

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA AUTÓNOMO CONSTITUIDO  
POR NODOS WIFI EN AREAS RURALES ALIMENTADO CON MODULOS  
FOTOVOLTAICOS**

**RICARDO ANDRES DIAZ SUAREZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2011**

Trabajo de investigación de maestría:

**DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA AUTÓNOMO CONSTITUIDO  
POR NODOS WIFI EN AREAS RURALES ALIMENTADO CON MODULOS  
FOTOVOLTAICOS**

Autor:

**RICARDO ANDRES DIAZ SUAREZ, Ing.**

Trabajo de investigación presentado para optar por el título de:  
Magister en Ingeniería Electrónica

Director:

**Óscar Gualdrón González, PhD**

Codirector:

**José de Jesús Rugeles Uribe, MIE**

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y  
TELECOMUNICACIONES  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
2011

## DEDICATORIA

A DIOS por ser mi guía,  
A mis padres y hermanos por su apoyo,  
A mis profesores por su invaluable aporte  
A mis amigos, por su paciencia.  
Gracias

*¡Amar al señor tu Dios con todo tu corazón  
con toda tu alma y con tus fuerzas !*

Mateo 22:37.

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad Industrial de Santander (UIS).

A la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T).

Al grupo de investigación en Conectividad y Procesamiento de Señal (CPS).

Al profesor Óscar Gualdrón González, director del trabajo de investigación, por su valiosa colaboración y su confianza depositada en mí.

Al profesor Jose de Jesús Rugeles Uribe, Codirector del trabajo de investigación por su aporte y su acompañamiento.

A los ingenieros Jairo Iván Flórez, Mauricio Erazo, William Salamanca, Sergio Abreo, Carlos Fajardo, Carlos Angulo, Luis Alejandro Osorio, Julián Rolón, Daniel Velazco, Diego Medina, por su apoyo y amistad.

A Cesar Augusto Bravo, Victor Alfonso Colmenares, Javier Fernando Arias y Andrés Felipe Alba, Leonardo Meza, Diego Moreno por su colaboración en el aporte para consecución de los objetivos del trabajo de investigación.

A todas aquellas personas que brindaron su ayuda para llevar a buen término el trabajo de investigación.

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN	20
1. ESTADO DEL ARTE DEL IEEE 802.11 SOBRE REDES DE LARGO ALCANCE.	25
1.1 MODIFICACIONES IEEE 802.11 CSMA/CA PARA ENLACES DE LARGO ALCANCE.	26
2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE DE TRES PROTOTIPOS DE NODO WI-FI AUTONOMOS PARA ENTORNOS RURALES.	33
2.1 REQUERIMIENTOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS NODOS DE COMUNICACIÓN.	33
2.2 SELECCIÓN DEL HARDWARE PARA EL NODO WI-FI.	35
2.2.1 Selección del radio Wi-Fi.	39
2.2.2 Selección de las tarjetas principales para el tráfico de datos.	43
2.2.3 Selección del OS y firmware.	48
2.3.1 Consumo de la carga.	52
2.3.2 Autonomía de la Carga (Nodo Wi-Fi):	52
2.4 CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO DE POTENCIA NODO WI-FI.	54
2.5 MODELADO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.	55
2.6 DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA EL NODO WI-FI .	58
2.6.1 Cálculo horas solares pico.	59
2.6.2 Balance de energía para el sistema fotovoltaico.	59
3. DESCRIPCIÓN DEL DESEMPEÑO IEEE802.11b/g EN ENLACES PUNTO A PUNTO DE LARGO ALCANCE PARA ZONAS RURALES.	63
3.1 DESEMPEÑO DE LA CAPA FÍSICA DEL IEEE802.11 SOBRE REDES DE LARGO ALCANCE.	63
3.1.1 Cálculo del nivel de señal recibida en el receptor.	64
3.2.1 Desempeño de la capa MAC del IEEE802.11 para redes de largo alcance.	69

3.3 CALCULO DEL THROUGHPUT UDP UNIDIRECCIONAL SOBRE UN ENLACE IEEE802.11 DE LARGO ALCANCE.	74
3.3.1 El Mecanismo Básico.	74
3.3.2 Calculo del throughput UDP unidireccional IEEE802.11b/g Bursting y Fastframing.	77
3.4 MODELOS QUE PERMITEN CALCULAR EL THROUGHPUT TCP.	80
3.5 PREDICCIÓN DEL THROUGHPUT UDP SATURADO BIDIRECCIONAL.	81
3.6 MODELO DE JAVIER SIMO.	83
3.7 MÁQUINA DE ESTADOS PARA MODELAR EL IEEE 802.11 DCF SOBRE REDES DE LARGO ALCANCE.	84
4. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE PRUEBAS.	90
4.1 METODOLOGÍA DE PRUEBAS PROPUESTA PARA DETERMINAR EL DESEMPEÑO DE UNA RED IEEE802.11.	90
4.1.1 Identificar las métricas de red para caracterizar el desempeño de un enlace de red.	94
4.1.2 Definición para el escenario de pruebas en laboratorio/campo.	96
Escenario de pruebas en laboratorio.	96
4.1.3 Identificar el tipo de pruebas.	98
4.1.4 Descripción y selección de los generadores de tráfico.	99
4.1.5 Selección de los parámetros para realizar las pruebas del <i>throughput</i> con el estándar IEEE802.11b/g .	102
4.1.6 Pruebas de laboratorio	106
4.1.7 Pruebas de los enlaces de comunicación en campo abierto.	112
5. CONCLUSIONES	119
BIBLIOGRAFÍA	123
ANEXOS	131

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Descripción del las MAC para zonas rurales.	32
Tabla 2. Costo de las antenas tipo grilla en función de la ganancia.	36
Tabla 3. FCC 15.247 en la banda 2.4 GHz (Enlaces Punto a Punto).	37
Tabla 4. Especificaciones de radios Wi-Fi IEEE802.11b/g comerciales.	41
Tabla 5. Características radio XR2	43
Tabla 6. Características de las diferentes tarjetas principales	45
Tabla 7. Descripción de la tarjeta principal nodo repetidor.	47
Tabla 8. Comparación de los diferentes drivers para chip Atheros.	50
Tabla 9. Medidas consumo de corriente nodo Wi-Fi	54
Tabla 10. Medición del consumo de potencia en W.	55
Tabla 11. Dimensionado del sistema fotovoltaico.	61
Tabla 12. Descripción del prototipo nodo cliente y repetidor.	62
Tabla 13. Regulación PIRE según localización geográfica.	64
Tabla 14. Parámetros simulación modelo <i>Longley-Rice</i> .	66
Tabla 15. Características del generador Iperf y D-ITG	100
Tabla 16. Relación entre la desviación estándar y la media con el número de observaciones.	102
Tabla 17. Parámetros MADWIFI Configuración IEEE802.11b	103
Tabla 18. Parámetros MADWIFI Configuración IEEE802.11g	104
Tabla 19. Material de laboratorio y Campo.	106
Tabla 20. Máxima distancia para un enlace punto a punto en función de la velocidad en la capa física con el radio XR2 y un margen de 20dB.	108
Tabla 21. Nodos instalados para las pruebas de campo.	112

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Diagrama del estado del arte del IEEE802.11 para enlaces de largo alcance.	31
Figura 2. Esquema de una red troncal	33
Figura 3. Diagrama de una red troncal.	34
Figura 4. Velocidad de transmisión función de la distancia.	38
Figura 5. Ganancia de la antena en función de la distancia.	38
Figura 6. Radio XR2	43
Figura 7. Descripción motherboard Alix2d2	47
Figura 8. Diagrama interno del nodo repetidor y cliente.	51
Figura 9. Radiación solar sobre el nodo Wi-Fi repetidor	53
Figura 10. Modelo de un sistema fotovoltaico corto término.	56
Figura 11. Consumo de corriente en el panel y consumo en la carga	57
Figura 12. Estado de carga de la batería.	58
Figura 13. Corriente de fuga y estado de carga (SOC).	60
Tabla 11. Dimensionado del sistema fotovoltaico.	61
Figura 14. Modelo prototipos de comunicación autónoma.	61
Figura 15. Prototipos de comunicación autónoma	61
Figura 16. Nivel de señal recibida modelo de Friss con 3 márgenes de desvanecimiento.	65
Figura 17. Predicción pérdidas por propagación modelo ITM/ Longley-Rice.	67
Figura 18. Paquetes recibidos en función nivel de ruido -99dBm.	69
Figura 19. El Slottime es comparable a 2 veces el tiempo de propagación	72
Figura 20. El Slottime es menor a 2 veces el tiempo de propagación	73
Figura 21. El Slottime es menor pero comparable al tiempo de propagación.	73
Figura 22. Esquema simplificado de una transacción UDP sobre IEEE802.11	75
Figura 23. Comparación throughput UDP unidireccional 802.11b 11Mbps	76
Figura 24 Throughput UDP unidireccional para el IEEE802.11g	77

Figura 25. Throughput UDP unidireccional para el estándar IEEE 802.11b	77
Figura 26. Transmisión bursting IEEE802.11	78
Figura 27. Transacción del IEEE802.11 usando fastframing.	79
Figura 28. Bursting y fastframing sobre el IEEE802.11	79
Figura 29. Transacción sobre el protocolo TCP.	81
Figura 30. Throughput UDP Bidireccional en un enlace Punto a Punto IEEE802.11b considerando $\sigma = \sigma_{estandar} + 2 * \delta$ .	82
Figura 31. Throughput UDP Bidireccional en un enlace Punto a Punto IEEE802.11g considerando $\sigma = \sigma_{estandar} + 2 * \delta$ .	83
Figura 32. Máquina de estados que representa un transmisor DCF.	85
Figura 33. Máquina de estados que representa al receptor.	86
Figura 34. Throughput UDP Bidireccional IEEE802.11b $\sigma = \sigma_{estandar}$	87
Figura 35. Comparación Modelo de J.Simo con el Modelo CPS IEEE802.11b	88
Figura 36. Comparación modelo J. Simo, emulador de canal, NS-2 ,proyecto EHAS, modelo CPS.	89
Figura 37. Comparación Throughput UDP Bidireccional para 11Mbps	89
Figura 38. Diagrama de red de una red troncal	90
Figura 39. Diagrama de bloques metodología de pruebas	93
Figura 40. Diagrama características que evalúan el desempeño de un hop.	94
Figura 41. Topología de red para las pruebas de laboratorio.	96
Figura 42. Throughput UDP unidireccional IEEE802.11b vs distancia.	109
Figura 43 .Throughput UDP Unidireccional IEEE802.11g vs Distancia.	109
Figura 44. Throughput TCP Unidireccional IEEE802.11b vs la distancia	110
Figura 45. Throughput TCP Unidireccional IEEE802.11g.	110
Figura 46. Throughput UDP unidireccional Bursting IEEE802.11b.	111
Figura 47. Throughput UDP unidireccional Bursting y Fastframe IEEE802.11.	111
Figura 48. Sitios seleccionados para los enlaces de comunicación.	112
Figura 50. Medición del throughput UDP IEEE802.11b Bidireccional vs Distancia.	114

Figura 51. Medición del throughput UDP IEEE802.11b Bursting unidireccional.	114
Figura 53. Mediciones de la potencia de señal recibida canal 3 enlace entre A-B mediciones se realizaron en el punto B.	116
Figura 54. Mediciones de la potencia de señal recibida canal 6 enlace entre A-F mediciones se realizaron en el punto F.	117

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. BIT ERROR RATE MODEL.	131
ANEXO B. CARACTERÍSTICAS DEL ESTÁNDAR IEEE802.11	136
ANEXO C. MODELO IEEE802.11 PARA CALCULAR EL <i>THROUGHPUT</i> UDP/ TCP UNIDIRECCIONAL.	142
ANEXO D. MEJORAS EN LA UTILIZACIÓN DEL CANAL BURSTING Y FASTFRAME.	152
ANEXO E. MODELO DE BIANCHI	156
ANEXO F. MODELO DE JAVIER SIMO PARA EL CÁLCULO DEL THROUGHPUT SATURADO EN UN ENLACE PUNTO A PUNTO DE LARGO ALCANCE.	164
ANEXO G. SIMULACIONES SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO EN DIFERENTES CIUDADES.	173
ANEXO H. MARCO REGULATORIO COLOMBIANO QUE DEFINE LOS INDICADORES DE CALIDAD PARA LOS SERVICIOS DE TELECOMUNICACIÓN.	200
ANEXO I. PLANO NODOS WI-FI.	205
ANEXO J. PRUEBAS REALIZADAS	218
ANEXO K. ESTADO DEL ARTE DEL IEEE802.11	226

## RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA AUTÓNOMO CONSTITUIDO POR NODOS WIFI EN AREAS RURALES ALIMENTADO CON MODULOS FOTOVOLTAICOS.<sup>1</sup>

AUTOR:  
RICARDO ANDRES DIAZ SUAREZ<sup>2</sup>

PALABRAS CLAVES: Wi-Fi, fotovoltaico, rural, solar, MAC, desempeño.

El desarrollo de este trabajo permite obtener los criterios para diseñar y construir prototipos Wi-Fi autónomos alimentados con sistemas fotovoltaicos y se desarrolla una metodología para caracterizar su desempeño en radio enlaces punto a punto de largo alcance en zonas rurales.

En la primera fase de este trabajo de investigación se elabora el estado del arte del estándar IEEE802.11 como una solución para ofrecer conectividad en zonas rurales incluidas las diferentes modificaciones de la capa de control de acceso al medio y la capa física para optimizar el desempeño de esta tecnología al desplegar redes de largo alcance.

Para la segunda fase se define el diseño del prototipo Wi-Fi autónomo. Para el módulo de comunicación se definen las especificaciones hardware y software que permitan integrar los componentes de cada nodo Wi-Fi considerando aspectos como la PIRE, bajo consumo de potencia, costo y operabilidad en campo abierto. El diseño del módulo de alimentación se desarrolla en dos etapas la primera se centra en la medición de las variables (tensión y corriente) en el panel solar, baterías y la carga para realizar un balance de energía del sistema fotovoltaico. En la segunda etapa se modela y dimensiona el sistema de alimentación fotovoltaico para alimentar el nodo de comunicación Wi-Fi.

En la tercera fase se especifica el desempeño de la capa física y MAC del IEEE802.11 a partir de modelos teóricos y se describe de forma analítica el comportamiento de las métricas de red en función de la distancia.

Para la última fase se diseña e implementa una metodología de pruebas en laboratorio y a campo abierto donde se evalúa el desempeño de las métricas de red sobre un enlace punto a punto IEEE802.11 de largo alcance.

---

<sup>1</sup> Trabajo de grado Maestría

<sup>2</sup> Facultad Físico Mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director Óscar Gualdrón Gonzáles. Codirector Jose de Jesus Rugeles Uribe

## SUMMARY

TITLE: DESIGN AND CHARACTERIZATION OF AN AUTONOMOUS SYSTEM MADE UP WIFI NODES IN RURAL AREAS SUPLIED BY MODULE PHOTOVOLTAIC.<sup>3</sup>

AUTHOR:  
RICARDO ANDRES DIAZ SUAREZ<sup>4</sup>

KEY WORDS: Wi-Fi, fotovoltaic, rural, solar, MAC, performance.

**DESCRIPTION:** This work set the design and construction criteria for a prototype of a Wi-Fi self-powered photovoltaic systems as well as a methodology to describe their performance when used in long distance point-to-point links rural areas.

In the first phase of this research a state of the art of the IEEE802.11 standard as a solution to provide rural connectivity is presented. It includes several modifications of the control access medium layer and the physic layer to optimize the performance of this technology for deploying long-range networks.

The second phase describes the design of the Wi-Fi autonomous prototype. The communication module includes the hardware and software needed to integrate the elements of each node Wi-Fi node taking into account aspects such as EIRP, low power consumption, cost and open field operations. The power module design is developed in two stages; the first stage focuses on the measurement of variables (voltage and current) in the solar panel, the batteries and the charge to do an energy balance of the photovoltaic system. In the second stage models and sizes the photovoltaic system to power the communication node Wi-Fi.

In the third phase specifies the performance of the physical layer and MAC the IEEE802.11 from theoretical models and is described analytical performance metrics based on network distance.

For the last phase is designed and implemented a testing methodology laboratory and open field which assesses the performance of network metrics on a point-to-point long IEEE802.11 reach.

---

<sup>3</sup> Trabajo de grado Maestría.

<sup>4</sup> Facultad Físico Mecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director Óscar Gualdrón Gonzáles. Codirector Jose de Jesus Rugeles Uribe

## **OBJETIVOS DEL TRABAJO DE LA INVESTIGACIÓN**

### **OBJETIVOS GENERAL**

Diseñar, implementar y caracterizar un sistema de comunicación inalámbrica 802.11 de largo alcance alimentado con energía solar como alternativa para la conectividad de emplazamientos rurales.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Para alcanzar el desarrollo del objetivo general y de acuerdo con los pasos que se necesitan para dicho desarrollo, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Realizar un análisis comparativo de las diferentes arquitecturas Hardware, distribuciones Linux, y drivers para el diseño de nodos IEEE 802.11 de bajo costo y bajo consumo de potencia con el propósito de mejorar las prestaciones en radio enlaces de largo alcance.
- Diseñar e implementar una metodología de pruebas en laboratorio que permita establecer el desempeño respecto a la tasa de transferencia de datos para un radio enlace con nodos IEEE 802.11 en función de la distancia.
- Caracterizar el desempeño de un radio enlace punto a punto en espacios abiertos construido con nodos IEEE 802.11 y alimentados con sistemas fotovoltaicos, en aspectos como son la transferencia de datos en función de la distancia y la autonomía.

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

El uso de nodos Wi-Fi autónomos de bajo costo tienen gran perspectiva como parte de las soluciones para brindar servicio de cobertura de datos en emplazamientos rurales de Colombia, donde su población rural se encuentra dispersa, tienen bajo poder adquisitivo, la orografía agreste y el desinterés de los ISP para ofrecer conectividad en estos lugares. En la actualidad no se conocen propuestas concretas ni estudios que demuestren el desempeño de estos sistemas como enlaces de última milla de largo alcance en emplazamientos rurales de Colombia, es decir se desconoce las tasas de datos en función de la distancia, también no se tienen estudios que permitan dimensionar un sistema fotovoltaico para proveer autonomía a un sistema de comunicación Wi-Fi considerando el recurso solar disponible y los modos de operación de este sistema de comunicación. Por eso se hace necesario desarrollar una propuesta de investigación que permita establecer el desempeño que ofrece Wi-Fi en cuanto a las velocidades de transmisión, además que permita establecer una metodología de diseño para determinar la autonomía de estos nodos de comunicación en diferentes modos de operación.

La tecnología Wi-Fi fue diseñada y optimizada para ofrecer la conectividad en redes de área local. Cuando se utiliza Wi-Fi en la construcción de enlaces de largo alcance se hace necesario realizar algunas consideraciones sobre la capa de control de acceso al medio, la capa física y el hardware utilizado, para poder realizar el despliegue de redes en área extensa.

Los enlaces Wi-Fi punto a punto puede establecer enlaces de decenas de kilómetros, pero los enlaces punto a multipunto se restringen a radio enlaces de pocos kilómetros, esto se debe principalmente a las limitaciones que impone la potencia isotrópica radiada equivalente, el uso de antenas omnidireccionales o arreglos de antenas, la baja utilización del canal de comunicación que tiene el

modo DCF el cual provee el protocolo de acceso CSMA/CA, el problema con los nodos ocultos que aumenta con la distancia entre las estaciones lo cual involucra utilizar el mecanismo RTS/CTS el cual disminuye el *throughput* efectivo entre los diferentes enlaces de comunicación y otro factor que restringe drásticamente el desempeño de estos enlaces son la interferencia generada por otras estaciones o equipos electrónicos que operan en la banda industrial, científica y médica, dentro de este trabajo de investigación nos centraremos en enlaces troncales punto a punto como solución de conectividad de última milla.

En Colombia para ofrecer un proceso de expansión en las tecnologías de la información y comunicación se han realizado en los últimos años grandes inversiones en la instalación de nueva infraestructura en zonas rurales y urbanas. El Ministerio TIC lidera programas de desarrollo en el territorio nacional donde se le ha dado alta prioridad a la expansión de las comunicaciones sociales considerando el uso de enlaces troncales de fibra óptica, microondas y satelitales para ofrecer cobertura. En el país gran parte de la oferta de acceso a internet se logra por iniciativas privadas mediadas por la rentabilidad. Esto conlleva a que la oferta de este servicio se concentre a los centros urbanos donde la amortización de dichas inversiones esté garantizada en unos horizontes razonables, lo cual acrecienta la brecha digital que a pesar de los programas gubernamentales como Compartel [1] el cual hasta la junio del 2010 tiene una cobertura del 62%, principalmente en escuelas, de las cuales sólo la mitad tienen conectividad de banda ancha de 1Mbps y la otra mitad tiene conectividad a 128kbps. Esto muestra que aún no ha logrado tener la penetración deseable en el acceso a banda ancha en escuelas, lugares rurales apartados así como en pequeñas poblaciones situación que restringe el uso de gran cantidad de aplicaciones que requieren calidad de servicio.[2] El Gobierno nacional se ha comprometido con un plan TIC para el periodo 2008–2019 según el cual todo ciudadano en Colombia deberá tener la posibilidad de acceder a las TIC. El plan hace énfasis en tres aspectos que se deben dar a corto plazo por el efecto que pueden ejercer sobre la

masificación de las TIC en la sociedad. El primero de los aspectos es la infraestructura en telecomunicaciones donde se desea ofrecer conexión de banda ancha a través de fibra óptica a 700 municipios del país, los cuales concentran el 90% de la población colombiana. El segundo es la masificación de las TIC en las pequeñas y medianas empresas (Pymes) está se encuentra enfocada en el desarrollo de aplicaciones que incentiven a las empresas el uso de las TIC para mejorar la comercialización de sus productos o servicios y el tercero es el gobierno en línea el cual permite que los entes territoriales, alcaldías y gobernaciones implementen las TIC para ofrecer información y servicios.[3]

Teniendo en cuenta las consideraciones de infraestructura y masificación de las TIC en zonas rurales se presentó a Colciencias por parte del grupo de conectividad y procesamiento de señal (CPS) una propuesta de investigación titulada: “Diseño construcción y caracterización de un enlace autónomo de comunicaciones Wi-Fi para áreas rurales alimentado con energía solar”, en el cual se deben diseñar y caracterizar un grupo de prototipos Wi-Fi alimentados con energía solar de bajo costo que permitan implementar radio enlaces de largo alcance en entornos rurales.[4]

Dentro de este trabajo de maestría se presenta los criterios para el diseño y construcción de nodos Wi-Fi autónomos de bajo costo, así como las pautas de desempeño de estos nodos en enlaces punto a punto de largo alcance en emplazamientos rurales en función de la distancia con respecto a las métricas de red.

## INTRODUCCIÓN

En las zonas rurales que hacen parte de los países subdesarrollados como Colombia y en algunos países desarrollados se carece de soluciones tecnológicas de bajo costo que permitan ofrecer conectividad con el resto del mundo. En consecuencia estas regiones se encuentran en algunos casos marginadas y desprotegidas lo cual incentiva el analfabetismo, la carencia de mecanismos que mejoren la salud pública así como la inexistencia de sistemas de prevención remota contra posibles desastres naturales. Si a ello se le agrega el aislamiento generado por la carencia de vías terrestres en buen estado que permitan acceder a estos emplazamientos, se convierten en factores que disminuyen sustancialmente la calidad de vida y limitan el desarrollo de las comunidades que habitan en estas regiones. Los gobiernos de estos países tratan de mitigar esta situación por la importancia que significa el desarrollo social y tecnológico de estas comunidades desprotegidas, las cuales desafortunadamente constituyen un gran porcentaje de su población. Para ello generan proyectos que les permitan ofrecer servicios de conectividad en estos sitios y establecen programas donde las nuevas tecnologías de la información y la comunicación constituyen un medio para el fortalecimiento y la gestión de iniciativas que permitan mejorar el bienestar y la calidad de vida para las comunidades. En Colombia el gobierno nacional puso en marcha el programa Plan nacional de TIC 2008-2019 [3]. Posteriormente en el 2010 lanzó el programa Plan Vive Digital [5] “Impulsar la masificación del uso de Internet, para dar un salto hacia la Prosperidad democrática”, Este plan incluye cuatro tópicos: conectividad (infraestructura), usuarios, contenidos y aplicaciones.

Para Colombia un programa que ha intensificado la masificación del uso de internet en el país desde el 2004 es el programa Compartel [1] [2], el cual fue creado para dar cubrimiento en los servicios de telecomunicación sobre todo el país. La primera etapa de este programa promovió el desarrollo de iniciativas para ofrecer telefonía rural comunitaria; en su segunda etapa las políticas estuvieron

dirigidas al desarrollo de centros comunitarios de acceso o Telecentros; seguidamente sus esfuerzos estuvieron enfocados en dar conectividad de banda ancha a las instituciones educativas, alcaldías, hospitales, etc; En su tercera etapa se centra en ofrecer banda ancha a las escuelas rurales, lo cual ha incentivado el trabajo de investigación que se presenta a continuación.

La principal limitante en el desarrollo de iniciativas para ofrecer conectividad sobre emplazamientos rurales son los costos en que se incurre cuando se desea implementar sistemas de comunicación para ofrecer servicios de conectividad con buenas prestaciones sobre este tipo de regiones. Entre los costos más relevantes se pueden mencionar: Los equipos de comunicación que permiten ofrecer conectividad con buenas prestaciones sobre estos sitios, las infraestructuras para soportar este tipo de redes, la renta por utilizar cierta banda del espectro radioeléctrico (cuando se requiere licencia), la energía necesaria para el correcto funcionamiento y operación de los equipos (importante cuando la zona rural carece de suministro eléctrico o el servicio de la red eléctrica es inestable e ineficiente), el mantenimiento de los equipos debido a la carencia de gente capacitada en estas regiones y las tarifas de acceso a los proveedores del servicio.[6]

La necesidad de encontrar sistemas comunicación de bajo costo para ofrecer conectividad en estos emplazamientos se origina principalmente en la baja densidad demográfica de estos emplazamientos y el bajo poder adquisitivo de sus habitantes, lo cual hace poca atractiva su oferta para los ISP (*Internet Service Providers*) y los operadores de telefonía celular, debido a la lenta amortización de sus inversiones requeridas. En vista de esta situación algunos entes gubernamentales han desarrollado programas encaminados a ofrecer conectividad en emplazamientos rurales .

Dentro de las tecnologías inalámbricas más comunes para ofrecer conectividad en zonas rurales se tienen las siguientes: VSAT (*Very Small Aperture Terminal*), WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), TETRA (*Terrestrial Trunked Radio*), CDMA450 (*Code Division Multiple Access en 450MHz*), GPRS (*General Packet Radio Service*), DECT (*Digital Cordless Phone System*), WI-FI (*Wireless Fidelity*) basada en la familia de estándares IEEE802.11. Cada una de estas tecnologías tienen características que limitan su desempeño en zonas rurales. Entre las características más importantes se tiene la cobertura, la banda del espectro electromagnético que ocupan, el ancho de banda que soporta, el número de estaciones que pueden acceder al canal de comunicación en forma simultánea (Mecanismo de control para el acceso al medio), los tipos de servicios que puede soportar la red, agregando los costos que se tienen para implementar y desplegar las redes de comunicación utilizando cada una de estas tecnologías en un entorno rural, todos ellos constituyen los criterios de decisión para seleccionar la tecnología más apropiada para ofrecer conectividad sobre diferentes emplazamientos rurales. Una vez consideradas las ventajas y desventajas de cada tecnología Wi-Fi surge como una de las mejores alternativas. [7][8][9]

Debido a la masificación en la fabricación de radios Wi-Fi diseñados para ofrecer conectividad en redes de área local, esta tecnología se presenta como un sistema de comunicación de bajo costo. Además, si se considera que el estándar define en su capa física una velocidad de transmisión máxima de 11Mbps en 802.11b, 54Mbps para 802.11a/g y de 300Mbps con 802.11n (Cuando se utiliza MIMO 2x2 y canal de 40MHz) la tecnología puede ofrecer altas velocidades de transmisión lo cual permite dar soluciones de banda ancha. Otra ventaja de esta tecnología es que funciona sobre la banda ISM (*Industrial Scientific and Medical*), a lo cual se añade que al realizar variaciones en los tiempos definidos en la capa MAC o si se cambia el protocolo para acceder al medio definido en el estándar IEEE802.11, esta tecnología se puede utilizar para desplegar redes de área extensa con

buenas prestaciones. Por todo lo anterior se considera a Wi-Fi como una de las mejores opciones para disminuir la brecha digital en los emplazamientos rurales.

Conociendo la importancia que presenta el IEEE802.11 para conectar emplazamientos rurales se diseñaron tres nodos Wi-Fi autónomos alimentados con sistema fotovoltaico y se caracterizó su desempeño. Para ello, primero se desarrolló una metodología de diseño para la construcción de nodos Wi-Fi de bajo costo que pueda operar sobre redes de largo alcance. El diseño se realizó bajo requerimientos de hardware (Antena, radios, tarjeta principal), software de uso libre (sistema operativo, driver, software de gestión de red) con especificaciones en los límites de distancia en el rango de 0-100 km y con la regulación de potencia isotrópica irradiada equivalente que existe en Colombia para enlaces punto a punto en la banda de 2.4GHz. También se desarrolló una metodología para dimensionar un sistema fotovoltaico para un nodo de comunicación Wi-Fi teniendo presente un estadístico de la radiación solar y diferentes escenarios de consumo de potencia para la carga (nodo cliente y nodo repetidor); además se realizó un modelo de la capa MAC IEEE802.11 para calcular el desempeño en función de las características de red [10][11] *throughput*, retardos, paquetes perdidos y la probabilidad de colisión de esta tecnología sobre enlaces de largo alcance. También se simuló la capa física del estándar para analizar la relación que existe entre la potencia de la señal recibida y el FER (*frame error rate*). Posteriormente se diseñó y desarrolló una metodología de pruebas de laboratorio y en campo abierto que permite calcular las características de red a partir de la inserción de datos conocidos dentro de ésta usando un generador de tráfico (Iperf) con el cual se realizan mediciones del *throughput*, a medida que se modifican los tiempos definidos en la capa de control acceso al medio (MAC) y la capa Física (PHY) (DIFS, Slottime, ACKTimeout) [12], con lo cual se disminuye la probabilidad de colisión y se evitan retransmisiones innecesarias. Finalmente se realizaron pruebas para mejorar la utilización del canal, usando mecanismos como *Bursting* y *fastframing* [13], tanto en campo como en simulación.

Este libro está organizado de la siguiente forma. En el primer capítulo se describe el estado del arte de la implementación del IEEE802.11 sobre redes de largo alcance, incluidas las investigaciones realizadas para el uso y despliegue del IEEE802.11 sobre redes de área extensa con mejoras en los mecanismos de acceso al medio CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Access/ Collision Avoidance*) [12] [13] [14] [15] [16] [17] [18] [19] [20] [21] y TDMA (*Time Division Multiple Access*) [21] [22] [23] [24], así como las modificaciones en hardware y la capa física del IEEE802.11 para optimizar su desempeño en enlaces de largo alcance. En el segundo capítulo se presenta una metodología para diseñar un nodo de comunicación Wi-Fi autónomo alimentado con paneles fotovoltaicos en el rango de 0-100km así como los criterios de selección y para las características del hardware y software del nodo Wi-Fi y la metodología de diseño para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico para alimentar el nodo de comunicación Wi-Fi. En el tercer capítulo se describe la predicción del desempeño del IEEE802.11 sobre redes de largo alcance y se presentan las limitaciones de la capa física EIRP (*Equivalent Isotropically Radiated Power*), RSS (*Received Signal Strength*), BER (*Bit Error Rate*), SNR (*Signal to Noise Ratio*) y la capa MAC (DIFS, *Slottime*, *ACKTimeout*), también se describen modelos para el cálculo del *throughput* UDP y TCP.

Dentro de este tesis se plantean criterios para el diseño, construcción y caracterización de nodos Wi-Fi autónomos, así como los límites que presenta la construcción de enlaces punto a punto con nodos Wi-Fi respecto a la distancia entre los nodos.

## 1. ESTADO DEL ARTE DEL IEEE 802.11 SOBRE REDES DE LARGO ALCANCE.

En este capítulo se describe el estado del arte del IEEE802.11 para enlaces de largo alcance. Esta descripción se presenta con dos enfoques: el primero se centra en modificar algunos parámetros MAC (*Medium Access Control*) y la capa PHY (*Physical*) definidos en el estándar IEEE802.11 los cuales optimizan las prestaciones de este estándar sobre redes de largo alcance; en el segundo enfoque se presentan los nuevos mecanismos para el control de acceso al medio basados en TDMA que mejoran las limitaciones presentes en CSMA/CA.

Dentro del primer enfoque se analiza el control del acceso básico al medio CSMA/CA donde se modifica los tiempos definidos en la capa MAC y PHY del IEEE802.11 (*Cw*, *Slottime*, *DIFS*, *ACKTimeout*, *AIFSN*, *Txop*) [12] [14] [15] para optimizar el mecanismo de acceso básico en enlaces de largo alcance y se presentan las técnicas *bursting* y *fastframing* [13] los cuales mejoran el uso del canal de transmisión después que se gana la etapa de contienda. Éstas últimas aumentan considerablemente las prestaciones del IEEE802.11 en redes de largo alcance. A continuación se describe la técnica *channel bonding*, para incrementar el ancho de banda por canal de comunicación (De 20MHz a 40MHz) lo cual permite incrementar el *throughput*. Además se introducen las técnicas de duplexación *TDD*, *FDD* y se presentan algunas mejoras en Hardware en la construcción del nodo transmisor y receptor como son el uso de antenas altamente directivas para disminuir los efectos de interferencia y con alta ganancia 35dB teniendo presente la EIRP para lograr una mejor SNR sobre enlaces de largo alcance. [25][26][27][28]. El segundo enfoque se centra en los protocolos 2P [22] [29], WILDMAC [30], JAZZYMAL [30] [31], SRAWAN [32] los cuales son los fundamentos del *draft* WIFI-RE (*Wireless Fidelity Rural Extension*) [30][33][34] para el desarrollo de redes Wi-Fi en zonas rurales. En seguida se presenta el protocolo JALDIMAC [35] un protocolo MAC que está diseñado

especialmente para los WISPs (*Wireless Internet Service Provider*), y se presenta MULTIMAC [36], es una estrategia que permite de forma dinámica configurar MAC híbridas entre CSMA/CA, TDMA y otras. Por último se realiza una comparación entre las diferentes mejoras que se le han realizado al IEEE802.11 sobre redes de largo alcance.

## **1.1 MODIFICACIONES IEEE 802.11 CSMA/CA PARA ENLACES DE LARGO ALCANCE.**

La MAC del IEEE802.11 no fue diseñada para operar sobre redes de largo alcance y en consecuencia presentan un pobre desempeño cuando se utilizan para tal fin principalmente por tres razones:

- Las colisiones presentes en largas distancias.
- Un mecanismo de recuperación ineficiente.
- Interferencia entre los enlaces.

Además si se le añade la baja utilización de canal que presenta el control de acceso al medio del DCF sobre enlaces de largo alcance se hace necesario modificar parámetros que permitan mejorar las prestaciones cuando se usa en esas condiciones. [37][38][39].

Dentro de los parámetros que permiten mejorar el desempeño del IEEE802.11a/b/g, se encuentran el *Slottime* y el *ACKTimeout*. El *Slottime* incide sobre la probabilidad de que las dos estaciones colisionen cuando éstas deseen acceder al medio de forma simultánea. La probabilidad de colisión aumenta con la distancia de forma proporcional al número de *Slottime(s)* que logren inicializarse antes de que la estación logre identificar el canal que se encuentra ocupado por la transmisión de otra estación. Cuando se selecciona el valor *Slottime* definido en el estándar aumenta la probabilidad de colisión al incrementar la distancia entre

las estaciones por lo tanto aumenta la cantidad de paquetes perdidos, el *throughput* disminuye y los retardos aumentan. Si el *Slottime* es proporcional a la distancia entre las estaciones se optimiza el *throughput*, aumentan los retardos y disminuye la probabilidad de colisión. A medida que el *Slottime* se aproxima a dos veces el tiempo de propagación, el *throughput* disminuye, los retardos y la cantidad de paquetes perdidos disminuye. El parámetro *ACKTimeout* define el tiempo que la estación transmisora debe esperar el arribo de un ACK paquete de confirmación para asegurar su arribo a la estación receptora, este valor debe estar cercano a dos veces el tiempo propagación para evitar retransmisiones innecesarias.[12][17] [23][37][38]

Cuando se utiliza el estándar IEEE802.11e, basado en EDCF, se introducen nuevos parámetros (CW, TOXP, AIFS) que mejoran sustancialmente el mecanismo de control de acceso. Los parámetros CW y AIFS inciden sobre la probabilidad de colisión cuando las dos estaciones que comparten el medio quieren transmitir de forma simultánea. El parámetro TXOP permite el envío de una o más MPDU (*MAC Protocol Data Unit*) las cuales eventualmente corresponderán a diferentes MSDU (*MAC Service Data Unit*) sin entrar en la etapa de contienda. Con base en el *draft* del IEEE802.11e se desarrolló la técnica *bursting* y la técnica *fast frames*, las cuales buscan optimizar el uso del canal de transmisión que presenta el mecanismo CSMA/CA en modo DCF después de haber ganado la etapa de contienda, aspecto fundamental en enlaces de comunicación de largo alcance. [23][39]

## **1.2 Modificaciones IEEE 802.11 TDMA para enlaces de largo alcance.**

Debido al desempeño que presenta CSMA/CA en presencia de interferencia y la baja utilización de canal que presenta el algoritmo DCF para enlaces de largo alcance se definen mecanismos de acceso al medio basados en TDMA, los cuales mejoran el control de acceso al canal de transmisión. Este mecanismo evita las colisiones que presenta el mecanismo de acceso básico del IEEE802.11,

y le permite operar de una forma más eficiente en presencia de interferencias debido a que las estaciones no pueden percibir que el canal de transmisión se encuentre ocupado en el área circundante del nodo receptor. Además al utilizar TDMA se puede garantizar una optimización en el uso del canal de transmisión, aunque puede incrementar la latencia entre los paquetes y aumentar el desperdicio del ancho de banda, debido a que las estaciones solamente pueden transmitir en un determinado *slot*. Para disminuir los retardos se utilizan *slots* cortos y para aumentar la utilización del canal se incluyen *slots* dinámicos que se construyen a partir de cabeceras más complejas. Todos estos aspectos conllevan a que TDMA utilice una compensación entre el *throughput* y los retardos de acuerdo con las necesidades de cada aplicación. Cuando se utiliza TDMA se debe tener un protocolo que permita asignar *Slots* y un algoritmo de sincronización para evitar las colisiones originadas por relojes asíncronos.[40]

El primer mecanismo de acceso al medio basado en la división en tiempo fue el protocolo 2P, en el que cada estación cambia de un estado transmisión a un estado de recepción cada cierto tiempo después de transmitir cierta cantidad de bytes. Los ACK son enviados cuando se conmuta entre el estado recepción-transmisión. Para mejorar las prestaciones que presenta 2P en presencia de interferencias se diseñó WILDMAC (*Wireless Long Distance MAC*) la cual optimiza el mecanismo de recuperación realizando *bulk ACK*, corrección de errores utilizando un sistema de FEC (*Forward error correction*) y además implementa mecanismos de retransmisiones para evitar pérdidas en los paquetes. [23][30][41][42]

Identificando algunas falencias presentes en 2P y WILDMAC se diseñó JazzyMAC (*An Adaptive, High Performance MAC for Long-Distance Multihop Wireless*) [30][31][43] el cual pretende alcanzar un *throughput* óptimo sobre redes AD-HOC, utilizando *slots* de longitud dinámica a partir del estado local de la red y la información del tráfico observado.

Considerando la necesidad de establecer servicios multimedia (Video y Volp) sobre redes de largo alcance se establece el control de acceso al medio SWRAWAN (*Sectorized Rural Area Wireless Access Network*), permite ofrecer calidad de servicio entre los enlaces de comunicación, utilizando algoritmos de *Round Robin* con la priorización de las colas.[32]

Teniendo presente la necesidad de ofrecer conectividad de largo alcance con buenas prestaciones sobre zonas rurales, caracterizadas por su baja densidad demográfica, a partir de los mecanismos de control de acceso al medio WILDMAC y JAZZMAC, se presenta el *draft* WIFIRE [44] como un nuevo estándar para la construcción de radios que permitan el despliegue de redes en emplazamientos rurales.

Dentro del *draft* se especifican tres tipos de redes: punto-punto, punto-multipunto y redes tipo malla (*AD-HOC*); se acepta como nodo final un terminal móvil celular. En la definición para el control de acceso al medio incorpora un direccionamiento de complejas interacciones de interferencia, adaptabilidad en enlaces con altas pérdidas, reasignación de canal en forma inteligente, adaptabilidad a las fluctuaciones en las demandas de tráfico y la robustez en la red. [34]

Las elevadas inversiones que deben hacer los WISP para el despliegue de redes inalámbricas rurales, las cuales principalmente se le atribuyen a la infraestructura necesaria para instalar los sistemas de comunicación, la baja densidad demográfica presente en estos emplazamientos y su bajo poder adquisitivo generan una fuerte limitante. Como alternativa se presenta el mecanismo de control de acceso al medio JaldiMAC (Jaldi es la palabra Hindu de *fast/quick*) [35], el cual propone utilizar una topología de red punto a multipunto que toma la ventaja de la orografía del terreno para aprovechar torres naturales (montañas, cimas) y ofrecer conectividad en enlaces de comunicación de largo alcance. Sus principales características consisten en optimizar el uso del canal de

comunicación, adaptarse a la asimetría del tráfico de internet, proveer cuasi QoS (*Quality of service*) con lo cual se soporta tráfico sensible a latencia.

En las redes de comunicación inalámbricas existen periodos de contienda bajos donde CSMA/CA es más eficiente y en periodos de alta contienda TDMA presenta mejores prestaciones, con estas premisas se presenta MultiMAC (*An Adaptive MAC Framework for Dynamic Radio Networking*) [36] la cual consiste en el desarrollo de una capa MAC híbrida en la cual se permite mejorar el desempeño de los enlaces de comunicación bajo diferentes condiciones de red. Para el desarrollo de MultiMAC se incorporaron procesos de decisión que se implementan en la MAC de acuerdo con las características del nodo de comunicación o las estadísticas de flujo de datos dentro de la red.

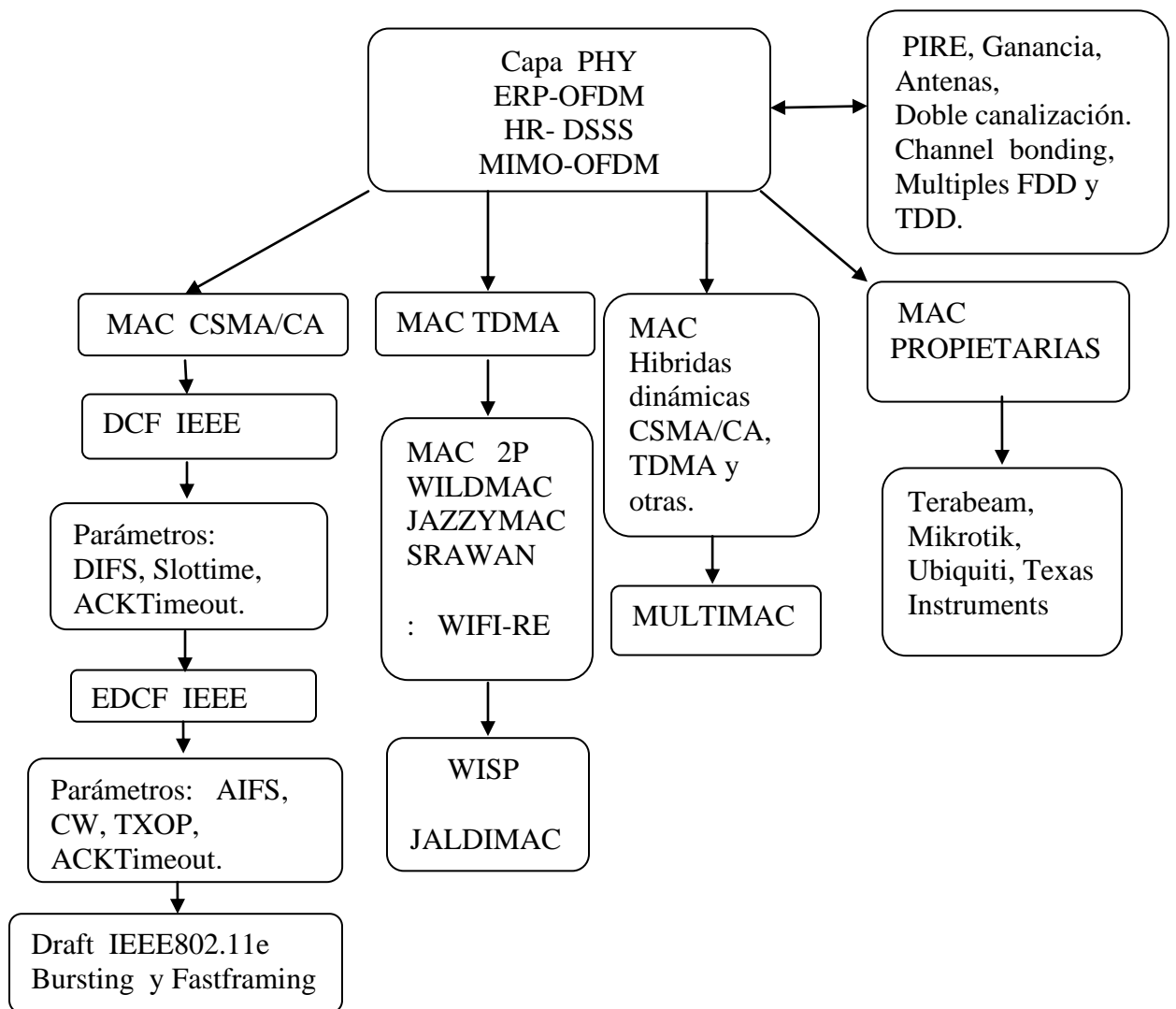
### **1.3 Mejoras en la capa Física y hardware para la construcción de enlaces de largo alcance.**

Para mejorar las prestaciones de *throughput* y el rango de distancia en los enlaces punto a punto de largo alcance utilizando los mecanismos CSMA/CA y TDMA, se aumenta el ancho de canal desde 20-40MHz y se utiliza la técnica MIMO (*Multiple Input/ Multiple output*) definida en la capa física del IEEE802.11n [38] para aumentar las velocidades de transmisión hasta 600Mbps [45]. Además se pueden realizar mejoras utilizando antenas altamente directivas con ganancia 35dBi, sin superar los límites establecidos para la PIRE (Potencia Isotrópica Irradiada equivalente) que dependen de la regulación en cada país. Se puede también utilizar la banda de 5.8GHz para evitar la interferencia presente en la banda de 2.4GHz por otras fuentes de radiación (teléfonos inalámbricos, hornos microondas, etc) u otros equipos Wi-Fi. Adicionalmente se pueden utilizar técnicas como *channel bonding* que permiten el uso de varios radios IEEE802.11 como si fuera una única interfaz, con lo cual se permite que varios radios de comunicación transmitan y reciban de forma simultánea como un único nodo de comunicación. Esta técnica la presenta el grupo de investigación *Ixem Labs* donde

logran velocidades de transmisión 25, 40 y 75Mbps a una distancia 100Km y 8, 12, 24Mbps a 300Km, utilizando un radio TDD, single FDD, 2 *banded* radios multiple FDD y 4 *banded* radios multiple TDD respectivamente. [25] [28]

Para un análisis más detallado de los diferentes mecanismos para el control de acceso al medio refiérase al ANEXO K en el cual se presenta de una manera más específica el estado del arte.

**Figura 1. Diagrama del estado del arte del IEEE802.11 para enlaces de largo alcance.**



Fuente: Autor.



## 2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DE DE TRES PROTOTIPOS DE NODO WI-FI AUTONOMOS PARA ENTORNOS RURALES.

Dentro de este capítulo se presenta una descripción de la metodología desarrollada para el diseño de tres tipos de nodos (pasarela, repetidor, cliente) Wi-Fi autónomos los cuales serán utilizados en la construcción de una red troncal en zonas rurales.

Figura 2. Esquema de una red troncal



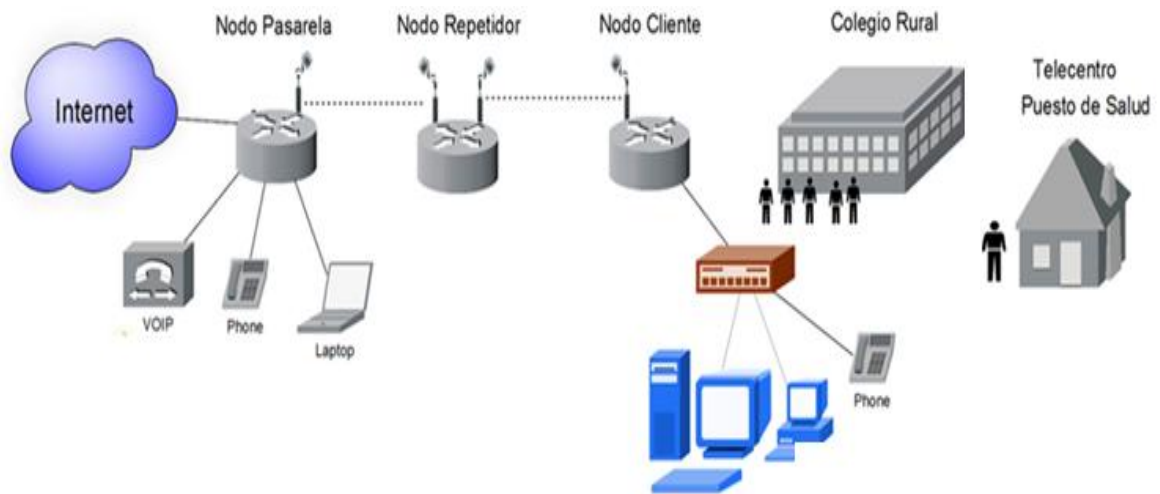
Fuente: Autor.

Para el diseño del nodo pasarela, cliente y repetidor se deben definir los requerimientos de hardware, software y firmware que fijen pautas para la construcción del módulo de comunicación. En la última sección de este capítulo se presenta la metodología para dimensionar el sistema fotovoltaico.

### 2.1 REQUERIMIENTOS PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LOS NODOS DE COMUNICACIÓN.

En esta sección se definen los criterios para la construcción de cada uno de los tres prototipos Wi-Fi autónomos los cuales hacen parte de una red troncal como se puede apreciar en la figura 3.

**Figura 3. Diagrama de una red troncal.**



**Fuente:** Autor.

Para el diseño de los nodos se tienen presentes los siguientes aspectos:

- Los nodos de comunicación Wi-Fi autónomos deben permitir la construcción de enlaces punto a punto de largo alcance en el rango de 0 –100 km sobre zonas rurales.
- El nodo repetidor debe tener una *motherboard* con una velocidad de procesamiento que permita enrutar de forma eficiente los paquetes de datos y evite el embotellamiento en el tráfico.
- Cada nodo Wi-Fi no debe requerir licencias comerciales en software y *firmware* para su funcionamiento.
- El hardware seleccionado para el nodo Wi-Fi debe ser de bajo costo, con operabilidad en espacios abiertos y de bajo consumo de potencia, para minimizar los costos en el sistema fotovoltaico.

- Los nodos pasarela, repetidor y cliente debe tener autonomía en escenarios de carga con ciclos de transmisión/ reposo 24/0H sin interrupción de la comunicación entre el nodo cliente y pasarela.

Para cumplir con cada uno de estos requerimientos en el diseño de los nodos Wi-Fi se analiza de forma detallada cada uno de las especificaciones en hardware y software.

## **2.2 SELECCIÓN DEL HARDWARE PARA EL NODO WI-FI.**

Los nodos Wi-Fi deben permitir la construcción de enlaces punto a punto para el rango de 0-100 km.

### **2.1.1.1 Selección de la antena.**

- Las antenas deben altamente directivas, tipo grilla y de bajo costo.
- Limitaciones del PIRE.

#### **Antena debe ser altamente directiva, tipo grilla y de bajo costo.**

Para construir enlaces de microondas punto a punto de largo alcance se deben utilizar antenas altamente directivas para evitar las multitrayectorias y interferencias, lo cual es fundamental para enlaces en el rango de 0-100km. Las antenas deben ser tipo grilla las cuales generan poca resistencia al viento lo cual es fundamental en zonas rurales.

El costo de las antenas directivas (8° ancho de haz principal) tipo grilla incrementa con la ganancia de la antena como se puede apreciar en la tabla 2.

**Tabla 2. Costo de las antenas tipo grilla en función de la ganancia.**

<b>Marca</b>	<b>Característica</b>	<b>Costo \$ Dolares</b>
HG2415G	Antena Grilla 15 dBi 2.4Ghz	63
HG2419G	Antena Grilla 19 dBi 2.4Ghz	75
HG2424G	Antena Grilla 24 dBi 2.4Ghz	100
HG2427G	Antena Grilla 27 dBi 2.4Ghz	425
HG2430G	Antena Grilla 30 dBi 2.4Ghz	750

**Fuente:** Enlace Wi-Fi, empresa distribuidora de antenas de comunicación, disponible en: [http://www.enlacewifi.com/Antenas\\_Hyperlink.html](http://www.enlacewifi.com/Antenas_Hyperlink.html).

Al comparar los costos de la tabla 2 se puede determinar que las antenas que tienen la mejor relación ganancia-costo son las de 19dBi y 24dBi. Al comparar su desempeño transmisión-recepción de acuerdo a la distancia considerando tener un mejor margen de estabilidad se selecciona la antena de 24dBi. (En el caso de que el criterio de selección considerado fuera el alcance sin importar el costo se seleccionaría la antena de 30dBi).

### **Limitaciones del PIRE.**

Las limitaciones de la potencia irradiada isotrópica equivalente depende de la regulación en cada país. Para el caso de Colombia la regulación que existe en la construcción de los enlaces punto a punto en la banda de 2.4GHz es una adaptación de la FCC, sección 15.247 (*Regulations for Low Power, Non-Licensed Transmitters*). La FCC impone una restricción de 30dBm de potencia transmitida con una antena de 6dBi PIRE; además por cada 3dBi adicionales de ganancia en la antena la potencia del transmisor se debe reducir en 1dBm [46]. Existen regulaciones más permisivas como en el continente africano donde la PIRE es de 40dBm. A continuación se presenta en la tabla 3 la regulación de PIRE presente en Colombia para enlaces punto a punto en la banda de 2.4GHz.

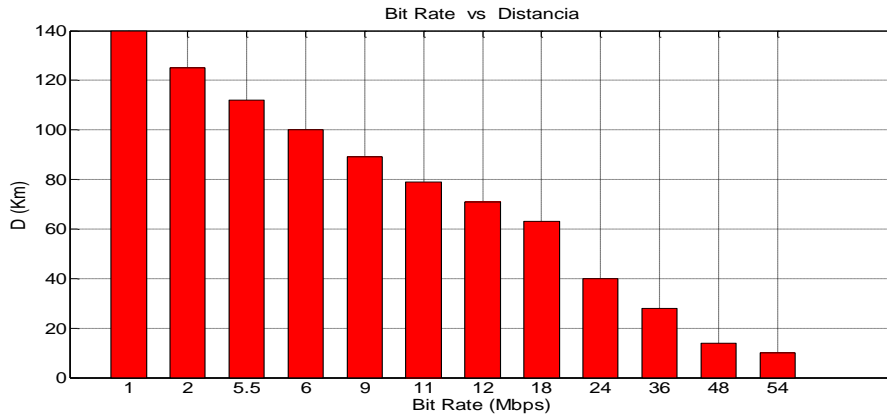
**Tabla 3. FCC 15.247 en la banda 2.4 GHz (Enlaces Punto a Punto).**

<b>Potencia Transmisor (dBm)</b>	<b>Ganancia Máxima Antena (dBi)</b>	<b>PIRE (dBm)</b>
30	6	36
29	9	38
28	12	40
27	15	42
26	18	44
25	21	46
24	24	48
23	27	50
22	30	52

**Fuente: Autor.**

Si se aplica la limitación de la PIRE en Colombia a una antena de 24dBi la máxima potencia de transmisión es de 24dBm. A continuación se calcula la velocidad de transmisión de la capa física para un enlace punto a punto en función de la distancia, calculando el nivel de recepción con la ecuación de Friss. Para el cálculo se tendrá presente el uso de antenas directivas, el nivel de sensibilidad del radio XR2 (radio con características de bajo nivel de sensibilidad) y un margen de desvanecimiento de 20dB. Éste último se origina en problemas alineación, pérdidas en los conectores, cables, orografía del terreno, fenómenos meteorológicos como lluvia o nubosidad, atenuación por árboles. El uso de un valor de desvanecimiento adecuado y asegura la estabilidad en el tiempo, aspecto fundamental para un radio enlace de largo alcance. [14] [15] [20] [47][48][49]

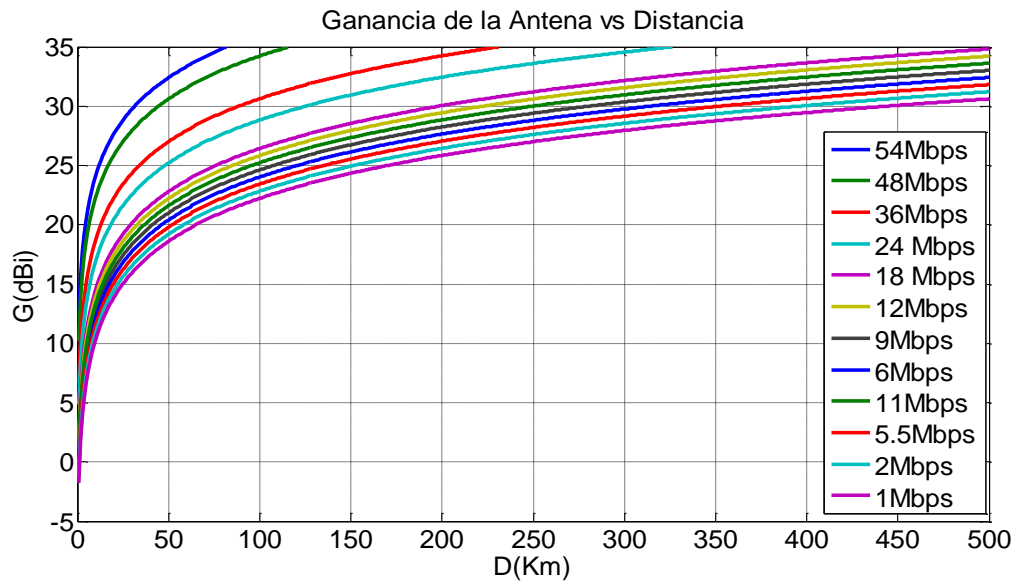
**Figura 4. Velocidad de transmisión función de la distancia.**



**Fuente:** Adaptada de Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links.[13]

Si se desean construir enlaces de comunicación punto a punto con distancias mayores a los 100Km se deben usar antenas de mayor ganancia. En la figura 5 se presenta la relación que existe entre la distancia, la modulación y la ganancia de la antena considerando el radio XR2.

**Figura 5. Ganancia de la antena en función de la distancia.**



**Fuente:** Autor

### **2.2.1 Selección del radio Wi-Fi.**

Para realizar la selección del radio transmisor se tienen presente los siguientes requerimientos:

- Potencia de transmisión (limitación PIRE).
- Bajo umbral de sensibilidad en la recepción.
- Tiempos del control de acceso al medio configurables.
- Operabilidad en espacios abiertos (*outdoor*).
- Bajo consumo de potencia.
- Bajo costo.

#### **Potencia de transmisión (límite PIRE).**

Considerando que la antena seleccionada tiene una ganancia de 24dBi el radio Wi-Fi debe tener una potencia de transmisión ajustable en el rango de 0-24 dBm, para cumplir con la regulación de la PIRE en Colombia (FCC 15.247 para una antena de 24dBi la máxima potencia que puede tener el transmisor es 24dBm). Esta selección evita el uso de amplificadores sobre la señal de RF (*Radio frequency*) y permite así la construcción de enlaces punto a punto en el rango de 0 -100km de una forma más eficiente.

#### **Bajo umbral de sensibilidad en la recepción.**

Para la selección del radio Wi-Fi se considera que su umbral de sensibilidad sea lo menor posible para un tipo de modulación particular, de manera que se incremente el margen de estabilidad en los enlaces Wi-Fi punto a punto de largo alcance, y se aumente de paso la distancia del enlace.

#### **Cambiar tiempos del control de acceso al medio.**

En el mercado existen gran diversidad de radios Wi-Fi pero pocos permiten por firmware modificar algunos tiempos que inciden en el mecanismo de acceso al medio. Esta característica es fundamental para la implementación de enlaces Wi-

Fi de largo alcance con buenas prestaciones. Algunos radios comerciales que la ofrecen están basados en la familia de *Chips Atheros* [50] los cuales permiten realizar modificaciones en los parámetros (*DIFS*, *Slottime* y *ACKTimeout*).

### **Operabilidad en espacios abiertos (outdoor).**

El clima Colombiano es característico de una zona ecuatorial donde se tiene un clima tropical que mantiene una temperatura uniforme durante todo el año. Colombia debido a su sistema montañoso Andino presenta distintos tipos climáticos los cuales están relacionados principalmente con la altitud relativa sobre el nivel del mar. [51]

El radio Wi-Fi seleccionado debe tener un desempeño estable para un rango de temperaturas ambiente que puede encontrarse entre (-10 hasta 45° C), con un porcentaje de humedad relativa (20-90%) según la ubicación del nodo, para evitar los costos adicionales en hardware para el control de temperatura y humedad, para garantizar una funcionalidad estable de los nodos de comunicación en los diferentes emplazamientos ubicados en la geografía Colombiana. [51]

### **Bajo consumo de potencia.**

El radio Wi-Fi seleccionado debe tener bajo consumo de potencia para disminuir los costos del sistema de alimentación fotovoltaica.

### **Bajo costo.**

Los radios Wi-Fi seleccionados deben ser de bajo costo, para que la construcción de nuevos prototipos sea viable al desplegar nuevas redes en zonas rurales.

Con los criterios especificados para la selección del radio Wi-Fi a continuación se presenta una tabla comparativa de los principales radios Wi-Fi comerciales basados en *Chips Atheros* con las respectivas especificaciones (Costo, potencia de transmisión, sensibilidad de recepción, corriente y potencia máxima y rango de temperaturas de operación). La selección de los radios Wi-Fi se fundamenta en

los requerimientos establecidos previamente. La información de los costos de los equipos corresponde a la suministrada por proveedores, mientras que las especificaciones técnicas se obtuvieron de las hojas de datos de los fabricantes.

**Tabla 4. Especificaciones de radios Wi-Fi IEEE802.11b/g comerciales.**

Radio (Chip)	Costo \$ UD	Potencia Máxima de Transmisión	Sensitividad de Recepción	Corriente/Potencia Máxima (A) / (W)	Temperatura (°C)
XR2 (AR5414)	132	28dBm 1-24Mbps 26dBm 36Mbps 25dBm 48Mbps 24dBm 54Mbps	1Mbps a -97dBm 6Mbps a -94dBm 54Mbps a -74dBm	1.3/4.29	-40 a 60
SR2 (AR5213)	132	26dBm 1-24Mbps 24dBm 36Mbps 21dBm 54Mbps	1Mbps a -97dBm 6Mbps a -94dBm 54Mbps a -74dBm	1.1/3.63	-40 a 60
R52H (AR5414)	50	25dBm 1Mbps 25dBm 6Mbps 20dBm 54Mbps	1 Mbps a -92dBm 6Mbps a -90dBm 54Mbps a -70dBm	0.8/2.64	-20 a 70
EMP-3602 (AR2413)	47	23dBm 6-24Mbps 21dBm 36Mbps 20dBm 48Mbps 19dBm 54Mbps	1Mbps a -96dBm 6Mbps a -91dBm 54Mbps a -73dBm	0.55/1.82	-20 a 85
EMP-8602+S (AR5413)	64	28dBm 1-11Mbps 27dBm 6-24Mbps 25dBm 36Mbps 23dBm 54Mbps	1Mbps a -92dBm 6Mbps a -92dBm 54Mbps a -76dBm	1/3.3	-20 a 80
EMP-8603 (AR5414)	72	27dBm 6-24Mbps 24dBm 48Mbps 23dBm 54Mbps	1Mbps a -97dBm 6Mbps a -94dBm 54Mbps a -74dBm	1.4/4.62	-40 a 85
KXS30SG (AR5414)	84	30dBm	1Mbps a -92dBm	1.5/4.95	-30 a 85
WLM54G-6B-30 (AR5414)	73.14	30dBm 1-11Mbps 30dBm 6-24Mbps 28dBm 36Mbps 25dBm 54Mbps	1Mbps a -97dBm 6Mbps a -90dBm 54Mbps a -70dBm	1.5/4.95	-20 a 70

Fuente: Autor [52][53][54][55][56][57][58][59]

De la tabla anteriorse deduce que el radio XR2 tiene las mejores características en cuanto a la potencia de transmisión y el nivel de sensibilidad para todas las velocidades de transmisión pero su costo se encuentra en la 4a posición y consumo de potencia en la 5ª. Por otra parte, el radio con mejores características

de costo y consumo de potencia es el EMP-3602 pero su potencia de transmisión no alcanza los 24dBm para ninguna de sus velocidades de transmisión y su nivel de sensibilidad se encuentra en la 5a posición.

Por lo tanto para un rango de distancias cortas y medias 0-40Km se considera el radio EMP-3602 la mejor opción, mientras que para distancias de 0-100km lo es el radio XR2. Otra característica importante que tiene este último radio es que presenta un EPM/ESD (*Electromagnetic Pulse Protection/Electrostatic Discharge*) de 15KV, y existe una baja relación entre la potencia de interferencia relativa y el ruido de piso lo cual es muy importante para operación en presencia de interferencias generadas por otros equipos de comunicación.

Los radios de comunicación comerciales incluidos en la tabla 4 se consideran de bajo costo al compararlos con otras soluciones comerciales para enlaces punto a punto de largo alcance que utilizan estándares Wi-Fi propietario cuyo costo supera los USD \$1000. Entre los más sobresalientes se tienen los equipos de marca *Lobometrics* [60], *Terabeam-Proxim Wireless* [61], *Motorola Canopy* [62] y *Alvarion* [63].

En la tabla 5 se presentan las especificaciones del radio XR2 en cuanto a potencia para la transmisión y nivel de sensibilidad en la figura 6 se presenta su apariencia.

**Tabla 5. Características radio XR2**

	DataRate (Mbps)	Tx dBm	Sensitividad (dBm)
802.11b	1	28	-97
	2	28	-96
	5.5	28	-95
	11	28	-92
802.11g	6	28	-94
	9	28	-93
	12	28	-91
	18	28	-90
	24	28	-86
	36	26	-83
	48	25	-77
	54	24	-74

**Figura 6. Radio XR2**



**Fuente: Hoja de datos radio XR2, Ubiquiti networks .[52]**

### **2.2.2 Selección de las tarjetas principales para el tráfico de datos.**

Los requerimientos para la tarjeta principal son los siguientes:

- El número de interfaces inalámbricas *miniPCI*.
- Soporte de tarjetas *miniPCI* de alta potencia.
- Tipo de procesador.
- Sistema antibloqueo.
- Operabilidad en espacios abiertos (ambientes *outdoor*).
- Bajo consumo de potencia de la tarjeta principal.
- Debe tener rango de alimentación en DC.
- Bajo Costo.

#### **Número de interfaces inalámbricas miniPCI.**

Para el diseño del nodo pasarela se considera que tarjeta principal debe tener un *slot miniPCI* y por lo menos dos puertos *fastEthernet*.

En el diseño del nodo repetidor se considera que la tarjeta principal tenga dos *slots miniPCI* y por lo menos un puerto *fastethernet*.

Para la estación cliente la tarjeta principal debe tener un slot *miniPCI* y dos o más puertos *fastethernet*.

