para la comunidad. El principio de comunicación que opera para las estaciones es el mismo para todas las redes. Una comunicación basada en el protocolo GPRS permite el envío de información desde las estaciones hasta nuestro servidor. Las estaciones envían cada minuto la información concerniente a las variables que se monitorean. [8]

- Red Meteorológica: la red está conformada por 84 estaciones pluviométricas y 16 meteorológicas.
- Red de Sensores de Nivel: compuesta por 36 estaciones de nivel tipo radar ubicadas sobre las principales quebradas de la ciudad.
- Red de Humedad del Suelo: está conformada por 5 sensores de humedad que se ubican en las laderas de la ciudad, éstas indicaran el nivel de saturación de los suelos y determinaran, bajo estudios y modelos hidrológicos en los cuales se está trabajando, el nivel de riesgo de las diferentes laderas.

1.4.3. Comunicación de las estaciones

Las estaciones de SIATA se comunican usando un modem GPRS y un plan de datos en cada una. La estación central es la encargada de la comunicación con la estación de monitoreo, esta hará las peticiones de información o cambio de parámetros a la estación de monitoreo, la cual responde enviando la información solicitada a la estación central. Como solo se tiene una estación central para muchas estaciones de monitoreo, en esta para remplazar el protocolo de acceso al medio se realizan procesos en paralelo donde cada uno de estos simula una estación central para cada una de las estaciones de monitoreo, existen tantos procesos en paralelo como estaciones de monitoreo hayan.

En la siguiente figura 1.3 se muestra el diagrama de flujo que representa el proceso de petición de datos de la estación central a la de monitoreo.



Figura 1.3: Petición de Datos Centro de Control a Monitoreo

Las peticiones de información por parte de la estación central se realiza aproximadamente cada 15 segundos dando alrededor de 4 peticiones en el mismo minuto, si llega una trama duplicada en el mismo tiempo esta es descartada debido a que ya se encuentra en base de datos.

En la figura 1.4 se muestra el diagrama de flujo que representa el proceso de petición para el cambio de parámetros de la estación central a la de monitoreo.

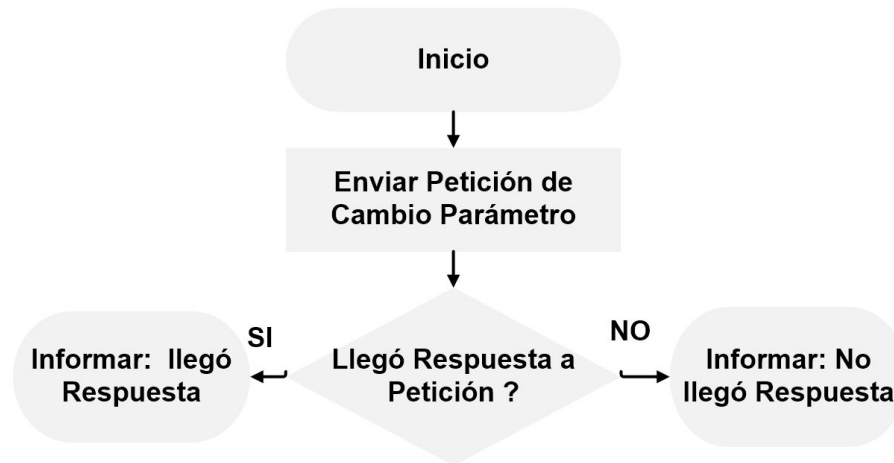


Figura 1.4: Cambio de Parámetros de Centro de control a Monitoreo

Los cambios de parámetros no tienen un tiempo determinado para su petición, esta es más dependiente de los operadores encargados del funcionamiento de cada una de las estaciones de monitoreo.

En la figura 1.5 se muestra el diagrama de flujo que representa el proceso de respuesta de petición de datos o cambio de parámetros de la estación de monitoreo a la central.

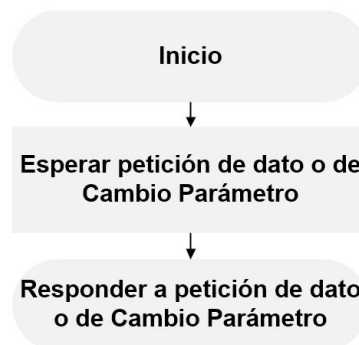


Figura 1.5: Respuesta a petición de datos o cambio de parámetros de estación de monitoreo a central

La estación de monitoreo está a la espera de una petición ya sea para los datos o para cambiar algún parámetro de la estación, cuando la petición llega, la estación responde inmediatamente con los datos o afirmando que el parámetro cambio correcta o incorrectamente.

1.4.4. Resumen de los Requerimientos Iniciales

En la tabla 1.2 se muestra un pequeño resumen de los requerimientos iniciales para el nodo hidrometeorológico a estudiar.

Tabla 1.2: Requerimientos Iniciales del Nodo Hidrometeorológico

Item	Requerimiento
Distancia entre las estaciones	12.28 Km
Cobertura	Buena o superior
Tasa de envío de información	1 minuto
Tecnología a emplear	Transmisión por radio frecuencia
*Frecuencia de Operación	Bandas Destinadas para la meteorología alrededor de 400 Mhz

Actualmente SIATA trabaja con módems bajo el protocolo GPRS, estos modem usan la frecuencia destinada para cada operador por MINTIC, las cuales son para claro de 850 Mhz y para tigo 1900 Mhz ambas para operar en GPRS.

Estos dos operadores poseen cobertura deficiente en el nodo de monitoreo quebrada larga, lo que hace que esta estación sea demasiado intermitente en la transmisión de la información y por ende saliéndose del rango de envío de 1 minuto.

*Nota: Para hacer uso de la banda de ayudas a la meteorología se es necesario contar con licencias otorgadas por MINTIC, por este motivo solo se trabajará con estas frecuencias en contextos de laboratorio.

Capítulo 2

Dimensionamiento de Red y Diseño del Protocolo

Antes de estudiar el diseño del protocolo, se hablará del canal sobre el cual se hará la transmisión, para determinar los parámetros de pequeña y gran escala, los cuales serán de utilidad para tomar decisiones en cuanto al diseño.

2.1. Dimensionamiento de Gran Escala

La ruta que sigue una señal desde el transmisor al receptor puede variar desde una simple línea de vista entre los dispositivos hasta un ambiente con una gran cantidad de obstáculos como edificios, montañas y árboles. Predecir o modelar estos canales de radiocomunicaciones es uno de los aspectos más complicados en el diseño de redes de comunicaciones. Estos modelos buscan predecir el comportamiento de la potencia de una señal para cualquier distancia entre el transmisor y receptor. Para distancias grandes estos modelos son llamados de gran escala y son de gran utilidad para calcular áreas de cobertura para sistemas de radio. [9]

2.1.1. Modelos de Propagación

Modelo de propagación en el espacio libre

Cuando entre el transmisor y receptor se tiene línea de vista se utiliza este modelo para predecir la potencia de la señal. Las pérdidas por trayectoria que representan la atenuación de la señal en dB se expresa a continuación y reciben

el nombre de ecuación de Friis:

$$Pl(dB) = 10\log(P_t/P_r) = -10\log(G_t G_r \lambda / (4\pi)^2 (d)^2) \quad (2.1)$$

Esta ecuación también se puede expresar de la siguiente manera:

$$Pl(dB) = 20\log(d) + 20\log(f) - 10\log(G_t) - 10\log(G_r - 147,55)dB \quad (2.2)$$

Donde:

P_t Potencia transmitida

P_r Potencia recibida

G_t Ganancia Antena de transmisión

G_r Ganancia Antena de recepción

d Distancia Separación entre transmisor y receptor

L Factor de pérdida del sistema no relacionada con la propagación, son pérdidas relacionadas con la línea de transmisión, si es igual a 1 significa que no hay pérdidas en el sistema por este factor.

λ Longitud de Onda de la portadora [10]

Modelo de propagación dos Rayos

Este modelo se basa en óptica geométrica y considera tanto la transmisión directa como la propagación reflejada en la tierra entre el transmisor y receptor.

Las pérdidas se representan de la siguiente manera:

$$Pl(dB) = 40\log(d) - (10\log(G_t) + 10\log(G_r) + 20\log(h_t) + 20\log(h_r)) \quad (2.3)$$

Donde h_r y h_t Altura de la antena receptora y transmisora respectivamente. [10]

Modelo de Okumura

El modelo de Okumura es el más utilizado para predicciones en ambientes urbanos, es aplicable para las bandas de frecuencias comprendidas entre 150 MHz a los 1920 MHz, es decir, en las bandas VHF y UHF y para distancias comprendidas entre 1 Km a 100 Km.

El modelo se basa en extensas mediciones que se realizaron en un terreno casi- plano, con parámetros predefinidos usando antenas verticales y omni- direccionales, de este estudio resulto el modelo el cual se expresa como:

$$Pl_{50}(dB) = L_F + A_{MU}(f, d) - Gt - G_{Area} \quad (2.4)$$

Donde

Pl_{50} son las pérdidas por propagación al 50 % de recepción de la señal.

L_F pérdidas en espacio libre.

G_{Area} ganancia del entorno.

A_{MU} Atenuación relativa promedio.

En las gráficas 2.1 se puede observar los valores de A_{MU} y G_{Area} . [10]

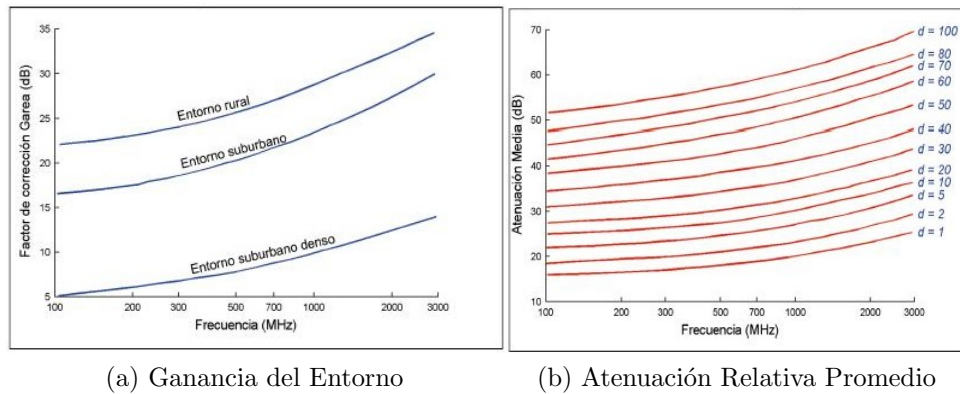


Figura 2.1: Valores de A_{MU} y G_{Area}

Modelo de Hata (Okumura- Hata)

El modelo de Hata es una formulación empírica de los datos obtenidos por Okumura para las pérdidas de propagación, también es válido para las frecuencias entre 150 Mhz y 1500 Mhz. la distancia entre el móvil y la estación base oscila entre 1 y 20 km. Este modelo expresa las pérdidas de la siguiente manera:

$$Pl(dB) = 69,55 + 26,16\log(f) - 13,82\log(h_t) - a(h_r) + (44,9 - 6,55\log(h_t))\log(d) \quad (2.5)$$

Donde $a(h_r)$ es un factor de corrección para la altura efectiva de la antena. [10]

Para ciudades pequeñas este factor es:

$$a(h_r) = (1,1\log(f_c) - 0,7)h_r - (1,56\log(f_c) - 0,8)$$

Para ciudades grandes

para $f_c < 300\text{Mhz}$

$$a(h_r) = 8,29(\log(1,54h_r))^2 - 1,1$$

para $f_c > 300\text{Mhz}$

$$a(h_r) = 3,2(\log(11,75h_r))^2 - 4,97$$

Modelo Cost 231

Este modelo es una extensión del modelo de Hata, ampliando su rango hasta los 2 GHz. El modelo se expresa como:

$$Pl(dB) = 46,3 + 33,9\log(f) - 13,82\log(h_t) - a(h_r) + (44,9 - 6,55\log(h_t))\log(d) + Cm \quad (2.6)$$

Donde Cm es el factor de corrección para ampliar el modelo a los 2 GHz. Este parámetro es 0dB para ciudades medianas y áreas suburbanas y 3 dB para centros metropolitanos. La distancia entre transmisor y receptor para este modelo va desde 1 Km hasta los 20Km. [10] [11]

Modelo Walfisch y Bertoni

Este modelo utiliza la difracción para predecir la potencia media considerando efectos como el de la altura y los techos de las construcciones. El rango de frecuencias en que es aplicable este modelo es de 300 a 3000 MHz, con separación entre transmisor y receptor de 200 a 5000 m. No es aplicable cuando la antena de la estación base está por debajo de la altura media de los edificios.

La pérdida de trayectoria S , se modela como el producto de tres factores:

$$S = P_o Q^2 Pl \quad (2.7)$$

Donde,

P_o es la pérdida en el espacio libre entre antenas isotrópicas,

$$P_o = ((\lambda)/4(\Pi)R)^2$$

Q^2 es la reducción de la señal a nivel de los techos. Pl representa las pérdidas por difracción en la señal entre el suelo y los techos. [10] [11]

Modelo Cost 231 Walfisch - Ikegami

Para considerar la difracción descendente hasta el nivel del suelo y algunos factores empíricos de corrección se combinaron los modelos de Walfisch – Bertoni con el de Ikegami y Cost 231. Este es un modelo híbrido para sistemas celulares de corto alcance y tiene validez para frecuencias entre 800 y 2 000 MHz, alturas de las antenas transmisoras de 4 a 50 m, distancias en un rango de 200 a 5 000 m y altura de la antena receptora de 1 a 3 m. Este modelo tiene en cuenta otros factores como, alturas de edificios (h_{roof}), ancho de las calles (w), separación entre edificios (b), y la orientación de las vías respecto al trayecto y es útil para ambientes urbanos densos. Dicho modelo se acomoda a los de tipo estadístico ya que solo considera características del entorno y no valores de bases de datos topográficos. [10] [11]

Las pérdidas de propagación con línea de vista está dada por la siguiente ecuación:

$$Pl(dB) = 42,6 + 26\log(d) + 20\log(f) \quad (2.8)$$

La ecuación anterior es válida para $d > 20m$, donde d se expresa en Km y f en Mhz.

Las pérdidas de propagación sin línea de vista está dada por la siguiente ecuación:

$$Pl(dB) = Pl_o + Pl_{rts} + Pl_{msd} \quad (2.9)$$

para $Pl_{rts} + Pl_{msd} > 0$

Donde

Pl_o son las pérdidas en el espacio libre y se representa como

$$Pl_o = 32,4 + 20\log(d + 20\log(f))$$

Pl_{msd} son las pérdidas por difracción múltiples filos de cuchillo antes del edificio final.

Pl_{rts} las pérdidas por difracción final en el nivel de las calles ocasionada por el último edificio.

$$Pl_{rts} = -16,9 - 10\log(w) + 10\log(f + 20\log\Delta(h_{mobile})) + Pl_{ori}$$

Pl_{ori} es el término que considera la orientación de las calles como se indica a continuación:

para $0^\circ < \varphi \leq 35^\circ$

$$Pl_{ori} = -10 + 0,534\varphi$$

para $35^\circ < \varphi \leq 55^\circ$

$$Pl_{ori} = 2,5 + 0,075(\varphi - 35)$$

para $55^\circ < \varphi \leq 90^\circ$

$$Pl_{ori} = 4 - 0,114(\varphi - 55)$$

Además $(\Delta)h_{mobile} = h_{roof} - h_{mobile}$

Modelo Longley Rice

Modelo basado en un algoritmo numérico, se aplica a sistemas punto a punto y para frecuencias comprendidas entre 40 Mhz y 100 Ghz sobre diferentes tipos de modelos y para longitudes de trayectoria entre 1 y 2000 kms. La pérdida media de propagación utiliza se obtiene utilizando información sobre la geometría del terreno entre el transmisor y receptor, y las características refractivas de la tropósfera. Para un sistema con línea de vista se utiliza principalmente el modelo de reflexión terrestre de 2 rayos.

Para las perdidas por difracción por obstáculos son estimadas utilizando el modelo de Fresnel – Kirchoff para “Filo de Cuchillo”. En los sistemas sin línea de vista se utiliza el modelo de Van der Pol – Bremmer.

El modelo Longley Rice trabaja de dos maneras para obtener los parámetros de propagación, la primera cuando se tiene información detallada del terreno al cual se le llama predicción punto a punto, al segundo se le conoce como predicción de área y es cuando no se tiene información del terreno utilizando técnicas para obtener los parámetros de propagación. Este modelo no determina correcciones debido a factores ambientales, ni a los efectos de edificios y árboles, tampoco considera el efecto multitrayectoria. [10] [12]

Modelo Durkin

Este modelo sirve para predecir la potencia de la señal en terrenos irregulares y utiliza un algoritmo que se divide en dos partes: La primera consta de reconstruir el perfil del terreno basado en datos topográficos, se debe suponer que dentro de esta área de estudio no habrá fenómenos debido a la multitrayectoria. La segunda etapa consta en calcular las pérdidas de la señal en el área definida, esto se hace de manera iterativa cambiando de lugar el receptor para obtener un contorno de la fuerza de la señal.

El modelo de Durkin resulta muy útil debido a que puede utilizar mapas de elevación del terreno que es un parámetro determinante en la propagación de RF, pero por otro lado presenta la desventaja que no tiene en cuenta los fenómenos multitrayectoria. [10]

Modelo Dual – Slope

Este modelo es basado en el modelo de Dos Rayos, es conveniente para regiones de propagación con línea de vista. Las pérdidas de propagación se pueden representar en función de d que es la distancia entre transmisor y receptor, de la siguiente manera:

$$Pl_o = Pl_b + 10n_1 \log(d) + P_1 \quad (2.10)$$

Donde P_1 son las pérdidas por trayectoria en dB en un punto de referencia, Pl_b es un parámetro básico de pérdidas en la transmisión y depende de la frecuencia y la altura de la antena. [10]

Modelo Log-Distancia

Teóricamente este modelo indica que la señal promedio recibida decrementa logarítmicamente con la distancia, la ecuación que representa este modelo se expresa a continuación:

$$Pl(dB) = Pl(d_0) + 10n \log(d/d_0) \quad (2.11)$$

Donde n es el exponente de path loss y depende del tipo de material y entorno. d_0 es una distancia de referencia cerca del transmisor $Pl(d_0)$ es la pérdida promedio a la distancia de referencia. [10]

En la tabla 2.1 se muestran los valores de n para diferentes ambientes.

Tabla 2.1: Exponente de path loss, n

Entorno	Exponente, n
Espacio libre	2
Reflexión especular ideal 4	4
Entorno urbano	2.7 a 3.5
Entorno urbano (shadowing)	3 a 5
En edificios (visión directa)	1.6 a 1.8
En edificios (camino obstruido)	4 a 5
En industria (camino obstruido)	2 a 3

2.1.2. Selección del modelo a utilizar

Para determinar qué modelo de gran escala utilizar se deben tener en cuenta las siguientes especificaciones:

- Frecuencia de operación: de acuerdo a lo expuesto en el capítulo 1 la frecuencia a utilizar están alrededor de los 400Mhz la cual está destinada para ayudas a la meteorología por MinTIC.
- Ancho de banda de operación: de acuerdo al CNABF los anchos de banda van relacionados de acuerdo al tipo de modulación, para una modulación análoga se tiene un B_w de 12,5Khz y para una modulación digital 6,25Khz.
- Condiciones ambientales de operación: El nodo que se pretende desarrollar consta de una estación de monitoreo y una estación central, la estación de monitoreo estará ubicada en el corregimiento san Antonio de prado vereda quebrada larga, lugar donde nace la quebrada doña María clasificada con nivel de riesgo alto. La estación central estará en el municipio de Medellín en la torre SIATA ubicada en el sector del estadio. Se tienen condiciones de montaña y condiciones urbanas con edificaciones, se tiene una distancia de separación de 12.28 Km, ambas estaciones son fijas. No se tiene línea de vista entre las estaciones.
- Otra consideración a tener en cuenta es la altura de la antena transmisora, para este trabajo es mínima de 3m.

A continuación en la tabla 2.2 se muestra la comparación de los modelos con sus diferentes parámetros de acuerdo a lo hallado en la literatura.

Tabla 2.2: Comparativa entre los modelos de gran escala

Modelo	Distancia Km	F . Operación Mhz	Área de Uso	LOS o NLOS	H ant. m
Espacio Libre	-	-	Amb. abiertos	LOS	-
Dos Rayos	-	-	Amb. abiertos	LOS	50
Okumura	1 - 100	150 - 1920	Urbano	NLOS	30-100
Hata	1-20	150 - 1500	Urbano	NLOS	30 -200
Cost 231	1-20	150 - 2000	Urbano	NLOS	4-50
Walfisch y Bertoni	0.2 - 5	300 - 3000	Urbano	NLOS	4-50
Cost 231 Walfisch Ikegami	0.2 - 5	800 - 2000	Urbano	NLOS	4-50
Longley Rice	1-2000	40 - 100000	Urbano	NLOS	-
Durkin	-	-	Urbano	NLOS	-
Dual Slope	-	-	Urbano	LOS	-
Log Distancia	-	-	Interiores	-	-

Para las siguientes condiciones de operación $f = 403\text{Mhz}$, $h_t = 3\text{m}$, $h_r = 40\text{m}$, $d = 12,28\text{Km}$ los modelos que más se ajustan de acuerdo a la tabla 2.2 son los de Cost 231 y Longley Rice.

