

**MODELO EMPÍRICO QUE PERMITA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE UNA
RED INALÁMBRICA PARA ISP BASADA EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11**

**MIGUEL ALONSO ARDILA OSORIO
SERGIO ANDRES ARDILA OSORIO**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN TELEMÁTICA
BUCARAMANGA
2016**

**MODELO EMPÍRICO QUE PERMITA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE UNA
RED INALÁMBRICA PARA ISP BASADA EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11**

**Trabajo de grado para optar al título de:
Magister en Telemática en la modalidad de Profundización**

**Director:
JUAN CARLOS VESGA FERREIRA
PhD(c) en Telecomunicaciones - Universidad Pontificia Bolivariana**

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA
FACULTAD DE INGENIERÍA DE SISTEMAS
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN TELEMÁTICA
BUCARAMANGA**

2016

Nota de aceptación

Firma Presidente del jurado

Firma del jurado

Bucaramanga, Enero de 2016

DEDICATORIA

Esta tesis está dedicada a Dios todo poderoso, creador de toda fuente de fuerza, dedicación y conocimiento apropiados en nuestros seres en el caminar de esta meta. A nuestras esposas, por su paciencia y apoyo en momentos difíciles. A la razón de nuestras vidas, nuestras hijas Valeria, Laura y Sara.

Sergio Andrés y Miguel Alonso

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa sus agradecimientos a:

Al director del trabajo de grado, PhD(c) Juan Carlos Vesga Ferreira, por sus aportes académicos, intelectuales y personales, indispensables para la feliz culminación de la presente tesis.

A aquellas personas que de alguna manera han sido partícipes en la formación profesional y humana necesarias para el cumplimiento de este propósito.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	21
1. MARCO REFERENCIAL	26
1.1 ESTADO DEL ARTE	26
1.2 MARCO TEÓRICO	30
1.2.1 Familia de Estándares 802 Lan/Man	30
1.2.2 Redes Inalámbricas	33
1.2.3 Estándares IEEE 802.11	34
1.2.4 Cobertura	41
1.2.5 Servicios De Redes IEEE 802.11	42
1.2.6 Problema Nodo Escondido	45
1.2.7 Capas iee 802.11	47
1.2.8 Control De Acceso Al Medio En IEEE 802.11	51
1.2.9 Trama Mac IEEE 802.11	55
1.2.10 Diseño Experimental	60
2. METODOLOGÍA	67
2.1 PLANEACIÓN	68
2.1.1 Identificación del Problema	68
2.1.2 Rendimiento	69
2.1.3 Throughput	70
2.1.4 Retardo de Propagación	70
2.1.5 Dispositivos utilizados y aspectos técnicos	71
2.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO	75
2.3 TOMA DE DATOS EN LA EXPERIMENTACIÓN	78

3. RESULTADOS	80
3.1 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA THROUGHPUT	80
3.2 VERIFICACIÓN DE LOS SUPUESTOS DEL MODELO PARA THROUGHPUT	91
3.2.1 Supuesto de Normalidad	92
3.2.2 Supuesto de Varianza Constante	93
3.2.3 Supuesto de Independencia	94
3.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS EFECTOS ACTIVOS	95
3.4 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA RETARDO DE TRANSMISIÓN	97
3.4.1 Verificación de los Supuestos del Modelo par Retardo de Transmisión	108
3.4.2 Análisis e Interpretación de los Efectos Activos para Retardo de Transmisión	110
4. CONCLUSIONES	113
5. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	116
BIBLIOGRAFÍA	118
ANEXOS	122
ANEXO A. CONEXIÓN DE EQUIPO CPE AL NODO DE DISTRIBUCIÓN	122
ANEXO B. DESCARGA DE ARCHIVO, MUESTRA EXPERIMENTAL	123
ANEXO C. NODO DISTRIBUCIÓN AROS COMUNICACIONES	124

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características tipos de redes	34
Tabla 2. Comparación estándares IEEE 802.11	38
Tabla 3. Servicios IEEE 802.11	43
Tabla 4. IEEE 802.11 Physical layer Standards	50
Tabla 5. Puntos de Acceso ubiquiti serie rocket	72
Tabla 6. Especificaciones técnicas antenas utilizadas	73
Tabla 7. Especificaciones técnicas CPEs utilizados	75
Tabla 8. Factores y niveles de factor	77
Tabla 9. Matriz Diseño de Throughput y Retardo de Propagación (Mbps, Seg)	79
Tabla 10. Datos Combinación factor A vs factor B	82
Tabla 11. Datos Combinación factor A vs factor C	83
Tabla 12. Datos Combinación factor A vs factor B vs factor C	84
Tabla 13. Efecto Throughput factor B	85
Tabla 14. Efecto Throughput factor C	86
Tabla 15. Efecto Throughput interacción de factores A-B	86
Tabla 16. Efecto Throughput interacción de factores A-C	87
Tabla 17. Efecto Throughput interacción de factores B-C	88
Tabla 18. Efecto Throughput interacción de factores A-B-C	89
Tabla 19. ANOVA para Throughput	90
Tabla 20. Datos combinación factor A vs factor B	100
Tabla 21. Datos combinación factor A vs factor C	100
Tabla 22. Datos combinación factor A vs factor B vs factor	101
Tabla 23. Efecto Retardo de Propagación factor B	102
Tabla 24. Efecto Retardo de Propagación factor C	103
Tabla 25. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores A-B	103
Tabla 26. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores A-C	104

Tabla 27. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores B-C	105
Tabla 28. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores A-B-C	106
Tabla 29. ANOVA para Retardo de Propagación	107

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Estándar IEEE 802	31
Figura 2. Categorías de redes Inalámbricas según cobertura	33
Figura 3. Sistema MIMO (múltiples entradas, múltiples salidas)	37
Figura 4. Data rates IEEE 802.11 a/b/g/n	37
Figura 5. Topología IEEE 802.11	39
Figura 6. BSS, DS, y ESS	41
Figura 7. Problema nodo oculto	45
Figura 8. RTS/ CTS	46
Figura 9. IEEE 802.11 Physicallayer	49
Figura 10. Modulación por división ortogonal de frecuencia	51
Figura 11. Arquitectura de protocolos IEEE 802.11	52
Figura 12. Trama MAC IEEE 802.11	56
Figura 13. Access Point marca ubiquiti modelo serie Rocket	72
Figura 14. Antena marca ubiquiti modelo serie M	73
Figura 15. CPE marca ubiquiti modelo serie Nanostation M	74
Figura 16. Topología AROS COMUNICACIONES Ltda	76
Figura 17. Valores residuales para throughput en papel ordinario	93
Figura 18. Valores residuales vs valores estimados para throughput	94
Figura 19. Residuos vs el Orden en la toma de datos	95
Figura 20. Interacción entre distancia y frecuencia	96
Figura 21. Interacción entre cantidad de CPE y frecuencia	96
Figura 22. Interacción entre cantidad de CPE y distancia	97
Figura 23. Valores residuales para Retardo de Propagación en papel ordinario	108
Figura 24. Valores residuales vs valores estimados para Retardo de Propagación	109
Figura 25. Residuos vs el orden en la toma de datos	110
Figura 26. Interacción entre cantidad de CPEs y frecuencia	110

Figura 27. Interacción entre cantidad de CPEs y frecuencia	111
Figura 28. Interacción entre cantidad de CPEs y distancia	112

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Conexión de equipo cpe al nodo de distribución	122
Anexo B. Descarga de archivo, muestra experimental	123
Anexo C. Nodo distribución aros comunicaciones	124

LISTA DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1. Ecuación Throughput	70
Ecuación 2. Medición del Throughput	77
Ecuación 3. Modelo estadístico y análisis de varianza para throughput	80
Ecuación 4. Interacciones entre factores (Modelo estadístico y análisis de varianza para throughput)	81
Ecuación 5. Ecuación matemática para determinar el factor correlación (FC) (Modelo estadístico y análisis de varianza para throughput)	83
Ecuación 6. Cálculos de la suma de cuadrados (SC)	84
Ecuación 7. Calculo de SC_A	85
Ecuación 8. Calculo de SC_B	85
Ecuación 9. Cálculo de SC_C	86
Ecuación 10. Cálculo de SC_{AB}	87
Ecuación 11. Cálculo de SC_{AC}	87
Ecuación 12. Cálculo de SC_{BC}	88
Ecuación 13. Cálculo de SC_{ABC}	89
Ecuación 14. Cálculo de SC_E	90
Ecuación 15. Análisis de varianza para retardo de transmisión, diseño factorial de 3 factores	98

Ecuación 16. Interacción entre sus 3 factores (Análisis de varianza para retardo de transmisión)	99
Ecuación 17. Ecuación matemática para determinar el factor correlación (FC) (Análisis de varianza para retardo de transmisión)	101
Ecuación 18. Cálculos de la suma de cuadrados (SC) (Análisis de varianza para retardo de transmisión)	101
Ecuación 19. Cálculo del efecto del factor A	102
Ecuación 20. Cálculo de SC_B	102
Ecuación 21. Cálculo de SC_C	103
Ecuación 22. Cálculo de SC_{AB}	104
Ecuación 23. Cálculo de SC_{AC}	105
Ecuación 24. Cálculo de SC_{BC}	105
Ecuación 25. Cálculo de SC_{ABC}	106
Ecuación 26. Cálculo de SC_E	107