### **Capacidad de soportar tarjetas miniPCI de alta potencia.**

Se debe seleccionar los sistemas empotrados que permitan operar radios *miniPCI* como el XR2, no todas las *motherboards* permiten manejar radios Wi-Fi de alta potencia.

### **Tipo de procesador.**

Existe gran variedad de tarjetas principales diseñadas para manejar redes de datos (manejo de números enteros) pero la gran mayoría de estas SBC (*System Board Chip*) carecen de una UPF (unidad de punto flotante). Estas SBCson ineficientes para realizar operaciones de punto flotante debido a que la CPU (Unidad central de procesamiento) tiene que emular una serie más simple aritmética basada en operaciones en punto fijo que funcionan en la unidad de la lógica aritmética de números enteros, lo cual redundo en un desempeño es lento comparado con una SBC que cuente con UPF. Las principales arquitecturas para sistemas empotrados son las ARM y X86. [64]

### **Sistema antibloqueo.**

La tarjeta principal debe tener un sistema *watchdog* en hardware que le permita reiniciar la placa de manera automática cuando exista un error de bloqueo.

### **Operabilidad en ambientes outdoor.**

La tarjeta seleccionada debe ser robusta para operar en emplazamientos rurales ubicados en la geografía Colombiana, se tendrán las mismas consideraciones que para la selección del radio Wi-Fi.

### **Bajo consumo de potencia de la tarjeta principal.**

La tarjeta debe tener un bajo consumo de potencia para minimizar los costos en el dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

### **Rango de tensión en DC.**

El rango de alimentación para la tarjeta principal tiene que contemplar la tensión de salida del regulador DC, el cual hace parte del sistema fotovoltaico. Este valor es de 12V.

### **Bajo Costo de la tarjeta principal.**

Se recomienda utilizar tarjetas principales que tengan un costo asequible para población ubicada en zonas rurales.

A continuación se presenta una tabla con la descripción detallada de diferentes sistemas empotrados que permitan manejar redes de datos para la construcción de los nodos de comunicación.

**Tabla 6. Características de las diferentes tarjetas principales**

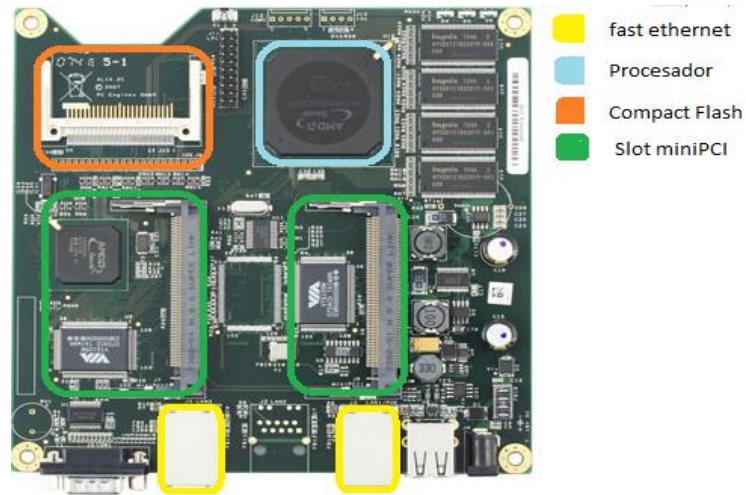
<b>Modelo</b>	<b>Arquitectura del Procesador</b>	<b>Memoria Ram Mbytes</b>	<b>Slot Compact Flash</b>	<b>Interfaces Inalámbricas miniPCI/ Puerto Fastethernet</b>	<b>Fuente/ Rango de Temperatura</b>	<b>Precio</b>
Soekris net 4801-48	233MHz AMD NSC SC1100 CON FPU	SDRAM 128	Si	1/3	6-20V/ 15W 0-60°C	\$213
Alix 2D3	500 MHz AMD Geode LX800 CON FPU	DRAM 256	Si	1/3	7-20V/6W 0-50°C	\$114
Alix 2D2	500 MHz AMD Geode LX800	DRAM 256	Si	2/2	7-20V/6W 0-50°C	\$109

	CON FPU					
Alix 2D0	433 MHz AMD Geode LX700 CON FPU	DRAM 128	Si	2/2	7-20V/6W 0-50°C	\$109
Routerboard RB411	300MHz MIPS Sin FPU	RAM 32	Si	1/1	10-28V/14W -30-60°C	\$49
Routerboard RB/411AH	680MHz MIPS Sin FPU	RAM 128	No	1/1	10-28V/14W -30-60°C	\$99
Pronghorn SBC-250	533MHz Intel® IXP425	SDRAM 64	No	2/1	5V / 24W -40-85°C	\$190

Fuente: Autor. [65] [66] [67] [68] [69] [70] [71].

Al analizar la tabla 6 se puede apreciar que las *motherboards* que cuentan con una UFP, menor consumo de potencia y menor costo son de la familia ALIX. Por otra parte, la velocidad de procesamiento de las ALIX es el doble de las *Soekris* y su capacidad de memoria es mayor, lo cual permite operar software de monitoreo de red más robusto. De la familia ALIX debido a la cantidad de interfaces inalámbricas se seleccionó la *motherboard* ALIX2D2 ya que puede servir de nodo cliente, ya sea que utilice una interfaz cuando se pueda cablear a través del puerto *ethernet* hasta el usuario final o dos interfaces inalámbricas cuando el nodo cliente tenga que ubicarse sobre la torre de comunicación y la única forma para llegar al usuario final sea por medio inalámbrico. El uso de esta *motherboard* permite que el nodo cliente tenga repetidor.

**Figura 7. Descripción motherboard Alix2d2**



**Fuente: Autor.**

A continuación se presenta las especificaciones técnicas del hardware seleccionado.

**Tabla 7. Descripción de la tarjeta principal nodo repetidor.**

<b>ALIX2D2</b>
<b>CPU:</b> 500MHz <i>AMD Geode LX800</i> <i>LX-800 with integrated RAM and PSU</i>
<b>DRAM:</b> 256 MB <i>DDR DRAM on board</i>
<b>Tipo de almacenamiento:</b> <i>CompactFlash socket</i>
<b>Tensión:</b> <i>min. 7V to max. 20V</i>
<b>Expansion:</b> <i>2 miniPCI slots, LPC bus</i>
<b>Connectividad:</b> <i>2 Ethernet channels (Via VT6105M 10/100)</i>
<b>Firmware:</b> <i>Award tinyBIOS</i>

**Fuente: Hoja fabricante Soekris [67]**

### **2.2.3 Selección del OS y firmware.**

#### **Selección del Sistema operativo.**

La selección del OS (sistema operativo) se centró en tres aspectos:

- Debe ser de uso libre.
- Implementación sobre plataformas X86.
- Debe tener soporte para aplicaciones de red.

#### **OS debe ser de uso libre.**

La implementación del SO GNU sobre SBC se ha masificado, debido al no pago de licencias, a su libre distribución, al acceso al código fuente lo cual permite no sólo optimizar el desempeño del sistema empujado, sino también generar innovación, soporte y compatibilidad a largo plazo. La masificación en el uso de OS basados en Linux en sistemas empujados en el 2010 alcanza a ser mayor del 60%, lo cual evidencia la importancia de los OS GNU. Como existen varias versiones de Linux la selección se orientará en la más implementadas como son las distribuciones basadas en Debian, las cuales son muy utilizadas en el desarrollo de dispositivos para la comunicación de datos y las nuevas basadas en el *kernel* de Linux. [72] [73]

#### **El OS debe tener soporte para aplicaciones de red.**

El OS debe tener soporte para implementar aplicaciones de red más avanzadas como son: los protocolos de enrutamiento y software para la gestión de la red, control y monitorización de red.

El OS seleccionado e instalado sobre la tarjeta principal ALIX2D2 es una versión reducida de la distribución Debian, llamada *Voyage*, que cumple a cabalidad los requisitos antes mencionados: Es de uso libre; está optimizada para arquitecturas X86, es decir, permite maximizar recursos de hardware y optimizar el número de

operaciones por ciclos de reloj; y cuenta con un amplio soporte en diversos repositorios para aplicaciones de red.[74]

### **Selección del driver.**

El driver es un módulo que sirve dentro del *kernel* de *Linux* para interactuar con el radio Wi-Fi seleccionado, en este caso es el radio XR2, el cual está basado en el *chip Atheros* AR5414. Entre las alternativas a considerar, se encuentran: madwifi, ath5k, ath9k, ath, athn.

**Madwifi (Multiband Atheros Driver for Wireless Fidelity):** Es un driver del kernel de linux para IEEE802.11a/b/g universal NICs, Cardbus, PCI, miniPCI. Este driver es el más utilizado en *Linux* para *chip Atheros* hoy en día, por ser estable.[75]

**athk5:** Es un *driver* para *chip Atheros* que se encuentra en desarrollo y no depende de HAL- Hardware Abstraction Layer (Es decir actúa directamente sobre el hardware). [76]

**athk9:** Es el *driver* más reciente de los seleccionados. Su desarrollo inicialmente fue realizado por *Atheros*, quien entonces liberó el código fuente a la comunidad de desarrolladores de drivers de uso libre. [77]

A continuación en la tabla 9 se presenta un comparativo comparativo de las diferentes características que tienen los drivers de uso libre LINUX.

**Tabla 8. Comparación de los diferentes drivers para chip Atheros.**

Driver	Configuración 802.11	AP	IBSS	Mesh	monitor	Modos Capa (PHY)	Buses
Freeware							
MadWifi	Si	Si	Si	Si	Si	a/b/g	PCI/ MiniPCI/ PC Card
ath5k	Si	Si	Si	Si	Si	a/b/g	PCI/ PCI-E/MiniPCI PCMCIA
ath9k	Si	Si	Si	Si	Si	a/b/g/n	PCI/PCI-E /AHB/ MiniPCI/ PCMCIA

**Fuente: Autor**

En la tabla anterior se puede apreciar que todos los driver permiten diferentes modos de operación y pueden interactuar con diferentes tipos de interfaces.

Considerando los requerimientos para la selección del driver relacionados con:

- Ser de uso libre.
- Estar disponible para el *kernel* de Linux.
- Operar sobre los buses *miniPCI*.
- Tener diferentes modos de operación y permitir modificar algunos parámetros MAC que permitan mejorar las prestaciones del IEEE802.11 sobre redes de largo alcance.
- Contar con una versión estable.

Con los requerimientos anteriores el driver seleccionado es MADWIFI (*madwifi-modules-2.6.30-voyage\_0.9.4-rc2-1+7.0-1\_i386.deb*) [78]. Su selección radica en tener una de las características más importantes cuando se trabaja con software de uso libre: la estabilidad. Adicionalmente permite modificar parámetros de la MAC y por estar ampliamente difundido en la academia del software libre se

encuentra gran cantidad de soporte técnico, aspecto fundamental cuando se desea desarrollar nuevas aplicaciones o se presentan algunos errores.

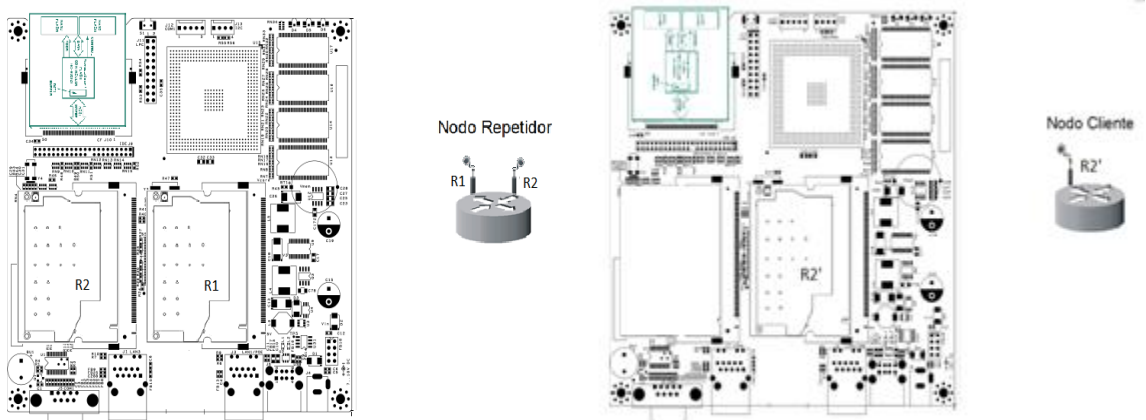
### 2.3 Dimensionado del sistema fotovoltaico.

El dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el nodo Wi-Fi de largo alcance se describirá en esta sección.

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico primero se especifican los modos de operación del nodo Wi-Fi. Posteriormente se mide el consumo de potencia en estos modos y por último se utiliza el modelo del sistema fotovoltaico presentado por (Castaner, L., y Silvestre S.) [79] [80] para dimensionar el sistema de suministro energético para el nodo de comunicación.

A continuación se presenta el diagrama interno del nodo de comunicación para el repetidor, cliente/ pasarela.

**Figura 8. Diagrama interno del nodo repetidor y cliente.**



**Fuente: Autor**

Cuando se desea dimensionar un sistema fotovoltaico que permita ofrecer suministro eléctrico para un sistema de comunicaciones se deben tener presente los siguientes aspectos:

- Consumo de potencia de la carga (Nodo Wi-Fi) en los diferentes modos de operación.
- Autonomía de la carga.
- Radiación solar disponible.

### 2.3.1 Consumo de la carga.

Este valor se calcula a partir de la potencia promedio que consume el nodo Wi-Fi en diferentes modos de operación (reposo, transmitiendo, recibiendo). [9][81]

**Nodo Reposo:** Se define que el nodo Wi-Fi se encuentra en modo reposo si está en *power save mode*. Cuando el nodo está configurado como punto de acceso (AP), éste envía periódicamente cada (100ms) mensajes de control denominados *Beacons*. Un nodo del tipo pasarela o terminal cuando se encuentra en reposo no envía ninguna señal.

**Nodo Transmitiendo:** El nodo se encuentra en modo transmitiendo cuando éste establece un envío o enrutamiento de paquetes de datos a través de sus interfaces inalámbricas de manera continua. Los paquetes son encapsulados sobre los protocolos de transporte TCP o UDP, ICMP.

**Nodo Recibiendo:** El nodo se encuentra en modo recibiendo cuando éste establece un enrutamiento sobre los paquetes de datos que arriban por cada una de sus interfaces inalámbricas y son enviados por sus interfaces cableadas o inalámbricas.

### 2.3.2 Autonomía de la Carga (Nodo Wi-Fi):

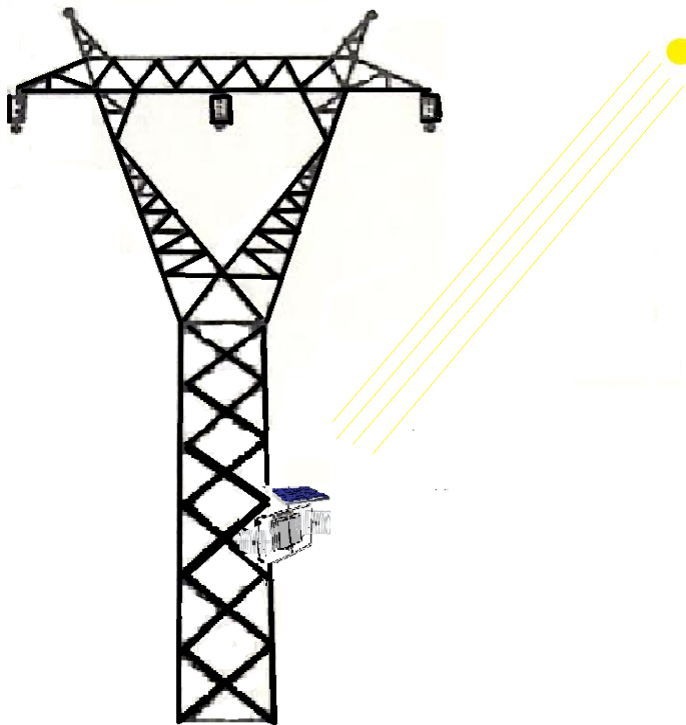
Se define como el periodo de tiempo dentro del cual el sistema fotovoltaico es capaz de suministrar energía en forma continua al nodo Wi-Fi para que opere en cualquiera de sus tres estados (reposo, transmitiendo, recibiendo) o una combinación contigua dentro de tales estados.

La condición más exigente para la autonomía del sistema corresponde al caso donde cada nodo se encuentra transmitiendo 24 horas al día.

### 2.3.3 Radiación Solar disponible.

Se debe tener información de la radiación solar multianual de un periodo de tiempo del sitio donde se va a instalar el sistema fotovoltaico. Con la estadística de esta serie de tiempo se estima de una manera más fiable el recurso solar disponible, y los periodos de tiempo donde la radiación solar es crítica.

Figura 9. Radiación solar sobre el nodo Wi-Fi repetidor



Fuente: Autor

La radiación incidente sobre el panel solar genera la energía que es suministrada al nodo Wi-Fi y la necesaria para cargar las baterías. La radiación recolectada por el panel depende de su inclinación. Para regiones del hemisferio norte se recomienda que éstos se encuentren inclinados hacia el sur. Para el caso de

Colombia la inclinación varía entre 0° y la latitud del sitio. Al inclinar así los paneles, los rayos solares incidan sobre ellos de forma perpendicular y no se reflejan sobre el cristal que sirve de recubrimiento para protegerlos.

## 2.4 CARACTERIZACIÓN DEL CONSUMO DE POTENCIA NODO WI-FI.

El primer paso consiste en conocer el consumo de potencia en reposo y transmitiendo de las configuraciones de los nodos Wi-Fi (estación y repetidor), mediante medidas realizadas en campo y laboratorio.

Para las medidas de consumo de potencia se utilizaron 2 tarjetas principales operando sobre los radios seleccionados XR2: la seleccionada ALIX2D2 y la tarjeta Soekris net4801-48 para efectos de comparación.

Primero se conectó la tarjeta ALIX con el radio XR2, desde donde se modifica la potencia de transmisión y se procede a medir el consumo de corriente del nodo de comunicación. Los resultados de este procedimiento se resumen en la tabla 9.

**Tabla 9. Medidas consumo de corriente nodo Wi-Fi**

Configuración de la carga	Tensión de alimentación = 12.50 V				
	En reposo	Transmitiendo a			
		10 dBm	15 dBm	20 dBm	28 dBm
Alix 2D2 + radio XR2	309 mA	432 mA	464 mA	491 mA	528 mA

**Fuente: Autor.**

Para el cálculo del consumo de potencia se considera que el nodo se encuentra transmitiendo con la máxima potencia es decir 24dBm cumpliendo la regulación PIRE por lo tanto el consumo de corriente se estima en un valor cercano a 514 mA.

A continuación en la tabla 10 se presenta el consumo de potencia medida con el nodo de comunicación en diferentes modos utilizando el osciloscopio y un datalogger [82].

**Tabla 10. Medición del consumo de potencia en W.**

Configuración de la carga	Potencia consumida				
	Osciloscopio			Datalogger	
	Reposo	Transmitiendo	Recibiendo	Reposo	Transmitiendo
Alix 2.D2	2.96	-		-	-
Alix 2D2 + 1 radio XR2	3.86	6.6	5	3.92	6.95
Alix 2D2 + 2 radio XR2	4.74	8.58	-	-	-
Soekris 4801-48	2.76	-	-	-	-
Soekris 4801-48+ 1radio XR2	3.66	6.42	4.85	-	-
<b>Error</b>	1%			5%	

**Fuente:** L. Meza, D. Moreno Selección, simulación y caracterización de un sistema de energía solar fotovoltaica para alimentación de nodos Wi-Fi en áreas rurales, 2010.

## 2.5 MODELADO DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO.

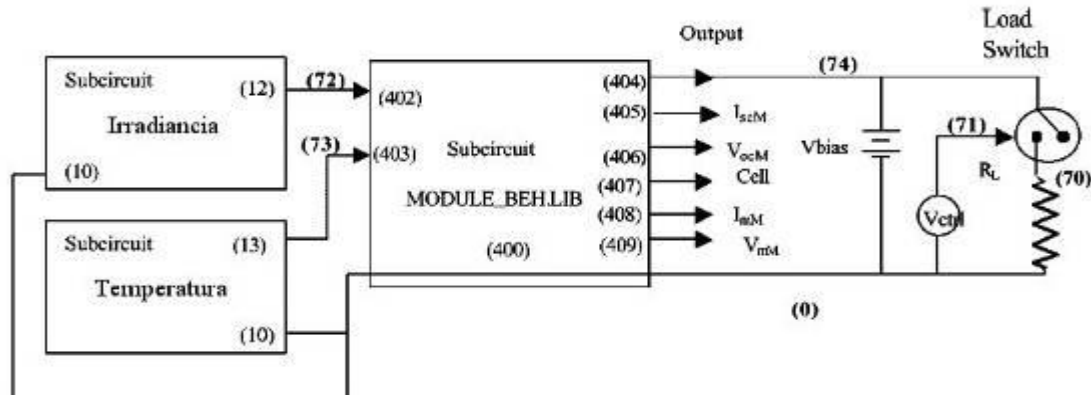
Para analizar el estado de carga en las baterías con el nivel de radiación solar en cualquier zona rural y con diferentes ciclos de funcionamiento (transmisión y reposo) para el nodo Wi-Fi, se debe tener un modelo que represente el funcionamiento del sistema fotovoltaico y permita evaluar su desempeño con diferentes consumos de potencia. En la literatura existen diferentes modelos que representan el funcionamiento para un sistema fotovoltaico [79][80][81][83][84][85].

Cada uno de ellos modela el comportamiento del panel solar, baterías y regulador. Para la selección del modelo se tuvo en cuenta la disponibilidad y la posibilidad de integración con un simulador de circuitos eléctricos, como es el caso de (Castaner, L., y Silvestre S)[80]. Este modelo permite introducir las características

de los elementos que forman parte del sistema fotovoltaico como son las corrientes de fuga, las características de los elementos del sistema fotovoltaico y conocer el comportamiento del sistema a partir de las variables de entrada (radiación solar) y la variables de salida (Consumo de la Carga) para establecer el SOC (*State of charge*), en el tiempo de la batería. Los modelos están programados en el lenguaje de la herramienta PSPICE lo cual facilita la etapa de validación y dimensionamiento del sistema fotovoltaico para el nodo de comunicaciones Wi-Fi.

El modelo se presenta en la figura 10, el cual es de corto término (donde los tiempos reales de simulación son horas, días, meses. Para este modelo se le introduce la información de radiación solar del sitio de interés donde se desea instalar el sistema fotovoltaico.

**Figura 10. Modelo de un sistema fotovoltaico corto término.**

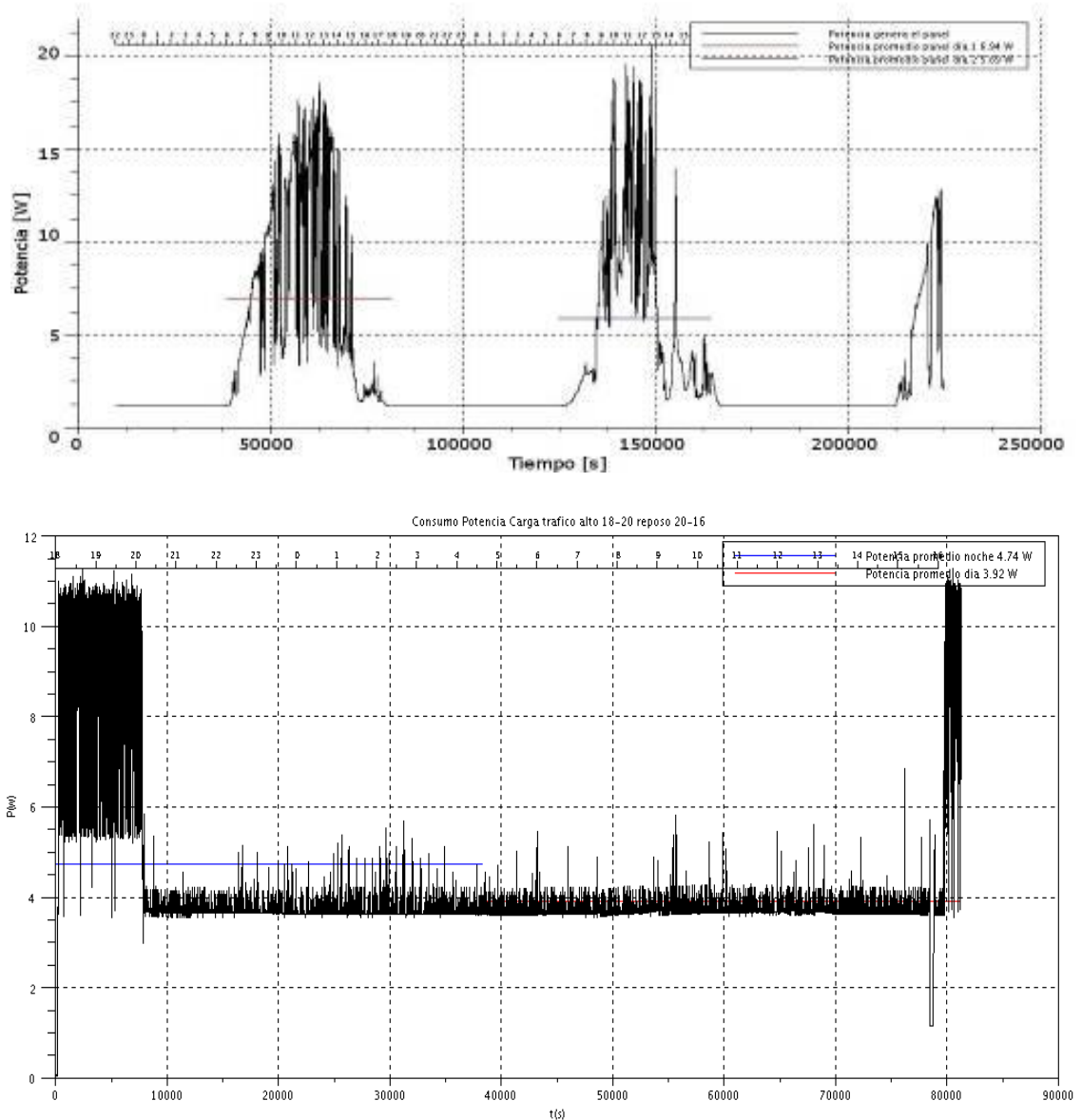


**Fuente: Modelling photovoltaic systems using Pspice.[80]**

Para validar el modelo con el nodo Wi-Fi autónomo real se implementó un circuito para medir las variables de entrada y salida del sistema fotovoltaico, se le introduce al modelo y se compara con otras variables del sistema como son la tensión en la batería y los ciclos de carga/descarga. A continuación se presenta la

corriente medida en el panel y la carga sobre un panel de 20W, el nodo se encuentra transmitiendo 2h y después en reposo.

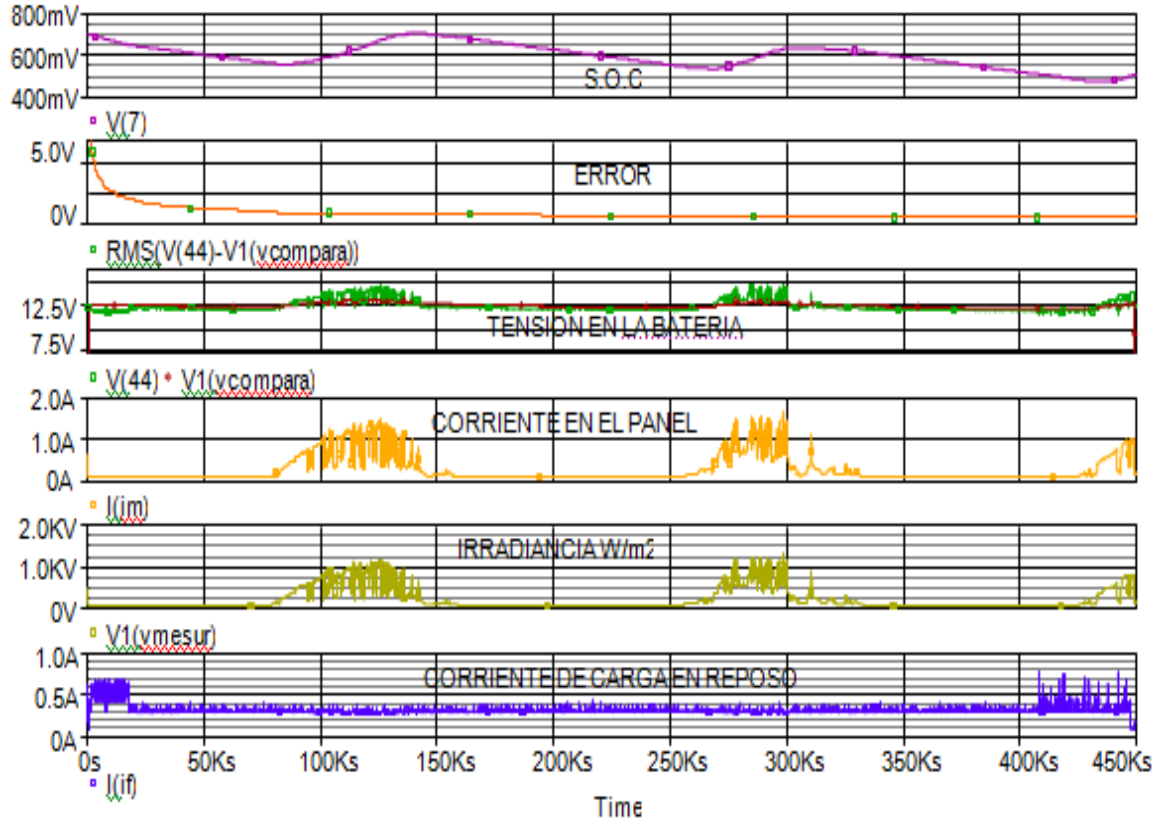
Figura 11. Consumo de corriente en el panel y consumo en la carga



Fuente: L. Meza, D. Moreno Selección, simulación y caracterización de un sistema de energía solar fotovoltaica para alimentación de nodos Wi-Fi en áreas rurales, 2010.

Utilizando los datos de la figura 8 y la tensión en la carga medidos se determina el estado de carga (SOC) de la batería con sus ciclos de carga y descarga y se compara con las medidas reales.

Figura 12. Estado de carga de la batería.



Fuente: L. Meza, D. Moreno Selección, simulación y caracterización de un sistema de energía solar fotovoltaica para alimentación de nodos Wi-Fi en áreas rurales, 2010.

## 2.6 DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMA FOTOVOLTAICO PARA EL NODO WI-FI .

Para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico se utilizan dos aspectos:

- Las horas solares pico. [86] [87]
- El balance de energía en el sistema fotovoltaico.

### **2.6.1 Cálculo horas solares pico.**

Se calcula a partir del número de horas en el día en que se considera que una irradiancia igual a  $1000W/m^2$  incide sobre la superficie del panel solar.

### **2.6.2 Balance de energía para el sistema fotovoltaico.**

Se determina a partir de la energía generada por los paneles solares, la almacenada por la batería y la que consume la carga en un periodo de tiempo. Ésta última se puede calcular mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica [88]. Para el cálculo de la energía proveniente de los paneles se tienen presente dos criterios: el primero utiliza la radiación solar promedio en el mes y el segundo usa la radiación solar del peor mes para dimensionar la capacidad de los paneles. Este segundo criterio puede sobredimensionar el sistema de generación. La capacidad de almacenamiento por las baterías se calcula a partir de los requerimientos de autonomía del sistema y la variabilidad de la radiación solar. La energía que consume la carga se calcula a partir de la medición de consumo de potencia durante el periodo de autonomía.[89][90][91][92]

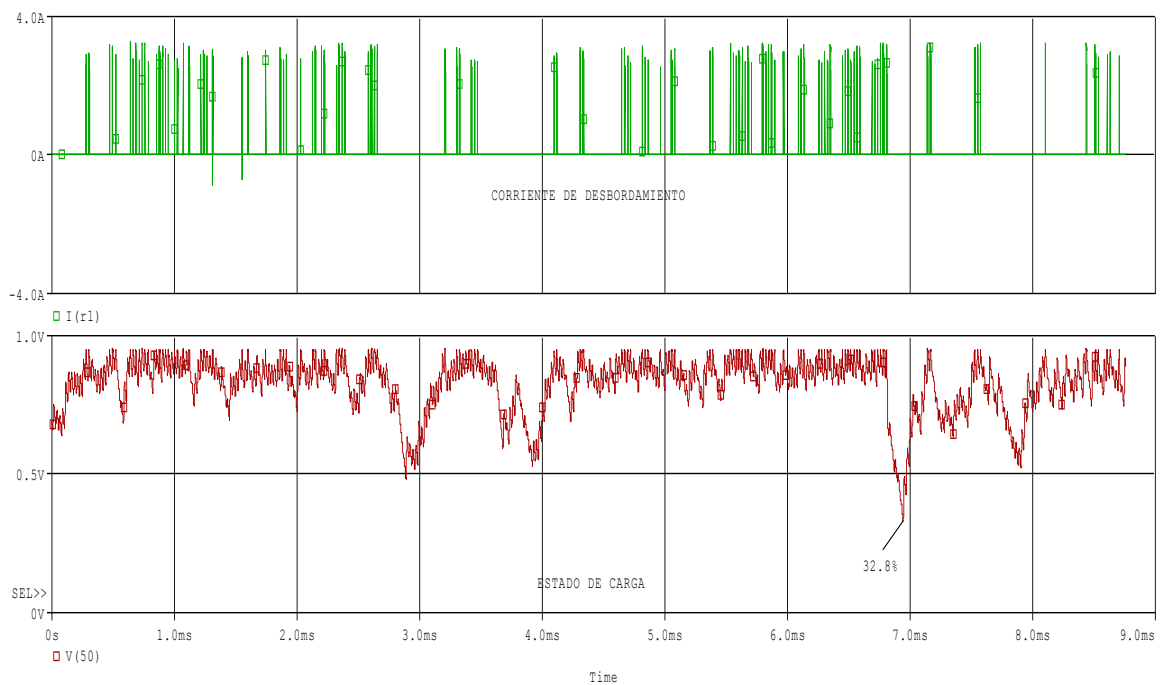
Con información de la radiación solar, un estimado de la potencia de los paneles, la capacidad de las baterías, el consumo de la carga y modelo del sistema fotovoltaico se determina el SOC de la batería y se seleccionan la capacidad del panel solar y las baterías. Para los criterios de selección se tiene en cuenta que el SOC debe ser mayor pero cercano al 30% en todos sus ciclos de funcionamiento y el costo del sistema fotovoltaico.[89][90][91][92]

Para minimizar los costos del nodo de comunicación primero se determina la potencia del panel fotovoltaico considerando que la corriente de desbordamiento (energía que no se utiliza) sea mínima en los ciclos de carga y después se calcula la capacidad de las baterías hasta encontrar el punto cercano al óptimo. La autonomía establecida para la construcción del nodo cliente y el repetidor es de

24h transmitiendo, considerando la situación menos favorable en la que los nodos Wi-Fi consumen mayor potencia.

A continuación se presenta, la corriente de desbordamiento para el nodo estación y el SOC de una batería con una capacidad de 1200AH con información de radiación solar multianual.

**Figura 13. Corriente de fuga y estado de carga (SOC).**



**Fuente: Autor.**

En la tabla 11 se presenta las especificaciones diseñadas en cuanto a la potencia de los paneles y la capacidad de la batería para el nodo cliente (C/P) y el nodo repetidor (R) para una autonomía de 24h transmitiendo considerando la información de radiación solar de Bucaramanga.

Otros escenarios de consumo de potencia y radiación solar de otras regiones se presentan en el anexo G.

**Tabla 11. Dimensionado del sistema fotovoltaico.**

Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Días
(C/P) 166.80Wh	Trasmitiendo 24 horas	65 W	840 Wh	70% (k=0.6)	32.8%	3.5
(R) 245.76Wh	Trasmitiendo 24 horas	85 W	1200 Wh	90% (k=0.95)	32.7	3.3

Fuente: Autor.

**Figura 14. Modelo prototipos de comunicación autónoma.**

**Nodo cliente/pasarela**

**Nodo repetidor**



Fuente: Autor.

**Figura 15. Prototipos de comunicación autónoma**



Nodo Pasarela



Nodo Repetidor



Nodo Cliente

Fuente: Autor.

**Tabla 12. Descripción del prototipo nodo cliente y repetidor.**

ID	Nombre	Seleccionado	Cliente/ Pasarela	Repetidor
1	Antena	tipo grilla 24dBi  HG2424	1	2
2	Radio	XR2	1	2
	Motherboard	ALIX 2D2	1	1
	OS	Voyage Linux 0.6.5	1	1
	Driver	madwifi-modules-2.6.30	1	1
3	Panel solar	Policristalino Kyocera	65W	85W
4	Regular	Steka	5ª	5ª
5	Baterías	MTEK Capacidad	66AH	103AH
Otros: Protector contra descargas, Cable LMR400, Pigtail MMCX, Protector contra descargas SP3-90-6-BFF				

**Fuente: Autor**

### **3. DESCRIPCIÓN DEL DESEMPEÑO IEEE802.11b/g EN ENLACES PUNTO A PUNTO DE LARGO ALCANCE PARA ZONAS RURALES.**

En este capítulo se presenta una breve descripción del desempeño que presenta el estándar IEEE 802.11 sobre enlaces punto a punto de largo alcance ubicado en zonas rurales. Para caracterizar este desempeño primero se especifican los límites que impone la capa física y la incidencia de esta en la pérdida de *frames*; después se realiza un análisis sobre la capa de control de acceso al medio; se analiza también la incidencia sobre el *throughput* en capa de transporte, retardos y paquetes perdidos; y por último se analiza en conjunto la incidencia de estas dos capas en las características del enlace.

#### **3.1 DESEMPEÑO DE LA CAPA FÍSICA DEL IEEE802.11 SOBRE REDES DE LARGO ALCANCE.**

El desempeño de la capa física sobre redes de largo alcance se explica en función de los límites que impone el nivel de sensibilidad de los radios el cual depende del tipo de modulación y la máxima PIRE. Después se introduce la presencia de FER (*Frame error rate*) debida a la relación RSS (*Receive signal strength*) y el nivel de ruido SNR (*Signal to Noise ratio*).

El límite que impone la capa física del IEEE802.11 para enlaces punto a punto de largo alcance está relacionado con la máxima PIRE regulada en cada país, el nivel de sensibilidad para cada tipo de modulación específica y las pérdidas por propagación.

En tabla 13 se presenta la máxima PIRE para enlaces punto a punto en la banda de 2.4GHz según la posición geográfica.

**Tabla 13. Regulación PIRE según localización geográfica.**

<b>Máxima potencia del Transmisor</b>	<b>Localización Geográfica</b>	<b>Regulación</b>
1000 mW	NORTE AMERICA y ALGUNOS PAISES EN DESARROLLO (Colombia)	FCC 15.247 ( <i>Federal Communications Commission</i> )
100 mW	EUROPA	ETSI 300-328 ( <i>European Telecommunications Standards Institute</i> )
10 mW/MHz	JAPÓN	MPT Ordinance 79 (Ministry of Posts and Telecommunications)

**Fuente:** Redes inalámbricas Rurales, Universidad Pontificia Católica del Perú. [37]

En el caso de Colombia las limitaciones de PIRE está regulada por la FCC 15.247 (*Regulations for Low Power, Non-Licensed Transmitters*).

### **3.1.1 Cálculo del nivel de señal recibida en el receptor.**

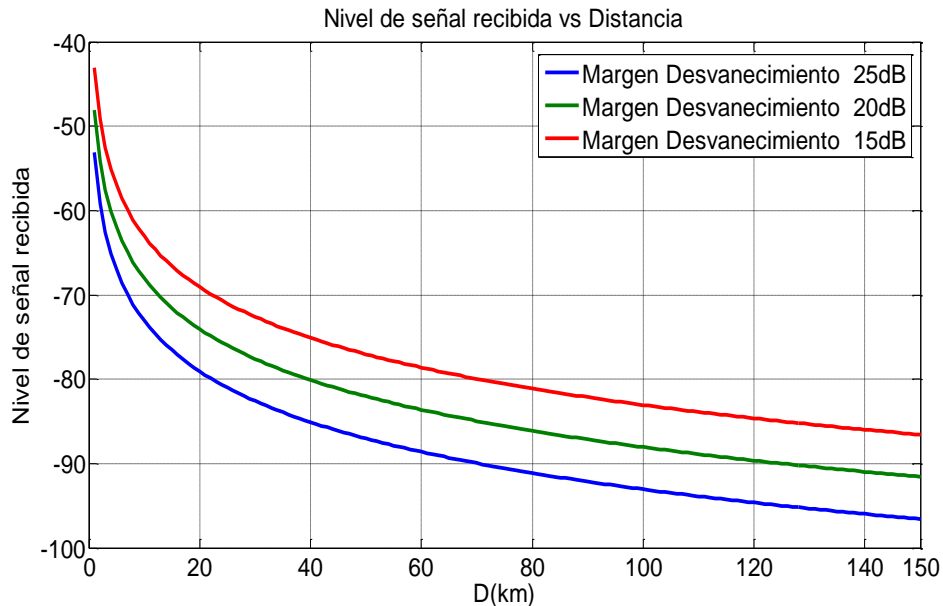
Para predecir el nivel de señal recibida en el receptor se pueden utilizar dos modelos de radiopropagación. El primero está descrito por la ecuación de *Friiss* y un segundo más preciso está descrito por el modelo (*ITM Irregular Terrain Model*)/ *Longley Rice*. [93][94][95]

#### **3.1.1.1 Modelo de Friiss.**

Este modelo describe las pérdidas en el espacio libre considerando que la potencia se esparce en una mayor región a medida que se aleja del transmisor. La ecuación de *Friiss* permite estimar el nivel de potencia recibida en el receptor para un enlace punto a punto en áreas rurales siempre que se encuentre libre de obstáculos la primera zona *Fresnel* y se considere un margen de desvanecimiento cuyo valor puede variar entre 15-25dB para garantizar un enlace estable. En la siguiente figura se presenta el nivel de señal recibida para el receptor en función

de la distancia considerando un enlace punto a punto simétrico donde se utiliza la ecuación de *Friss* y una potencia de transmisión 24dBm y una ganancia en la antena de 24dBi para 3 diferentes márgenes de desvanecimiento.[93][96]

**Figura 16. Nivel de señal recibida modelo de Friss con 3 márgenes de desvanecimiento.**



**Fuente: Autor**

De la figura 16, se deduce que el radio XR2, el cual para una velocidad de transmisión en capa física de 36Mbps tiene un nivel de sensibilidad de -84dBm al utilizar un margen de sensibilidad de 25dB lograría una máxima distancia en un enlace punto a punto de 40km. Si se considera un margen de sensibilidad de 20dB la máxima distancia que se puede establecer para el enlace es de 63km a 36Mbps. El valor seleccionado para el margen de desvanecimiento depende directamente de la orografía del terreno, el tipo de suelo, la vegetación, la alineación presente en las antenas, las condiciones atmosféricas, la eficiencia de las antenas, las pérdidas en los conectores, la potencia efectiva del transmisor y el margen de seguridad que se desea tener para el enlace.

### 3.1.1.2 Modelo ITM (*Irregular terrain model*) /(*LongLey-Rice*).

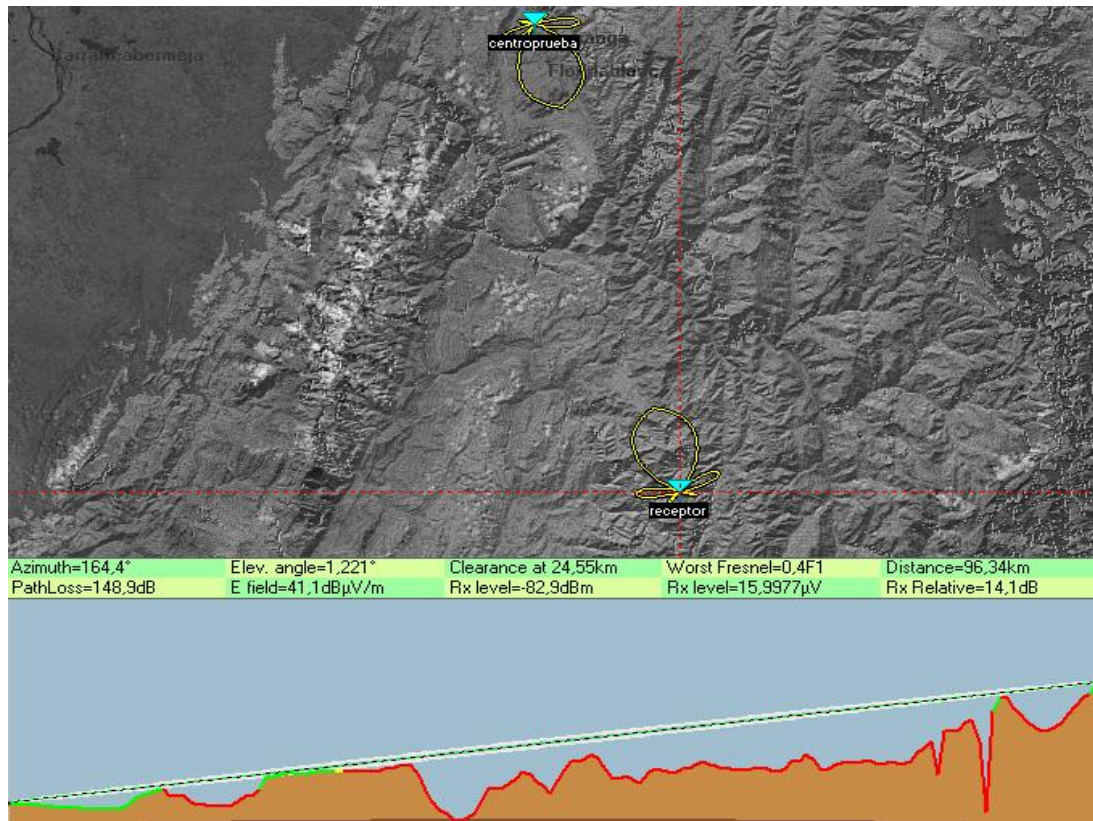
El modelo ITM/(*Longley-Rice*) puede ser aplicable a sistemas de comunicación en el rango de frecuencia desde los 20MHz-20GHz sobre diferentes tipos de terreno. Este modelo fue adoptado por la FCC para la propagación en terrenos irregulares. El Modelo *ITM /LongLey-Rice* requiere los siguientes parámetros: polarización de la antena, refractividad de la superficie (que depende de la curvatura de la tierra), constante dieléctrica de la tierra, conductividad del suelo, tipo de clima y tres tipos de variabilidad: temporal (variación horaria de la mediana de la atenuación), localización (variaciones en las estadísticas a largo plazo que se producen a partir de una trayectoria a otra trayectoria), situación (variaciones en las mediciones de la intensidad de campo por variables ocultas). En la siguiente figura se presenta el cálculo de las pérdidas por propagación en un enlace punto a punto de 96. Km entre el nodo centro de prueba (7.139 N, 73.121 W) y nodo receptor (6.30N, 72.88W) utilizando el modelo *ITM/LongLey-Rice* con el software de radio *mobile* utilizando los parámetros que se presentan en la tabla 14.[94][95]

**Tabla 14. Parámetros simulación modelo *Longley-Rice*.**

Frecuencia	2.4-2.5 GHz
Ganancia Antena	24dBi
Potencia Transmisor	24dBm
Pérdidas Cables, conectores, protecciones.	3dB
Refractividad de la superficie	301 N
Conductividad de la tierra	0.005 S/m
Permitividad Relativa de la tierra	15
Modo de variabilidad Spot	%50
Clima	Ecuatorial

**Fuente: Autor**

Figura 17. Predicción pérdidas por propagación modelo ITM/ Longley-Rice.



Fuente: Autor

En la figura 17 se puede apreciar que el nivel de sensibilidad en el receptor es de -83.9dBm. Si se analiza la figura 16, es comparable si se selecciona el modelo de *Friss* con un margen de desvanecimiento de 15dB.

### 3.1.2 Error de frame para enlaces IEEE802.11b/g de largo alcance.

Las variaciones en las pérdidas de *frames* en enlaces de largo alcance se pueden clasificar en dos patrones o categorías de pérdidas. La primera de ellas es del tipo *burst* (generados principalmente por interferencias externas) y la segunda se atribuye a pérdidas residuales. [97]

Los enlaces IEEE802.11 en áreas rurales por lo general presentan bajo nivel de interferencias y por lo tanto las pérdidas tipo *burst* son despreciables en estos sitios. Además si el nivel de la relación señal ruido se encuentra en el margen

donde el  $BER < 1e - 5$  se puede considerar que las pérdidas residuales son despreciables. En el caso de que el SNR se encuentre dentro de la ventana de vulnerabilidad  $BER > 0$  se analiza en la siguiente sección. [97]

### 3.1.2.1 Características del FER vs SNR (RSS/NOISE) en enlaces IEEE 802.11 de largo alcance.

A continuación se presentan las características del FER:

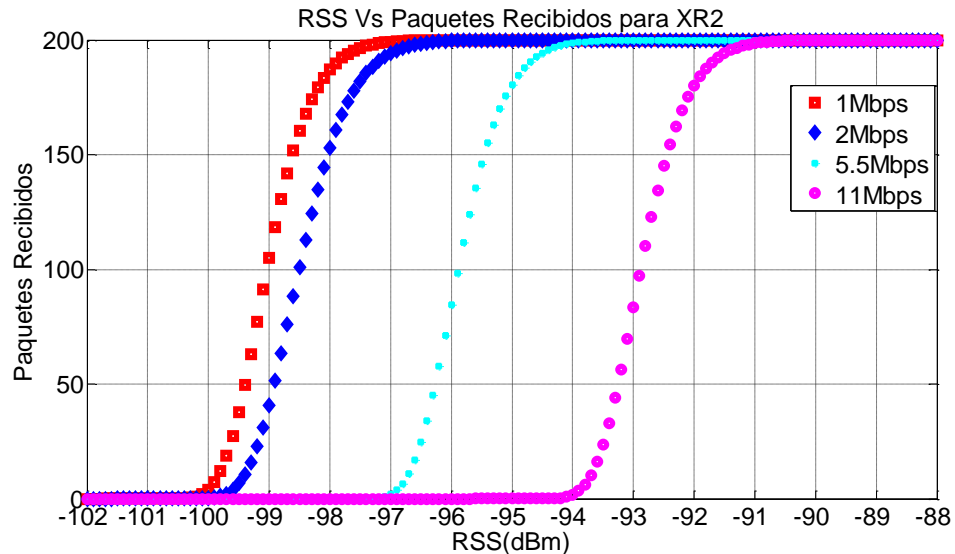
- La dependencia del FER (*frame error rate*) con respecto a la relación señal a ruido es muy cercana a su valor teórico para el 802.11b/g. En el estándar IEEE 802.11b/g existe una pequeña ventana donde si el SNR se encuentra entre 4 a 6 dB, el BER es aproximadamente del 100%, y por encima esta ventana la tasa de error es menor que el 1%. [98][99]
- La FER no depende directamente de la longitud del *link* o distancia entre los nodos, solamente de la señal recibida SNR. [98][99][100]
- Existe una definitiva dependencia entre el FER y la tasa de transmisión. [98][99]

En el estándar IEEE802.11 el nivel de sensibilidad se determina a partir del valor RSS para el cual el FER es del 8%, considerando una MPDU de 1024 bites, lo que es equivalente a tener un  $BER \approx 10^{-5}$ . [101]

Para el radio XR2 cuyos niveles de sensibilidad son -92dBm, -95dBm, -96dBm, -97dBm para 1, 2, 5.5 y 11Mps respectivamente, se considera que el FER es aproximadamente  $8e-2$  para una MPDU de 1024 bites, 200 paquetes enviados y un nivel de ruido -99dBm (excepto para 1Mbps que se utilizó un umbral de ruido mayor) se obtiene la cantidad de paquetes recibidos en función del RSS.

Utilizando los modelos de la capa física del IEEE802.11b [101][102] el número de paquetes recibidos en función del RSS para las diferentes velocidades de transmisión, utilizando una MPDU (*MAC protocol data unit*) de 1094 bytes, 200 paquetes enviados en *broadcast*, bajo AWGN (*Aditive White Gaussian Noise*) .

**Figura 18. Paquetes recibidos en función nivel de ruido -99dBm.**



**Fuente: Autor.**

Como se puede apreciar en la figura 18 el umbral de recepción se puede comparar con el valor de sensibilidad del radio XR2 la ventana de vulnerabilidad entre 4 y 5 dB para los cuales el FER puede variar de 1-100% como se expresó en las características de FER en enlaces de largo alcance. Para mayor información del modelado de la capa física del IEEE802.11b refiérase al ANEXO A.

### 3.2.1 Desempeño de la capa MAC del IEEE802.11 para redes de largo alcance.

El desempeño de la capa MAC del IEEE802.11 para enlaces de largo alcance está expresado en función de algunos tiempos que definen el mecanismo de acceso al medio y que llevan implícitamente el tiempo.

La capa MAC no impone restricciones al límite de distancia existente entre los nodos de una manera explícita, pero si algunos de sus parámetros lo llevan de manera implícitamente como son el DIFS, *Slottime*, *ACKtimeout*, aunque en la versión más reciente del estándar se define que el máximo *AirPropagationTime* (dos veces el tiempo de propagación) es de  $1\mu s$ , es decir el estándar está diseñado para una red de área local, aunque en dicha versión del estándar se introduce el parámetro *coverage class* permite incrementar el valor de *AirPropagationTime* a  $93\mu s$  lo que permitiría concebirlo para una distancia de 13.95 km.[12] [103]

**ACKTimeout:** Es el intervalo de tiempo que una estación transmisora debe esperar para recibir un ACK confirmando que la transmisión fue exitosa. Si no se recibe una confirmación dentro de ese intervalo de tiempo la estación transmisora considera que la transmisión fue fallida y vuelve a invocar el algoritmo *backoff* para realizar otra transmisión. Para enlaces de larga distancia si el valor del *ACKTimeout* es menor que dos veces el tiempo de propagación se generan retransmisiones innecesarias debido a que este expira, por lo tanto el valor de  $ACKTimeout > 2\delta$  para utilizar el canal de transmisión de una manera más conveniente de acuerdo a la distancia.[9][12] [103]

**DIFS:** Es el tiempo durante el cual una estación debe sensor el canal libre antes de programar una nueva transmisión o reactivar la cuenta regresiva de la ventana de contención. Si ésta es interrumpida debido a la transmisión de otras estaciones, para un enlace de largo alcance la estación podría determinar que el canal está libre he inicializar el algoritmo de *backoff* sin estarlo debido a los tiempos de propagación, por lo tanto este parámetro deberá ser incrementado por lo menos *Round trip time*; además se puede garantizar que las estaciones que comparten el medio no colisionen con los ACK en el caso de que existan más de dos estaciones.[9][12][103]

**Slottime:** Este parámetro incide directamente sobre la probabilidad de colisión entre las estaciones que comparten el medio. Este parámetro está definido dentro del estándar de tal forma que las estaciones que desean acceder al medio pueden colisionar si transmiten en un mismo slot, es decir si una estación se encuentra en un slot previo puede determinar que la otra estación ha accedido al medio. Para considerar como el *Slottime* define la probabilidad de la colisión en función de la distancia deberemos considerar el intervalo de vulnerabilidad el cual es el periodo de tiempo durante el cual pueden ocurrir colisiones. Esto se debe a que la transmisión y recepción no son mecanismos instantáneos, es decir, éstos dependen del tiempo de propagación de la señal electromagnética entre las estaciones, el tiempo implementado en los mecanismos CS/CCA (*Carrier Sense/Clear Channel Assessment*) y el tiempo en que la capa física cambia de modo recepción y comienza a transmitir el primer símbolo. El intervalo de vulnerabilidad se describe con el siguiente ejemplo; cuando una estación comienza a transmitir datos, éstos no podrán ser detectados por las otras estaciones de manera instantánea por lo tanto pueden considerar que el canal está libre y comenzar a transmitir generando colisiones. Las estaciones solamente podrán determinar que el canal está ocupado después de un determinado tiempo el cual debe ser por lo menos el periodo de vulnerabilidad.

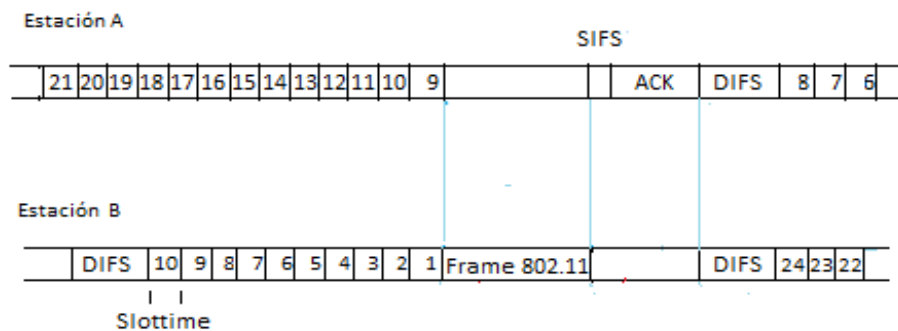
Periodo de vulnerabilidad es igual a la suma de:

- El tiempo que le toma a la estación transmisora evaluar el canal y de notificar ese estado a la capa MAC.
- El tiempo que tarda una estación destino cambiar de estado recepción al de transmisión.
- El tiempo de propagación.

Cuando se utiliza el *Slottime* definido en el estándar como  $20$  y  $9 \mu s$  para el estándar IEEE802.11b/g respectivamente, el intervalo de vulnerabilidad aumenta a partir de  $2.25\text{km}$  considerando que el  $CCA = 5 \mu s$  y  $750\text{m}$ . Si se utiliza un  $CCA = 2 \mu s$ , al aumentar la distancia, el intervalo de vulnerabilidad aumenta y el número de slots que encajan dentro de este intervalo aumenta, es decir aumentando la probabilidad de colisión entre las estaciones.[9][12][103]

Si se considera un análisis sobre los valores del *Slottime* en función de la distancia al aumentar el valor del *Slottime* de tal forma que sea igual al intervalo de vulnerabilidad ( $slottime \approx 2\delta$ ) las estaciones colisionarían solamente si transmiten en un mismo slot como se puede apreciar en la figura 19. [9] [20] [39]

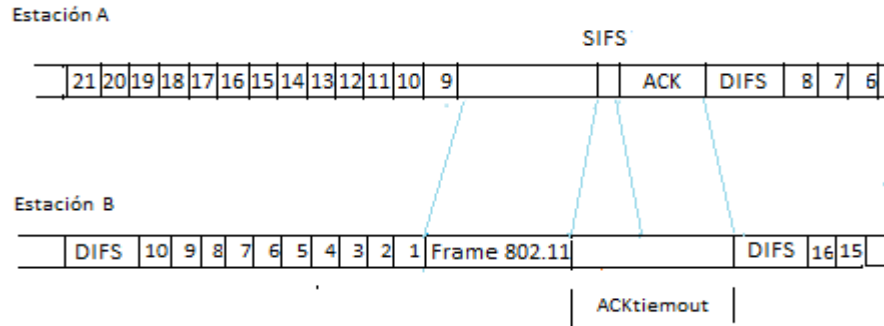
**Figura 19. El Slottime es comparable a 2 veces el tiempo de propagación**



**Fuente: Adaptada de Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links.[13]**

Si el valor del *Slottime* es más menor pero comparable con el intervalo de vulnerabilidad ( $slottime < 2\delta$ ) las estaciones podrán colisionar si transmiten en slots previos, el enlace pierde la simetría como se presenta en la figura 20. [9][20][39]

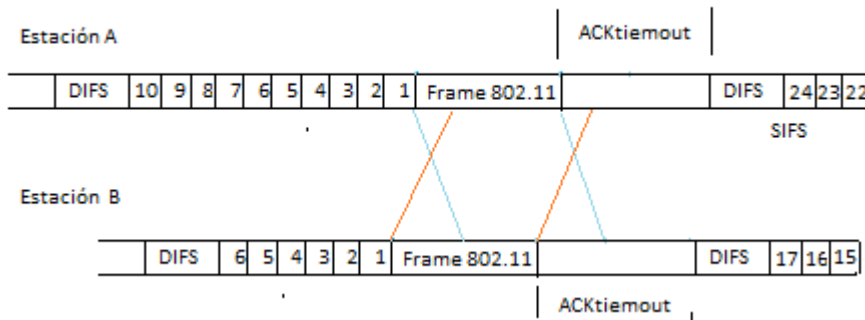
**Figura 20. El Slottime es menor a 2 veces el tiempo de propagación**



**Fuente: Adaptada de Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links.[13]**

Cuando el valor del *slottime* es pequeño comparado con el intervalo de vulnerabilidad  $slottime \ll 2\delta$  la probabilidad de colisión comienza a aumentar significativamente debido a que las estaciones podrán decrementar varios slots al no percibir el canal ocupado y después transmitir sin percibir la presencia de las otras estaciones.[9][20][39]

**Figura 21. El Slottime es menor pero comparable al tiempo de propagación.**



**Fuente: Adaptada de Modeling and optimization IEEE802.11. [13]**

### 3.3 CALCULO DEL THROUGHPUT UDP UNIDIRECCIONAL SOBRE UN ENLACE IEEE802.11 DE LARGO ALCANCE.

#### 3.3.1 El Mecanismo Básico.

El modo acceso básico está basado en el protocolo CSMA/CA. Cuando una estación se encuentra lista para transmitir, ésta debe sensar el canal por un tiempo DIFS (DCF *Interframe Space*), intervalo que depende de la capa física. Si la estación se encuentra libre durante este periodo, entonces la estación inicializa el algoritmo exponencial *backoff*. Como parte de este algoritmo se selecciona de forma aleatoria a partir de una distribución normal en el intervalo  $(0, CW_{min})$  el número de slots. Cada vez que la estación transmisora considere el canal libre CS/CCA, decrementa un slot. Si encuentra el canal ocupado la estación congela el algoritmo *backoff* hasta que encuentre el canal libre durante un DIFS. Cuando el número de slots llega a cero la estación comienza a transmitir. Al terminar la transmisión la estación transmisora escucha inmediatamente el canal para detectar si otra estación se encuentra transmitiendo. Si es así la estación declara que ocurrió una colisión y dobla la ventana de contención  $(0, 2^i * CW_{min})$  donde  $i$  especifica el número de retransmisiones hasta  $CW_{max}$  en el caso de que existan más colisiones en las otras etapas de contención. Si no la estación espera un ACK que será enviado desde la estación receptora. En el caso que no ocurra el arribo de un ACK se considera que existió una colisión (las estaciones no logran diferenciar una colisión de una pérdida de paquete).[103] Para mayor información del estándar refiérase al ANEXO B.

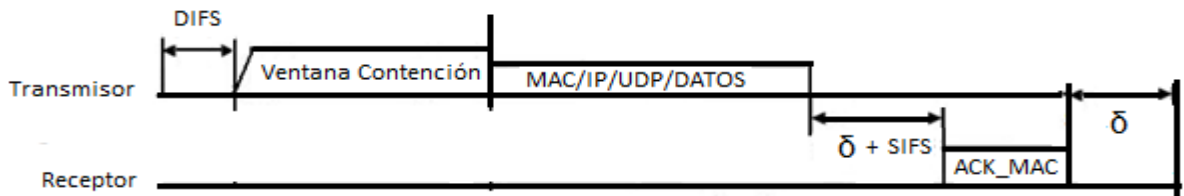
A continuación se calcula el máximo *throughput* UDP unidireccional [104][105] sobre el IEEE802.11 en función de la distancia. Para calcular el máximo *throughput* UDP unidireccional se utiliza la siguiente expresión:

$$Throughput_{UDP} = \frac{L_{paquete\_UDP}}{T_{Trans\_UDP}} \quad (3.1)$$

Donde  $L_{Paquete\_UDP}$  se refiere a la longitud del paquete UDP.

La  $T_{Trans\_UDP}$  se considera como el tiempo que transcurre una transacción UDP sobre el estándar IEEE802.11, el envío de un paquete UDP se describe en la figura 22.

Figura 22. Esquema simplificado de una transacción UDP sobre IEEE802.11



Fuente: Autor

Primero la estación transmisora verifica que el canal se encuentre libre durante un  $T_{DIFS}$ , para inicializar la ventana de contención, la cual se disminuye hasta que la ventana llega a cero la estación. Se procede luego a enviar el paquete UDP y cuando la estación llamada receptora lo recibe espera un tiempo  $T_{SIFS}$  para confirmar el arribo del paquete con un ACK\_MAC. [103]

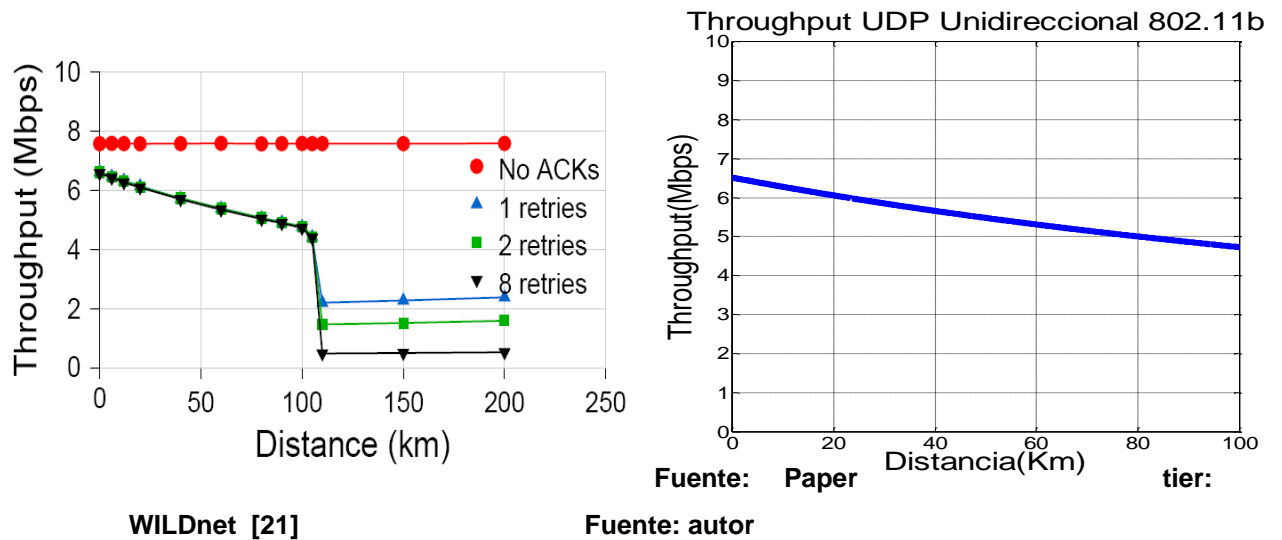
El tiempo para transmitir un segmento UDP sobre el estándar IEEE802.11b/g está dado por las siguientes expresiones:

$$T_{Trans\_UDP} = T_{DIFS} + T_{W\_contención} + T_{Datos\_UDP} + T_{SIFS} + T_{802.11\_ACK} + 2 * \delta \quad (3.2)$$

Con las expresiones anteriores y los parámetros definidos en ANEXO B y las especificaciones del Anexo C se predice el máximo *throughput* UDP unidireccional para el IEEE802.11b operando a 11Mbps en función de la distancia, con un valor de *ACKTimeout* de por lo menos 2 veces el tiempo de

propagación  $\delta$  para que no expire el *timer*, y el canal de comunicación ideal. Finalmente, se compara el modelo de la transacción UDP para 11Mbps utilizando una MPDU 1440bits en función de la distancia con los resultados obtenidos con un emulador de canal *Spirent SR5500* presentado por TIER.[21][42]

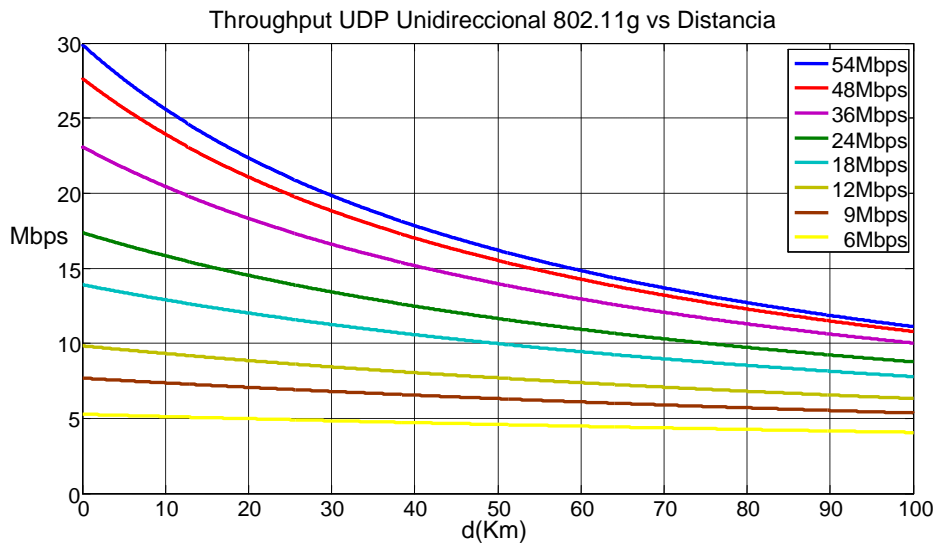
**Figura 23. Comparación throughput UDP unidireccional 802.11b 11Mbps**



Como se puede apreciar en la figura 23 este modelo permite predecir el *throughput* UDP unidireccional en un enlace punto a punto de largo alcance.