EL modelo cost 231 tiene un metro más en la altura de la antena transmisora que la mínima propuesta de 3m, aun conociendo esto se usará dicho modelo porque sus condiciones están muy cercanas a las propuestas dando una muy buena idea de la potencia que se necesitaría para el intercambio de información en el nodo.

Para el modelo Cost 231 las pérdidas de propagación son:

Cost 231

$$Pl(dB) = 158, 1dB \quad (2.12)$$

El modelo de Longley Rice se analizará más adelante en este capítulo.

2.1.3. Presupuesto de Enlace

El presupuesto de enlace es la aplicación directa de los modelos de propagación a gran escala específicamente los modelos de path loss, mientras que los modelos que consideran multitrayectoria, desvanecimientos y efectos del canal en la forma de la señal se emplean para diseñar los receptores y estimar la tasa de velocidad, modulación y codificación.

Con el modelo de propagación PL se puede deducir la pérdida a una distancia de referencia (diseño de redes por cobertura) Se puede deducir que distancia cubre una red a una capacidad de transmisión (diseño por capacidad o tráfico) En un sistema de comunicaciones bidireccional, hay que balancear el presupuesto de enlace (el de menor cobertura), ya sea bajando o subiendo potencias de transmisión o colocando pérdidas adicionales. [1]

Para realizar el presupuesto de enlace se requiere determinar:

- Elementos de Ganancia:
 - Potencia de transmisión del radio USRP N210, 20 dBm.
 - Ganancia de las antenas, 10 dB.
 - Margen 10 dB
 - Amplificación, 0dB
- Elementos de pérdida
 - Conectores, 0.25dB/conector
 - Cable, 14 dB/100m
 - Sensibilidad, -130 dBm
- Contramedidas y márgenes
 - Figura de ruido, 5dB.
 - Protección y medio ambiente, 3 dB

EL presupuesto de enlace nos ayudará a determinar la potencia mínima requerida para cumplir con los parámetros establecidos como distancia y frecuencia. Primero se calculará la potencia mínima de recepción, con esta se calculará que potencia se debe transmitir para garantizar esta potencia mínima teniendo en cuenta las pérdidas de propagación más grande.

$$\begin{aligned}
 P_{rx} &= -130dBm(\text{sensibilidad}) + 10dB(Gtx) - 1dB(\text{conectores}) - 5dB(NF) \\
 &- 3dB(\text{medio ambiente}) + 10 dB (\text{margen})
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

$$P_{rx} = -119dBm
 \tag{2.14}$$

Al realizar un balance entre las potencias de transmisión y recepción con las pérdidas de propagación se obtiene:

$$PIRE - Prx = Pl$$

$$PIRE = 158,1dB - 119dBm$$

$$PIRE = 39,1dBm
 \tag{2.15}$$

$$P_{tx} = PIRE - 10dB(G_{tx}) + 1dB(\text{conectores}) = 30,1dBm \quad (2.16)$$

Teóricamente se requiere aplicar una potencia en el transmisor de 30,1dBm para el intercambio de información entre las estaciones de monitoreo y central, distanciadas 12.28 kms.

Gráficamente el presupuesto de enlace lo podemos ver en la figura 2.2. Donde Pc es la perdida en cables y conectores, FN es la figura de ruido, P es la protección contra el medio ambiente.

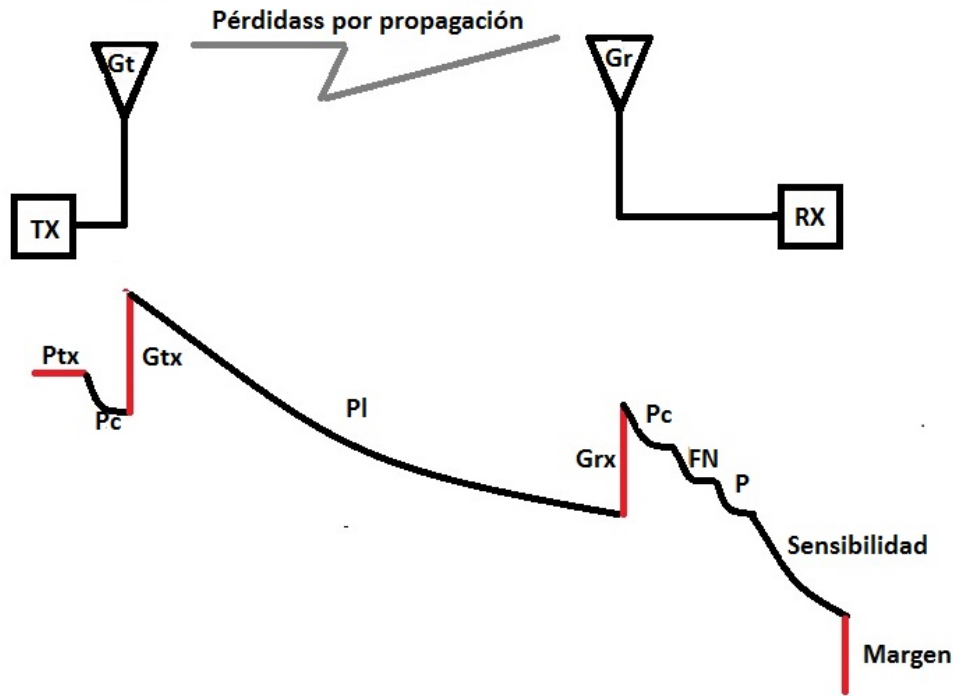


Figura 2.2: Presupuesto de enlace

A continuación se verifica el presupuesto de enlace de acuerdo a la figura 2.2.

$$\text{Margen} = P_{tx} - P_c + G_{tx} - P_l + G_{rx} - P_c - FN - P - \text{Sensibilidad}$$

$$\begin{aligned} \text{Margen} &= 30,1dBm - 1dB + 10dB - 158,1dBm + 10dB - 1dB \\ &\quad - 5dB - 3dB - (-130dBm) \end{aligned}$$

$$\text{Margen} = 10dB$$

Otro modelo que podemos utilizar debido a su licenciamiento mediante el software mentum planet para la Universidad Pontificia Bolivariana es el de

Longley Rice, el cual también se ajusta a las condiciones expuestas de frecuencia de operación y distancia entre las estaciones.

Los parámetros iniciales a usar en el modelamiento con el software son:

- Estación de monitoreo: Altura de la antena entre 3m y 32dbm.
- Estación Central: Altura de la antena 40m y 32 dbm.

De acuerdo a los resultados que arroje el modelo Longley Rice, los parámetros anteriores pueden variar, con el fin de buscar potencias de transmisión que ofrezcan una potencia de recepción óptima y así garantizar que la comunicación entre ambas estaciones sea confiable.

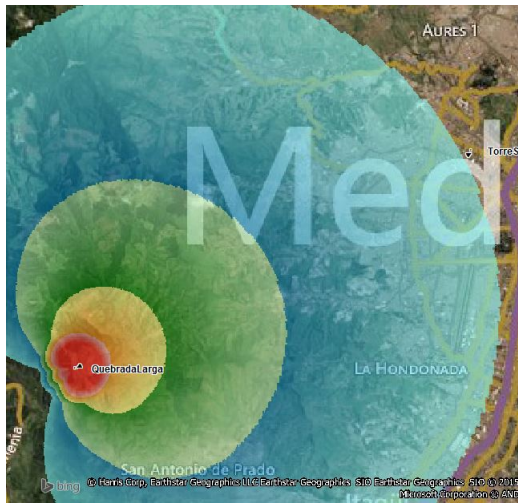
En la gráfica 2.3 se muestra la paleta de colores con la cual se analizará la potencia de recepción más óptima ya sea de la estación central o de monitoreo. Se trabajará para que la estación que este en recepción se encuentre en la franja entre $-76,9dBm$ y $-88,8dBm$

Interval list:

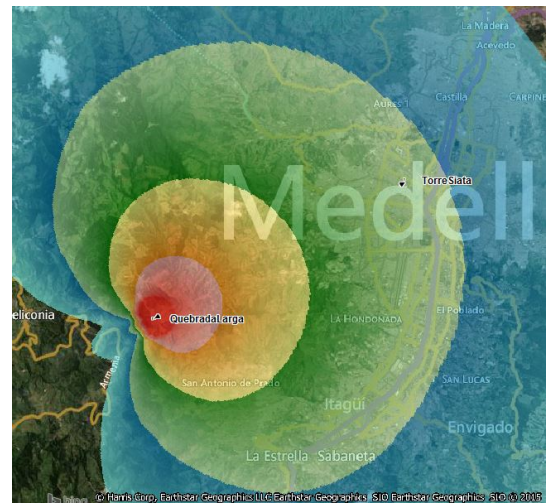
	>= Value	< Value	Color
1	-136,2500	-124,3925	
2	-124,3925	-112,5350	
3	-112,5350	-100,6775	
4	-100,6775	-88,8200	
5	-88,8200	-76,9625	
6	-76,9625	-65,1050	
7	-65,1050	-53,2475	
8	-53,2475	-41,3900	
9	-41,3900	-29,5325	
10	-29,5325	-17,6750	

Figura 2.3: Paleta de Colores para análisis de potencia

En la gráfica 2.4 se muestra los resultados de cobertura para una altura de antena de 3m y potencia de transmisión de 32dBm y 44dBm para la estación de monitoreo.



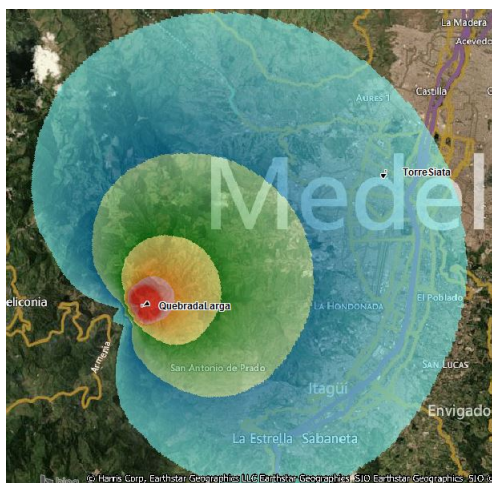
(a) Tx = 32dbm, Altura = 3m



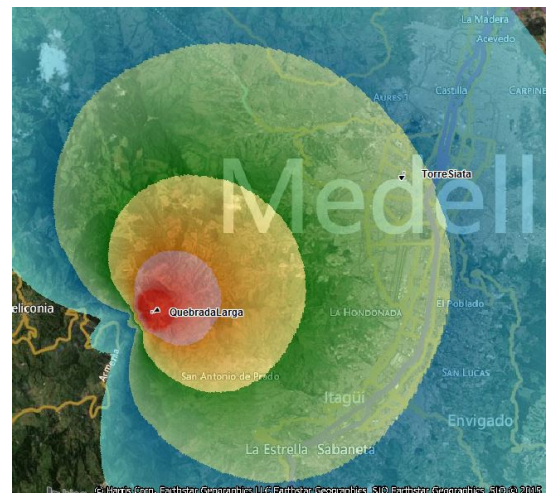
(b) Tx = 44dbm, Altura = 3m

Figura 2.4: Cobertura para altura de antena igual a 3m

En la gráfica 2.5 se muestra los resultados de cobertura para una altura de antena de 6m y potencia de transmisión de 32dBm y 40dBm para la estación de monitoreo.



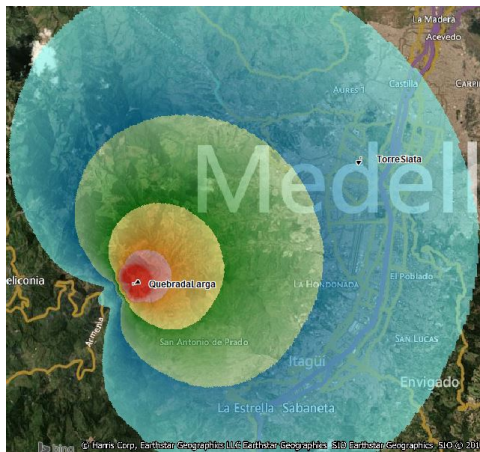
(a) Tx = 32dbm, Altura = 6m



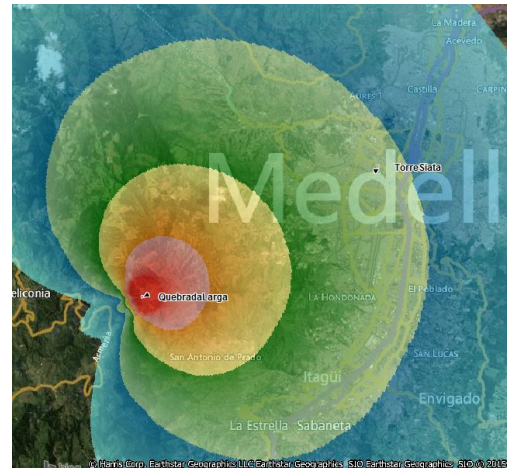
(b) Tx = 40dbm, Altura = 6m

Figura 2.5: Cobertura para altura de antena igual a 6m

En la gráfica 2.6 se muestra los resultados de cobertura para una altura de antena de 9m y potencia de transmisión de 32dBm y 38dBm para la estación de monitoreo.



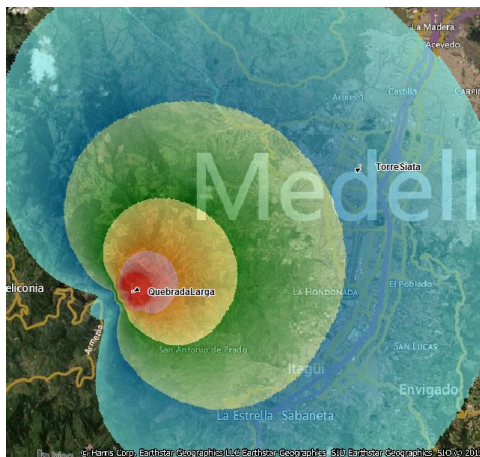
(a) Tx = 32dbm, Altura = 9m



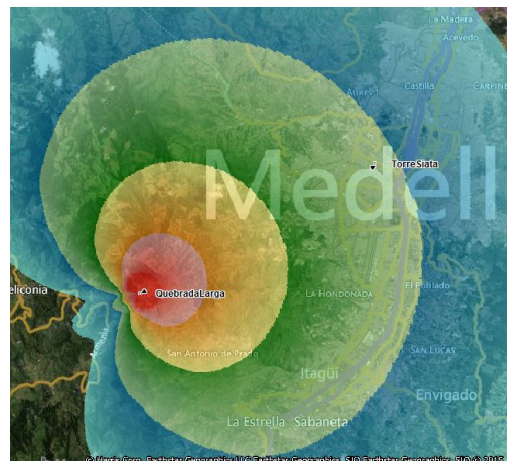
(b) Tx = 38dbm, Altura = 9m

Figura 2.6: Cobertura para altura de antena igual a 9m

En la gráfica 2.7 se muestra los resultados de cobertura para una altura de antena de 12m y potencia de transmisión de 32dBm y 36dBm para la estación de monitoreo.



(a) Tx = 32dbm, Altura = 12m



(b) Tx = 36dbm, Altura = 12m

Figura 2.7: Cobertura para altura de antena igual a 12m

Para la transmisión desde la estación central se tiene una altura de antena igual a 40m y potencia de transmisión de 32dBm. Los resultados los podemos observar en la gráfica 2.8.

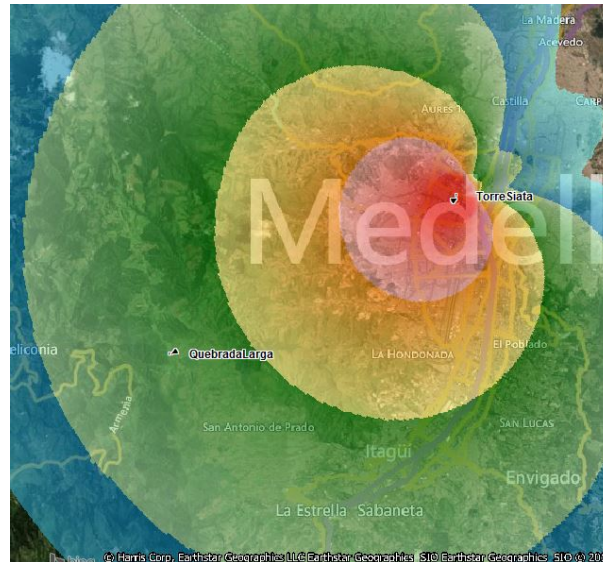


Figura 2.8: Cobertura para altura de antena igual a 40m desde centro de control

De acuerdo al modelo de Longley Rice la altura está relacionada con la potencia de transmisión, entre más alta esté la antena transmisora menor potencia se requiere. Para una altura de 3m en la estación de monitoreo, se necesita 44dBm para que la estación central se encuentre en la franja descrita. Para 6m se requieren 40dBm, en 9m se necesitan 38dBm y para 12m se requieren 36dBm. La estación central tiene una altura de antena de 40m se necesita 32dBm para que la estación de monitoreo se encuentre en la franja propuesta.

Disposiciones de Potencia

Por las condiciones de NLOS, difracción y medio ambiente se usará la potencia más grande hallada. La potencia para cumplir con los requisitos de diseño varía dependiendo del modelo empleado, la mayor potencia obtenida fue de la simulación con el modelo de Longley Rice con altura de antena transmisora de 3m y receptora de 40m con 44 dBm. Este será la potencia mínima a tener en cuenta en el prototipado en la parte de transmisión, el prototipo debe ser capaz de transmitir a esta potencia.

2.2. Diseño de Pequeña Escala

El desvanecimiento a pequeña escala es usado para describir rápidas variaciones en la amplitud de la señal de radio en periodos cortos de tiempo o distancia cortas de viaje. El desvanecimiento es causado por dos o más versiones de la señal transmitida al llegar al receptor en diferentes tiempos. Estas ondas llamadas multitrayectoria combinadas en el receptor generan variaciones en la amplitud y fase. [1]

Propagación Multitrayectoria pequeña escala

La multitrayectoria en canales de radio crean diferentes efectos de desvanecimiento, los 3 más importantes son:

- Rápidos cambios en la intensidad de la señal
- Pequeñas distancias o intervalos de tiempo.
- Variación en frecuencia debido al efecto doppler o diferentes caminos que toma la señal.
- Dispersión en el tiempo debido a los retardos por multitrayectoria.

Factores que influyen en el desvanecimiento de pequeña escala

- Propagación multitrayectoria: La presencia de objetos que generan reflexión y dispersión en el canal crean un constante cambio en el ambiente, lo que disipa la energía de la señal en fase, amplitud y tiempo. Estos fenómenos también causan interferencia intersimbólica.
- Velocidad del móvil: La relación de movimiento entre la estación base y el móvil resulta en aleatoriedad de la frecuencia produciendo el efecto doppler.
- Velocidad de los objetos en el canal: si los objetos en el canal de radio se mueven, estos inducen al efecto doppler por trayectorias múltiples.
- Ancho de Banda de transmisión de la señal: si el ancho de banda de la señal transmitida es más grande que el ancho de banda en multitrayectoria la señal recibida será distorsionada. El ancho de banda del canal puede cuantificarse con el ancho de banda coherente, el cual está relacionado con multitrayectorias presentes en el canal. [1]

2.2.1. Parámetros de Canal

Existen parámetros que se utilizan para caracterizar los canales multitrayectos. Entre estos se encuentran la dispersión de retardo media $\bar{\tau}$, la dispersión de retardo rms τ_{rms} y la dispersión de retardo máxima τ_{max} , parámetros que pueden ser determinados a partir del perfil de retardo de potencia del canal.

Dispersión del retardo medio

Es el primer momento del perfil de potencia y está definida por:

$$\bar{\tau} = \frac{\sum_k P(\tau_k) * \tau_k}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (2.17)$$

Dispersión del retardo rms

Está definida como la raíz cuadrada del segundo momento central del perfil de retardo de potencias, tal que:

$$\tau_{rms} = \sigma_{rms} = \sqrt{\bar{\tau}^2 - \bar{\tau}^2} \quad (2.18)$$

donde,

$$\bar{\tau}^2 = \frac{\sum_k P(\tau_k) * (\tau_k)^2}{\sum_k P(\tau_k)} \quad (2.19)$$

Ancho de Banda coherente

Se deriva del coeficiente de dispersión del retardo rms, y es una medida estadística del rango de frecuencias sobre el cual el canal puede considerarse plano; es decir un canal que pasa todas las componentes con una ganancia aproximadamente igual y fase lineal. Mide el rango de frecuencias donde componentes espectrales tienen un fuerte potencial de estar correlacionados en amplitud. [1] [13]

Para una correlación mayor al 90 % se tiene:

$$B_c = \frac{1}{50\sigma_{rms}} \quad (2.20)$$

y para una correlación mayor al 5 %

$$B_c = \frac{1}{5\sigma_{rms}} \quad (2.21)$$

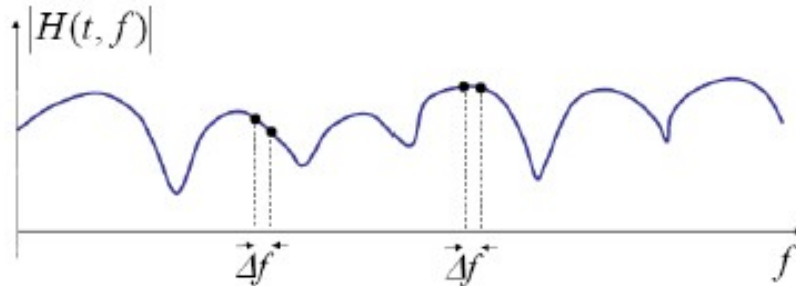


Figura 2.9: Ancho de Banda Coherente [1]

Tiempo de Coherencia

El tiempo de coherencia del canal, es una medida estadística de la duración sobre la cual la respuesta impulsional del canal es esencialmente invariante, y cuantifica la similitud de la respuesta del canal en diferentes instantes de tiempo. Dentro del tiempo de coherencia las señales recibidas tienen un enorme potencial de estar correlacionadas en amplitud. [1] [13]

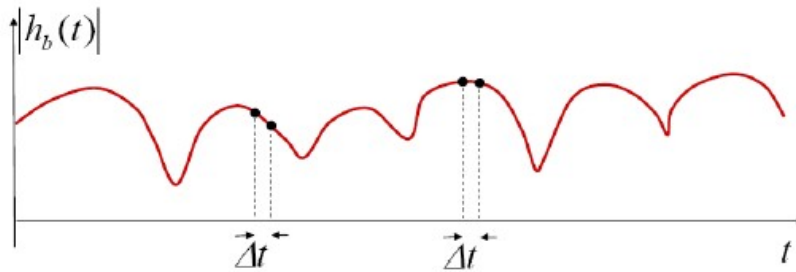


Figura 2.10: Tiempo de Coherencia [1]

Para cuantificar el efecto debido al movimiento de los terminales, se emplea el desplazamiento Doppler, f_m , que está relacionado por tanto con la velocidad de los mismos.