ACRÓNIMOS

AP	<i>Access Point (Punto de Acceso)</i>
ANOVA	Análisis de Varianza
ANSI	<i>American National Standar Institute</i> (Instituto Nacional de Estándares Americanos)
BSS	<i>Basic Service Set</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access/Colision Avoidance</i> (Acceso Múltiple por Detección de Portadora/Eliminación de Colisiones)
CSMA/CD	<i>Carrier Sense Multiple Access/Colision Avoidance</i> (Acceso Múltiple por Detección de Portadora/Detección de Colisiones)
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i> (Equipo Local del Cliente)
CTS	<i>Clear to Send</i> (Libre para Envío)
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i> (Función de Coordinación Distribuida)
DFWMAC	<i>Distribution Foundation Wireless MAC</i>
DSM	<i>Distribution System Medium</i> (Sistema de Distribución del Medio)
DSS	<i>DirectSequence Spread Spectrum</i> (Secuencia Directa de Espectro Ensanchado)
ESS	<i>Extended Service Set</i>
FHSS	<i>Frecuncy Hoping Spread Spectrum</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Ingenieros Electricos y Electrónicos)
ISP	<i>Internet Service Provider</i> (Proveedor de Servicios de Internet)
LAN	<i>Local Area Networks</i> (Redes de Área Local)
LLC	<i>Logic Layer Control</i> (Control de Enlace Lógico)
LoS	<i>Line of Sight</i> (Línea de Vista)
MAC	<i>Medium Access Control</i> (Control de Acceso al Medio)
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i> (Red de Área Metropolitana)

MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> (Múltiples Entradas Múltiples Salidas)
MINTIC	Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones
MPDU	<i>Maximum Protocol Data Unit</i> (Protocolo de Máxima Unidad de Datos)
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> (Multiplexación por División Ortogonal de Frecuencia)
PDU	<i>Protocol Unit Data</i> (Protocolo de Unidad de Datos)
PMD	<i>Physical Medium Dependent</i> (Subcapa Dependiente del Medio Físico)
QoS	<i>Quality of Services</i> (Calidad de Servicio)
RTS	<i>Request to Send</i> (Respuesta al Envío)
SNAP	<i>Subnetwork Access Protocol</i> (Protocolo de Acceso a Subred)
STA	<i>Station</i> (Estación)
SIFS	<i>Short Interframe Space</i> (Pequeño Espacio entre Tramas)
TIC	<i>Technology Information Communication</i> (Tecnologías de la Información y las Comunicaciones)
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade and Development</i> (Conferencia de las Naciones Unidas sobre Comercio y Desarrollo)
WLAN	<i>Wireless LAN</i> (LAN Inalámbrica)
WPA	<i>Wireless Protected Access</i> (Acceso Inalámbrico Protegido)

GLOSARIO

DISEÑO FACTORIAL: investigación utilizada generalmente por los científicos que desean comprender el efecto de dos o más variables independientes respecto a una variable dependiente.

FRECUENCIA: característica del medio que permite mediante diferentes técnicas la transmisión de datos.

IEEE 802.11: es un estándar internacional que define las características de una red de área local inalámbrica.

LOS: *line of sight* (línea de vista). Se refiere a enlaces cuyo medio o camino (*path*) entre las antenas transmisoras y receptoras es limpio y sin obstrucciones.

OFDM: Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal. Sistema de modulación digital en el cual se hace división del espectro.

QoS: acrónimo para *Quality of Service* (calidad de servicio). Conjunto de técnicas de telecomunicaciones orientadas a priorizar las comunicaciones de flujos multimedia y voz sobre IP (VoIP), en una red.

RED DE AREA LOCAL: grupo de equipos de una organización conectados en una misma área geográfica.

RETARDO DE PROPAGACIÓN: tiempo que tarda la información en llegar al otro extremo del sistema de transmisión.

THROUGHPUT: en redes datos, es el volumen de información que pasa sobre un canal de comunicación. Las unidades generalmente se presentan en bits por segundo (bps) o sus múltiplos.

RESUMEN

TITULO: MODELO EMPÍRICO QUE PERMITA EVALUAR EL RENDIMIENTO DE UNA RED INALÁMBRICA PARA ISP BASADA EN EL ESTÁNDAR IEEE 802.11.

AUTOR: MIGUEL ALONSO ARDILA OSORIO, SERGIO ANDRES ARDILA OSORIO.

Palabras clave: Estándar IEEE 802.11, Análisis de Varianza, *Throughput*, Retardo de Propagación, Diseño experimental.

Introducción: La transferencia de datos en grandes volúmenes y conexiones fiables a través del tiempo se convirtió en una necesidad que profesionales expertos en este tema han tenido que satisfacer. Grandes empresas, instituciones de diferente índole, organizaciones y otras, asignan muchos de sus recursos (humanos, económicos, tecnológicos, etc) a la investigación que conlleve al desarrollo de tecnologías de alto rendimiento y capacidad.

Objetivo: El presente trabajo fue diseñado con el propósito de efectuar un diagnóstico del comportamiento de la infraestructura de red en la empresa AROS COMUNICACIONES Ltda teniendo en cuenta que en términos de gestión y administración no se tiene conocimiento acerca del correcto funcionamiento del sistema. Este estudio pretende mediante un diseño experimental encontrar los factores que afecten el rendimiento de una red inalámbrica para ISP basada en el estándar IEEE 802.11.

Metodología: Se dispuso parte de la infraestructura de red de la empresa Aros Comunicaciones, para realizar la experimentación, recolección y análisis de datos. El escenario comprende el uso de tres (3) Puntos de Acceso, uno (1) en la frecuencia de 2.4 Ghz y dos (2) en la frecuencia de 5.8 Ghz, haciendo uso de trece (13), diez y seis (16) y treinta y siete (37) terminales inalámbricas; combinando estos niveles de factor con distancias de cuarenta metros (40m), mil metros (1000m) y dos mil quinientos metros (2500) para las pruebas correspondientes.

Lo referente al tráfico que circula en el sistema inalámbrico, corresponde al tráfico propio generado por las terminales asociadas a los Puntos de Acceso y en la descarga de un archivo previamente alojado en un servidor. Los parámetros de medición tenidos en cuenta fueron: *Throughput* y Retardo de Transmisión.

Conclusiones: En las conclusiones se puede destacar que tanto en el análisis hecho para *Throughput* como para Retardo de Propagación los factores incidentes fueron la frecuencia de operación (A), el número de CPE's conectados al AP (C) y la interacción existente entre frecuencia de de operación y número de CPE's conectados al AP (AC).

ABSTRACT

TITLE: EMPIRICAL MODEL TO EVALUATE THE PERFORMANCE OF A WIRELESS NETWORK FOR ISP BASED ON THE STANDARD IEEE 802.11.

AUTHOR: ARDILA ALONSO MIGUEL OSORIO OSORIO SERGIO ANDRES ARDILA.

Keywords: IEEE 802.11 standard, variance analysis, *Throughput, Propagation Delay, Experimental design*

Introduction: The transfer of data in large volumes and reliable connections over time became a necessity that experts in this issue have had to meet. Large companies, institutions of various kinds, and other organizations, assigned many of his (human, financial, technological, etc.) to research that may lead to the development of high-performance technologies and capacity resources.

Objetives: this study was designed with the purpose of make a diagnosis of the behavior of the network infrastructure in the company AROS COMUNICACIONES LTDA considering that in terms of management and administration are not aware about the proper functioning of the system. This study aims to find using an experimental design factors affecting the performance of a wireless network for ISP based on the IEEE 802.11 standard.

Metodology: Part of the network infrastructure company Aros Communications were available, for experimentation, data collection and analysis. The stage comprises the use of three (3) Access Points, one (1) in the 2.4 GHz frequency and two (2) in the frequency of 5.8 GHz, using thirteen (13), sixteen (16) and thirty-Seite (37) wireless terminals; combining these levels of factor distances forty meters (40m), a thousand meters (1000m) and 2500 meters for evidence tests.

Regarding the traffic going in the wireless system, it corresponds to own traffic generated by terminals associated with the access points and discharge of a previously hosted file on a server. The parameters measured were taken into account: Throughput and Transmission Delay.

Conclusions: The conclusions can be noted that both the analysis made for Throughput to incidents Propagation Delay factors were operating frequency (A), the number of CPE's connected to the AP (C) and the interaction between frequency operation and number of CPEs connected to AP (AC).

INTRODUCCIÓN

La transferencia de datos en grandes volúmenes y conexiones fiables a través del tiempo se convirtió en una necesidad que profesionales expertos en este tema han tenido que satisfacer. Grandes empresas, instituciones de diferente índole, organizaciones y otras, asignan muchos de sus recursos (humanos, económicos, tecnológicos, etc) a la investigación que conlleve al desarrollo de tecnologías de alto rendimiento y capacidad.

Las redes inalámbricas con protocolo IEEE 802.11 pasaron de ser una solución alternativa en áreas de difícil acceso donde tecnologías de tipo cableado eran inviables por su complejidad, a ser una opción que proporciona soluciones en diferentes entornos, con los más altos estándares de calidad y confiabilidad gracias a la evolución constante que presenta.

La tendencia mundial en los últimos años es cada vez más móvil. Como resultado, las formas tradicionales han demostrado ser insuficientes para afrontar los retos planteados por las nuevas exigencias de los usuarios. En ambientes de trabajo u hogareños si los usuarios deben estar conectados por un medio cableado sus movimientos se reducen drásticamente. La conectividad inalámbrica sin embargo no presenta este tipo de restricción y permite mucha más libertad por parte del usuario. En entornos de proveedores de servicios el concepto de movilidad también juega un papel importante, brindando gran flexibilidad en sus redes, fácil despliegue y facilidad de adaptación en poco tiempo, algo que en tecnologías cableadas puede ser lento, complejo y costoso tanto para el proveedor como para el usuario.