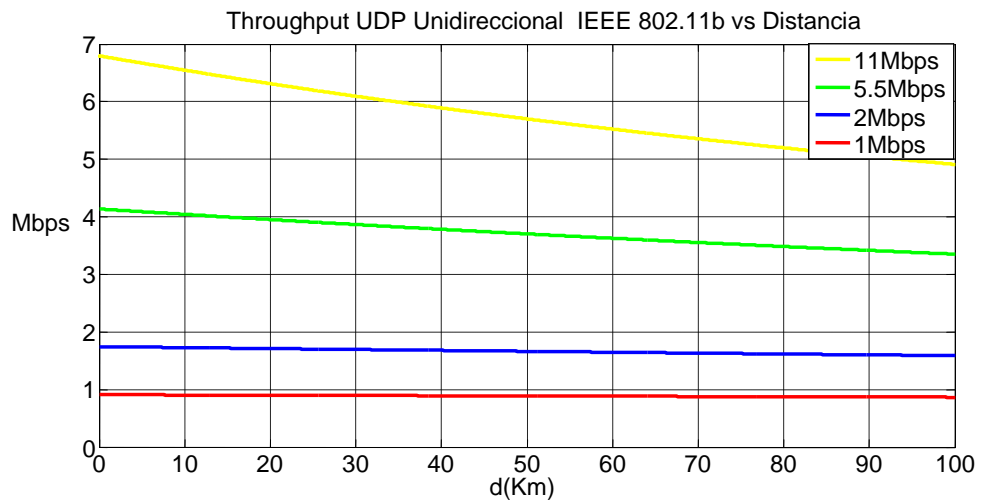
A continuación se presenta el *throughput* UDP unidireccional para todas las velocidades de transmisión IEEE802.11b/g, sin considerar las limitaciones de la PIRE para el rango de 0-100Km.

**Figura 24 Throughput UDP unidireccional para el IEEE802.11g**



Fuente: Autor.

**Figura 25. Throughput UDP unidireccional para el estándar IEEE 802.11b**



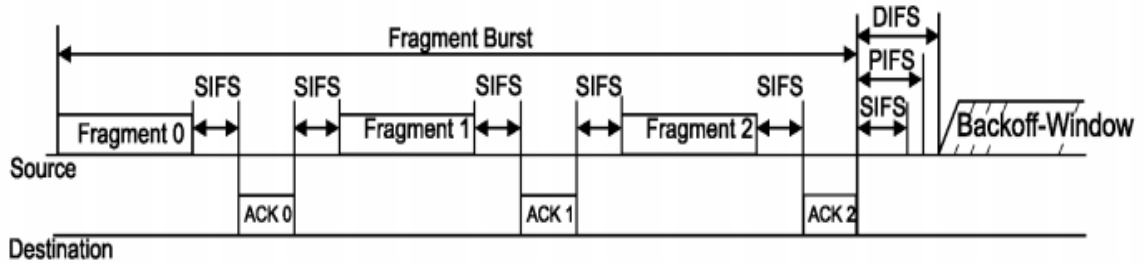
Fuente: Autor.

### 3.3.2 Calculo del throughput UDP unidireccional IEEE802.11b/g Bursting y Fastframing.

**Bursting:** Puede enviar más datos después de acceder el canal de comunicación es decir aumenta el *throughput*, elimina llamado consecutivos del algoritmo

exponencial de *backoff* es decir reduce el número de cabeceras como se puede apreciar en la figura 26.

Figura 26. Transmisión bursting IEEE802.11



Fuente: Estándar IEEE802.11 2007.

Para calcular el *throughput* se utiliza la siguiente expresión:

$$Throughput_{UDP} = \frac{N * L_{Paquete\_UDP}}{T_{Trans\_UDP}} \quad (3.3)$$

Donde el tiempo de una transacción UDP está dado por:

$$T_{Trans\_UDP} = T_{DIFS} + T_{W_{contención}} + N * T_{DatosUDP} + (2 * N - 1) * T_{SIFS} + N * T_{802.11\_ACK} + 2 * N * \delta \quad (3.4)$$

$N$  Es el número de paquetes de 1500 bytes que envía antes de volver a ejecutar el algoritmo de *backoff*.

$T_{DIFS}, T_{SIFS}, T_{802.11\_ACK}$  Se definen dentro del estándar.

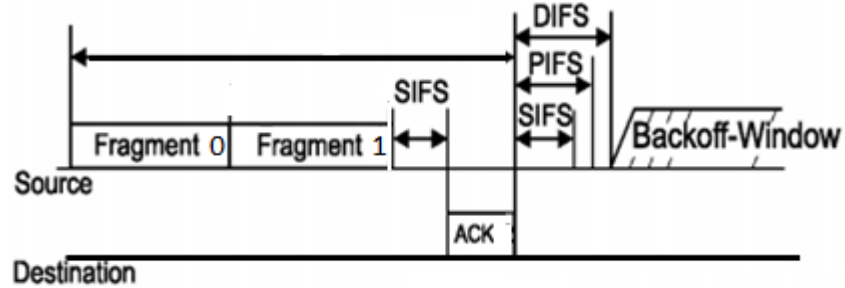
$T_{W_{contención}}$  Define la ventana de contención promedio.

$T_{802.11\_ACK}, T_{DatosUDP}$  Se calcula a partir del estándar.

**Fastframing:** Concatena tramas para mejorar la utilización del canal cuando la estación gana la etapa de contienda, cada vez que envía un super *frame* invoca

el algoritmo de *backoff* exponencial, lo cual lo hace más eficiente en canales con  $FER \approx 0$ .

Figura 27. Transacción del IEEE802.11 usando fastframing.



Fuente: Autor

Las expresiones para el cálculo del *throughput* UDP unidireccional con *fastframing* concatenando dos paquetes se calcula a partir de las siguientes expresiones:

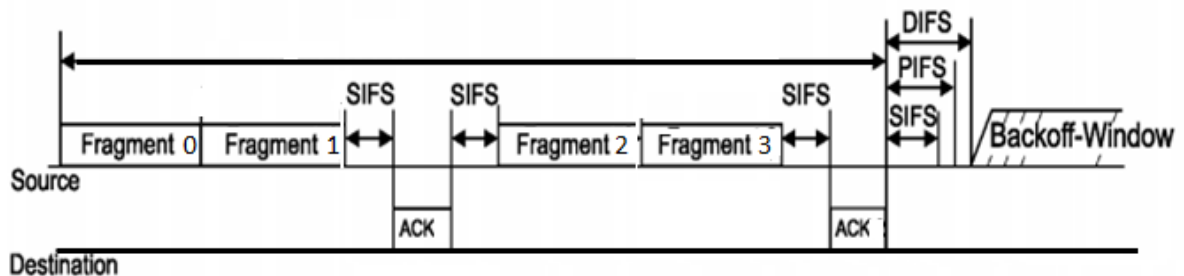
$$Throughput_{UDP} = \frac{2 * L_{Paquete\_UDP}}{T_{Trans\_UDP}} \quad (3.5)$$

$$T_{Trans\_UDP} = T_{DIFS} + T_{W_{contención}} + 2 * T_{Datos_{UDP}} + T_{SIFS} + T_{802.11ACK} + 2 * \delta \quad (3.6)$$

### Bursting y fastframing.

Estos dos protocolos buscan optimizar el uso del canal que cuando se utiliza CSMA/CA (Básico).

Figura 28. Bursting y fastframing sobre el IEEE802.11



Fuente: Autor.

El *throughput* UDP unidireccional utilizando estas dos técnicas se utiliza las siguientes expresiones considerando que la máxima MTU es 1500 bytes:

$$Throughput_{UDP} = \frac{2 * N * L_{paquete\_UDP}}{T_{Trans\_UDP}} \quad (3.7)$$

$$T_{Trans_{UDP}} = T_{DIFS} + T_{W_{contención}} + 2 * N * T_{Datos_{UDP}} + (2 * N - 1) * T_{SIFS} + N * T_{802.11_{ACK}} + 2 * N * \delta \quad (3.8)$$

$N$  Es el número de super *frame* que envía antes de volver a ejecutar el algoritmo de *backoff*.

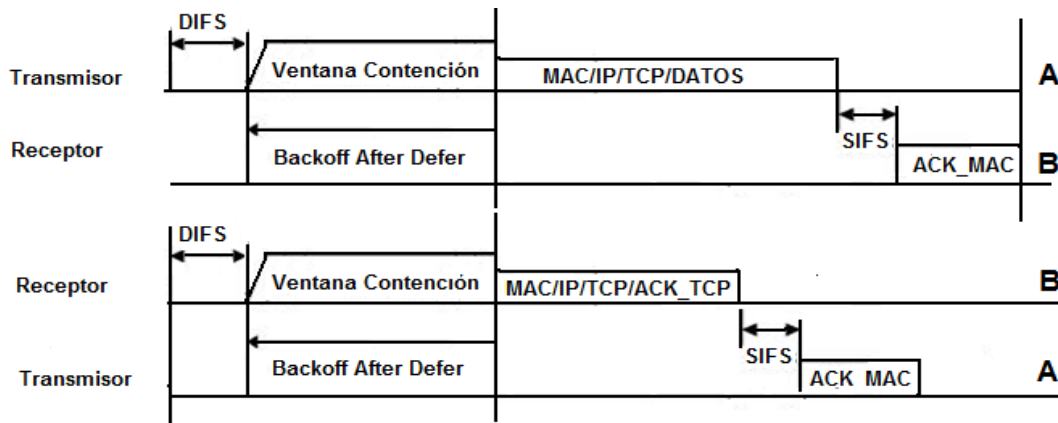
Para mayor información sobre *bursting* y *fastframing* refiérase al ANEXO D.

### 3.4 MODELOS QUE PERMITEN CALCULAR EL THROUGHPUT TCP.

Para calcular el *throughput* TCP se tendrá presente que por ser un protocolo de transporte orientado a conexión la estación receptora envía un ACK\_TCP desde la capa de transporte para confirmar el arribo de un paquete. Además se debe tener en cuenta que el protocolo TCP introduce una ventana de contención la cual mantiene el control de flujo sobre los dato y que la capa MAC del IEEE802.11 realiza máximo 7 retransmisiones sobre los paquetes perdidos.

A continuación se presenta un diagrama que representa una transacción TCP sobre el IEEE802.11 desde la perspectiva del transmisor y del receptor.

Figura 29. Transacción sobre el protocolo TCP.



Fuente: Autor.

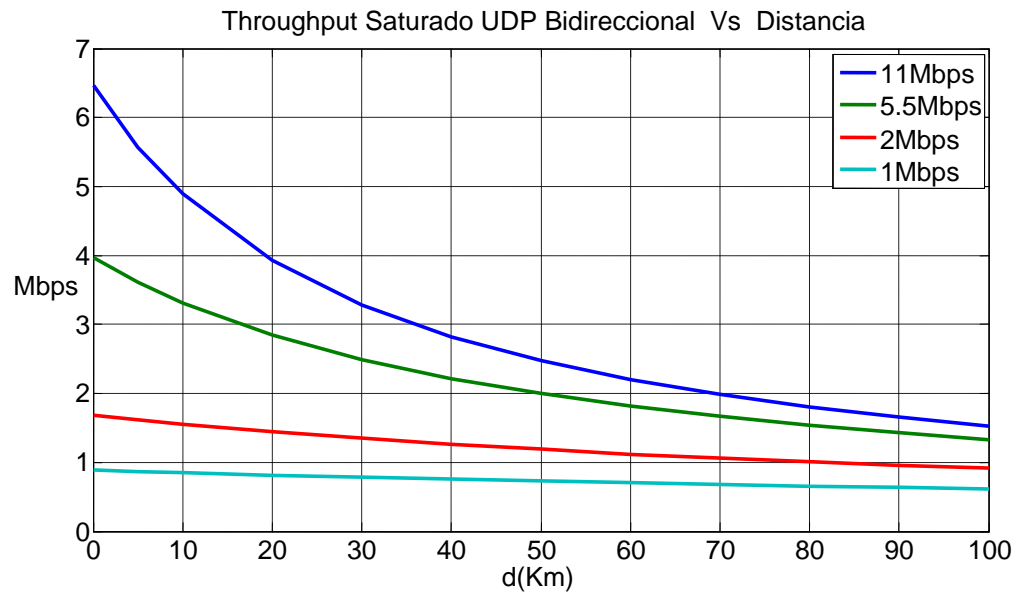
Para mayor información refiérase al ANEXO C.

### 3.5 PREDICCIÓN DEL THROUGHPUT UDP SATURADO BIDIRECCIONAL.

Al predecir el *throughput* UDP saturado bidimensional se analiza cómo influye el valor del *Slottime* en la probabilidad de colisión (considerando que el *ACKTimeout* es mayor al tiempo a 2 veces el tiempo de propagación). Si el *slottime* seleccionado es el valor por defecto del estándar, al incrementar la distancia la probabilidad de colisión aumenta, por ende se incrementa el número de retransmisiones así como los retardos y el *throughput* disminuye. Si el valor del *slottime* es cercano al tiempo de propagación entre las estaciones, el *throughput* se maximiza, la probabilidad de colisión disminuye y los retardos aumentan. Al seleccionar el *slottime* proporcional a 2 veces el tiempo de propagación entre las estaciones, sólo pueden colisionar si transmiten en un mismo slot. A partir del último caso, ajustando el tiempo de una transmisión exitosa y el de una colisión, con el modelo de Bianchi podemos predecir el *throughput* saturado sobre redes de largo alcance. Para el enlace punto a punto en el modelo de bianchi se considera que el número de estaciones N es 2, el  $BER = 0$  (es decir el nivel de recepción siempre se encuentra mayor que el nivel de sensibilidad), que los

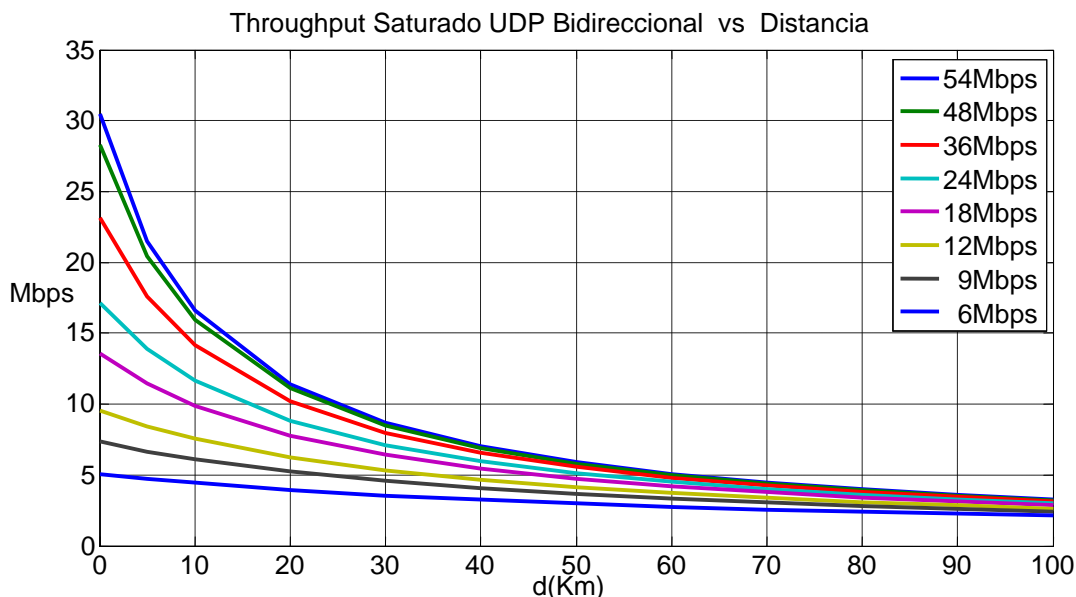
temporizadores de ACK no expiran y que no hay limitaciones en cuanto a la PIRE. El resultado se presenta en las figuras 30 y 31 (si quiere considerar la PIRE para cada distancia se considera que la máxima distancia para cada velocidad de transmisión en la capa física está dada en la figura 4). [106][107]

**Figura 30. Throughput UDP Bidireccional en un enlace Punto a Punto IEEE802.11b considerando  $\sigma = \sigma_{estandar} + 2 * \delta$ .**



Fuente: Autor.

**Figura 31. Throughput UDP Bidireccional en un enlace Punto a Punto IEEE802.11g considerando  $\sigma = \sigma_{estandar} + 2 * \delta$ .**



Fuente: Autor

Para una mejor comprensión del modelo propuesto por Bianchi refiérase al ANEXO E.

### 3.6 MODELO DE JAVIER SIMO.

J. Simo introduce un modelo que representa el desempeño del IEEE802.11 sobre redes de largo alcance. J Simo para desarrollar su modelo identifica la ocurrencia de las colisiones a partir del intervalo de vulnerabilidad donde una estación puede colisionar con la transmisión de otra estación debido a que ésta no puede escuchar el arribo del paquete de la otra estación. Para el cálculo de  $\tau$ , el cual es la probabilidad de que al menos una estación transmita en un slot (valor que no depende de la distancia entre los nodos), la expresión se toma del modelo de Bianchi, mientras que para determinar  $p$ , la probabilidad de que ocurra una colisión, el modelo de J. Simo tiene presente el intervalo de vulnerabilidad.[12][20]

Para mayor comprensión del modelo refiérase al ANEXO F.

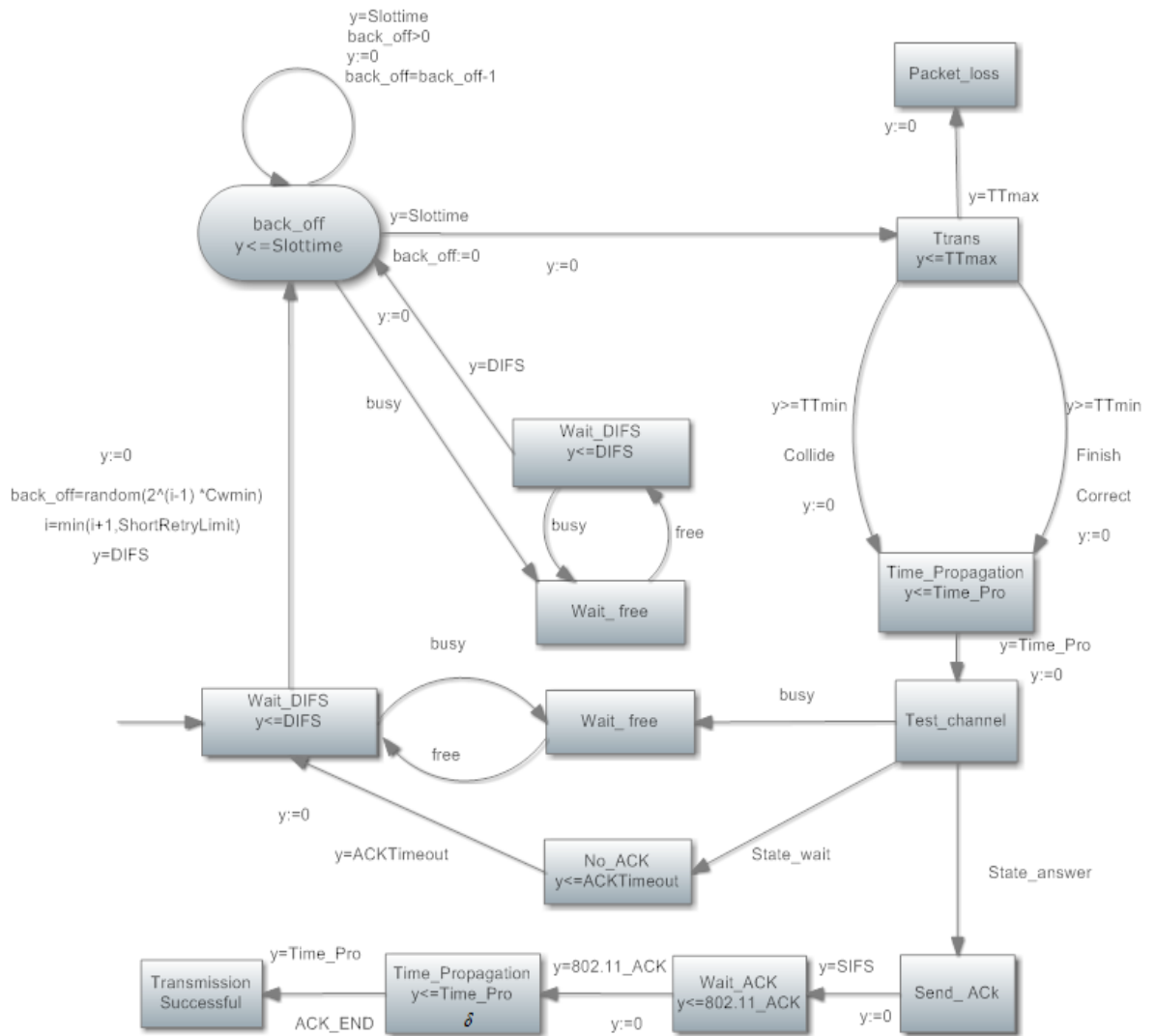
### 3.7 MÁQUINA DE ESTADOS PARA MODELAR EL IEEE 802.11 DCF SOBRE REDES DE LARGO ALCANCE.

Las máquinas de estado permiten realizar una representación de las cadenas bidimensionales de Markov, que para el caso permiten ilustrar la evolución del modo DCF a través del tiempo, y evaluar el *throughput* saturado en una red de área local basado en el IEEE802.11. [108] [109]

En redes de un enlace de largo alcance, basadas en el IEEE802.11, la probabilidad de que una estación transmita no depende de la distancia entre las estaciones. Lo que si varía es la probabilidad de que la transmisión de una estación colisione con otra, lo cual depende del valor  $C_w$  que obtenga cada estación que desee acceder al medio en su etapa de contienda y el número de slots que se inicialicen antes de que la señal alcance la otra estación.

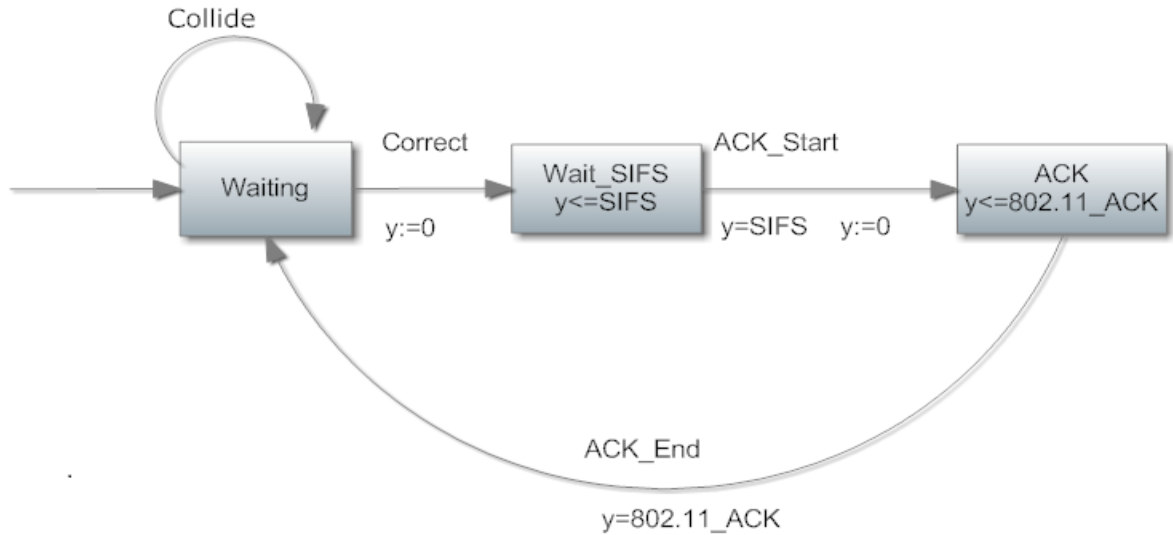
A continuación se presenta una máquina de estados que representa al transmisor que utiliza DCF.

**Figura 32. Máquina de estados que representa un transmisor DCF.**



**Fuente: Adaptado de Probabilistic Model Checking of the IEEE 802.11 Wireless Local Area Network Protocol [108] y A Finite State Model for IEEE 802.11 Wireless LAN MAC DCF [109]**

Figura 33. Máquina de estados que representa al receptor.



Fuente: Adaptado de Probabilistic Model Checking of the IEEE 802.11 Wireless Local Area Network Protocol [108] y A Finite State Model for IEEE 802.11 Wireless LAN MAC DCF [109].

A partir de la máquina de estados se puede determinar el tiempo de transmisión exitosa y el tiempo de colisión, para utilizarlos en la evaluación del *throughput* de un enlace de comunicación. Adicionalmente se debe diferenciar en cuáles casos se llega al estado de transmisión exitosa y en cuáles ocurre una colisión. Por lo tanto se define el intervalo de colisión (IC), considerado como el intervalo de tiempo durante el cual la estaciones STA y STB, que hacen parte del enlace punto a punto, pueden colisionar cuando transmitan asumiendo que STA tiene una ventana  $CW_a$  y STB tiene una ventana  $CW_b$ , con un valor de *Slottime* fijo. Para una mejor comprensión, considérese el siguiente ejemplo. Dos estaciones STA y STB intentan transmitir de manera simultánea. La ventana seleccionada de forma pseudo aleatoria para STA es  $CW_a$  y para STB es  $CW_b$ . La estación que tenga la menor ventana de contención transmite, pero debido a la distancia entre ellas, la otra estación no detecta con su mecanismo CC/CCA que el canal se encuentra ocupado. Si se supone que STA tiene la menor ventana, sólo podrá

colisionar con STB cuando la ventana de contención llegue a cero debido a que no percibe la transmisión de STA, lo cual se puede calcular a partir del número de *Slottime* ( $s$ ) que transcurren en el tiempo de propagación y el tiempo que tarda el mecanismo CCA en determinar que el canal se encuentra ocupado,  $IC = \delta + CCATime$ . También se puede calcular el número de slots dentro de los cuales puede ocurrir una colisión, lo cual está expresado en siguiente ecuación:

$$ICN = \left( \frac{\delta + CCATime}{\sigma} \right) \quad (3.9)$$

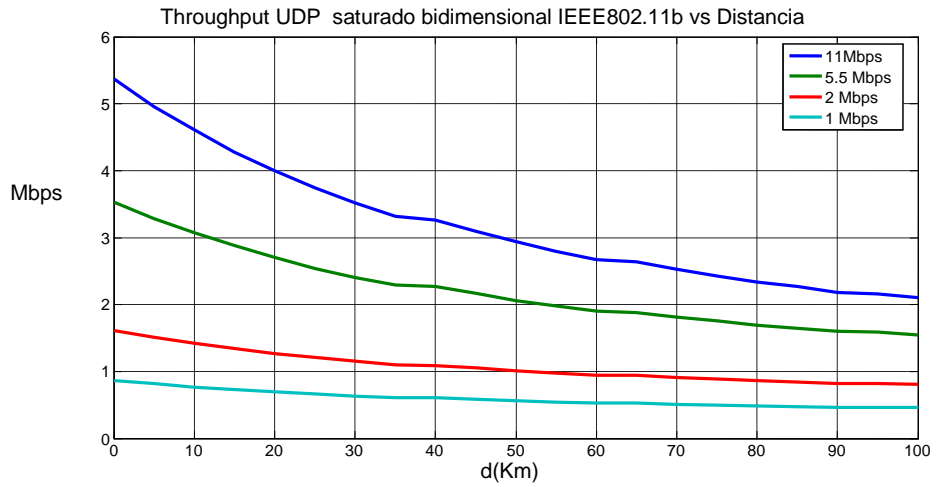
Como  $CCATime \ll \delta$  para enlaces de largo alcance y tomando valores enteros para el número de *slots*, la expresión se puede simplificar a:

$$ICN = \text{ceil} \left( \frac{\delta}{\sigma} \right) \quad (3.10)$$

Este el intervalo de colisión es la mitad del intervalo definido en el modelo de Javier Simo debido a que se conoce el valor de la ventana de contención para las dos estaciones, por lo tanto la estación que tenga la ventana de contención menor no podrá colisionar a priori con la otra estación.

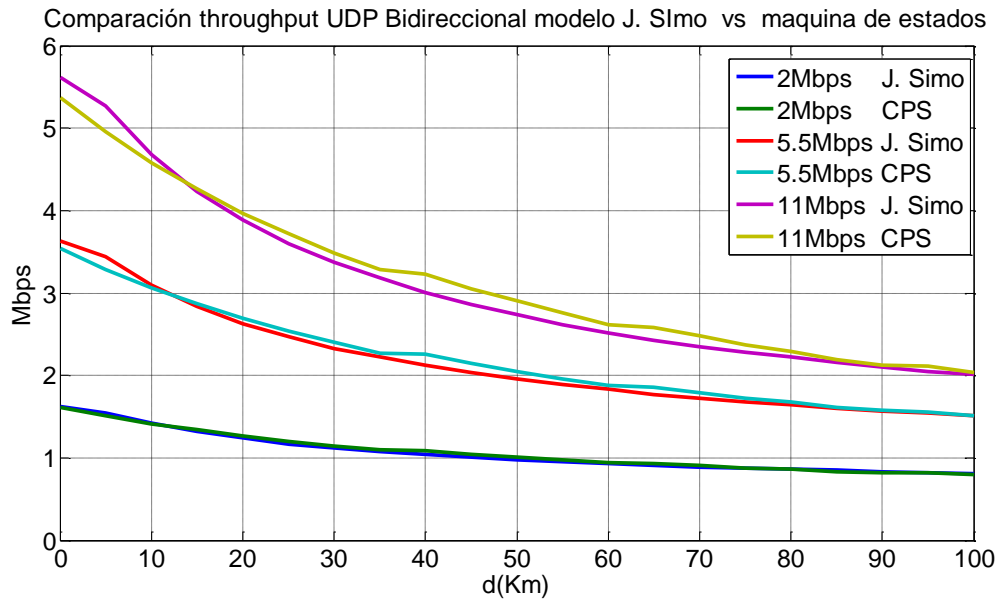
A continuación se presenta en la figura 34 los resultados del modelo CPS para el estándar IEEE802.11b. En la figura 35 se compara con el modelo propuesto por J. Simo. La figura 36 se compara el modelo CPS con mediciones de *throughput* saturado bidimensional realizadas en la zona rural de Cuzco en el Perú por el grupo EHAS [20]. En la figura 37 se presenta una comparación entre las medidas entregadas por el modelo CPS y las pruebas realizadas con el emulador de canal SR5500 por el grupo TIER [21].

**Figura 34. Throughput UDP Bidireccional IEEE802.11b  $\sigma = \sigma_{estandar}$**



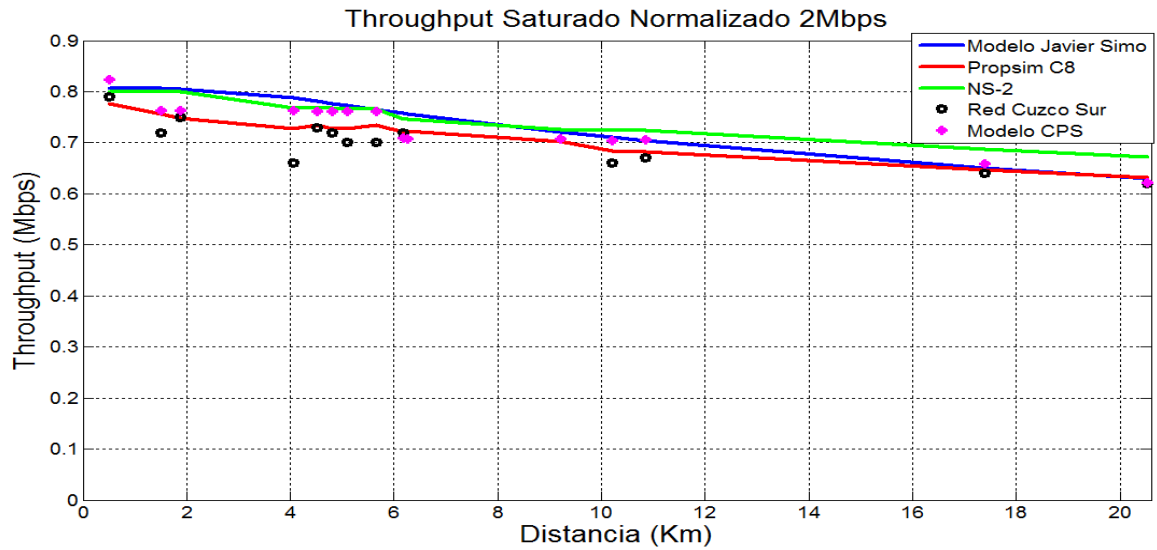
Fuente: Autor.

**Figura 35. Comparación Modelo de J.Simo con el Modelo CPS IEEE802.11b**



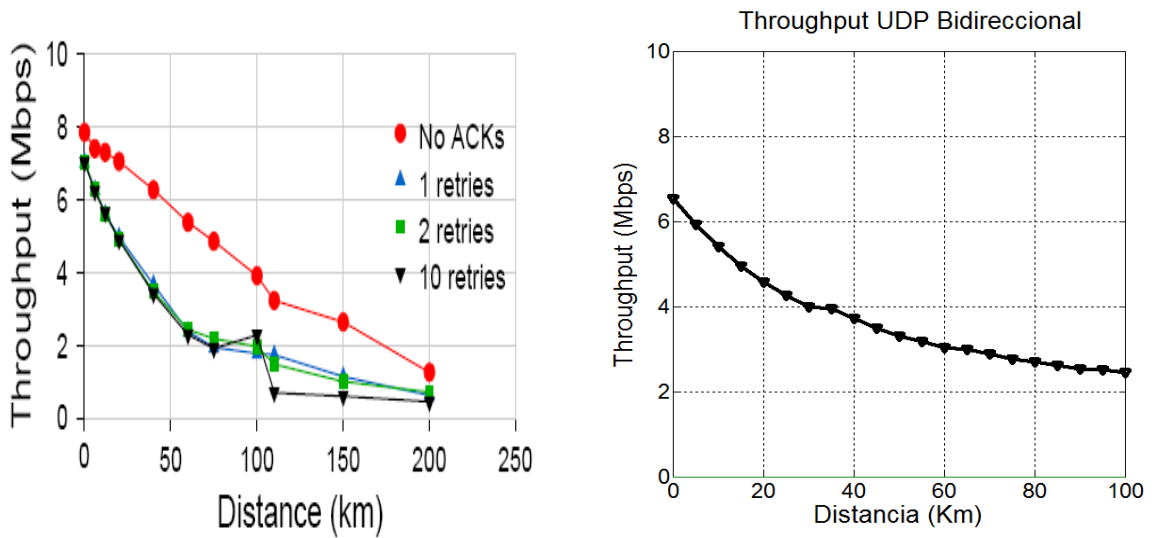
Fuente: Autor.

**Figura 36. Comparación modelo J. Simo, emulador de canal, NS-2 ,proyecto EHAS, modelo CPS.**



Fuente: Autor.

**Figura 37. Comparación Throughput UDP Bidireccional para 11Mbps**



Fuente: WILDnet: Design and implementation Of high performance WiFi based long distance networks, Universidad Berkeley, 2007. [21]

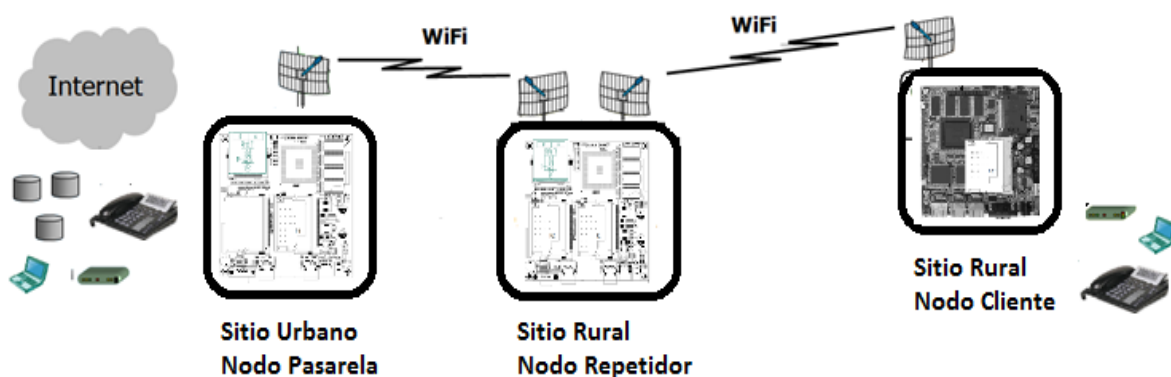
Fuente: Autor.

## 4. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE PRUEBAS.

### 4.1 METODOLOGÍA DE PRUEBAS PROPUESTA PARA DETERMINAR EL DESEMPEÑO DE UNA RED IEEE802.11.

En este capítulo se describe la propuesta metodológica para implementar un conjunto de pruebas que permita caracterizar el desempeño de una red de comunicación inalámbrica bajo el estándar IEEE802.11b/g modificando tiempos de su mecanismo de acceso al medio para enlaces de largo alcance, los cuales serán implementados en zonas rurales. Las pruebas han sido e implementadas tanto en laboratorio como en campo abierto. El desarrollo de estas pruebas se realiza sobre enlaces punto a punto que están organizados en una topología de red troncal como se aprecia en la figura 38. Los nodos se clasifican como pasarela, repetidor y cliente.

Figura 38. Diagrama de red de una red troncal



Fuente: Autor.

La configuración seleccionada para los radios de comunicación es infraestructura punto acceso (AP) y estación base (BS) y el modo de funcionamiento que se utiliza es (DCF).

El desempeño de una red de comunicación se determina a partir de la relación que existe entre las métricas (Ancho de banda, retardos y pérdidas) con los protocolos de comunicación, la topología y el escenario físico de red. Cuando se caracteriza un enlace de comunicación inalámbrico, las métricas están relacionadas estrechamente con la relación señal a ruido, la interferencia, las velocidades de transmisión sobre la capa física, los protocolos que se utilizan para acceder al medio y la cobertura sobre escenarios cerrados y abiertos (Fenómenos de propagación difracción, absorción, reflexión, refracción).

Para evaluar el desempeño del IEEE802.11b/g en enlaces de largo alcance se realizaron pruebas de laboratorio y campo abierto. Para evaluar el cálculo de las métricas de desempeño se utilizó un generador de tráfico.

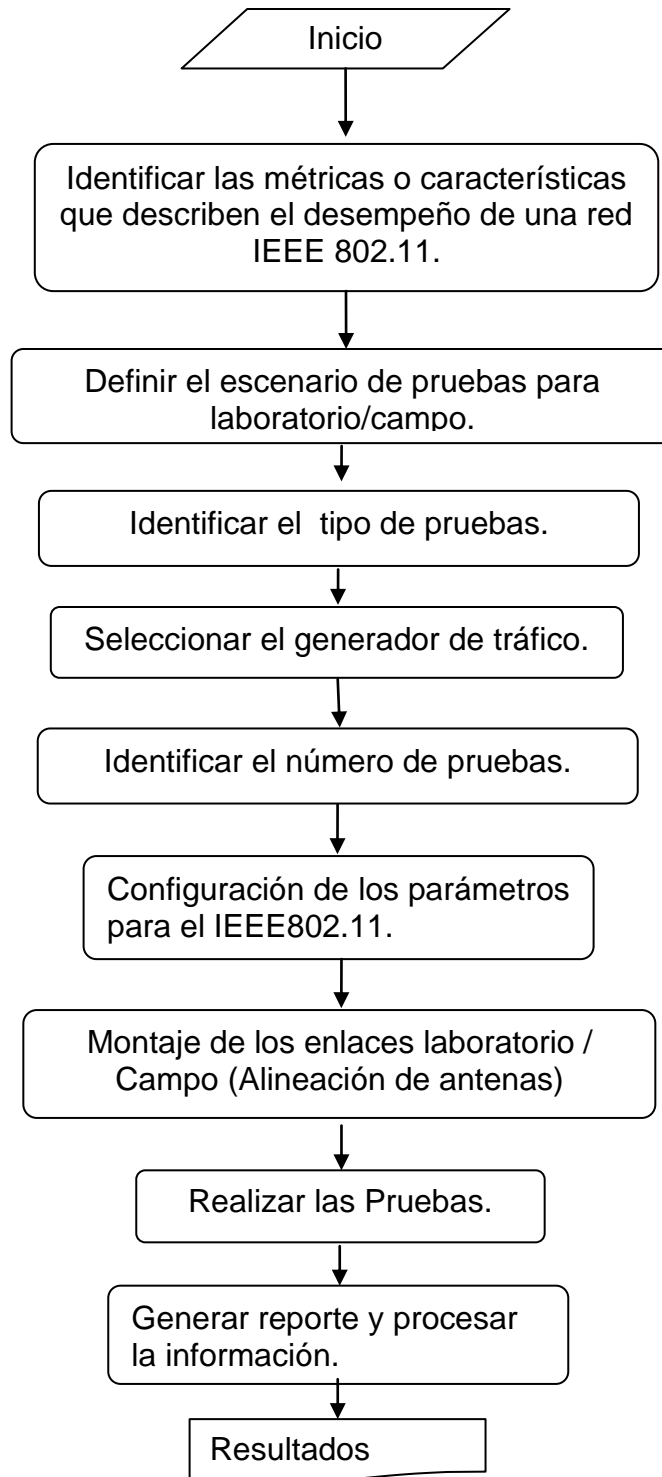
Para la realización de las pruebas se tuvieron presentes los siguientes aspectos:

- El valor seleccionado para el *slottime* es cercano al valor que maximiza el *throughput* según la distancia.
- El valor de *ACKTimeout* se configura de tal forma que no expire por el tiempo de la señal entre los extremos del enlace punto a punto, evitando así que se generen retransmisiones innecesarias. Si *ACKTimeout* para el chip *Atheros* se configura en un valor máximo de 370µs, la máxima distancia para el IEEE802.11g es de 50Km mientras que si se configura en 740 µs para el IEEE802.11b es de 100Km.
- En las pruebas de laboratorio se utiliza un cable como guía para la señal de Wi-Fi y se evita de esta forma la incidencia de interferencia sobre el enlace y la multitrayectoria, lo cual podría afectar las mediciones realizadas.

- A las medidas obtenidas en laboratorio se les debe compensar los retardos generados por el recorrido espacial tanto para UDP como para TCP.
- En las pruebas de campo abierto y en laboratorio se realizan con el acceso al medio básico definido en el estándar IEEE802.11 y con los protocolos *bursting* y *fastframing* los cuales optimizan la utilización del canal.
- En las pruebas de laboratorio como en las de campo abierto se debe garantizar que el RSS esté por encima del umbral de recepción de los radios, para garantizar un *BER* cercano a cero y obtener el máximo *throughput*.
- Para realizar las pruebas de campo se debe garantizar la estabilidad del enlace, es decir, debe existir una alineación entre las antenas que no se vea afectada por el viento.

La descripción de la metodología se representa con el siguiente diagrama de bloques y a continuación se describe cada uno de ellos.

Figura 39. Diagrama de bloques metodología de pruebas



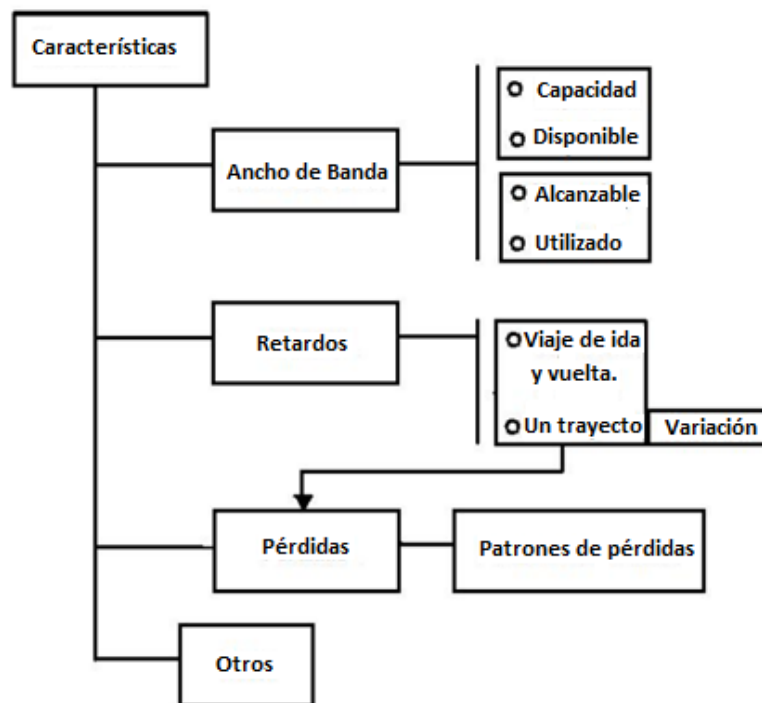
Fuente: Autor.

#### 4.1.1 Identificar las métricas de red para caracterizar el desempeño de un enlace de red.

Para identificar las métricas que permiten caracterizar el desempeño de un enlace de comunicación punto a punto se relacionaron las características que presentan el grupo de *Internet Engineer Task Force* con las que presenta *Network Measurements Working Group* y se seleccionaron las más relevantes para un sistema de comunicación inalámbrico.

A continuación se presenta un cuadro con las diferentes métricas más importantes que permiten caracterizar el desempeño de un enlace de comunicación.

Figura 40. Diagrama características que evalúan el desempeño de un hop.



Fuente: Autor.

De las características descritas en la gráfica anterior para el sistema de comunicación inalámbrico punto a punto se identificaron las siguientes:

**Ancho de banda logrado:** Es la máxima cantidad de bits por unidad de tiempo que un hop o enlace pueden proveer para una aplicación, dado la utilización actual del canal, el protocolo y el sistema operativo usado, y las capacidades de rendimiento del host final. El objetivo consiste en tratar de determinar el *throughput* real que usa una aplicación.

**Retardos:** El retardo se puede medir por medio del *One way delay* (OWD) o *Round Trip time* (RTT). OWD es el tiempo que tarda en viajar un paquete desde una fuente a un punto destino, mientras que el RTT se calcula sumando el tiempo de vuelta. Idealmente se puede decir que el RTT es dos veces OWD. Si esta condición no se cumple se puede decir que el enlace es asimétrico.

**Jitter o variaciones de retardos:** Es una característica que se encuentra implícitamente dentro de los retardos. Esta métrica se define como la variación de la característica *one way delay* de los paquetes. Este parámetro se mide a partir de la observación del tiempo de arribo entre los paquetes enviados en un intervalo fijo.

**Paquetes perdidos:** En un enlace los paquetes enviados por el transmisor pueden sufrir alteraciones ya sea por interferencias en el canal, por colisiones, o por la BER asociada con la SNR y el tipo de modulación utilizada.

**Otros.**

**RSSI (*Receive Signal Strength indicator*) / SNR (*Signal to Noise Ratio*) :** El radio provee una medida por frame llamada RSSI y una medida llamada “*silence value*”. El nivel de señal RSSI refleja la potencia total observada por el hardware mientras recibe el *frame*, incluyendo la señal, interferencia y el ruido. El valor de silencio es la potencia que se observa en el receptor antes de recibir el

*frame*. Los radios Wi-Fi en su capa física define un intervalo de valores entre 0 y 6 dB de RSS sobre el umbral para los cuales el FER varía entre 0 – 100%.

En síntesis, la metodología de pruebas para caracterizar un enlace punto a punto bajo los estándares IEEE802.11b/g sobre redes de largo alcance contempla las siguientes métricas:

- Ancho de banda logrado (*Throughput*).
- Retardos (RTT).
- *Jitter*.
- Paquetes perdidos.
- RSSI.

#### 4.1.2 Definición para el escenario de pruebas en laboratorio/campo.

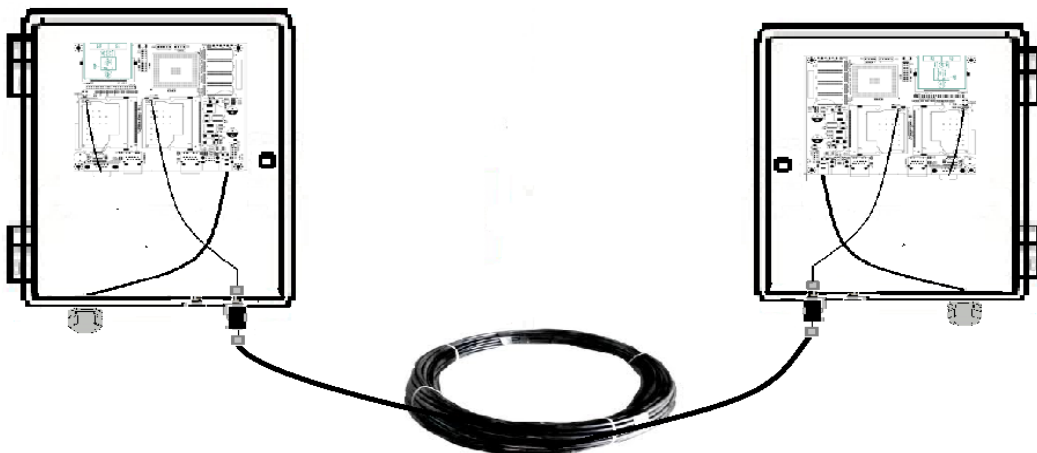
##### Escenario de pruebas en laboratorio.

Para el desarrollo de las pruebas de laboratorio se tendrá presente los siguientes aspectos.

Figura 41. Topología de red para las pruebas de laboratorio.

Nodo 1

Nodo 2



Fuente: autor

- El canal de comunicación seleccionado debe estar libre de interferencias.
- Se utiliza un cable coaxial para emular una guía para la señal de RF y generar una atenuación asociada a la propagación.

### **El canal libre de interferencias:**

El canal de comunicación entre los nodos Wi-Fi para el enlace punto a punto seleccionado debe estar libre de interferencias (causado por otros nodos Wi-Fi u otras fuentes de radiación) para evitar que el mecanismo CCA detecte energía en el canal de comunicación de una señal Wi-Fi válida. Cuando esto sucede, se considera que el canal se encuentra ocupado, se activa el algoritmo *backoff*, se difiere la transmisión del paquete y como resultado se disminuye significativamente el *throughput*. Por otra parte, la presencia de interferencia incrementa el nivel de ruido, lo cual aumenta el BER y en consecuencia el desempeño del enlace.

### **Uso de cable coaxial para emular las pérdidas por propagación.**

El cable permitirá emular una atenuación proporcional a la distancia de propagación con un  $BER \approx 0$ . Con esto se garantiza que prácticamente no existan retransmisiones dentro del algoritmo *backoff*, por lo tanto la atenuación no será influyente sobre el *throughput*. Si ésta se encuentra por encima del umbral de recepción, se evitan retransmisiones innecesarias debido al error de un paquete por el ruido presente en el canal de transmisión.

Al utilizar un medio guiado (cable coaxial) se debe garantizar que la potencia del radio transmisor no active el mecanismo CCA por el canal no guiado (espacio libre) entre las dos estaciones. Para verificar que los nodos se están comunicando a través del medio guiado se monitorea el canal de comunicación utilizando una tarjeta de red Wi-Fi en la zona circundante o un analizador de

espectros para verificar que el nivel de recepción en los extremos del enlace se encuentre lo más cercano al umbral de ruido.

#### **4.1.3 Identificar el tipo de pruebas.**

Las pruebas se realizan con tráfico UDP y TCP en laboratorio y en campo abierto.

##### **Medidas con UDP**

Las medidas de tráfico UDP se orientan a *streams* de datagramas espaciados adecuadamente. Para ello se debe transmitir una cantidad de datos y medir la cantidad de tiempo que se tarda el receptor en recibirlos y medirlos. El espacio entre los datagramas puede ser determinístico o seguir una distribución probabilística lo cual permite lograr una tasa o velocidad de transmisión de segmentos. Los *streams* enviados no deben exceder la capacidad de la tarjeta de red o interface de red, porque ésta tendrá problemas con el embotellamiento de ellos paquetes pueden ser encolados a perdidos por el sistema que se encuentra transmitiendo, alterando así la secuencia presente en la red.

##### **Medidas con TCP**

Una de las medidas más utilizadas es el *throughput* o capacidad TCP, el cual se calcula a partir del máximo flujo de datos con cabeceras TCP que se puedan transmitir entre los terminales de un hop. Los resultados de capacidad son muy afectados por la forma en que se implementa el protocolo TCP, es decir el algoritmo utilizado para el control de la congestión (*Reno, Tahoe, Cubic, bic, new Reno, Hybla*), la longitud del buffer para lectura y escritura que utiliza, y la longitud de socket buffer que está limitado la ventana implementada.

Otros factores que afectan al *throughput* TCP, son:

- Los algoritmos que implementan el protocolo TCP utilizan estrategias de

control de congestión como *slow start*. Si el enlace es demasiado lento (RTT  $\geq 50$ ms), este algoritmo puede demorarse 1 segundo en iniciar.

- El algoritmo TCP utilizado es muy intrusivo y carga de forma significativa la red. Esto implica usar por tiempo considerable un generador de tráfico para poder tener un estimativo real de la capacidad de la red con la herramienta *iperf*. Para un enlace cuyas características de ancho de banda y retardos son 100Mbps y RTT: 200ms el *iperf* debe estar funcionando por lo menos durante 10s para lograr una estimación aceptable.
- Algunas aplicaciones ven afectado su *throughput* por efecto de los búferes y de los retardos en el encolado de paquetes más que por el uso de un generador de tráfico.

#### 4.1.4 Descripción y selección de los generadores de tráfico.

Los generadores de tráfico se dividen en dos clases: Los que generan tráfico de naturaleza determinística y los generadores que hacen uso de procesos estocásticos.[113]

##### *Descripción de los generadores de tráfico IPER y DITG.*

**IPERF:** Es uno de los generadores de tráfico mas referenciado en la literatura debido a su versatilidad y desempeño. Permite generar tráfico tanto TCP como UDP y reporta medidas de *bandwidth*, *MSS/MTU Maximum Segment Size/Maximum Transmission Unit*, *delay*, *jitter* y paquetes perdidos.[113] [114]

**DITG:** *Distributed Traffic Generator* Es una herramienta capaz de generar tráfico de forma precisa, replicando procesos estocásticos basados en *Inter departure time* para definir el tiempo entre el envío consecutivos de paquetes y *packet size* para el tamaño de los paquetes, utilizando variables aleatorias cuya distribución puede ser (Exponencial, Uniforme, Cauchy, Normal, Pareto). La herramienta permite generar tráfico TCP/UDP/ICMP/SCTP/DCCP y medir el *throughput*, *Round*

*Trip Time* RTT, *one-way delay meter* (OWDM). También permite realizar mediciones de *Quality of Service* (Qos) en aplicaciones tales como VoIP. [115]

**Tabla 15. Características del generador Iperf y D-ITG**

<b>Característica de red</b>	<b>Iperf</b>	<b>D-ITG</b>
Throughput UDP/TCP	Si	Si
Jitter	Si	Si
Packet Loss	Si	Si
OWD	Si	No
RTT	No	No
Observaciones	La herramienta IPERF permite modificar el tamaño de la MTU y el buffer en UDP y TCP permite modificar el tamaño de la ventana.	La herramienta D-ITG permite generar diversos patrones de tráfico permitiendo variar la MTU según diferentes variables aleatoria.

**Fuente: Autor**

El generador de tráfico seleccionado para la metodología de prueba Iperf como resultado de su bajo consumo de memoria y carga de procesamiento.

### **Parámetros y características del generador de tráfico IPERF.**

#### **Características de TCP.**

- Permite medir ancho de banda
- Reporta máximo tamaño de segmento MSS y la máxima unidad a transmitir MTU.
- Permite cambiar el tamaño de la ventana a partir de un socket búfer.
- Cliente y el servidor pueden abrir un número múltiple de conexiones.

#### **Características en UDP.**

- Permite al cliente crear *streams* UDP con un ancho de banda específico.

- Mide paquetes perdidos.
- Mide el retardo y el *jitter*.
- Puede generar tráfico multicast.
- Cliente y servidor pueden tener conexiones simultáneas.

#### 4.1.4 Número de observaciones realizadas.

Para determinar el número de observaciones se tuvieron presente tres aspectos, las experiencias presente en los trabajos [12] [23], el número de pruebas propuesto por la ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) [116] y la experiencia con las mediciones en campo abierto.

El número de observaciones que propone la ETSI se relaciona con la variabilidad de las mediciones, es decir, la calidad del enlace, el mecanismo de acceso al medio y el tipo de generador de tráfico utilizado. Éste se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$n = \frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2}{\alpha^2} * \left( \frac{s}{\text{mean}(x)} \right)^2 \quad (4.1)$$

donde:

$n$ : Es el número de muestras.

$Z_{1-\alpha/2}$  Es el percentil  $1 - \alpha/2$  de una distribución normal.

$s$  : Es la desviación estándar (esta medida se calcula a partir de las medidas realizadas en un piloto de prueba).

$\text{mean}(x)$ : Es el valor medio (esta medida se calcula a partir de las medidas realizadas en un piloto de prueba).

$\alpha$ : Es la precisión relativa.

Para tener un nivel de confianza del 95% Se deben usar los siguientes valores.

$$Z_{1-\alpha/2} = 1.96$$

$$\alpha = 2\%$$

**Tabla 16. Relación entre la desviación estándar y la media con el número de observaciones.**

$\frac{s}{\text{mean}(x)}$	Observaciones
< 0.1	100
0.1 a 0.3	1000
0.3 a 0.5	2500
0.5 a 0.7	5000
0.7 a 0.9	7500
>0.9	10000

**Fuente:** Referencia [116].

Como el valor del cociente y desviación estándar es menor que < 0.1 cuando el nivel de RSS se encuentra por encima del umbral de sensibilidad, la cantidad de observaciones debe ser mayor de 100. Además se debe considerar que la duración de las observaciones preliminares requeridas por la metodología debe ser mayor que el tiempo de respuesta del generador de tráfico, cuyo valor por defecto para el caso de iperf es 10s. Con tiempos mayores a este intervalo de tiempo el transitorio de arranque del generador de tráfico no afecta las medidas esto sucede si se considera que las condiciones del enlace son estables.

Para las pruebas realizadas en laboratorio se estableció que la duración de las mismas fuera de 180s, aunque en pruebas de laboratorio se pudo apreciar que con duraciones menores el resultado no difiere de las medidas realizadas sobre intervalos de tiempo más grandes.

#### **4.1.5 Selección de los parámetros para realizar las pruebas del *throughput* con el estándar IEEE802.11b/g .**

##### **Limitaciones en Hardware.**

La extensión del alcance de un radio mediante modificación de los parámetros de

la capa MAC está limitada por el valor máximo que puede tomar el campo del parámetro *ACKtimeout* que se puede realizar con el driver MADWIFI. Los valores típicos son:

802.11b : 744us ~ 111km

802.11g : 372us ~ 55km

Las pruebas se realizaron en el rango de 0-100Km con el estándar IEEE802.11b, IEEE802.11b- *Bursting* y 50Km con el estándar IEEE802.11g, IEEE802.11g- *Bursting-Fastframe*.

**Tabla 17. Parámetros MADWIFI Configuración IEEE802.11b**

Comando	Descripción
iwpriv ath0 mode 11b	Radio configurado 802.11b
iwpriv ath0 abolt 0	Deshabilita los protocolos fastframe y bursting.
Sysctl -w dev.wifi0.slottime	Ajusta el slottime del radio de acuerdo a la distancia.
Sysctl -w dev.wifi0.acktimeout	Ajusta el acktimeout del radio de acuerdo a la distancia.
Sysctl -w dev.wifi0.ackrate=0	Ajusta los ACK a 2Mbps

**Fuente: Autor.**

$$T_{Slottime} = T_{Slottimeb} = 20\mu s + \frac{D(m)}{300(m/s)} \mu s \quad (4.2)$$

$$T_{DIFS} = T_{DIFsb} = 10 + 2 * T_{Slottimeb} \quad (4.3)$$

Considerando el tiempo de arribo ACK\_MAC tiene presente la distancia entre los nodos tenemos:

Para la selección del *ACKTimeout* se debe tener presente que el driver *madwifi* tiene una consideración implícita del PLCP que en el caso del estándar IEEE802.11b es de 96μs si se considera el preámbulo corto y de 192 μs si se considera el preámbulo largo, para el estándar IEEE802.11g es de 20 μs.

El *ACKTimeout* definido para los nodos según el estándar es igual a  $30\mu s$  despreciando el *aPHY-RX-START-Delay* para redes de área local pero para los enlaces de comunicación real que se encuentra en el driver MADWIFI en una red de área local es de  $48\mu s$ .

$$T_{Acktimeoutb} = 30\mu s + \frac{2 * D}{300} \mu s \quad (4.4)$$

El tiempo para el *ACKTimeout* que se define dentro del driver en función de la distancia es igual a:

$$T_{Acktimeoutb} = 48\mu s + \frac{2 * D}{300} \mu s \quad (4.5)$$

**Tabla 18. Parámetros MADWIFI Configuración IEEE802.11g**

Comando	Descripción
iwpriv ath0 mode 11g	Radio configurado 802.11g
iwpriv ath0 abolt 0	Deshabilita los protocolos propietarios.
iwpriv ath0 pureg 1	Radio opera $R_{Data\_Rate}$ 11g
iwpriv ath0 protmode 0	Deshabilita protección contra red 11b
Sysctl -w dev.wifi0.slottime	Ajusta el slottime del radio de acuerdo a la distancia.
Sysctl -w dev.wifi0.acktimeout	Ajusta el acktimeout del radio de acuerdo a la distancia.
Sysctl-w dev.wifi0.ackrate=1	Ajusta los ACK a high- rate
iwpriv ath0 mcast rate 24000 18000 12000 9000 6000	Ajusta los ACK a $R_{Basic\_Rate}$ 24Mbps 18Mbps 12Mbps 9Mbps 6Mbps

**Fuente: Autor.**

Los parámetros para IEEE802.11g dentro del modelo serán:

$$T_{DIFS} = T_{DIFSg} = 10\mu s + 2 * T_{Slottimeg} \quad (4.6)$$

$$T_{Slottime} = T_{Slottimeg} = 9\mu s + \frac{D}{300} \mu s \quad (4.7)$$

El valor para el *ACKTimeout* que se define dentro del estándar como:

$$ACKTimeout = Slottime + SIFS + aPHY\_Rx\_START\_DElay \quad (4.8)$$

Considerando que el aPHY-RX-START-Delay está definido por hardware entonces el valor de *ACKTimeout* para una red de área local es de  $19 \mu s$  por lo tanto se puede aproximar con siguiente expresión:

$$T_{Acktimeoutg} = 19\mu s + \frac{2 * D}{300} \mu s \quad (4.9)$$

El driver MADWIFI tiene un valor de *ACKTimeout* por defecto de  $48 \mu s$  para redes de área local por lo tanto para las pruebas de campo como de laboratorio se considera la siguiente expresión:

$$T_{Acktimeoutg} = 48\mu s + \frac{2 * D}{300} \mu s \quad (4.10)$$

Para las pruebas de laboratorio el valor de *ACKTimeout* no expira debido a que no existen retardos entre el transmisor y el receptor debido a que se encuentran conectados por un cable coaxial y la estación transmisora percibirá el arribo de ACK como si se encontrara en una red de área local.

**Tabla 19. Material de laboratorio y Campo.**

<p><b>Analizador Vectorial R&amp;S ZVL6.</b> El analizador Vectorial permite trabajar hasta 6 GHz. Este equipo se utilizó medir la potencia de salida de los radios Wi-Fi.</p>	
<p><b>Generador de Radio Frecuencia R&amp;S SMB-B106.</b> El rango de frecuencias que maneja este equipo es de 9 kHz a 6 GHz y tiene una potencia máxima de salida de 30 dBm. Este equipo se utilizó para generar la onda de RF que permite alinear las antenas.</p>	
<p><b>Medidor de potencia Keithley 3500.</b> Este equipo permite realizar medidas de potencia de hasta 20 dBm para un rango de frecuencias entre 10MHz y 6 GHz.</p>	
<p><b>Wi-Spy</b> Este dispositivo es un analizador de espectros en la banda de 2.4 GHz este herramienta permite analizar el tipo de interferencias en la banda de 2.4GHz.</p>	

**Fuente: Autor.**

#### 4.1.6 Pruebas de laboratorio

A continuación se presenta las pruebas experimentales y el modelo teórico para el *throughput* UDP unidireccional con IEEE802.11b/g manteniendo un  $BER < 1e - 5$

Para realizar las pruebas de laboratorio se tendrá presente que a estas medidas obtenidas se le deben introducir los tiempos de propagación para esto se presentara en el siguiente análisis.

Para una red de área local podemos considerar que el *throughput* se define con la siguiente expresión:

$$Throughput_{UDP} = \frac{L_{Paquete\_UDP}}{T_{Trans\_UDP\_local}} \quad (4.11)$$

Donde la  $L_{Paquete\_UDP}$  es una expresión constante y el tiempo de transmisión de un paquete con el protocolo UDP está dado por.

$$T_{Trans\_UDP} = T_{DIFS} + T_{W\_contención} + T_{Datos\_UDP} + T_{SIFS} + T_{802.11\_ACK} \quad (4.12)$$

En el caso de una red de largo alcance el *throughput* está dado por:

$$Throughput_{UDP\_distancia} = \frac{L_{Paquete\_UDP}}{T_{Trans\_UDP\_local} + 2 * \delta} \quad (4.13)$$

Como el término  $T_{Trans\_UDP}$  tiempo de una transacción UDP es la misma para las dos ecuaciones anteriores esta aproximación se puede realizar si el  $BER = 0$  y el valor del *ACKTimeout* es lo suficientemente grande para que no existan retransmisiones innecesarias.

Despejando  $T_{Trans\_UDP}$  de la ecuación 4.12 y reemplazando en la ecuación 4.13 se obtiene la ecuación 4.14 la cual nos permite obtener el valor del *throughput* UDP unidireccional.

$$Throughput_{UDP\_distancia} = \frac{L_{Paquete\_UDP}}{\frac{L_{Paquete\_UDP}}{Throughput_{UDP}} + 2 * \delta} \quad (4.14)$$

Este mismo análisis se puede realizar para caracterizar una transacción TCP sin embargo se debe tener presente la cantidad de paquetes que deben arribar antes de enviar un ACK\_TCP.

A continuación se presentan las pruebas introduciendo los retardos por propagación para un enlace punto a punto con el estándar IEEE802.11b/g corregidas de un enlace punto a punto considerando que no existe limitaciones de la PIRE (Si se desea considerar limitaciones de la PIRE se debe tener presente la máxima distancia para un enlace punto a punto considerando el radio XR2 una ganancia en las antenas de 24dBi y una potencia de transmisión de 24dBm según la tabla 20.