El tiempo de coherencia es el dual en tiempo de la dispersión Doppler. [1]

$$T_c \approx \frac{1}{f_m} \quad (2.22)$$

Donde f_m se relaciona directamente con la velocidad del terminal e inversamente con la longitud de onda (λ).

$$f_m = \frac{v}{\lambda} \quad (2.23)$$

El tiempo de coherencia es una medida estadística, y la expresión anterior corresponde a valores de correlación de la señal por encima de 0.5. Otra aproximación mucho más estricta que la anterior [1] viene dada por la expresión:

$$T_c \approx \frac{9}{16\pi * f_m} \quad (2.24)$$

En la práctica la señal varía mucho, la ecuación 2.22 no suele ser muy restrictiva, mientras que 2.24 es a menudo demasiado severa. Por este motivo, se suele utilizar la media geométrica entre ambas para definir el tiempo de coherencia

$$T_c = \frac{0,423}{f_m} \quad (2.25)$$

Tipos de Desvanecimiento de pequeña escala

Dependiendo de la relación entre los parámetros de la señal y los parámetros del canal se formaran diferentes tipos de desvanecimiento, estos son: Desvanecimiento plano, selectivo en frecuencia, rápido y desvanecimiento lento. Esto lo podemos ver en la siguiente gráfica 2.11. [1]

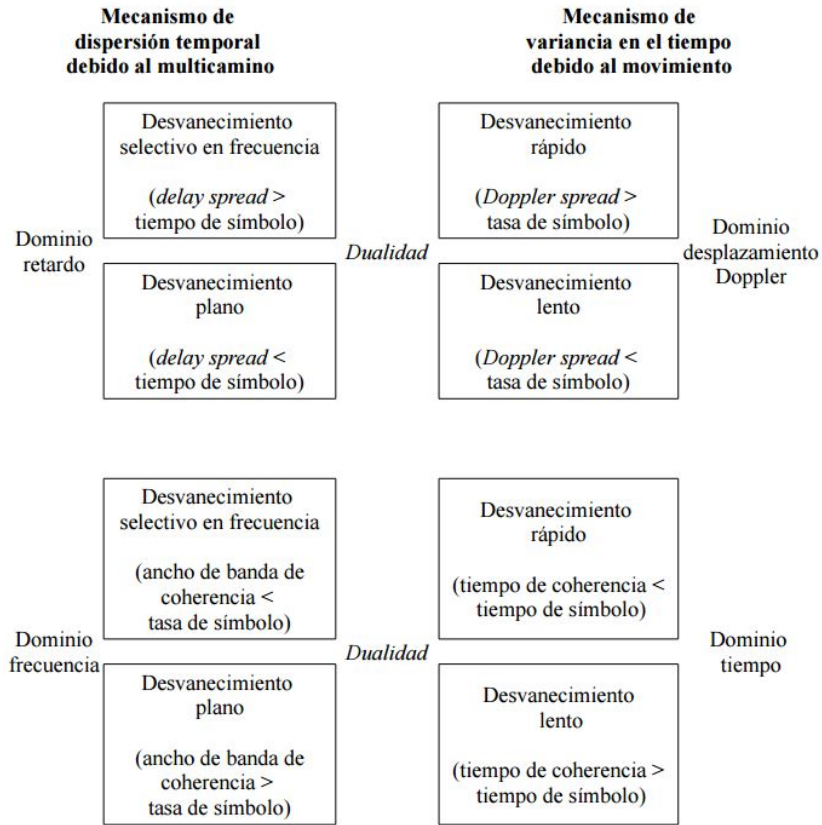


Figura 2.11: Tipos de Desvanecimiento [2]

2.2.2. Calculo de los parámetros de pequeña escala

Para calcular los diferentes parámetros de pequeña escala, se trazan con la ayuda del software google earth 9 trayectorias teniendo en cuenta la de línea recta y los picos más representativos. Con estas trayectorias y con el mismo software se obtiene altura y coordenadas de los puntos en las montañas donde la onda difracta ver la figura 2.12.

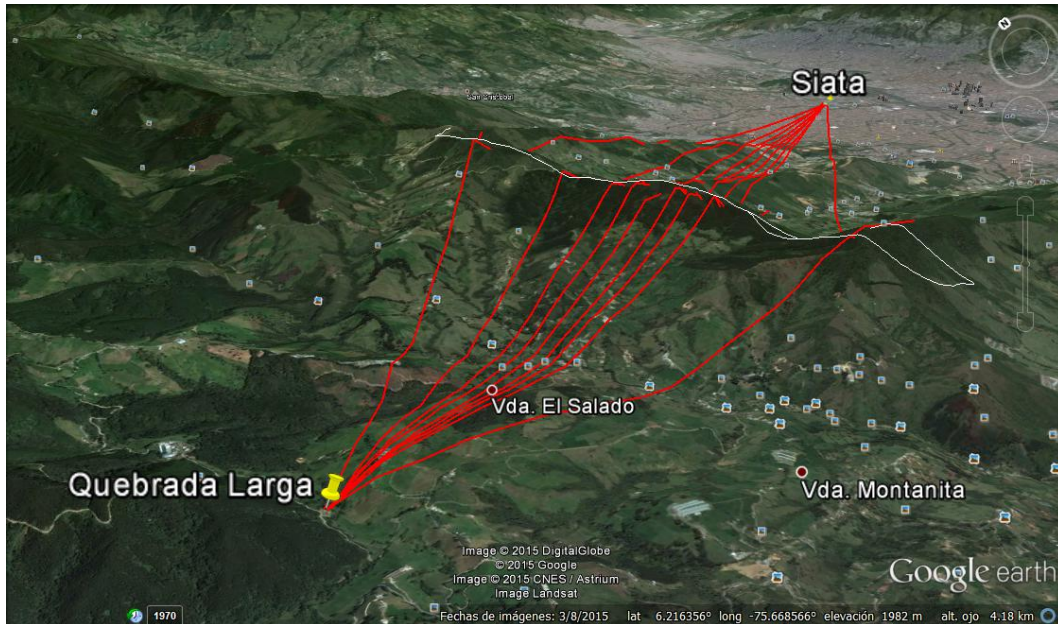


Figura 2.12: Trayectorias de las ondas

Se establece que las trayectorias de las ondas primero difractan en una montaña cercana a la estación de monitoreo, para luego difractar en la montaña más alta y por último llegar a la estación central. Para cada una de estas se calculan 3 distancias con el teorema de Pitágoras $h = \sqrt{a^2 + b^2}$, con sus respectivos tiempos de llegada al filo de la montaña y estación central con la ecuación $t = d/v$, donde d es la distancia recorrida y v es la velocidad a la que se propaga la onda que es la velocidad de la luz. Luego se suman las 3 distancias y los 3 tiempos de cada una de ellas para obtener la distancia total recorrida y el tiempo asociado a esta distancia, ver la figura 2.13.

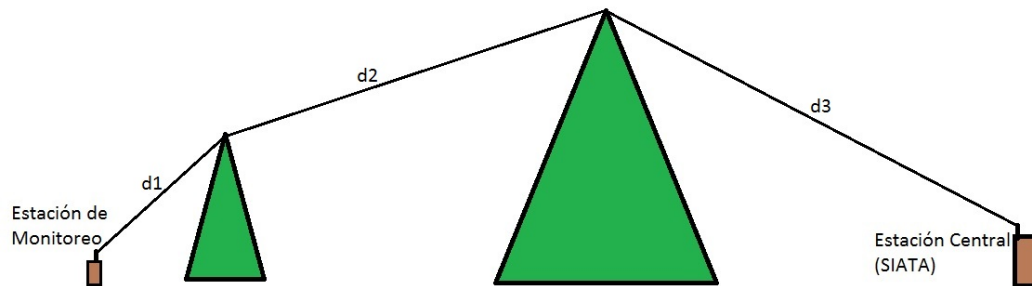


Figura 2.13: Difracción de las ondas

Otro calculo requerido es la potencia de recepción de cada una de las trayectorias, para esto se calcula la atenuación de cada una de las 3 con la

ecuación de friss $L(db) = 32,44 + 20\log(f) + 20\log(d)$, para luego sumarlas y obtener la atenuación total de la trayectoria. Este valor es restado a la potencia de transmisión obtenida en el presupuesto de enlace de $44dbm$ para obtener así la potencia de recepción $P_{rx} = P_{tx} - L$.

Por último con estos valores hallados se calcula la dispersión de retardo rms 2.18 y el ancho de banda coherente mayor al 90 % 2.20.

Para calcular el tiempo de coherencia del canal se debe tener en cuenta que ambos sistemas, el centro de control y de monitoreo prácticamente son estáticos. Se establece que la estación de monitoreo tendrá un pequeño movimiento en la antena debido al viento de $10cm/s$ y la estación central estará estática. De la ecuación 2.25 y 2.23 tenemos:

$$T_c = \frac{0,423 * C}{v * f} = \frac{0,423 * 300000m/s}{0,1m/s * 403Mhz} \tag{2.26}$$

$$T_c = 3,15mseg \tag{2.27}$$

Teóricamente se tiene un $T_c = 3,15mseg$, lo que significa que para versiones de la señal original que lleguen al receptor en un tiempo menor o igual al T_c tendrán una alta correlación en amplitud.

Todos los valores anteriores los podemos observar en las tablas 2.3 y 2.4.

Tabla 2.3: Valores iniciales de Parámetros de Pequeña Escala

Trayectoria	Distancia (m)	Tiempo (s)	Atenuación (dBm)	Potencia Rx (dBm)
1- Línea recta	12339,3	4,113E-05	274,2	-230,2
2	12330,6	4,110E-05	274,9	-230,9
3	12335,1	4,112E-05	274,8	-230,8
4	12422,5	4,141E-05	275,3	-231,3
5	12345,1	4,115E-05	273,8	-229,8
6	12356,3	4,119E-05	273,8	-230,0
7	12383,8	4,128E-05	274,0	-239,0
8	12586,9	4,196E-05	283,0	-235,7
9	12382,8	4,128E-05	199,3	-155,3

Tabla 2.4: Parámetros de Pequeña Escala

Dispersión del retardo rms	Bw coherente (hz)	Tiempo de Coherencia mseg
4,32E-07	46282	3,15

Antes de realizar la conclusión con los parámetros de pequeña escala, se requiere calcular el tiempo de bit (t_b), tiempo de trama (t_t) y tiempo de símbolo (t_s); para esto se usarán las siguientes ecuaciones en QPSK con un $B_w = 6,25Khz$.

$$\begin{aligned}
 R &= \frac{2B_w}{1+r} \\
 t_b &= \frac{1}{R} \\
 t_s &= 2t_b
 \end{aligned}
 \tag{2.28}$$

$$t_t = t_b * \text{NumerodebitsporTrama}$$

Donde R es la tasa de bits, r el factor de roll-off del filtro raíz de coseno alzado con valor de 0,5 y en este capítulo más adelante se determinó el tamaño máximo de trama de 600 bits. Con estas consideraciones y las ecuaciones 2.28 se hallaron dichos tiempos. Ver la tabla 2.5

Tabla 2.5: Tiempos de trama para QPSK

Tasa de bits	Tasa de simbolo	T. de bits	T. de simbolo	T. de trama
8333,3 (bits/seg)	16666,7 (bits/seg)	120 (us)	240 (us)	72 (ms)

Conclusiones parámetros pequeña escala

Para un tiempo de símbolo de $t_s = 240\mu seg$, tasa de símbolo $t_{sim} = 16667bits/seg$ y los valores de $Bwc = 46282Hz$, $\tau_{rms} = 43,2\mu seg$ y $t_c = 3,15mseg$ hallados teóricamente se concluye que el canal tendrá desvanecimiento plano ya que el $Bwc \geq t_{sim}$, $\tau_{rms} \leq t_s$ y que el desvanecimiento será lento debido a que $t_c \geq t_s$. Con esta conclusión se establece que en la parte de recepción no es necesario ecualizar, debe ser suficiente con variar la potencia para lograr una recepción adecuada.

2.3. Diseño del Protocolo

El objetivo primario de la arquitectura de una red es proporcionar a sus usuarios los medios necesarios para establecer la red y efectuar el control de flujo de datos. Una arquitectura de red describe la forma en que se arregla o estructura una red de comunicación de datos y, en general, incluye el concepto

de niveles o capas dentro de la arquitectura. Cada nivel dentro de la red consiste en protocolos específicos, es decir, reglas de comunicación que desempeñan un conjunto dado de funciones.

Un protocolo de red de comunicación de datos es un conjunto de reglas que gobierna el intercambio ordenado de datos dentro de la red.

Dos modelos de arquitectura de red son el de interconexión de sistemas abiertos (OSI) con siete capas y TCP/IP con 4. Las capas del modelo OSI son aplicación, presentación, sesión, Transporte, red, enlace de datos y física. Mientras que las capas de TCP/IP son aplicación, transporte, internet y capa de acceso a la red. En este trabajo se usará el modelo OSI, y según los alcances de este se trabajará en las dos últimas capas, la de control de acceso y física.

2.3.1. Capa Física

La capa física del modelo OSI proporciona los medios de transporte para los bits que conforman la trama de la capa de enlace de datos a través de los medios de red. Esta capa acepta una trama completa desde la capa de Enlace de datos y la codifica como una secuencia de señales que se transmiten en los medios locales.

El envío de tramas a través de medios de transmisión requiere los siguientes elementos de la capa física:

- Medios físicos y conectores asociados. Los medios no transportan la trama como una única entidad. Los medios transportan señales, una por vez, para representar los bits que conforman la trama.
- Codificación de los datos y de la información de control. La codificación es un método utilizado para convertir un stream de bits de datos en un código predefinido. Los códigos son grupos de bits utilizados para ofrecer un patrón predecible que pueda reconocer tanto el emisor como el receptor. Entre los principales métodos de codificación están NRZ, AMI, Manchester
- Representación de los bits en los medios. La presentación de los bits es decir, el tipo de señal depende del tipo de medio, para el medio inalámbrico las señales son patrones de ondas electromagnéticas. Existen muchas formas de transmitir señales. Un método habitual para enviar datos consiste en utilizar técnicas de modulación. Para este trabajo se tienen una moduladora digital y una portadora analógica, combinación que da como resultado usar modulaciones del tipo ASK, FSK y PSK.
- Sistema de circuitos del receptor y transmisor en los dispositivos de red.

Consideraciones en la Capa Física

El medio a usar para la transmisión de información será el inalámbrico. Para la codificación de los datos se utilizará la codificación NRZ, dando en amplitud de $\sqrt{2}/2$ a él bit en estado 0 y de $-\sqrt{2}/2$ al bit en estado uno. La modulación a utilizar será QPSK. La circuitería asociada a la capa física es la relacionada con los radios USRP N210 y sus componentes como antenas, amplificadores, también se encuentra la asociada a la parte de medición con el sensor y datalogger.

2.3.2. Capa de Enlace

La capa de enlace de datos es la responsable de la transferencia de mensajes (Tramas) a través del canal. A la vez, transforma un canal susceptible de provocar errores en un enlace prácticamente libre de errores.

Los protocolos de enlace de datos se clasifican en general como asíncronos o síncronos, los asíncronos están orientados a caracter, mientras que los síncronos pueden estar orientados a bit o a caracter. [14]

Las funciones que debe realizar la capa de enlace de datos se pueden agrupar en las siguientes:

- Estructuración de mensajes en tramas
- Detección de errores
- Corrección de errores
- Control de transmisión
- Control de Flujo
- Tipos de servicios en la capa de enlace
- Control de Acceso al Medio

Estructuración de mensajes en tramas

La trama es la unidad de datos que utiliza la capa de enlace, estas viajan de un nodo a otro siempre y cuando ambos nodos estén en el mismo medio de comunicación. Una trama nunca salta de una subred a otra.

La trama facilita la sincronización en la comunicación entre las entidades de la capa de enlace, que consiste en la localización del comienzo y el final de bloque de información transmitido.

La información de control del protocolo viaja en la trama junto a los datos a transmitir, si esta está ubicada en la cabecera de la trama se dice que esta es posicionalmente dependiente, y si va en cualquier otro lugar de la trama se habla de posicionamiento independiente. [15] [16]

A continuación se mencionará algunos ejemplos de tramas asíncronas y síncronas.

Para los protocolos orientados a caracter se suele usar caracteres de control, como los presentados en la tabla 2.6.

Tabla 2.6: Caracteres de control

Carácter de control	Descripción
SOH	Comienzo de Cabecera
STX	Comienzo de texto
ETX	Fin de texto
EOT	Fin de transmisión
ACK	Acuse de recibo correcto
DLE	Secuencia de escape
NAK	Acuse de recibo negativo
SYN	Carácter de sincronismo

Entre los protocolos asíncronos se encuentran 8A1/8B1 de Western Electric y 83B de IBM. Estos protocolos tienen la siguiente estructura básica de trama. Ver 2.7. [14] [17]

Tabla 2.7: Trama básica protocolos asíncronos

SOH	Encabezado	STX	Datos	EOT
-----	------------	-----	-------	-----

En el campo de encabezado se transmite información distinta a los datos, como hora, número de mensaje, entre otros. [15]

La trama del protocolo síncrono BISYNC de IBM es la siguiente. 2.8

Tabla 2.8: Protocolo Síncrono BISYNC

SYN	SYN	SYN	SYN	SOH	Cabecera	STX	Datos	ETX	CRC
-----	-----	-----	-----	-----	----------	-----	-------	-----	-----

Donde CRC es el campo destinado para la detección de errores en la trama. [14]

Un protocolo orientado a bit síncrono es el de comunicaciones de enlace de datos síncronos (SDLC) de IBM, este protocolo puede transferir en simplex, semidúplex y dúplex. Un protocolo orientado a bits (BOP, bit-oriented protocol) es una disciplina para transferencia de información en serie por bit, por un canal de comunicación de datos. En un BOP, la información de control del enlace de datos se transfiere e interpreta bit por bit, y no como caracteres únicos de control de enlace de datos. La trama del protocolo SDLC la podemos ver en la tabla 2.9

Tabla 2.9: Protocolo Síncrono orientado a bit SDLC

Bandera	Dirección	Control	Datos	FCS	Bandera
01111110 8 bits	8 bits	8 bits	Variable	CRC - 16 16 bits	01111110 8 bits

Donde el campo bandera se usa para delimitar y obtener la sincronización de caracteres, el de dirección se refiere al número de estación al cual va dirigido, la de control indica que tipo de trama es (información, supervisión y no numerado), el campo de datos es la información como tal a transmitir y el FCS contiene el mecanismo de detección de errores para SDLC. [14].

Un protocolo basado en SDLC es el AX.25 que se encarga de poner de acuerdo las distintas formas de usar redes públicas de transmisión de datos y su trama es similar a la anterior 2.9. [16] [17]

Otro protocolo en la capa de enlace es Ethernet, el cual es la tecnología LAN más ampliamente utilizada. Ethernet proporciona servicio sin conexión y sin reconocimiento sobre un medio compartido utilizando CSMA/CD como métodos de acceso al medio. El formato básico de la trama y las subcapas del IEEE de las Capas OSI 1 y 2 siguen siendo los mismos para todas las formas de Ethernet. Sin embargo, los métodos para detectar y colocar en los medios varían con las diferentes implementaciones. En la siguiente tabla 2.10 se puede observar el formato de trama de Ethernet.

Tabla 2.10: Trama Protocolo Ethernet

Preámbulo	Destino	Origen	Tipo	Datos	FCS
8 Bytes	6 Bytes	6 Bytes	2 Bytes	46 - 1500 Bytes	4 Bytes

Donde preámbulo tiene la misma funcionalidad de sincronización que el campo bandera en las tramas anteriores. En el campo destino y origen va la dirección MAC de cada dispositivo. En tipo se indica que protocolo de capa superior recibirá los datos y FCS para controlar las tramas dañadas. [18]

El protocolo punto a punto (PPP) es un protocolo utilizado para entregar tramas entre dos nodos. PPP fue desarrollado como un protocolo WAN y sigue siendo el protocolo elegido para implementar muchas WAN serie. PPP se puede utilizar en diversos medios físicos, lo que incluye cable de par trenzado, líneas de fibra óptica o transmisión satelital. La trama de este protocolo la podemos ver en la tabla 2.11.