En Colombia, la última década se ha caracterizado por una expansión masiva del estándar IEEE 802.11 tanto en aplicaciones sencillas de tipo hogar u oficinas con

niveles bajos de transmisión y ambientes *indoor*, como en aplicaciones de grandes empresas con infraestructuras de redes tipo MAN o WAN en ambientes mixtos (*indoor y/o outdoor*) que requieren transmitir diferentes tipos de tráfico con capacidades hasta del orden de los Gbps y sin ningún tipo de errores y cortes en la comunicación.

La evolución en las telecomunicaciones en nuestro país está soportada en la necesidad de masificación del internet como herramienta de desarrollo social y económico en todos los sectores.

Según estudios de Raul Katz, de la Universidad de Columbia, en el caso Chileno aumentar en 10% la penetración de Internet generó una reducción en el desempleo del 2%. Según el UNCTAD *Information Economy Report 2010*, en países en desarrollo como Filipinas e India, por cada empleo generado en la industria TIC se generan entre 2 y 3.5 empleos adicionales en la Economía. Según el Banco Mundial y el reporte del Foro Económico Mundial, *The Global Information Technology Report 2010*, hay una correlación directa entre el *Network Readiness Index*, que mide el uso y desarrollo de las TIC, y su competitividad internacional. Informe Rendición de Cuentas 2014 8 Encontramos que Colombia debe superar diversas barreras para lograr la masificación de Internet. Tenemos barreras en todas las partes del ecosistema digital, es decir, en infraestructura, servicios, aplicaciones y usuarios **(Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones [MINTIC], 2014)**.

Distintos estudios han encontrado que existe una correlación directa entre la penetración y el uso de Internet, la apropiación de las TIC, la generación de empleo y la reducción de la pobreza. Por ejemplo, un estudio de las Naciones Unidas [UNCTAD2010] muestra cómo existe una clara correlación entre el número de usuarios de Internet y la tasa de pobreza de los países **(MINTIC, 2010)**.

El Plan Vive Digital 2010-2014-2018 es un proyecto bandera gubernamental que tiene como principal objetivo la reducción del desempleo, reducción de la pobreza y aumento en la competitividad mundial.

Consecuencia de la política mencionada anteriormente, el territorio nacional cuenta con troncales de fibra óptica que abarcan actualmente el 96% del territorio con 1078 municipios. Este avance tiene como complemento el acceso a conexiones de internet de altas velocidades de los habitantes de dichas poblaciones **(MINTIC, 2014)**.

Por lo tanto, es un reto para el sector de las comunicaciones el desarrollo de programas que tengan como propósito la creación de redes que provean y distribuyan acceso de internet de alta velocidad a las personas, instituciones, empresas, etc..., en las localidades donde no existe una infraestructura adecuada.

Aunque el estado colombiano ha hecho un gran esfuerzo en cuanto a infraestructura, los datos demuestran un índice de penetración del internet muy bajo sobre todo en la parte norte y sur del territorio nacional. Los departamentos más destacados en cuanto a índice de penetración son: Antioquia 14.5%, Santander y Risaralda 14% y el distrito capital Bogotá 19.9%. Se debe tener en cuenta que de estos porcentajes, una alta proporción está dada por las ciudades capitales y sus áreas metropolitanas **(MINTIC, 2015)**.

Esto generó una ventana abierta para que empresas pequeñas y microempresas llenen este vacío en diferentes lugares. La mayoría de estas empresas teniendo en cuenta las condiciones para el montaje y administración de estas redes, optaron por infraestructuras de tipo inalámbricas y más exactamente las IEEE 802.11.

Las redes inalámbricas en general y específicamente las IEEE 802.11 presentan en gran medida, bajo rendimiento por problemas del canal. El espacio libre es un medio difícil de controlar y presenta cambios constantes en sus propiedades por factores de distintas índoles que no podemos predecir de forma totalmente acertada. El medio inalámbrico presentará, en todo momento, interferencias de otras señales y ruido electromagnético que degradarán la calidad de la señal. De modo que, en cualquier sistema de comunicaciones inalámbricas, siempre se tendrá una eficiencia condicionada directamente por la pérdida de datos en el medio, entre otras situaciones. Dichas pérdidas pueden deberse a distintos fenómenos como atenuación, distorsión o interferencia por señales no deseadas **(Marin, 2013, p. 12)**.

A través del tiempo las mejoras para todos y cada uno de los inconvenientes se resolvieron parcial o totalmente mediante técnicas para aumentar la capacidad del canal como: aumento en el ancho de banda, aumento de potencia de transmisión, diferentes tipos de modulaciones que hacen eficiente el espectro radioeléctrico, etc.

En la presente investigación se pretende realizar un análisis del comportamiento de una red bajo el estándar IEEE 802.11 con una infraestructura previamente operativa y generar un modelo empírico que evalúe el rendimiento de este tipo de redes, basándonos en parámetros de medición como el Throughput y Retardo de Transmisión de la comunicación entre las Estaciones y los Puntos de Acceso, cuyos datos son recolectados experimentalmente mediante la inyección de datos aleatorios.

Teniendo en cuenta el propósito principal de la investigación que consiste en elaborar un modelo empírico que permita evaluar el rendimiento de una red inalámbrica para ISP basada en el estándar IEEE 802.11, cuyos objetivos específicos se mencionan a continuación:

- Recopilar información del estado del arte referente al estándar **IEEE** 802.11 WLAN y su utilización en la transmisión de cualquier tipo de tráfico mediante protocolo IP.
- Proponer un diseño experimental que permita evaluar el rendimiento de la red inalámbrica de la empresa AROS COMUNICACIONES Ltda para la transmisión de diferentes tipos de tráfico sobre el protocolo IP.
- Realizar campañas de muestreo acorde a los factores y niveles establecidos dentro del diseño experimental seleccionado.
- Obtener un modelo estadístico empírico soportado en los datos obtenidos durante las campañas de muestreo utilizando técnicas que permitan simular el rendimiento de la red WLAN en la empresa AROS COMUNICACIONES Ltda.
- Evaluar la validez del modelo propuesto frente a los resultados experimentalmente.

1. MARCO REFERENCIAL

La información de mayor relevancia y que presenta pertinencia con con el respectivo caso de estudio contempla diversos documentos de diferentes fuentes en varios formatos utilizados en el ámbito de las telecomunicaciones.

1.1 ESTADO DEL ARTE

- ***Improving the Multiple Access Method of CSMA/CA Home Networks***

CPI (*Contention window Proactive Increase*). Este trabajo propone un mecanismo o técnica que permite mejorar el método de acceso al medio en los estándares IEEE 802.11 y *HomePlug*. La idea principal es que las estaciones no realicen el procedimiento de *backoff* (algoritmo utilizado para definir los tiempos de retransmisiones cuando hay colisiones) solo cuando haya colisiones sino que además se realice cuando exista alta probabilidad de estas. Esta idea conlleva a que el proceso de *backoff* se realice una cantidad de veces mayor al tradicional. También cambia el concepto de los tiempos de retransmisión, pues con esta técnica se hacen constantes. Se concluye con pruebas realizadas en un simulador que al aumentar la cantidad de estaciones se obtiene menos retardos y más *throughput* utilizando CPI (Campista, Costa, & Duarte, 2006).

- ***The Analysis of Performance of IEEE 802.11 MAC Protocol Using Markov Chain***

Los canales inalámbricos de IEEE 802.1.1 son propensos a errores. La mayoría de estudios y trabajos existentes analizan el rendimiento de DFC asumiendo condiciones de canal ideal. Algunos estudios realizados consideran el *packet*

error rate como constante, teoría que obviamente no es razonable para ambientes prácticos. Este trabajo propone manejar los diferentes errores de transmisión en los diferentes nodos recreando un ambiente más real. El análisis de estos datos es realizado por un modelo de cadenas de Markov el cual tiene como objetivo presentar la probabilidad de transmisión. Este modelo considera cierta cantidad de nodos en un área específica y los clasifica de acuerdo a las diferentes tasas de error de paquetes (Yin, 2007).

- ***Analysis of Wireless CSMA/CA Network Using Single Station Superposition (SSS)***

En este artículo presentamos un modelo analítico para calcular el rendimiento del protocolo MAC de la LAN inalámbrica Conocido como *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance* (CSMA / CA) - teniendo en cuenta la variabilidad del algoritmo de *backoff*. Los efectos del cambio de rates en relación al número de usuarios sobre un *throughput* normalizado y el retardo de los paquetes son mostrados. Por otra parte la variación de los parámetros de *backoff* son analizados para dar juicios sobre el retardo y *throughput*.

En este trabajo, se establece un modelo de Markov para una estación teniendo el efecto de otras estaciones y el uso de algunas variables globales dependientes del estado. Matemáticamente se representa el *throughput* y el retardo utilizando una técnica llamada *Single Station Superposition* (SSS) mediante la obtención de valores globales de los parámetros de un número finito de nodos (Khattab, El-Hadidi, Mahmoud, Mourad, & Hebat-AllahM, 2002).