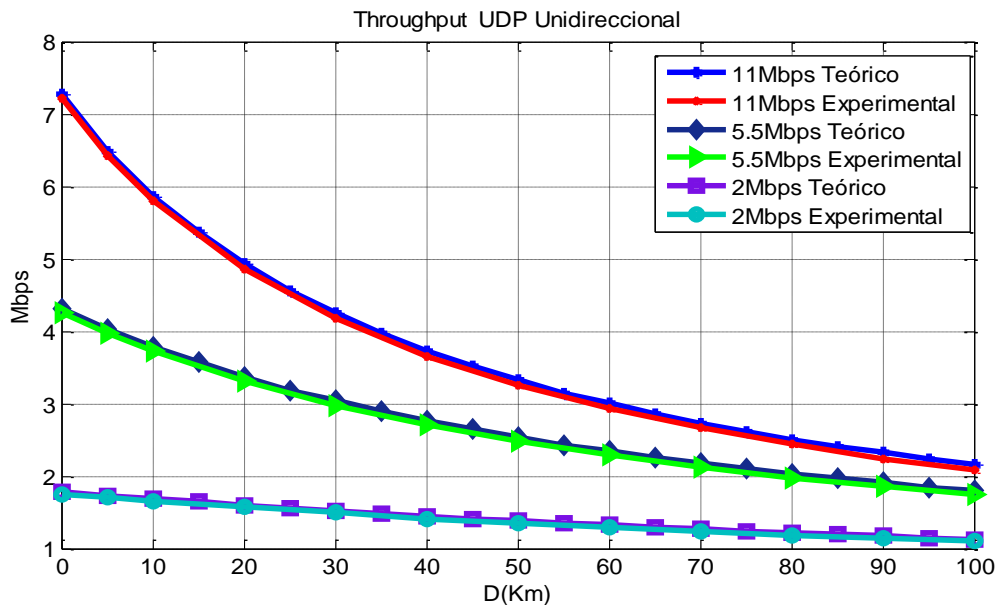
**Tabla 20. Máxima distancia para un enlace punto a punto en función de la velocidad en la capa física con el radio XR2 y un margen de 20dB.**

<b>Velocidad [Mbps]</b>	1	2	5.5	6	9	11	12	18	24	36	48	54
<b>Sensibilidad Recepción (dBm)</b>	-97	-96	-95	-94	-93	-92	-91	-90	-86	-83	-77	-74
<b>Distancia PtP (Km)</b>	141.2	125.9	112.2	100	89.1	79.4	70.8	63.1	39.8	28.2	14.1	10.0

Fuente: J Simó Reigadas, *Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links*

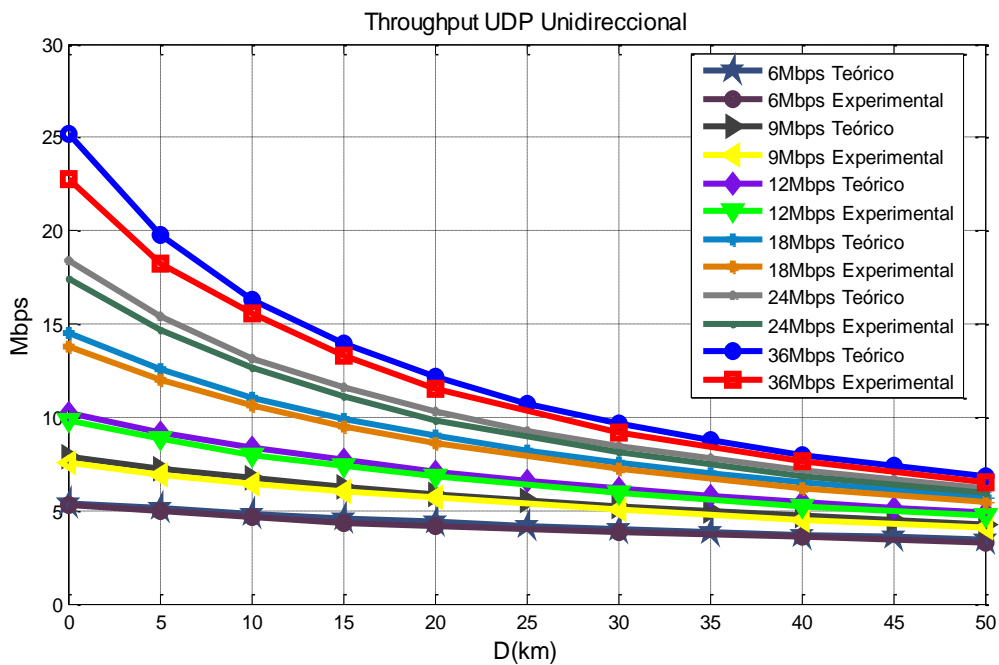
A continuación se presentan las mediciones de *throughput* para el estándar IEEE802.11b/g en laboratorio para un enlace punto a punto.

**Figura 42. Throughput UDP unidireccional IEEE802.11b vs distancia.**



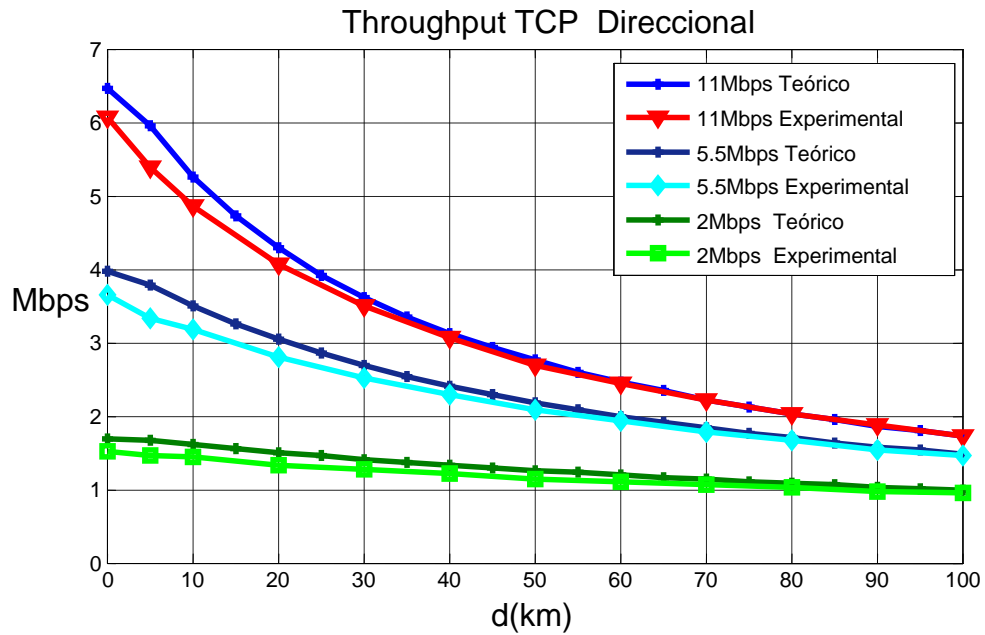
Fuente: Autor.

**Figura 43. Throughput UDP Unidireccional IEEE802.11g vs Distancia.**



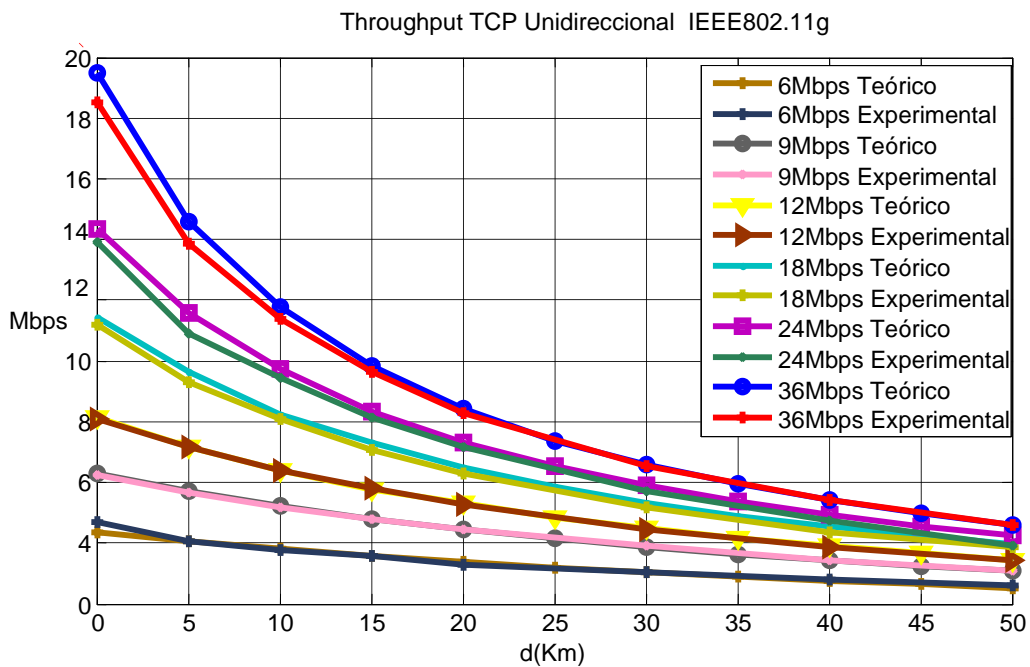
Fuente: Autor.

**Figura 44. Throughput TCP Unidireccional IEEE802.11b vs la distancia**



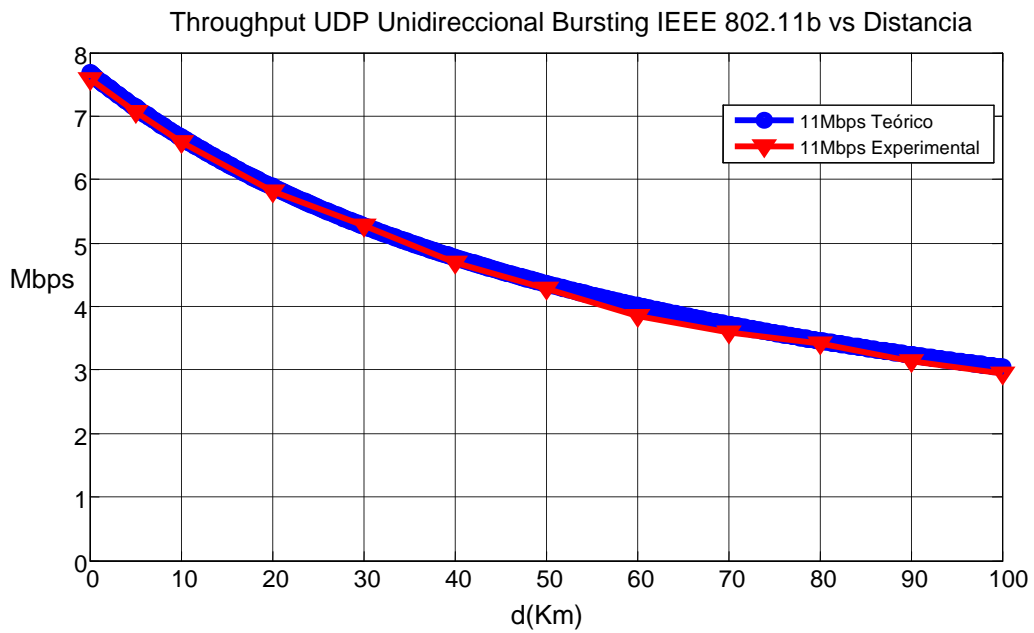
Fuente: Autor.

**Figura 45. Throughput TCP Unidireccional IEEE802.11g.**



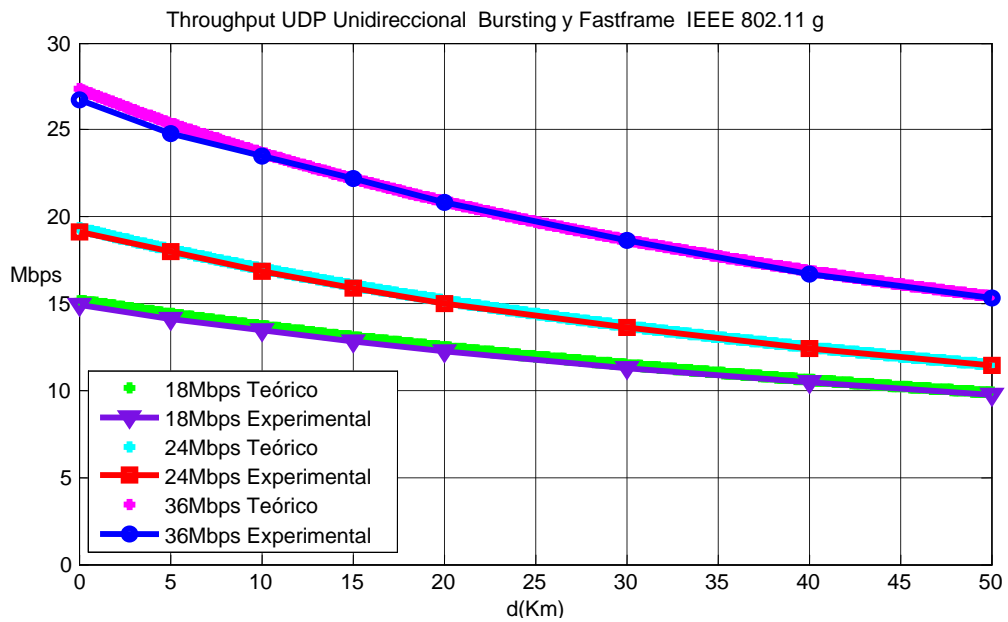
Fuente: Autor.

**Figura 46. Throughput UDP unidireccional Bursting IEEE802.11b.**



Fuente: Autor

**Figura 47. Throughput UDP unidireccional Bursting y Fastframe IEEE802.11.**



Fuente: Autor.

#### 4.1.7 Pruebas de los enlaces de comunicación en campo abierto.

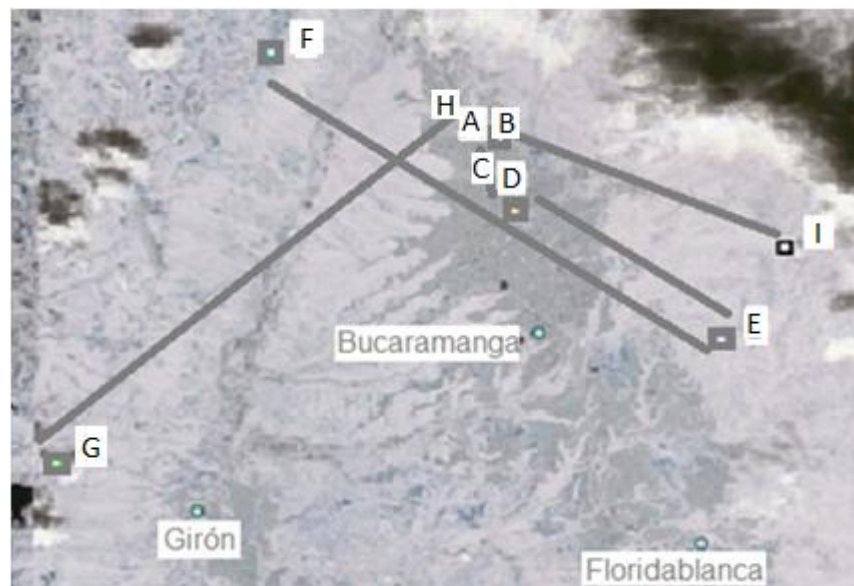
##### Selección de los sitios para realizar cada uno de los enlaces.

Tabla 21. Nodos instalados para las pruebas de campo.

Sitio Seleccionado	Nodo	Latitud	Longitud	Altura (m)
Edificio Centic	A	7° 8'26.09"N	73° 7'17.87"O	991
Edificio Halley	B	7° 8'21.0"N	73° 7'16.1"O	990
Edificio Capela	C	7° 7'59.81"N	73° 7'17.08"O	1000
Edificio Arapaima	D	7° 7'39.90"N	73° 7'15.80"O	998
Finca Caracol Radio	E	7° 6'14.4"N	73° 5'10.5"O	1293
Finca en Lebrija	F	7° 9'24.50"N	73° 9'43.40"O	1060
Torre ESSA	G	7° 4'55.5"N	73°11'48.7"O	1358
Edif. Ing. Civil	H	7° 8'28.4"N	73° 7'23.1"O	975
Alto de los Padres	I	07°07'14.4"N	73°04'37.4"O	1565

Fuente: Autor.

Figura 48. Sitios seleccionados para los enlaces de comunicación.



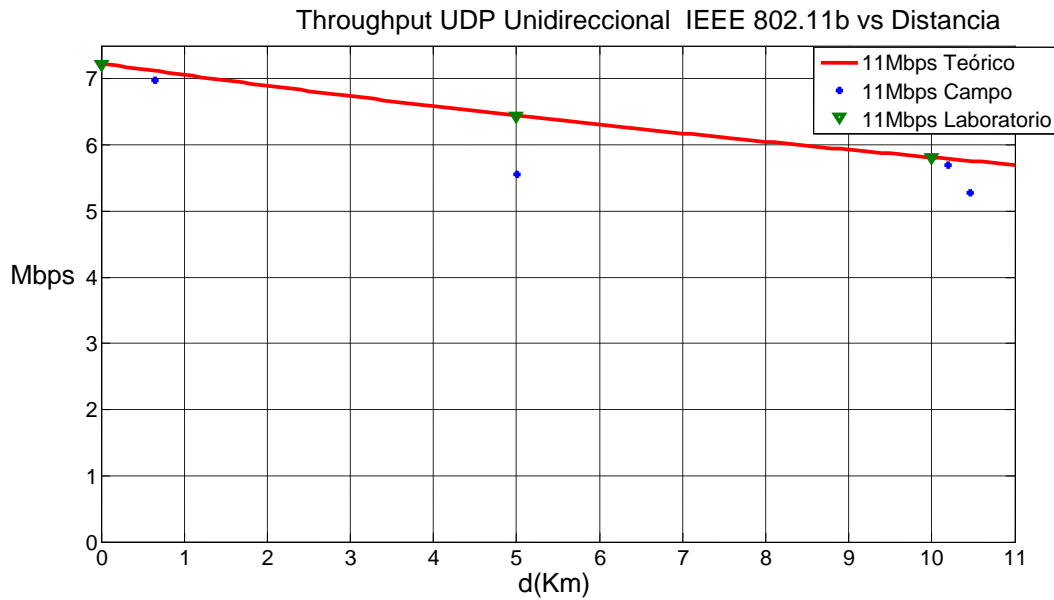
Fuente: Autor.

**Tabla 22 Enlaces de comunicación.**

Enlaces	Distancia (km)	Slottime (ms)		Acktimeout (ms)
		11g	11b	
A-B	0.16	9	20	48
B-C	0.65	9	20	48
D-E	4.674	23	34	75
E-F	10.212	43	54	116
B-I	5.01	25	36	79
G-H	10.46	43	54	116

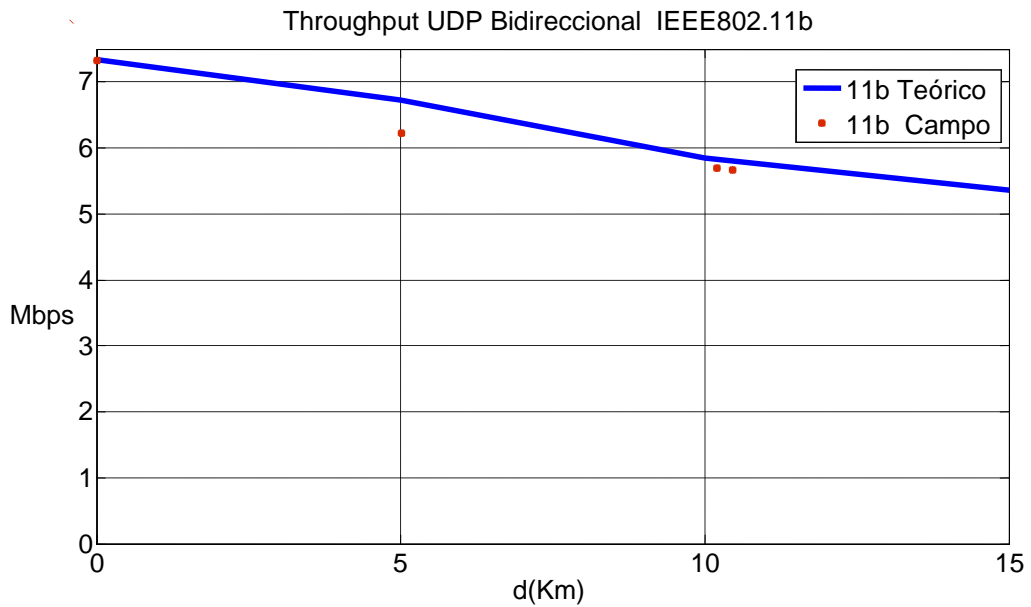
Fuente: Autor.

**Figura 49. Medición de throughput UDP Unidireccional IEEE802.11b 11Mbps.**



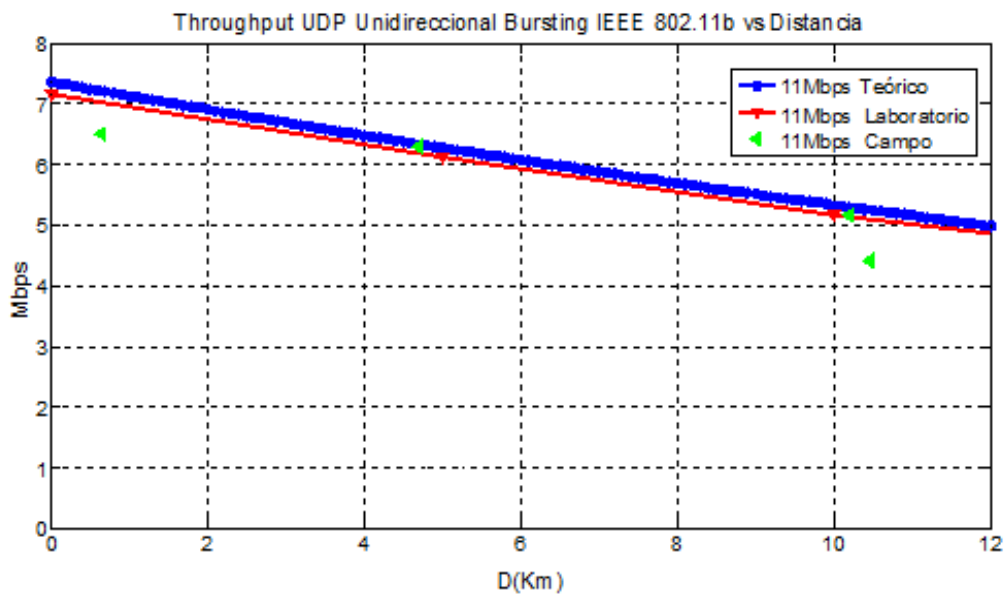
Fuente: Autor.

Figura 50. Medición del throughput UDP IEEE802.11b Bidireccional vs Distancia.



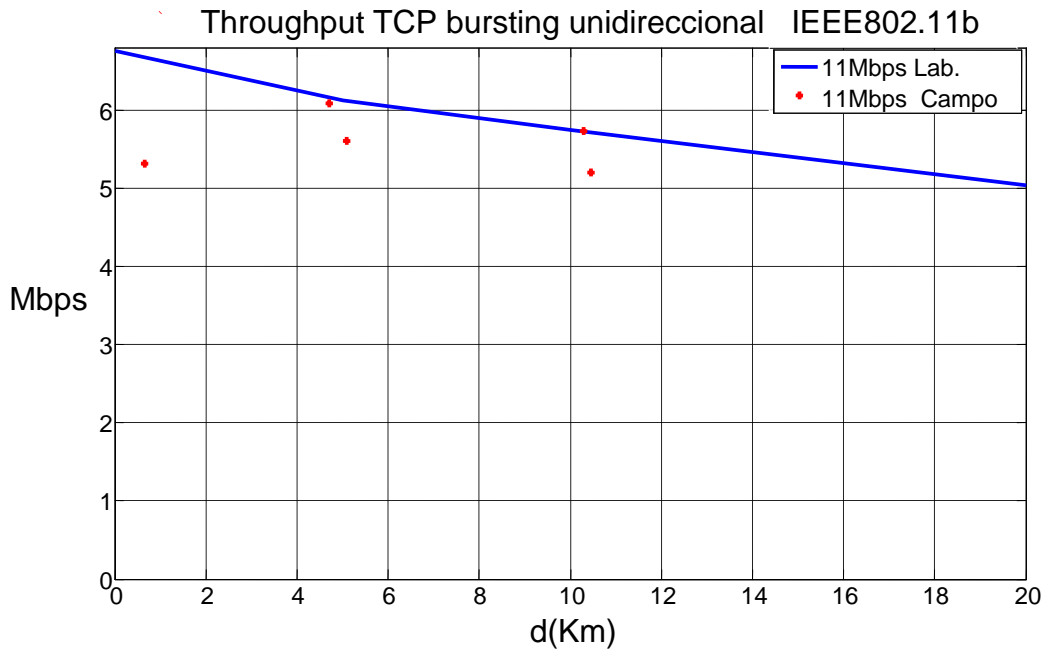
Fuente: Autor.

Figura 51. Medición del throughput UDP IEEE802.11b Bursting unidireccional.



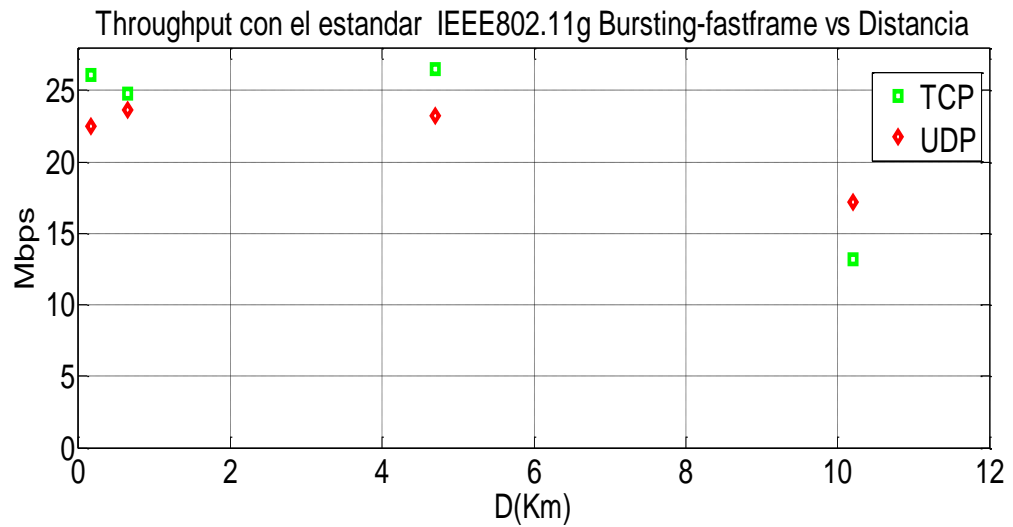
Fuente: Autor.

**Figura 52. Throughput TCP bursting unidireccional IEEE802.11b.**



Fuente: Autor.

**Figura 53. Throughput TCP bursting-Fast framing unidireccional IEEE802.11g.**

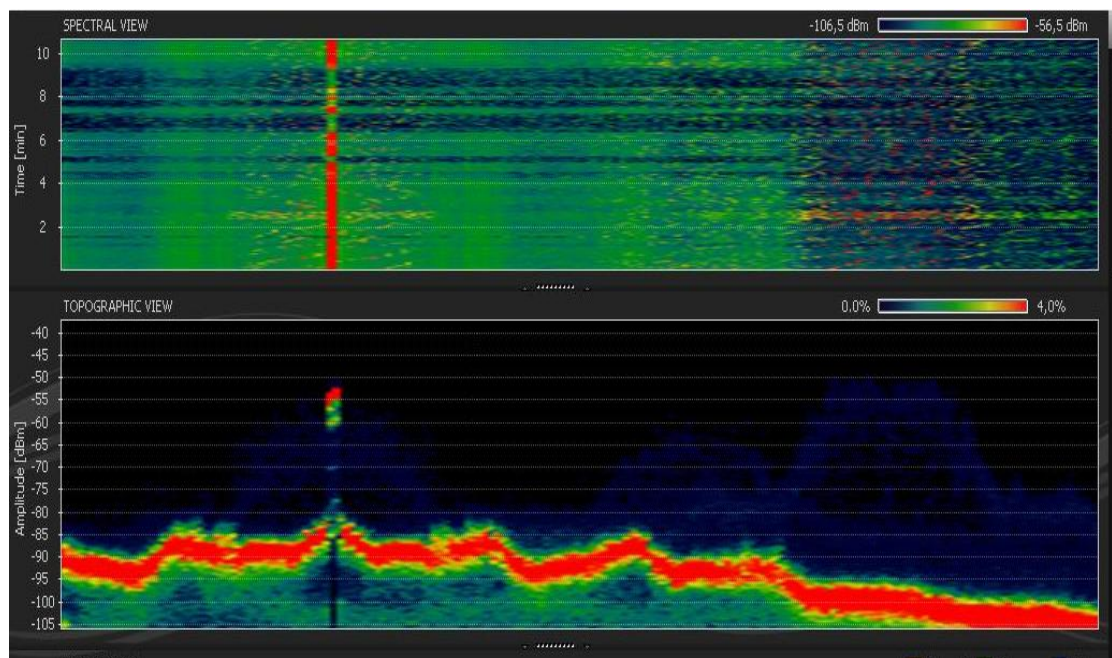


Fuente: Autor.

### **Alineación de las antenas y medición de RSS (*Recieved Signal Strength*)**

Para la alineación de las antenas se utilizo un generador de RF y un analizador de espectros en la banda de 2.4GHz Wi-Spy, las medidas obtenidas se realizaron conectando el Wi-Spy a la antena de 24dBi la cual introduce un factor de escala a las medidas de 16dBi, En este esquema se pudo apreciar que el margen de pérdidas respecto al valor esperado.

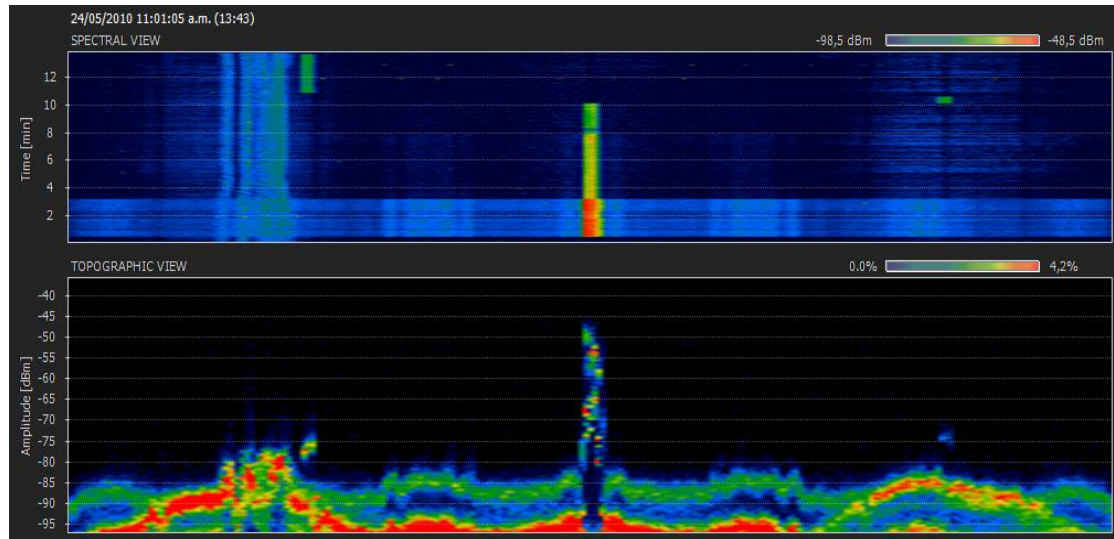
**Figura 53. Mediciones de la potencia de señal recibida canal 3 enlace entre G-H mediciones se realizaron en el punto G.**



**Fuente: Autor.**

En la figura 53 se puede apreciar como el nivel de señal recibida en el punto G, presenta un elevado nivel de ruido, esto se debe a la gran cantidad de sistemas de comunicación que operan en la banda de 2.4GHz ubicados en la zona de Palonegro donde se encuentran varios proveedores de servicio de telefonía móvil, internet y empresas privadas.

**Figura 54. Mediciones de la potencia de señal recibida canal 6 enlace entre B-I mediciones se realizaron en el punto I.**



**Fuente: Autor.**

En la figura 54 se puede apreciar la presencia de interferencia en el canal 1 (2412MHz) y en el canal 11 (2462MHz) la portadora se ubicó en el canal 6 (2437MHz).

**Tabla 26. Simulación RSS con el modelo Longley Rice.**

Enlace	Alineación de las antenas (°)				Nivel en el Receptor (dBm)	Peor Fresnel
	Maestro		Esclavo			
	Azim.	Elev.	Azim.	Elev.		
B-C	181,6	1,706	1,6	-1,71	-43.6	7F1
D-E	124,6	3,248	304,6	-3,29	-54.5	3.8F1
E-F	125,3	1,229	305,3	-1,32	-59.1	3.5F1
B-I	120,3	6,254	303,3	-6,299	-57.1	1.3F1
G-H	51,1	-2,161	231,1	2,067	-67.2	4.8F1

**Fuente: Autor.**

Al comparar las medidas de campo con el modelo de Longley-Rice se puede apreciar que existe una diferencia que oscila entre 6 y 15dB. Esta diferencia se considera que hace parte del margen de desvanecimiento

## 5. CONCLUSIONES

Se diseñaron y construyeron un grupo de prototipos Wi-Fi autónomos para la construcción de radioenlaces de largo alcance. En la etapa de diseño de las estaciones cliente/pasarela y repetidor se consideró una autonomía de 24H y la radiación solar presente en el área metropolitana de Bucaramanga. Para la construcción de las estaciones Wi-Fi cliente/pasarela se implementó un panel de 65W y una capacidad en las baterías de 66 AH, para la estación repetidora se utilizó un panel de 85W con un banco de baterías de 103 AH.

Se propuso y desarrolló una metodología de diseño para dimensionar un sistema fotovoltaico (SF) para un nodo de comunicación Wi-Fi. La metodología se basa en un modelo que representa el sistema fotovoltaico, información de radiación solar multianual presente en la zona de interés, el consumo de potencia de los sistemas de comunicación Wi-Fi considerando los diferentes modos de operación (Transmitiendo, recibiendo y reposo). En los criterios de diseño se consideró que el estado de carga SOC en las baterías sea mayor al 30% para todos los ciclos de carga/descarga y que la potencia entregada por los paneles sea de tal forma que la densidad en la curva de corriente de desbordamiento sea baja a lo largo del año, evitando sobre dimensionar el sistema fotovoltaico.

El modelo que se implementó para dimensionar el sistema fotovoltaico del nodo de comunicación Wi-Fi autónomo se simuló en ORCAD-PSPICE. A este modelo se le incorporó como carga el consumo de potencia del nodo WI-FI considerando diferentes escenarios de operación (Transmitiendo: 6.6W, Recibiendo: 5W, Reposo: 3.86W), los parámetros del regulador STEKA PR1010 y de la batería M-TEK LPF1233HR y del panel fotovoltaico KYOCERA, después se comparó el comportamiento de la tensión y corriente presente en el panel solar y en las baterías del prototipo real con los resultados del modelo, donde se encontró que el error cuadrático medio en estado estable de las medidas reales y el modelo es

menor al 10% permitiendo validar el modelo implementado en la metodología de diseño.

En las medidas de *throughput* UDP unidireccional realizadas con el estándar IEEE802.11b a 11Mbps en modo *bursting* en enlaces punto a punto se obtuvo 7.15Mbps para una distancia de 650m y 6.21Mbps para una distancia de 10.46Km, sin el modo *bursting* las medidas fueron de 6.98Mbps y 5.27Mbps respectivamente, las pruebas se realizaron incrementando el parámetro *Slottime* en un valor proporcional a la distancia presente entre las estaciones y el valor del *ACKTimeout* en dos veces el tiempo de propagación.

El *throughput* UDP bidireccional con el estándar IEEE802.11b a 11Mbps fue de 7.32Mbps para una distancia de 650m y 5.67Mbps para una distancia de 10.46Km, estos radio enlaces presentan asimetría en el tráfico entre la estación cliente y el punto de acceso. El valor del *Slottime* se incremento en un valor proporcional a la distancia entre las estaciones y parámetro *ACKTimeout* en dos veces el tiempo de propagación.

Las medidas de *throughput* TCP realizadas utilizando el estándar IEEE802.11g con los protocolos *bursting* y *fastframing* a 54Mbps se obtuvo que para la distancia de 650m es 24.8Mbps y para a 10.2Km se obtuvo 13.2Mbps, para el *throughput* sobre UDP se obtuvo 23.2Mbps y 17.2Mbps respectivamente.

Se propuso y validó un modelo para predecir el *throughput* UDP saturado sobre una red punto a punto de largo alcance que opera sobre el estándar IEEE802.11 en modo DCF. Este modelo está basado en una máquina de estados que representa los eventos de una transmisión exitosa, colisión y los diferentes estados del algoritmo *backoff* exponencial, esto permite determinar el tiempo de arribo para cada paquete enviado por las estaciones que hacen parte del enlace. El tráfico UDP bidireccional y unidireccional se evaluó para distancias en el rango

(0-100Km) considerando diferentes tamaños de MPDU y varios valores para el *slottime*.

Las velocidades de transmisión presentes en los enlaces punto a punto utilizando el modo DCF varían de acuerdo al tipo de modulación implementada, la distancia presente entre los nodos, la máxima potencia isotrópica irradiada equivalente, características hardware del equipo, el control de acceso al medio, el nivel de señal recibida y las interferencias presentes en el canal de comunicación. Para un canal de comunicación ideal considerando el modelo propuesto, los tiempos definidos en el estándar y evitando las retransmisiones ajustando el *ACKTimeout* a dos veces el tiempo de propagación, con el modelo DCF propuesto para redes de largo alcance se encontró que para el estándar IEEE802.11Mbps a 11Mbps el *throughput* UDP unidireccional varía de 6.7Mbps en una distancia de pocos metros a un valor de 4.9Mbps para 100Km. El *throughput* UDP bidireccional varía de 5.6Mbps en la red local a un valor cercano de 2Mbps a una distancia de 100km.

En el desarrollo de este trabajo de investigación se diseñó e implementó una metodología de pruebas para laboratorio y en campo abierto para caracterizar el desempeño del IEEE802.11 en enlaces de largo alcance sobre zonas rurales. En las pruebas de laboratorio se estableció un estimado del *throughput* en un canal de comunicación ideal el cual permite predecir el máximo desempeño de las pruebas de campo abierto.

El *throughput* UDP unidireccional se disminuye por los retardos de propagación y el algoritmo de parada y espera presente en el DCF. A medida que disminuye la velocidad en la capa física los retardos de propagación no influyen significativamente en el *throughput*. Para el *throughput* UDP bidireccional

presenta un desempeño que se ve afectado considerablemente por la probabilidad de colisión más que por los retardos en la propagación.

En los enlaces de comunicación realizados en campo abierto que presentaron un bajo nivel de interferencia el valor de *throughput* medido es cercano al valor estimado en las pruebas de laboratorio y el modelo teórico planteado.

Los sistemas Wi-Fi autónomos se presentan como una solución de bajo costo para construir enlaces troncales en zonas rurales donde se pueda utilizar las elevaciones naturales del terreno para garantizar la zona de fresnel y se pueda garantizar un margen de estabilidad en el nivel de señal recibida.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Compartel: Programa de Telecomunicaciones Sociales creado por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, Colombia, minitic, 2011, Disponible en <http://archivo.mintic.gov.co/mincom/faces/index.jsp?id=2971>
- [2] Compartel: Rendición de cuentas junio del 2010, Colombia, presentación p 3-5.
- [3] M. Rodriguez: Plan nacional de TICs 2008- 2019, Bogotá, ACIS Abril 2008, revista 114 p. 1-4.
- [4] Propuesta Colciencias Diseño construcción y caracterización de un enlace autónomo de comunicación Wi-Fi para áreas rurales alimentado con energía solar. Colombia, 2007, 405/07 – proyectos de investigación, Colombia, 2007.
- [5] Plan vive digital desarrollará el ecosistema digital del país en las dimensiones de infraestructura, servicios, aplicaciones y usuarios Disponible en < <http://vivedigital.gov.co/>>.
- [6] L. Chamorro y E. Pietrosevoli: Redes inalámbricas para el desarrollo de América latina y el Caribe, latinoamerica, ARPC, diciembre 2008, pg 1-3.
- [7] P. V. Gomez Oviedo, "Análisis de Sistemas digitales radio apropiados a las necesidades de telecomunicación en zonas rurales aisladas de la Amazonia peruana" ,Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid, N. 2003
- [8] V. Gunasekaran, Fotios C Harmantzis. Emerging wireless technologies for developing countries ,NJ07030 USA, technology society 2007.
- [9] G. Araujo, L. Camacho, D. Chávez, C. Córdova, D. Espinoza, R. Honda, L. Liñán, J. Margarito, A. Martínez, E. Maya, P. Osuna, Y. Pacheco, J. Paco, Y. Quijandria, R. Quispe, C. Rey, S. Salmerón, A. Sánchez, P. Sanoni, J. Seoane, J. Simó y J. Vera. Redes inalámbricas para zonas rurales, Lima Perú, GTR-PUCP Enero 2008 p 14-20.
- [10] R. Schoonderwoerd, Network performance measurement tools a comprehensive comparison, Vrije Universiteit, master thesis, Noviembre 2002.
- [11] B. Lowekamp, B. Tierney, L. Cottrell, R. Hughes-Jones, T. Kielmann Martin Swany A Hierarchy of Network Performance Characteristics for Grid Applications and Services, Network Measurements Working Group, College of William and Mary, Lawrence Berkeley National Lab, Stanford Linear Accelerator Center, University of Manchester, Vrije Universiteit, UCSB, 19 of june 2003, p-3-21.
- [12] F. J. Simo Reigadas, A. Martínez Fernández, F. J. Ramos-López, J. Seoane-Pascual, Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links," IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 9, no. 6, pp. 881-896.
- [13] Atheros Communication Super G Maximizing Wireless performance, White paper.
- [14] M. Baños Aixála, "Diseño e implementación de una red inalámbrica IEEE 802.11b para aplicaciones de voz y datos en la cuenca del río Napo-Perú" ,Escuela Técnica Superior d'Enginyeria de Telecomunicació de Barcelona , Universitat Politecnica de Catalunya, N. 2007.

- [15] J. Lyons "Redes Inalámbricas para países en desarrollo", una guía práctica para planificar y construir redes inalámbricas de bajo costo, septiembre 2008. Descargar online:< <http://wndw.net>>
- [16] MMTK Multimedia training kit. (2004) (1nd ed.). Disponible en:<<http://www.itrainonline.org/itrainonline/english/wireless.shtml> >
- [17] F. J. Simó Reigadas , A. M. Fernández, F. D. Mórán, A. R. Gallón "Implementación de IEEE 802.11 en enlaces largos para zonas rurales aisladas", Departamento Teoría de la señal y Comunicaciones Universidad Rey Juan Carlos España, Grupo de ingeniería Telemática Universidad del Cauca Colombia.
- [18] J. C. Sueiro, P. G. Garnacho, "Diseño de una Red de Telecomunicaciones para establecimientos de salud Rurales del Perú", Departamento de la Teoría de la Señal y Comunicaciones, Escuela Politécnica Superior, 2006.
- [19] R. Salazar "Sistema de voz sobre IP para Redes Inalámbricas en Zonas Rurales Aisladas", Departamento de Ingeniería y Sistemas Telemáticos de la Universidad Politécnica de Madrid (2005).
- [20] Francisco J. Simó , J. Seonade, Andrés M. Fernández "Modelado y Optimización de IEEE 802.11 para su Aplicación en el Despliegue de Redes Extensas en Zonas rurales aisladas de Países en Desarrollo" Departamento de Ingeniería y Sistemas Telemáticos de la Universidad Politécnica de Madrid (2007).
- [21] R. Patra, S. Nedeveschi, S. Surana, A. Sheth, L. Subramanian, E. Brewer .WiLDNet: Design and Implementation of High PerformanceWiFi Based Long Distance Networks, TIER Group, Universidad de California Berkeley, Universidad de Colorado, Universidad de nueva york, Boulder,2007.
- [22] B. Raman, K. Chebrolu "Experiences in using WiFi for Rural Internet in India", IEEE Communications Magazine, Jan 2007, Special Issue on New Directions In Networking Technologies In Emerging Economies.
- [23] S. Salmerón-Ntutumu, J. Simó-Reigadas, and R. Patra, "Comparison of MAC Protocols for 802.11-Based Long Distance Networks," Proc. Workshop Wireless For Development (WIRELESS4D), Dec. 2008.
- [24] A. Sheth, S Nedeveschi, R. Patra, S. Surana, E. Brewer, L Subramanian . Packet Loss Characterization in WiFi-based Long Distance Networks, Universidad de California Berkeley, Universidad de Colorado, Universidad de nueva york, IEEE INFOCOM, 2007.
- [25] D. Trincherro, A. Galardini, R. Stefanelli, P. Venuti, Performance of Low Cost Radios in the Implementation of Long Distance Wireless Links, iXem Labs, Politecnico di Torino, Italy.
- [26] D. Trincherro, A. Galardini, R Stefanelli, B. Fiorelli, F Cambiotti, MKM networks: a solution for low cost, long distance radiocommunications, Ixem Labs, Electronics Department, Politecnico di Torino, c.so Duca degli Abruzzi 24, Torino,10129, Italy
- [27] D. Trincherro, A. Galardin; R. Stefanelli, E Guariso. F Cambiotti, F. Troisr, L. Baldaccr della Monica, D. Ragno, E. Moriondo, R. Ancillr, M. Schiavr, An independent, low cost and open source solution for the realisation of wireless links over huge multikilometric distance ,IXem Labs.

- [28] D. Trinchero, R. Stefanelli, A. Galardini “Reliability and scalability analysis of low cost long distance ip-based wireless networks”, Innovations for Digital Inclusion, ITU-T Kaleidoscope event, Mar del Plata, Argentina, 31 Aug. - 1 Sept. 2009.
- [29] B. Raman, K. Chebrolu, Design and Evaluation of a new MAC Protocol for Long Distance 802.11 Mesh Networks. Department of CSE, Department of EE, IIT Kanpur, Mobile and ubiquitous Computing Seminar, Spring 2006.
- [30] L. Subramanian. A Low-Cost Efficient Wireless Architecture for Rural Network Connectivity, Computer Science Department Room 706, 715 Broadway.
- [31] S. Nedeveschi, R.K. Patra, S. Surana, S. Ratnasamy, L. Subramanian, S. Surana, E. Brewer, An Adaptive, High Performance MAC for Long-Distance Multihop Wireless Networks, EECS Department, Intel Research, UC Berkeley, USA.
- [32] N. Reddy, B. Raman, The SRAWAN MAC Protocol to support Real-Time Services in Long Distance 802.11 Networks, Department of Computer Science & Engineering Indian Institute of Technology, Kampur. August 2006.
- [33] K. Paul, A. Varghese, S. Iyer, B. Ramamurthi, A. Kumar, WiFiRe: Rural Area Broadband Access Using the WiFi PHY and a Multisector TDD MAC, New Directions in networking technologies in emerging economies, 2007.
- [34] Broadband Wireless for Rural Areas - WiFiRe: Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Center of excellence in Wireless Technology (CEWiT).
- [35] Y. Ben-David, M. Vallentin, S. Fowler, and Eric Brewer. 2010. JaldiMAC: taking the distance further. In Proceedings of the 4th ACM Workshop on Networked Systems for Developing Regions (NSDR '10). ACM, New York, NY, USA, , Article 2 , 6 pages.
- [36] C. Doerr, M. Neufeld, J. Fifield, T. Weingart, D. C Sicker, D. Grumwald. MultiMAC- An Adaptive MAC Framework for dynamic Radio Networking, Department of Computer Science, University of Colorado Boulder. Computer Science Department Room 706, 715 Broadway.
- [37] L. Camacho y C. Rey GTR-PUCP, Redes inalámbricas para zonas rurales , vol. I. Lima., 2008.
- [38] L. Camacho, R. Quispe, C. Córdova, L. Liñán, D. Chávez. “Wild: Wifi based Long Distance” , Grupo de telecomunicaciones rurales, Pontificia Universidad Catolica del peru, agosto 2009.
- [39] S. S. Ntutumu, Parametrización de IEEE 802.11e EDCA para la priorización del tráfico VoIP en redes extensas para zonas rurales de países en vías de desarrollo, URJC/TSC-ETSI de telecomunicación, Madrid(Spain).
- [40] S. Leffler, E. Consulting, TDMA for Long Distance Wireless Networks, University of Cambridge, Computer Laboratory Seminar, September 21, 2009.
- [41] B. Raman, K. Chebrolu, Design and evaluation of a new MAC protocol for long- distance 802.11 Mesh Networks. Department of EE Indian Institute of Technology, Kanpur. 2005.
- [42] R. Krushanchandra Patra. 2009. A Multi-Tier Network Architecture for Long Distance Rural Wireless Networks in Developing Regions. Ph.D. Dissertation. University of California at Berkeley, Berkeley, CA, USA. Advisor(s) Eric Brewer.

- [43] S. Nedeveschi, Maximizing performance in long distance Wireless networks for developing regions, University of California, Berkeley, Technical Report N° UCB/EECS-2009-27.
- [44] S. Kurkure, S. K. Hullur WiFiRE: Wireless broadband access for rural area, Second Stage Report, Master of technology, Kanwal Rekhi School of Information Technology. Indian Institute of Technology, Powai, Mumba.
- [45] Meraki White paper: 802.11 technology Disponible en: <[http://meraki.com/library/collateral/white\\_paper/meraki\\_white\\_paper\\_802\\_11n.pdf](http://meraki.com/library/collateral/white_paper/meraki_white_paper_802_11n.pdf)>, febrero 2011
- [46] Excerpts from FCC Rules part 15 relative to "Unlicensed Spread Spectrum radio systems" believed to be current as of July 23, 1996.
- [47] F. J. Simó Reigadas, J. Cid Sueiro, G. Alberdi Sáenz Diez, Estudio comparativo de IEEE802.11e y IEEE802.16 para el diseño de una red rural de comunicaciones, Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior. España, Febrero 2006.
- [48] M. Martín Espín, Guía para el diseño e implementación de redes inalámbricas en entornos rurales del Perú, Universidad Autónoma de Madrid, Diciembre del 2010.
- [49] F. J. Simó Reigadas, P. Osuna Garcia, D. S. Espinoza Aguilar, L. C. Caballero, R. Q. Tacas, Application of IEEE 802.11 technology for health isolated rural environments, Proyecto EHAS.
- [50] Atheros Communications (NASDAQ: ATHR), Atheros is a developer of semiconductors for network communications, particularly wireless chipsets, Founded in 1998. Disponible en: <<http://www.atheros.com/>>.
- [51] Clima Colombiano, La atmosfera el tiempo y el clima, Disponible en: <[http://es.wikipedia.org/wiki/Clima\\_de\\_Colombia](http://es.wikipedia.org/wiki/Clima_de_Colombia)>
- [52] Radio Wi-Fi IEEE802.11b/g Xtreme range 2 Ubiquity Networks Disponible en : <[http://ubnt.com/downloads/xr2\\_datasheet.pdf](http://ubnt.com/downloads/xr2_datasheet.pdf) >.
- [53] Radio Wi-Fi IEEE802.11b/g Super range 2 Ubiquity Networks Disponible en: <[http://ubnt.com/downloads/sr2\\_datasheet.pdf](http://ubnt.com/downloads/sr2_datasheet.pdf) >.
- [54] Radio Wi-Fi R52H High power Wireless Routerboard. Disponible en: <[http://routerboard.com/pricelist/download\\_file.php?file\\_id=97](http://routerboard.com/pricelist/download_file.php?file_id=97)>.
- [55] Radio Wi-Fi EMP-3602 Business class high power wireless Engenius Disponible en: <<http://www.gowifi.co.nz/specs/EMP-3602.pdf> >
- [56] Radio Wi-Fi EMP-8602+s Atheros 6G, Fabricante Engenius. Disponible en: <<http://www.engenustech.com/resources/EMP-8602%20PLUS-S.pdf>>.
- [57] Radio Wi-Fi EMP-8603 Get conect Engenius Disponible en: <<http://www.engenius-europe.com/files/pdf/en/emp-8603-etsi.pdf> >
- [58] Radio Wi-Fi KXS30SG Valemount 1W Disponible en: <<http://www.staros.com/documentation/KXS30SG%20Sell%20Sheet.pdf>>
- [59] WLM54G 6B-30 miniPCI 6B-30 Disponible en: <[http://www.streakwave.com/mmSWAVE1/Video/WLM54G-26\\_30\\_rev1.1.pdf](http://www.streakwave.com/mmSWAVE1/Video/WLM54G-26_30_rev1.1.pdf) >.

- [60] Lobometrics es un compañía que manufactura dispositivos inalámbricos, Disponible en: <[http://www.lobometrics.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=81&Itemid=55](http://www.lobometrics.com/index.php?option=com_content&view=article&id=81&Itemid=55)>.
- [61] Terabeam-proxim Wireless compañía manufacturera dispositivos inalámbricos, Disponible en: Disponible en: <<http://www2.proxim.com/products.html>>.
- [62] Motorola soluciones de redes inalámbricas para gobiernos, empresas, WISP , Disponible en: <<http://motorola.wirelessbroadbandsupport.com/support/>>
- [63] Alvarion Soluciones de comunicación inalámbricas 4G. Disponible en: <<http://www.alvarion.com/> >
- [64] Evaluación de placas madres para aplicaciones inalámbricas 802.11, GTR grupo de telecomunicaciones rurales, UPCP, Peru, Marzo 2008, Disponible en: <[http://gtr.telecom.pucp.edu.pe/webfm\\_send/76](http://gtr.telecom.pucp.edu.pe/webfm_send/76)>.
- [65] Motherboard Soekris net4801-48. Disponible en: <<http://soekris.com/products/net4801.html>>.
- [66] PC Engines ALIX series of system boards ALIX2D3. Disponible en: < <http://pcengines.ch/alix2d3.htm> >.
- [67] PC Engines ALIX series of system boards ALIX2D2, Disponible en: < <http://pcengines.ch/alix2d2.htm>>.
- [68] PC Engines ALIX series of system boards ALIX2D0, Disponible en: < <http://pcengines.ch/alix2d0.htm>>.
- [69] RouterBOARD es una hardware construido por Mikrotik RB411. Disponible en: < <http://www.routerboard.com/pdf/rb411ugA.pdf> >
- [70] RouterBOARD es una hardware construido por Mikrotik RB/411AH. Disponible en: <<http://www.routerboard.com/pricelist.php?showProduct=48>>.
- [71] ADI engineer Pronghorn SBC-250 SBC Dual Radio Wi-Fi Router Board. Disponible en: <[http://www.adiengineering.com/php-bin/ecomm4/productDisplay.php?product\\_id=79](http://www.adiengineering.com/php-bin/ecomm4/productDisplay.php?product_id=79)>.
- [72] GNU/Linux embebido, introducción, Disponible en: <<http://linuxemb.wikidot.com/tesis-c1>> .
- [73] GNU/Linux embebido, Fundamentos teóricos, Disponible en: <<http://linuxemb.wikidot.com/tesis-c2>>
- [74] Voyage Linux distribución derivada de debian plataforma X86, Disponible en: <<http://linux.voyage.hk/>>.
- [75] Madwifi Multiband Atheros Driver for wireless Fidelity, Disponible en: <<http://madwifi-project.org/wiki/About/MadWifi>>.
- [76] Linux Wireless Atheros Driver athk5. Disponible en: <<http://linuxwireless.org/en/users/Drivers/ath5k>>
- [77] Linux Wireless Atheros Driver athk9. Disponible en: <<http://linuxwireless.org/en/users/Drivers/ath9k>>.
- [78] Driver de Madwifi estable, Disponible en: < <http://linux.voyage.hk/blog/1?page=1> >

- [79] S. Silvestre, L. Castaner y D. Guasch. Herramientas de Simulación para Sistemas Fotovoltaicos en Ingeniería. Universidad Politécnica de Cataluña, España. 2008, vol.1, n.1, pp. 13-18.
- [80] C.Luis, S. Santiago, Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice, John Wiley & Sons, 2002.
- [81] P. O. Garcia, F. J. Simó-Reigadas, J. S. Pascual, Redes "MESH" Wi-Fi de bajo coste. Desarrollo de un router inalámbrico solar autónomo. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación, Universidad Politécnica de Madrid.
- [82] J. Lyons, "Datalogging Lessons," Magazine, Home power vol 114, pp 64-67 august & September 2006.
- [83] A. D. Hansen, P. Sorensen, L.H. Hansen, H. Binder, Models for a Stand-Alone PV System, Riso-R-1219(EN)/SEC-R-12.
- [84] D. G. Murillo, S. S. Bergés, Tesis doctoral, Modelado y Analisis de Sistemas Fotovoltaicos, Departament D'enginyeria electrònica, Universidad Politecnica de Catalunya, Barcelona, abril 2003.
- [85] U. Boke, A Simple model of photovoltaic module electric characteristics, Philips research, Germany.
- [86] Meteotest Meteororm Ver. 5.1, Switzerland. Disponible en: <[www.meteororm.com](http://www.meteororm.com)>
- [87] UPME, IDEAM, Atlas de Radiación solar de Colombia, 2005.
- [88] C. G. Rodriguez-Borges, A. Sarmiento-Sera, Dimensionado mediante simulación de sistemas de energía solar fotovoltaica aplicados a la electrificación rural, 7 de septiembre del 2010.
- [89] H. L. Gasquet, Curso de Energía Solar, Texas, Disponible en:<<http://www.ecomaipo.cl/solar/documentos/Apuntes-FV-Sept-2003-02.pdf>>.
- [90] A. Escudero-Pascual, Sistemas de energía solar fotovoltaica para equipos de telecomunicaciones introducción, basado en el trabajo original de miembros de ingeniería sin fronteras (ISF) y el instituto de energía solar de la Universidad Politécnica de Madrid.
- [91] F. J. Simó-Reigadas, P. Osuna García, J. Seoane Pascual, A. Martínez Fernández, "Wireless Solar-Powered Router For Health Isolated Rural Environments", 4th IEE International Seminar on Appropriate Healthcare Technologies for Developing Countries, Londres (Reino Unido), 23-05-2006.
- [92] P. Osuna García, S. Lafuente Sanz, J. Seoane Pascual, F. J. Simó-Reigadas, A. Martínez Fernández, "The design of a wireless solar powered router for rural environments isolated from health facilities", IEEE Wireless Communications, Vol. 15(3), 24-30, New York, 01-06-2008.
- [93] M. M. Wiener, "Use of the Longley-Rice and Johnson-Gierhart Tropospheric Radio Propagation," IEEE Journal on selected areas in Comm., Vol. SAC-4, NO. 2, March 1986.
- [94] G. A. Hufford, A. G. Longley, W. A. Kissick, "A guide to use of the ITS irregular terrain model in the area prediction mode," U.S. Dep. Commerce, Boulder, CO, NTIA Rep. 82-100, Apr. 1982.
- [95] T. S. Rappaport, Wireless Communications Principles and Practice, 1ra Ed., Prentice Hall, New Jersey, p. 70-71, 1996.

- [96] J. Simó, P. Osuna, J. Seoane, A. Martínez. Router solar autoconfigurable para redes mesh IEEE 802.11 de telemedicina rural en América Latina. In: Chavez D, editor. Actas del Primer Foro Iberoamericano de Telemedicina Rural; 2006 Feb 27-28 Mar 1; Cusco, Perú. 2006. p. 168-7.
- [97] A. Sheth, S. Nedeveschi, R. Patra, S. Surana, E. Brewer, L. Subramanian, Packet Loss Characterization in WiFi-Based Long Distance Networks IEEE INFOCOM 2007 26th IEEE International Conference on Computer Communications (2007), Pages: 312-320.
- [98] K. Chebrolu, B. Raman, S. Sen. Long-Distance 802.11b Links: Performance Measurements and Experience. In ACM MOBICOM, 2006.
- [99] D. Aguayo, J. Bicket, S. Biswas, G. Judd, and Robert M. Link-level Measurements from an 802.11b Mesh Network. In SIGCOMM, Aug 2004.
- [100] P. Barsocchi, G. Oligeri y F. Potorti. Frame error model in rural Wi-Fi networks. IEEE Transactions on wireless communications, Marzo 2009.
- [101] P. Guanyu and T. Henderson, Validation of ns-3 802.11b PHY model. Boeing Research and Technology, The Boeing Company, MAY 2009.
- [102] M. B. Pursley, Fellow, IEEE, and T. C. Royster IV, Properties and Performance of the IEEE 802.11b Complementary-Code-Key Signal Sets, IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, VOL. 57, NO. 2, FEBRUARY 2009.
- [103] IEEE. 802.11-2007, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications, Rev. 2007," technical report, IEEE CS, 2007.
- [104] W. Grote, C. Avila y A. Molina. Análisis de máximo desempeño para un WLAN operando a tasas fijas o adaptativas usando el estándar IEEE 802.11a/b/g. Ingeniare. Rev. chil. ing. 2007, vol.15, n.3, pp. 320-327
- [105] S. Delgadillo, D. Guzman, A. Muller y W. Grote. Análisis experimental de un ambiente Wi-Fi multicelda. Rev. Fac. Ing. - Univ. Tarapacá [online]. 2005, vol.13, n.3, pp. 45-52. ISSN 0718-1337
- [106] G. Bianchi, "Performance Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function," IEEE J. Selected Areas in Comm, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, Mar. 2000.
- [107] G. Bianchi and I. Tinnirello, "Remarks on IEEE 802.11 DCF Performance Analysis," IEEE Comm. Letters, vol. 9, no. 8, pp. 765-767, Aug. 2005.
- [108] M. Kwiatkowska, G. Norman and J. Sproston. Probabilistic Model Checking of the IEEE 802.11 Wireless Local Area Network Protocol. In H. Hermanns and R. Segala (editors) Proc. PAPM/PROBMIV'02, volume 2399 of Lecture Notes in Computer Science, pages 169-187, Springer. July 2002.
- [109] D. K. Puthal y B. Sahoo, A Finite State Model for IEEE 802.11 Wireless LAN MAC DCF, Emerging Trends in Engineering & Technology, International Conference on, pp. 258-263, First International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, 2008.

- [110] B. Lowekamp, B. Tierney, L. Cottrell, R. Hughes-Jones, T. Kielmann, M. Swamy, A Hierarchy of Network Performance Characteristics for Grid Applications and Services, network measurements working group. 2003.
- [111] V. Paxson, G. Almes, J. Mahdavi, M. Mathis, RFC 2330: Framework for IP Performance Metrics, NetworkWorking Group, Lawrence Berkeley National Lab, Advanced Network and Services, Pittsburgh Supercomputer Center, May 1998. <ftp://ftp.rfc-editor.org/in-notes/rfc2330.txt>
- [112] R. S. Prasad, M. Murray, C. Dovrolis, K. Claffy, Bandwidth estimation: metrics, measurement techniques, and tools, Networking and Telecommunications Group, Cooperative Association for Internet Data Analysis, 2003. Disponible en: <http://www.caida.org/publications/papers/2003/bwestmetrics/bwestmetrics.pdf> >.
- [113] R. Schoonderwoerd, Network Performance measurement tools, Dept. of Computer Science, master thesis, Vrije Universiteit, November 2002; Disponible en: <http://www.cs.vu.nl/~kielmann/papers/rody-thesis.pdf> >.
- [114] M. Gates, A. Tirumala, J. Dugan, K. Gibbs, IPERF User docs National Laboratory for Applied Network Research, March 2003.
- [115] S. Avallone, A. Pescape, G. Ventre. Distributed internet Traffic Generator: Analysis and operation over heterogeneous networks Dipartimento di Informatica e Sistemistica. Disponible en: <http://www.grid.unina.it/software/ITG/D-ITGpublications/29URCININA-ICNP2003poster.pdf>
- [116] ETSI EG 202 057-4 V1.1.1, Speech Processing, Transmission and Quality Aspects (STQ); User related QoS parameter definitions and measurements; Part 4: Internet access.

## ANEXOS

### ANEXO A. Bit error rate model.

Para determinar la probabilidad de una transmisión no exitosa ocurrida por un error en la transmisión se debe calcular la relación que existe entre el error en un bit y el error de *frame* esto se debe a que un error de bit no necesariamente genera un error en el *frame*, si deseamos calcular la probabilidad de encontrar un *frame* erróneo utilizaremos la siguiente expresión.

$$P_{e \text{ data}} = 1 - (1 - BER)^{L_{data}} \quad (A.1)$$

#### 1Mbps BER (Bit error rate)

La modulación para cada Chip está en DBPSK la probabilidad de error de chip está dado por la siguiente expresión:

$$P_{chipDBPSK} = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_c}{N_0}} \quad (A.2)$$

Donde  $E_c$  es la energía por chip y  $N_0$  es el nivel de ruido, conociendo que cada símbolo tiene 11 chips donde cada uno está constituido por 1 bit, es decir el error de bit es igual al error de símbolo por lo tanto se puede determinar que el BER es igual al *Frame error rate* (FER).

$$BER_{1Mbps} = \frac{1}{2} e^{-\frac{11E_c}{N_0}} = \frac{1}{2} e^{-\frac{E_b}{N_0}} \quad (A.3)$$

Donde  $E_b$  es la energía de bit.

#### 2 Mbps BER

Para 2 Mbps se usa la modulación DQPSK el *chip error rate*:

$$P_b = Q_1(a, b) - \frac{1}{2} I_0(a, b) e^{-\frac{1}{2}(a^2 + b^2)} \quad (A.4)$$

Donde  $Q_1(a, b) = e^{-\frac{1}{2}(a^2+b^2)/2} \sum_{k=0}^{\infty} \left(\frac{a}{b}\right)^k I_k(ab)$  es la función Q,  $I_k(a, b)$  es la función de Bessel de primer tipo de orden  $k$  en [Tight b] se realiza la siguiente aproximación.

$$P_{DQPSK-chip} = \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{8\pi\sqrt{2}}} \frac{1}{\sqrt{\frac{E_c}{N_0}}} e^{-(2-\sqrt{2})\frac{E_c}{N_0}} \quad (A.5)$$

Para 2Mbps cada símbolo se codifica en dos bits .Si los símbolos provienen de un código de gray , un error de decodificación entre dos símbolos adyacentes en la constelación DQPSK permite solamente un error simple, así el símbolo error rate es igual al BER, así la expresión que provee el BER está dada por:

$$\begin{aligned} BER_{2MBPS} &= \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{8\pi\sqrt{2}}} \frac{1}{\sqrt{\frac{E_c}{N_0}}} e^{-(2-\sqrt{2})\frac{E_c}{2N_0}} \quad (A.6) \\ &= \frac{\sqrt{2}+1}{\sqrt{8\pi\sqrt{2}}} \frac{1}{\sqrt{\frac{E_c}{N_0}}} e^{-(2-\sqrt{2})\frac{E_b}{N_0}} \end{aligned}$$

### 5.5 Mbps and 11 Mbps CCK :

*Complementary code keying* fue adoptado por el estándar IEEE802.11b para 5.5Mb y 11Mbps se muestra que *biorthogonal-key* (BOK) es una aproximación para determinar el *frame error rate* tanto para 11Mbps y 5.5Mbps bajo AWGN (*Additive white Gaussian noise*).