Tabla 2.11: Trama Protocolo PPP

Señalizador	Destino	Control	Protocolo	Datos	FCS
1 Bytes	1— Bytes	1 Bytes	2 Bytes	Variable	2 o 4 Bytes

Donde señalizador indica inicio y fin de la trama y tiene la forma 01111110, destino tiene la dirección de broadcast, PPP no asigna direcciones a estaciones individuales, el campo de control tiene la secuencia 00000011 que requiere la transmisión de datos del usuario en una trama no secuencial. El protocolo indica el protocolo encapsulado en el campo de datos de la trama. [18]

Detección de errores

Los mecanismos de detección de errores se basan en la inclusión de información redundante en la trama, es decir, una serie de bits adicionales que representan de algún modo el contenido del mensaje transmitido, y que se envían conjuntamente con el mensaje.

Un método muy efectivo para la detección de errores es enviar la trama varias veces y compararlas para observar diferencias, este método tiene el problema de reducir la capacidad del enlace, por lo que se buscan otras técnicas que mantengan mejores prestaciones en el uso del canal. Algunas de estas técnicas son:

- Paridad horizontal: consiste en añadir a un grupo de bits de datos (entre 5 y 8), un bit más con valor de 0 ó 1 según corresponda para que el número de bits 1 total sea par (paridad par) o impar (paridad impar). Esta paridad puede detectar únicamente errores que afectan a un número impar de bits.

- Paridad vertical: La detección de errores puede mejorar considerablemente añadiendo a cada grupo de n caracteres que se envían sucesivamente, uno más que contenga bits de paridad para los bits que ocupan la misma posición en los n caracteres transmitidos, a esto se le conoce como paridad vertical. La combinación de estos dos métodos ayudaría a detectar hasta 3 bits en el bloque, todos los errores con un número impar de bits erróneos y algunos con número par.
- Chequeo por suma: El emisor de la trama realiza la suma de los bytes o caracteres a transmitir en todos o en determinados campos de la trama, esta suma generará hasta 16 bits adicionales que se añadirán al final de la trama. Este método detecta errores de 2 bits en una fila o dos filas, pero falla en la detección de un número par de bits erróneos en una columna. Esta técnica no es capaz de detectar errores de secuencia, es decir, se produce una suma idéntica cuando el mensaje se envía en cualquier otro orden.
- Códigos de redundancia cíclica (CRC): Usa un código polinomial dando una buena detección de errores con poca información redundante adicional. Normalmente se le añade a la trama hasta 32 bits de información.

Consiste básicamente en que el emisor trata la información a transmitir como una cadena de bits, y la convierte en un polinomio binario (donde los valores de los coeficientes son cero o uno). Este polinomio binario se multiplica por el grado del polinomio generador que es conocido tanto por el emisor como por el receptor, y posteriormente se divide por el módulo 2 (No se llevan acarreo), generándose un resto de grado una mitad inferior al polinomio generador. Los coeficientes (Ceros o unos) de este resto se añaden a la trama como código de detección de errores. Un polinomio generador de orden n generará un código de n bits. Para un polinomio de 16 bits se corregirán errores de hasta 2 bits, errores en un número impar de bits y errores de ráfagas. [15]

Corrección de errores

El método más sencillo y utilizado de corrección de errores es la detección de los mismos por alguno de los mecanismos señalados anteriormente y la retransmisión de la trama.

Sin embargo, en algunos casos se puede incluir información redundante en la trama de manera que los errores los pueda corregir el propio receptor. La cantidad de código que se añade a la trama suele estar entorno al 50% de su longitud original. Además de su coste en tiempo de computación, es difícil diseñar el algoritmo que corrija tanto error de bits dispersos. Por lo tanto son

solo rentables en enlaces con tasas de errores muy altos o que tienen grandes retardos. [15]

Control de transmisión

El protocolo de capa de enlace debe tener en cuenta la pérdida de una trama, aparición de tramas duplicadas y llegada de tramas fuera de secuencia.

Si no se trata adecuadamente estas situaciones, la primera dará lugar a la pérdida de información en la comunicación, la segunda a la aceptación de datos erróneos como si fueran válidos y la tercera puede provocar cualquiera de las dos anteriores. Para controlar esto existen protocolos encargados de regular estas situaciones, a continuación se hablará del protocolo más simple para esto y de las mejoras que se le pueden adicionar para hacerlo más robusto.

- **Protocolo Simple de enlace de datos**

Este tipo de protocolo solo envía tramas con información, sin establecer ni liberar conexiones, si no se presenta ninguna anomalía de las anteriores su funcionamiento sería el adecuado, únicamente para evitar desbordar el receptor, el emisor enviaría una trama y esperaría un acuse de recibo antes de enviar la siguiente.

Por si alguna razón una trama no llega, llega incorrecta o un ack no llega a su destino la comunicación se quedaría bloqueada y el emisor ya no enviaría más tramas. [15]

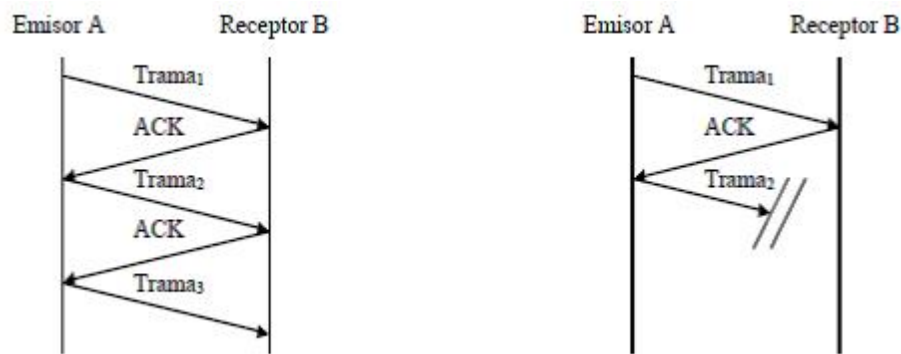


Figura 2.14: Protocolo Simple de enlace de datos

El problema anterior se resuelve si el emisor decide el reenvío de la última trama si no ha recibido el ack en un tiempo razonable. A este tiempo se le denomina tiempo de espera o timeout y su duración optima se estima entre

una y dos veces el tiempo de retardo medio necesario para el envío, procesado y respuesta a una trama.

A pesar de la mejora si la trama perdida sea un ack el receptor puede aceptar una trama retransmitida por el emisor tras el timeout como si fuera una nueva trama. [15]

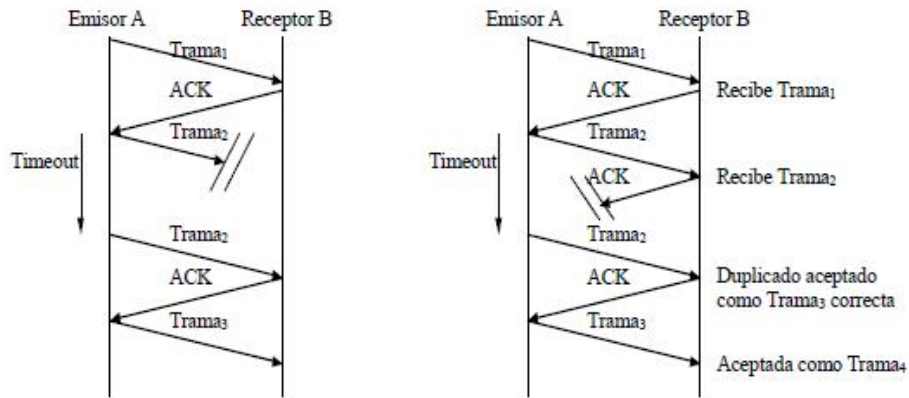


Figura 2.15: Protocolo Simple de enlace de datos con reenvío de trama sin llegar Ack en un tiempo

De nuevo la solución es simple, se deben enumerar las tramas para que el receptor no las confunda, pero aun así se pueden presentar fallos produciendo pérdidas de datos si por alguna razón se produce un timeout antes de la llegada de un ack correspondiente a la trama correcta. La solución más simple para este nuevo problema es numerar los ack también con el número de secuencia de la trama a la que dan acuse de recibo. [15]

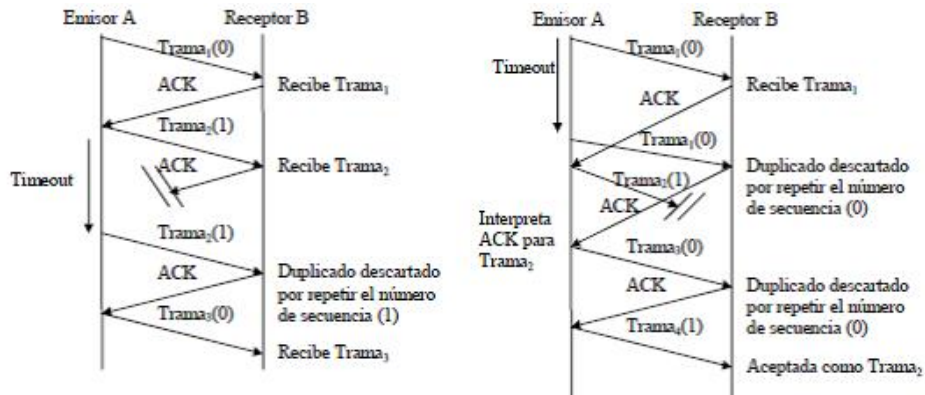


Figura 2.16: Protocolo Simple de enlace de datos con Ack Numerados

A continuación se hablará sobre otras mejoras al protocolo.

- **Pipelining**

Esta técnica consiste en enviar más de una trama antes de recibir un acuse de recibo. Si las tramas se enumeran con modulo N se podrán enviar teóricamente N-1 tramas antes de recibir un acuse de recibo. Aunque lo que en realidad limita su número es el tamaño del buffer del emisor y del receptor.

Al no tener que esperar innecesariamente por cada acuse de recibo se aprovecha mejor la capacidad del enlace, más aún, si un ack puede servir para confirmar la recepción de más de una trama.

- **Acuse de recibo negativo (NAK)**

SI una trama llega al receptor con errores, este puede advertir al emisor del error enviándole un NAK sin que este tenga que esperar a la finalización del timeout, se aumenta así la velocidad de comunicación. El NAK también puede indicar la causa del rechazo de la trama.

- **Piggyback Acknowledgment**

En comunicaciones donde la información fluye en ambos sentidos, se consigue un notable aumento de la capacidad del enlace si las tramas que se envían con información se les incorpora un acuse de recibo de las que se han recibido. En el caso de que no haya información que enviar se envía una trama solo con el ack. [15]

Control de Flujo

El control de flujo de datos es un problema que surge cuando hay dos dispositivos intercambiando datos y el dispositivo que está recibiendo los datos no es capaz de tratar esos datos con la misma rapidez con la que le están llegando.

Una solución a este problema es igualar las velocidades entre el transmisor y el receptor, lo que obliga a ralentizar el emisor de modo que las prestaciones del sistema decaen.

Otra solución es disponer de una memoria interna que sirva de amortiguador en la llegada de datos de modo que, aunque los datos no se han tratado si están almacenados para su procesamiento posterior. Tiene la limitación en la cantidad de memoria RAM de que se disponga.

Una solución más óptima es que exista una comunicación bidireccional entre los dispositivos. De modo que cuando el receptor, esté a punto de llenar su buffer, se lo indique al transmisor y este pare de mandar datos hasta que el receptor indique que está nuevamente apto para recibir información. [15]

Tipos de servicios en la capa de enlace

A continuación se describirá los tipos de servicio en la capa de enlace.

- **Servicio no orientado a conexión sin confirmación**

En este tipo de servicio no se establece conexión previa y las tramas se envían al destino sin acuse de recibo. Es válido para aplicaciones en tiempo real.

- **Servicio no orientado a conexión con confirmación**

Aquí tampoco se establece conexión previa, pero en este caso cada trama es notificada y confirmada por el destino al origen (reenvío de tramas ante errores).

- **Servicio orientado a conexión con confirmación**

Las tramas no se envían independientemente, sino que son numerados y antes del envío de las mismas es necesaria una fase de establecimiento de la conexión en la que se negocian los parámetros de comunicación entre emisor y receptor, después se envía la información y finalmente se cierra la conexión. Cada trama se recibe una y sólo una vez. [15]

Control de Acceso al Medio

En las redes cableadas e inalámbricas es muy importante determinar quién puede hacer uso del canal cuando varios nodos quieren transmitir al mismo tiempo. La capa MAC (Control de Acceso al Medio) es una subcapa de la capa de enlace y como su nombre lo indica, es la encargada de controlar el acceso al medio, así como de gestionar y mantener comunicación entre distintos nodos. Esto es de suma importancia debido a que el hecho de no tener una coordinación adecuada en la transmisión de datos ocasiona colisiones. [19]

Dependiendo de quien gestione el uso del medio de transmisión los mecanismos de control de acceso al medio pueden ser distribuidos y centralizados.

- **Distribuidos**

Todas las estaciones cooperan para determinar cuál de ellas accederá al medio según unas reglas preestablecidas.

- **Centralizados**

Existe un controlador que decide que estación puede acceder al medio en cada momento. Este esquema tiene las ventajas de que se puede realizar un control de acceso al medio más avanzado (Se puede manejar nivel de prioridad, garantizar que todas las estaciones puedan transmitir, entre otras) y que el software que requiere es sencillo. Trae la desventaja de que si falla el nodo central la red no funcionará. [20]

Disposiciones en la capa de enlace

A continuación se presentarán las consideraciones a tener en cuenta para el diseño de la trama y el protocolo en la capa de enlace.

Consideraciones de diseño

- Mecanismo para identificar transmisor y receptor, debido a que la red puede contar con varios usuarios y así especificar cuáles son las estaciones involucradas en el envío y recepción de la información.
- Identificar como viajan los datos en el sistema, los cuales pueden ser simplex, semidúplex y dúplex.
- Identificación y corrección de errores, debido a que el canal de comunicación presenta ruido.
- Acuse de recibo, en la estación central.
- El tamaño de la información es variable, se deben contar con mecanismos de ensamble y desensamble de las tramas en el transmisor y receptor respectivamente.
- Considerar los servicios orientados o no orientados a la conexión. En un servicio orientado a la conexión, el usuario establece la conexión, la usa y luego la libera. En un servicio no orientado a la conexión esto no se realiza por lo que cada uno de los mensajes son encaminados independientemente por la red.

Diseño de la trama

A continuación en la tabla 2.12 se compararán las tramas de los protocolos expuestos para decidir cuales campos tendrá nuestra trama.

Tabla 2.12: Comparación entre las tramas

Protocolo	Preámbulo	Fuente	Destino	Control	Datos	Errores	Fin
8A1/8B1	x	x		x	x		x
BISYNC	x	x		x	x	x	
SDLC	x	x		x	x	x	x
Ethernet	x	x	x	x	x	x	
PPP	x		x	x	x	x	

El criterio a usar para determinar los campos de la trama será que al menos dos tramas de las 5 comparadas usen el campo. Bajo este criterio los campos para la trama serán preámbulo, fuente, destino, control, datos, corrección de errores y fin.

Un campo adicional que no poseen los protocolos expuestos y que se introducirá en la trama para este trabajo es el de bits de guarda el cual ayudará para que los retardos y reflexiones de la señal no afecten adversamente la recepción.

Teniendo en cuenta las consideraciones de diseño y basados en lo mencionado anteriormente se tendrán los siguientes campos en la trama.

- Bits de guarda, al iniciar la trama se envían 20 bits de guarda en cero para ayudar en la recepción.
- Preámbulo de un tamaño de 16 bits, al igual que un fin de igual tamaño, estos campos ayudarán a la sincronización indicando el inicio y el fin de la trama.
- Campo para indicar la fuente y el destino cada uno de 10 bits, dando como tamaño máximo de estaciones de 1024.
- Campo de control para indicar el tamaño de la información, este será de 16 bits. Este campo ayudará al receptor a saber cuántos bits procesará para tratar la información que fue enviada para su correcta interpretación.
- Los datos irán contenidos en otro campo de la trama, dicho campo es variable hasta 480 bits equivalentes a 60 caracteres.
- Se requiere un espacio para la detección de errores.

Lo anterior nos lleva a la obtención de la siguiente trama 2.13.

Tabla 2.13: Diseño de la Trama

Guarda	Preámbulo	Destino	Fuente	Control	Datos	Det. Errores	Fin
20 Bits	16 Bits	10 Bits	10 Bits	16 Bits	Variable(480 bits)	32 Bits	16 Bits

El campo de petición o respuesta es el campo de datos, en el cual la estación central hará los requerimientos a la estación de monitoreo y sobre este mismo, la estación de monitoreo dará respuesta a la estación central. Este campo es variable y su tamaño depende del tipo de petición o de la respuesta que se dé a dicha petición tendrá un tamaño máximo de 480 bits equivalentes a 60 caracteres, si se toman 6 caracteres por sensor se tendrá campo para transmitir información de 10 sensores. La trama total tendrá un tamaño máximo de 600 bits.

Disposiciones Finales en la capa de enlace

Las estaciones de monitoreo obtienen la información de las diferentes variables almacenándolas, y están a la espera de alguna petición para que esta información almacenada sea enviada al centro de control. Teniendo esto en cuenta se establece usar un servicio no orientado a la conexión con acuse de recibo, junto con un protocolo simple de comunicación con timeout, y el acuse de recibo se realizara con Piggyback Acknowledgment. Todas estas consideraciones son debido a que la información estará contenida en una sola trama lo que facilita el protocolo. El acuse de recibo será la trama que envía como respuesta la estación de monitoreo.

La estación central hará peticiones de información a las estaciones de monitoreo, espera un timeout la llegada la trama con la información, trama que a su vez servirá de ack para la estación central, si esta no llega en un timeout la estación central hará de nuevo la petición de la información por 2 veces más.

Para la detección de los errores se utilizara un CRC de 16 bits $X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$, si se detecta un error se pedirá la retransmisión de la información por parte de la estación central debido a que esta es poco y estará contenida en una sola trama.

La información viaja en ambas direcciones pero no al mismo tiempo, entonces esta será semidúplex.

Para el control de acceso al medio se utilizará uno centralizado, el nodo central realizará las peticiones a las estaciones de monitoreo. Tomando los

tiempos de la tabla 2.3 en que demora la onda en ir de la estación central a la de monitoreo es de aproximadamente $41\mu s$ más el tiempo de trama igual a 72 ms se obtiene un tiempo total de 144,082 ms, tiempo estimado para la comunicación entre nodo central y una estación de monitoreo. Con este periodo de tiempo estimado para cada comunicación, en 1 minuto se podría establecer comunicación con alrededor de 416 estaciones. La estación central tendrá el número 1, mientras que las de monitoreo serán numeradas del dos en adelante.

En la tabla 2.14 se resumirá las disposiciones para el protocolo.

Tabla 2.14: Conclusiones para el protocolo

Elemento	Disposición
Modulación	QPSK
Trama	Guarda(20 bits), Preámbulo(16 bits), Fuente(10 bits), Destino (10 bits), Control (10 bits), Datos (hasta 480 bits) , Detección errores (32 bits) y Fin (16 bits)
Detección de errores	CRC con un polinomio de 16 bits $X^{16} + X^{15} + X^2 + 1$
Corrección de errores	Reenvío de la información si se detectan errores, la solicitud de reenvío la hará la estación central
Control de transmisión	Protocolo simple de comunicación con timeout y el acuse de recibo se realizara con Piggyback Acknowledgment. Si la respuesta no llega en un tiempo se hará de nuevo otra petición por parte de la estación central. Solo se harán 3 peticiones por estación.
Control de flujo	Colas tipo FIFO para evitar sobre flujos y bloqueos
Tipo de servicio	Servicio no orientado a la conexión con confirmación. La confirmación será la misma trama enviada por la estación de monitoreo
Control de acceso al medio	Centralizado, la estación central será la encargada de realizar las peticiones a las de monitoreo cada minuto, que pueden ser alrededor de 416 estaciones. La estación central será la número 1. Las de monitoreo tendrán del número 2 en adelante

Descripción del Funcionamiento del Protocolo

A continuación se describirá mediante unos diagramas de flujo el funcionamiento de todo el protocolo con las consideraciones de diseño. La figura 2.17 representa el diagrama de flujo que muestra el funcionamiento del nodo central.

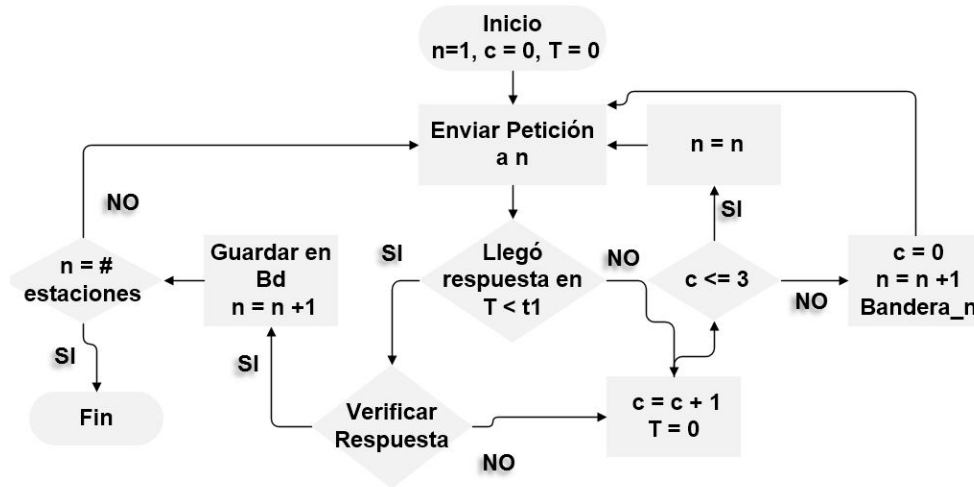


Figura 2.17: Funcionamiento del Nodo Central

Donde n es el número de la estación, c es el contador de petición de trama, t_1 es el tiempo de espera de la respuesta y T el contador del tiempo.