- ***Throughput Modelling and Fairness Issues In CSMA/CA Based Ad-Hoc Networks***

Este Trabajo se propone un modelo para medir el caudal o throughput en redes en ad-hoc utilizando el protocolo CSMA/CA. Se Utiliza una análisis de markov para redes CSMA/CA con una topología en general; se utilizan las simulaciones para medir el rendimiento, teniendo en cuenta la equidad en el acceso con CSMA/CA y los *frames* RTS/CTS (Wang & Kar, 2005).

- ***Throughput and Delay Analysis of the IEEE 802.11e EDCA Saturation Singapore2005***

El documento introduce un modelo para mejorar la distribución de canales en condiciones de saturación (EDCA). El modelo captura la operación de los (IFS) y La ventana de contención, de esta manera se analiza el rendimiento del *throughput* y retardo en mecanismos EDCA (Tantra, Heng Foh, & Mnaouer, 2005).

- ***Near Theoretical Maximum Throughput Limits of CSMA/CA RTS CTS Protocol in IEEE 802.11 Wireless Networks Using Active Node Back-off Algorithm***

Esta investigación propone una nueva técnica de ventana de contención teniendo en cuenta el número de estaciones calculada con el algoritmo de *backoff*, identificado con el nombre de Nodo Activo Back-off Algoritmo (ANBA), y mejorar el desempeño del protocolo CSMA/CA RTS CTS. El rendimiento de ANBA se mide en términos de parámetros de rendimiento de tasas de capa de enlace de datos. Se introduce el modelo basado en la cadena de Markov para calcular el rendimiento mejorado en un sistema saturado (Sarththong & Suvepon, 2011).

- ***OFDMA-Based Medium Access Control for Next-Generation WLANs***

El artículo propone un modelo para reducir las colisiones mediante OFDM en la fase de solicitud de la transmisión y facilitar el acceso al canal. Las oportunidades de transmisión se asignan a partir de un punto de acceso y pueden programar los flujos de tráfico tanto en tiempo y en frecuencia; Para mejorar la eficiencia del acceso se combina CSMA con OFDMA buscando minimizar el acceso aleatorio al canal, además importante resaltar la diferencia con IEEE 802.16 MAC, ya que es más adecuado para tráfico heterogéneo, mayor flexibilidad y operación en diferentes entornos (Alnuweiri & Yaser, 2009).

- ***Throughput and QoS Optimization in IEEE 802.11 WLAN***

El artículo propone un modelo analítico para soportar múltiples clases de tráfico brindando QoS. Está basado en los diferentes parámetros de control de acceso y la ventana de contención (CW) y el espacio entre tramas (IFS), se deriva de un modelo matemático para caracterizar el comportamiento de MAC. En Los resultados muestran un alto throughput, garantizando QoS (Zhaoy, Zhang, Zihua, & Zhu, 2007).

- ***Throughput Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function considering Capture Effects***

Actualmente IEEE 802.11 es el estándar por defecto para redes inalámbricas. El estándar trabaja en la capa de control de acceso al medio y la capa física. El alcance de IEEE 802.11 trabajando grupos (GWs) es propuesto y se desarrolla en MAC y capa física para el manejo de estaciones móviles y portátiles. En este estándar, la capa MAC opera en la parte superior de la capa física. El rendimiento del acceso al medio es operado mediante CSMA/CA. En este *paper*, se presenta un modelo analítico que estudia el performance de saturación de la capa MAC de

IEEE 802.11 con efectos de captura. Se extiende un modelo inicial de cadenas de Markov multidimensional propuesto por Bianchi que caracteriza el comportamiento de los efectos de la captura **(Kumar, P, & Krishnan, 2010)**.

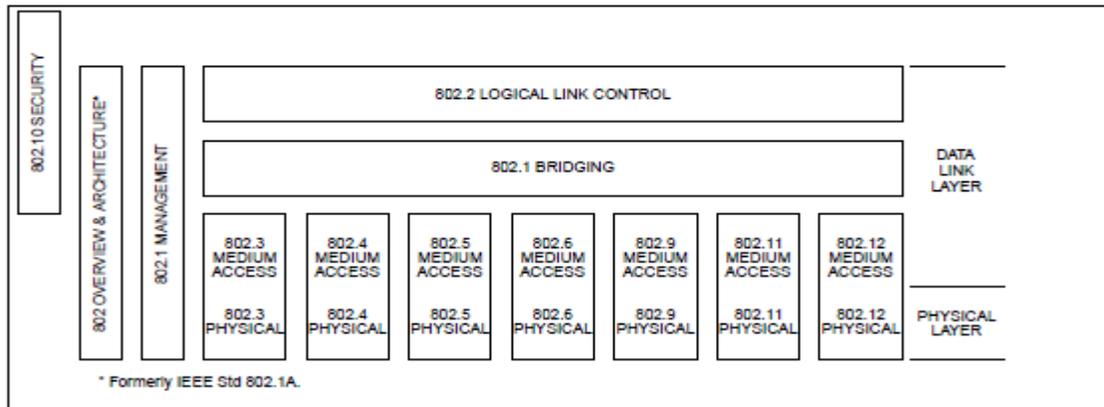
- ***Effect of adjacent-channel interference in IEEE 802. 1 WLANs***

Los canales de frecuencia son un recurso escaso para frecuencias no licenciadas en IEEE 802.11. Los recursos de radio actuales están limitados a un número pequeño de canales solapados, siendo tres posibles canales en la banda de 2.4 GHz. En este artículo se estudia y cuantifica el efecto de la interferencia de canal adyacente, que es causado por la transmisión en parte de canales solapados. Se propone un modelo que es capaz de determinar bajo qué circunstancias es justificado el uso de canal adyacente. El modelo también puede ser usado para ayudar a diferentes mecanismos de administración de recursos de radio **(Villegas & Lopez-Agilera, 2007)**.

1.2 MARCO TEÓRICO

1.2.1 Familia de Estándares 802 Lan/Man. Son estándares referentes a redes de área local (LAN) y metropolitanas (WAN) que limitan su transporte a paquetes de tamaño variable. La familia de los estándares IEEE 802.11 define su actividad en las capas 1 y 2 del modelo OSI. Define siete tipos de tecnologías de acceso al medio asociado al tipo de comunicación, cada una con requerimientos o aplicaciones en particular y otras en proceso de investigación.

Figura 1. Estándar IEEE 802



Fuente: Autor

Familia de tecnologías, estándares IEEE 802:

- IEEE Std 802 *overview and Architecture*. Esta norma proporciona una visión general de la familia de estándares IEEE 802.
- ANSI/IEEE Std 802.1b y 802.1k ISO/IEC 15802-2. Define una arquitectura compatible con el modelo OSI, servicios y protocolos para uso en redes LAN y WAN para llevar a cabo administración remota.
- ANSI/IEEE Std 802.1d ISO/IEC 15802-3 Control de acceso al medio MAC Implementación de bridge. Especifica una arquitectura y protocolo para la interconexión de IEEE 802 LANs.
- ANSI/IEEE STD 802.1E ISO/IEC 15802-4 *System Load Protocol*. Especifica el conjunto de servicios y protocolos para aspectos de gestión relacionados con la carga de los sistemas en los estándares IEEE 802 LANs.

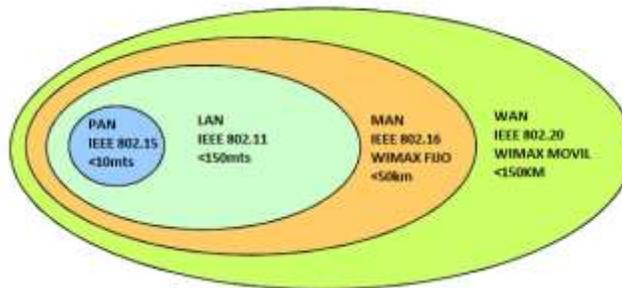
- IEEE Std 802.1F. Definiciones y procedimientos para IEEE 802 manejo de información.
- ANSI/IEEE Std 802.1 G ISO/IEC 15802- 5 Control de acceso al medio (MAC). Especifica las extensiones para la interconexión, Utilizando tecnologías de comunicación No-Fi, geográficamente separadas IEEE 802 LANs debajo del control de enlace lógico LLC.
- ANSI/IEEE Std 802.2 ISO/IEC 8802-2 Control de enlace Lógico.
- ANSI/IEEE Std 802.3 ISO/IEC 8802-3 CSMA/CD Método de acceso a la capa física especificaciones.
- ANSI/IEEE Std 802.4 ISO/IEEE 8802-4 *Token Passin Bus Acces Method*
- ANSI/IEEE Std 802.5 ISO/IEC 8802-5 *Token Ring*, especificaciones método de acceso a la capa física.
- ANSI/IEEE Std 802.6 ISO/IEC 8802-6 *Distributed Queue Dual Bus Acces*, Especificaciones para acceso a la capa física
- ANSI/IEEE Std 802.9 ISO/IEC 8802-9 *Integrated Services (IS) interfaces LAN en Medium Aces Control (MAC) y capa física.*
- ANSI/IEE Std 802.10 *Interoperable LAN/WAN Security*
- IEEE Std 802.11 ISO/IEC DIS 8802-11 *Wireless LAN médium Acces Control (MAC) y especificaciones capa física*

- ANSI/IEE Std 802.12 iso/iecdis 8802-12 *Deman Priority Access Method*, especificaciones capa física y Repetidores. **(Stallings, 2000)**

1.2.2 Redes Inalámbricas. Se entiende por red inalámbrica a una comunicación entre dos o más dispositivos en la que no existe un medio de comunicación guiado o tipo cableado. “En medios no guiados, tanto la transmisión como la recepción se llevan a cabo mediante antenas. En la transmisión, la antena radia energía electromagnética en el aire, en la recepción la antena capta las ondas electromagnéticas del medio que la rodean” **(Stallings, 2000, p.112)**. Este tipo de características brindan ventajas como: rápida instalación, escalabilidad, mejor tolerancia a cambios, fácil administración y la posibilidad de movilidad mientras su cobertura lo permita. Por otra parte, es importante tener cuenta que la pérdida de velocidad de transmisión respecto a otro tipo de tecnologías cableadas, las diferentes interferencias y el manejo de un medio compartido son desventajas en este tipo de comunicaciones.