La probabilidad de un error de símbolo para una señal  $k$ -biorthogonal está dada por:

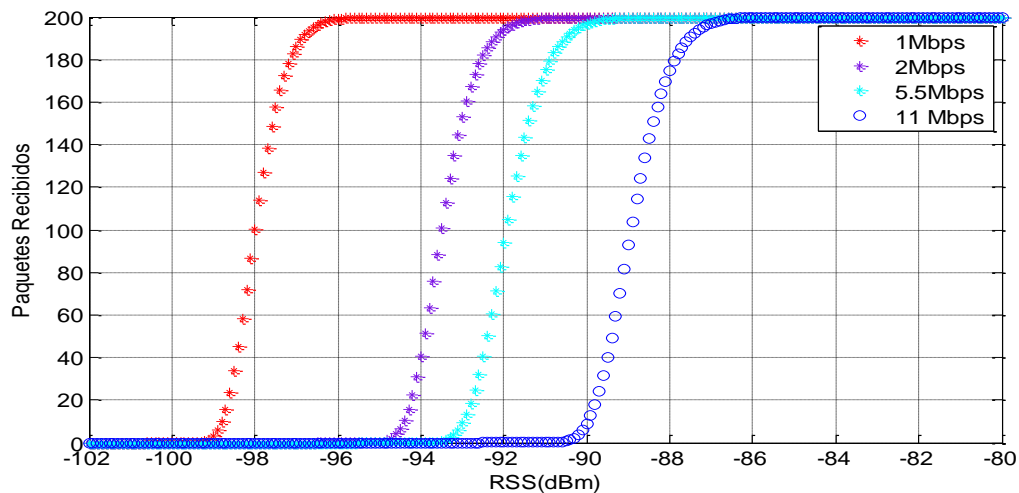
$$P_e = 1 - \int_{-\beta}^{\infty} [2\phi(x + \beta) - 1]^{N-1} \frac{e^{-x^2}}{\sqrt{2\pi}} dx \quad (A.7)$$

Donde  $\phi$  es la función de distribución Gaussiana estándar, SNR es la relación señal a ruido en el receptor y  $\beta = \sqrt{2SNR}$

Para 5.5Mbps la relación entre la energía por bit y la densidad de ruido  $\frac{E_b}{N_0}$  es 4SNR y para 11Mbps 2SNR, esto se debe porque el IEEE 802.11b utiliza un ancho de banda de 22MHz y CCK usa 8 chips por símbolo lo cual permite enviar 1375 MSPS (Mega símbolos por segundo), en 5.5Mbps se utilizan 4 bits para representar un símbolo y en 11Mbps se utiliza 8 bits, como el receptor no es coherente  $\beta = \frac{\beta}{2}$ .

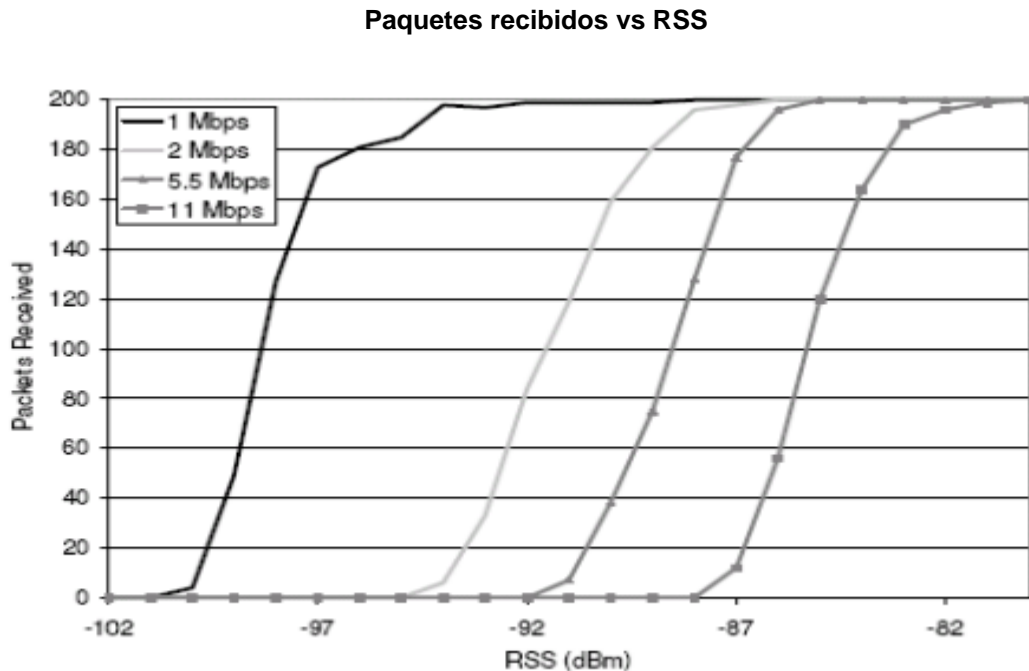
En la siguiente figura se calcula los paquetes recibidos en un enlace punto a punto sobre el nivel de recepción para el estándar IEEE802.11b/g.

**Figura A.1 .Paquetes recibidos vs RSS**



**Fuente: Autor**

Considerando la MPDU de 1094 bytes y Noise=-94dBm se compara con los resultados presentados en “Glenn Judd and Peter Steenkiste. Characterizing 802.11 wireless link behavior. Wireless Networks, 2008” el cual se presenta a continuación.



**Fuente: Autor.**

**Las medidas se realizaron con un emulador de canal.**

- Total de paquetes transmitidos 200.
- Retransmisiones no se utilizan.
- Ruido de piso aproximadamente -99 dBm
- Nivel de señal recibida: Varía desde -102 dBm a -80 dBm con 1 dB de incremento.
- Chipset: Prism 2.5.

- Red inalámbrica Senao 2511CD.

Dentro del estándar IEEE802.11 determina el nivel de sensibilidad a partir del valor donde el FER (*Frame error rate*) se encuentra cercano del 8% para modulaciones como DSSS (*Direct sequence spread spectrum*) y para una MPDU que tiene 1024 bytes, entonces se tiene 8/100 (errors/frames), lo que es equivalente a tener un BER  $10^{-5}$ .

## ANEXO B. Características del estándar IEEE802.11

A continuación presentamos la familia de estándares IEEE802.11

**802.11:** El estándar original soporta 1 y 2 Mbps.

**802.11a:** WLAN estándar 5GHz. Soporta 54Mbps, radio banda ISM utiliza OFDM.

**802.11b:** WLAN estándar 2.4GHz. Soporta 11Mbps, radio banda ISM utiliza HR/DSSS.

**802.11c:** Provee información necesaria para poder realizar operaciones de bridge, lo cual es necesario para el desarrollo de puntos de acceso.

**802.11d:** Cubre algunos dominios adicionales de regulación, lo cual es muy importante en la banda de 5GHz porque el uso de esas frecuencias difiere de un país a otro.

**802.11e:** Dirige los requerimientos de calidad de servicio para todas las interfaces de radio IEEE WLAN. Las mejoras en la MAC para calidad de servicio son HCF y EDCF.

**802.11f:** Define la comunicación entre los diferentes Access point para facilitar la distribución de los productos de diferentes fabricantes.

**802.11g:** Establece una técnica de modulación para la banda de 2.4GHz que provee velocidades de 54Mbps, en radios no licenciados con OFDM.

**802.11h:** Define para manejar el espectro en la banda de 5GHz para el uso en Asia y Europa.

**802.11i:** Dirige las debilidades de seguridad en la autenticación y en los protocolos de encriptación.

**802.11j:** Equivale al estándar 802.11h pero en la regulación japonesa.

**802.11k:** Permite calcular y valorar los recursos de radio frecuencia para los Clientes de una WLAN.

**802.11n:** Introduce la técnica MIMO para operar enlaces con velocidades en capa física teóricas de 600Mbps.

**802.11p:** Este estándar opera en el espectro de radio frecuencia de 5.9GHz diseñado para el intercambio de datos entre automóviles.

**802.11r:** *Fast Basic Service Set Transition*, su característica es permitir protocolos de seguridad de identificación en la asociación de un dispositivo.

**802.11s:** Define interoperabilidad para los equipos utilizando protocolos MESH.

**802.11v:** Desde el punto de acceso se puede realizar configuración remota a los puntos cliente.

**802.11w:** Mejora la capa de control para mejorar la capacidad de los protocolos de autenticación.

**802.11y:** Permite operar en la banda de frecuencias de 3650- 3700MHz teniendo regulaciones de potencia más permisivas.

A continuación se presenta la estructura TCP/IP con el estándar IEEE802.11

**Tabla B.1 Estructura de la capa TCP/IP y IEEE802.11.**

Aplicación	Aplicación
Capa de transporte	Protocolos de transporte TCP y UDP
Capa de red	Protocolos de enrutamiento (STATIC, DSDV, AODV, DSR, TORA, OSPF, OLSR).
Capa de enlace	802.11 Enlace lógico de control.
	802.11 Control de acceso al medio. PCF, DCF, EDCF.
Capa física	Infrarrojo, FHSS, DSSS, OFDM, HR-DSSS

**Fuente:** Autor.

## **Características de los estándares IEEE 802.11 b/g**

### **B.1 Características de la capa física del estándar IEEE 802.11b**

En el estándar IEEE802.11b dentro de la capa física se utiliza la técnica de modulación de espectro ensanchado por secuencia directa de alta tasa HR/DSSS la cual consiste en modular la señal a transmitir con una secuencia de bits de alta velocidad conocidos como la secuencia de *Barker* o código de

dispersión, donde el ancho de banda es de 22MHz y tiene una canalización de 5MHz para poder operar desde el canal 1 centrado a 2412 MHz hasta el canal 13 centrado a 2472 MHz, las diferentes velocidades de transmisión en la capa física dependen del tipo de modulación implementada, para 1 Mbps se utiliza modulación por desplazamiento diferencial de fase DBPSK, 2Mbps utiliza modulación por corrimiento de fase en cuadratura diferencial DQPSK, para 5.5 y 11 Mbps utilizan la modulación por códigos complementarios CCK y no utiliza la secuencia de *Barker*.

El control de acceso del canal para saber si está libre se realiza a través del sensado de portadora el cual permite detectar si el canal está ocupado si detecta cierto umbral de energía o si detecta una señal DSSS.

#### **B.2 Características de la capa física del estándar IEEE 802.11g**

Para el estándar IEEE 802.11g utiliza en la capa física la tecnología llamada capa física de tasa extensiva-multiplexación por división de frecuencias ortogonales OFDM para el envío de datos, la cual consiste en fraccionar un canal en un número de subcanales ortogonales los cuales son usados en paralelo para aumentar la transferencia de datos, esta técnica es muy inmune a la interferencia entre símbolos (ISI) causado por multitrayectorias, pero se ve muy afectada por la interferencia entre portadoras (ICI) debido ha pequeños corrimientos en la frecuencia de las subportadoras, para solucionar este problema se considera un tiempo de guarda que evita esta interferencia, la cual también limita el throughput. La multiplexación se realiza en un canal de 20MHz, el cual se encuentra ocupado por 52 portadoras de las cuales 4 de estas se utilizan para monitorizar la ICI y las otras 48 se utilizan para la transmisión de información, la capa física utiliza diferentes esquemas de modulación para las tasas de transmisión van desde los 6 hasta los 54Mbps donde todas manejan una tasa de símbolo de 0.250 MSps sobre los 48 subcanales donde varia el número de bits por simbolo, el estándar IEEE 802.11g usa la modulación QAM y utiliza un decodificador basado en el

algoritmo de Viterbi para realizar una corrección de errores progresiva esto permite detectar bits corruptos y repararlos.

El control para acceder al canal y evaluar si está libre combina con un umbral mínimo de energía con la capacidad de detectar una señal IEEE 802.11g valida.

**Tabla B.2 Velocidades de transmisión y velocidades de código IEEE802.11g**

Modulación	Rata Código	Velocidad transmisión
BPSK	1/2	6
BPSK	3/4	9
QPSK	1/2	12
QPSK	3/4	18
16-QAM	1/2	24
16-QAM	3/4	36
64-QAM	2/3	48
64-QAM	3/4	54

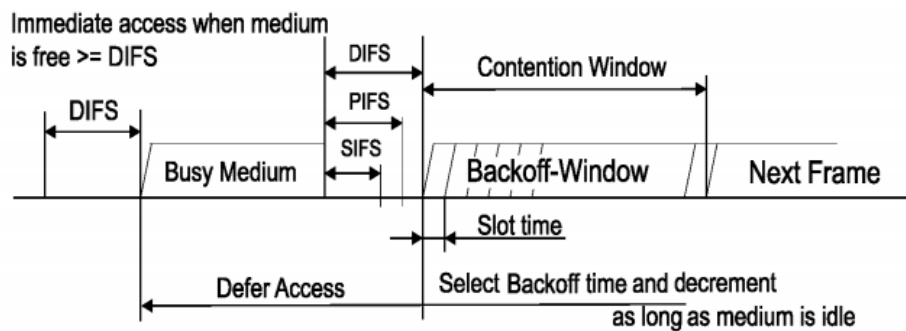
**Fuente: Estándar.**

### **B.3 Características de la capa MAC del estándar IEEE 802.11b/g.**

La capa *Medium Access protocol* (MAC) de los estándares IEEE 802.11b/g definen dos modos para su funcionamiento, el más implementado sobre los radios comerciales es el distribuido (función de coordinación distribuida DCF) el cual utiliza el protocolo *Carrier Sense Multiple Access With/ Collision Avoidance* CSMA/CA para coordinar la forma como varias estaciones comparten el acceso el medio, el otro modo es centralizado o coordinado (función de coordinación puntual PCF) donde el acceso al medio se ofrece libre de colisiones, su implementación es escasa en radios comerciales por lo tanto no será analizado.

El DCF tiene dos modos de acceder al medio uno de ellos es el básico (2 way *handshaking*) el otro es *Request to send* RTS/CTS (4 way *handshaking*) el cual se implementa para mejorar la eficiencia de la red cuando existen nodos ocultos.

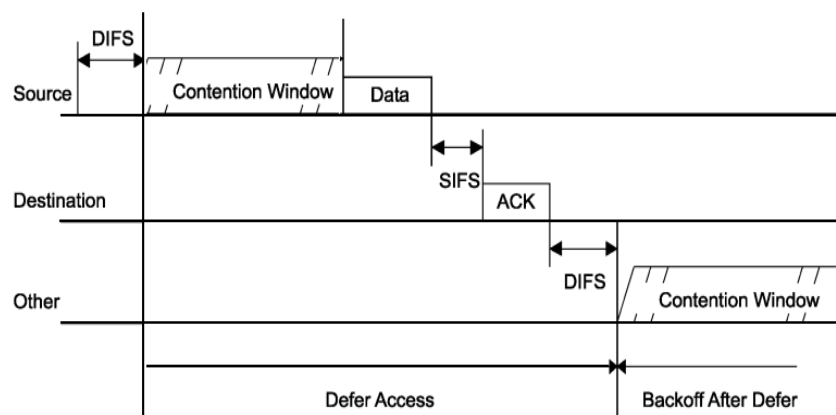
**Figura B.1** Parámetros definidos IFS interframe space.



**Fuente:** Estándar.

En la siguiente figura se muestra un esquema para una transacción de un paquete de datos utilizando los estándares IEEE802.11.

**Figura B.2** Transacción de un paquete de datos con el estándar IEEE 802.11b/g



**Fuente:** Estándar

Cuando se utiliza DCF el acceso al medio RTS/CTS cuando existen nodos ocultos (*raramente se implementa en enlaces Point-Point*), el transmisor AP o ST utiliza el acceso básico DCF para enviar un paquete *request to send* RTS el cual sirve para reservar el canal, la estación receptora AP o ST espera un tiempo SIFS para enviar un paquete *clear to send* CTS para confirmar la reserva del canal, Los *frames* RTS y CTS llevan la información de la longitud del paquete que va a ser transmitido, esta información es leída por todas las estaciones que están escuchando, lo cual permite actualizar el *network allocator vector* (NAV) el cual contiene la información sobre el periodo de tiempo en el cual el canal se encuentra ocupado para mayor información refiérase .

En la tabla B.3 se muestra los tiempos que se definen en la capa física Espacio inter trama y la CW para diferentes capa física.

**Tabla B.3 Descripción de la capa física del estándar IEEE802.11 a/b**

Parámetros	802.11 a	802.11b (FH)	802.11b (DS)	802.11b (IR)	802.11b (High Rate)
Slottime ( $\mu s$ )	9	50	20	8	20
SIFS ( $\mu s$ )	16	28	10	10	10
DIFS ( $\mu s$ )	34	128	50	26	50
EIFS( $\mu s$ )	92.6	396	364	205 o 193	268 o 364
<i>Cwmin</i>	15	15	31	63	31
<i>Cwmax</i>	1023	1023	1023	1023	1023
Data rate capa física.	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2,5.5 y 11

**Fuente: Estándar.**

### Anexo C. Modelo IEEE802.11 para calcular el *throughput* UDP/ TCP unidireccional.

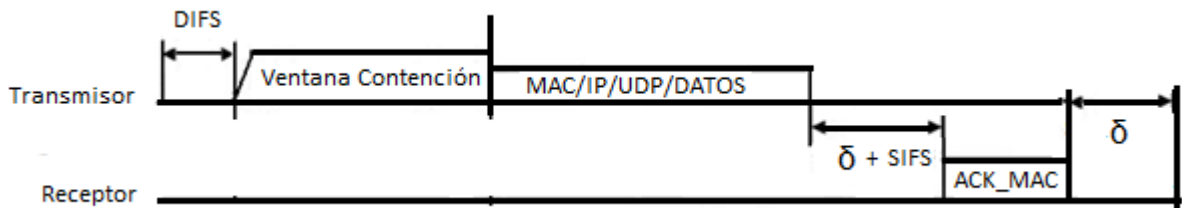
Calculo del *throughput* UDP unidireccional en un enlace punto a punto.

$$Throughput_{UDP} = \frac{L_{Paquete\_UDP}}{T_{Trans\_UDP}} \quad (C.1)$$

Donde  $L_{Paquete\_UDP}$  se refiere a la longitud del paquete UDP.

La  $T_{Trans\_UDP}$  se considera como el tiempo que transcurre una transacción UDP sobre el estándar IEEE802.11, el envío de un paquete UDP se describe en la siguiente figura C1.

Figura C1. Esquema simplificado de una transacción UDP sobre IEEE802.11.



Fuente: Autor

El *throughput* UDP está dado por la siguiente expresión:

$$T_{Trans\_UDP} = T_{DIFS} + T_{W\_contención} + T_{Datos\_UDP} + T_{SIFS} + T_{802.11\_ACK} + 2 * \delta \quad (C.2)$$

Donde:

$$T_{DIFS} = 2 * T_{Slottime} + T_{SIFS} \quad (C.3)$$

Considerando que el canal se encuentra libre de interferencias y el nivel de señal recibida se encuentra por encima del nivel de sensibilidad del receptor que define para cada velocidad de transmisión es decir el FER la rata de error de paquete es cercano a cero se considera el canal de transmisión ideal por lo tanto el tiempo promedio de la ventana de contención está dado por.

$$T_{W\_contención} = \frac{CW_{min}}{2} * T_{Slottime} \quad (C.4)$$

Para el cálculo del tiempo en que se transcurre al enviar un paquete es

Donde:

$T_{Datos\_UDP}$  es el tiempo que se transcurre en enviar un frame de datos UDP.

$$T_{Datos\_UDP} = T_{Preambulo} + \frac{L_{MPDU\_frame}}{R_{Tasa}} * 8 \quad (C.5)$$

$T_{802.11\_ACK}$  es el tiempo que transcurre en la estación receptora para en el envío de un ACK.

$$T_{802.11\_ACK} = T_{Preambulo} + \frac{L_{802.11\_ACK}}{R_{Basic}} * 8 \quad (C.6)$$

$\delta$  Se refiere al tiempo que tarda en viajar la señal entre las estaciones.

$$\delta = \frac{d}{v} = \frac{d(m)}{300e6 \text{ m/s}} \quad (C.7)$$

Cuando se trabaja con el estándar IEEE802.11g la expresión (C.5) y (C.6) se convierten en (C.9) y (C.10).

$$T_{Datos\_UDP} = T_{Preambulo} + \frac{N_{DBPS} * \text{ceil}\left(\frac{L_{MPDU\_frame}}{N_{DBPS}}\right)}{R_{Tasa}} * 8 + T_{Signal\_EXT} \quad (C.9)$$

$$T_{802.11\_ACK} = T_{Preambulo} + \frac{N_{DBPS} * \text{ceil} \left( \frac{L_{802.11\_ACK}}{N_{DBPS}} \right)}{R_{Basic}} * 8 + T_{Signal\_EXT} \quad (C.10)$$

A continuación se presenta la tabla de valores para cada una de las variables del modelo para el estándar IEEE802.11b/g respectivamente.

**Tabla C.1 Valores de las variables para el modelo UDP unidireccional.**

Parámetro	Definición	Valor 802.11b	Valor 802.11g	Unidad
$CW_{min}$	Tamaño de la ventana contienda mínima.	31	15	Slots
$T_{Slottime}$	Tiempo asignado al slot	20	9	µs
$T_{W \text{ contención}}$	Tiempo promedio de la ventana contienda.	310	67	µs
$T_{DIFS}$	Tiempo DIFS	50	28	µs
$T_{SIFS}$	Tiempo SIFS	10	10	µs
$T_{Preambulo}$	Duración PLCP Largo/Corto	192 /96	20	µs
$L_{MPDU\_frame}$	SERVICE+	0	2	Bites
	MAC	28	28	
	SNAP/LLC+	8	8	
	IP+	20	20	
	UDP+	8	8	
	DATOS	1440	1440	
	FCS	0	4	
		=1504	=1508	
$R_{Tasa}$	Tasa de Transmisión Capa física	1, 2, 5.5,11.	6, 9, 12,18, 24,36 , 48,54	Mbps
$R_{Basic}$	Tasa de transmisión capa física ACK.	1, 2	6,9,12, 18, 24	Mbps
$T_{Signal\_EXT}$	Extensión de Señal	-	6	µs
$L_{802.11\_ACK}$	Longitud del frame 802.11 Ack	14	14	Bytes
$N_{DBPS}$	Número de data bits por símbolo para OFDM.	-	216,192 144, 96 72, 48 36, 24.	

Fuente: Estándar IEEE802.11 2007.

Reemplazando las expresiones con los valores definidos en el estándar IEEE 802.11b/g para 11Mbps y 24Mbps sobre un enlace punto-punto sobre una red área local ( $\delta = 0$ ) se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla C2. Calculo de la transacción UDP con el estándar IEEE 802.11b 11Mbps**

Transmisor UDP	
$T_{DIFS}$	50 $\mu$ s
$T_{W \text{ contención}}$	310 $\mu$ s
$T_{\text{Datos UDP}}$	1189 $\mu$ s
$T_{SIFS}$	10 $\mu$ s
$T_{802.11 \text{ ACK}}$	208 $\mu$ s
$T_{\text{Trans UDP}}$	1768 $\mu$ s

Fuente: Autor.

Para cada transacción se requieren 1768  $\mu$ s durante los cuales se logran realizar 565 intercambios que se pueden completar en 1 segundo con una carga de 1440 bytes el throughput UDP obtenido es 6.51 de Mbps.

### Modelo transacción UDP sobre el estándar IEEE 802.11g.

**Tabla C3. Calculo del tiempo de una transacción UDP con IEEE802.11g con 24Mbps**

$T_{\text{Trans UDP}}$	
$T_{DIFS}$	28 $\mu$ s
$T_{W \text{ contención}}$	67 $\mu$ s
$T_{\text{Datos UDP}}$	504 $\mu$ s
$T_{SIFS}$	10 $\mu$ s
$T_{802.11 \text{ ACK}}$	28 $\mu$ s
$T_{\text{Trans UDP}}$	637 $\mu$ s

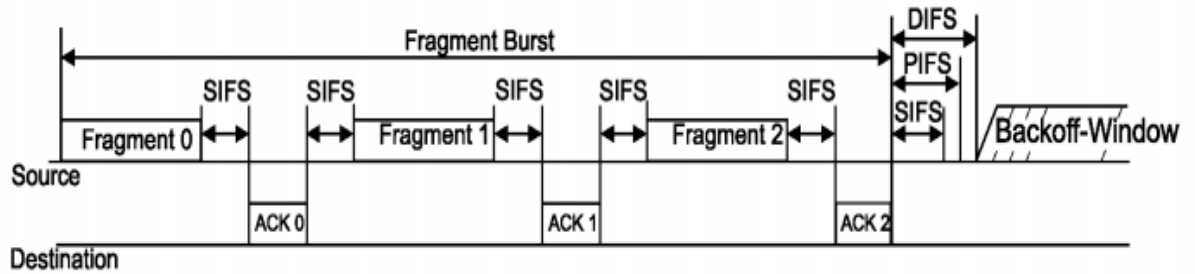
Fuente: Autores

En 1s se pueden realizar 1570 envíos de paquetes donde se obtiene que el máximo throughput teórico obtenido en UDP es de 18 Mbps para una red punto a punto de área local.

### Bursting sobre el estándar IEEE802.11b/g

El modo bursting se presenta en la figura C.2.

Figura C.2. Transacción Bursting sobre el estándar IEEE802.11b/g



Fuente: Estándar IEEE802.11 (2007).

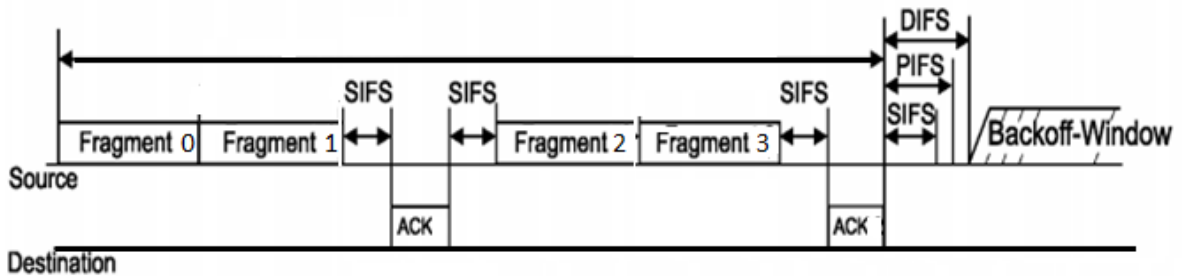
$$Throughput_{UDP} = \frac{N * L_{Paquets\_UDP}}{T_{Trans\_UDP}} \quad (C.11)$$

Donde el tiempo de una transacción UDP sobre bursting está dado por:

$$T_{Trans\_UDP} = T_{DIFS} + T_{W_{contención}} + N * T_{DatosUDP} + (2 * N - 1) * T_{SIFS} + N * T_{802.11\_ACK} + 2 * N * \delta \quad (C.12)$$

Bursting y Fastframe sobre el IEEE802.11.

Figura C3. Transacción Bursting and fastframe sobre el estándar IEEE802.11.



Fuente: Atheros.

Throughput TCP con el IEEE802.11b/g.

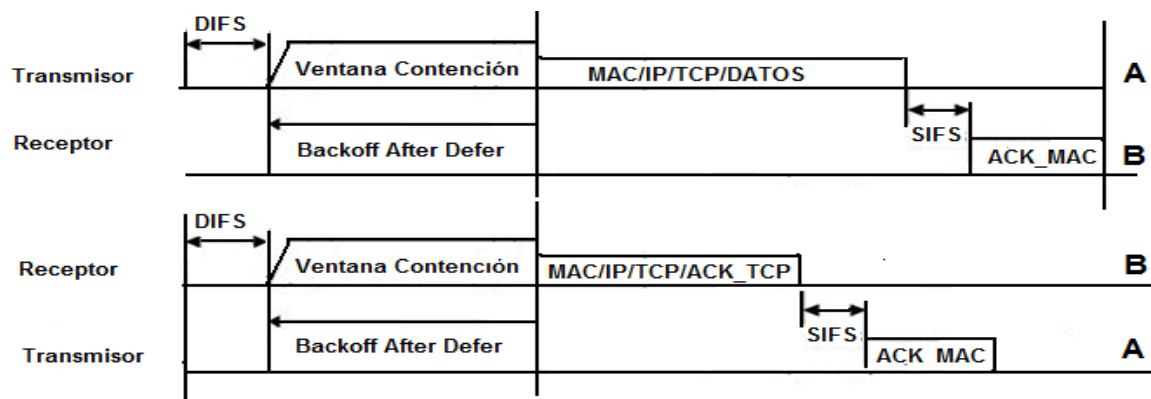
El throughput TCP sobre un enlace IEEE802.11 se encuentra definido por :

$$Throughput_{TCP} = \frac{L_{Paquete\_TCP}}{T_{Transacción\_TCP}} \quad (C.13)$$

Donde  $L_{Paquete\_TCP}$  se refiere a la longitud del paquete TCP, para el cálculo del máximo throughput se debe considerar la máxima unidad de transmisión (MTU) que opera sobre una red Ethernet 1500 bytes la cual es la que se encuentra conectada a los puntos de acceso, removiendo la cabecera IP se obtendrá que un paquete TCP  $L_{Paquete\_TCP} = 1480 \text{ bytes}$ .

$T_{Transacción\_TCP}$  se considera como el tiempo que transcurre una transacción TCP sobre el estándar IEEE802.11, el envío de un paquete TCP se describe en la siguiente figura C.4.

**Figura C.4 Esquema simplificado de una transacción TCP sobre IEEE802.11**



**Fuente: Autor.**

Primero la estación A llamada transmisora sensa que el canal se encuentre libre durante un  $T_{DIFS}$ , para inicializar la ventana de contención después que la ventana llega a cero la estación se encuentra lista para enviar el paquete TCP cuando la

estación B llamada receptora lo recibe espera un tiempo  $T_{SIFS}$  para confirmar el arribo del paquete con un ACK\_MAC, como TCP es un protocolo orientado a conexión la estación A necesita un ACK\_TCP en el que confirma que el paquete en capa de transporte arribo y se encuentra en buen estado por lo tanto la estación B tendrá que sentir que el canal se encuentre libre durante un  $T_{DIFS}$  mas el tiempo en que la ventana de contienda llega a cero para enviar el paquete de TCP\_ACK y después recibir una notificación de su arribo por parte de la estación A por medio de un ACK\_MAC.

### **Modelo transacción TCP sobre el estándar IEEE 802.11b.**

Para este modelo se tiene un paquete de información de 1460 bytes, donde se le agrega una cabecera IP de 20 Bytes y la cabecera TCP le agrega 20 Bytes para enviar una MTU de 1500 bytes que es la longitud de la trama que debe enviar un radio IEEE802.11b/g (máxima MTU de la red cableada fastethernet) para obtener certificación de la comunidad Wi-Fi, para ver la transacción refiérase a la figura C4.

El Tiempo para transmitir un paquete TCP sobre el estándar IEEE802.11b/g está dado por las siguientes expresiones:

$$T_{Trans\_TCP} = T_{DIFS} + T_{W\_contención} + T_{Datos\_TCP} + T_{SIFS} + T_{802.11\_ACK} \quad (C.14)$$

Donde:

$$T_{DIFS} = 2 * T_{Slottime} + T_{SIFS} \quad (C.15)$$

$$T_{W\_contención} = \frac{CW_{min}}{2} * T_{Slottime} \quad (C.16)$$

$$T_{Datos\_TCP} = T_{Preambulo} + \frac{L_{MPDU\_frame}}{R_{Tasa}} * 8bits + T_{Signal\_EXT} \quad (C.17)$$

$$T_{802.11\_ACK} = T_{Preambulo} + \frac{L_{802.11\_ACK}}{R_{Tasa}} * 8bits + T_{Signal\_EXT} \quad (C.18)$$

El tiempo para transmitir un paquete receptor TCP\_ACK está dado por las siguiente expresión:

$$T_{Recep\_TCP} = T_{DIFS} + T_{w\_contención} + T_{ACK\_TCP} + T_{SIFS} + T_{802.11\_ACK} \quad (C.19)$$

Donde:

$$T_{Ack\_TCP} = T_{Preambulo} + \frac{L_{TCP\_Ack}}{R_{Tasa}} + T_{Signal\_EXT} \quad (C.20)$$

$$T_{802.11\_ACK} = T_{Preambulo} + \frac{L_{802.11\_ACK}}{R_{Tasa}} * 8bits + T_{Signal\_EXT} \quad (C.21)$$

El tiempo para realizar una transacción de frame total está dado por:

$$T_{Transacción\_TCP} = T_{Trans\_TCP} + T_{Recep\_TCP} \quad (C.22)$$

La definición y el valor de los parámetros de las ecuaciones anteriores están definidos en la siguiente tabla.

**Tabla C4. Valores de las variables para el modelo .**

Parámetro	Definición	Valor 802.11b	Valor 802.11g	Unidad
$CW_{min}$	Tamaño de la ventana contienda	31	15	Slots
$T_{Slottime}$	Tiempo asignado al slot	20	9	$\mu s$
$T_{w\_contención}$	Tiempo promedio de la ventana contienda.	310	67	$\mu s$
$T_{DIFS}$	Tiempo DIFS	50	28	$\mu s$
$T_{SIFS}$	Tiempo SIFS	10	10	$\mu s$
$T_{Preambulo}$	Duración PLCP Largo/Corto	192 /96	20	$\mu s$
$L_{MPDU\_frame}$	MAC+ SNAP+ IP+ TCP+ DATOS	28+ 8 + 20+ 20+ 1460 =1536	36 + 8 + 20 + 20 + 1460 =1536	Bites
$R_{Tasa}$	Tasa de	1, 2,	6, 9,	

	Transmisión Capa física	5.5,11.	12,18, 24,36 , 48,54	Mbps
$T_{Signal\_EXT}$	Extensión de Señal	No definido Para el modelo tomara 0	6	$\mu s$
$L_{802.11 ACK}$	Longitud del frame 802.11 Ack	14	14	Bites
$L_{TCP Ack}$	Longitud de la trama ACK de TCP. MAC+ SNAP+ ACK TCP	28+ 8 + 40 =76	28 + 8 + 40 =76	Bites

Fuente: Autor

Reemplazando las expresiones con los valores definidos en el estándar para una red IEEE 802.11b/g de área local obtenemos los siguientes resultados:

Tabla C5. Modelo de una transacción TCP con el estándar IEEE 802.11b con 11Mbps

	Transmisor TCP	Receptor TCP_ACK
$T_{DIFS}$	50 $\mu s$	50 $\mu s$
$T_{W contención}$	310 $\mu s$	310 $\mu s$
Paquete TCP sobre 802.11b	$T_{Datos TCP}$ 1213 $\mu s$	$T_{Ack TCP}$ 151 $\mu s$
$T_{SIFS}$	10 $\mu s$	10 $\mu s$
$T_{802.11 ACK}$	106 $\mu s$	106 $\mu s$
Intercambio del frame	$T_{Trans TCP}$ 1,689 $\mu s$	$T_{Recep TCP}$ 627 $\mu s$
$T_{Transacción TCP}$	2,316 $\mu s$	

Fuente: Autor.

Para cada transacción se requieren 2316  $\mu s$  durante los cuales se logran realizar 431 intercambios que se pueden completar en 1 segundo con una carga de 1480 bytes el *throughput* TCP obtenido es de 5.11Mbps.

Modelo transacción TCP sobre el estándar IEEE 802.11g.

**Tabla C6. Modelo de una transacción TCP con el estándar IEEE 802.11g con 54Mbps**

	Transmisor TCP $T_{Trans\ TCP}$	Receptor TCP_ ACK $T_{Recep\_TCP}$
$T_{DIFS}$	28 $\mu$ s	28 $\mu$ s
$T_{W\ contenci3n}$	67 $\mu$ s	67 $\mu$ s
Paquete TCP Sobre 802.11g	$T_{Datos\ TCP}$ 254 $\mu$ s	$T_{Ack\ TCP}$ 37 $\mu$ s
$T_{SIFS}$	10 $\mu$ s	10 $\mu$ s
$T_{802.11\ ACK}$	30 $\mu$ s	30 $\mu$ s
Intercambio del Frame	$T_{Trans\ TCP}$ 389 $\mu$ s	$T_{Recep\_TCP}$ 172 $\mu$ s
$T_{Transacci3n\ TCP}$	561 $\mu$ s	

**Fuente: Autor.**

En 1s se pueden realizar 1782 envíos de paquetes donde se obtiene que el máximo *throughput* teórico obtenido en TCP es de 28 Mbps para una red punto a punto de área local, para una red de largo alcance realizando las variantes que se aplican a los parámetros de la capa física.

### ANEXO D. Mejoras en la utilización del canal Bursting y Fastframe.

*Bursting* y *fastframe* son técnicas implementadas por los chips Atheros y Texas *instruments* están basadas en el IEEE802.11e para mejorar el uso del canal después que una estación accede al medio para transmitir con el protocolo CSMA/CA, esto es muy importante en enlaces punto a punto de largo alcance.

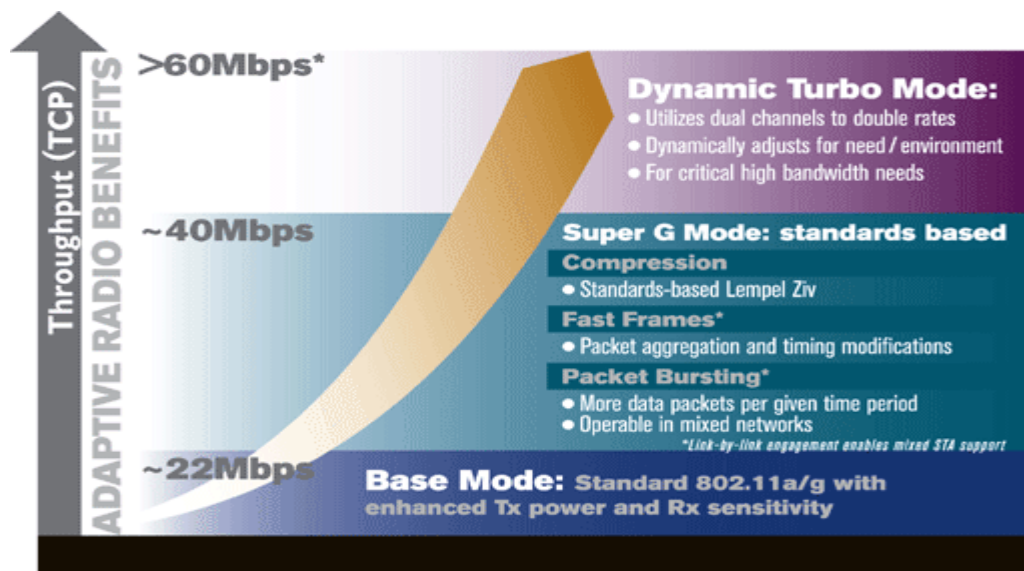
Tabla D.1 Características para mejorar el desempeño del throughput en el mecanismo CSMA/CA.

Característica	Descripción	Beneficios
<i>Bursting</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Más datos son enviados por periodo de tiempo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aumenta el <i>throughput</i> reduciendo las cabeceras.</li> </ul>
<i>Compression</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Se realiza compresión a los datos en tiempo real.</li> <li><i>Lempel Ziv compression</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incrementa el <i>throughput</i>, utilizando técnicas de compresión.</li> </ul>
<i>Fast Frames</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliza agregación de <i>frame</i> cuya longitud es de 3000 bites y realiza modificaciones en los tiempos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incrementa el <i>throughput</i> transmitiendo mas datos por <i>frame</i> y removiendo tiempos entre <i>frames</i>.</li> </ul>
<i>Dynamic Turbo</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Utiliza dos canales para realizar transmisiones.</li> <li>Analiza el entorno y ajusta el ancho de banda.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maximiza el ancho de banda utilizando dos canales.</li> </ul>

Fuente: Atheros

Vamos a analizar la implementación de técnicas para aumentar el *throughput* al nivel MAC del 802.11, las técnicas *fastframe* y *bursting* tienen compatibilidad con radios Wi-Fi, las técnicas de compresión no tiene compatibilidad con equipos comerciales y algunas características de *dynamic Turbo* están presentes en el estándar IEEE802.11n.

**Figura D.1 Throughput sobre el IEEE802.11g con las técnicas bursting y fast frame, compression y Dynamic Turbo.**



Fuente: Atheros.

Cuando se utiliza el estándar 802.11g en modo puro el *throughput* TCP es cercano a los 22Mbps, cuando se le habilita, las opciones de *packet Bursting*, *fast frames* y compresión este alcanza un *throughput* cercano a 40Mbps, cuando se activa el turbo mode dinámico supera los 40Mbps.

### **Texas Instruments G-Plus techniques:**

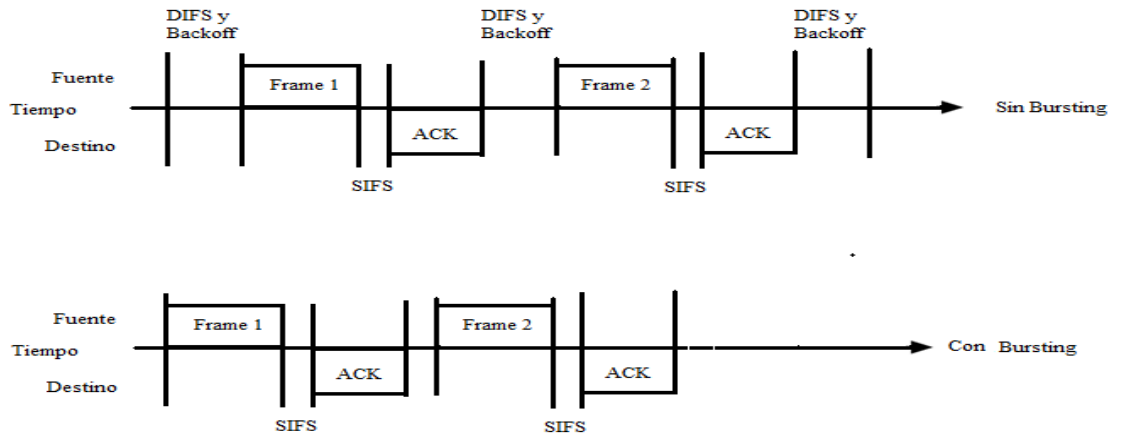
Algunos radios de Texas también introducen *bursting* y *fastframe* para mejorar el *throughput* obtenido en una red con el estándar IEEE802.11b/g, dentro de estas técnicas se realiza una mejor utilización del canal, cuando una estación accede al medio y utiliza la técnica *bursting* ocupa el canal para realizar varias transmisiones sin volver a invocar al algoritmo *backoff* cada vez que desee realizar una nueva transmisión esto elimina cabeceras y mejoras el *throughput* cuando utiliza la técnica *fastframing* concatena varios paquetes y realiza una transmisión de esta forma elimina cabeceras aumentando la MPDU.

**Tabla D.2 Características Bursting y fastframing chip Texas Instruments.**

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>	<b>Beneficio</b>
Concatenación de <i>frame</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Varios paquetes son colocados dentro de uno para formar un paquete de 4000 bites</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incrementa el <i>throughput</i> removiendo cabeceras y algunos retardos <i>interframe</i></li> </ul>
<i>Bursting</i> de <i>frames</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Técnica similar a los <i>chips Atheros</i>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Técnica similar a los <i>chips Atheros</i>.</li> </ul>

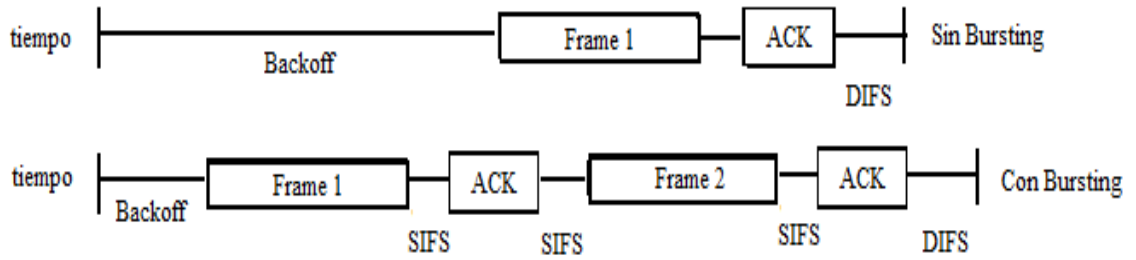
Fuente: Texas Instruments

**Figura D.2 Transacción utilizando Bursting.**



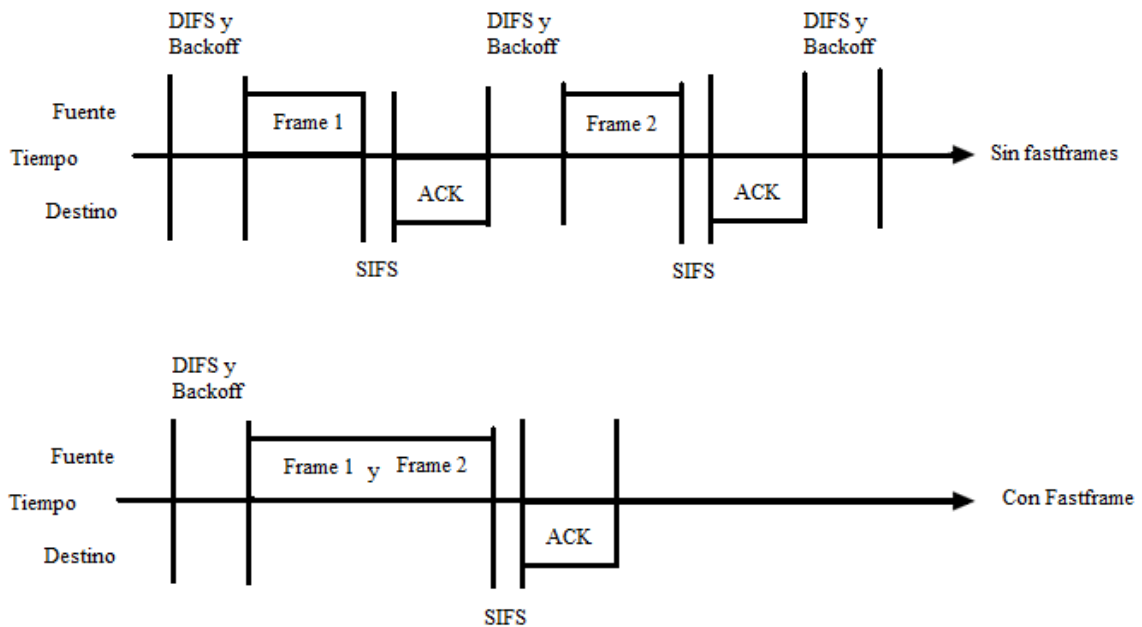
Fuente: Atheros Extreme Range.

Figura D.3 Técnica Bursting chip Texas instruments.



Fuente: Texas Instruments.

Figura D.4 Técnica Fastframe chip Atheros.



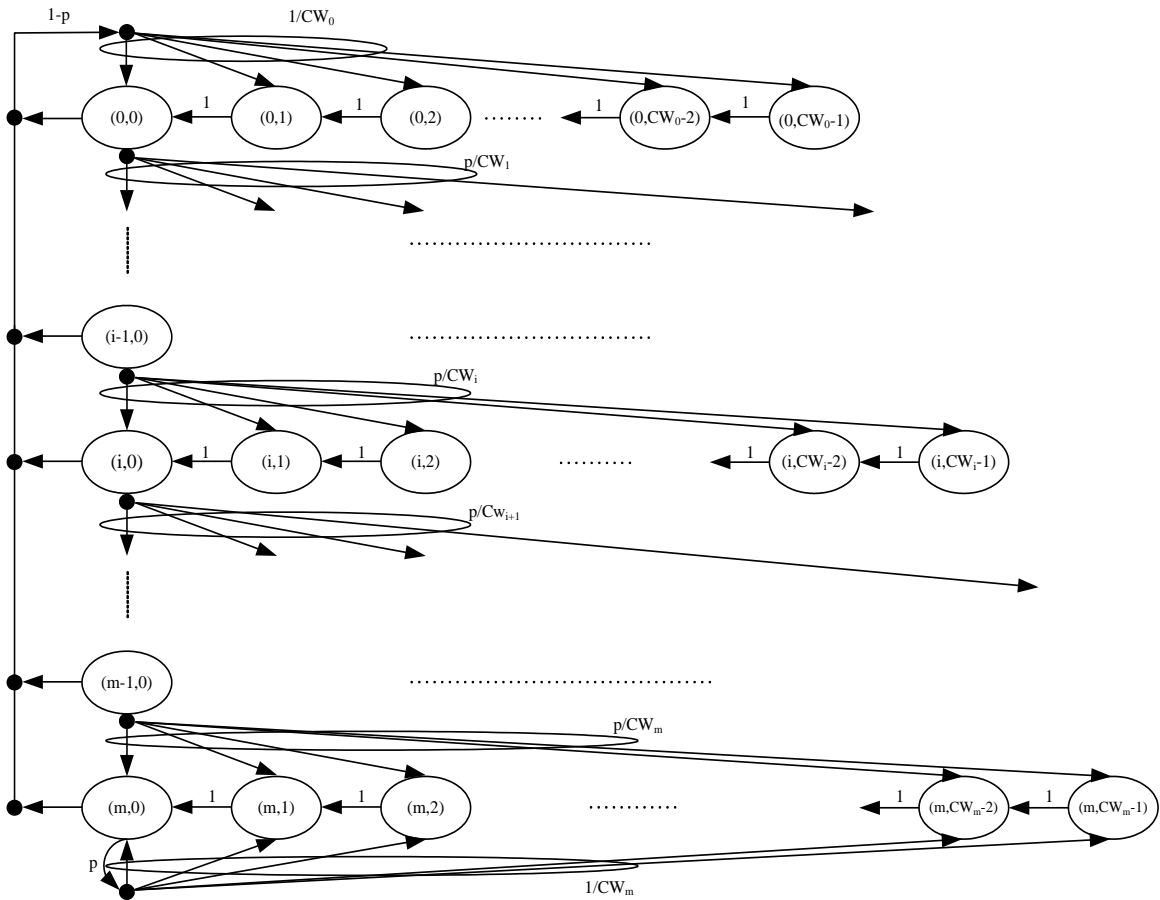
Fuente: Atheros Extrame-Range

## ANEXO E. Modelo de Bianchi

El modelo de Bianchi es un modelo analítico para el cálculo del *throughput* saturado, este modelo permite calcular la probabilidad de que la transmisión de un paquete falle debido a una colisión, este modelo asume que el canal se encuentra en condiciones ideales y que no existen nodos ocultos.

El modelo de Bianchi utiliza una cadena de Markov bidimensional de  $m + 1$  estados de backoff donde cada estado está representado por el contador de tiempo backoff del nodo. Una transmisión toma lugar entre una colisión y una transmisión exitosa, desde el estado 0 hasta el estado más alto como se puede apreciar en la figura E.1.

Figura E.1 Cadena bidimensional de Markov IEEE802.11 DCF



En la figura E.1 se presento la cadena bidimensional de *Markov* que modela el tamaño de la ventana en el algoritmo *backoff* que utiliza el protocolo

Como se puede apreciar en la figura anterior dentro de cada estado  $CW_i$  es el valor máximo de la ventana de contención el cual es igual a  $2^i(CW_{min} + 1)$  y el valor de  $CW_{max}$  es igual a  $2^m CW_{min}$ , donde  $m$  es el número máximo de retransmisiones. Si una transmisión se realiza en el estado  $(i, 0)$ , un número aleatorio será seleccionado en el intervalo entre  $0$  y  $CW_0 - 1$  con una probabilidad  $\frac{1-p}{CW_0}$ , este caso representa los estados  $(0,0)$  a  $(0, CW_0 - 1)$  dentro de la cadena de Markov, en el caso de que exista una colisión dentro del estado  $(i - 1, 0)$ , un número aleatorio será seleccionado del intervalo  $0$  y  $CW_i - 1$ , cada uno con una

probabilidad  $\frac{p}{CW_i}$ , este caso es representado por los estados  $(i, 0)$  a  $(i, CW_i - 1)$  dentro de la cadena de Markov.

Dentro de este modelo se adopta una escala de tiempo que es discreto y entero, dentro de esta escala de tiempo,  $t$  y  $t + 1$  corresponden al inicio de dos slots consecutivos, cada estación decremента el contador del tiempo *backoff* en el inicio de cada *Slottime*, el tiempo de *backoff* se frena cuando el canal está ocupado, pero el intervalo de tiempo entre  $t$  y  $t + 1$  puede ser mucho más grande que el slottime definido en el estándar, esto puede incluir una transmisión o una colisión.

Cada estado de este proceso bidimensional de Markov es representado por  $\{s(t), b(t)\}$ , donde  $b(t)$  es un proceso estocástico que representa el contador de tiempo *backoff* para una estación y  $s(t)$  es un proceso estocástico que representa el estado de *backoff*  $(0, 1, \dots, m)$  de una estación en el tiempo  $t$ . Este modelo asume que cada intento de transmisión a pesar del número de retransmisiones sufridas cada paquete colisiona con una probabilidad constante  $p$ , es decir  $p$  es la probabilidad que dentro de un *Slottime* una de las  $N - 1$  estaciones restantes transmitan, si cada una estaciones restantes transmiten un paquete con probabilidad  $\tau$  entonces  $p$  puede ser escrito como:

$$p = 1 - (1 - \tau)^{N-1} \quad (E.1)$$

Definamos  $b_{i,k} = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{S(t) = i, b(t) = k\}$ ,  $i \in (0, m)$ ,  $k \in (0, CW_i - 1)$  esta es una distribución estacionaria de la cadena, una transmisión ocurre cuando el contador de backoff es igual a cero. Así se puede escribir la probabilidad que una estación transmita:

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} \quad (E.2)$$

A partir de la cadena de Markov se calcula  $b_{i,0}$  en función de  $p$ , escribiendo la distribución estacionaria de la cadena para  $b_{i,0}$ ,  $b_{m,0}$  y  $b_{i,k}$ :

$$b_{i,0} = p^i b_{0,0} \quad 0 < i < m \quad (E.3)$$

$$b_{m,0} = \frac{p^m}{1-p} b_{0,0} \quad (E.4)$$

$$b_{i,k} = \frac{CW_i - k}{1-p} b_{i,0} \quad 0 \leq i \leq m \quad 0 < k < CW_i - 1 \quad (E.5)$$

A partir de la cadena de Markov Bidimensional podemos obtener para la primera ecuación la siguiente relación  $b_{i,0} = b_{i-1,0} * p$ , para  $0 < i < m$ , para la segunda expresión se obtiene  $(1-p) * b_{m,0} = p * b_{m-1,0}$  y para la tercera  $\sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{0,0}}{1-p}$ .

$$b_{i,k} = \frac{CW_i - k}{1-p} * (1-p) * \sum_{j=0}^m b_{j,0} \quad i = 0 \quad (E.6)$$

$$b_{i,k} = \frac{CW_i - k}{1-p} * p * b_{j,0} \quad 0 < i < m \quad (E.7)$$

$$b_{i,k} = \frac{CW_i - k}{1-p} * p * (b_{m-1,0} + b_{m,0}) \quad i = m \quad (E.8)$$

Imponiendo la normalización de que la sumatoria de todos los estados  $b_{i,k}$  debe ser igual a la unidad.

$$1 = \sum_{i=0}^m \sum_{k=0}^{CW_i-1} b_{i,k} \quad (E.9)$$

Donde

$$1 = \frac{b_{0,0}}{2} \left[ CW_{\min} \left( \sum_{i=0}^{m-1} (2p)^i + \frac{(2p)^m}{1-p} \right) + \frac{1}{1-p} \right] \quad (E.10)$$

Despejando  $b_{0,0}$  tenemos:

$$b_{0,0} = \frac{2 * (1 - 2p) * (1 - p)}{(1 - 2p)(CW_{min} + 1) + pCW_{min} * (1 - (2p)^m)} \quad (E.11)$$

Ahora calculando la probabilidad de que una estación transmita

$$\tau = \sum_{i=0}^m b_{i,0} = \frac{b_{i,0}}{1 - p} = \frac{2(1 - 2p)}{(1 - 2p)(CW_{min} + 1) + pCW_{min}(1 - (2p)^m)} \quad (E.12)$$

Ahora el problema consiste en resolver las ecuaciones

El *throughput* saturado es igual al promedio de la longitud de los paquetes o *payload* dentro de un intervalo de tiempo, se calcula como

$$Thr = \frac{E[\text{Tamaño del paquete transmitido en un intervalo de tiempo}]}{E[\text{Duración del intervalo de tiempo}]} \quad (E.13)$$

$$Thr = \frac{P_s P_{tr} L_{Data}}{P_s P_{tr} T_s + P_{tr} (1 - P_s) T_c + (1 - P_{tr}) T_{id}} \quad (E.14)$$

Donde  $P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^N$  es la probabilidad de la transmisión ocurra en un Slottime,  $L$  es la longitud del paquete,  $P_s = \frac{N\tau(1-\tau)^{N-1}}{1-(1-\tau)^N}$  es la probabilidad de que una transmisión sea exitosa,  $T_c$  es el tiempo en promedio que transcurre en una colisión,  $T_{id}$  es la duración de un periodo de slot inactivo.

$$\left\{ \begin{array}{l} T_i = \sigma \\ T_s = 2T_{PHYhdr} + T_{DATA} + 2\delta + T_{SIFS} + T_{ACK} + T_{DIFS} \\ T_c = T_{PHYhdr} + T_{DATA} + \delta + T_{EIFS} \\ T_{ERRDATA} = T_{PHYhdr} + T_{DATA} + \delta + T_{EIFS} \\ T_{ERRACK} = T_s \\ T_{EIFS} = T_{SIFS} + T_{ACK\_time} + T_{DIFS} \end{array} \right. \quad (E.16)$$

Dónde  $\sigma$  es la duración de un *Slottime* y  $\delta$  es el retardo de propagación.

Cuando se utiliza OFDM los paquetes son redimensionados debido a que se transmiten símbolos no bits.

$$T_{DATA} = T_{symbol} \left[ \frac{L_{SER} + L_{TAIL} + L_{DATA}}{N_{Bps}} \right] \quad (E.17)$$

$$T_{ACK} = T_{symbol} \left[ \frac{L_{SER} + L_{TAIL} + L_{ACK}}{N_{Bps}} \right] \quad (E.18)$$

Donde

$T_{symbol}$  La duración para la transmisión de un símbolo.

$L_{SER}$  Tamaño del campo servicio en la capa física de OFDM.

$L_{TAIL}$  Tamaño del campo Tail en la capa física de OFDM.

$N_{Bps}$  Número de bits codificados por símbolo.

$L_{ACK}$  Longitud de un frame ACK.

$L_{DATA}$  La longitud de un frame data.

### Modelo de Bianchi y Tinirello 2005

Define  $TX$  el evento que una estación comience a transmitir en frame en un determinado slot y denota  $(s = i)$  el evento que una estación se encuentre el

estado del backoff  $i \in (0, \dots, R)$ , se utiliza el teorema de bayes para determinar que la estación transmita en un slot aleatoriamente seleccionado.

$$P(TX) \frac{P(s=i|TX)}{P(TX|s=i)} = P(s=i) \quad \text{para } i \in (0, \dots, R)$$

Lo cual es igual para todos  $(0, \dots, R)$  tambien es igual para la suma.

$$P(TX) \sum_{i=0}^R \frac{P(s=i|TX)}{P(TX|s=i)} = \sum_{i=0}^R P(s=i) = 1 \quad (E.19)$$

Así  $P(TX)$  se puede expresar en función de la probabilidad de colisión.

$$P(TX) = \frac{1}{\sum_{i=0}^R \frac{P(s=i|TX)}{P(TX|s=i)}} \quad (E.20)$$

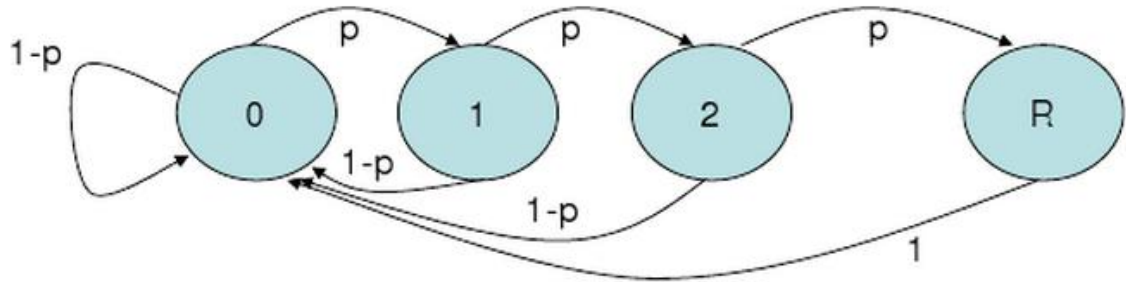
Donde  $P(TX|s=i)$  es la probabilidad de que una estación transmita encontrándose en el estado  $i$ , esta probabilidad es una distribución en estado estable en tiempo discreto de una cadena de Markov  $s(k)$  la cual describe una distribución del estado del *backoff* durante una transmisión en el instante  $k$  la transición de las probabilidades no nulas son.

$$\left\{ \begin{array}{l} P(s(k+1) = i | s(k) = i-1) = p \quad i = 1, \dots, R \\ P(s(k+1) = 0 | s(k) = i) = 1 - p \quad i = 0, \dots, R-1 \\ P(s(k+1) = 0 | s(k) = R) = 1 \quad i = R \end{array} \right. \quad (E.21)$$

Donde  $p$  es la probabilidad condicional de colisión, es la probabilidad que un paquete sea transmitido y pueda colisionar,  $p$  se asume que es constante he independiente del número de retransmisiones si se trunca a  $R$  retransmisiones entonces se obtiene que.

$$P(s=i|TX) = \frac{(1-p)p^i}{1-p^{R+1}} \quad i \in (0, \dots, R) \quad (E.22)$$

Figura E.2 . Transición del estado  $s(k)$



Fuente: Performance Analysis of IEEE802.11 DCF

Ahora se calcula la probabilidad  $p(TX|s = i)$  de que una estación transmita mientras se encuentra en el estado *backoff*  $i$ .

$$P(TX|s = i) = \frac{1}{1 + \frac{CW_i}{2}} \quad (E.23)$$

Donde  $\frac{CW_i}{2}$  es el promedio de la ventana de contención

$$\tau = \frac{1}{1 + \frac{1-p}{1-p^{R-1}} \sum_{i=1}^R p^i \frac{1}{1 + \frac{CW_i}{2}}} \quad (E.24)$$

El *throughput* Tinnirello y Bianchi lo definen

$$Thr = \frac{P_s P_{tr} L_{Data}}{P_s P_{tr} T'_s + P_{tr} (1 - P_s) T'_c + (1 - P_{tr}) \sigma} \quad (E.25)$$

El promedio del tamaño de un paquete está definido por.

$$E[P]' = E[P] + \sum_{i=1}^{\infty} B_0^k E[P] = \frac{(CW_{min} + 1)E[P]}{CW_{min}} \quad (E.26)$$

La duración de una transmisión exitosa es:

$$T'_s = T_s + \sum_{i=1}^{\infty} B_0^i T_s + \sigma = \frac{T_s}{1 - B_0} + \sigma \quad (E.27)$$

Para el tiempo de una colisión

$$T'_c = T_c + \sigma \quad (E.28)$$

## **ANEXO F. Modelo de Javier Simo para el cálculo del throughput Saturado en un enlace punto a punto de largo alcance.**

J.Simo presenta un modelo del DCF sobre redes de largo alcance “*Modeling and optimizing IEEE 802.11 DCF for long-distance links*”, J. Simo se basa en el modelo de Bianchi Tinnirello para describir el comportamiento de la transición de la máquina de estados DCF del 802.11 en función de la probabilidad de colisión y la de transmisión.

El DCF sobre redes de área local solo pueden colisionar si transmiten en un mismo slot al aumentar la distancia entre las estaciones este probabilidad

aumenta por lo tanto J. Simo define el intervalo de vulnerabilidad entre dos estaciones como el espacio de tiempo durante el cual una estación puede colisionar con un frame transmitido por otro en un determinado tiempo, se define como el tiempo de propagación entre las dos estaciones STA y STB, se considera que la transmisión es exitosa si esta recibe correctamente un ACK desde el receptor.

Para entender el intervalo de vulnerabilidad se puede interpretar a partir del siguiente escenario. consideremos tres estaciones que son mutuamente visibles STA, STB y STC, la estación STA transmite a una estación STB quien responde con su correspondiente ACK, la estación STC puede también intentar transmitir al mismo tiempo produciendo una colisión, STC puede generar una colisión si esta comienza a transmitir durante el intervalo de vulnerabilidad  $VIAB = (t - \delta - CCA, t + \delta + CCA)$ , de otra forma STA no transmite porque ella detectara la comunicación proveniente de STC o STC no transmite porque ella a detectado la transmisión de STA, sin embargo el desempeño depende directamente del número de slots que se inicien en el intervalo de vulnerabilidad se define el intervalo de vulnerabilidad normalizado  $NVI = VI/\sigma$  cuyo valor depende de la distancia.

- Si STC está demasiado cerca a STA (red de área local) entonces  $\delta + CCA < \frac{\sigma}{2}$ .
- Si STC está muy lejos de STA  $\delta + CCA > \frac{\sigma}{2}$  uno o mas slots pueden inicializarse en el intervalo de vulnerabilidad.

Si STC comienza a transmitir en alguno de los slots que hacen parte del intervalo de vulnerabilidad resulta en una colisión. para el estándar IEEE802.11b donde el *Slottime* es 20us solo permite distancia 750m y 2.5km, dependiendo del mecanismo CCA utilizado para IEEE802.11a/g donde el *Slottime* es de 9us se

puede considerar 750m y 1.1km, el mecanismo CCA puede ser despreciable a medida que la distancia entre las estaciones aumenta  $\delta \gg CCA$  realizando estas consideraciones el intervalo de vulnerabilidad  $NVI = \frac{2\delta}{\sigma}$ , la parte no decimal del intervalo de vulnerabilidad corresponde a la probabilidad extra que el slot inicie dentro del intervalo de vulnerabilidad al menos  $\text{int}\left(\frac{2\delta}{\sigma}\right)$  y la parte decimal de la fracción es la probabilidad de que uno o más slots o  $\text{int}\left(\frac{2\delta}{\sigma}\right) + 1$  slots comiencen en el intervalo de vulnerabilidad.

**DIFS:** Diferentes intervalos *inter frame* son definidos para asignar diferentes prioridades a los ACK, PCF control *frames* y normal DCF data *frames*. Dentro de una red DCF, la principal funcionamiento DIFS es prevenir que las estaciones que se encuentren esperando por el canal colisiones con los *frames* ACK.

**ACKtimeout:** Se define como el tiempo que el nodo transmisor tiene que esperar el ACK que confirme el envío correcto de una trama del nodo receptor si no se recibe el ACK tras ese tiempo el ACK se da por perdido (el IEEE802.11 no distinguir si se ha perdido el paquete enviado o el ACK que espera recibir) y se llega un tiempo después se descarta aumentando el tamaño de la ventana de contienda y se inicia una nueva transmisión. Cuando el *ACKtimeout* es menor a dos veces al tiempo que tarda en propagación entre las dos estaciones los ACK no llegan al transmisor a tiempo descartando los ACK si llega antes de la retransmisión o colisionando, por lo tanto el *ACKtimeout* debe ser mayor al RTT y lo define.

$$ACKTimeout = SIFS + \sigma_{STD} + 2 * \delta_{MAX} + PLCP \text{ (F.1)}$$

J. Simo realiza las siguientes consideraciones dentro de su modelo:

- Considera que no existen nodos ocultos.

- El canal de comunicación es ideal  $BER = 0$ .
- El tráfico es saturado para todas las estaciones.
- La probabilidad de colisión  $P_c$  es constante e independiente del número de retransmisiones.
- Considera un límite entre la distancia de los nodos de 100km, teniendo presente la duración de una ACK y la duración mínima de un paquete, se considera despreciable de que la transmisión de un paquete comience y termine dentro del intervalo de vulnerabilidad.

Define  $n$  estaciones Wi-Fi que se denominan  $E_1, \dots, E_n$  o  $STA, STB, \dots, STn$

El modelo de Bianchi presenta la transición de la máquina de estados para una estación la cual es independiente de cualquier factor externo de la propia descripción de la MAC es decir no influye la distancia de los nodos o el número de nodos.

$$\tau_Q = P(TX E_Q) = \frac{1}{\sum_{i=0}^R \frac{P(S_Q = i | TX E_Q)}{P(TX E_Q | S_Q = i)}}, \quad Q \in (1, \dots, n) \quad (F.2)$$

Donde se obtiene la probabilidad de que una estación transmita en una ranura cualquiera, siendo:

$$P(S_Q = i | TX E_Q) = \frac{(1 - P_Q)}{1 - P_Q^{R+1}}, \quad i \in (0, \dots, R), Q \in (1, \dots, n) \quad (F.3)$$

y

$$P(TX E_Q | S_Q = i) = \frac{2}{2 + CW_i}, \quad i \in (0, \dots, R), Q \in (1, \dots, n) \quad (F.4)$$

Para cada estación se tiene  $n$  ecuaciones con  $2n$  incógnitas para las estaciones con  $Q \in (1, n)$

$$\tau_Q = \frac{2 * (1 - p_Q^{R+1})}{(1 - P_Q) \sum_{i=0}^R p_Q^i (2 + CW_i)} \quad (F.5)$$

Debido a que el intervalo de vulnerabilidad de una estación con respecto a otra puede ser mayor que el intervalo de la ranura. J. Simo define la probabilidad de que una estación transmita durante el intervalo de vulnerabilidad.