La estación central inicia el envío de petición de datos a cada una de las estaciones de monitoreo en orden numérico, luego espera la respuesta enviada por la estación de monitoreo un tiempo determinado, si en este tiempo determinado no llega esta, realiza una nueva petición a la misma estación, si llega la trama de la estación de monitoreo y la validación de esta no es correcta se hará de nuevo la petición de los datos. La estación central solo realizará 3 peticiones de datos por cada estación en caso de no tener una respuesta satisfactoria, esto antes de continuar con la siguiente estación. Si la respuesta es satisfactoria la información será almacenada en bases de datos y continuará el proceso de petición a la estación siguiente. El proceso termina cuando se llega a la última estación y empieza de nuevo al minuto de haber comenzado.

La figura 2.18 representa el diagrama de flujo que muestra el funcionamiento de la estación de monitoreo.

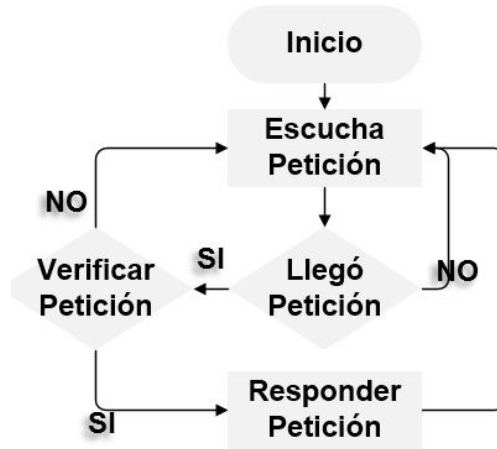


Figura 2.18: Funcionamiento del Nodo de Monitoreo

El nodo de monitoreo está en constante escucha, cuando llega una petición este verifica la integridad de la trama, si da validez a la trama responde a la petición con una nueva trama con la información solicitada, si descarta la trama de petición vuelve a modo escucha.

En las figuras 2.17 y 2.18 en los campos de enviar petición y responder petición se lleva a cabo el siguiente proceso 2.19.



Figura 2.19: Funcionamiento de los campos enviar o responder a Petición

Cuando hay que enviar o responder a una petición, esta solicitud se ensambla en la trama junto a los otros campos necesarios, para luego modularla y enviarla a través del radio.

Las figuras 2.17 y 2.18 en los campos de llegó petición o respuesta a petición se lleva a cabo el siguiente proceso 2.20.

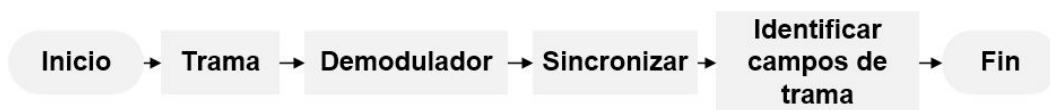


Figura 2.20: Funcionamiento de los campos Llegó o respuesta a petición

Cuando llega una trama esta se demodula para luego sincronizarla e identificar los diferentes campos de esta.

En los diagramas 2.17 y 2.18 en los campos de verificar respuesta o petición se lleva a cabo el siguiente proceso 2.21.

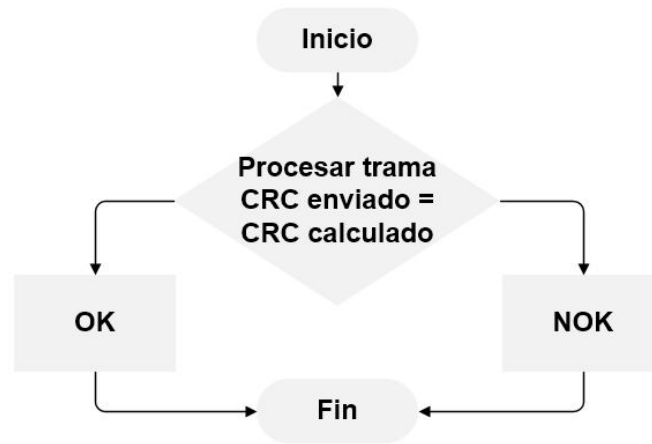


Figura 2.21: Verificación de Trama

Para verificar las tramas, se comparan los CRC enviados con el calculado en el receptor, si estos coinciden se confirma que la trama es correcta, de lo contrario esta no se valida.

Capítulo 3

Implementación

La comunicación, como se sabe, es la transferencia de información desde un punto considerado como emisor hasta otro punto considerado como receptor. Dicha transferencia se hace a través de un canal, y se estima que el proceso sea seguro y confiable, de modo tal que la información desde la fuente sea recibida en su totalidad.

Ahora bien, es el sistema de comunicación el conjunto de subsistemas y mecanismos que permite el enlace entre el emisor y el receptor. Este sistema debe cumplir ciertos conceptos para asegurar la transmisión y recepción óptima del mensaje, pero, en general, se toman en cuenta tres factores principales que son:

- Un transmisor, que toma la información y la convierte en una señal.
- Un Medio de Transmisión o Canal Físico que lleva la señal.
- Un Receptor, que toma la señal del canal y la convierte de vuelta a información útil.

En el transmisor los procesos más relevantes son el codificador de fuente, el codificador de canal y la modulación. En el receptor son los procesos inversos al transmisor que son el decodificador de fuente, el decodificador de canal y la demodulación. Esto lo podemos observar en el diagrama 3.1 que expresa el proceso de comunicación de un sistema digital. [21]

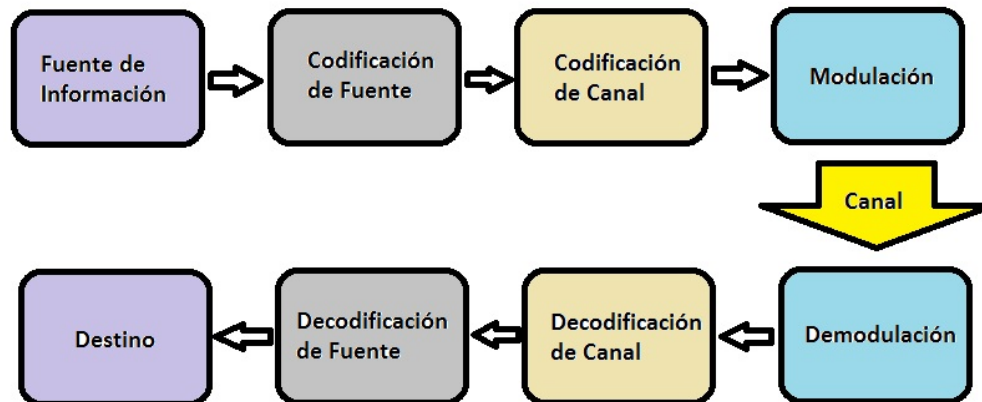


Figura 3.1: Proceso de comunicación digital

Nota: la programación del transmisor y receptor se lleva a cabo con la ayuda del software labview.

3.1. Desarrollo del Transmisor

Descripción de los componentes que conforman el transmisor.

Fuente de Información

La fuente de información es el bloque donde se genera la señal a transmitir ya sea digital o analógica. Para este trabajo la fuente de información es digital y es generada en la estación central y en la de monitoreo. En la central se genera un string de caracteres los cuales serán la petición a la estación de monitoreo, en donde la información a responder es otra cadena de caracteres con los datos solicitados por la estación central.

Esta información va acompañada de unos bits de guarda, de un preámbulo, un fin, un código de redundancia cíclica, un código de fuente y de receptor. Todo esto genera la trama total a ser enviada por el canal de comunicaciones. Ver figura 3.2.

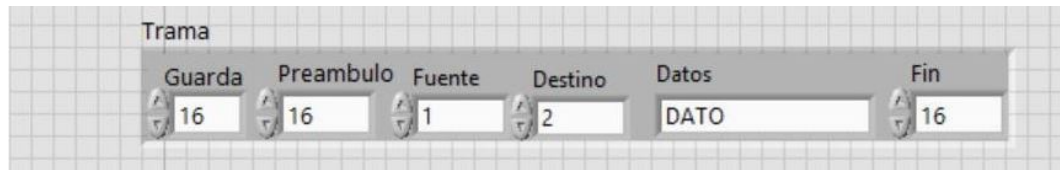


Figura 3.2: Trama

Codificador de fuente

El mensaje producido por la fuente es convertido en una secuencia de dígitos binarios. Idealmente, se busca representar la información fuente mediante la secuencia de información conteniendo el menor número de bits posible. En otras palabras, se busca una representación del mensaje con poca o nula redundancia. A la salida del codificador de fuente disponemos, por lo tanto, de un conjunto de bits que representan la información original tan reducido como se pueda, puesto que se ha eliminado la información repetida.

A continuación se describirá cada uno de los campos que conforman la trama y su codificación de fuente:

- Los bits de guarda son un array de ceros de $1 \times$ número de ceros y la cantidad es elegida por el usuario.
- El preámbulo y el fin son arrays de $1 \times$ número de bits de unos y ceros, donde número de bits es elegido por el usuario. Dichos arrays tienen forma constante la cual se les da con el bloque MT Generate Bits de labview, los cuales servirán para la sincronización con el receptor.
- Los datos son la petición de información como tal a transmitir, y es una cadena string que el usuario ingresa o la estación central responde, estas cadenas son convertidas a booleano y luego pasada a un array de bits de $1 \times$ (número de caracteres \times 8).
- El CRC toma los datos a enviar y calcula el CRC de 16 bits correspondiente en hexadecimal para luego convertirlos a string y posteriormente a un array de bits de 1×32 .
- Un campo incluido en la trama para ayudar en la parte de recepción a separar el campo de datos, es el tamaño del campo de este. Para esto se calcula en bits el tamaño y este valor es convertido a su vez en datos binarios para adicionarlos a la trama a enviar.

Cada uno de estos arrays es organizado uno tras otro para formar la trama total en bits.

Todos los procesos mencionados anteriormente los podemos ver en la figura 3.3.

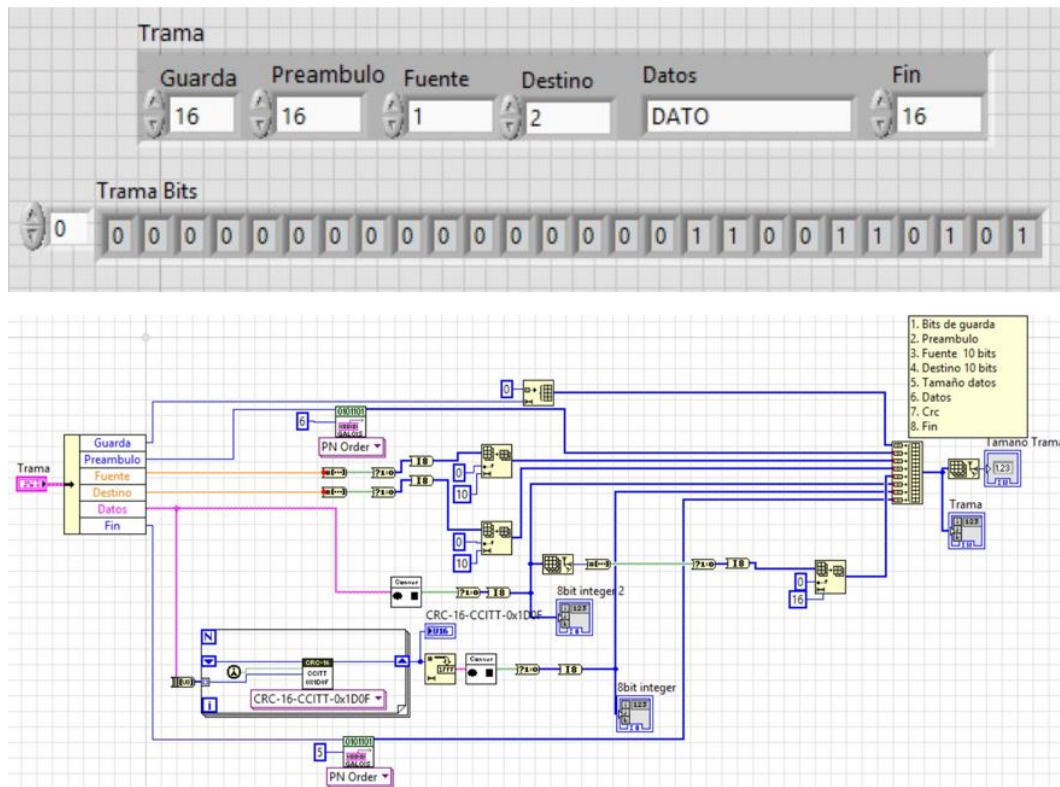


Figura 3.3: Conversión de la Trama en Bits

Codificador de canal

El propósito del codificador de canal es introducir, de manera controlada, algo de redundancia en la secuencia de información que pueda ser usada en el receptor para superar los efectos de ruido e interferencia que introduce el canal. Entonces, la redundancia de la palabra de código sirve para incrementar la confiabilidad de los datos recibidos y mejorar la fidelidad de la señal recibida. También tiene como finalidad la detección y corrección de errores producidos en el canal de comunicación o en medios de grabación, como consecuencia del ruido y distorsión introducidos, tanto por el medio de propagación, como por las no linealidades en el propio sistema de transmisión.

Para este trabajo se tiene un código de redundancia cíclica de 16 bits, el cual actúa sobre el campo de datos para calcular un valor de verificación el cual es adjuntado en la trama a enviar en el transmisor, el receptor cuando recibe la trama calcula este valor, si ambos son iguales acepta la trama, sino pide una retransmisión de la trama. Ver figura 3.4

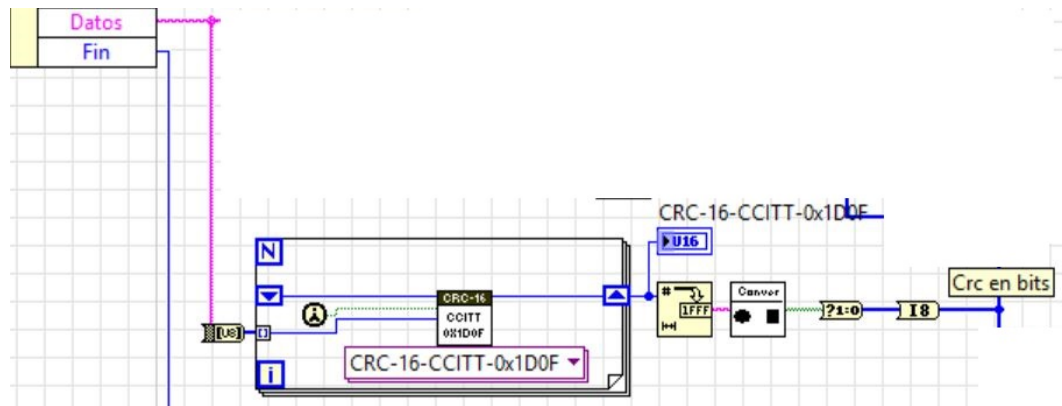


Figura 3.4: Código de redundancia Cíclica

Modulación

El paso siguiente consiste en convertir la secuencia de bits de la salida del codificador de canal en un conjunto finito de formas de onda que se ajusten a las características del canal. Esta función, la ejerce el modulador.

Modular consiste, en el ámbito de las comunicaciones, en la variación de una o más propiedades de una forma de onda periódica de alta frecuencia (conocida como señal portadora) con respecto a una señal moduladora, que es la que se desea transmitir. Con esto es posible transportar el mensaje dentro de otra señal que puede ser transmitida físicamente a través de un canal.

Para la transmisión digital estamos hablando de una señal portadora analógica Sinusoidal que es modulada de acuerdo con una cadena de bits. Dependiendo del parámetro que se decida variar, se generan distintos tipos de modulación. Los fundamentales son (Trabajan con una cadena de 0 y 1's):

- PSK (Modulación por cambio de fase)
- FSK (Modulación por cambio de frecuencia)
- ASK (Modulación por cambio de amplitud)

Pero, si hablamos de la modulación m-aria o multinivel, se tendrán entonces:

- QPSK (Modulación por cambio de fase en cuadratura)
- MPSK
- ASK QAM (Modulación por amplitud en cuadratura)

Para este trabajo se utilizará la modulación QPSK. A continuación se hablará sobre esta modulación. [22] [21]

Modulación QPSK

En sistemas de telecomunicaciones hay dos recursos importantes, la potencia de transmisión y el ancho de banda del canal, ya que estos determinan el desempeño del sistema. Este último depende de la tasa de bits. Si dos o más bits son combinados en símbolos, se puede enviar mayor cantidad de información en menor tiempo. QPSK es capaz de enviar dos bits por símbolo, duplicando la capacidad en tasa de bits dentro del mismo ancho de banda. La modulación QPSK o PSK en cuadratura como a veces se le llama, es una modulación digital de fase con una amplitud constante. QPSK es una técnica de codificación M-ario, en donde $M = 4$. Con QPSK son posibles cuatro fases de salida por una sola frecuencia de portadora. Debido a que hay cuatro fases de salida diferentes, tiene que haber cuatro condiciones de entrada diferentes. En QPSK dos bits sucesivos son combinados. Esta combinación resulta en cuatro diferentes símbolos. Cuando un símbolo cambia en otro, la fase de la portadora cambia en 90° o bien $\pi/2$.

El primer paso para la modulación QPSK es dividir la secuencia de datos binarios en dos canales, el canal de bits I y el canal de bits Q. Estos canales reciben ese nombre debido a que después de pasar la señal senoidal por el bloque NRZ, el primer canal se multiplica por una señal senoidal en fase (“I, In phase”) mientras que el segundo canal se multiplica por una señal senoidal desplazada 90° , es decir en cuadratura (“Q, Quadrature”), debido a que esto permite mejorar la probabilidad de error al separar los vectores en el diagrama de constelación. Después de separar los canales y que cada bit se multiplica por su correspondiente NRZ, ahora cada canal puede tomar valores de $+\sqrt{(2)}/2$ o $-\sqrt{(2)}/2$.

El siguiente paso es la modulación de las portadoras. El canal I modulara a la portadora $\sin(w_ct)$ y el canal Q modulara a la portadora $\cos(w_ct)$, estas dos portadoras están desfasadas 90° . Las dos señales moduladas serán:

$$\begin{aligned} S_I(t) &= b_I(t)\text{sen}(w_ct) \\ S_Q(t) &= b_Q(t)\text{cos}(w_ct) \end{aligned}$$

El último paso de la modulación QPSK es la suma de las dos señales $S_I(t)$ y $S_Q(t)$. A la salida del sumador tendremos la señal:

$$S_{QPSK}(t) = b_I(t)\text{sen}(w_ct) + b_Q(t)\text{cos}(w_ct)$$

En QPSK, cada una de las cuatro posibles fases de salida tiene exactamente la misma amplitud. En consecuencia la información binaria se debe codificar por

completo en la fase de la señal de salida. La separación angular entre cualquiera de dos fasores adyacentes en QPSK es de 90° . Por lo tanto, la señal QPSK puede experimentar un cambio de fase de $+45^\circ$ o de -45° durante la transmisión y todavía retener la información correcta codificada al demodulador. En la gráfica 3.5 se muestra la constelación para QPSK. [23] [24]

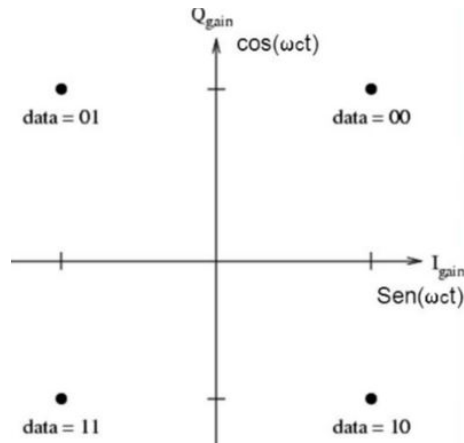


Figura 3.5: Constelación QPSK

Para programar esta modulación en labview se usará el bloque MT Modulate PSK el cual requiere de parámetros importantes para generar la forma de onda a transmitir y al mismo tiempo filtrarla y suavizarla mediante un filtro de raíz de coseno alzado con $\alpha = 0,5$ y un tamaño del mismo igual a 8. Se tomaran 16 muestras por símbolo.

A continuación en la figura 3.6 se muestra el código empleado para la modulación QPSK.