La popularidad de este tipo de redes crece a medida que sus prestaciones aumentan y de igual manera surgen como solución a nuevas aplicaciones con gran impacto. Este tipo de tecnología puede ser clasificada y utilizada de forma práctica en diferentes entornos de acuerdo a la cobertura requerida, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Categorías de redes Inalámbricas según cobertura



Fuente: Autor

Tabla 1. Características tipos de redes

	PAN	LAN	MAN	WAN
Tipo	Privada	Privada, Publica	Privada, Publica	Privada, Publica
Distancia entre terminales	<10 m	100 m	10 km - < 100 km	100 km - 10.000 km
Áreas	Oficinas	Oficinas, Edificios	Varias LAN, Ciudades	Países, continentes
Tecnologías	Bluetooth, Ethernet, Infrarrojo, IEEE 802.15, etc	Ethernet, Token Ring, FDDI, Apple talk, IPX etc	ATM, Fram Relay, xDSL, WDM, ISDN, Wimax, PPP etc	ATM, Fram Relay, X.25, E1,T1, GSM, TDMA, xDSL, PPP etc
Medio de transmisión	Cobre, microondas	Cobre, microondas, coaxial, fibra óptica	Cobre, Fibra óptica , microondas	Fibra óptica, microondas , celular y vía satélite

Fuente: Autor

1.2.3 Estándares IEEE 802.11. El estándar IEEE 802.11 conocido como WIFI (*Wireless Fidelity*) fue publicado en el año 1997 por el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Enginners*) fue el primer estándar oficial WLAN (redes locales inalámbricas) cuya velocidad de transmisión alcanza de 1Mbps hasta 2Mbps, operando sobre radiofrecuencia o infrarrojo en la banda de 2.4 Ghz ; siendo este impulsado y desarrollado por un grupo de compañías conocido como Wifi Alliance una organización sin ánimo de lucro, con participación de grandes empresas como 3com, Aironet, Nokia, Harris, Lucent y otros.

EL estándar define el modo de acceso al medio bajo el protocolo CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Acces/Collision/Avoidance*, Múltiple acceso por detección de portadora evasión de colisiones). Debido a la bajas prestaciones que ofrecía el estándar en su versión original no fue una solución viable en su momento, sin embargo su desarrollo continuo dando origen al estándar IEEE 802.11 b el cual tuvo gran aceptación en la mayoría de las empresas.

Dentro de la evolución y mejoras que ha presentado el estándar se han generado varias versiones; cada versión tiene compatibilidad con las versiones anteriores, pero cada una de ellas agrega nuevas características que versiones anteriores no pueden soportar; es importante resaltar que en el caso que se esté trabajado un híbrido de diferentes versiones, el estándar trabajará con la versión más baja compatible. Las diferentes versiones trabajan como base sobre el estándar IEEE 802.11-1997, las cuales afectan la capa de nivel físico y la subcapa MAC (**Crow, 2002**).

1.2.3.1 Estándar IEEE 802.11b. Surge como la evolución del estándar original IEEE 802.11 en 1999, con capacidades de transmisión más elevadas (5.5Mbps y 11 Mbps), dependiendo de las condiciones de conexión, en una banda de 2.4 Ghz. La cobertura que puede alcanzar esta versión del estándar depende de la velocidad de transmisión, la cantidad de terminales conectados, potencia de transmisión, ganancia de las antenas, amplificadores y de las condiciones propias del medio; teóricamente especifica en espacios abiertos un alcance de 120 metros (11Mps), y 460 metros (1Mbps), y en espacios cerrados 30 metros (11Mbps) y 90 metros (1mps).

1.2.3.2 Estándar IEEE 802.11a. Esta variación del estándar IEEE 802.11 aparece también en el año 1999 basado en el estándar original, se diferencia principalmente de los anteriores por operar en la banda de los 5Ghz y utilizar como técnica de modulación OFDM (Orthogonal frequency división mulplexing), la

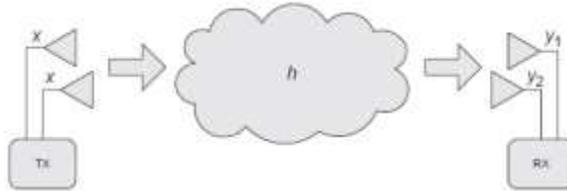
cual permite tasas de transmisión de hasta 54 Mbps; la cobertura es inferior comparada con la banda de 2.4 Ghz, alcanzando 30 metros en espacios abierto frente a los 100 metros en 2.4 Ghz

1.2.3.3 Estándar IEEE 802.11g. Este nuevo estándar surge en el 2003, con mejoras en la velocidad de transmisión que ofrecía la banda en b de 2.4 Ghz, alcanzando los 54 Mbps teóricos, con la gran ventaja de la compatibilidad con el estándar IEEE 802.11 b, y con cobertura entres 50 y 100 metros en espacios abiertos.

1.2.3.4 Estándar IEEE 802.11n. Estándar aprobado en el ancho de 2009, alcanza velocidades de transmisión teóricas de 540 Mbps aproximadas gracias a la incorporación del concepto MIMO (Multiple Input, Multiple Output, múltiples entradas múltiples salidas); MIMO implica utilizar varios transmisores y varios receptores para aumentar la tasa de transferencia y el alcance. MIMO aprovecha la propagación por multitrayectoria para mejorar el rendimiento en vez de tratar de eliminar los efectos de las reflexiones en el trayecto de propagación como lo hacen los demás estándares.

- **MIMO.** El estándar IEEE 802.11 inicialmente solo soportaba la posibilidad de trabajar con un solo arreglo de antenas, sin embargo con la implementación del concepto MIMO esto cambio radicalmente, dando la posibilidad de incorporar al sistema varios arreglos de antenas mejorando de esta forma la velocidad de transmisión sin necesidad de aumentar la potencia de transmisión y aprovechando mejor el espacio espectral. Este tipo de sistema ha sido implementado en diversas tecnologías de transmisión como lo son IEEE 802.16 WIMAX, 4G, IEEE 802.20, IEEE 802.11n etc.

Figura 3. Sistema MIMO (múltiples entradas, múltiples salidas)

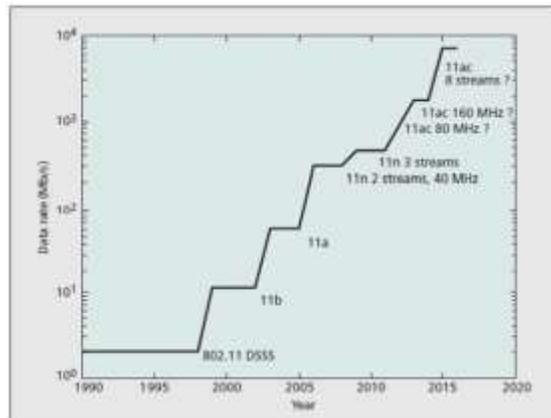


Fuente: Eldad Perahia y Robert Stacey, "Next Generation Wireless LAN", 2008.

1.2.3.5 Estándar IEEE 802.11ac. El comité de estándares IEEE 802 crea dos nuevos grupos de trabajo (TGs) 11ac y 11ad con el objetivo de mejorar WLAN y alcanzar el rendimiento de redes cableadas. El estándar 11ac opera en la banda de 5Ghz (no soporta la banda de 2.4 Ghz). Esto debería teóricamente permitir tasas de transferencia de al menos 1Gbps. Las nuevas especificaciones se basan en el estándar IEEE 802.11n, se amplía el ancho del canal a 80 Mhz hasta 160 Mhz, adicionalmente se usa MIMO con 8 canales espectrales, altos esquemas de modulación (256-QAM) y otras características mejoradas como formación del haz (Al-Ghazu, 2013).