La define como:

$$P_Q = \sum_{D=1, D \neq Q}^n \mu_{QD} \left( 1 - \prod_{X=1, X \neq Q}^n (1 - \xi_{QDX}) \right) \quad (F.6)$$

Donde  $\mu_{QD}$  se considera como la probabilidad de que una estación  $EQ$  tenga un paquete para transmitir a  $ED$ .

$\xi_{QDX}$  Es la probabilidad que la estación  $EX$  transmita en el intervalo de vulnerabilidad  $EQ$  transmitiendo un paquete a  $ED$ .

J. Simo utiliza la cadena bidimensional de Markov para calcular los estados estacionarios  $b_{X,i,j}$  para calcular la probabilidad  $\xi_{QDX}$ .

$$\xi_{QDX} = \tau_x + \sum_{i=0}^R \sum_{j=1}^{CW_i} b_{X,i,j} P\{e_{X,i,j} \rightarrow e_{X,i,0} \text{ durante } IV_{QRX}\} \quad (F.7)$$

Donde

$$P\{e_{X,i,j} \rightarrow e_{X,i,0} \text{ durante } IV_{QRX}\} = P\{Ex \text{ no reciba nada en } j \text{ ranuras}\} * K_{QRX,j} \quad (F.8)$$

Para calcular que la estación no reciba en número de ranuras.

$P\{ex \text{ no reciba nada en } j \text{ ranuras}\} =$

$$= \sum_{a=0}^R \sum_{b=0}^{CW_a} \max\left(\frac{CW_a + 1 - j}{CW_a + 1}, 0\right) * b_{X,a,b} \prod_{y=1, y \neq X, Q}^n \sum_{l=0}^R \sum_{m=j}^{CW_l} b_{y,l,m} \quad (F. 10)$$

$$K_{QRX,j} = \begin{cases} 1 & \text{int}(IVN_{QRX}) > j \\ (IVN_{QRX} - j) & \text{int}(IVN_{QRX}) = j \\ 0 & \text{int}(IVN_{QRX}) < j \end{cases} \quad (F. 11)$$

Define el intervalo de vulnerabilidad normalizado como:

$$IVN_{QRX} = \frac{2\delta}{\sigma} \quad (F. 12)$$

La probabilidad de transmisión como:

$$\begin{aligned} \xi_{QDX} = \tau_x + & \sum_{i=0}^R \sum_{j=1}^{CW_i} K_{QRX,i,j} \frac{CW_i + 1 - j}{CW_i + 1} p_X^i \tau_x \frac{1 - P_X}{1 - p_X^{R+1}} \\ & * \sum_{a=0}^R \sum_{b=0}^{CW_a} \max\left(\frac{CW_a + 1 - j}{CW_a + 1}, 0\right) * \frac{CW_a + 1 - b}{CW_a + 1} p_X^a \tau_x \frac{1 - P_X}{1 - p_X^{R+1}} \\ & * \prod_{y=1, y \neq X, Q}^n \sum_{l=0}^R \sum_{m=j}^{CW_l} \frac{CW_l + 1 - m}{CW_l + 1} p_y^l \tau_y \frac{1 - p_y}{1 - p_y^{R+1}} \quad (F. 13) \end{aligned}$$

J. Simo define el caudal normalizado como la suma de los caudales que generan las estaciones.

$$S = \sum_{i=1}^n S_i \quad (F. 14)$$

Donde:

$$S_i = \frac{\text{El número de bits transmitido por ranura}}{\text{Tamaño medio de ranura}} \quad (F. 15)$$

$$S_i = \frac{\tau_i (1 - p_i) E[P]'}{E[Slot]} \quad (F.16)$$

El modelo considera tres tipos de ranura de duración diferente: Cuando existen ranuras donde el medio está libre, aquellas donde se produce una transmisión con éxito, también tiene presente las distancias la duración no es igual desde la perspectiva de cada estación.

$$E[Slot_i] = (1 - P_{tr})\sigma + \sum_{j=1}^n \tau_j (1 - p_j) T_{s,j,i} + P_{tr} (1 - p_s) \left( \frac{T_i}{P_{tr}} T_{c,i} + \left(1 - \frac{T_i}{P_{tr}}\right) T_{c,not-i} \right) \quad (F.17)$$

Donde la probabilidad de que una ranura contenga al menos una transmisión de cualquiera de las n estaciones es:

$$P_{tr} = 1 - \prod_{x=1}^n (1 - T_x) \quad (F.18)$$

La probabilidad de que exista una transmisión con éxito:

$$P_{tr} P_s = \sum_{x=1}^n T_x (1 - p_x) \quad (F.19)$$

Los tiempos de una transmisión con éxito es :

$$T_{s,j,i} = \sigma + \frac{1}{1 - B_0} \begin{cases} E[P] + 2 * PHYoverhead + ACK + DIFS & i \neq j \\ E[P] + 2 * PHYoverhead + ACK + DIFS + 2E[\delta_i] & i = j \end{cases} \quad (F.20)$$

Donde  $B_0 = \frac{1}{CW_{min} + 1}$  y  $PHYoverhead = PLCP Preamble + PLCP Header$

Para calcular el tiempo de una colisión tenemos:

$$T_{c,i} = E[P] + PHYOverhead + ACKTimeout + DIFS \quad (F.21)$$

Si la colisión no involucra a la estación este tiempo se define con la siguiente expresión.

$$T_{c,not-i} = E[P] + PHYOverhead + EIFS \quad (F.22)$$

Una estación cuando oye una transmisión o una colisión en una ranura se considera la duración descrita dentro del estándar, pero cuando una estación se encuentra transmitiendo tiene que tener presente el tiempo de propagación, cuando se genera una colisión se tiene presente la duración de un *ACKTimeout*, aunque esto no es cierto debido a que la estación comienza a transmitir cuando recibe un paquete diferente del ACK esperado.

También define un retardo medio de propagación como:

$$E[\delta_i] = \sum_{j=1, j \neq i}^n \mu_{i,j} \delta_{i,j} \quad (F.23)$$

La probabilidad de descarte de un paquete después de  $R$  retransmisiones.

$$P_{drop,Q} = \tau_Q \frac{(1 - p_Q^{R+1})}{1 - p_Q^{R+1}} \sum_{i=0}^R \left(1 + \frac{CW_i}{2}\right) \quad (F.24)$$

En el caso de un enlace punto a punto entre las estaciones A, B las expresiones quedan de la siguiente forma:

$$\delta_{A,B} = \delta = \frac{d}{c} = \frac{d}{300e6} \quad (F.25)$$

La ecuación del comportamiento del DCF sigue siendo el mismo descrito por Bianchi y Tinirello.

$$\tau = \frac{1}{\sum_{i=0}^R \frac{1-p}{1-p^{R+1}} p^i \left(1 + \frac{CW_i}{2}\right)} \quad (F.26)$$

$$p = \xi = \tau + \sum_{i=0}^R \sum_{j=1}^{CW_i} K_j \frac{CW_i + 1 - j}{CW_i + 1} p^i \tau \frac{1-p}{1-p^{R+1}} \\ * \sum_{a=0}^R \sum_{b=0}^{CW_a} \max\left(\frac{CW_a + 1 - j}{CW_a + 1}, 0\right) * \frac{CW_a + 1 - b}{CW_a + 1} * p^a \tau \frac{1-p}{1-p^{R+1}} \quad (F.27)$$

Para el cálculo del *throughput* se reduce a las siguientes expresiones:

$$S = 2\tau \frac{(1-p)E[P]'}{E[Slot]} \quad (F.28)$$

El promedio del tiempo del slot.

$$E[Slot] = (1 - P_{tr})\sigma + P_{tr}P_sT_s + P_{tr}(1 - P_s)T_c \quad (F.29)$$

Donde

$$P_{idle} = \sigma = (1 - P_{tr}) = (1 - \tau)^2 \quad (F.30)$$

$$P_{tr}P_s = 2\tau(1-p) \quad (F.31)$$

Para el cálculo del tiempo de una transmisión exitosa se toma la siguiente expresión.

$$T_s = \frac{1}{1 - B_0} (E[P] + 2 * PHYOverhead + ACK + DIFS + \delta) + \sigma \quad (F.32)$$

Y el tiempo de colisión considerando que el  $ACKTimeout$  es mayor que dos veces el tiempo de propagación entre las estaciones para evitar las retransmisiones en de ACKs.

$$T_c = E[P] + ACKTimeout + DIFS + \sigma \quad (F.33)$$

Y para el cálculo de la probabilidad de paquetes perdidos.

$$P_{drop} = \tau \frac{(1-p)p^{R+1}}{1-p^{R+1}} \sum_{i=0}^R \left(1 + \frac{CW_i}{2}\right) \quad (F.34)$$

La expresión para el cálculo de los retardos.

$$D = \frac{2E[P]}{S} (1 - P_{drop}) \quad (F.35)$$

## **Anexo G. Simulaciones Sistema solar fotovoltaico en diferentes ciudades.**

Dentro de este Anexo se presentan las simulaciones del modelo para calcular la capacidad de las batería y la potencia del panel para alimentar el nodo Cliente y repetidor 24 Horas transmitiendo considerando la radiación solar presente en diferentes ciudades representativas de la radiación solar en el país, en las figuras siguientes se presenta la corriente de desbordamiento (CD) del panel y el estado de carga SOC de la batería.

### **Ciudad: Barranquilla**

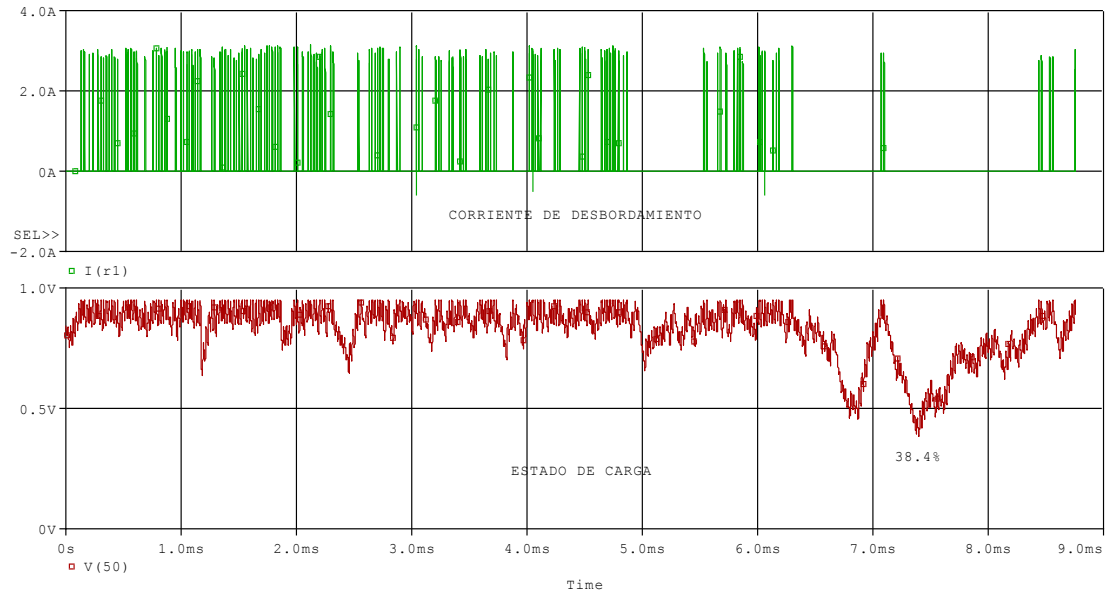
**Tabla G1. Dimensionado sistema fotovoltaico Bogotá nodo cliente**

<b>Nodo Cliente</b>						
<b>Potencia</b>	<b>Escenario de carga</b>	<b>Capacidad del panel</b>	<b>Capacidad de la batería</b>	<b>SOC inicial</b>	<b>SOC final</b>	<b>Autonomía</b>

166.8 Wh	24h Transm <sup>5</sup>	50 W	1200 Wh	85%	38.4%	5 días
----------	-------------------------	------	---------	-----	-------	--------

Fuente: Autor.

Figura G1. CD y SOC en Barranquilla nodo cliente.



Fu

Fuente: Autor

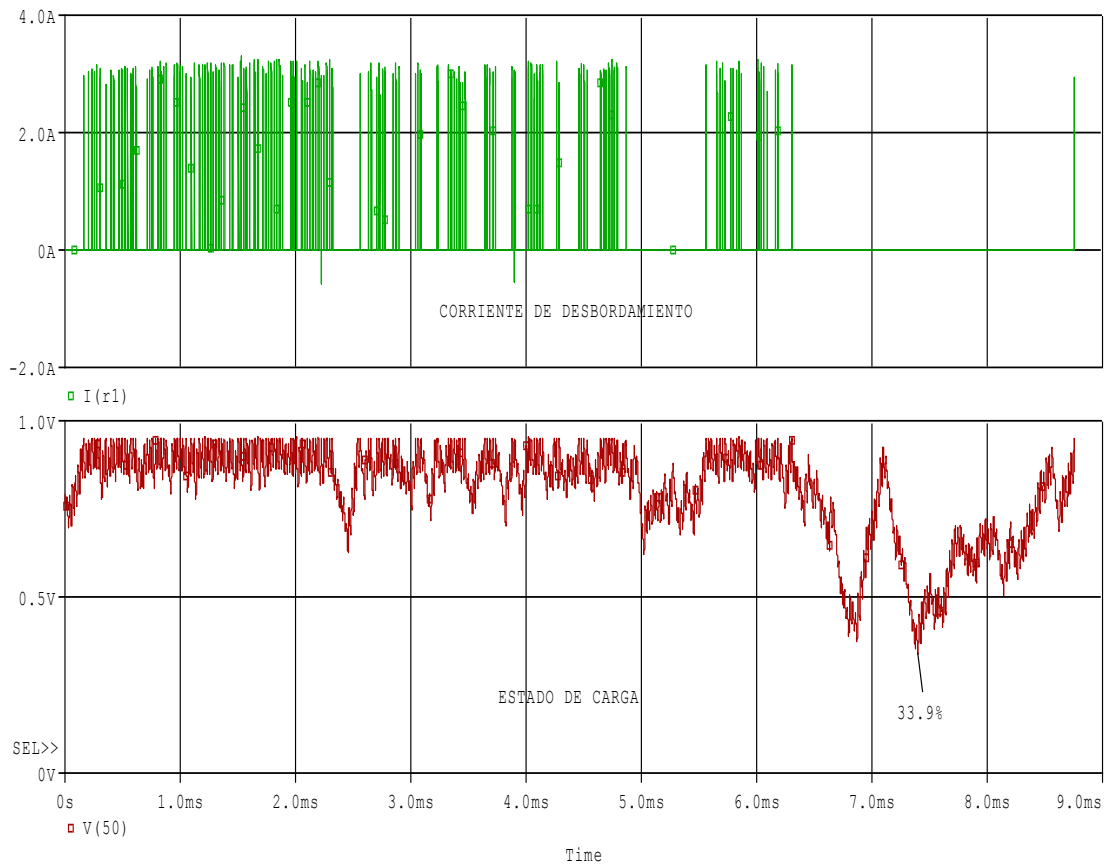
Tabla G2. Dimensionado sistema fotovoltaico Barranquilla nodo repetidor.

Nodo Repetidor						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía
245.76 Wh	24h Trans	70 W	1500 Wh	80%	33.9%	4.2 días

Fuente: Autor.

Figura G2. CD y SOC en Barranquilla nodo repetidor.

<sup>5</sup> La sigla transm se refiere a que el nodo se encuentra transmitiendo.



Fuente: Autor.

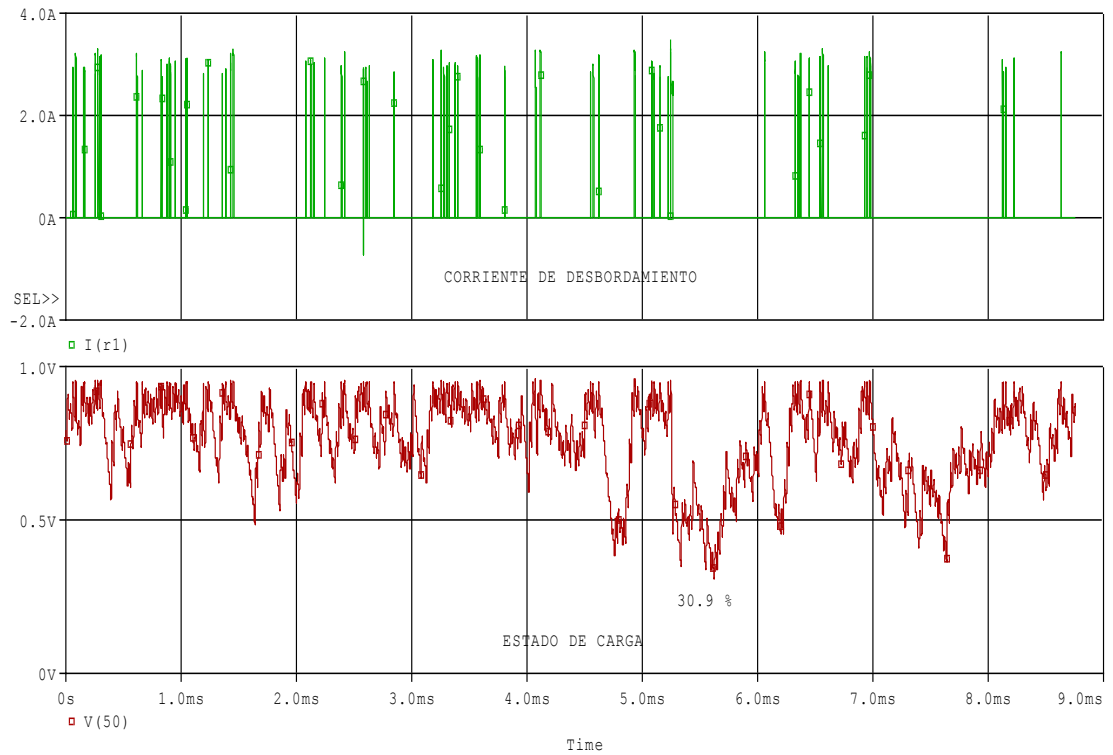
Ciudad: Bogotá

Tabla G3. Dimensionado sistema fotovoltaico Bogotá nodo cliente.

Nodo Cliente						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Días
166.80 Wh	24h Trans	65 W	1100 Wh	80%	30.9%	4.6

Fuente: Autor.

Figura G3. CD y SOC en Bogotá nodo cliente.



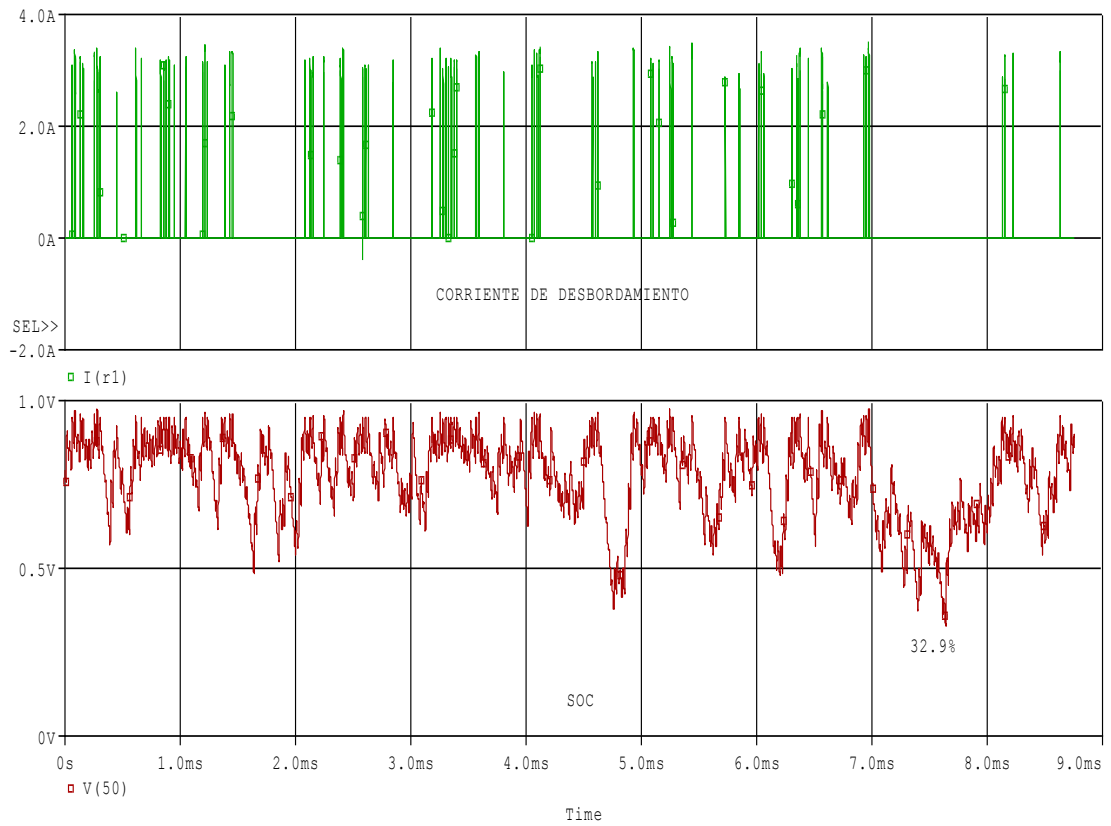
Fuente: Autor.

Tabla G4. Dimensionado sistema fotovoltaico Bogotá nodo repetidor.

Nodo Repetidor						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Días
245.76 Wh	24h Transm	85 W	1450 Wh	80%	32.9%	4,13

Fuente: Autor.

Figura G4. CD y SOC en Bogotá nodo repetidor.



Fuente: Autor.

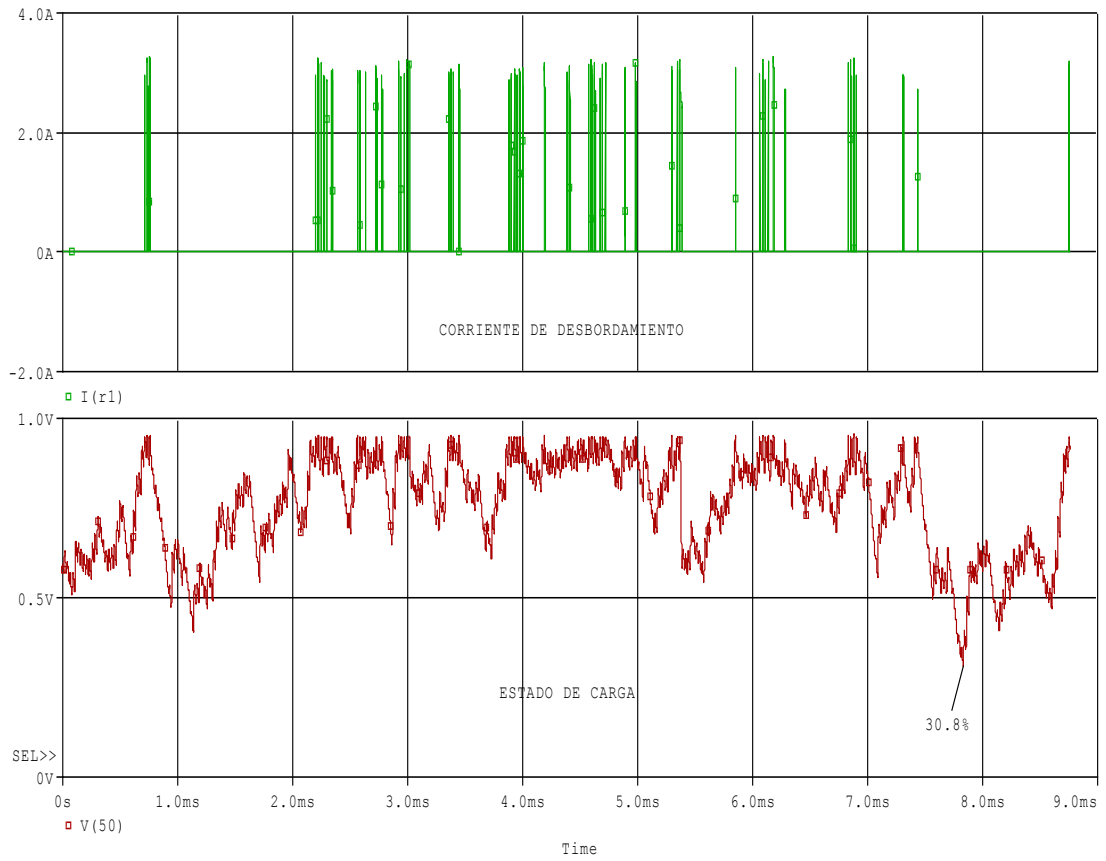
### Ciudad: Cali

Tabla G5. Dimensionado sistema fotovoltaico Cali nodo cliente.

Nodo Cliente						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Días
166.80 Wh	24 h Transm	70 W	1600 Wh	60%	30.8%	6,7

Fuente: Autor.

Figura G5. CD y SOC en Cali nodo cliente.



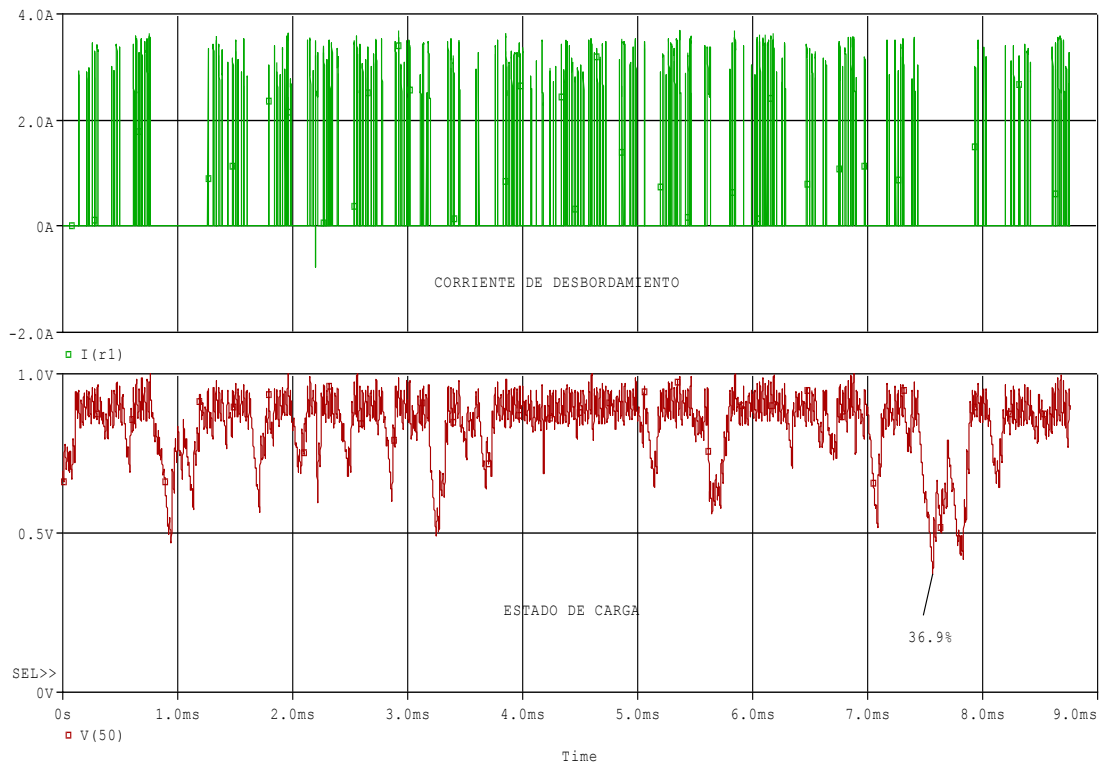
Fuente: Autor.

Tabla G6. Dimensionado sistema fotovoltaico Cali nodo repetidor

Nodo Repetidor						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía
245.76 Wh	24 h Transm	120 W	1200 Wh	70% (k=0.7)	36.9%	3.41

Fuente: Autor.

**Figura G6. CD y SOC en Cali nodo repetidor.**



**Fuente: Autor.**

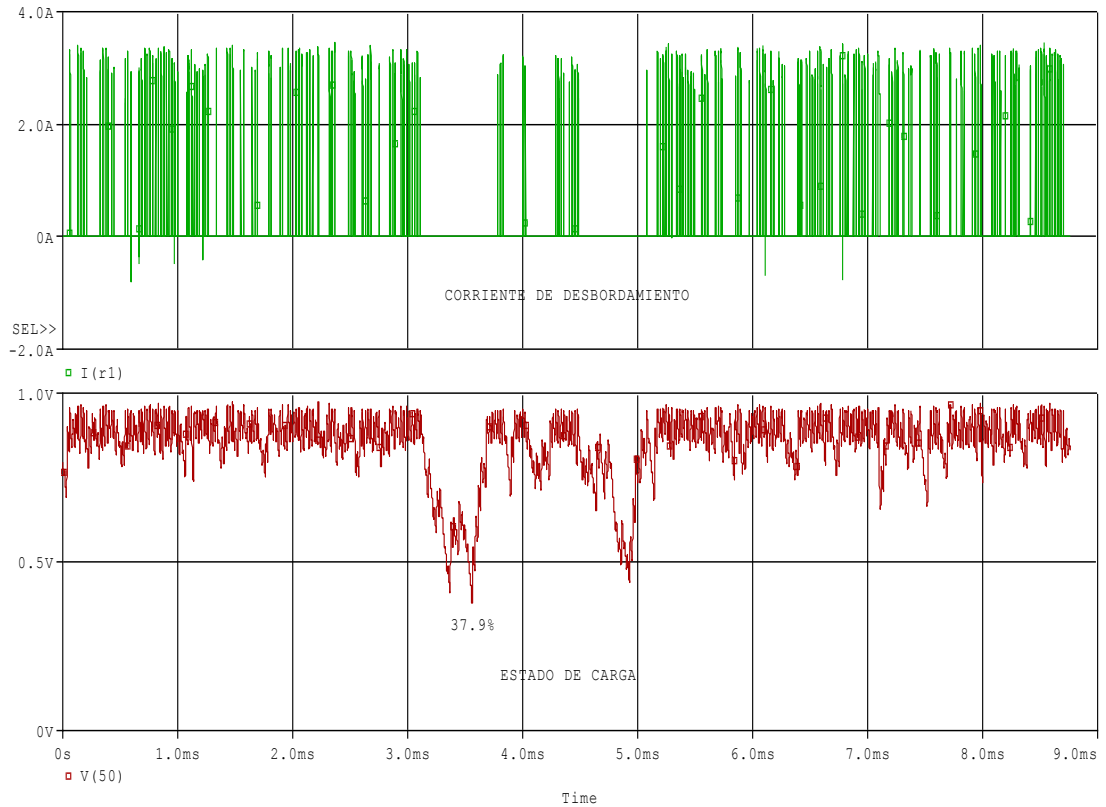
### Ciudad: Leticia

**Tabla G7. Dimensionado sistema fotovoltaico Leticia nodo cliente.**

Nodo Cliente						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Días
166.80 Wh	24h Transm	85 W	1200 Wh	80%	37.9%	5

**Fuente: Autor**

**Figura G7. CD y SOC en Leticia nodo cliente.**



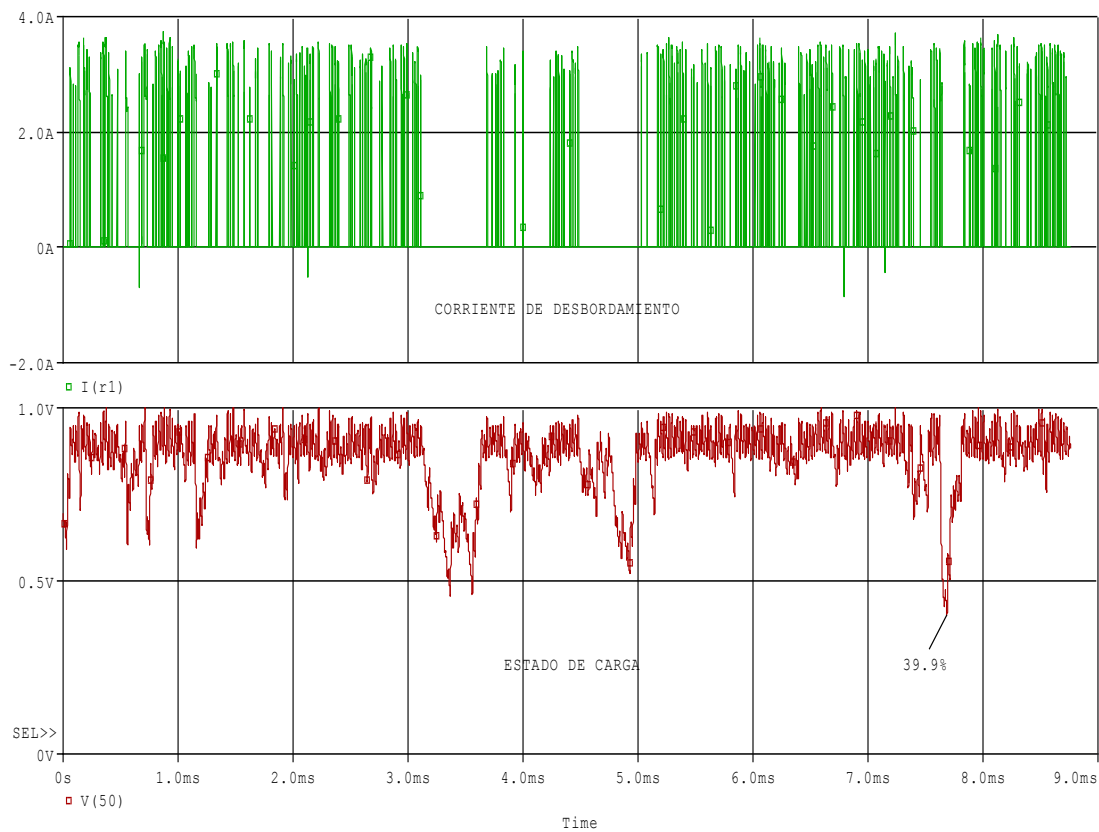
**Fuente: Autor.**

**Tabla G8. Dimensionado sistema fotovoltaico Leticia nodo repetidor.**

Nodo Repetidor						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Días
245.76 Wh	24h Transm	120 W	1400 Wh	70%	39.9%	3,98

**Fuente: Autor.**

**Figura G8. CD y SOC en Leticia nodo repetidor.**



Fuente: Autor.

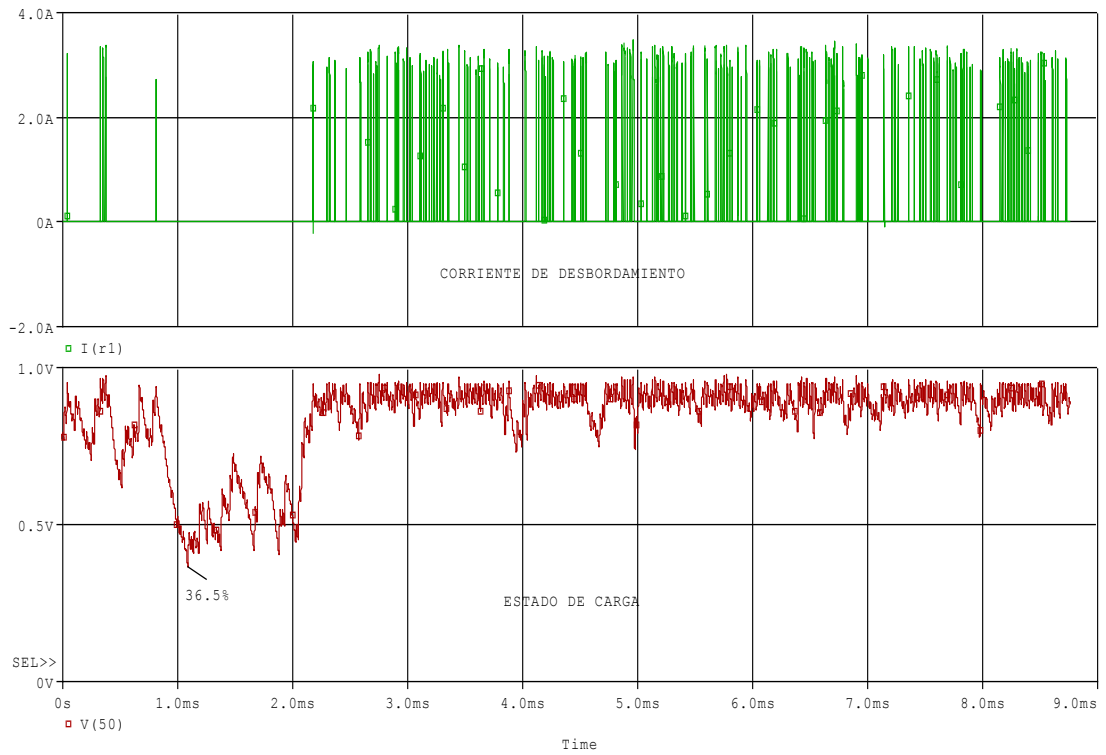
### Ciudad: Quibdó

Tabla G9. Dimensionado sistema fotovoltaico Quibdó nodo cliente

Diseño Cliente						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Días
166.80 Wh	24h Transm	95 W	1700 Wh	80%	36.5%	7,13

Fuente: Autor

Figura G9. CD y SOC en Leticia nodo cliente.



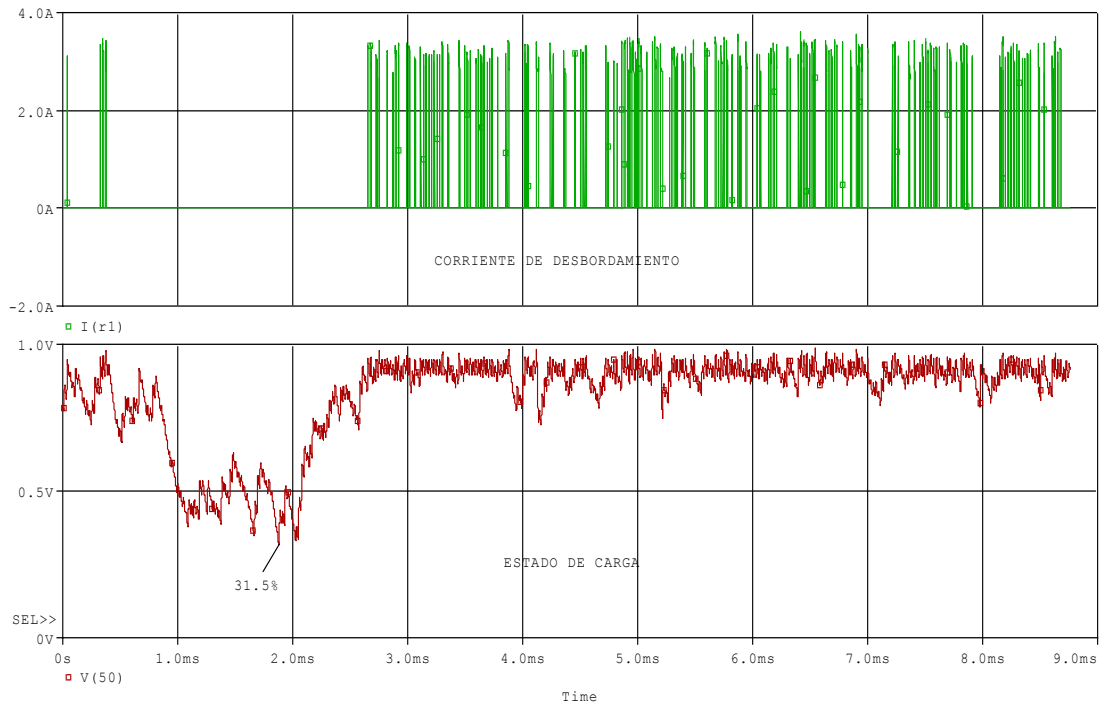
Fuente: Autor.

Tabla G9. Dimensionado sistema fotovoltaico Quibdó nodo repetidor.

Nodo Repetidor						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Días
245.76Wh	24h Transm	120 W	2300 Wh	80%	31.5%	6.55

Fuente: Autor.

Figura G9. CD y SOC en Quibdó nodo repetidor.



Fuente: Autor.

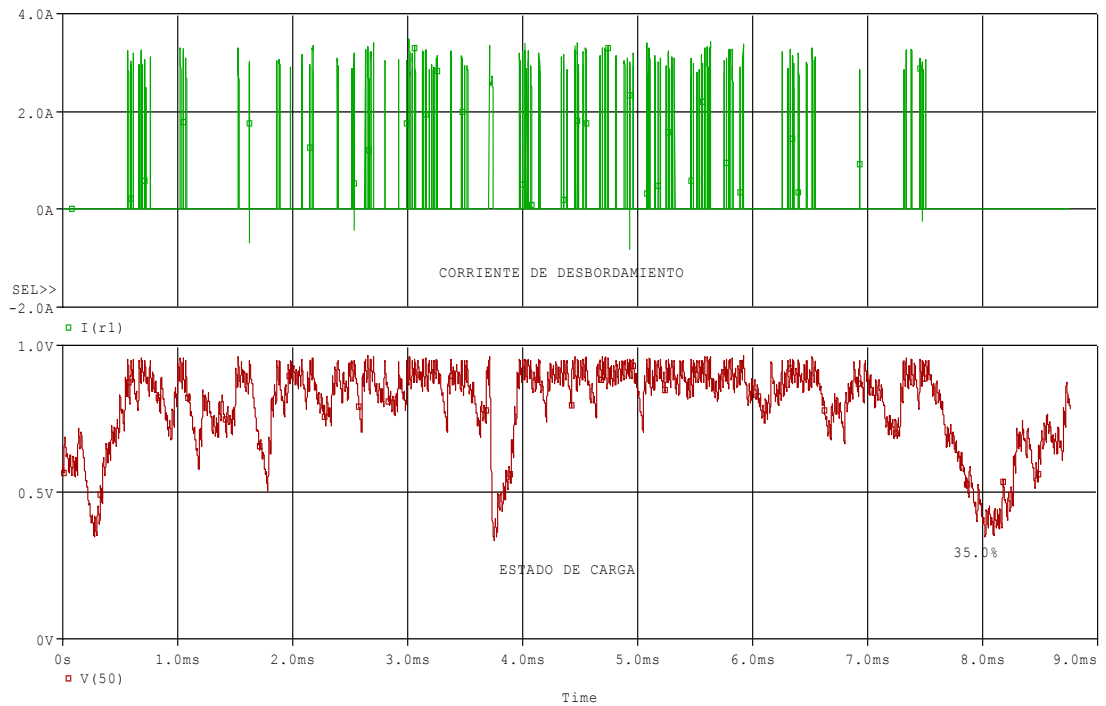
**Ciudad: Medellín**

**Tabla G10. Dimensionado sistema fotovoltaico Medellín nodo cliente.**

Nodo Cliente						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Díaz
166.80 Wh	24h Transm	70 W	1400 Wh	60%	35%	5,87

**Fuente: Autor.**

**Figura G10. CD y SOC en Medellín nodo cliente.**



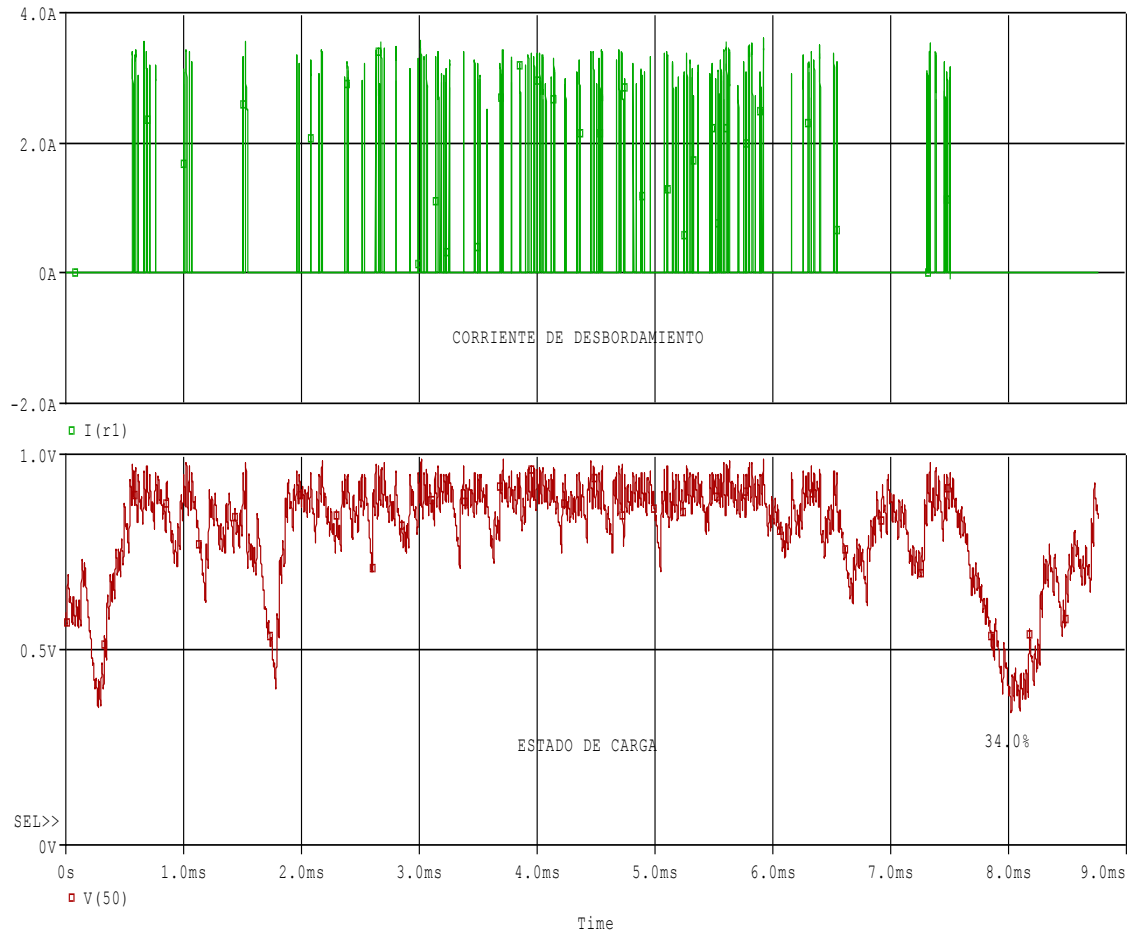
**Fuente: Autor.**

**Tabla G11. Dimensionado sistema fotovoltaico Medellín nodo repetidor.**

Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía
245.76 Wh	24 h transm.	95 W	1800 Wh	60%	34%	5.12

Fuente: Autor.

**Figura G11. CD y SOC en Medellín nodo repetidor.**



Fuente: Autor.

## **Escenarios de carga considerando el diseño del sistema fotovoltaico para Barranquilla.**

Para el nodo cliente se simula con un panel de 65 W y dos baterías de 33 Ah en paralelo, con lo que se obtiene una energía de  $66 \text{ Ah} * 12,7 \text{ V} \approx 840 \text{ Wh}$ . Análogamente, para el cliente repetidor se simula con el mismo banco de baterías, pero con un panel de 85 W. Con esto se hicieron las simulaciones para hallar los escenarios de carga que el sistema soporta para cada uno de las configuraciones del nodo. Los resultados se muestran a continuación para las ciudades representativas de cada una de las regiones con niveles de radiación solar diferentes, según el mapa de radiación solar de la UPME, publicado en el año 2005.

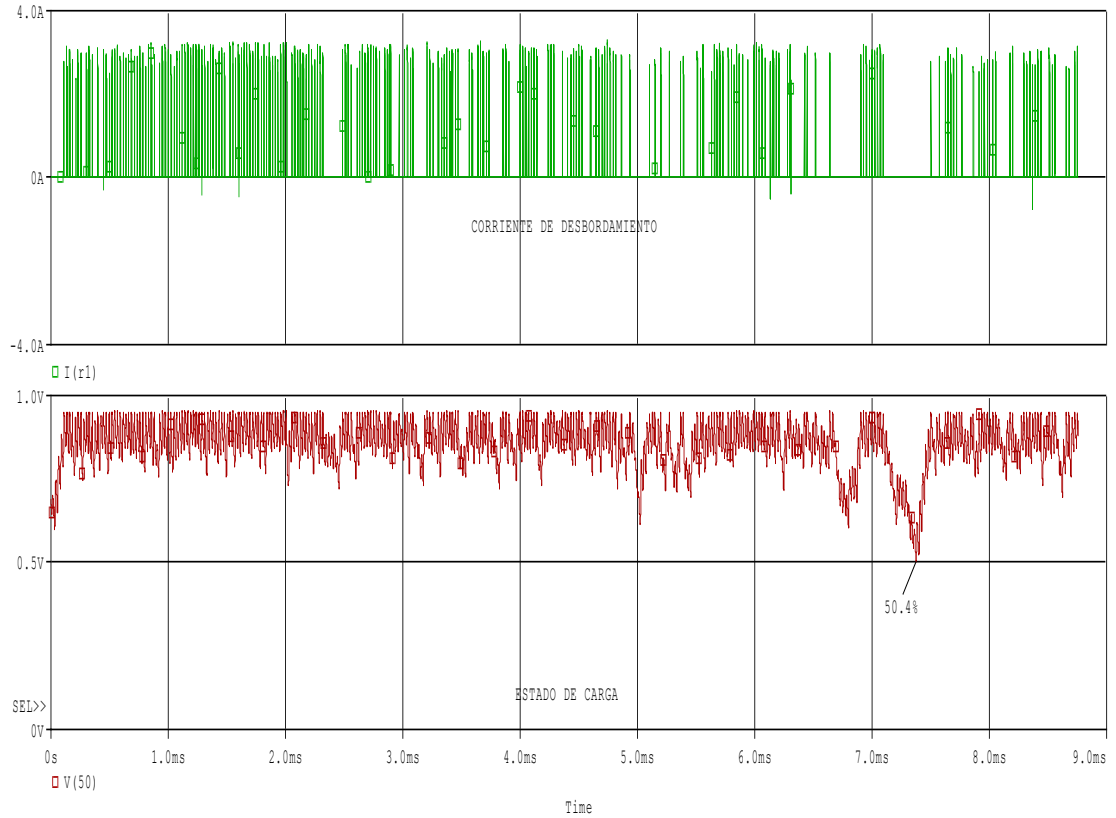
### **Ciudad: Barranquilla**

**Tabla G12. Dimensionado sistema fotovoltaico Barranquilla nodo cliente.**

<b>Potencia</b>	<b>Escenario de carga</b>	<b>Capacidad del panel</b>	<b>Capacidad de la batería</b>	<b>SOC inicial</b>	<b>SOC mín.</b>	<b>Autonomía</b>
166.8Wh	24 h transm.	65 W	840 Wh	70 %	50.4 %	3.5 días

**Fuente: Autor.**

**Figura G12. CD y SOC en barranquilla nodo cliente.**



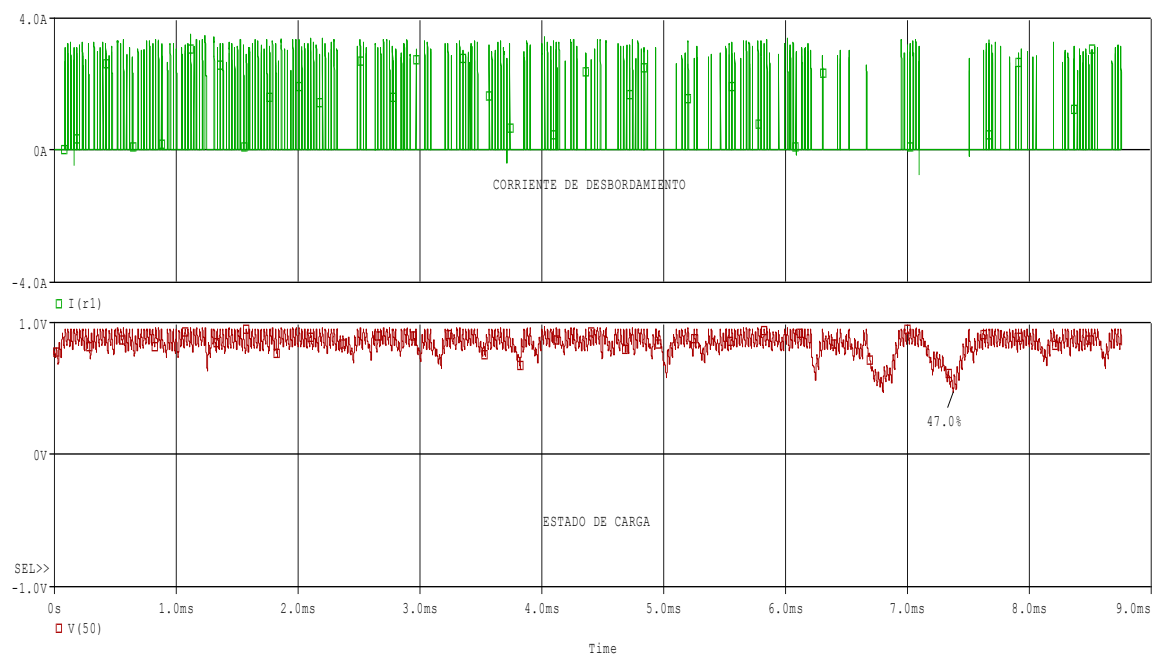
**Fuente: Autor.**

**Tabla G13. Dimensionado sistema fotovoltaico Barranquilla nodo repetidor.**

Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC mín.	Autonomía
245.76	24 h transm.	85 W	840 Wh	80% (k=0.7)	47.0%	2.4 días

**Fuente: Autor.**

**Figura G13. CD y SOC en Barranquilla nodo Repetidor**



**Fuente: Autor.**

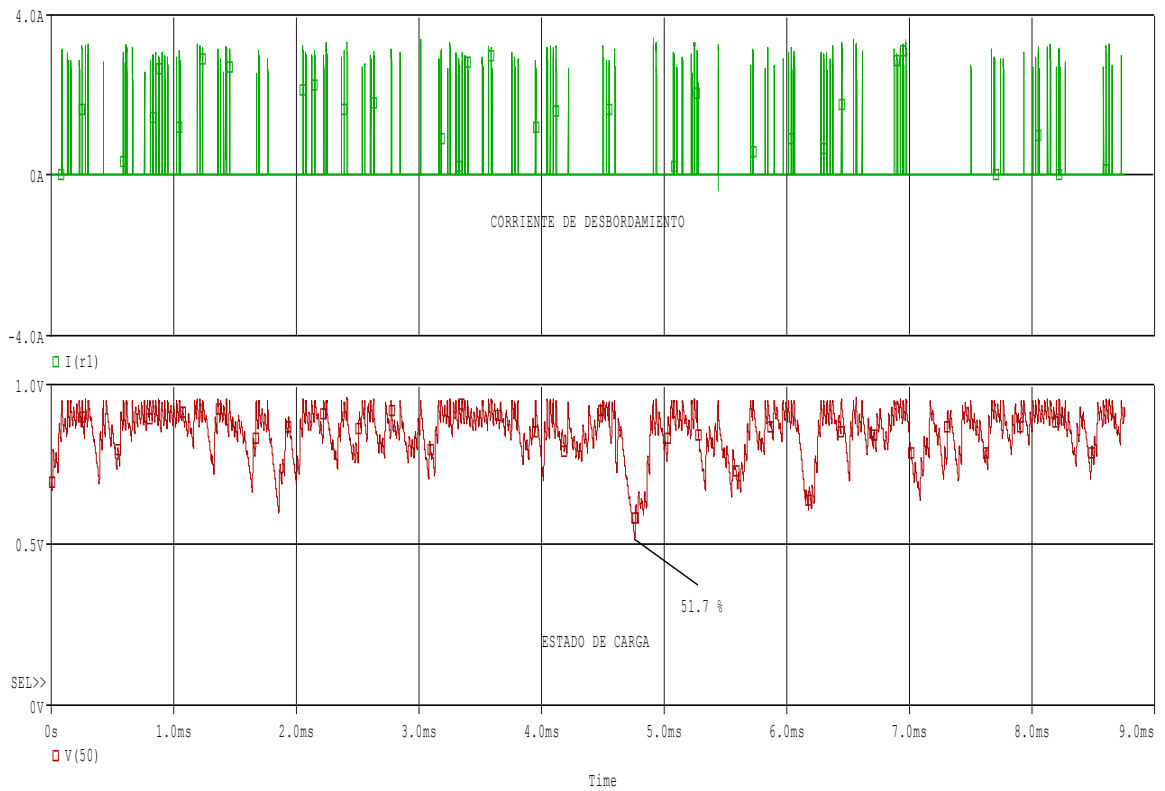
**Ciudad: Bogotá**

**Tabla G14. Dimensionado sistema fotovoltaico Bogotá nodo cliente.**

Nodo Cliente						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC mín	Autonomía Días
148.62 Wh	18 h transm., 6 h reposo	65 W	840 Wh	70% (k=0.6)	51.7%	4

**Fuente: Autor.**

**Figura G14. CD y SOC en Bogotá nodo cliente.**



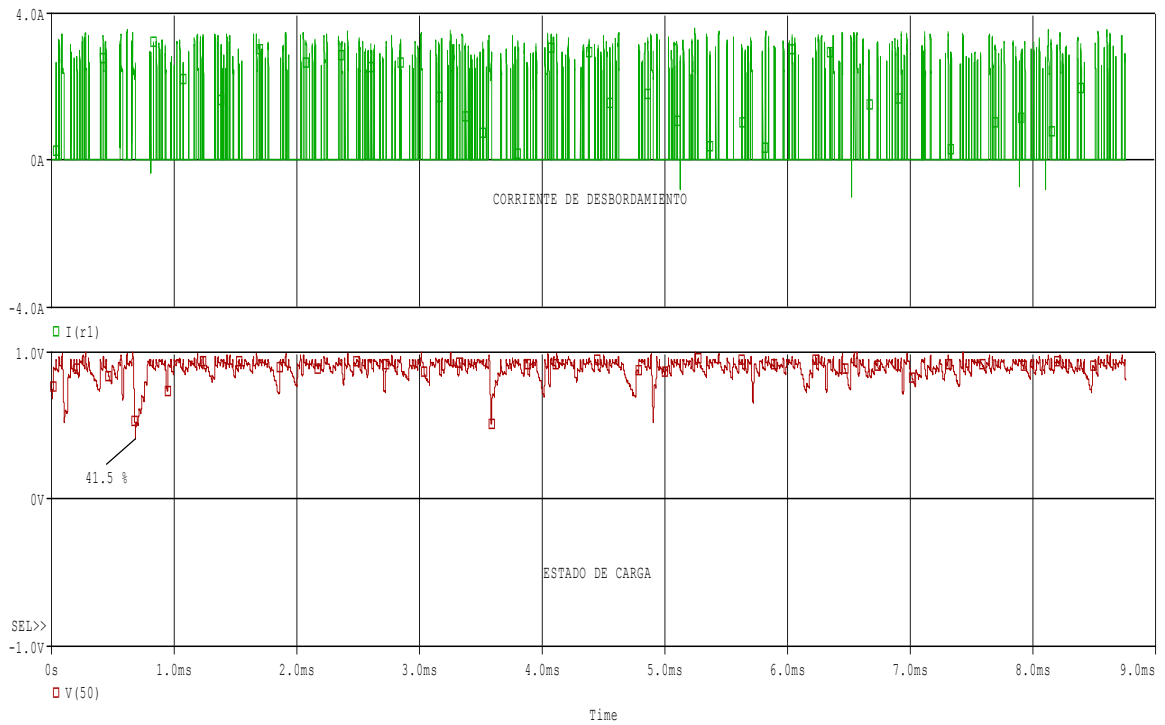
**Fuente: Autor.**

**Tabla G15. Dimensionado sistema fotovoltaico Bogotá nodo repetidor.**

Nodo Repetidor						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC mín	Autonomía Días
245.76	12 h centrales del día transm.	85 W	840 Wh	70% (k=0.8)	41.5%	2.4

**Fuente: Auto**

**Figura G14. CD y SOC en Bogotá nodo repetidor.**



**Fuente: Autor.**

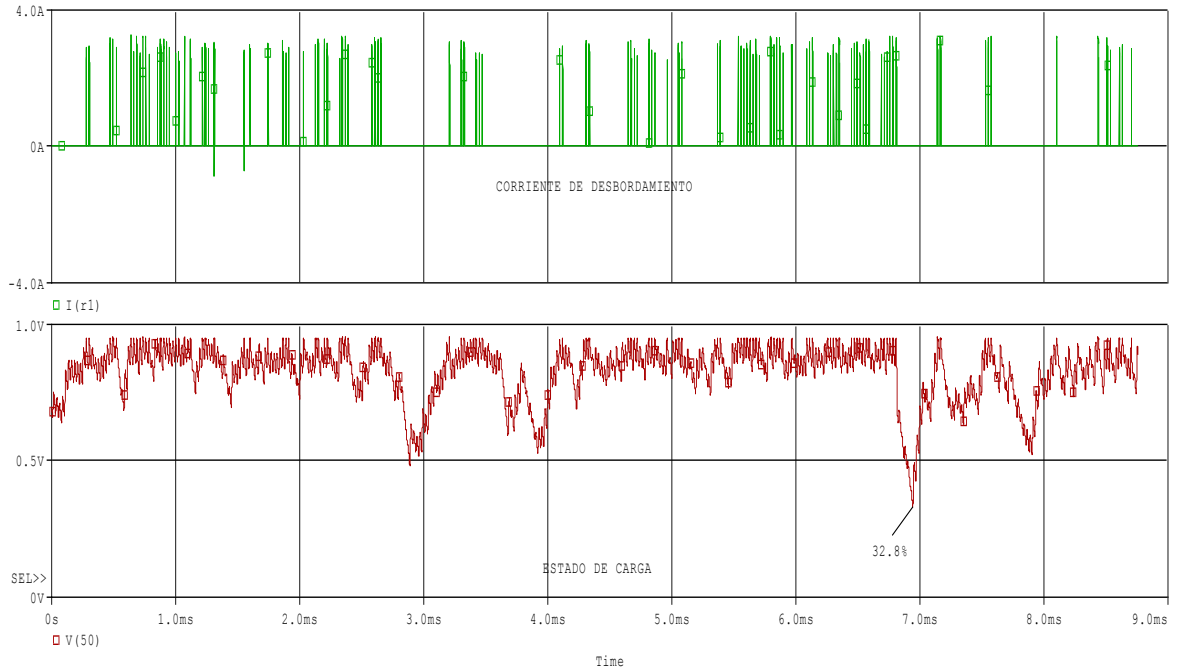
**Ciudad: Bucaramanga**

**Tabla G15. Dimensionado sistema fotovoltaico Bucaramanga nodo cliente.**

Nodo Cliente						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Días
166.80Wh	24 h transm.	65 W	840 Wh	70% (k=0.6)	32.8%	3.5

**Fuente: Autor**

**Figura G15. CD y SOC en Bucaramanga nodo cliente.**



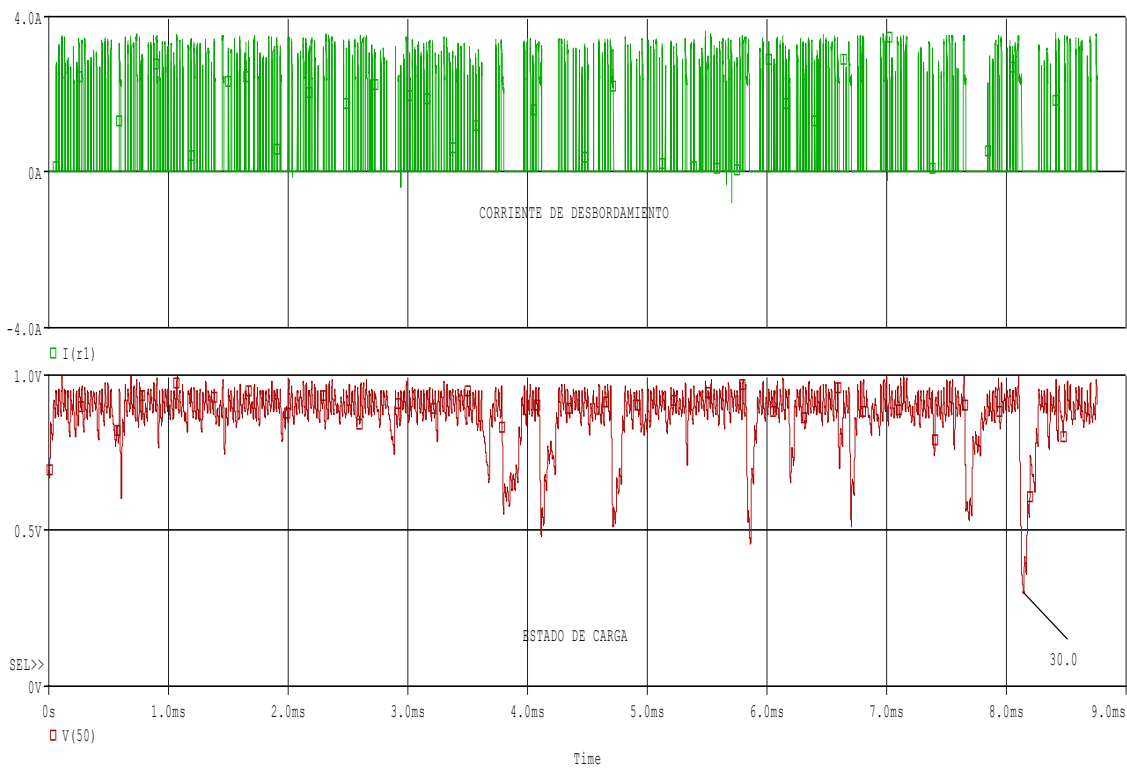
**Fuente: Autor.**

**Tabla G16. Dimensionado sistema fotovoltaico Bucaramanga nodo repetidor.**

Nodo Repetidor						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC final	Autonomía Días
245.76 Wh	12 h transm. 12 h rep.	85 W	840 Wh	70 % (k=0.7)	30.0%	2.4

**Fuente: Autor.**

**Figura G16. CD y SOC en Bucaramanga nodo repetidor.**



**Fuente: Autor**

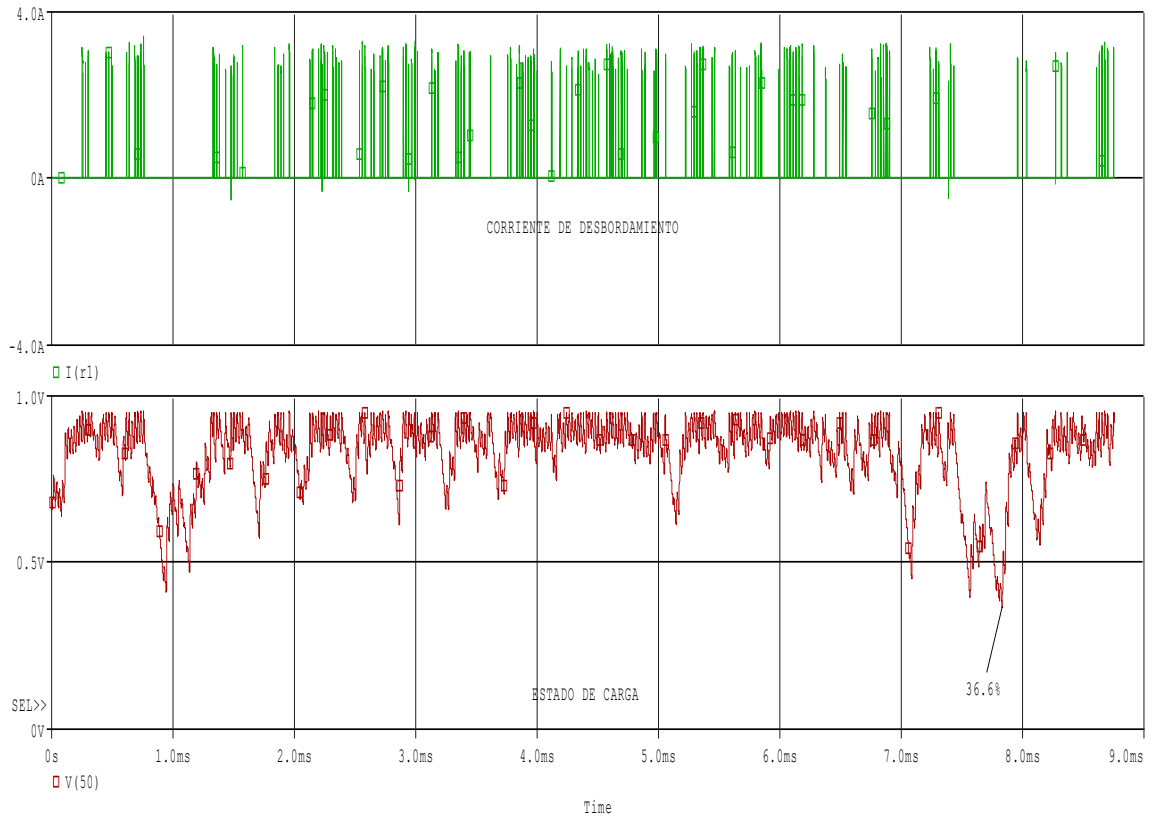
**Ciudad: Cali**

**Tabla G17. Dimensionado sistema fotovoltaico Cali nodo cliente.**

Nodo Cliente						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC mín	Autonomía Días
166.80Wh	12 h trans, 12 h rep.	65 W	840 Wh	70%	36.6%	3.5

**Fuente: Autor.**

**Figura G17. CD y SOC en Cali nodo cliente.**



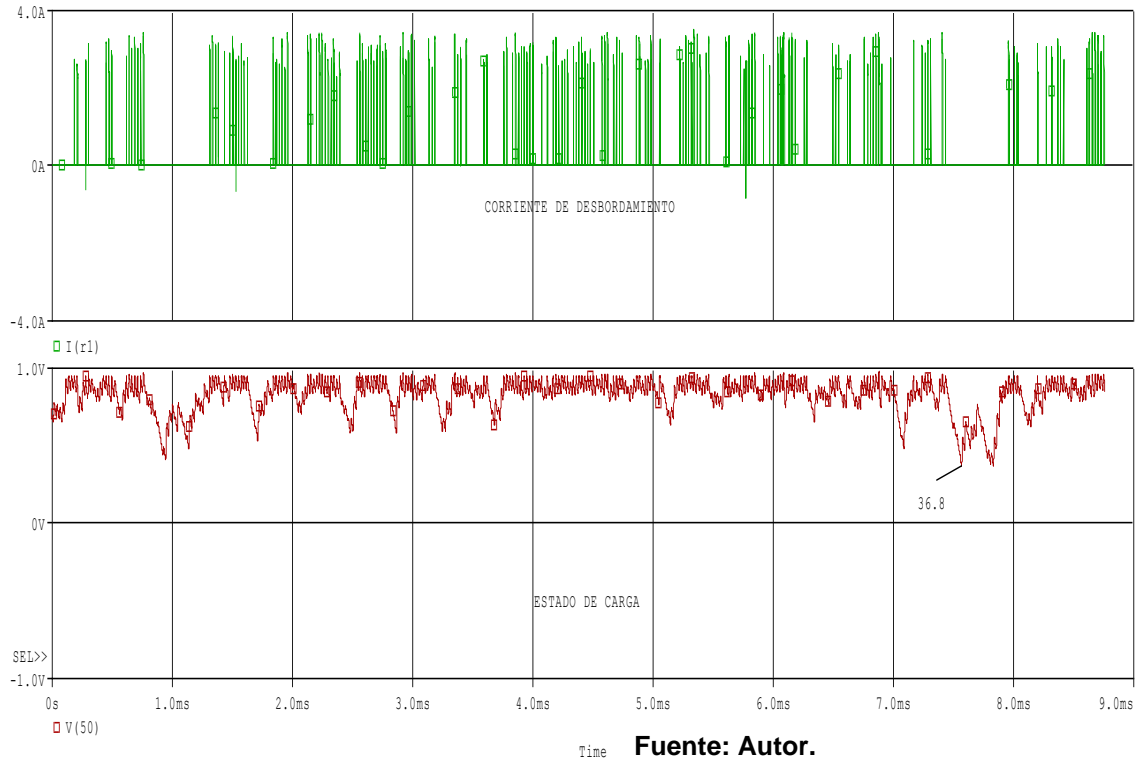
**Fuente: Autor.**

**Tabla G18. Dimensionado sistema fotovoltaico Cali nodo repetidor.**

Nodo Repetidor						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC mín	Autonomía Días
245.76W	12 h transm. 12 h rep	85 W	840 Wh	70% K(0.7)	36.8%	2.39

**Fuente: Autor**

**Figura G18. CD y SOC en Cali nodo repetidor.**



Fuente: Autor.