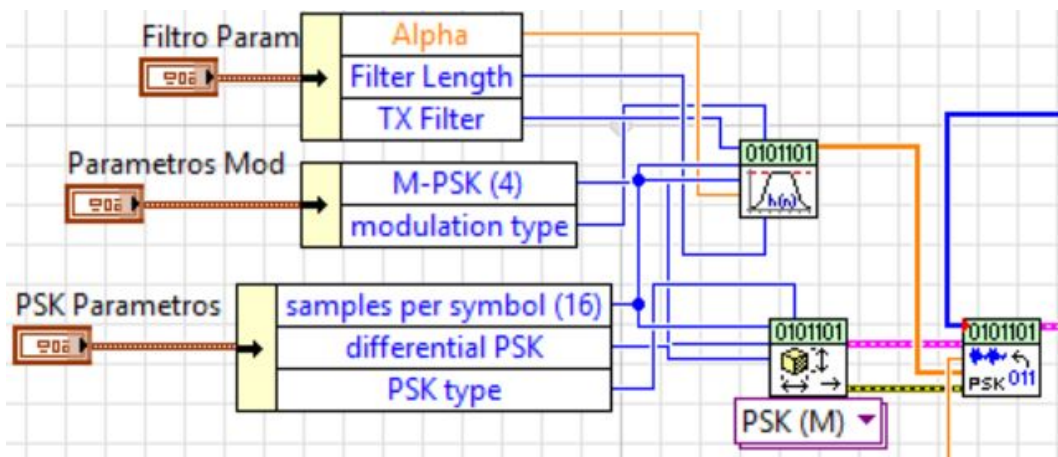
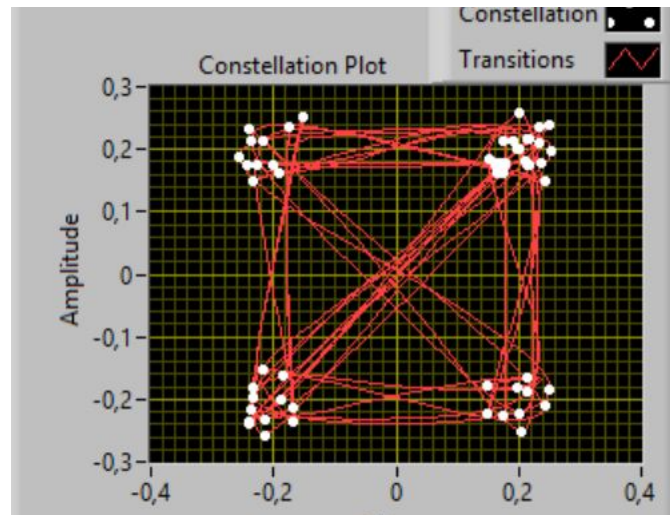
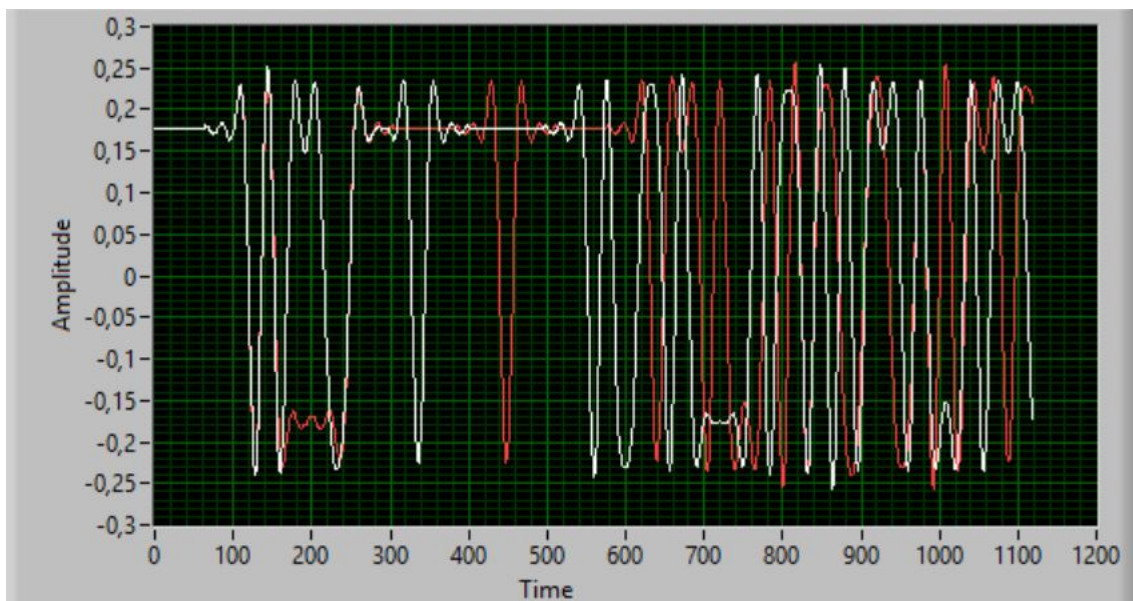


Figura 3.6: Código para Modulación QPSK

Para la palabra Dato como petición y con los valores antes mencionados a la salida del modulador se tiene el siguiente diagrama de constelación y la forma de onda que contiene toda la trama a ser transmitida por los radios usrp n210. Ver figuras 3.7



(a) Constelación



(b) Forma de onda a transmitir correspondiente a la trama

Figura 3.7: Salidas del Modulador QPSK

Antes de ingresar la información a transmitir a los radios USRP N210, dicha trama en bits pasa por colas tipo FIFO con el fin de evitar sobreflujos y sobrecargas al sistema. Ver figura 3.8.

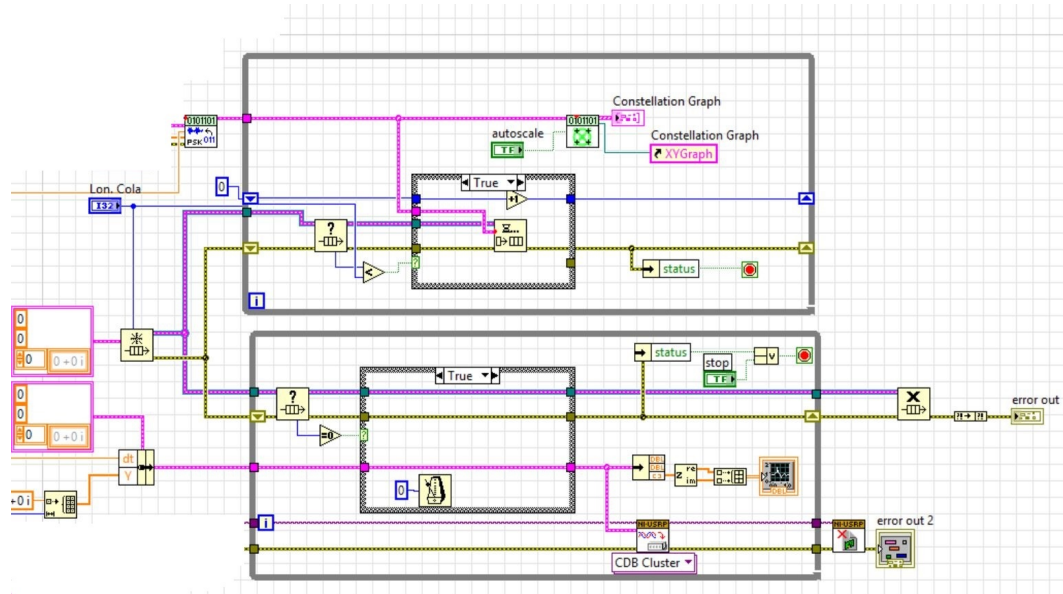


Figura 3.8: Programa para el manejo de Colas

Programa para configuración del radio transmisor USRP N210

Para configurar los radios USRP N210 para la transmisión se requieren los siguientes bloques en labview [25]:

- niUSRP Open Tx Session: crea una sesión de transmisión de datos entrantes al USRP, requiere la dirección IP del dispositivo como entrada y provee una salida para identificar y administrar la sesión de comunicación activa con el USRP (session handle out).
- NiUSRP Configure Signal: Se encarga de configurar los parámetros necesarios para la señal de transmisión o de recepción, donde se debe especificar el canal y el nombre de la antena activa, la frecuencia de muestreo, frecuencia central y ganancia, además se debe ingresar la señal encargada del manejo de la sesión activa.
- niUSRP Write Tx Data: Permite enviar los datos IQ al USRP para que pueda transmitir esos datos a la frecuencia de portadora especificada por él ni USRP Configure Signal.
- niUSRP Close Session: Termina la sesión activa con el dispositivo.

El programa para la transmisión en los radios USRP lo podemos observar en la siguiente figura 3.9.

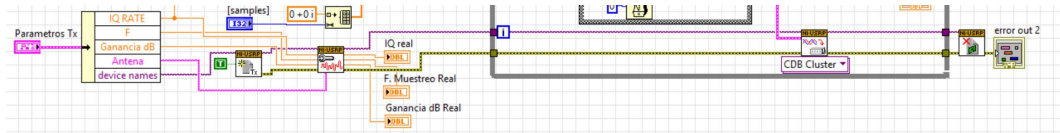


Figura 3.9: Programa para configurar el transmisor USRP N210

La siguiente figura 3.10 muestra el programa completo que integra todo lo relacionado a la transmisión.

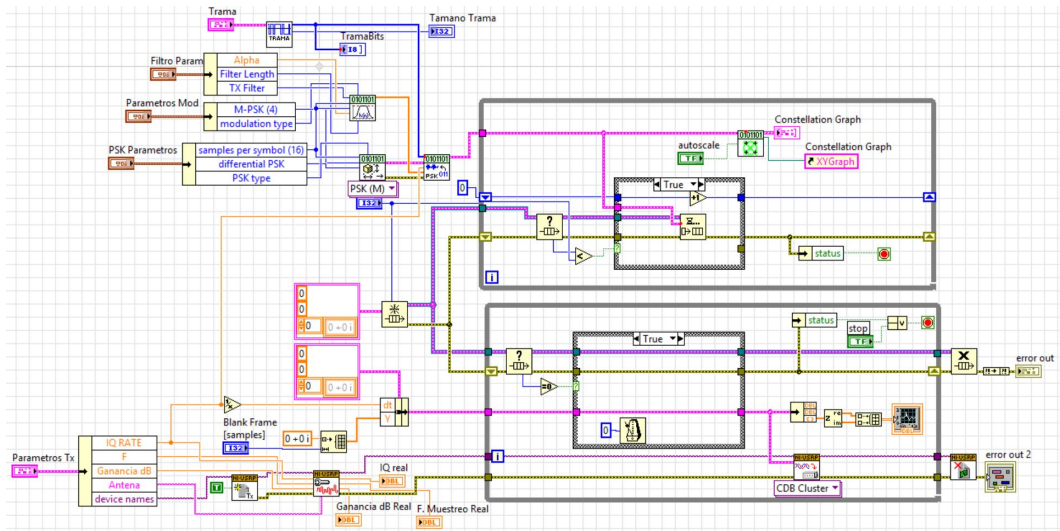


Figura 3.10: Programa completo para la transmisión

3.2. Desarrollo del Receptor

Para la recepción se llevan a cabo los procesos inversos al transmisor que son la demodulación, la decodificación de canal, decodificación de fuente, para terminar con los datos que fueron enviados entendibles para ser procesados.

Programa para configuración del radio Receptor USRP N210

El primer paso en todo el proceso de recepción es la configuración del radio USRP N210 para recibir la información, este requieren los siguientes bloques en labview [25]:

- niUSRP Open Rx Session: crea una sesión de recepción de datos provenientes al USRP, requiere la dirección IP del dispositivo como entrada y provee una salida para identificar y administrar la sesión de comunicación activa con el USRP (session handle out).
- NiUSRP Configure Signal: bloque explicado en el transmisor.
- niUSRP Initiate: Inicia la sesión de adquisición de datos, requiere la señal encargada del manejo de la sesión activa del USRP, el controlador del USRP pasa al estado de funcionamiento (running state).
- niUSRP Fetch Rx Data: Entrega el número de muestras especificado que fueron obtenidas por el USRP provenientes del canal indicado, además se puede seleccionar el tipo de datos de salida (Clúster, forma de onda, doble o entero)
- niUSRP Abort: Detiene la adquisición de datos iniciada previamente, el controlador del USRP pasa al estado terminado (done state)
- niUSRP Close Session: Termina la sesión activa con el dispositivo.

El programa para la recepción en los radios USRP lo podemos observar en la siguiente figura 3.11.

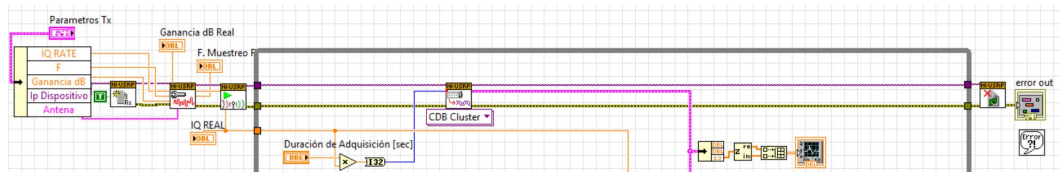


Figura 3.11: Programa para configurar el Receptor USRP N210

Demodulador

En este punto el programa debe identificar la forma de onda recibida en los radios USRP y convertirlas en un array de 1's y 0's conociendo que se está hablando de modulación QPSK. En labview se usa el VI MT Demodulate PSK.

Para una correcta demodulación se requiere de los mismos parámetros ingresados al modulador como los del filtro raíz de coseno alzado $\alpha = 0,5$, tamaño del mismo igual a 8 y 16 muestras por símbolo.

En la siguiente figura 3.12 se muestra todo el programa involucrado en la demodulación.

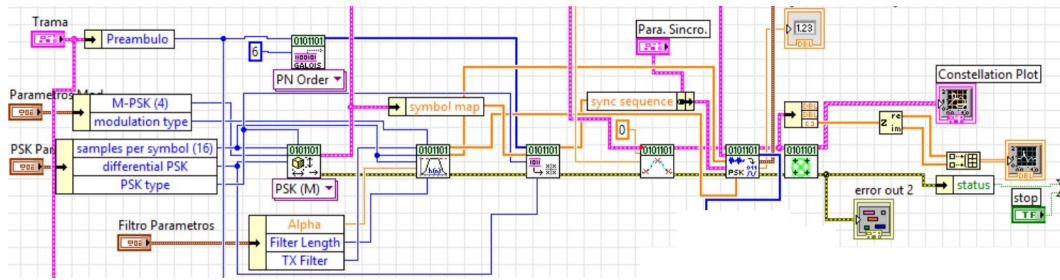


Figura 3.12: Programa para la demodulación

3.3. Decodificador de Canal

Identificada el inicio de la trama se procede a separar cada uno de los campos de esta, uno de ellos es el valor de verificación del CRC y otro es el campo de datos sobre el cual se ejecuta el mismo algoritmo del CRC y se calcula el valor de verificación del lado del receptor. Se comparan estos dos valores de verificación si son iguales la trama fue recibida correctamente sin errores, si son distintos hubo cambios en la trama, por ende esta se descarta y se pide al transmisor el reenvío de la misma.

3.4. Decodificador de Fuente

Si la verificación con CRC dio correcta cada uno de los campos de la trama recibida en bits son separados para identificar la fuente, el destino y los datos para ser procesados y convertirlos a datos comprensibles es decir en una cadena de caracteres nuevamente.

El campo de fin en la trama tiene una funcionalidad similar al preámbulo, en este caso sirve para identificar el fin de la trama. Este valor es similar en el transmisor y en el receptor.

En la figura 3.13 se puede ver el programa para la decodificación de canal y de fuente.

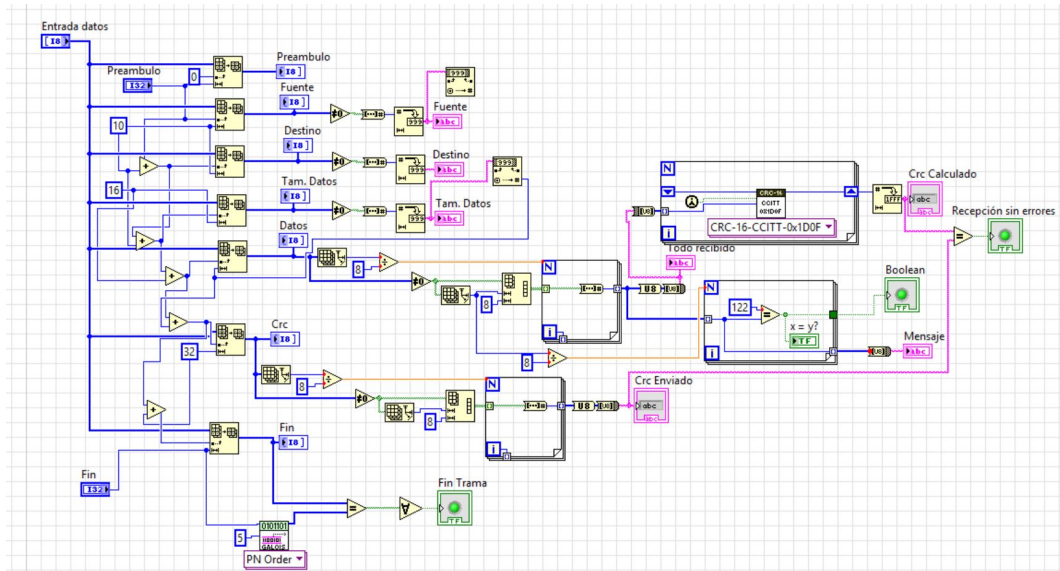


Figura 3.13: Decodificación de canal y de fuente

La siguiente figura 3.14 muestra el programa completo que integra todo lo relacionado a la recepción.

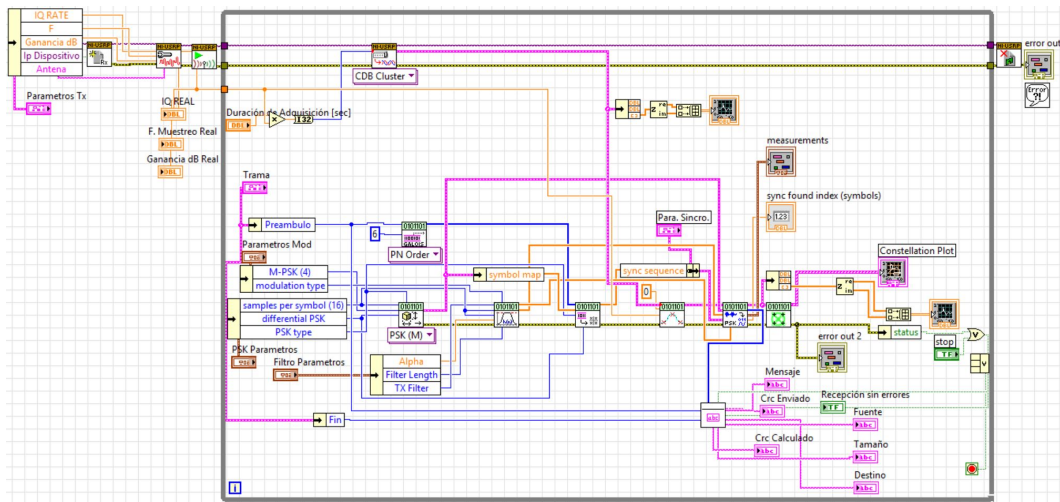


Figura 3.14: Programa completo para la Recepción

3.5. Sincronización

La sincronización es un punto importante en la transferencia de datos ya que permite la coordinación entre el transmisor y receptor. Esta básicamente

consiste en tener un mismo identificador en el transmisor como en el receptor. Para este trabajo se destinaron dos campos de la trama llamados preámbulo y fin, el preámbulo es el encargado de sincronizar e indicar donde comienza la trama y el fin donde termina esta. En ambos campos se tienen destinados 16 bits y tienen la misma estructura en ambos lados de la transmisión.

3.6. Implementación en Hardware

Para la implementación en hardware del código anterior, se usarán dos radios configurables por software USRP N210, cada uno de los radios estará conectado a un computador, para así conformar los nodos transmisor y receptor ver figura 3.15.

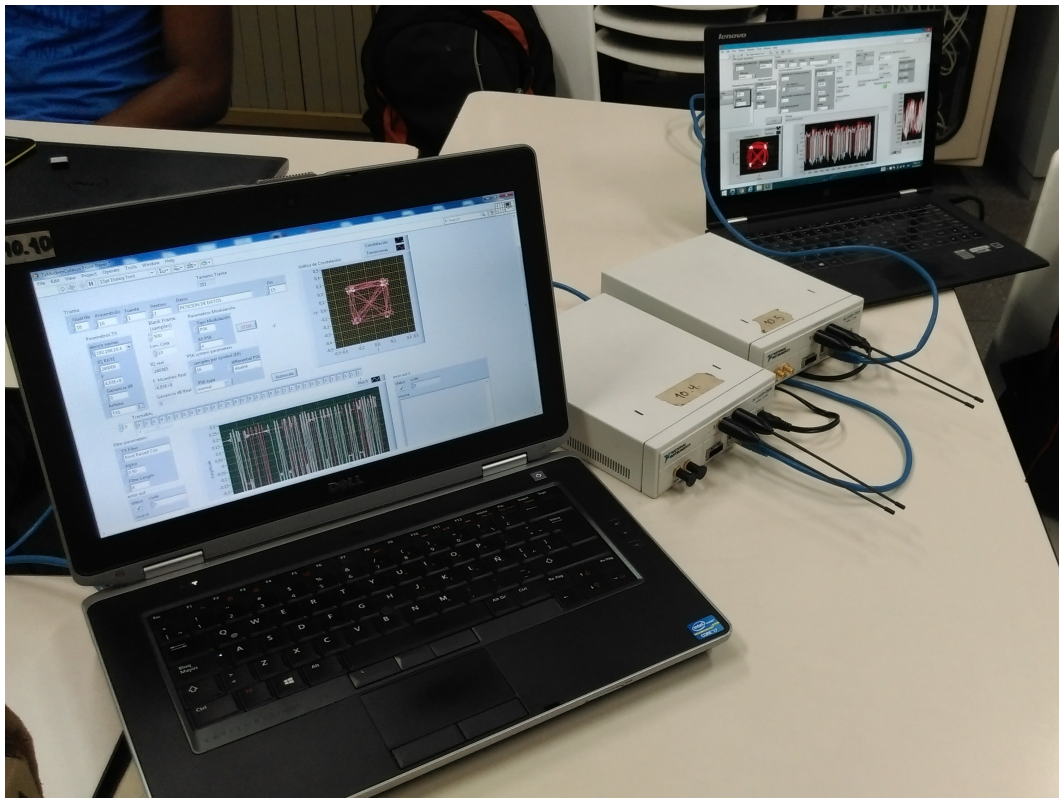


Figura 3.15: Implementación en Hardware

Las características básicas del radio USRP-N210 con una tarjeta WBX se pueden observar en la tabla 3.1 [26].