1.2.3.6 Evolución Capacidades IEEE 802.11

Figura 4. Data rates IEEE 802.11 a/b/g/n



Fuente: Van Nee, R., "Breaking the Gigabit-per-second barrier with 802.11AC," Wireless Communications, IEEE, vol.18, no.2, pp.4,4, April 2011

Tabla 2. Comparación estándares IEEE 802.11

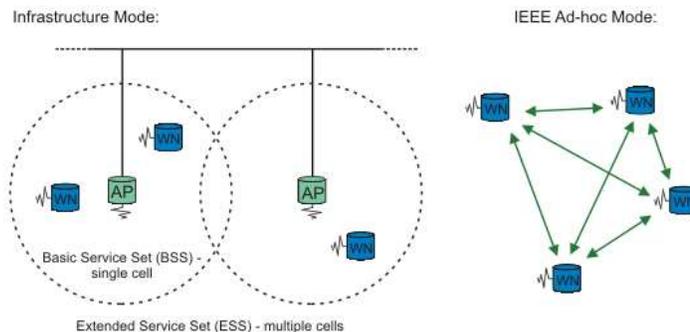
	802.11	802.11b	802.11g	802.11a	802.11n	802.11ac
Rate Máximo	2Mbps	11Mbps	54Mbps	54Mbps	540Mbps	1.2Gbps
Banda de Operación	IR,2.4GHz	2.4GHz	2.4GHz	5GHz	2.4GHz,5GHz	5GHz
Alcance	100mts	100mts	100mts	100mts	150mts	80-100mts
Canales no Solapados	3	3	3	23	3(2.4GHz), 23(5GHz)	23
Fuente de Interferencia	Bluetooth, microondas 2.4GHZ, etc	Bluetooth, microondas 2.4GHZ, etc	Bluetooth, microondas 2.4GHZ, etc	Teléfonos Inalámbricos, Hornos Microondas	2.4GHZ (Las mismas que para 802.11b/g) 5GHz (Las mismas que para 802,11 ^a)	Teléfonos Inalámbricos, Hornos Microondas
Estándar Aprobado	Si	Si	Si	Si	Si	Si
Certificación Wi-Fi	Si	Si	Si	Si	Si	Si

Fuente: Autor

1.2.3.7 Topología IEEE 802.11. El concepto de arquitectura para redes inalámbricas IEEE 802.11 se basa en pequeñas células que concentran cierta cantidad de abonados, existen dos tipos de arquitecturas: de tipo Ad-Hoc y de tipo Infraestructura:

- **Ad-hoc:** Todos los dispositivos se conectan independientemente, sin la intervención de un equipo que gestione las conexiones,. En el trabajo propuesto no se manejará redes de este tipo.,
- **Infraestructura:** Todos los dispositivos se comunican por medio de un equipo centralizado AP (*Acces Point*) que permite el acceso a los dispositivos y administra las conexiones. El AP escucha todas las conexiones y las reparte, ya sea dentro del BSS (*Basic Service set*) o a través del DS (*Distribution Service*), que suele ser un red una red Ethernet o un punto a punto de gran capacidad inalámbrico. Cuando el sistema crece y se agregan varios BSS que genera ESS (*Extended Service set*), permitiendo el salto de celdas de los abonados según disponga la cobertura de las redes. El foco de la propuesta se basa en este tipo de arquitectura la cuál esta implementa en la empresa Aros Comunicaciones.

Figura 5. Topología IEEE 802.11



Fuente: Hep.By, Linux Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) IPv6 HOWTO: What about IBSS (IEEE ad-hoc mode)?, tomado de: <http://www.hep.by/gnu/linux/OLSR-IPv6-HOWTO/intro.html>

1.2.3.8 The Independent BSS Ad Hoc Network. Es el más básico de tipo de IEEE 802.11 LAN, consiste como mínimo de dos estaciones que pueden

comunicar directamente. Este tipo de configuración suele realizarse sin planificación y es identificada como del tipo ad-hoc.

1.2.3.9 STA To BSS asociación Dinámica. La asociación entre la estación STA y un BSS es dinámica, la estación se conecta mientras esté dentro del rango de cobertura del BSS o desconecta si esta por fuera del mismo. Para que la STA sea miembro de el BSS debe pasar por el proceso de asociación el cual implica el uso de *distribution system service* (DSS), el cuál es descrito en médium *acces control* (MAC) y PHY físicas especificaciones.

1.2.3.10 DistributionSystem DS. Las limitaciones del medio determina la distancia soportada a la cual se pueden conectar las estaciones. En el caso que se encuentre un BSS también se pueden añadir más BSS formando una arquitectura extendida y ampliando la cobertura, este componente se identifica como el *DistributionSystem* (DS).

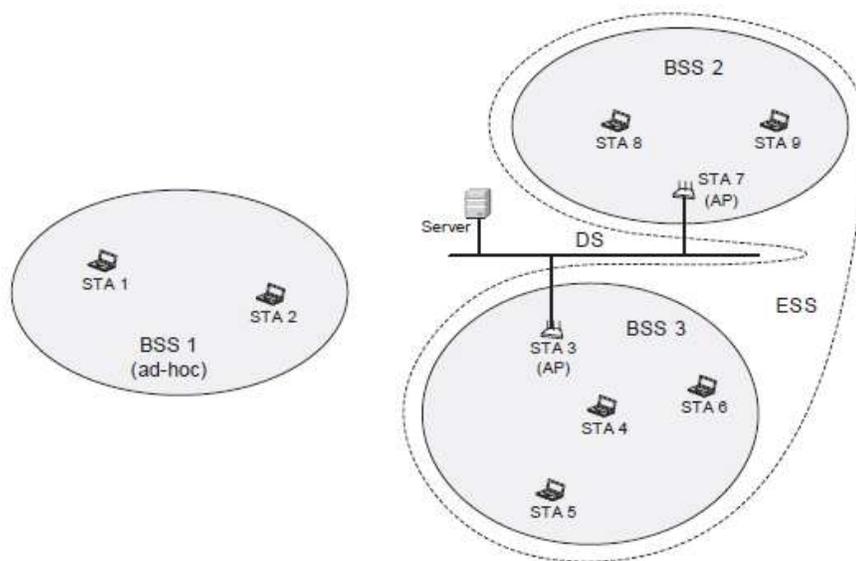
IEEE 802.11 separa lógicamente el medio físico (*Wireless Medium WM*), del sistema de distribución (*Distribution Systems Medimum DSM*), Cada medio lógico es utilizado para diferentes propósitos en diferentes componente de la arquitectura. La arquitectura IEEE 802.11 especifica de maneja independiente las características físicas y implementaciones específicas.

Un DS permite compatibilidad con los diferentes dispositivos móviles, proporcionando los servicios lógicos necesarios para manejar la dirección destino cartografía y perfecta integración con diferentes BSS. Un *Acces Point* (AP) y una STA proveen acceso a DS servicios.

Los datos se mueven entre los BSS en DS a través del AP y las estaciones, por lo tanto dispositivos direccionables. Las direcciones Utilizadas por el AP para la comunicación en WM y en el DSM NO SON necesariamente las mismas

1.2.3.11 Extended Service Set (ESS): Amplia Cobertura En Redes. El DS y BSSs permiten IEEE 802.11 crear redes inalámbricas de diferente complejidad. IEEE define este tipo de redes como *extended services set network* ESS aparece en al capa LLC Y EN IBSS networks. Dentro del ESS estaciones pueden comunicarse y estaciones móviles pueden desplazarse de BSS a otra BSS de forma transparente gracias a LLC (**Matthew, 2002**).

Figura 6. BSS, DS, y ESS



Fuente: Next Generation Wireless LAN, Eldad Perahia y Robert Stacey

1.2.4 Cobertura. Para IEEE 802.11 no existe un área de cobertura exacta realmente, las características de propagación son dinámicas e impredecibles, Pequeños cambios en la posición o dirección pueden dar lugar a grandes diferencias en la señal. Efectos similares se producen si una STA es fija o móvil, cualquier movimiento puede afectar la propagación.

La cobertura de una red WLAN puede variar dependiendo del ambiente donde sea implementado, ya sea de tipo *Indoor* (ambientes de espacios cerrados) ó *outdoor* (ambientes de espacios abiertos). La cobertura en ambientes *Indoor* es bastante inferior a los *Outdoor*, donde línea de visión (LOS) entre los enlaces en muchos casos es nula, limitado a espacios de casas, oficinas o sectores de un edificio, donde las condiciones de la estructura física de las instalaciones limitan la propagación de la señal inalámbrica; condiciones como la cantidad de muros o paredes, ventanas, el material propio de cada obstáculo que obstruya la señal inalámbrica atenúa la intensidad de la señal disminuyendo su alcance o cobertura. En ambientes *outdoor* la cobertura es considerablemente mayor, se espera mejor cobertura y calidad de los enlaces inalámbricos, dependiendo de la ubicación estratégica de los AP y la posición de las estaciones inalámbricas podría alcanzar cobertura del orden de kilómetros.

El estándar IEEE 802.11 maneja un serie de modulaciones que le proporcionan cierta capacidad de transmisión y alcance; dependiendo de la distancia y condiciones del medio el equipo puede disminuir su capacidad de transmisión, cambiando la modulación para conservar la conectividad con los dispositivos.

1.2.5 Servicios De Redes IEEE 802.11. El estándar IEEE 802.11 ofrece servicios para su implementación que definen propiamente las características de la tecnología como tal. Tres de los servicios son usados para el transporte de los datos, los otros servicios restantes corresponden a operaciones de gestión. Los servicios son descritos en la siguiente tabla.

Tabla 3. Servicios IEEE 802.11

SERVICIOS 802.11		
Servicio	Estación o servicio distribución	Descripción
Distribución	Distribución	Servicio utilizado para determinar la dirección destino en una red de tipo infraestructura
Integración	Distribución	Entrega a una trama 802.11 a otra red fuera del sistema inalámbrico
Asociación	Distribución	Usada para establecer conexión con el AP que sirve como puerta de enlace de una estación en particular
Reasociación	Distribución	Se usa para cambiar de AP que sirve como puerta de enlace de una estación en particular
Des asociación	Distribución	Remueve la estación de la red inalámbrica
Autenticación	Estación	Establece la identidad del terminal antes de asociarse
Des autenticación	Estación	Se usa para cancelar la autenticación
Privacidad	Estación	Provee protección a la red
Entrega MSDU	Estación	Entrega los datos al receptor

1.2.5.1 Distribución. Este servicio utilizado para estaciones móviles en una red de tipo infraestructura enviando los datos cada vez sea pertinente. Una vez la trama ha sido aceptada en el punto de acceso es, es usado el sistema de distribución para entregar la trama a su destino. Cualquier comunicación que utiliza el punto de acceso viaja a través del sistema de distribución, incluyendo la comunicación entre dos estaciones asociadas al mismo punto de acceso.