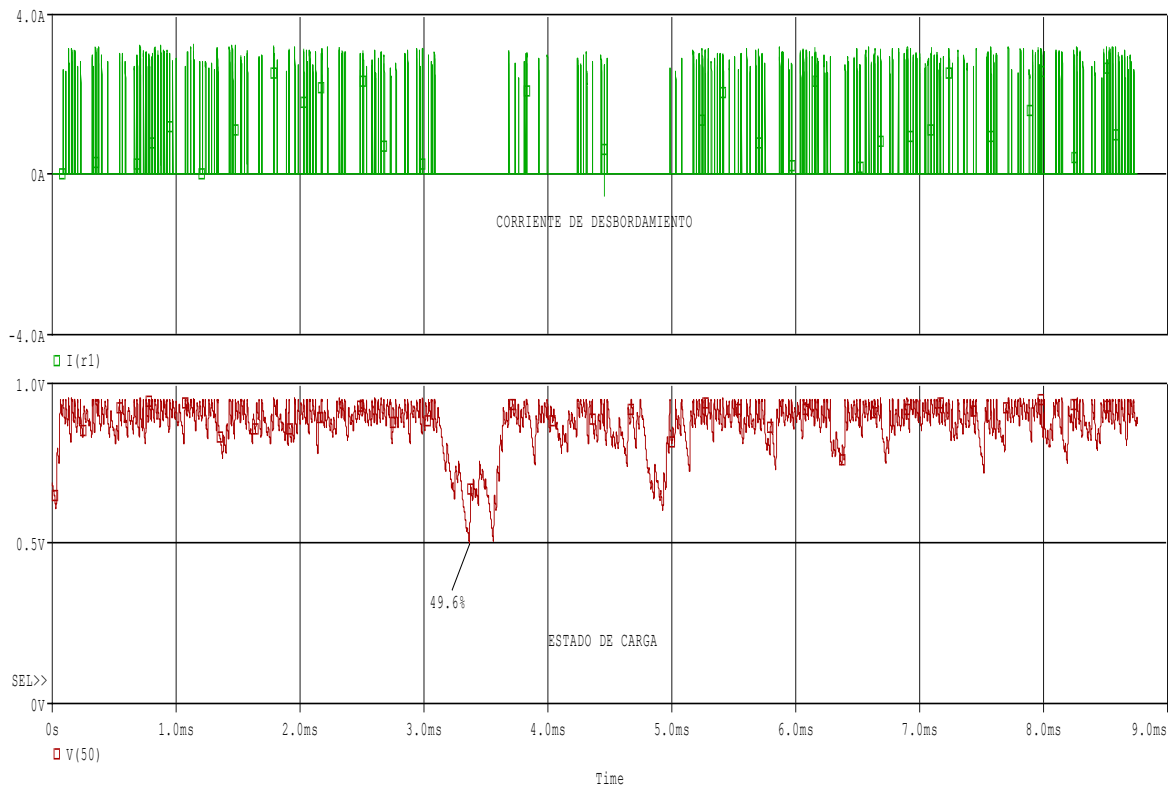
Ciudad: Leticia

**Tabla G19. Dimensionado sistema fotovoltaico Cali nodo repetidor.**

Nodo Cliente						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC mín	Autonomía Días
166.8 w	12h trans 12h rep	65W	840 Wh	70% (k=0.8)	49.6%	3.52

Fuente: Autor

**Figura G19. CD y SOC en Leticia nodo cliente.**



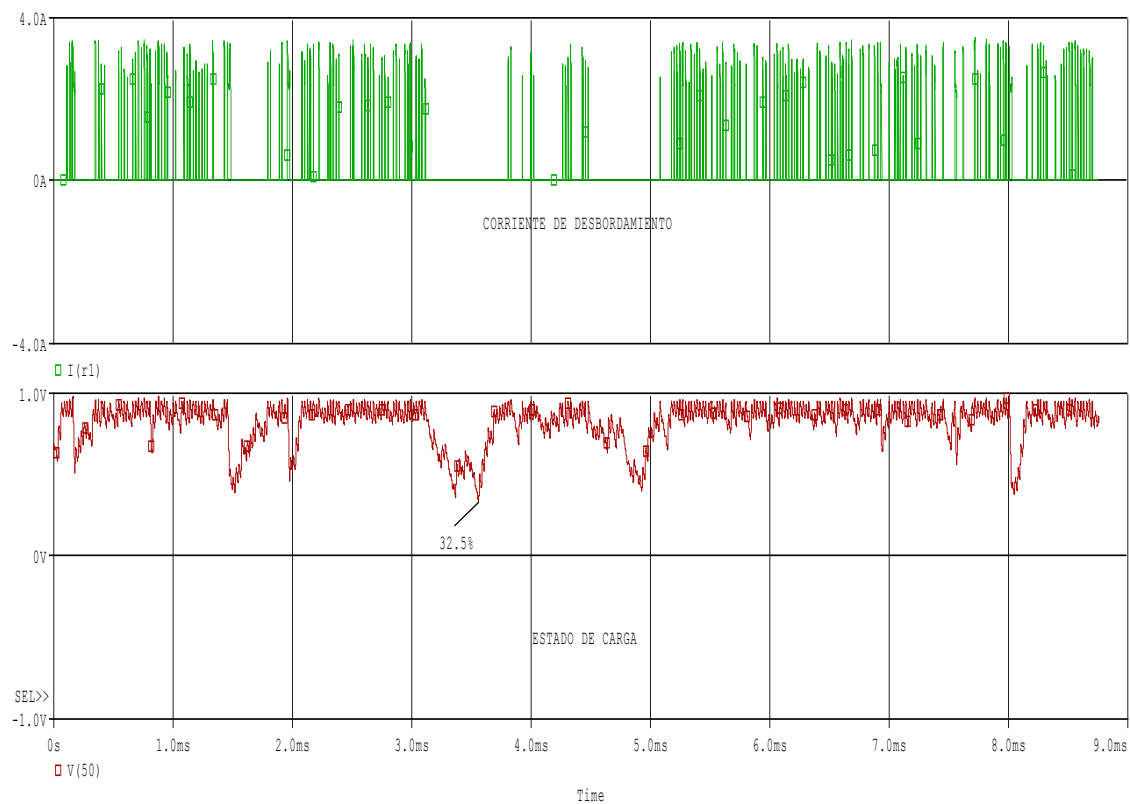
**Fuente: Autor.**

**Tabla G20. Dimensionado sistema fotovoltaico Cali nodo repetidor.**

Nodo Repetidor						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC mín	Autonomía
245.76 W	12h trans 12h rep	85 W	840 Wh	70% (k=0.7)	32.5%	3.4 días

**Fuente: Autor.**

**Figura G20. CD y SOC en Leticia nodo cliente**



**Fuente: Autor.**

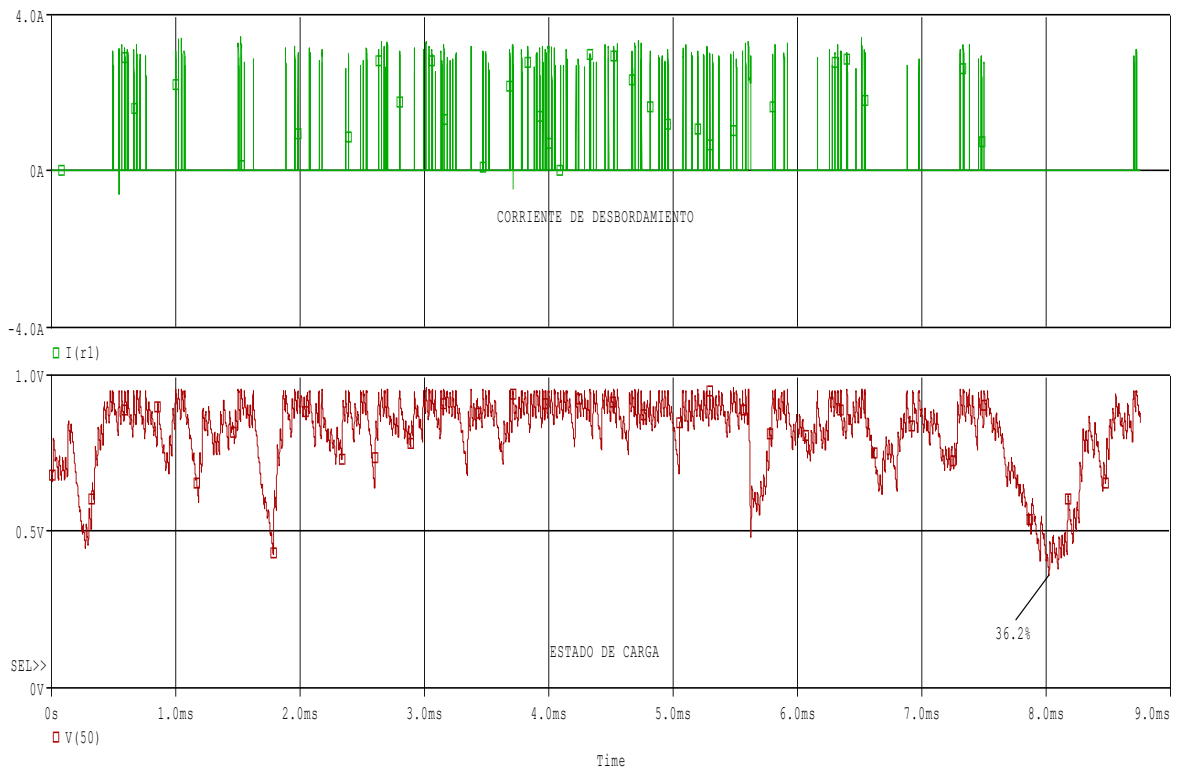
**Ciudad: Medellín**

**Tabla G21. Dimensionado sistema fotovoltaico Medellín nodo cliente.**

Nodo Cliente						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC mín	Autonomía Días
166.8 W	18 h transm., 6 h reposo	65 W	840 Wh	70% (k=0.7)	36.3%	3.52

**Fuente: Autor**

**Figura G21. CD y SOC en Medellín nodo cliente.**



**Fuente: Autor.**

**Tabla G22. Dimensionado sistema fotovoltaico Medellín nodo repetidor.**

Nodo Repetidor						
Potencia	Escenario de carga	Capacidad del panel	Capacidad de la batería	SOC inicial	SOC mín	Autonomía Días
245.76	12 h transm., 12 h reposo	85 W	840 Wh	70% ( $k=0.7$ )	32.3%	3.4

**Fuente: Autor.**

**Figura G22. CD y SOC en Medellín nodo repetidor.**

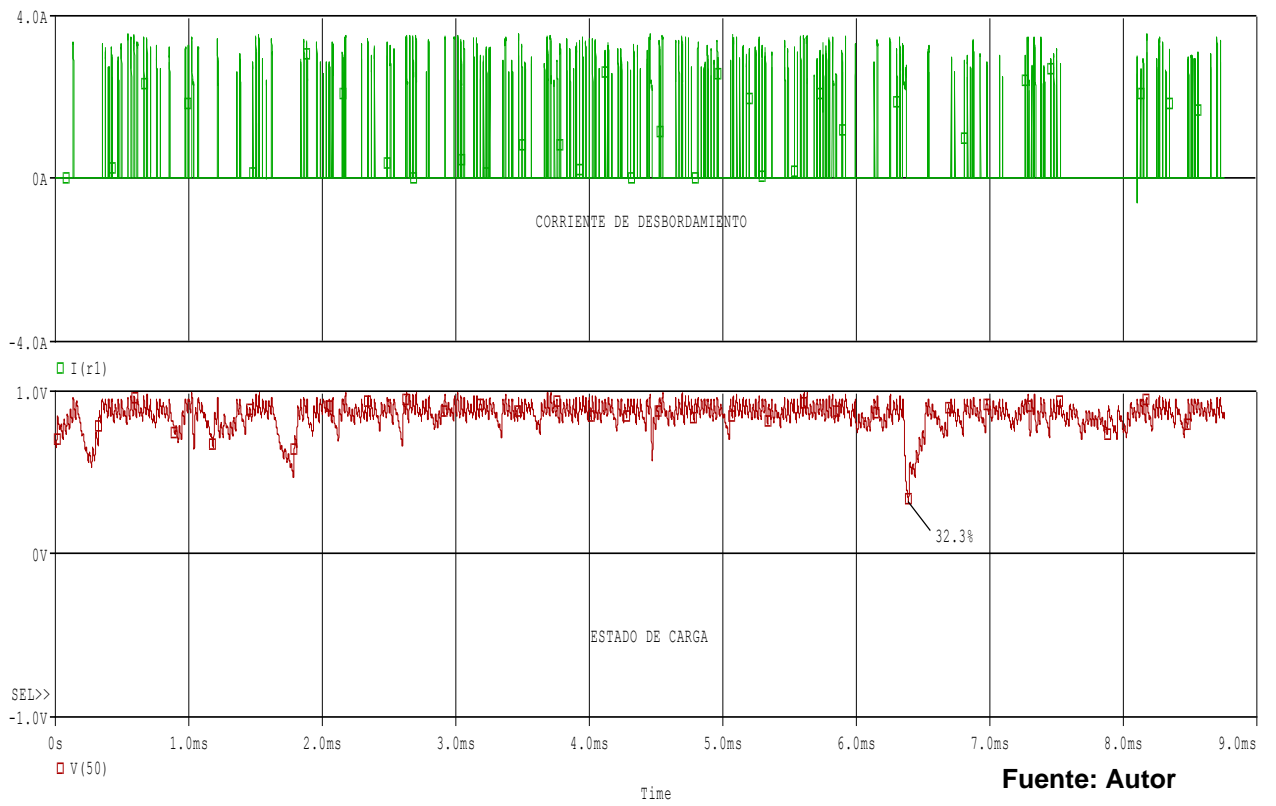
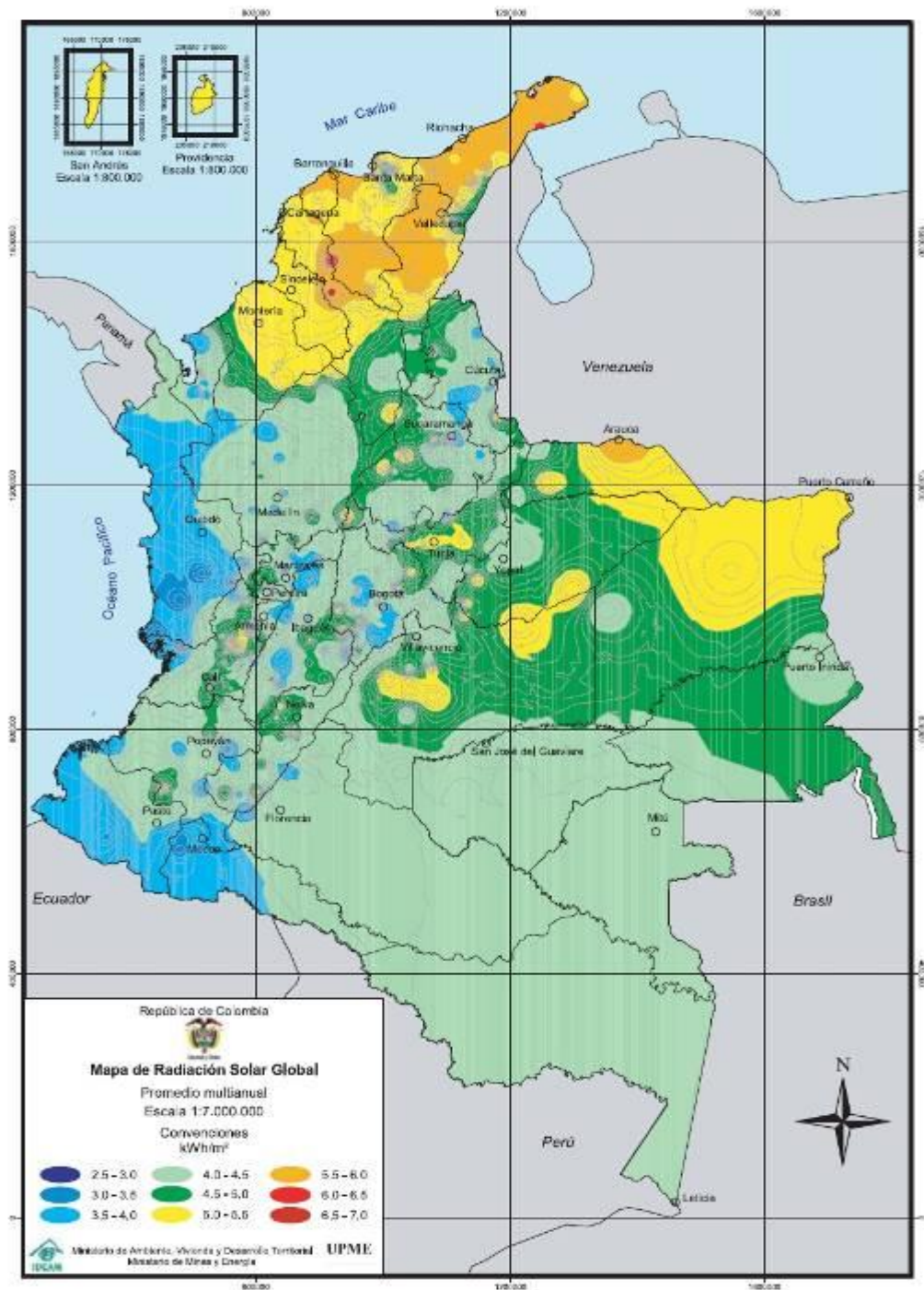


Figura G23. Mapa de radiación solar multianual para Colombia.



## **ANEXO H. Marco regulatorio Colombiano que define los indicadores de calidad para los servicios de telecomunicación.**

La propuesta metodológica debe permitir hacer injerencias sobre un marco regulatorio Colombiano en cuanto indicadores de calidad, la propuesta metodológica planteada debe permitir establecer la relación entre los indicadores de calidad para los proveedores de servicio de internet ISP (Velocidad efectiva mínima *upstream/downstream*) y el desempeño del estándar IEEE802.11b/g en redes rurales de áreas largo alcance.

Los indicadores que deben ser medidos por los ISP son:

- Tiempo promedio de establecimiento de la conexión (TPEC).
- Velocidad de transmisión de datos alcanzada (VTD).
- Proporción de transmisiones de datos fallidas (%TDF).
- Proporción de accesos exitosos (%AE).
- Retardo en un sentido (Ret).

En la propuesta metodológica se centrara principalmente en VTD y Ret, las TDF no se tendrá porque TPEC, AE están garantizados en una red troncal por el ISP (*Internet service provider*).

### **Velocidad de datos alcanzada (VTD):**

Corresponde a la velocidad máxima, media y mínima, medida en kbps con que los datos son transmitidos desde la red ISP hacia el usuario durante periodos de tiempo determinados. esta velocidad de transmisión se calcula dividiendo el

tamaño del archivo de prueba entre el tiempo de transmisión requerido para una transmisión completa y libre de errores.

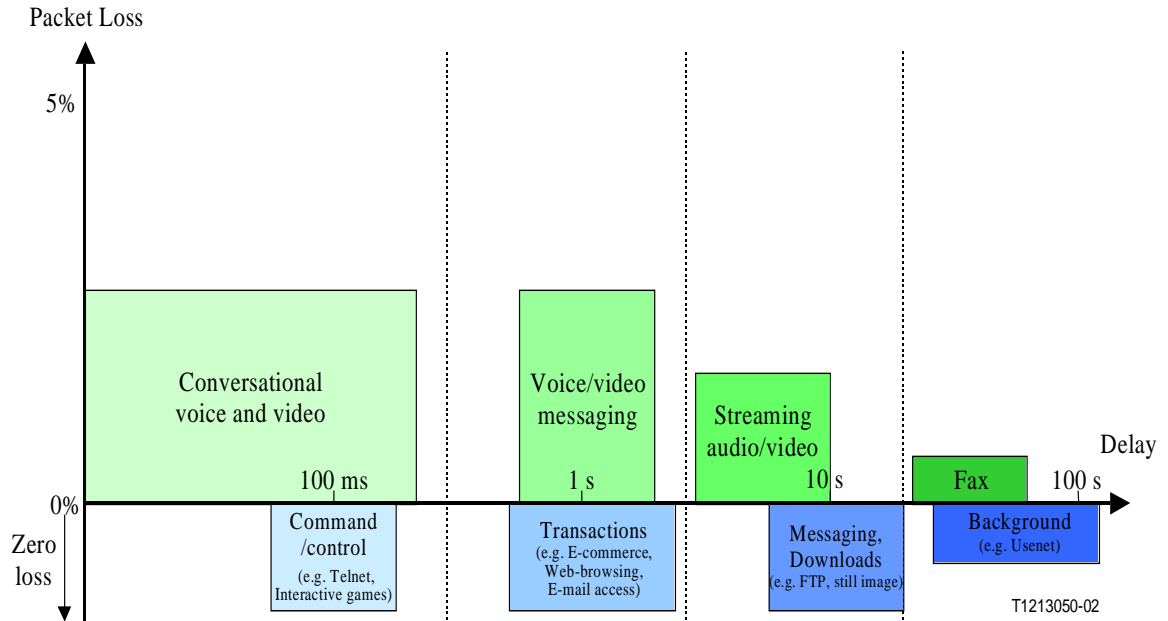
### **Retardo en un sentido (Ret):**

El retardo en un sentido está definida como la mitad de tiempo medido en milisegundos que se requiere para realizar un ping (ICMP *echo request/reply*) hacia una dirección IP válida. Esta característica se debe calcular a partir de la media en milisegundos y la desviación estándar del mismo.

### **Proporción de transmisiones de datos fallidas (%TDF):**

Los intentos de transmisión de datos fallidos corresponden a aquellos en los que un archivo de pruebas no se recibe completo y libre de errores antes del vencimiento del temporizador, esta medición se considera exitosa cuando la transmisión de un archivo de pruebas cuyo tamaño debe ser igual a 8 veces de la máxima velocidad nominal. Dentro del marco regulatorio basado en la ETSI donde enmarca a la ITU G1010 se realiza una clasificación de las aplicaciones multiservicio a partir de los requerimientos de *throughput*, *one way delay*, *jitter*, pérdida de paquetes. En la siguiente figura se puede apreciar la sensibilidad de las aplicaciones a los paquetes perdidos y a los retardos.

**Figura H.1. Clasificación de las aplicaciones en función de los retardos y los paquetes perdidos.**



**Fuente: Referencia [ETSI].**

A continuación se presentan los requerimientos de las aplicaciones para audio y video.

**Tabla H.1 Requerimientos para las aplicaciones de Audio y Video.**

Aplicación	Data rates típico	One way delay	jitter	Perdida de Paquetes
Conversación Voz	4 a 64 kbits	<150ms Limite 400ms	<1ms	<3%
Mensajes de voz	4 a 32 kbits	<1 s para reproducción Automática y 2 s		<3%

		almacenar		
Audio de alta calidad Streaming	16kbits a 128kbits	<10 s	<< 1 ms	< 1%
Video pone	16kbit/s a 384kbits	<150ms hasta 400ms		<1%
Video	16kbit/s a 384kbits	<10 s		< 1%

Fuente: Autor.

A continuación se presenta una tabla con los requerimientos de las aplicaciones para datos.

**Tabla H.2 Requerimientos para aplicaciones de datos.**

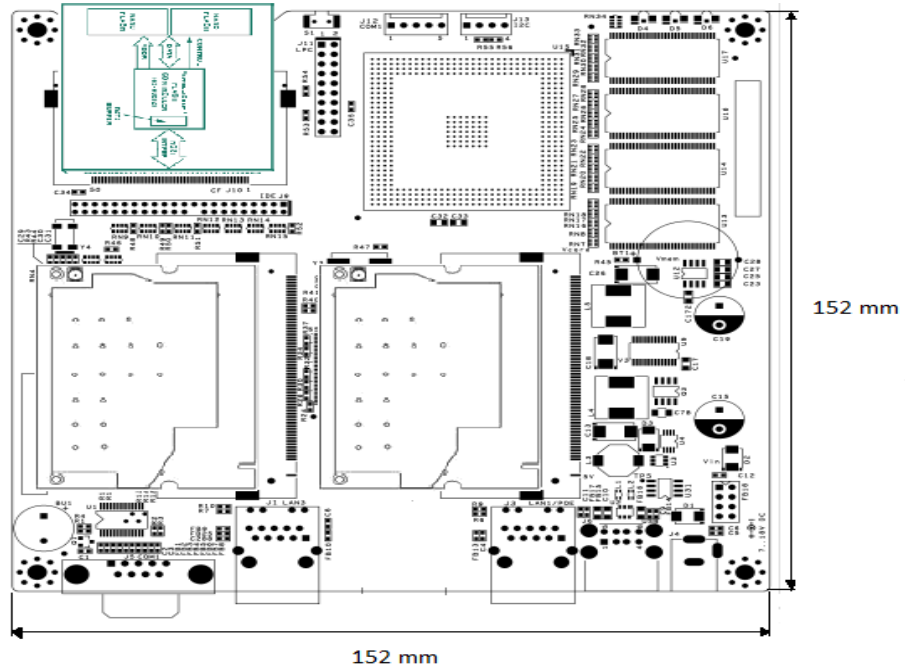
Aplicación	Cantidad De datos	One way delay	jitter	Perdida de Paquetes
Web browsing HTML	10KB	<2s /página Aceptable <4s /página	NA	0
Bulk data Transfer /retrieval	10KB a 10 MB	<15 s Aceptable < 60 s	NA	0
Servicios de Transacción con alta prioridad comercio electrónico ATM	<10KB	<2 s Aceptable <4s	NA	0
Comando/control	1KB	<250ms	NA	0
Imágenes fijas	<100KB	<15 s Aceptable <60s	NA	0
Juegos interactivos	<1KB	<200ms	NA	0

Telnet	<1KB	<200ms	NA	0
E-mail (Server Access)	<10KB	Puede durar varios minutos.	NA	0
Fax (tiempo real)	10KB	< 30s / pagina	NA	<10e-6 VER
Fax (Store & Forward )	10KB	Puede durar varios minutos.	NA	<10e-6 BER
Transacciones con baja prioridad	<10KB	<30 s	NA	0
Usenet	Puede ser 1MB o mas.	Puede durar varios Minutes.	NA	0

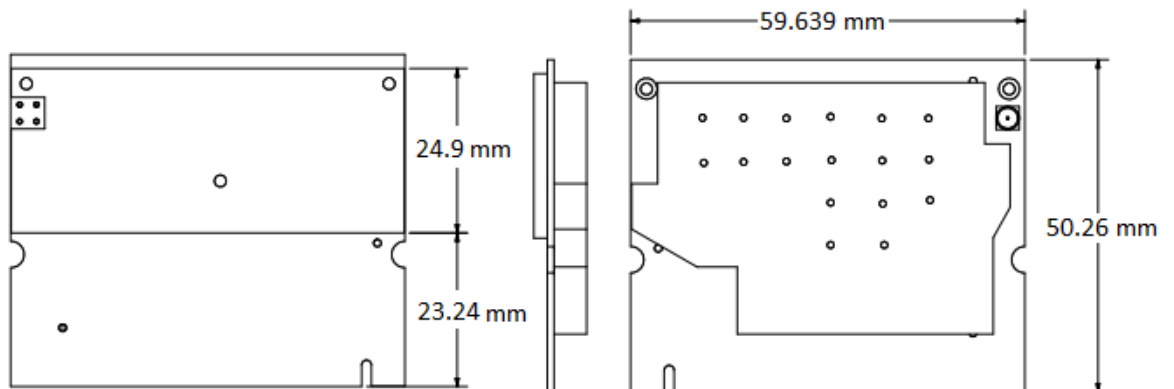
**Fuente: Referencia [ETSI]**

## ANEXO I. Plano nodos Wi-Fi.

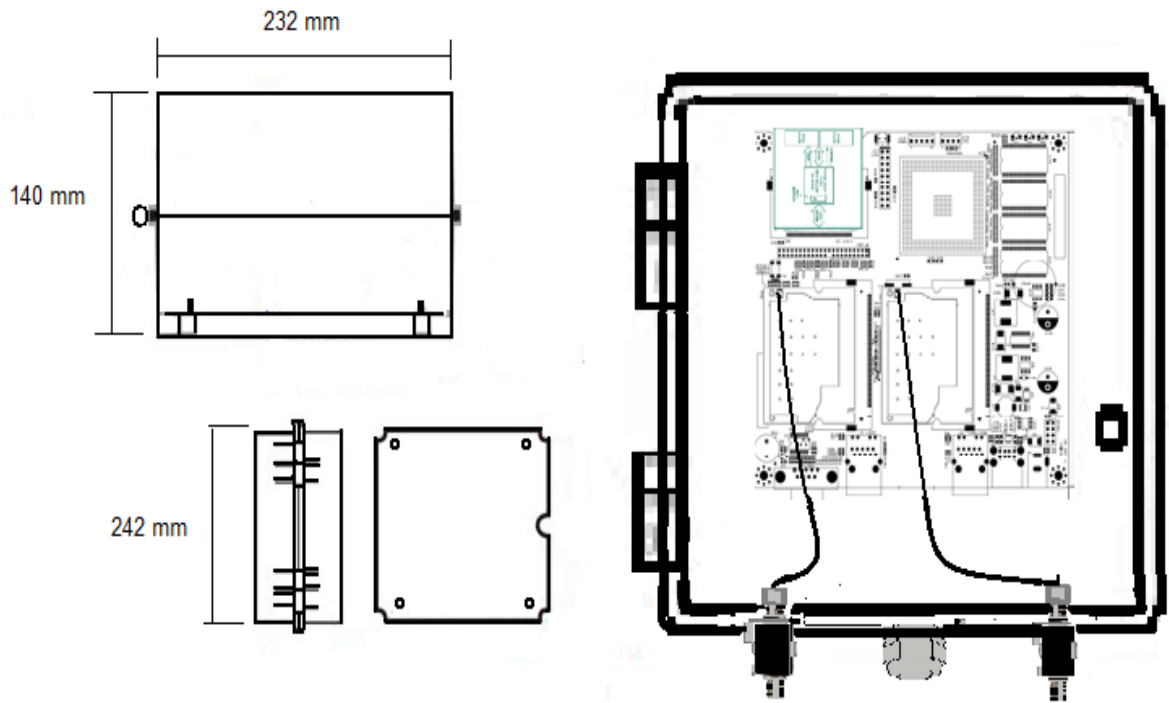
Figura I.1 Diagrama tarjeta principal seleccionada ALIX2D2.



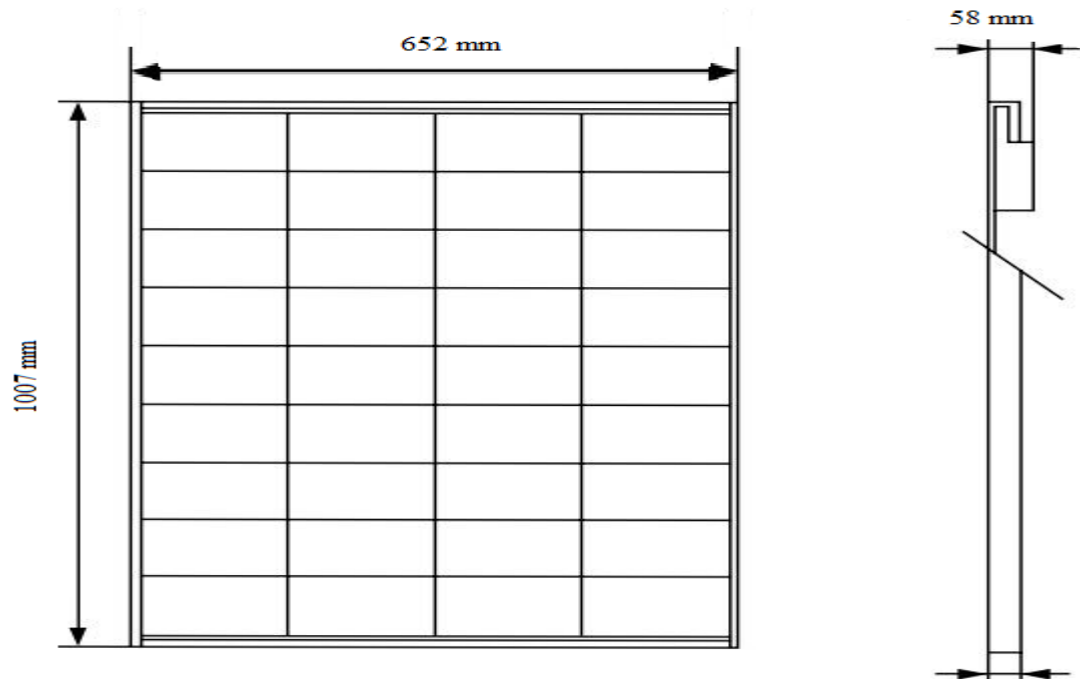
I.2 Diagrama radio Wi-Fi XR2.



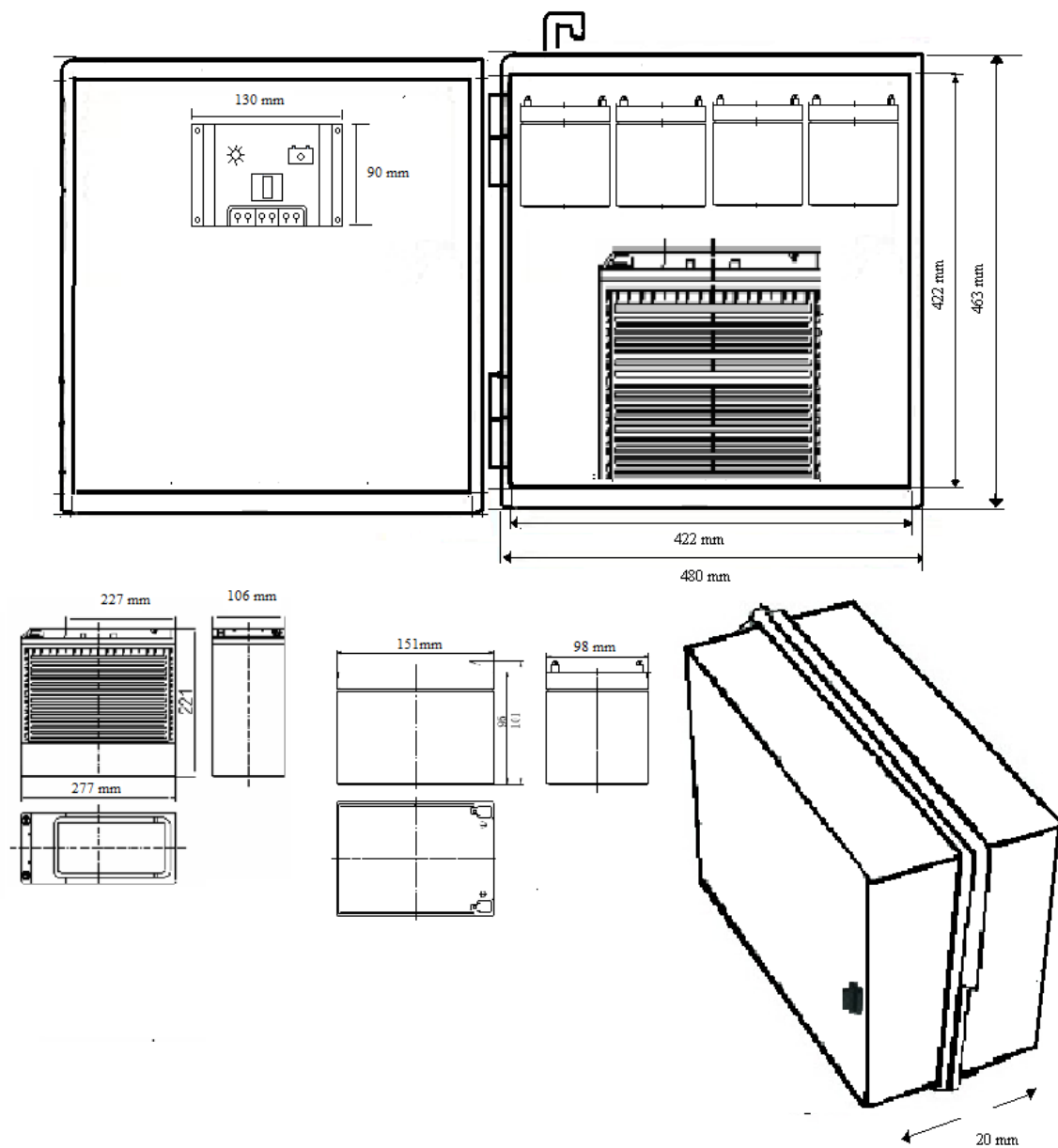
### I.3 Sistema de comunicación Wi-Fi nodo repetidor.



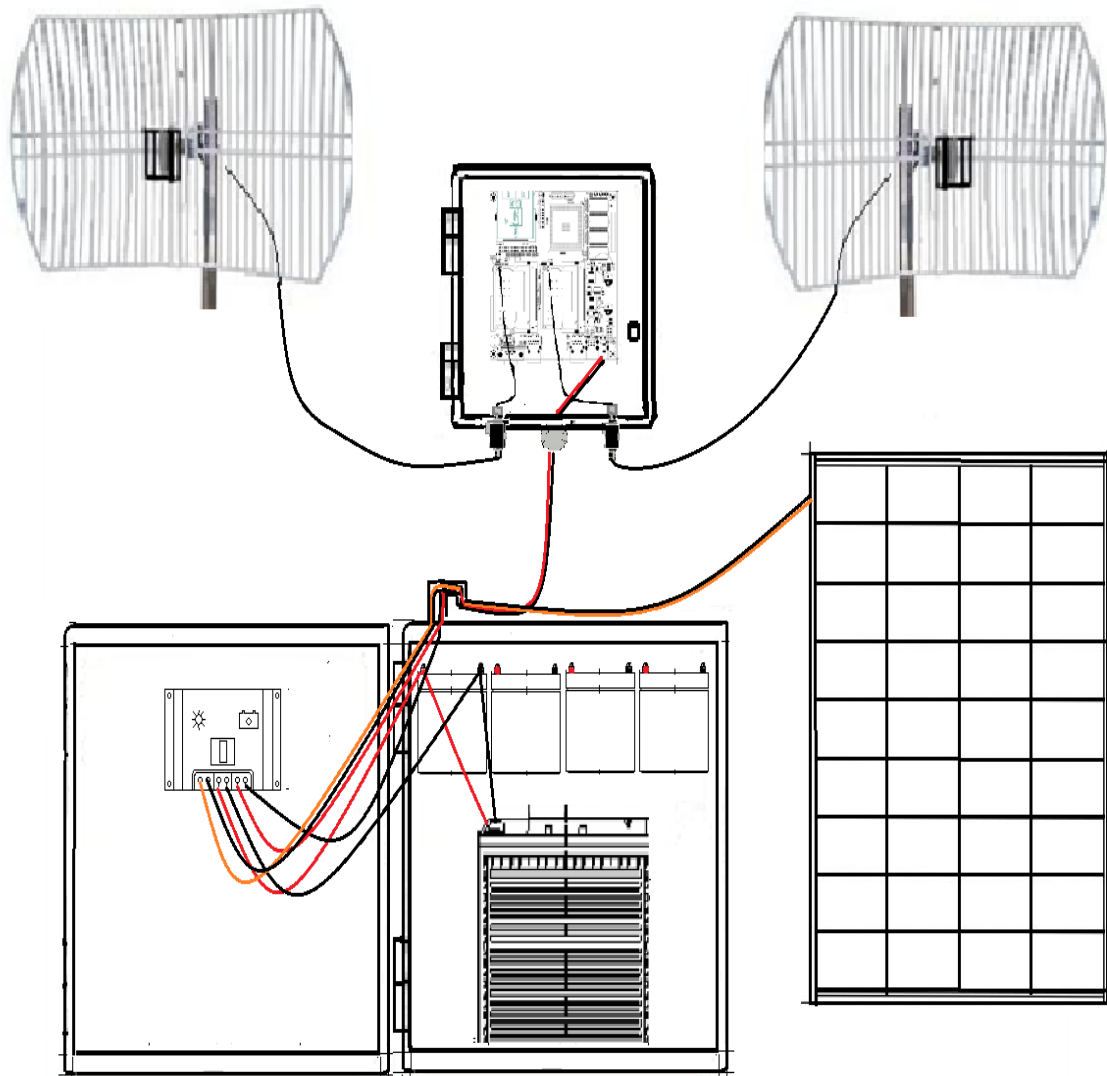
### I.4 Dimensiones del panel Solar.



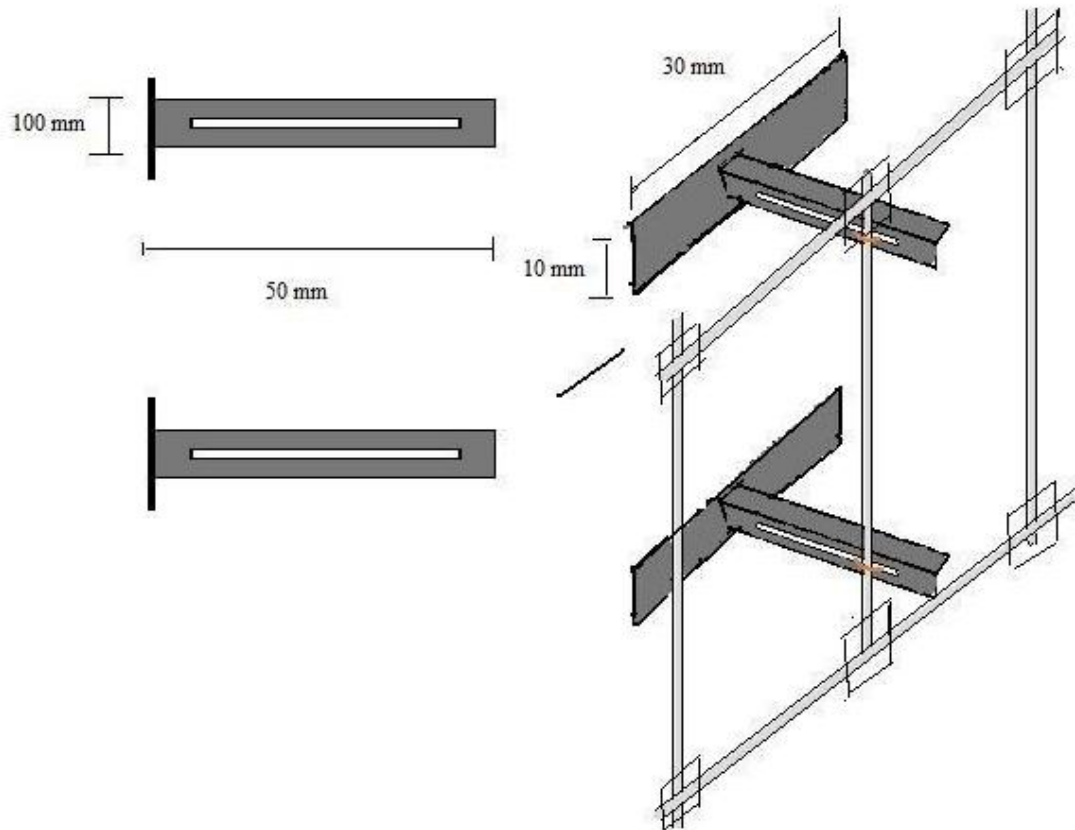
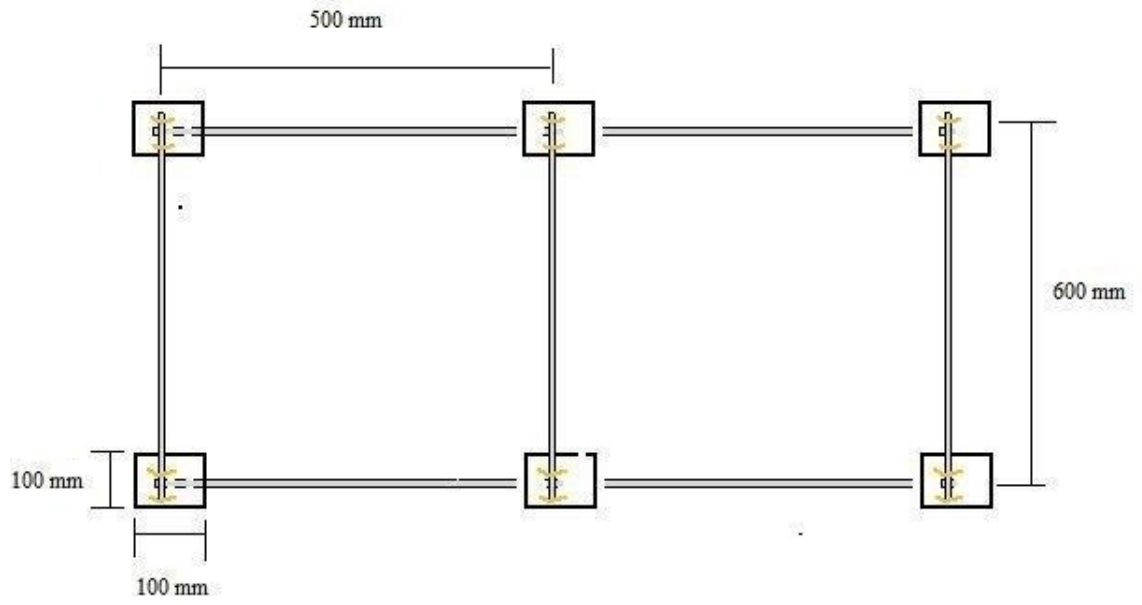
### I.5 Sistema de alimentación nodo repetidor.



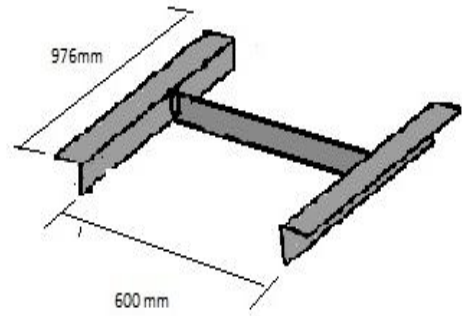
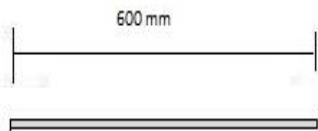
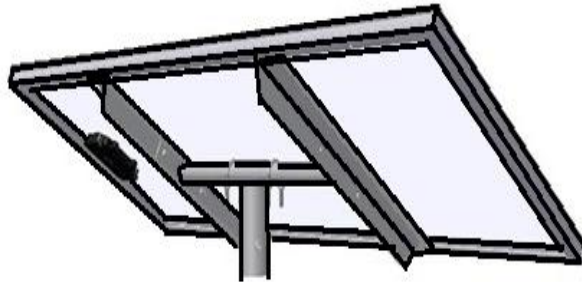
### I.6 Diagrama de conexiones nodo Wi-Fi.



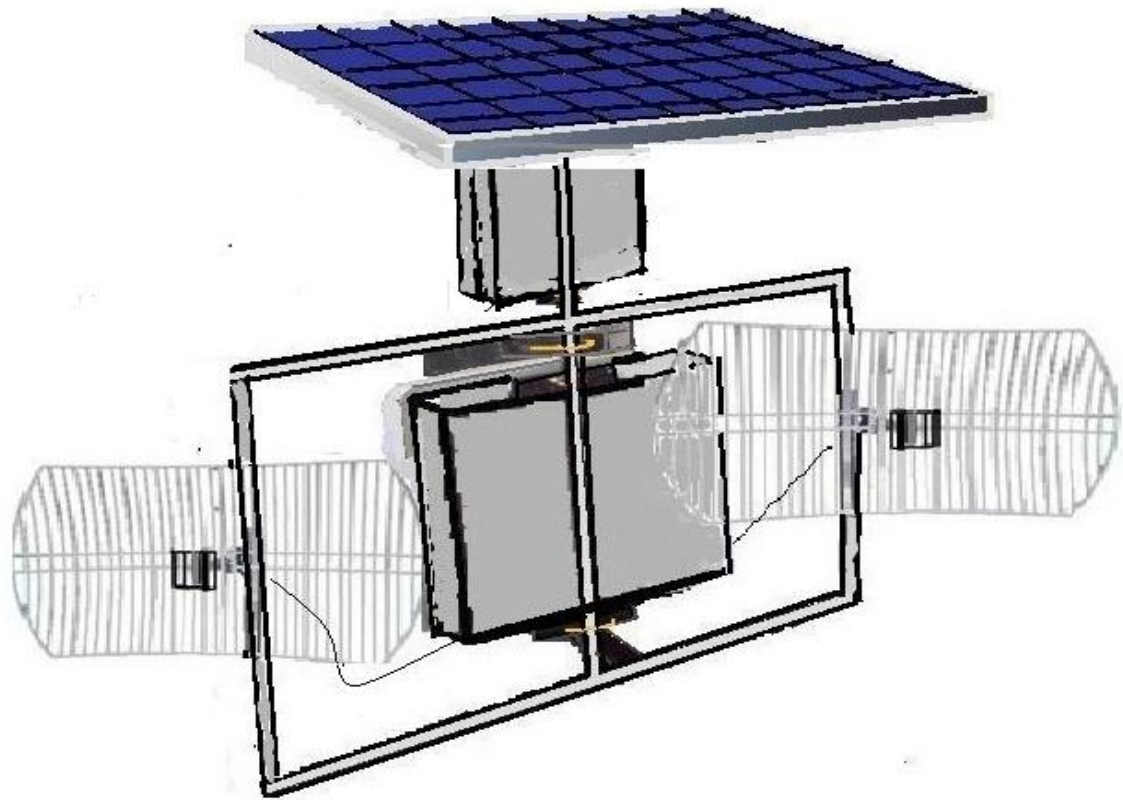
### I.7 Soporte del prototipo repetidor.



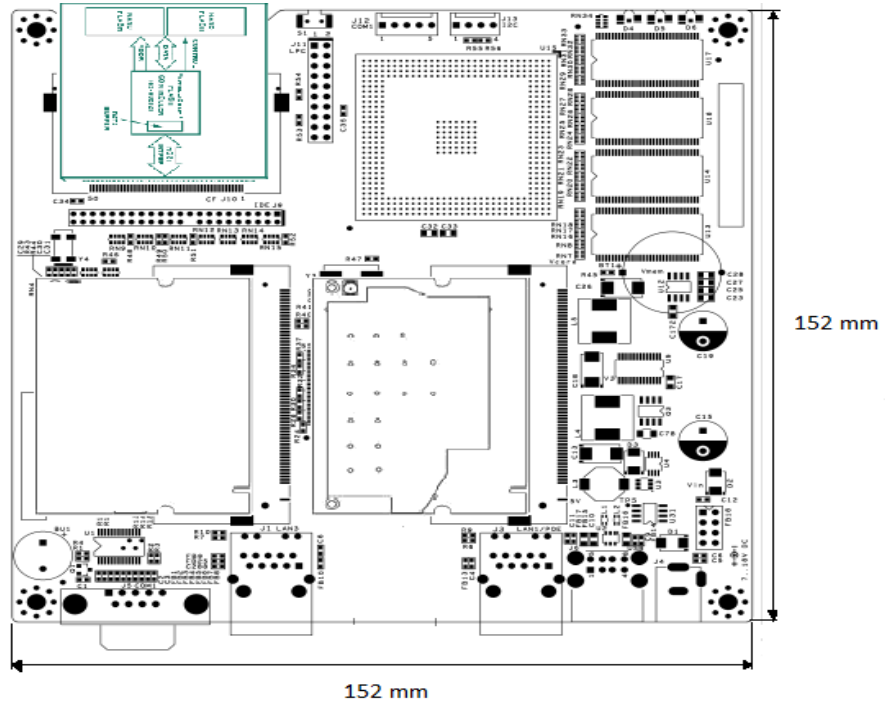
### I.8 Soporte para el sistema fotovoltaico.



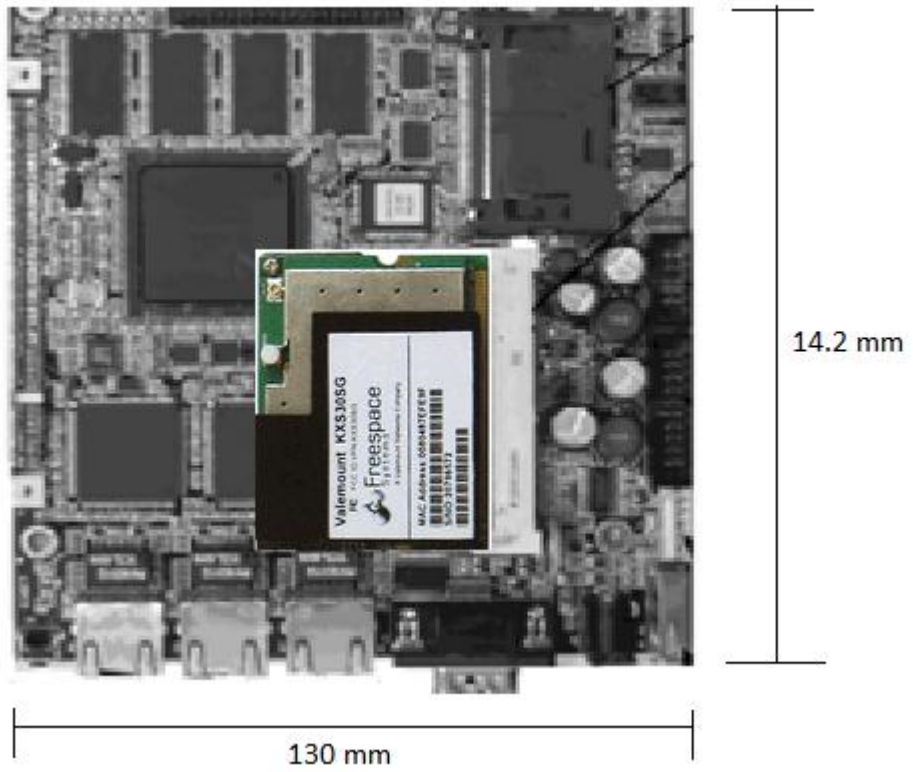
**I.9 Sistema de comunicación nodo Wi-Fi repetidor autónomo sistema fotovoltaico.**



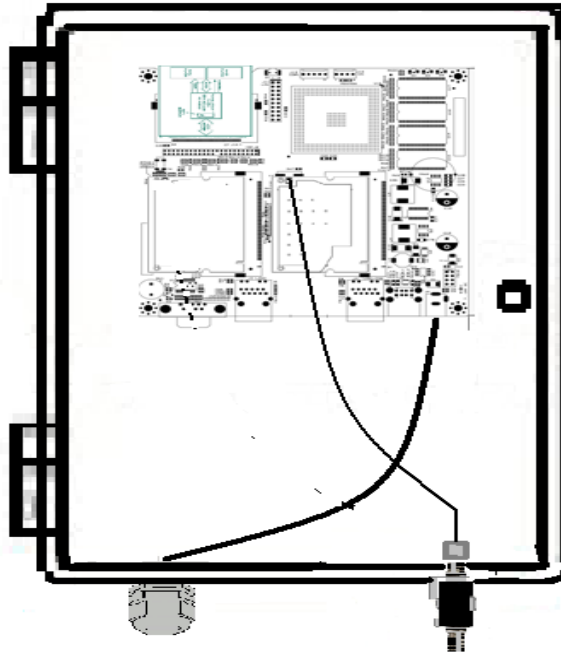
I.10 Motherboard nodo cliente 1.



I.11 Motherboard nodo cliente 2.

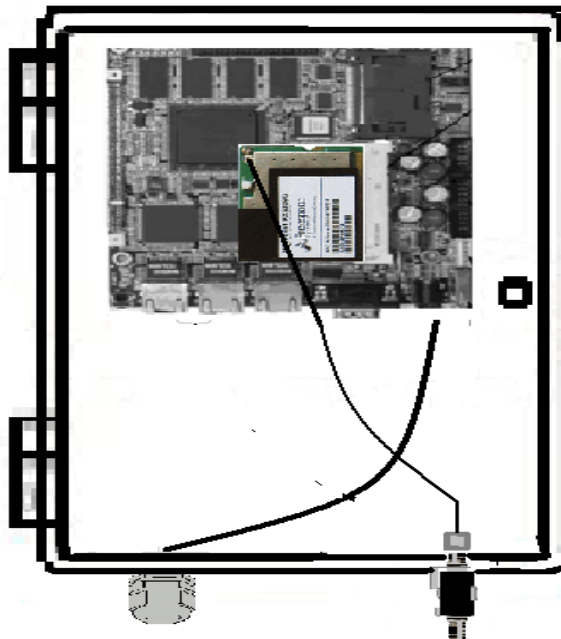


.12 Nodo de comunicación prototipo Cliente 1 pasarela.



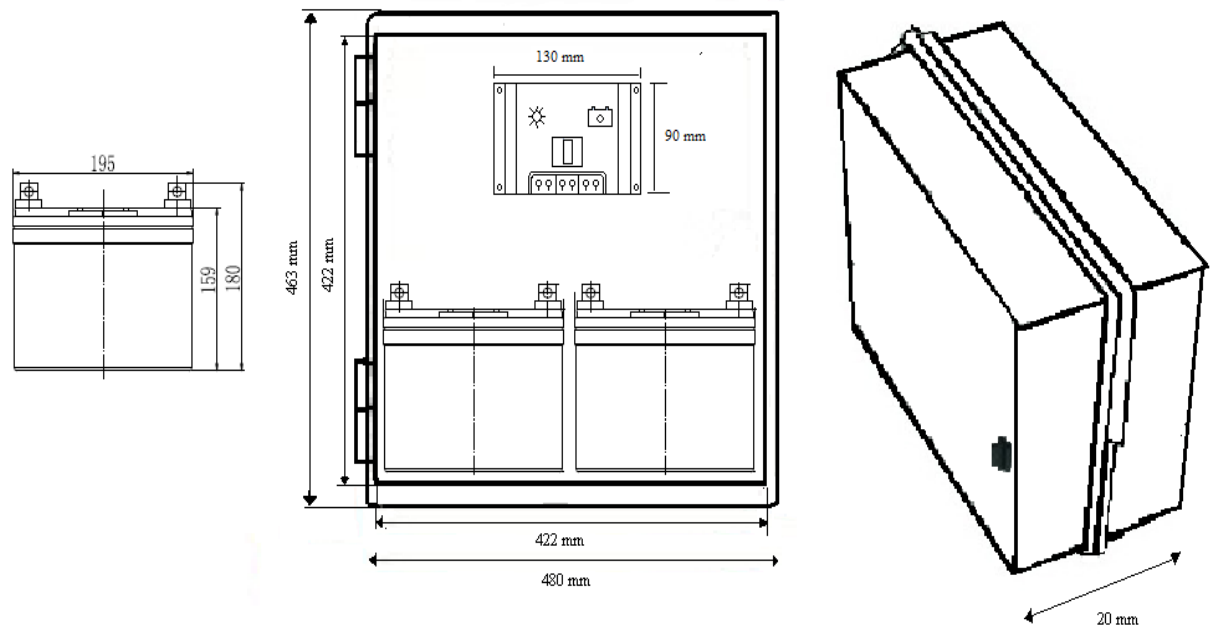
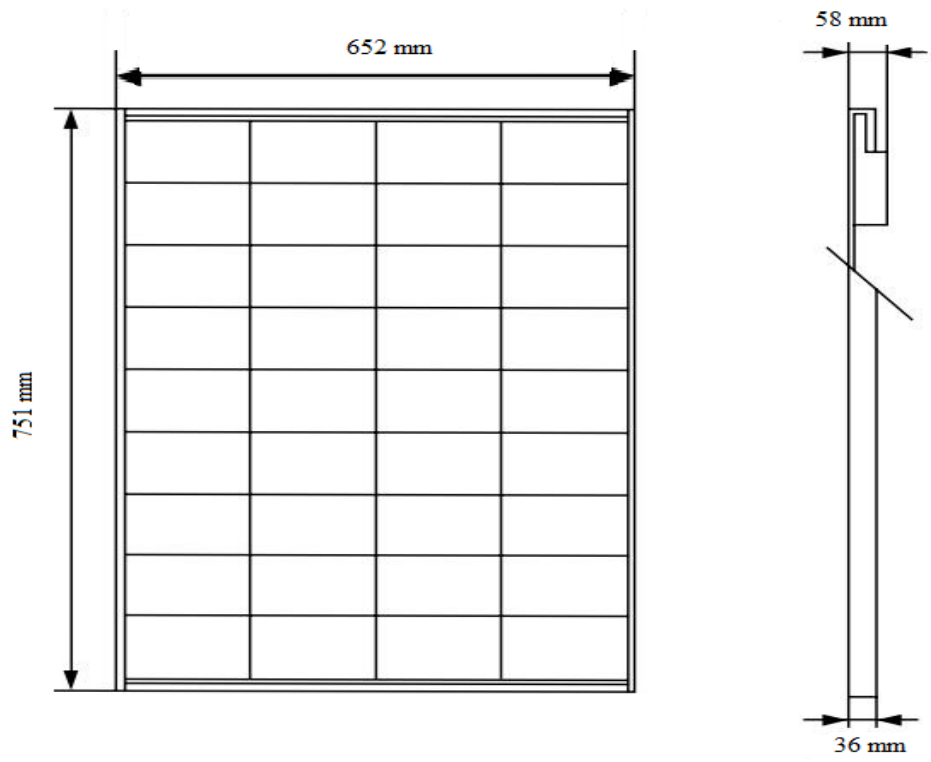
Fuente: Autor.

I.13 Nodo de comunicación prototipo Cliente 2.

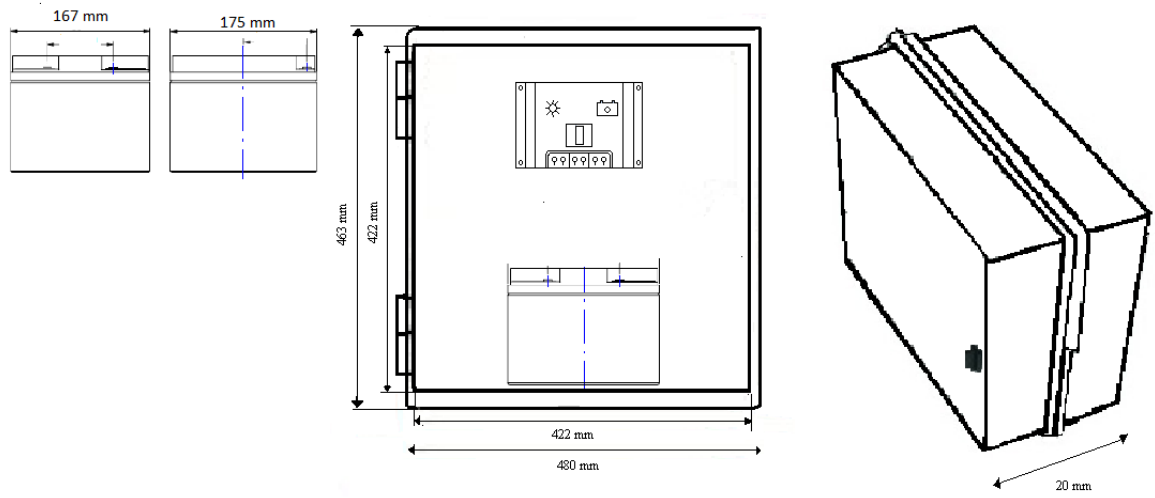


Fuente: Autor.