Tabla 3.1: Características del radio USRP N210

Item	Valor
Rango de frecuencia	50MHz - 2.2 GHz
Potencia	50MHz - 1.2 GHz / 17 - 20 dBm 1.2 GHz - 2.2 GHz / 15 - 18 dBm
Rango de ganancia de salida	25 dB
Precisión de frecuencia	50 PPM
Ancho de banda en tiempo real	20 MHz
Rango de ganancia	0 - 31 dB
DAC	400 MS/s, 16 bit
DAC	SFDR 80 dB
Sensibilidad	-130 dBm
Figura de Ruido (FN)	5 dBm

Con la configuración anterior se realiza una prueba en el laboratorio transmitiendo la palabra Dato a 403MHz con una ganancia de 3db , dicha ganancia dará al radio una potencia aproximadamente de -10dbm [27]. Los resultados se pueden observar en la figura 3.16.

lo que nos lleva a concluir que se realizó un proceso de transmisión-recepción sin errores.

3.7. Pruebas de Campo

Verificado el funcionamiento del software en laboratorio, se procederá a realizar pruebas de campo dentro de la UPB. Se ubicará el transmisor en la zona de comidas, y se tendrán 3 puntos de recepción. El primer punto de recepción se encuentra a 15 metros del transmisor, el segundo a 34 metros y el tercer punto a 203 metros. Se debe tener en cuenta que los dos primeros puntos de recepción tienen línea de vista con el transmisor, mientras que el tercero no posee línea de vista.

3.7.1. Parametros de configuración

- Frecuencia de operación de 403Mhz
- La ganancia del lado del transmisor será de 30db lo que da al transmisor una potencia de aproximadamente 17dbm siendo este valor muy cercano a la potencia máxima del radio, para los dos primeros puntos de recepción la ganancia será de 3db , mientras que para el tercero se utilizara 30db .
- Para el filtro raíz de coseno alzado se tendrá un $\alpha = 0,5$, tamaño del mismo igual a 8 y 16 muestras por símbolo.
- Para el preámbulo, fin y bits de guarda se utilizarán 16 bits.
- Modulación QPSK y un IQ Rate de 240,000

En la figura 3.17 se puede observar la ubicación del transmisor y los puntos de recepción en el campus de la UPB.



Figura 3.17: Ubicación de transmisor y receptor en prueba de campo

3.7.2. Resultados obtenidos en la prueba de campo

En la prueba de campo realizada en la UPB se obtuvo los siguientes resultados para la información '2016-01-19 16-28-00 001 NI 0010 PR 0020 P1 02540' enviada en el transmisor:

Para los dos primeros puntos de recepción los datos enviados han llegado de manera satisfactoria, ver figura 3.18.

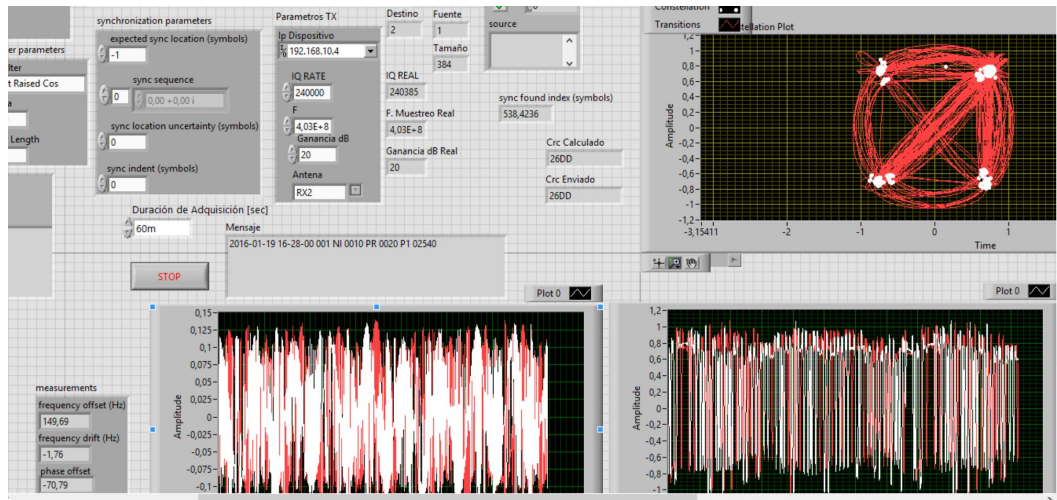


Figura 3.18: Pureba exitosa de Recepción

Para el tercer punto de recepción la prueba no fue satisfactoria al no llegar los datos transmitidos ver figura 3.19.

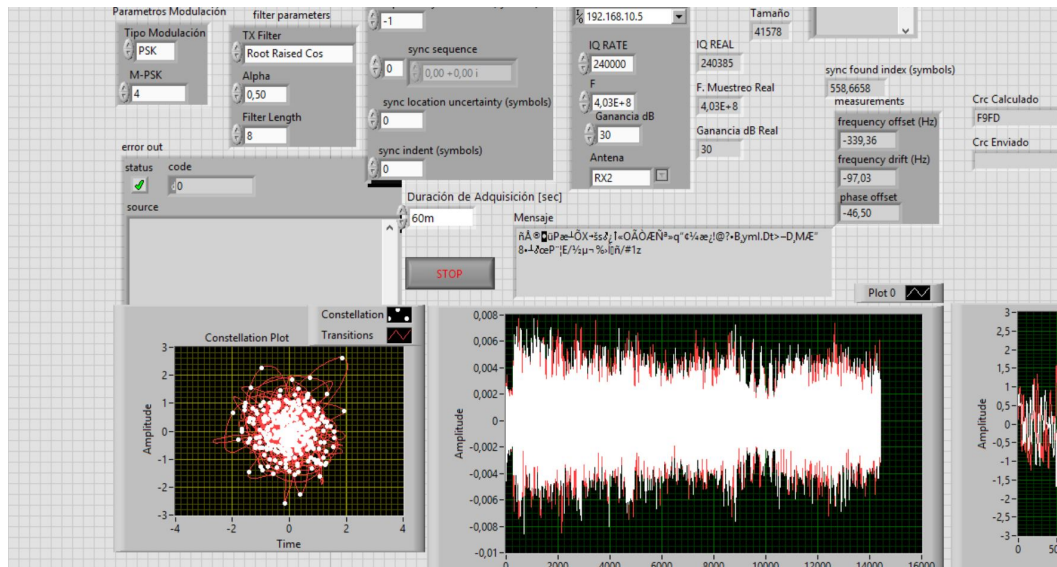


Figura 3.19: Prueba No Exitosa

Los dos primeros puntos de recepción tenían línea de vista y no superaban los 40 m esto facilitó la recepción correcta, mientras que el tercer punto no tiene línea de vista y posee varios obstáculos como edificios y árboles, esto último sumado a la baja potencia del radio y las antenas de cero ganancias da el resultado obtenido de no recepción.

Nota

Luego de tener establecido los elementos necesarios para una transmisión confiable entre las estaciones, solo habrá que adicionarles los datalogger, para esto solo se requiere un código de comunicación serial en labview para el intercambio de los datos recepcionados y los datos a ser transmitidos entre los radios y el datalogger. Este apartado no se realizó en este trabajo debido a la falta de licenciamiento de la frecuencia a utilizar de 403 Mhz para su uso en condiciones fuera de laboratorio.

Capítulo 4

Análisis de Resultados y Prototipado

La relación Señal a Ruido (SNR), magnitud del vector de error (EVM) y la tasa de bit en error (BER) son los parámetros de desempeño más comunes para medir la calidad de un sistema de comunicaciones. SNR es una medida directa entre la potencia relativa del ruido comparada con la señal, SNR se puede utilizar para predecir el desempeño de los sistemas en términos de recepción correcta. Lo que de igual forma se puede lograr utilizando BER, es decir, la relación entre bits lanzados y bits que se recibieron erróneamente. BER se ha convertido en el parámetro de desempeño más popular tanto en la industria como en la investigación.

Magnitud del Vector de Error, SNR y BER

La magnitud del vector de error (EVM) es una relación, en porcentaje, entre la magnitud del símbolo original y la magnitud de error promedio de los símbolos recibidos, el cual cuantifica el rendimiento de un radio digital transmisor o receptor. Es decir, este parámetro cuantifica la desviación de los símbolos transmitidos a partir de su posición ideal, sin tomar en cuenta el ruido o interferencias que pueden presentarse. De esta manera, este parámetro permite conocer la calidad de modulación.

EVM da una idea de la calidad de la señal modulada, la cual se origina cuando los bits se asignan a los símbolos en un plano complejo en sistemas de modulación como QPSK, 16 QAM entre otros. [28] [29] . Ver figura 4.1.

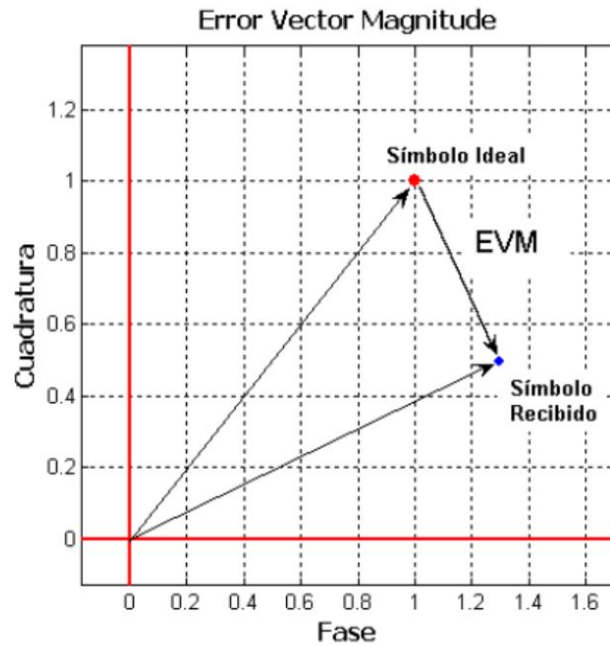


Figura 4.1: Magnitud del Vector de Error

Para calcular el EVM se usa la siguiente ecuación:

$$EVM_{rms} \% = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I - I_e)^2 + (Q - Q_e)^2}{\sum_{i=1}^n (I)^2 + (Q)^2}} * 100$$

donde I es la componente I de la señal de referencia, Q es la componente Q de la señal de referencia, I_e es la componente I de la señal recibida y Q_e es la componente Q de la señal recibida. [30] [31]

Una señal enviada por un transmisor ideal o recibida por un receptor ideal tendría todos los puntos de la constelación en los lugares ideales, sin embargo varias imperfecciones en la aplicación (tales como ruido de fase, fuga de portadora entre otros) hacen que los puntos de la constelación reales se alejen de los lugares ideales. [32]

La SNR tiene se puede hallar con el EVM de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$SNR = -10 \text{Log}(EVM/100 \%)$$

La importancia de la ecuación anterior es que se puede relacionar el EVM con la BER a través de la relación señal a ruido SNR. [33] [34]

4.1. Desempeño del Transmisor

Para analizar el comportamiento del transmisor se analizará su funcionamiento con el software implementado.

Funcionalidad del Transmisor

El radio no presento inconvenientes para transmitir la trama en las pruebas realizadas en campo y laboratorio. El software implementado funcionó adecuadamente generando la señal a transmitir bajo la modulación QPSK y filtro raíz de coseno alzado, ver gráfica 4.2. El radio no presento bloqueos al transmitir de manera continua.

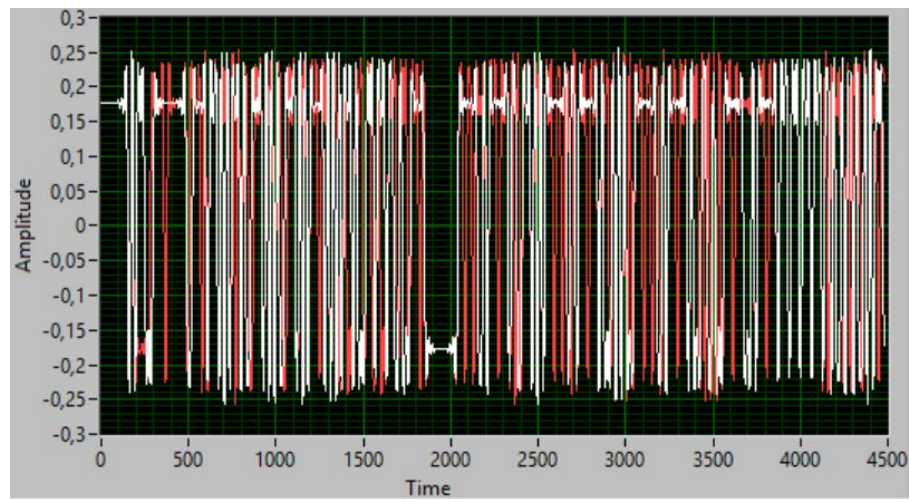


Figura 4.2: Señal Transmitida por el Radio USRP

Teóricamente con el modelo de Longley Rice simulando las condiciones bajo las cuales se aplicaron las pruebas de campo se tendría un alcance teórico de 380 metros. Ver gráfica 4.3.

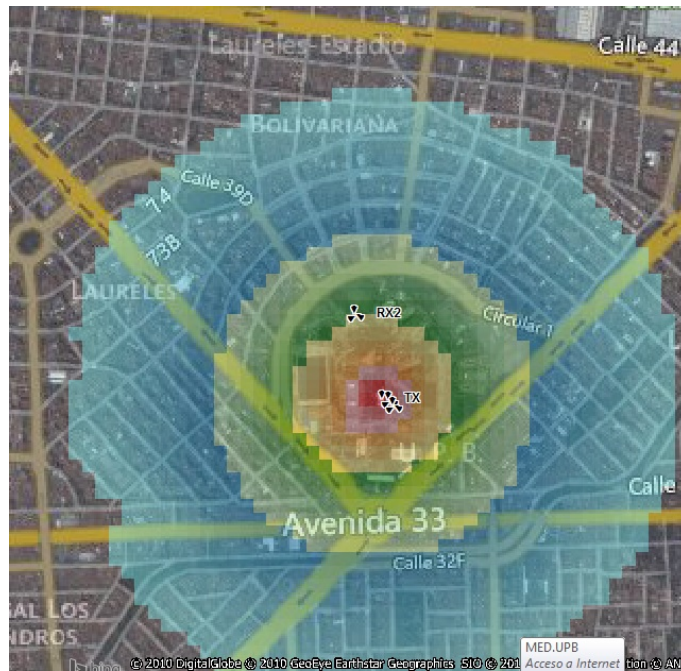


Figura 4.3: Alcance teórico del transmisor

Teniendo en cuenta las limitaciones de potencia de los radios y las antenas utilizadas, se concluye que el transmisor funcionó de manera adecuada en las pruebas realizadas al modular la trama y transmitirla sin errores.

4.2. Desempeño del Receptor

Evaluaremos inicialmente el receptor en condiciones ideales, es decir cerca del transmisor para así analizar el software implementado en los radios. Luego se evaluarán las pruebas de campo y por último el desempeño con el EVM.

Desempeño del Software

Bajo las condiciones de cercanía entre el transmisor y receptor, este último demoduló adecuadamente la señal al sincronizar con el preámbulo y fin. Al entrar en sincronismo con la trama enviada, desempaqueta los campos de información, fuente, destino, CRC enviado por el transmisor y el tamaño de la información. Con esta información el receptor calcula el CRC y lo compara con el enviado, dando ambos el mismo valor, lo que significa que la recepción se llevó a cabo sin errores. Ver figura 4.4.

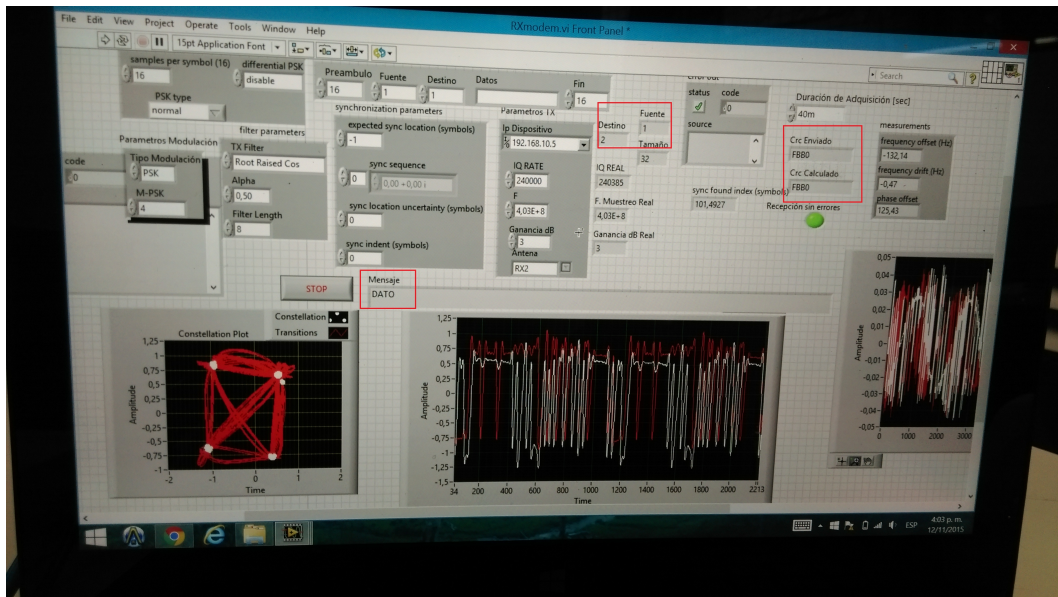


Figura 4.4: Recepción

Otra prueba realizada fue poner el transmisor de forma continua, y el receptor se ejecutó varias veces. El resultado obtenido fue la identificación sin problemas de la información enviada, concluyendo que el software implementado en la parte de recepción funciona de manera adecuada.

Desempeño en pruebas de campo

En las pruebas de campo las dos primeras recepciones a 15 metros y 34 metros la recepción se llevó a cabo sin inconvenientes, mientras que el tercer punto de recepción ubicado a 203 metros no se obtuvieron resultados satisfactorios, esto debido a la baja potencia de transmisión de los radios USRP N210, a las antenas utilizadas de cero ganancia y a los obstáculos presentes entre el transmisor y receptor como árboles y varios edificios que atenuaron rápidamente la señal. Este último resultado era algo predecible por el conocimiento de antemano de las limitaciones con que se contaban.

EVM, SNR y BER en el Receptor

Para la evaluación del EVM se trabajará en condiciones de laboratorio con distancia entre el transmisor y receptor de 1 metro y variando la potencia de recepción y transmisión con la ayuda de la ganancia en los radios. En la figura 4.5 se muestra el diagrama de constelación de una de las señales de prueba.

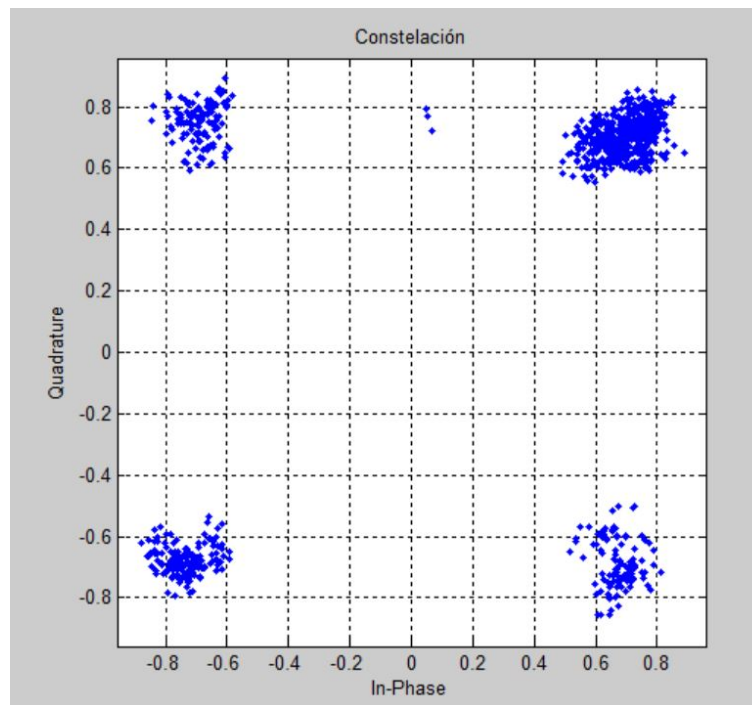


Figura 4.5: Constelación en el Receptor

Los resultados obtenidos para el EVM y la SNR los podemos ver a continuación en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: EVM

Ganancia Tx	Ganancia Rx	EVM%	SNR(dB)
15	20	9,75	10,110
15	15	10,41	9,825
15	10	10,32	9,863
15	5	10,86	9,642
10	20	11,44	9,416
10	15	11,82	9,274
10	10	11,81	9,278
10	5	11,38	9,439
5	20	12,77	8,938
5	15	11,8	9,281
5	10	11,55	9,374
5	5	11,8	9,281

Promediando los valores del EVM obtenido en la tabla 4.1 se tiene un EVM de 11,3%, lo que significa que los símbolos estarán desviados de su posición de referencia un valor de 0,08 tomando como punto de referencia $\pm 0,7071$ en ambas componentes I y Q dependiendo del cuadrante en que se encuentre. Este valor del EVM es muy bueno ya que el símbolo permanecerá en el cuadrante correcto permitiendo una debida identificación en el receptor.