1.2.5.2 Integración. Integra los servicios que provee el sistema de distribución; permite la comunicación del sistema de distribución en una red IEEE 802.11. Las funciones de integración son especificadas por el sistema de distribución.

1.2.5.3 Asociación. La entrega de las tramas de las estaciones móviles es hecha posibles debido a que al registro o asocio de estaciones móviles con los puntos de acceso. El sistema de distribución puede usar la información del registro para determinar el punto de acceso utilizado para cualquier estación móvil. Estaciones móviles no asociadas

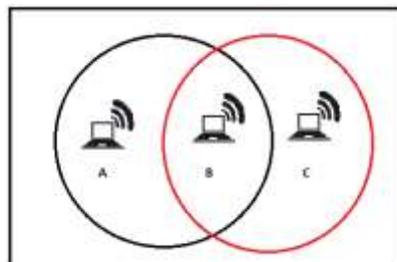
1.2.5.4 Reasociación. Cuando una estación móvil se mueve entre zonas servicios básicos dentro de un área de servicio extendido, debe evaluar la fuerza de la señal y prepararse para cambiar de punto de acceso asociado. Las re asociaciones son iniciadas por la estación móvil cuando la fuerza de la señal indica que asociación diferente sería beneficiosa; Nunca son iniciadas por el punto de acceso. Después que la re asociación es completada, el sistema de distribución actualiza sus registros de localización para reflejar accesibilidad de la estación móvil a través de un punto de acceso diferente.

1.2.5.5 Desautenticación. La des asociación termina la relación de autenticación. Debido a que la autenticación se necesita antes de autorizar el uso de la red, un efecto secundario es terminar cualquier asociación actual.

1.2.5.6 Privacidad. Fuertes controles físicos pueden prevenir gran número de ataques en la privacidad de los datos en una LAN cableada. Atacantes deben obtener acceso al medio físico de la red antes de intentar espiar el tráfico. En redes cableadas, el acceso físico es un subconjunto de accesos físicos de otros recursos computacionales. Por diseño, el acceso físico a redes inalámbricas es comparativamente más simple en cuestión de usar los métodos de la antena y la modulación utilizada. Para ofrecer un nivel similar de privacidad, IEEE 802.11 ofrece un servicio opcional de privacidad llamado Wired, equivalente a privacidad WEB. WEB es una seguridad vulnerable, demostrada que se puede romper fácilmente con un ordenador portátil. Sin embargo se disponen de otro mecanismo de privacidad más robusta conocida como WPA y su evolución WPA2 con sus respectivas derivaciones, demostrando gran fortaleza si se usan con las recomendaciones mínimas en su implementación (**IEEE Computer Society, 2007**).

1.2.6 Problema Nodo Escondido. En redes Ethernet, las estaciones dependen de la recepción de las transmisiones para el rendimiento del mecanismo de acceso al medio CSMA/CD. Una estación puede comunicarse libremente con cualquier otra en un medio cableado. En redes inalámbricas dos estaciones conectadas a la misma pueden presentar problemas para comunicarse entre sí, este problema se conoce como problema de nodo escondido oculto como se ilustra en la siguiente figura:

Figura 7. Problema nodo oculto

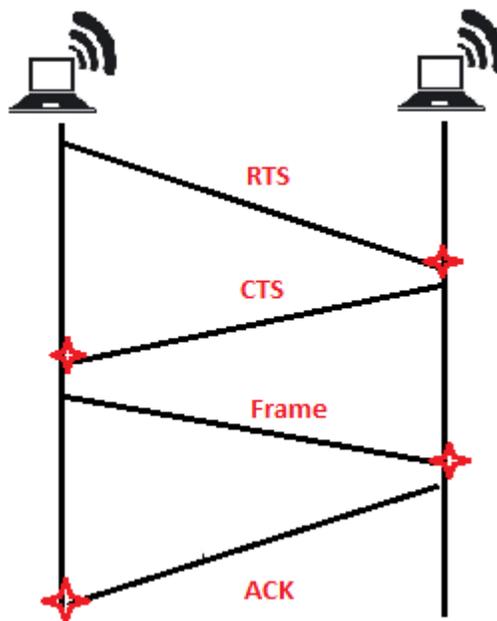


Fuente: Autor

En la figura, el nodo B se puede comunicar con los nodos A y C, pero la comunicación entre los nodos A y C no es posible. Es posible que la cobertura entre los nodos A con B, y C con B sean lo suficientemente distantes para que las ondas de radio entre A y C no tengan suficiente fuerza para su comunicación directa; desde esta perspectiva los nodos A y C no podrán comunicarse dando lugar al problema de nodo oculto. Dado el caso que los nodos A y C realicen una transmisión simultánea producirá una colisión, además los nodos A y C no tendrán ningún indicador de error ya que la colisión se ocasiono en el nodo B.

Estos Problemas son difíciles de detectar en redes inalámbricas porque el transmisor inalámbrico generalmente trabajan en *half-Duplex*, y es posible ellos no transmitan ni reciban por algún tiempo. Para prevenir colisiones, IEEE 802.11 permite a las estaciones usar señal *Request to Send (RTS)* y *Clear to send (CTS)*.

Figura 8. RTS/ CTS



Fuente: Autor

En el caso que la estación A desee transmitir, inicia el proceso enviando una trama RTS. Las RTS tramas tienen un papel importante en las comunicaciones inalámbricas, reservando el medio físico para realizar la transmisión y esperando la respectiva confirmación por parte del receptor, de esta forma espera silenciar las otras estaciones para que puedan escucharlo. Si la estación destino recibe el RTS, ella contestará por medio de un mensaje CTS silenciando a las estaciones inmediatamente vecinas. Una vez el intercambio de RTS/CTS sea completado, el nodo A puede transmitir sus datos sin preocuparse por colisiones o interferencia de los nodos ocultos

El procedimiento RTS multitrama/transmisión CTS consume una buena cantidad de capacidad, especialmente debido a la latencia adicional incurrida antes que la transmisión pueda comenzar. Como resultado solo se usa en entornos de alta capacidad en contención significativa en la transmisión, para entornos de menor capacidad no es necesario. Se puede controlar el procedimiento RTS/CTS estableciendo un umbral RTS si el controlador del dispositivo de la tarjeta IEEE 802.11 le permite ajustar la misma (**Perahia & Stacey, 2008**).

1.2.7 Capas iee 802.11. EL estándar IEEE 802.11 trabaja sobre las dos primeras capas del modelo OSI, física (PHY) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC).

1.2.7.1 Capa Física (PHY). La capa física define todas las características eléctricas y tipo de señal para la transmisión de la información. La capa física está conformada por dos subcapas más:

PCLP *Physical Layer Convergente Procedure*: Subcapa de procedimiento de convergencia de la capa física, se encarga de adaptar las condiciones del medio, además es el mecanismo que mapea las tramas MAC en el medio físico.

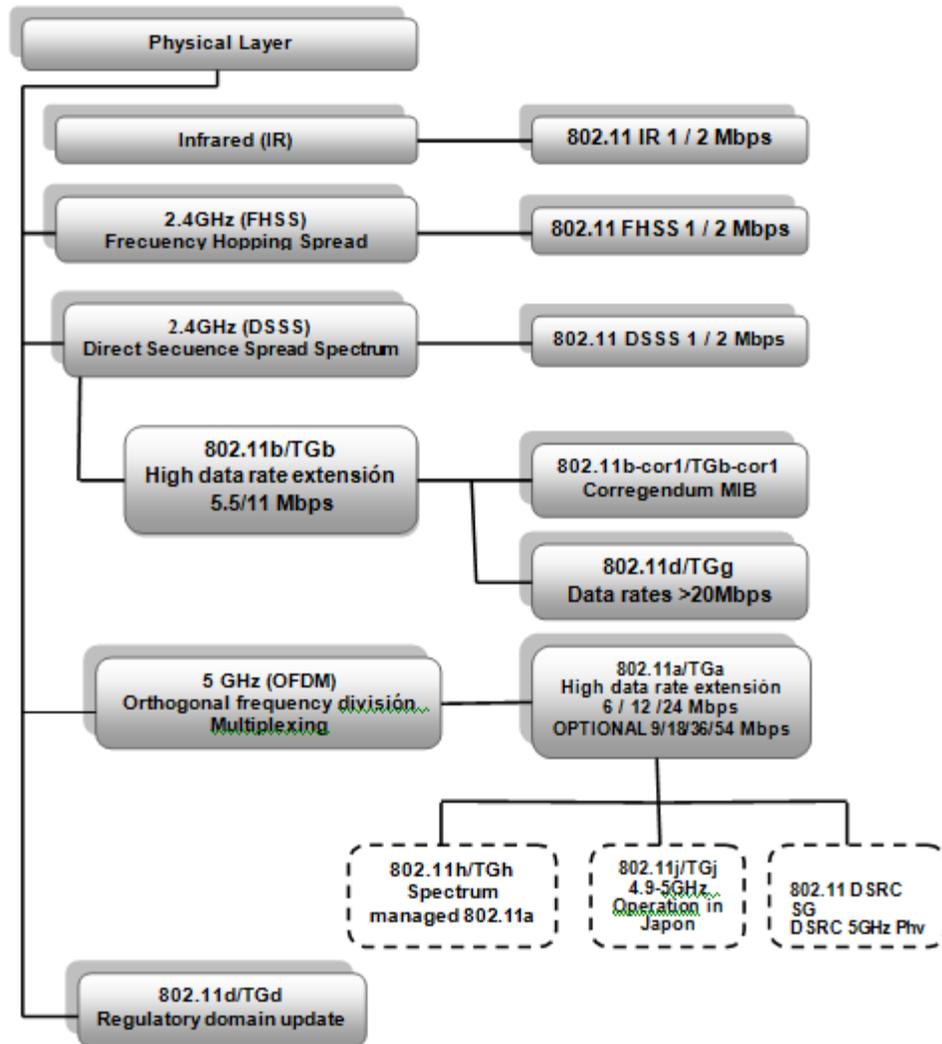
PMD *Physical Medium Dependent*: Subcapa dependiente del medio físico, La subcapa PMD proporciona una interfaz de transmisión utilizada para enviar y recibir datos entre dos o más STA.