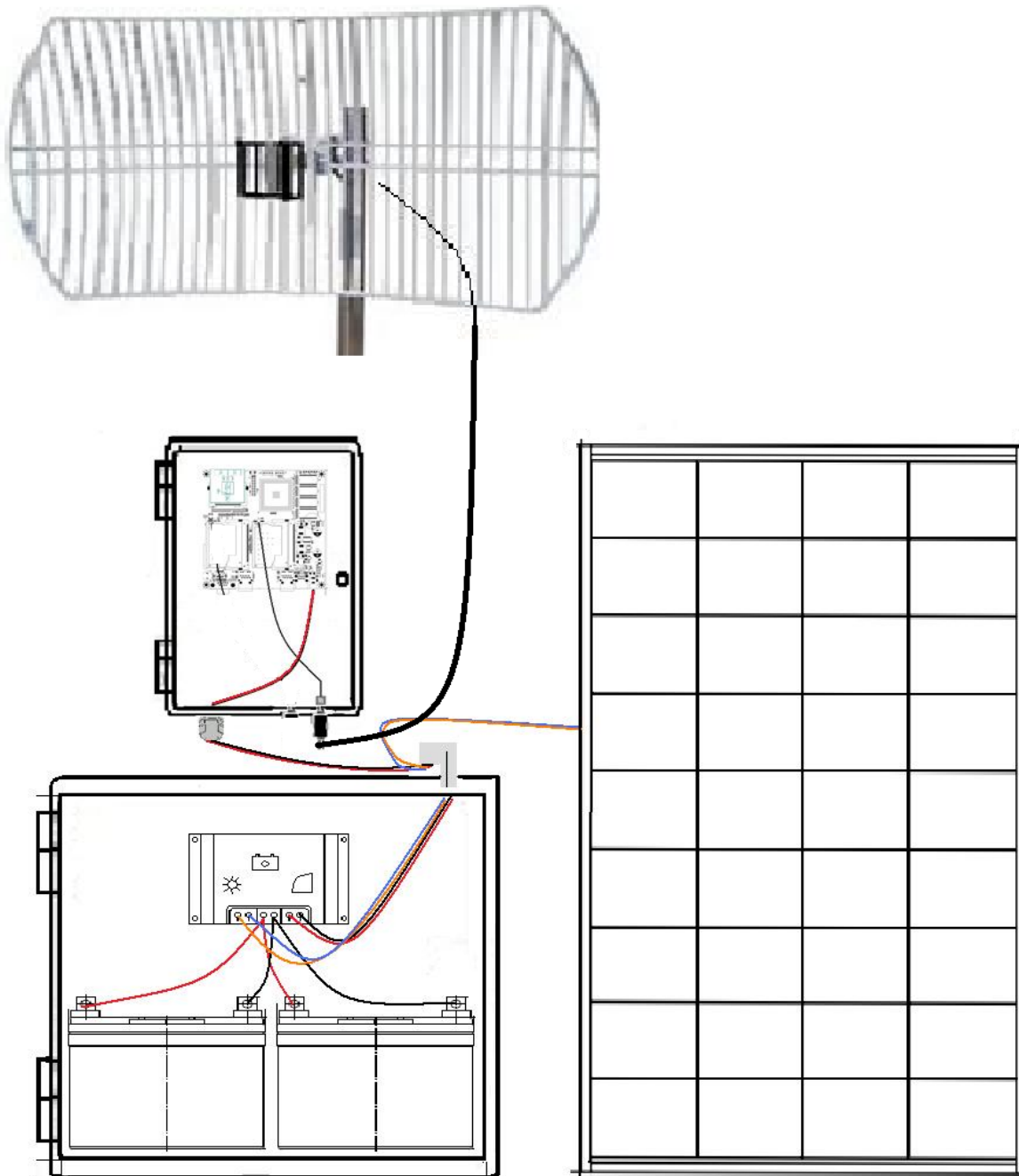
I.14 Sistema de alimentación nodo cliente.



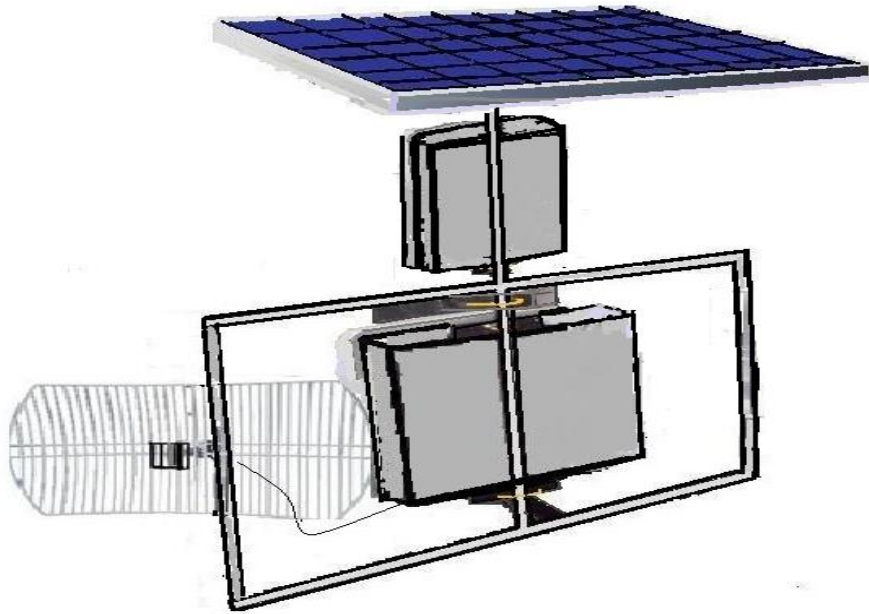
### I.15 Sistema de alimentación nodo cliente



I.16 Diagrama de conexiones nodo cliente.



I.17 Sistema de comunicación nodo Wi-Fi cliente autónomo.



## ANEXO J. PRUEBAS REALIZADAS

**Tabla J.1 Configuración de los radios modo IEEE802.11b.**

Comando	Descripción
iwpriv ath0 mode 11b	Radio configurado 802.11b
iwpriv ath0 abolt 0	Deshabilita los protocolos fastframe y bursting.
Sysctl -w dev.wifi0.slottime	Ajusta el slottime del radio de acuerdo a la distancia.
Sysctl -w dev.wifi0.acktimeout	Ajusta el acktimeout del radio de acuerdo a la distancia.
Sysctl -w dev.wifi0.ackrate=0	Ajusta los ACK a 2Mbps

Fuente: Autor.

**Tabla J.2 Configuración del nodo punto AP IEEE802.11b.**

Parámetro	802.11b
Slottime	$20 + \frac{D(km)}{300e8}$
SIFS	10 $\mu$ s
PIFS	Slottime+ SIFS
DIFS	2* Slottime+ SIFS
Tamaño ventana de contienda.	15-1031 slots
Duración del preambulo corto-largo.	96 $\mu$ s
Duración del encabezado PLCP.	48 $\mu$ s
ACKTimeout	$48 + \frac{2 * D(km)}{300e8}$

Fuente: Autor.

Se selecciono la ventana de contienda en la capa MAC a la mitad definida en el estándar para que el nodo configurado como punto de acceso IEEE802.11b para priorizar el tráfico proveniente entre el punto de acceso y el nodo cliente.

**Tabla J.3 Configuración del nodo Cliente IEEE802.11b.**

Parámetro	802.11b
Slottime	$20 + \frac{D(km)}{300e8}$
SIFS	10 $\mu$ s
PIFS	Slottime+ SIFS
DIFS	2* Slottime+ SIFS
Tamaño ventana de contienda.	31-1031 slots
Duración del preambulo corto-largo.	96 $\mu$ s

Duración del encabezado PLCP.	48 $\mu$ s
ACKTimeout	$48 + \frac{2 * D (km)}{300e8}$

Fuente: Autor.

**Tabla J.4 Parámetros seleccionados para realizar las pruebas**

Distancia (Km)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Slottime ( $\mu$ s)	20	37	54	87	120	153	186	220	253	287	320	353
ACKTimeout ( $\mu$ s)	48	82	115	182	248	315	382	448	515	582	648	715

Fuente: Autor.

### Medidas con el estándar IEEE 802.11b.

**Tabla J.5 Throughput TCP Unidireccional (Mbps)**

D(KM)/ V(Mbps)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
11	6.07	5.39	4.85	4.06	3.5	3.06	2.68	2.77	2.21	2.02	1.87	1.73
5.5	3.65	3.33	3.17	2.8	2.52	2.3	2.09	1.93	1.79	1.67	1.54	1.46
2	1.51	1.46	1.44	1.33	1.28	1.21	1.15	1.1	1.07	1.02	0.97	0.95

Fuente: Autor.

**Tabla J.6 Throughput UDP IEEE802.11b Unidireccional (Mbps).**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
11	7.22	6.43	5.80	4.85	4.17	3.65	3.25	2.92	2.66	2.43	2.24	2.08
5.5	4.25	3.97	3.72	3.31	2.98	2.71	2.48	2.28	2.11	1.97	1.85	1.73
2	1.75	1.70	1.65	1.57	1.49	1.41	1.35	1.29	1.23	1.18	1.13	1.09

Fuente: Autor.

**Tabla J.7 Jitter tráfico UDP IEEE802.11b (ms)**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
11	1.01	5.12	5.19	7.28	7.28	9.20	9.62	11.2	11.8	13.2	14.2	14.8
5.5	4.14	2.90	8.93	3.1	2.93	11.7	10.5	14.9	14.9	13.7	16.3	16.8
2	10.7	8.30	9.36	7.54	8.18	11.7	22.7	4.10	23.9	10	28.5	29.1

Fuente: Autor.

**Tabla J.8. Porcentaje de paquetes perdidos IEEE 802.11b.**

D(KM)/ V(Mbps)	0	5	10	20	30	40
11	0.003%	0.002%	0.014%	0.0013%	0.0044%	0.013%
5.5	0.013%	0.0066%	0.0035%	0.0078%	0.011%	0.0023%
2	0.011%	0.058%	0.008%	0.021%	0.0084%	0.0091%
D(KM)/ V(Mbps)	50	60	70	80	90	100

11	0.0019%	0.008%	0.0022%	0.0049%	0.018%	0.02%
5.5	0.005%	0.0027%	0.0029%	0.012%	0.0033%	0%
2	0.019%	0.0049%	0.041%	0.021%	0.039%	0.011%

Fuente: Autor

**Tabla J.9 RTT min (ms)**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
11	0	0.03	0.06	0.13	1.2	1.27	1.33	1.4	1.46	1.53	1.6	1.66
5.5	1	1.03	1.06	1.13	1.2	1.27	1.33	1.4	1.46	1.53	1.6	1.66
2	1	1.03	1.06	1.13	1.2	1.27	1.33	2.4	2.46	2.53	2.6	2.66

Fuente: Autor

**Tabla J.10 RTT promedio (ms)**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
11	1.18	1.18	1.91	1.49	1.63	2.07	2	2.7	3.13	3.4	4.35	4.32
5.5	1.31	1.19	2.26	1.62	1.57	1.98	2.43	3.65	3.44	2.61	3.25	3.91
2	1.89	1.69	1.53	1.91	1.88	2.56	2.33	4.85	3.83	3.86	3.26	4.96

Fuente: Autor

**Tabla J.11 RTT máximo (ms)**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
11	6	7	100	8	22	52	17	23	42	38	31	57
5.5	21	4	91	15	7	9	15	84	77	17	75	30
2	80	50	19	56	11	77	10	83	43	23	17	38

Fuente: Autor.

### Medidas en Campo abierto estándar IEEE802.11b/g.

**Tabla J.12 Throughput UDP Unidireccional pruebas de campo IEEE802.11b.**

D(KM)/ V(Mbps)	0.650	5.01	10.2	10.46
11	6.98	5.56	5.7	5.27

Fuente: Autor.

**Tabla J.13 Throughput UDP Bidireccional en campo IEEE802.11b**

D(KM)/ V(Mbps)	0.650	5.01	10.2	10.46
11	7.32	6.22	5.7	5.67

Fuente: Autor

**Tabla J.14 Throughput TCP unidireccional en campo IEEE802.11b**

D(KM)/ V(Mbps)	0.650	5.01	10.2	10.46
11	6.04	5.34, 5.36	4.82	4.76

Fuente: autor.

**Tabla J.15 jitter UDP unidireccional en campo IEEE802.11b**

D(KM)/ V(Mbps)	0.650	5.01	10.2	10.46
11	1.3ms	2.545 ms	6.3ms	7.51ms

Fuente: autor.

**Tabla J.16 Porcentaje paquetes perdidos UDP unidireccional campo IEEE802.11b.**

D(KM)/ V(Mbps)	0.650	5.01	10.2	10.46
11	0.004%	0.0065%	0.0031%	0.0064%

Fuente: autor.

### Pruebas con el estándar IEEE802.11g

**Tabla J.17 Configuración de los radios modo IEEE802.11g.**

Comando	Descripción
iwpriv ath0 mode 11g	Radio configurado 802.11g
iwpriv ath0 abolt 0	Deshabilita los protocolos propietarios.
iwpriv ath0 pureg 1	Radio opera $R_{Data\_Rate}$ 11g
iwpriv ath0 protmode 0	Deshabilita protección contra red 11b
Sysctl -w dev.wifi0.slottime	Ajusta el slottime del radio de acuerdo a la distancia.
Sysctl -w dev.wifi0.acktimeout	Ajusta el acktimeout del radio de acuerdo a la distancia.
Sysctl-w dev.wifi0.ackrate=1	Ajusta los ACK a high- rate
iwpriv ath0 mcast rate 24000 18000 12000 9000 6000	Ajusta los ACK a $R_{Basic\_Rate}$ 24Mbps 18Mbps 12Mbps 9Mbps 6Mbps

Fuente: Autor.

**Tabla J.18 Configuración del nodo punto AP IEEE802.11g.**

Parámetro	802.11g
Slottime	$9 + \frac{D(km)}{300e8}$
SIFS	10 $\mu$ s
DIFS	$2 * Slottime + SIFS$
Tamaño ventana de contienda.	7-1031 slots
Duración del preambulo corto-largo.	20 $\mu$ s
Duración del encabezado PLCP.	4 $\mu$ s

<i>ACKTimeout</i>	$48 + \frac{2 * D(km)}{300e8}$
-------------------	--------------------------------

Fuente: Autor.

**Tabla J.19 Configuración del nodo Cliente IEEE802.11g.**

Parámetro	802.11g
<i>Slottime</i>	$9 + \frac{D(km)}{300e8}$
SIFS	10 $\mu$ s
DIFS	2* <i>Slottime</i> + SIFS
Tamaño ventana de contienda.	15-1031 slots
Duración del preambulo.	20 $\mu$ s
Duración del encabezado PLCP.	4 $\mu$ s
<i>ACKTimeout</i>	$48 + \frac{2 * D(km)}{300e8}$

Fuente: Autor.

**Tabla J.20 Configuración de los parámetros en función de la distancia.**

Distancia (Km)	0	5	10	15	20	30	40	50
Slottime ( $\mu$ s)	9	26	42	59	76	109	143	176
ACKTimeout ( $\mu$ s)	48	82	115	148	182	248	315	382

Fuente: Autor.

**Tabla J.21 Throughput UDP en función de la distancia en (Mbps).**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	15	20	30	40	50
54	25.700	22.736	18.208	14.855	12.822	9.899	8.074	6.852
48	25.300	22.736	18.208	14.702	12.676	9.899	8.027	6.871
36	22.800	18.210	15.591	13.305	11.559	9.197	7.627	6.543
24	17.400	14.665	12.628	11.137	9.861	8.113	6.859	5.960
18	13.800	11.980	10.621	9.472	8.577	7.221	6.213	5.468
12	9.800	8.833	7.991	7.395	6.836	5.943	5.244	4.714
9	7.530	6.941	6.446	6.034	5.662	5.038	4.524	4.117
6	5.260	4.950	4.682	4.362	4.155	3.877	3.575	3.308

Fuente: Autor

**Tabla J.22 Jitter en función de la distancia en (ms)**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	15	20	30	40	50
54	-	-	1.208	1.223	1.281	1.200	3.844	3.557
48	0.942	-	1.280	0.984	1.574	1.933	3.195	3.284
36	-	0.679	2.115	2.260	0.847	1.187	1.818	3.843

24	1.436	2.112	0.861	2.801	2.659	3.199	4.123	4.856
18	1.433	1.055	1.171	1.095	3.362	4.127	3.145	5.037
12	0.748	1.748	4.388	4.232	4.339	5.032	5.687	6.335
9	2.185	5.304	2.862	2.633	2.277	6.031	6.449	2.871
6	3.626	1.860	1.959	7.686	5.025	7.816	4.423	8.169

Fuente: Autor.

**Tabla J.23 Porcentaje de paquetes perdidos IEEE 802.11g.**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	15	20	30	40	50
54	-	-	0.019	0.22	0.02	0.038	0.024	0.04
48	64	-	0.004	0.003	0.0009	0.00	0.025	0.003
36	0.003	0.025	0.0074	0.000	0.007	0.006	0.077	0.000
24	0.007	0.002	0.0054	0.002	0.000	0.0028	0.001	0.0009
18	0.003	0.005	0.0071	0.000	0.011	0.0008	0.000	0.006
12	0.004	0.002	0.011	0.005	0.0027	0.0061	0.0056	0.0012
9	0.0098	0.007	0.011	0.0032	0.0033	0.0061	0.0093	0.0043
6	0.0051	0.000	0.0056	0.000	0.0015	0.003	0.0032	0.003

Fuente: Autor.

**Tabla J.24 Throughput TCP en función de la distancia en (Mbps).**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	15	20	30	40	50
54	22.7	16.88	13.4	11.01	9.08	7.13	5.82	4.83
48	22.9	15.68	12.4	10.41	9.06	7.12	5.77	4.83
36	18.5	13.84	11.4	9.65	8.3	6.56	5.43	4.58
24	13.9	11.05	9.56	8.27	6.88	5.92	4.89	4.17
18	11.2	9.3	8.1	7.06	6.3	5.2	4.35	3.86
12	8.09	7.16	6.37	5.808	5.29	4.47	3.89	3.45
9	6.25	5.68	5.2	4.79	4.43	3.9	3.43	3.11
6	4.67	4.11	3.84	3.64	3.39	3.18	2.95	2.73

Fuente: Autor.

**Tabla J.25 RTT mínimo (ms)**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	15	20	30	40	50
54	0.000	0.03	0.06	0.1	0.13	0.2	0.26	0.33
48	0.000	0.03	0.06	0.1	0.13	0.2	0.26	0.33
36	0.000	0.03	0.06	0.1	0.13	0.2	0.26	0.33
24	0.000	0.03	0.06	0.1	0.13	0.2	0.26	0.33
18	0.000	0.03	0.06	0.1	0.13	0.2	0.26	0.33
12	0.000	0.03	0.06	0.1	0.13	0.2	0.26	0.33
9	0.000	0.03	0.06	0.1	0.13	0.2	0.26	0.33
6	0.000	0.03	0.06	0.1	0.13	0.2	0.26	1.33

Fuente: Autor.

**Tabla J.26 RTT promedio (ms)**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	15	20	30	40	50
54	3.028	0.608	0.638	0.439	0.480	0.717	0.732	1.03
48	0.256	2.047	0.442	1.256	1.377	0.933	0.788	1.058
36	1.444	0.313	0.4	2.644	0.99	1.468	0.993	3.100
24	0.361	1.493	2.143	0.417	2.858	1.463	0.909	0.810
18	0.374	0.421	0.693	0.667	0.641	1.994	0.833	1.102
12	0.322	2.177	0.482	2.806	0.602	2.2	0.973	0.872
9	1.5	0.460	0.493	2.278	0.541	0.672	0.738	0.802
6	0.992	0.962	1.471	1.026	2.099	0.945	1.172	2.568

Fuente: Autor.

**Tabla J.27 RTT Máximo (ms)**

D(Km)/ V(Mbps)	0	5	10	15	20	30	40	50
54	218	39	39	5	4	11	7	27
48	5	155	8	156	166	21	7	14
36	218	11	7	221	74	154	34	197
24	3	181	130	4	201	93	6	8
18	6	3	41	18	6	140	13	27
12	4	192	8	191	6	196	12	7
9	127	3	7	177	11	10	8	8
6	9	12	130	11	149	6	11	6

Fuente: Autor.

### Pruebas con IEEE802.11b con Bursting

**Tabla J.28 Configuración de los radios modo IEEE802.11b bursting.**

Comando	Descripción
iwpriv ath0 mode 11b	Radio configurado 802.11b
iwpriv ath0 abolt 152	habilita los protocolos bursting.
Sysctl -w dev.wifi0.slottime	Ajusta el slottime del radio de acuerdo a la distancia.
Sysctl -w dev.wifi0.acktimeout	Ajusta el acktimeout del radio de acuerdo a la distancia.
Sysctl -w dev.wifi0.ackrate=0	Ajusta los ACK a 2Mbps

Fuente: Autor.

**Tabla J.29 Configuración del nodo punto AP IEEE802.11b.**

Parámetro	802.11b
Slottime	$20 + \frac{D(km)}{300 \times 8}$
SIFS	10 $\mu$ s

PIFS	$Slottime + SIFS$
DIFS	$2 * Slottime + SIFS$
Tamaño ventana de contienda.	15-1031 slots
Duración del preambulo corto-largo.	96 $\mu$ s
Duración del encabezado PLCP.	48 $\mu$ s
$ACKTimeout$	$48 + \frac{2 * D (km)}{300e8}$

Fuente: Autor.

**Tabla J.30 Parámetros seleccionados para realizar las pruebas**

Distancia (Km)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Slottime ( $\mu$ s)	20	37	54	87	120	153	186	220	253	287	320	353
ACKTimeout ( $\mu$ s)	48	82	115	182	248	315	382	448	515	582	648	715

Fuente: Autor

### Pruebas en el laboratorio estándar IEEE802.11b con bursting.

**Tabla J.31 Throughput UDP IEEE802.11b**

D(KM)/ V(Mbps)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
11	7.58	7.06	6.58	5.81	5.26	4.69	4.27	3.85	3.59	3.41	3.13	2.94

Fuente: Autor.

**Tabla J.32 Throughput TCP IEEE802.11b**

D(KM)/ V(Mbps)	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
11	6.75	6.13	5.73	5.04	4.46	4.02	3.6678	3.34	3.09	2.86	2.67	2.50

Fuente: Autor.

### Pruebas en campo modo IEEE802.11b bursting.

**Tabla J.33 Throughput UDP IEEE802.11b Campo.**

D(KM)/ V(Mbps)	0.650	4.7	5.01	10.2	10.46
11	7.15	7.18	4.48	6.58	6.21

Fuente: Autor.

**Tabla J.34 Throughput TCP IEEE802.11b Campo.**

D(KM)/ V(Mbps)	0.650	4.7	5.01	10.2	10.46
11	5.31	6.09	5.6	5.73	5.2

Fuente: Autor.

## ANEXO K. Estado del arte del IEEE802.11

### K.1.1 Modificaciones IEEE 802.11 DCF para enlaces de largo alcance.

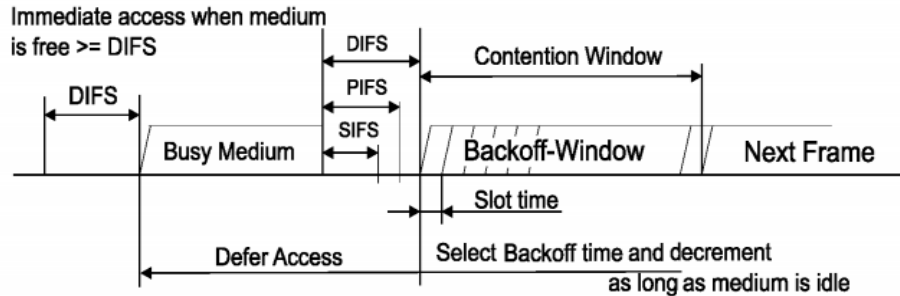
En esta sección realiza una corta descripción de la capa MAC del IEEE802.11, después se describe los parámetros que permiten optimizar el desempeño del estándar IEEE 802.11 sobre redes de largo alcance.

#### K.1.1.1 Descripción de la capa MAC IEEE 802.11.

La capa de acceso al medio del estándar IEEE 802.11 define dos mecanismos para su operación: DCF (*Distribution coordination function*) y el PCF (*Point Coordinated Function*). Los equipos comerciales generalmente emplean el mecanismo DCF, el cual accede al medio con el protocolo CSMA/CA para coordinar la forma en que las estaciones acceden al medio.

La capa MAC del estándar IEEE 802.11b/g emplea la función de coordinación distribuida DCF a continuación se describe su funcionamiento: Cuando se utiliza DCF básico la estación transmisora antes de inicializar una transmisión invoca al mecanismo CS (*Carrier sense*) para determinar si hay otra estación transmitiendo o si existe una señal Wi-Fi válida, si la estación encuentra el canal libre por un intervalo de tiempo que excede un espacio DIFS (*Distributed Interframe space*) o EIFS (*Extended Inter Frame Space*) lo cual depende si la estación estuvo involucrada en una colisión inicia el intervalo de tiempo aleatorio llamada la ventana de contención o *backoff* el cual se encuentra ranurado, estas ranuras se van decrementando mientras la estación transmisora detecta el canal libre, cuando el contador de la ranuras llega a cero la estación transmite (la transmisión se realiza al inicializar la ranura del tiempo cero), si la estación encuentra el canal ocupado el contador se congela y vuelve a esperar un DIFS, para continuar decrementando el contador. En la figura k.1 se presenta el mecanismo de acceso básico al medio.[1] [2] [3]

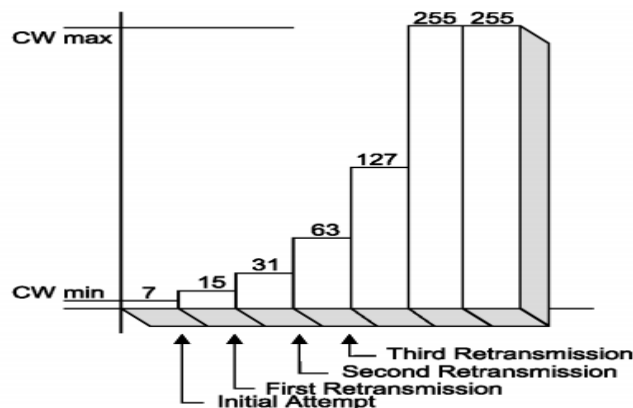
Figura K.1. Acceso básico al medio.



Fuente: Estándar.

La ventana *backoff* es un entero *pseudo* aleatorio seleccionado de una distribución uniforme en el intervalo  $(0, CW)$  donde *CW* se llama la ventana de contención cuyo valor depende del número de transmisiones fallidas al enviar un paquete, en el primer intento en que la estación desea transmitir *CW* toma el valor de  $CW_{min}$  llamado la ventana de contención mínima, cada vez que se realiza una transmisión y ésta no es exitosa el valor de *CW* se dobla, hasta alcanzar el valor máximo  $CW_{max}$  como se aprecia en la figura 2. [1][2][3]

Figura K.2 Esquema de retransmisión algoritmo backoff 802.11

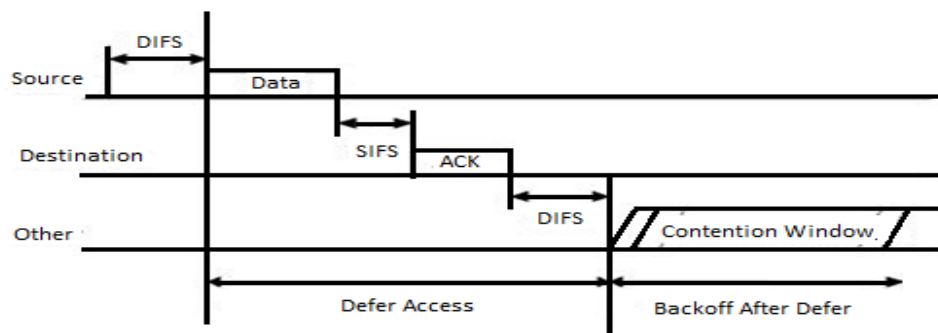


Fuente: Estándar.

Si la estación transmite activa el *ACKTimeout* (tiempo que espera el arribo de un ACK antes de generar una retransmisión), después que el paquete llega a la estación receptora esta espera un tiempo llamado SIFS (*Short Inter frame Space*) para enviar su respectivo ACK el envío de este tipo de *frames* no requiere etapas previas de contención.[3]

En la figura K.3 se muestra un esquema para una transacción de un paquete de datos utilizando los estándares IEEE802.11b/g.

**Figura K.3. Transmisión de un frame con CW= 0 para transmisor.**



Fuente: Estándar IEEE802.11 2007.

En la tabla 1 se muestran algunos tiempos definidos en el estándar IEEE 802.11 para el mecanismo de acceso al medio.

**Tabla K.1. Parámetros de la capa física del estándares IEEE 802.11b/g.**

Parámetro	802.11b	802.11g
<i>Slottime</i>	20µs	9µs
SIFS	10 µs	10 µs
PIFS	<i>Slottime+ SIFS</i>	<i>Slottime+ SIFS</i>
DIFS	<i>2*Slottime+ SIFS</i>	<i>2*Slottime+ SIFS</i>
Tamaño ventana de contienda.	31-1023 slots	15-1031 slots
Duración del preambulo corto-largo.	192-96 µs	20 µs
Duración del encabezado PLCP.	48 µs	4µs
Máxima trama MAC.	4095bytes	4095bytes

Fuente: Estándar IEEE802.11 2007.

### K.1.1.2 Problemas con enlaces Wi-Fi no modificados.

La MAC del IEEE802.11 no fue diseñada para operar sobre redes de largo alcance, enlaces reales WILD (*Wi-Fi base Long Distance*) presentan un pobre desempeño principalmente por tres razones:

- Las colisiones presentes en largas distancias.
- Un mecanismo de recuperación ineficiente.
- Interferencia entre los enlaces.

### **Las colisiones presentes en largas distancias.**

El estándar IEEE802.11 por utilizar el control de acceso al medio CSMA/CA este mecanismo escucha el canal por un tiempo especificado antes de transmitir un paquete así se asegura que el canal esta libre, sin embargo cuando se utilizan enlaces de largo alcance existe la posibilidad de que un nodo comience a transmitir un paquete y las otras estaciones no estén consientes de dicha transmisión por lo tanto cuando la distancia entre las estaciones se incrementa (El tiempo en que se demora propagar una onda electromagnética aumenta) entonces la probabilidad de colisionar, retardos y la pérdidas de paquetes crece.

### **Ineficiente utilización del enlace de comunicación.**

El estándar IEEE802.11 usa un protocolo simple de parada y espera donde cada paquete de manera independiente necesita un ACK, si el paquete es recibido de manera satisfactoria el nodo receptor envía el ACK dentro de un tiempo *ACKTimeout*, si el ACK no se recibe, el transmisor vuelve a retransmitir el paquete. Cuando la distancia del enlace se incrementa el transmisor tiene que esperar por largo tiempo el arribo de un ACK, lo cual decrementa la utilización del canal, si el periodo de tiempo para que un ACK retorne excede el parámetro *ACKtimeout* el transmisor puede realizar transmisiones innecesarias que pueden colisionar con ACK provenientes de estaciones receptoras y así desperdicia el ancho de banda.

### **Interferencia de múltiples enlaces.**

Una de las fuentes principales de errores en un enlace basado del IEEE802.11 es la interferencia generada por enlaces de comunicación que operan en el mismo canal o están presentes en canales adyacentes y la presencia de señales Wi-Fi no validas, en un enlace de largo alcance la interferencia se convierte en un aspecto crítico para el mecanismo CSMA/CA esto se debe a que cuando una estación va a transmitir está no puede detectar la interferencia presente en el otro extremo donde se encuentra el nodo de comunicación debido a la distancia presente entre las estaciones por lo tanto el número de colisiones aumenta considerablemente y el desempeño de la red se convierte critico.

Esta interferencia ocurre en algunos casos porque las antenas direccionales tienen lóbulos laterales cuya ganancia oscila entre (4–8 dBi) en adición al lóbulo principal. Además por el uso de radios con alta potencia se deteriora la recepción de los paquetes recibidos por los otros radios (*Frame error rate*) se incrementa, también no se pueden realizar transmisiones simultáneas desde varios radios debido a que cada uno detecta el canal como ocupado debido a la presencia de una señal Wi-Fi valida difiriendo las transmisiones.

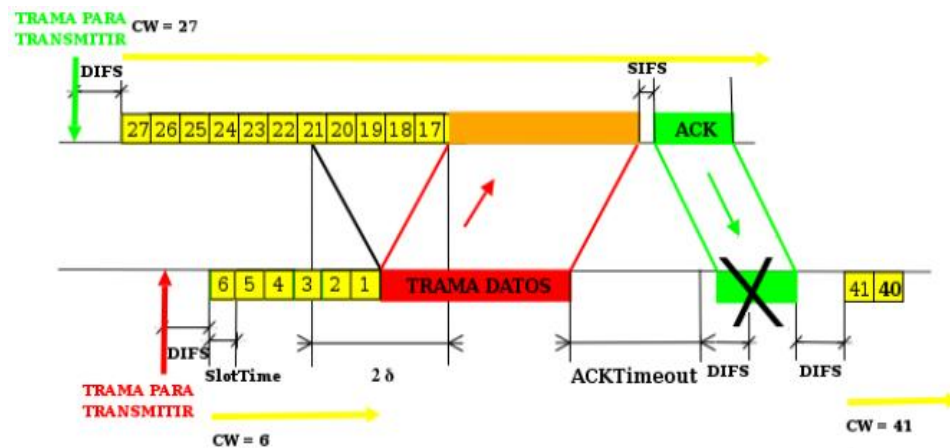
#### **K.1.1.3 Parámetros del estándar IEEE 802.11 que optimizan el desempeño en redes de largo alcance.**

Los parámetros que optimizan el comportamiento del IEEE 802.11 en enlaces de largo alcance principalmente se refieren a *ACKtimeout*, *Slottime*, *Cw*.

**ACKTimeout:** Es el tiempo que la estación transmisora espera el ACK de un paquete enviado previamente. Transcurrido este tiempo se considera que el paquete se perdió y se genera una retransmisión. Al implementar un enlace de largo alcance se debe garantizar que valor de tiempo *ACKTimeout* sea mayor a dos veces el tiempo de propagación entre las dos estaciones, para no generar

retransmisiones innecesarias las cuales conllevarían a que disminuya el *throughput* drásticamente. Esto se debe a que cuando el transmisor desconoce el arribo de un paquete en el receptor se continuará enviando el paquete (7 veces como máximo), generando retransmisiones que a su vez colisionaran con los ACK enviados por la estación receptora.

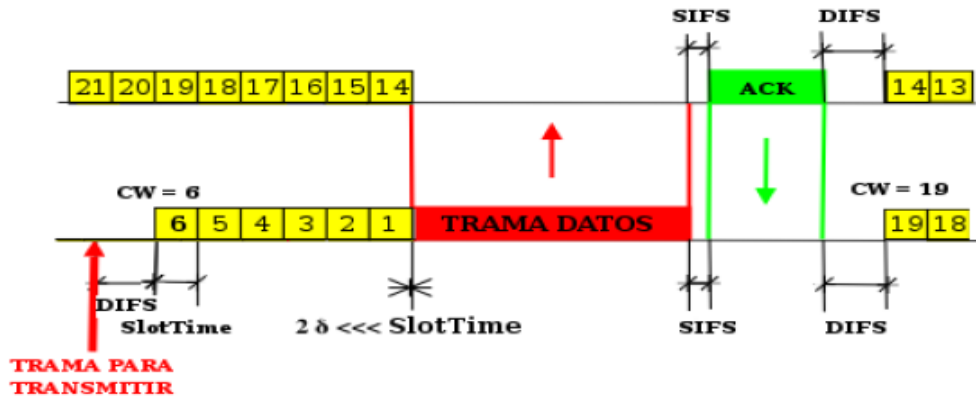
Figura K.4. El valor del ACKTimeout  $\ll 2\delta$ .



Fuente: *Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links*.

**Slottime:** Está definido dentro del estándar de tal forma que una estación siempre pueda determinar si otra estación ha accedido al canal al inicializarse un slot previo. Cuando la estación A desea transmitir esta podrá determinar si la estación B está ocupando el canal, por lo tanto la estación debe esperar para después transmitir, se podrá generar colisiones cuando la estación A y B transmitan en el mismo *slot*. El parámetro *Slottime* afecta directamente la probabilidad de colisión sobre el mecanismo de acceso al medio en un enlace de largo alcance.

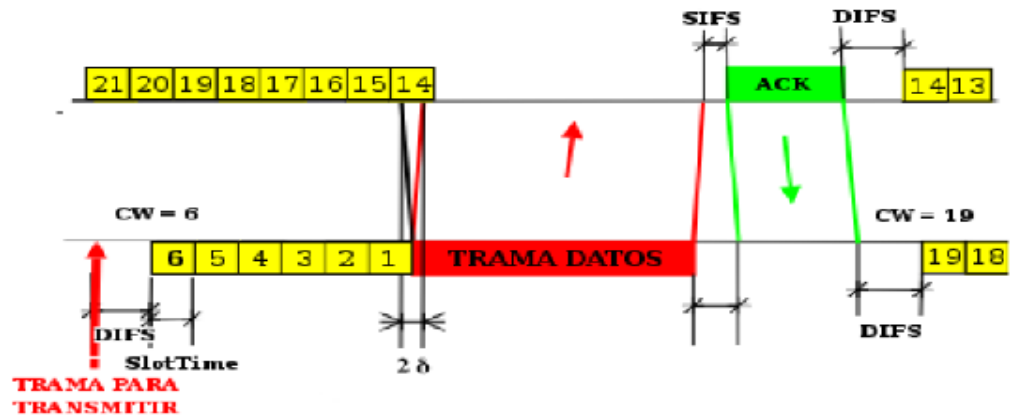
Figura K.5. El Slottime > 2δ



Fuente: *Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links.*

Cuando el valor del *Slottime* es menor pero comparable al tiempo de propagación las estaciones tendrán una asimetría al acceder al canal y comienza a aumentar la probabilidad de colisión se representa en la figura K.6.

Figura K.6. El Slottime es menor pero comparable a dos veces el tiempo de propagación.

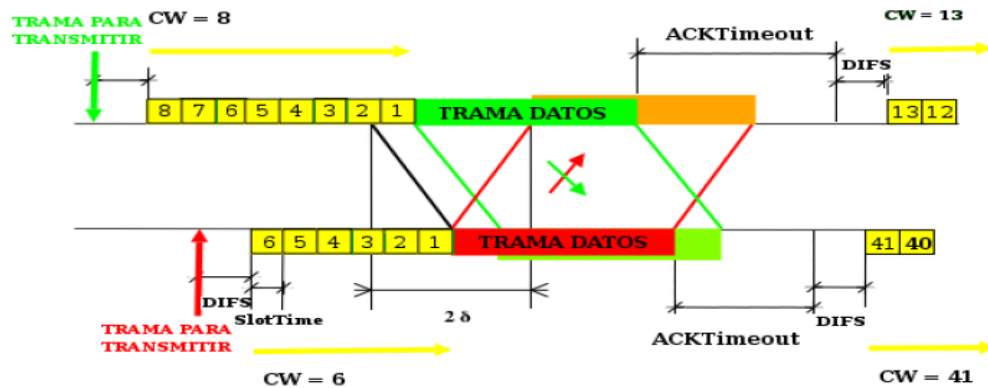


Fuente: *Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links.*

Cuando el *Slottime* toma un valor menor que dos veces el tiempo de propagación la probabilidad de colisión se incrementa debido a que cuando una estación transmite las otras estaciones no detectan de forma instantánea que el canal se encuentre ocupado por lo tanto reduce la ventana de contención en varios slots

(proporcional a la distancia entre las estaciones) lo que permite que otra estación transmita y colisiones, esto reduce considerablemente el desempeño del enlace, como se puede apreciar en la figura K.7.

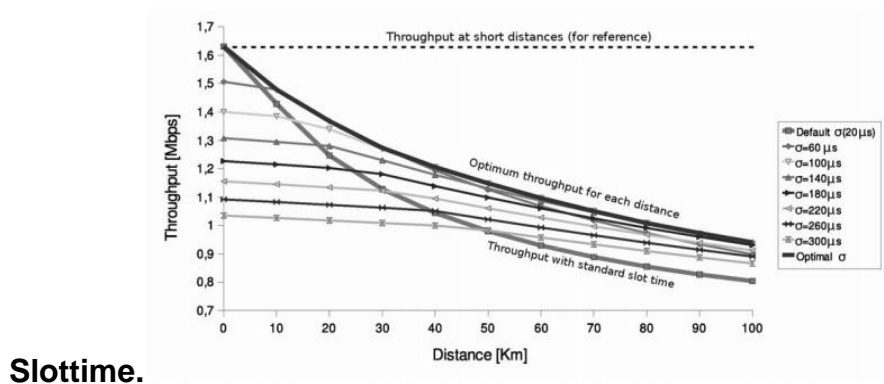
Figura K.7. Slottime es menor que dos veces el tiempo de propagación.



Fuente: *Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links.*

El valor del *Slottime* incide sustancialmente en el desempeño del IEEE802.11 sobre enlaces de largo alcance si este valor es cercano al tiempo de propagación entre las estaciones se maximiza el *throughput*, si su valor es cercano a 2 veces el tiempo de propagación se minimiza los paquetes perdidos y los retardos en la figura K.8 se presenta el *throughput* UDP bidireccional para 2Mbps en un enlace punto a punto en función del *Slottime*.

Figura K.8. Throughput UDP Bidireccional 2Mbps en función del



Slottime.

**Fuente:** *Modeling and Optimizing IEEE 802.11 DCF for Long-Distance Links.*

**C<sub>wmin</sub>:** Define el valor máximo con el cual se inicializa el algoritmo de *backoff* exponencial, este valor se toma de una variable aleatoria uniforme en el intervalo  $(0, C_{wmin})$ , este valor define el número de Slots que deben decrementarse de la ventana para intentar realizar una transmitir. Las falencias que se obtienen al optimizar  $C_{wmin}$  radica en que no se incrementa el DIFS en presencia de nodos ocultos el modo RTS/CTS (*Request to send/Clear to send*) no puede evitar las colisiones satisfactoriamente entre los nodos, esto se puede solucionar utilizando EDCA ajustando el  $C_{wmin}$  y el AIFS (*Arbitrary Interframe Space*) de acuerdo a la distancia pero esto no permite diferenciar clases y ofrecer QoS (*Quality of Service*).

### **Enlaces de largo alcance utilizando IEEE 802.11e EDCA.**

WILD-EDCA (*Wi-Fi Based Long Distance-Enhanced Distributed Channel Access*) toma ventaja de la configuración de los parámetros disponibles en el estándar IEEE802.11e EDCA para cambiar algunos tiempos fundamentales del IEEE802.11s, tales como el *Slottime*, *ACKTimeout* y el tamaño de la ventana.

El estándar IEEE 802.11e presenta a EDCF como una evolución de DCF dentro del estándar esta soporta 4 AC (*Access Category*) el cual tiene 4 probabilidades de acceder al canal sobre la capa MAC. La categoría de acceso  $i^{th}$  tiene su propia cola en la transmisión caracterizada por los parámetros: AIFSN<sub>*i*</sub> (*Arbitrary Inter-Frame Space Number*),  $C_{wmin,i}$  (*Contention Window*) y TXOP<sub>*i*</sub> (*Transmission Opportunity*).

Una estación que esté dispuesto a transmitir debe esperar que el canal se encuentre libre durante un intervalo  $AIFS_i = SIFS + AIFSN_i * \sigma$  donde  $\sigma$  es el *Slottime* en el proceso de backoff. Entonces utiliza una ventana de contención de  $C_{w,i}$  slots donde  $C_{w,i}$  esta tomado en el rango  $[0, C_{w,i}]$  para cada categoría  $i$ , el límite superior  $C_{w,i}$  es incrementado exponencialmente cada vez que la

transmisión no sea exitosa, siempre comienza en  $C_{wmin,i}$  y termina  $C_{wmax,i}$ , si el canal se presenta ocupado durante la ventana de contienda, el contador se congela, pero se reanuda una vez el canal se encuentre libre por un periodo  $AIFS_i$ , cuando el contador finaliza la estación transmite y espera un ACK que tiene que ser enviado por el receptor después de un intervalo de tiempo SIFS, si el ACK arriba en un tiempo menor a  $ACKTimeout$ , la transmisión es considerado exitosa, de otro modo el paquete será retransmitido, este proceso se repite hasta el máximo número de retransmisiones.

Las limitaciones al emplear el IEEE802.11e sobre redes de largo alcance son principalmente dadas por las colisiones que se presentan cuando se aumenta la distancia entre los nodos esto se puede mitigar variando algunos parámetros del IEEE 802.11e EDCA, algunos de estos pueden ser ajustados de acuerdo al estándar mientras otros ajustes se realizan sobre parámetros que en el estándar no permiten su modificación.

#### **Optimizando los parámetros del IEEE802.11:**

El  $ACKTimeout$  necesita ser incrementado para evitar retransmisiones innecesarias como se describió en la sección K.1.1.3.

El  $Slottime$  debe ser incrementado dos veces el tiempo de propagación para distancias mayores a 3km para  $Slottimes$   $20 \mu s$  o 1.35km cuando el  $Slottime$  es de  $9 \mu s$  para garantizar que las dos estaciones se puedan escuchar entre ellas y solo puedan colisionar si transmiten en el mismo  $Slot$  como se describió en la sección K.1.1.3.

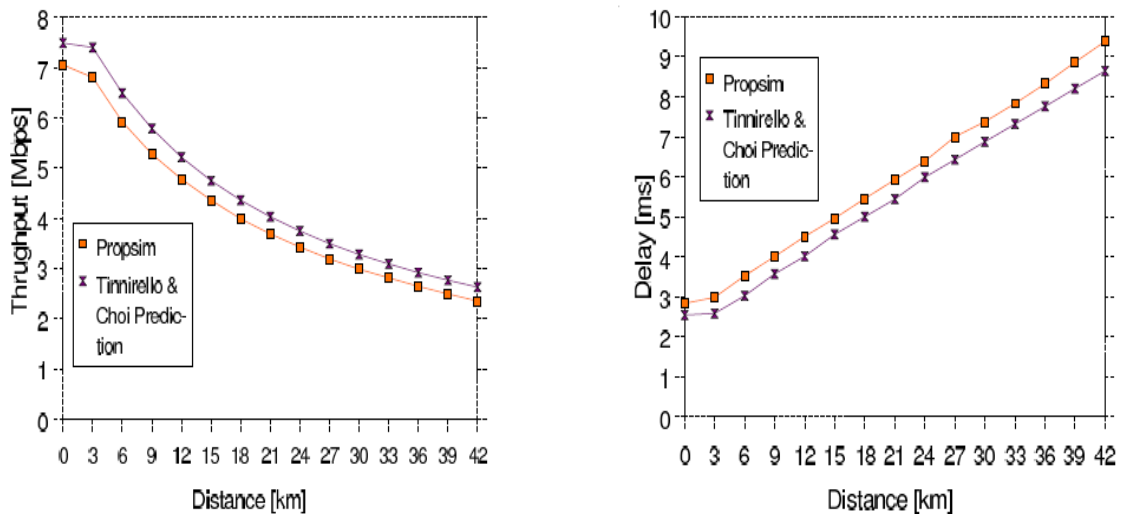
#### **Optimizando los parámetros del EDCA para redes de largo alcance.**

En adición a los parámetros de tiempo que se puede realizar sobre el acceso básico del IEEE802.11, el IEEE802.11e EDCA permite cambiar el  $CW_{min}$  y TXOP los cuales se pueden optimizar sobre redes WILD. Si  $CW_{min,i}$  se cambia de

acuerdo a la distancia hasta encontrar la ventana optima  $CW_{opt}$ , este maximiza el *throughput* y minimiza los retardos, este parámetro permite optimizar el *throughput* total aunque se incremente el *Slottime*. Además dentro del IEEE802.11e se permite a las estaciones que ganan la contienda permanecer en el canal durante cierto tiempo límite TXOP, dentro de este intervalo de tiempo se pueden realizar múltiples transmisiones, lo cual permite aumentar la eficiencia de la MAC en términos del *throughput* efectivo y los retardos presentes en la red.

Otro parámetro que se incluyen en la EDCA son los ACK en bloque los cuales se utilizan para ocupar el canal de una forma más eficiente debido a que reduce el arribo de ACKs individuales después de cada transmisión de paquete y disminuye el número de retransmisiones, esto se considera cuando varios paquetes son enviados en bloque separados por un SIFS y la estación receptora envía un reconocimiento llamado bloque ACK por el arribo de estos. A continuación se presenta el *throughput* y los retardos en función de la distancia en función de la distancia para un enlace punto a punto con EDCA considerando. A continuación se presenta el *throughput* UDP saturado bidireccional utilizando el IEEE802.11e.

**Figura K.9. Throughput y Retardos UDP bidireccional IEEE 802.11e.**



**Fuente: Comparison of MAC Protocols for 802.11-Based Long Distance Networks.**

#### **K.1.1.4 Bursting y fastframing en el IEEE802.11**

El *Bursting* y *fastframing* son técnicas empleadas para incrementar la utilización del canal lo cual es importante sobre todo cuando se utiliza DCF enlaces punto a punto de largo alcance IEEE802.11 la técnica *Bursting* está basada en el draft del IEEE802.11e.

El *bursting* reduce algunos llamados consecutivos del algoritmo *backoff* permitiendo transmitir varios paquetes de forma consecutiva separados por un SIFS si entrar al algoritmo de parada y espera descrito en el acceso básico y el *fastframing* permite agregar frames incrementando el tamaño de la MTU (*Maximum Transmission Unit*) permitiendo que la estación transmita mas información después de ganar la etapa de contienda.

#### **K.1.1.5 Enlaces de largo alcance utilizando IEEE 802.11 a/h (Multikilometric)**

El estándar 802.11a permite operar enlaces en la banda de 5Ghz, su capa MAC tiene las mismas limitantes que se presentaron cuando se utiliza el mecanismo para acceder al medio CSMA/CA cuando se utiliza para desplegar enlaces de largo alcance, por lo tanto se hace necesario realizar variaciones en algunos parámetros MAC explicados en 1.3.

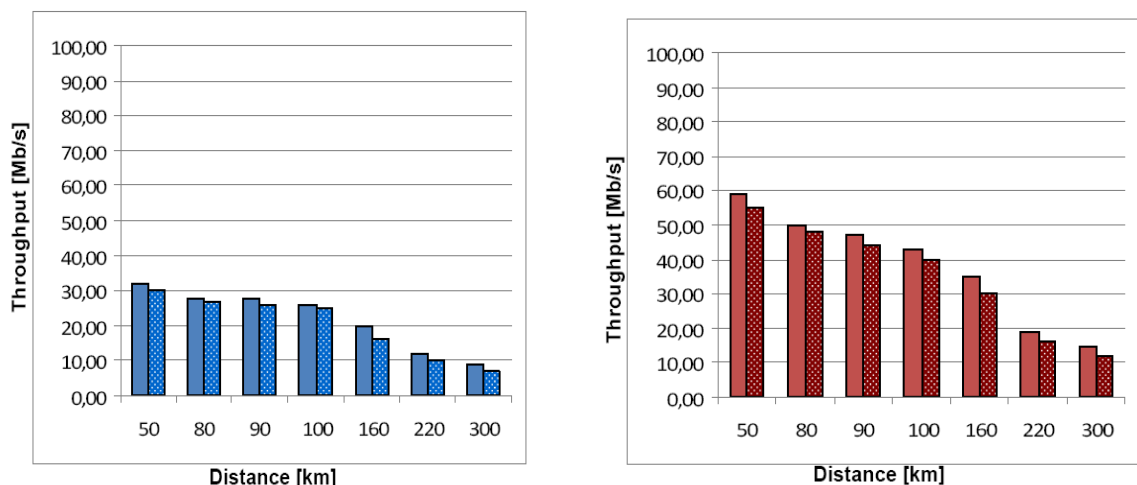
La utilización del IEEE 802.11a se utiliza en algunos casos para mitigar las limitaciones por interferencia y la escasa canalización presentes en la banda de 2.4GHz, pero en presencia de radares se le añade el estándar IEEE 802.11h, el cual permite realizar la selección de frecuencia de forma dinámica y un control para transmitir potencia sobre la capa MAC, lo cual es fundamental en una red de largo alcance.

Bajo este esquema el grupo IXEM *labs* presenta un sistema de comunicación de bajo costo para realizar enlaces punto a punto en el rango de 10-300 kilómetros,

los radioenlaces se construyen a partir de radios comerciales IEEE 802.11 a/h los cuales se le han realizado modificaciones sobre la capa MAC donde se utilizan varios transmisores (*Channel bonding*) sobre varios canales a través de una única interfaz virtual, pero no especifican las variaciones realizadas sobre el mecanismo de acceso al medio, en cuanto a las modificaciones en su capa física utiliza un ancho de banda de 40MHz, además se utilizan antenas altamente directivas cuya ganancia es de 35 dBi en los extremos manteniendo las limitaciones de la potencia isotrópica radiada equivalente (PIRE) según la regulación (30dBm Europa y 40 dBm África) con la alta direccionalidad de las antenas se evita que la radiación se disperse en otras direcciones, cuando el radio actúa como receptor fortalece la potencia recibida mientras la gran direccionalidad de las antenas minimiza el ruido y la interferencias.

Los enlaces se realizaron con una PIRE de 40dBm, para el rango entre 10-50km se utilizan antenas de 30dB y para el rango de 50-300km se utilizan antenas de 35dB, los cables de RF utilizados son de bajas pérdidas. En la figura K.10 se presenta el *throughput* UDP unidireccional que obtuvieron en función de la distancia cuando se utilizan de forma simultánea 1, 2 radios de comunicación.

**Figura K.10. Throughput UDP unidireccional utilizando uno, dos radios IEEE 802.11 a/h**



**Fuente: An independent, low cost and open source solution for the realisation of wireless links over huge multikilometric distance.**

### **K.1.2 Modificaciones del IEEE 802.11 basado en TDMA para enlaces de largo alcance.**

El surgimiento de nuevos protocolos para acceder al medio que operaran sobre la capa física definida en el estándar IEEE 802.11, se fundamento en mejorar las falencias y limitaciones encontradas en CSMA/CA cuando se implementa en redes de largo alcance, el cual es ineficiente en el aprovechamiento del canal de transmisión para redes de largo alcance, también presenta mal desempeño cuando los niveles de SNR son menores al nivel de sensibilidad de los radios y el funcionamiento de los enlaces de largo alcance con interferencia se convierte crítico .

En esta sección se especifica el protocolo de acceso al medio basado en TDMA , después se presenta 4 MAC basadas en tiempos de *slot* como son 2P, WILDMAC, JAZZYMAL, SRAWAN, estos protocolos convergen para hacer parte del desarrollo para la arquitectura de red WIFIRE, después se presenta el desarrollo de JALDIMAC un protocolo MAC que está diseñado especialmente para los WISPs (*Wireless Internet Service Provider*) desplieguen internet sobre redes inalámbricas rurales, por último se presenta MULTIMAC una MAC híbrida entre CSMA/CA y TDMA.

#### **K.1.2.1 MAC TDMA sobre la capa física del IEEE 802.11**

El grupo TIER (*Technology and Infrastructure for Emerging Regions*) de la universidad de Berkeley introdujo WILDNET (*WiFi Based Long Distance Networks*) para el diseño de redes Wi-Fi de bajo costo donde mantiene la compatibilidad con la capa física del estándar IEEE802.11 y utiliza TDMA (*Time División Multiplexed Access*) como mecanismo para acceder al medio. TDMA elimina las limitaciones presentes en CSMA/CA cuando se utiliza en redes de largo alcance, esto se debe a que TDMA asigna a cada estación dentro de la red

un intervalo de tiempo durante el cual esta puede transmitir, evitando que colisione con otras estaciones, aunque el uso de TDMA mejora las características en la forma que accede al medio, incrementa la latencia entre los paquetes y el desperdicio de ancho de banda, esto sucede porque las estaciones solamente pueden transmitir en un determinado *slot*, para mitigar estos efectos se utilizan *slots* cortos y para aumentar la utilización del canal considera la posibilidad de tener slots dinámicos involucrando tener cabeceras más complejas, todos estos aspectos conllevan a que TDMA utilice una compensación entre el *throughput* y los retardos de acuerdo a las necesidades de cada aplicación. Al implementar TDMA se hace necesario tener un protocolo que permita asignar los *Slots* y un algoritmo de sincronización para evitar que existan colisiones dentro del slot por relojes asíncronos.

#### **Características que describen a TDMA:**

- El número de *time slots* dentro de la red.
- La longitud de cada *slot*.
- El tiempo que necesita cada *time slot* para proteger a los paquetes durante el *slot* (*Guard interval*).

#### **K.1.2.2 Protocolo MAC 2P**

El protocolo MAC 2P fue la primer acercamiento para realizar transmisiones utilizando la capa física del IEEE 802.11 a través de mecanismos que utilizan la división en tiempo, donde cada estación cambia de un estado transmisión *SynTx* a un estado de recepción *SynRx* cada cierto tiempo después de transmitir cierta cantidad de bites.

Para mejorar las prestaciones 2P MAC sobre el estándar IEEE802.11 se envían los ACKs cuando el nodo cambia del estado de *SynRx-SynTx*, por lo tanto los ACKs son enviados sobre los paquetes de datos que van en la dirección opuesta.

La MAC 2P permite mecanismos para que varias interfaces inalámbricas que hagan parte de un mismo nodo de comunicación transmitan o reciban de forma simultánea, evitando las ineficiencias del mecanismo CSMA/CA sobre redes de largo alcance. 2P MAC utiliza slots fijos lo cual presenta limitantes en el *throughput* y se considera que tiene baja utilización del canal, aunque su desempeño es mejor que el IEEE 802.11.

### **K.1.2.3 WILDMAC (*Wireless Based Long Distance MAC*)**

WILDMAC está basado en TDMA, este protocolo elimina las colisiones, mejora el mecanismo de recuperación y la utilización del canal sobre distancias largas pero tiene la deficiencia de sufrir retardos elevados cuando existen time slots largos. WILDMAC realiza mejoras al protocolo 2P el cual tiene deficiencias cuando se implementa sobre canales que tienen muchas fluctuaciones.

#### **Elimina Colisiones.**

Cuando existen enlaces direccionales WILDMAC impone sincronización a través de los enlaces, donde unos transmiten y otros reciben de manera simultánea evitando la interferencia entre ellos y evitando colisiones.

#### **Mejora el mecanismo de recuperación sobre IEEE802.11.**

Los mecanismo de FEC (*Forward error correction*) y retransmisiones son usadas para tratar con las pérdidas, una aproximación basada en retransmisiones puede lograr una pérdida enlazada con mínimo *throughput* en las cabeceras pero a expensas de incrementar los retardos. El FEC incurre en cabeceras pero este no recurre en retardos adicionales especialmente si se utiliza sobre TDMA.

#### **Mejora la utilización del Canal.**

WILDMAC direcciona la poca utilización del canal que utiliza CSMA/CA con el uso de reconocimientos "*Bulk ACK*" donde el control de flujo se realiza través de

una ventana deslizante, la estación receptora envía un volumen de ACK como reconocimiento de toda la ventana de paquetes enviados en un *slot* previo.

#### **K.1.2.4 JazzyMAC ( *An Adaptive, High Performance MAC for Long-Distance Multihop Wireless*).**

JazzyMAC realiza mejoras significantes sobre 2P y WILDMAC para lograr un *throughput* cercano al óptimo sobre redes AD-HOC. Utiliza un TDMA con slots de tiempo con longitud dinámica, JazzyMAC está destinado para ser distribuido donde cada nodo se adapta al tamaño del *slot* para su transmisión usando su estado local y el tráfico de información observado.

#### **Desempeño**

Sus características de desempeño le permite adaptarse a las demandas de tráfico debido a que no depende de un *slot* fijo permite realizar transmisiones simultaneas con sus vecinos sin tener problemas de interferencia, también permite realizar la compensación entre el *throughput* y los retardos con excelentes prestaciones y no tiene limitaciones con la topología de red.

#### **K.1.2.5 SRAWAN ( *Sectorized Rural Area Wireless Access Network* )**

El protocolo MAC SRAWAN está basado en TDMA permite optimizar el desempeño sobre servicios en tiempo real (VoIP, Video) en redes de largo alcance basadas en IEEE 802.11, describe su topología con una BS Estación base que tiene antenas sectorizadas y una SS estación suscriptora. El protocolo SRAWAN permite ofrecer calidad de servicio combinando *Round-Robin* (Técnica para seleccionar procesos de manera equitativa) con el ponderado de las colas para ofrecer calidad de servicio.

Desempeño de SRAWAN:

- Resuelve el problema de los nodos ocultos.
- Permite tener armonía entre el tráfico TCP y multimedia.

- Se reduce el tamaño de las cabeceras.
- Permite realizar más conversaciones sobre VoIP.
- Obtiene un *throughput* sobre UDP 42Mbps con 54Mbps y de 7.92Mbps con 11Mbps.

#### **K.1.2.7 WIFIRE (Wireless Fidelity Rural Extension)**

Es una estructura de red diferente a otras tradicionales como las celulares, WIMAX y WILD o redes inalámbricas tipo malla, para comparación WIRE provee su foco en la cobertura de regiones rurales que tienen poca conectividad. La estructura de red de WIRE está basada en la topografía para que de forma eficiente se puedan alcanzar regiones rurales que se encuentran dispersas. WIFIRE usa una combinación de estructura de red con 4 componentes importantes:

- Enlaces de red punto a punto
- Enlaces de red punto multipunto
- Distribución local a través de red tipo malla
- Celulares como dispositivos finales en unión o telecentros.

#### **Cambios en la capa MAC**

- Desarrollo de nuevos protocolos MAC para enlaces punto a multipunto.
- Direccional complejas interacciones de interferencia.
- Adaptable a enlaces con altas pérdidas.
- Asignación de canal de forma inteligente.
- Adaptar las fluctuaciones a las demandas de tráfico.
- Diseños que permitan tener una red robusta.

La capa MAC que se utiliza para enlaces punto a punto y punto a multipunto está basada en WILDMAC y JAZZMAC, con esta capa nueva capa MAC los clientes logran alcanzar un *throughput* cercano al óptimo por cliente en escenarios donde existen fluctuaciones en la demandas y variaciones en las pérdidas. La idea

básica de esta aproximación es la utilización de slots adaptativos dentro de TDMA el cual cambia de acuerdo a la demanda de tráfico, para disminuir los efectos de las pérdidas se le incorporan técnicas adaptativas en los mecanismos de recuperación de paquetes.

#### **K.1.2.6 Jaldimac**

JaldiMAC se presenta como una nueva capa MAC que permite crear pequeñas WISPs que sean rentables sobre zonas rurales, una de las grandes limitantes para el despliegue de redes inalámbricas por los WISP radica en los costos que se incurren en la construcción de las torres de comunicación, para reducir o eliminar esta barrera JaldiMAC propone una nueva topología punto a multipunto que toma la ventaja de las torres naturales tales como montañas, cimas para ofrecer conectividad aun sobre distancias largas.

#### **Características Jaldimac:**

- Es un protocolo basado en TDMA.
- Optimiza los enlaces punto a multipunto.
- Se adapta a la asimetría del tráfico en internet.
- Provee calidad de servicio que garantiza al tráfico sensible a latencias.

El protocolo TDMA que utiliza Jaldimac es adaptativo y permite que los enlaces punto a multipunto soporten diversas clases de servicio, para el diseño se asume un entorno típico para un WISP donde la estación es fija y controlada por un proveedor de servicios y este puede controlar el tráfico agregado a cada una de las estaciones cliente. Para optimizar sus prestaciones en enlaces punto a multipunto y para la asimetría de la red introduce un *layout* dinámico, donde cada estación tomara tráfico de acuerdo a sus necesidades y la estación central administra estas peticiones siendo lo más equitativo entre unos valores mínimos y máximos, además utilizando el ancho de banda de una forma más eficiente.

Para proveer calidad de servicio a las aplicaciones de red que varían de acuerdo a los requerimientos de ancho de banda, latencia, *jitter*. JaldicMAC utiliza modelos de captura que permiten en algunos casos maximizar el *throughput* sin tener en cuenta la latencia y el *jitter*. En otros tipo de aplicaciones cuando el tráfico sensitivo a la latencia se intenta minimizar la latencia y el *jitter* a costa del *throughput*.

#### **K.1.2.7 MultiMAC(An Adaptive MAC Framework for Dynamic Radio Networking)**

Consiste en el desarrollo de una capa MAC dinámica la cual es capaz de lograr el mejor desempeño de los enlaces de comunicación dentro de diferentes condiciones de red, MultiMAC puede utilizar CSMA/CA, TDMA y otros controles de acceso al medio de forma dinámica. Para el desarrollo de MultiMAC se incorporaron procesos de decisión que se le incorporan en la MAC de acuerdo a las características del nodo de comunicación o las estadísticas de flujo de datos dentro de la red, permite una reconfiguración inteligente de la MAC y capas físicas en respuesta a los cambios externos y los requerimientos de optimización en el uso del espectro disponible.

#### **K.1.3 Desarrollo de nuevas capas MAC**

El diseño de nuevas capa MAC se realiza con SDR (*Software Define Radio*) un ejemplo se encuentra en SoftMAC el cual usa tarjetas inalámbricas IEEE802.11 a/b/g con *chip Atheros* para construir un software radio que opera sobre una capa física predefinida y un capa MAC flexible, es decir un driver que permite realizar un control extensivo sobre la capa MAC, permitiendo implementar diferentes protocolos para controlar el acceso al medio como TDMA y permitir el control de errores (*Reed-Solomon*).

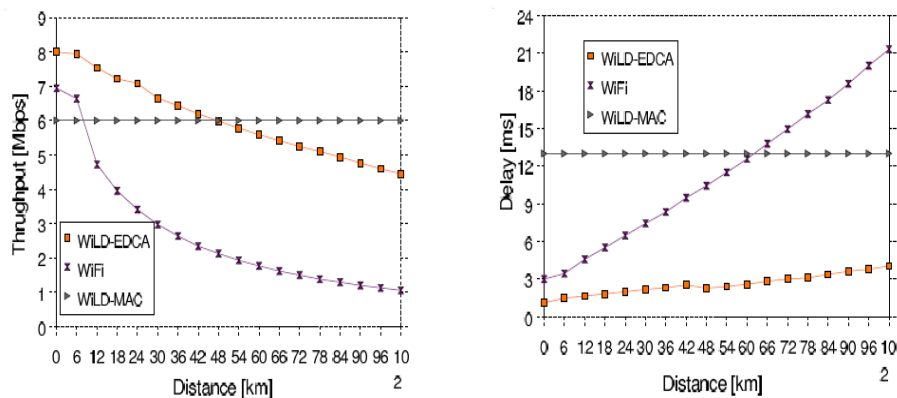
### K.1.4 Protocolos MAC propietarios.

En el mercado existen fabricantes de radios con protocolos propietarios para el despliegue de redes inalámbricas de largo alcance entre ellas se encuentran los Motorola Canopy, Lobometrics, otros definen su línea Wi-Fi para exteriores como Terabeam, Mikrotik, *Ubiquiti networks*, Intel.

El estándar IEEE802.11n se presenta como la nueva generación de comunicaciones inalámbricas de alta velocidad hasta la fecha no existen publicaciones que presenten su desempeño en redes de largo alcance, pero algunos autores comentan que en las pruebas preliminares que han realizado sobre este estándar que presenta buen desempeño.

Al comparación sobre los mecanismos de acceso al medio CSMA/CA basado en el mecanismo de acceso básico sobre el IEEE802.11e y TDMA, se pudo apreciar en figura K.11 que WILD-EDCA (CSMA/CA) tiene mejores prestaciones en el rango 0-42Km y que el WILD-MAC (TDMA) mas optimo para distancia más largas, para todas las distancias WILD-MAC tiene menores retardos.

**Figura K.11. Comparación de las MAC WILD-EDCA, WIFI, WILD\_MAC .**



**Fuente: Comparison of MAC Protocols for 802.11-Based Long Distance Networks.**