La SNR tiene un valor promedio de 9,47 dB, valor muy bueno ya que nos da un BER aproximado de 10^{-5} (Ver figura 4.6) lo que significa que por cada 100 mil bits transmitidos habrá uno erróneo.

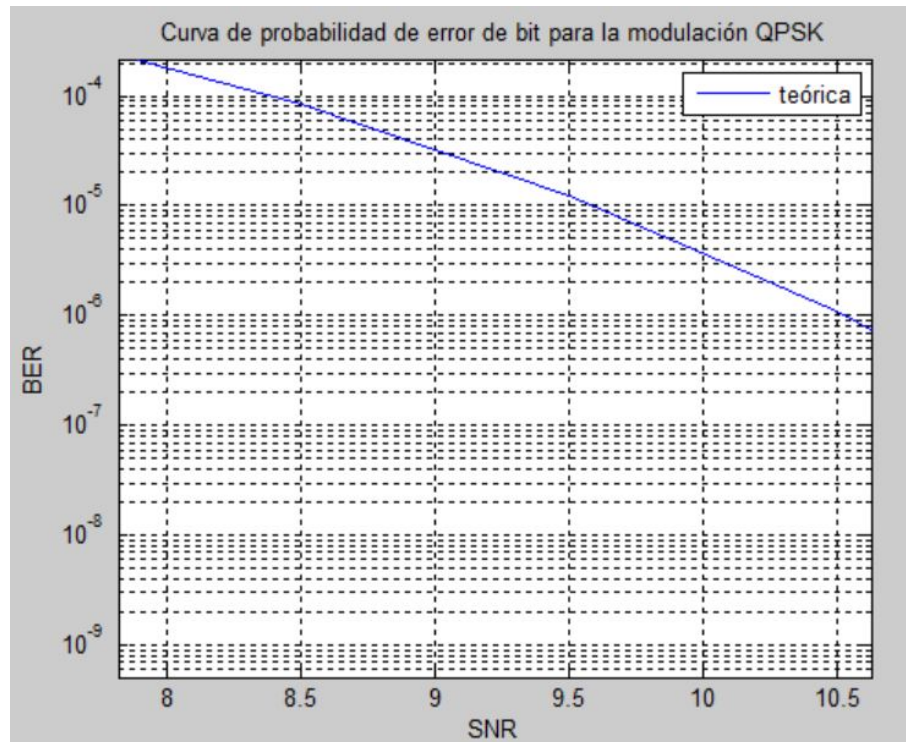


Figura 4.6: BER para QPSK

De la tabla 4.1, también se deduce que para potencias de transmisión mayores se tiene una mejora leve en el EVM y en la SNR.

4.2.1. Prototipo

En esta sección se hablará sobre el prototipo usado para las pruebas y cuál será el recomendado para cumplir los requerimientos de cobertura. También se hará un presupuesto de cada uno de ellos en su parte de hardware.

Prototipo de Prueba

El radio usado para la transmisión y recepción es el USRP N210, acompañado de la antena VERT400 de 0dbi de ganancia en la banda de 400Mhz, ambos de la compañía Ettus. Se requiere de un computador portátil básico para instalar el software, en nuestro caso este sería labview. Cable Patch Cord para conectar el radio al computador. También es necesaria la tarjeta de adquisición de datos y cable usb serial para conectarla al computador portátil.

El costo por estación con el prototipo de prueba es de 7,502,500,00 pesos, se puede ver en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Costo por Estación del Prototipo de Prueba

Elemento	Costo unidad	Cantidad	Costo Total
Antena Vert400	\$ 164.000,00	2	\$ 328.000,00
Radio USRP N210	\$ 6.203.000,00	1	\$ 6.203.000,00
Patch cord	\$ 8.000,00	1	\$ 8.000,00
Usb Serial	\$ 63.500,00	1	\$ 63.500,00
Portatil	\$ 700.000,00	1	\$ 700.000,00
Tarjeta	\$ 200.000,00	1	\$ 200.000,00
			\$ 7.502.500,00

Una esquema básica del prototipo de prueba es la siguiente 4.7.

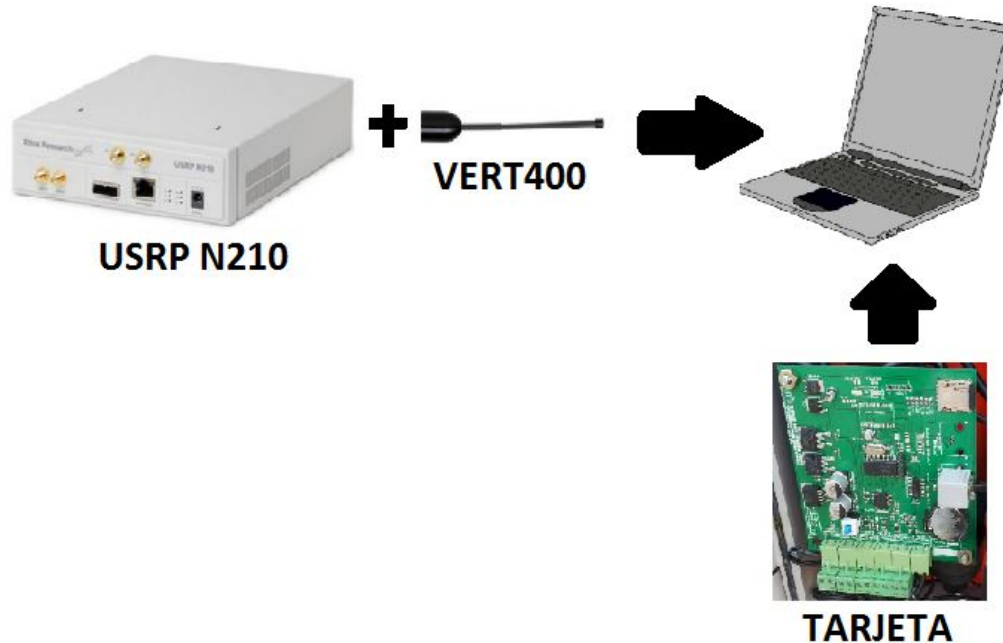


Figura 4.7: Esquema del Prototipo de Prueba

Prototipo Recomendado

Con los elementos del prototipo de prueba solo se consiguió la transmisión y recepción a una distancia muy corta, debido a la baja potencia del radio USRP N210 de 20dBm y a la baja ganancia de las antenas de 0dBi. Con esta conclusión se hablará a continuación de los elementos necesarios que complementen o sustituyan algunos de los componentes del prototipo de prueba, con el fin de cubrir la distancia de 12,28 km y lo establecido en este trabajo con el protocolo.

Inicialmente se recomienda el cambio de radio por el USRP B200 mini con una potencia máxima de 10dBm, el cual debe complementarse con un amplificador de rf ABL0600-01-2740 con una ganancia de 21 dB. Las antenas se recomiendan para la frecuencia de 400 Mhz las CA5-400 de Katherin con 12 dBi de ganancia. El resto de elementos son los mismos del prototipo de pruebas.

Con estos elementos se calcula la PIRE:

$$PIRE = P_{tx} + G_{amplificador} + G_{antena_{tx}} - Perdida_{Conectores}$$

$$PIRE = 10dBm + 25dBm + 12dB - 1dB$$

$$PIRE = 46dBm$$

Con el prototipo propuesto se alcanza una PIRE máxima de 46 dBm cubriendo el mayor valor encontrado en las simulaciones de 44dBm para alcanzar la distancia requerida de 12,28 km entre las estaciones central y de monitoreo.

El costo por estación bajo este prototipo recomendado es de 5,711,500,00 pesos, lo podemos ver en la tabla 4.3.

Tabla 4.3: Costo por Estación del Prototipo Recomendado

Elemento	Costo unidad	Cantidad	Costo Total
Amplificador ABL0600	\$ 1.000.000,00	1	\$ 1.000.000,00
Antena katherin	\$ 600.000,00	2	\$ 1.200.000,00
Radio USRP B200	\$ 2.540.000,00	1	\$ 2.540.000,00
Patch cord	\$ 8.000,00	1	\$ 8.000,00
Usb Serial	\$ 63.500,00	1	\$ 63.500,00
Portatil	\$ 700.000,00	1	\$ 700.000,00
Tarjeta	\$ 200.000,00	1	\$ 200.000,00
			\$ 5.711.500,00

Una esquema básica del prototipo recomendado es la siguiente 4.8.

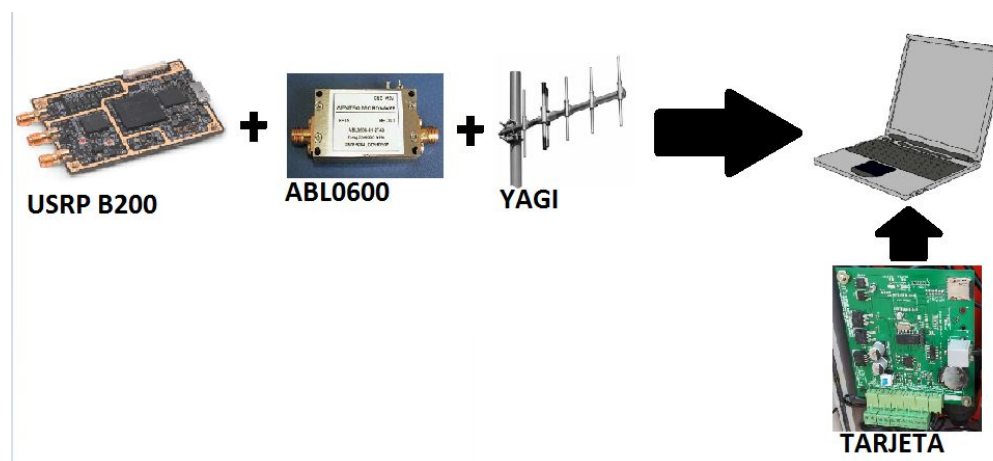


Figura 4.8: Esquema del Prototipo de Prueba

Disposiciones del Prototipado

Analizando ambos prototipos se concluye que el mejor es el recomendado debido a su menor costo y a que es el que cumpliría con los requisitos para una

transmisión-recepción entre las estaciones de monitoreo y central separadas una distancia de 12,28km.

Se empleó el prototipo de prueba para este trabajo bajo condiciones de laboratorio debido a la falta de licencia para transmitir en la banda de 400 Mhz y su uso en las estaciones reales.

En la tabla 4.4 se muestran los parámetros y equipos para el prototipo recomendado con los cuales se cubrirá la distancia entre los nodos estudiados y a su vez ejecutarán el protocolo de comunicaciones desarrollado en este trabajo.

Tabla 4.4: Equipos y parámetros del prototipo recomendado

Componente o Parámetro	Valor
Radio USRP B200	10dBm de potencia máxima
Amplificador de rf ABL0600-01-2740	Ganancia 21 dB
Antena CA5-400 Katherin	Ganancia 12dBi
Frecuencia	403 Mhz
Modulación	QPSK
Trama	Máximo 600 bits

Comparación entre la tecnología usada por SIATA y la propuesta en este trabajo

En la tabla 4.5 se comparó la tecnología usada actualmente para la transmisión de los datos por SIATA que es mediante módems GPRS y la propuesta en este trabajo que es la de radio frecuencia utilizando SDR. La comparación en este punto no es la ideal debido a que la implementación del protocolo propuesto no se pudo llevar a cabo por no tener la licencia para emitir en la frecuencia seleccionada.

Tabla 4.5: Comparación entre la tecnología usada (Modems GPRS) y la estudiada en este trabajo basada en radio frecuencia

	Modems GPRS		Radio Frecuencia usando SDR	
Item	Ventaja	Desventaja	Ventaja	Desventaja
Cobertura	Buena en zonas urbanas	Deficiente en zonas rurales	Cobertura tanto en zonas rurales y urbanas	Mayor cobertura mayor potencia
Tasa de Envío	Controlable		Controlable	
Confiabilidad		Perdida de datos	Verificación de la información	
Costo	Menor que RF	Pago mensual plan de datos	No requiere pago mensual	Más Costoso que el Modem
Escalabilidad		Requiere trabajo para ser escalable	Facil de implementar	
Adaptabilidad		Funciona como servidor o cliente	Puede ser servidor y cliente al mismo tiempo	
Protocolo		TCP/IP - UDP	Fácil de implementar	

De la tabla 4.5 se concluye que a pesar de que la tecnología planteada es más costosa de la que se usa actualmente, esta tendrá cobertura sobre el nodo meteorológico con confiabilidad en los datos y fácil adaptación y escalabilidad a las necesidades de SIATA. Si sumamos todo esto al protocolo propuesto dará una estación de monitoreo meteorológico de alta confiabilidad para el monitoreo en tiempo real.

Capítulo 5

Conclusiones

- Para hacer uso de frecuencias destinadas a ayudas a la meteorología se requiere tramitar ante la Agencia Nacional del Espectro (ANE) y MinTIC su licenciamiento.
- La potencia necesaria para la transmisión de información desde la estación de monitoreo hasta la central debe ser de 44dBm, esta potencia fue la más grande que se halló con el modelo simulado de Longley Rice. Se toma esta potencia porque las condiciones de no línea de vista, difracción y medio ambiente que se tienen en el enlace requiere de una buena potencia para transmitir la información de forma confiable.
- El canal tiene desvanecimiento plano y este es lento, por esta razón no hay necesidad de ecualizar, solo con manipular la ganancia es suficiente.
- EL protocolo usa un servicio no orientado a la conexión con acuse de recibo, junto con un protocolo simple de comunicación con timeout, y el acuse de recibo se realizó con Piggyback Acknowledgment. Se usa para la detección de errores un CRC con un polinomio de 16 bits y para el control de acceso al medio se tiene en cuenta uno centralizado. La trama diseñada tiene un tamaño máximo de 600 bits. El protocolo propuesto es sencillo debido a que se tiene poco tráfico, bajas colisiones y es más fácil de implementar en hardware.
- La implementación en el nodo descrito no se pudo llevar a cabo debido al no licenciamiento de la frecuencia a utilizar de 403 Mhz.
- El software implementado en los radios para cumplir con el protocolo de diseño, cumplió a cabalidad bajo pequeñas distancias (menores a 100 m) ya que a largas distancias se tienen limitaciones de equipos y potencia.
- EL desempeño de la transmisión se evaluó con el EVM, dando alrededor de 11,3% en el receptor, lo que indica que los símbolos estarán desviados

0,08 del valor ideal. Con este valor de desviación, el receptor no tendría inconvenientes en identificar el símbolo QPSK dando un buen desempeño al sistema transmisor-receptor.

- La SNR da en promedio 9,47 dB, valor que da un BER aproximado de 10^{-5} , lo que significa que por cada 100 mil bits transmitidos habrá uno erróneo dándole al sistema confiabilidad en el intercambio de información.
- El prototipo de prueba es adecuado para analizar el funcionamiento del protocolo, pero no fue suficiente para ser utilizado en las estaciones de monitoreo y central debido a que no alcanzaba la potencia necesaria de 44dBm para cubrir la distancia de separación de las estaciones.
- El prototipo recomendado es 2 millones más económico y tiene los elementos necesarios para alcanzar hasta 46 dBm dando cobertura al nodo estudiado. Este prototipo es escalable.
- Poder implementar este nodo bajo el protocolo desarrollado dará al SIATA autonomía en su red hidrometeorológica y no dependerá de un tercero para la transmisión de información.
- La ampliación de los lugares de instalación permitirá más cobertura en zonas críticas y para el monitoreo será una consecuencia directa de tener una red autónoma.
- La transmisión confiable de datos que dará esta red, permitirá la notificación de alertas tempranas que evitarán pérdidas de vidas humanas y materiales.
- Antes de llevar este proyecto a una fase de industrialización se debe estudiar un modelo de negocio adecuado para este en su comercialización. También se requiere hacer un estudio de potencias y compatibilidad electromagnética para evaluar con precisión el desempeño del prototipo recomendado. Aplicando lo anterior se podrá llegar a un buen desarrollo de este producto dándole potencial para convertirse en un producto de uso nacional.

Bibliografía

- [1] T. S. Rappaport. *Wireless Communications - Principles and Practice (2nd Edition)*. Prentice - Hall, 2002.
- [2] A. P. I Vinadé. Estimación ciega de canal en sistemas OFDM. Master's thesis, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Telecomunicaciones Barcelona, 2011.
- [3] Área Metropolitana del Valle de Aburrá, CORANTIOQUIA, CORNARE, and Universidad Nacional de Colombia. Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río aburrá (POMCA), 2007.
- [4] E. López, L. J. Mejía, and M. Hermelin. La importancia de la instalación de redes meteorológicas densas en las ciudades localizadas en montañas del trópico húmedo. *Meteorología Colombiana*, 5:115–122, 2002.
- [5] ANE. Agencia nacional del espectro, Agosto 2015.
- [6] República de Colombia Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. Cuadro nacional de atribución de bandas de frecuencia, 2010.
- [7] MinTIC. Ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones, R. d. C., Agosto 2015.
- [8] SIATA. Sistema de alertas temprana de medellín y valle de aburrá, Julio 2014.
- [9] H. Cárdenas. Planificación de un sistema de comunicaciones con UAVs para situaciones de emergencia empleando mapas digitales del terreno. Master's thesis, 2014.
- [10] J. T. T. Cortés. Propagación de RF en las bandas: LF, MF, HF, VHF, UHF y VHF. Master's thesis, Universidad de las Américas Puebla, México, 2003.
- [11] J. Giménez, J. López, D. G Barquero, and N. Cardona. Modelos de propagación radio para redes de TDT móvil en la banda UHF. *S&T*, 9(18), 2011.
- [12] B. Mesa, D. Díaz, and Quintero. Herramienta software de planificación radio para sistemas de acceso inalámbrico fijo en ambientes rurales. *GTI*, 20, 2009.

- [13] V. P. Gil Jiménez. *Algoritmos en transmisión y recepción para OFDM en entornos multi-usuario*. PhD thesis, Universidad Carlos III de Madrid, 2005.
- [14] T. Wayne. *Sistemas de Comunicaciones Electrónicas*, volume 4. Prentice - Hall, 2003.
- [15] A. Tanenbaum. *Redes de computadoras*, 2003.
- [16] J. Moreno and M. Ramírez. *Diseño de un protocolo de comunicaciones digitales en las bandas de operación VHF para las comunicaciones de organismos de socorro*. Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [17] J. B. Márquez. *Transmisión de Datos*. Universidad de los Andes.
- [18] Cisco Networking Academy. *Ccna exploration 4.0 aspectos básicos de networking*.
- [19] M. Á. Cervantes. *Ahorro en el consumo de energía en las redes de sensores inalámbricas con el protocolo S-MAC*. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2008.
- [20] M. Romero, J. Concejero, J. Benjumea, O. Rivera, J. Roper, G. Sánchez, and F. Castillo. *Redes Locales*. Ediciones Paraninfo, 2014.
- [21] Pere Martí i Puig. *Los sistemas de comunicaciones digitales*. Universidad Oberta de Catalunya.
- [22] M. Mezoa. *Introducción a los sistemas de comunicaciones digitales*. OpenStax-CNX, 2010.
- [23] D. Castañeda. *Implementación de un modulador-demodulador digital QPSK en base a un FPGA como prototipo para un micro satélite*. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [24] H. Campanella, A. Morales, and R. Saad. *Modulación QPSK no ideal en UTRA-TDD: Análisis de fase y potencia*. *Ingeniería & Desarrollo. Universidad del Norte*, 12, 2002.
- [25] G. R. Portilla. *Implementación de un transmisor 802.11 OFDM basado en SDR*. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, 2015.
- [26] F. Muños. *Diseño e implementación de una estación terrena para la obtención de imágenes satelitales meteorológicas usando la plataforma USRP.*, 2014.
- [27] J.J. Rugeles Uribe, T. Mancilla, and C. Clavijo. *Caracterización de la plataforma de radio definida por software usrp n210 - wbx*. *Revista Gerencia Tecnológica Informática*, 12, 2013.

- [28] V. Torres, F. Esparza, and F. Falcone. Análisis del comportamiento de esquemas de modulación adaptativos en lte. *XXIV Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio*, 2009.
- [29] I. G. Mestre. *Sistemas de banda ancha sobre fibras ópticas multimodo empleando fuentes estrechas y excitación modal central*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2008.
- [30] M. Aamer. *Development of An Integrated Silicon Photonic Transceiver For Access Networks*. PhD thesis, Universidad Politécnica de Valencia, 2013.
- [31] M. V. Valle. Planificación radio LTE de una red de telefonía móvil en el municipio de rota. Master's thesis, Universidad Oberta de Catalunya, 2016.
- [32] L. A. Bolaños and A. Ruiz. Diseño de un algoritmo para el análisis y monitoreo de parámetros de señales LTE 4g utilizando la plataforma de radio definido por software (USRP). Master's thesis, Universidad Politécnica Salesiana Sede Guayaquil, 2015.
- [33] Agilent Technologies. Testing and troubleshooting digital rf communications receiver designs. Application Note.
- [34] T. Xiao-heng and T. Teng-jiao. Evm simulation and analysis in digital transmitter. *ScienceDirect*, 16, 2009.