En el estándar IEEE 80.11 se estandarizaron tres capas físicas publicadas en 1997:

- Capa física de radio de espectro disperso de salto en frecuencia (FH, *Frequency-Hopping*)
 - Capa física de radio de espectro disperso de secuencia directa (DS, *Direct-Sequence*)
 - Capa física de Luz infrarroja (IR, *Infrared Light*)
-
- **Frecuencia:** Los estándares IEEE 802.11 b/g/n usan la banda de los 2.4 Ghz definida por la UIT para uso científico médico e industrial. El intervalo de banda permitido en Colombia para uso libre es 2400 a 2483.5 Mhz según la resolución número 002544 de 14 octubre del 2009 emitido por el MINTIC (Ministerio de las tecnologías de la información y las comunicaciones).

El estándar IEEE 802.11 a utiliza la banda de los 5 Ghz, permitiendo en Colombia un intervalo en las bandas de frecuencia para uso libre de 5150 a 5850 Mhz según la resolución ya mencionada. **(MINTIC, 2009)**

Figura 9. IEEE 802.11 Physicalayer



Fuente: Wireless Communications and Networks Sixth Edition, Williant Stallings

- **IR (Infrarrojos).** Ha sido netamente de carácter experimental, no se ha comercializado
- **FHSS (FrecuncyHoping Spread Spectrum).** Basado en concepto de transmitir en una frecuencia por determinado tiempo, después aleatoriamente saltar a otra; el transmisor envía al receptor señales de sincronización contienen la secuencia y la duración de los saltos. En el estándar IEEE 802.11 utiliza las bandas de

frecuencia alrededor de 2.4 Ghz con *data rates* entre 1Mbps – 2Mbps, el número de canales disponibles para Japón son 23, y para USA 70 canales; se hicieron los primeros estudios bajo esta modulación; permitía la coexistencia de varias en el mismo lugar manejando niveles de transmisión relativamente altos.

- **DSS (DirectSequence Spread Spectrum).** Usa frecuencias de 2.4 Ghz, obteniendo velocidades de transmisión de 1Mbps y 2 Mbps, trabajando en la misma frecuencia de FHSS; Esta tecnología fue mejorada y desplazado a FHSS. La definición de capas *MAC* y *PHY* específicas por parte del estándar IEEE 802.11, no sólo posibilita la implementación de dispositivos sencillos para realizar el encaminamiento o *bridging* entre redes, sino que también permite a las redes inalámbricas realizar control de errores optimizados para este tipo de comunicación. Se pretende así, que los errores producidos por la transmisión inalámbrica no lleguen a capas superiores del protocolo. De no ser así, deberíamos llegar a niveles superiores del modelo *OSI* para corregir los errores, con lo que la retransmisión de los paquetes se haría de manera más costosa, tanto en ancho de banda como en tiempo de proceso. Esto podría causar una sobrecarga de retransmisiones influyendo de manera drástica en la eficiencia de estas redes.

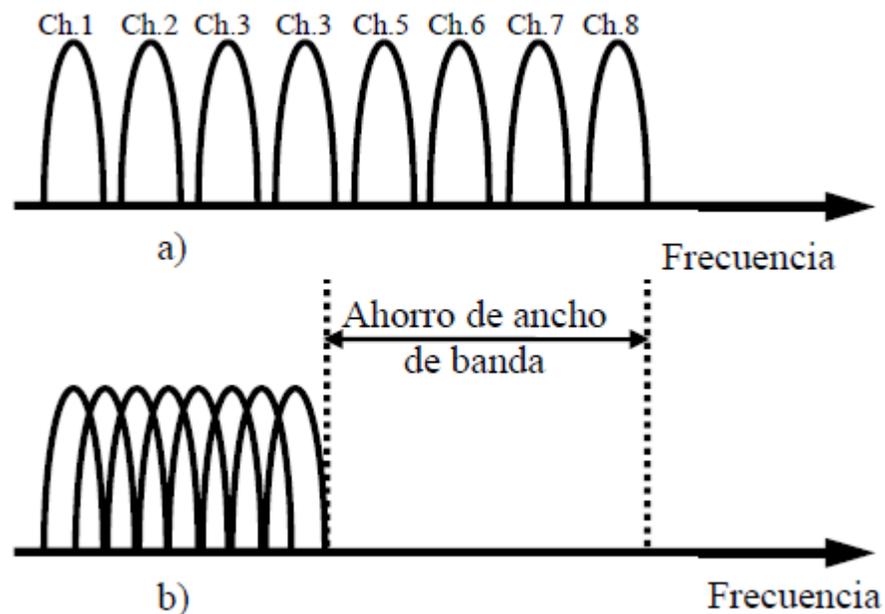
Tabla 4. IEEE 802.11 Physical layer Standards

	802.11	802.11 ^a	802.11b	802.11g
Available Bandwidth	83.5 Mhz	300 Mhz	83.5 Mhz	83.5 Mhz
Unlicensed frequency	2.4-2.4835 GHz DSSS, FHSS	5.15-5.35 Ghz OFDM 5.725-5.825 GHz OFDM	2.4-2.4835 GHz DSSS	2.4-2.435 GHz DSSS, OFDM
Number of nonoverlapping channels	3 (indoor/outdoor)	4 indoor 4(indoor/outdoor) 4 outdoor	3 (indoor/outdoor)	3 (indoor/outdoor)
Data rate per channel	1.2 Mps	6,9,12,18,24,36,48,54 Mbps	1,2,5.5,11 Mbps	1,2,5.5,5,8,11,12,18,24,36,48,54 Mbps
Compatibility	802.11	Wi-Fi5	Wi-Fi	Wi-Fi at 11 Mbps and below

Fuente: Wireless Communicationsa and Networks Sixth Edition, Williant Stallings

- **Modulación Por División Ortogonal De Frecuencia (OFDM).** OFDM es un tipo de modulación basada en FDM (Multiplexación por división de frecuencia) adopta por los estándares IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, y el reciente IEEE 802.11c, donde se utilizan las sub portadoras para transportar información en determinadas sub bandas, utilizando partes iguales de su espectro pero diferenciándose por propiedades de ortogonalidad. OFDM trabaja enviando varias señales simultaneas pero en diferentes frecuencias sumando las subportadoras ortogonales, cada subportadora se modula independientemente ya sea con QAM (Modulación de fase y amplitud) o PSK (modulación de fase); OFDM ha sido adoptada por los estándares IEEE 802.11a, IEEE 802.11g, y el reciente IEEE 802.11c .

Figura 10. Modulación por división ortogonal de frecuencia



Fuente: Autor

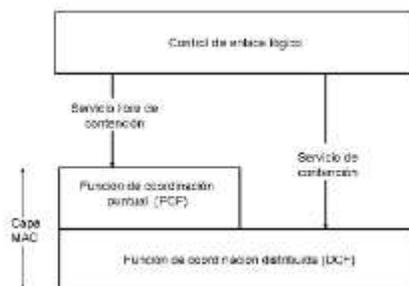
1.2.8 Control De Acceso Al Medio En IEEE 802.11. La capa MAC de IEEE 802.11 se encarga de los procedimientos de control de acceso a los canales, del direccionamiento de PDU, del formato de tramas, comprobación de errores,

fragmentación y reensamblado. Para la entrega fiable de datos libre de errores se emplean tramas de confirmación (ACK) que se envían a la estación origen del mensaje. Si en un intervalo de tiempo no se recibe la confirmación, la fuente retransmite la trama.

Se consideran dos métodos de control de acceso al medio: Acceso Distribuido y Acceso Centralizado. El Acceso distribuido se basa en un protocolo en el que la decisión para transmitir es asumida por todos los nodos utilizando un mecanismo de detección de portadora (utilizado en redes Adhoc). El Acceso centralizado se basa en un protocolo que implica que una autoridad central es la encargada de la toma de decisiones (utilizado en redes Infraestructura).

En general, es el algoritmo MAC o DFWMAC (*Distribution Foundation Wireless MAC*) que proporciona un mecanismo de control de acceso distribuido sobre el que se ubica un control centralizado opcional. La DCF (*Distributed Coordination Function*) es la subcapa inferior que utiliza un algoritmo de contención para dar acceso a todo el tráfico. Encima de éste se encuentra el PCF (*Point Coordination Function*) que es un algoritmo de acceso centralizado que ofrece un servicio libre de contención. La PCF utiliza las características del DCF para asegurar el acceso a los usuarios.

Figura 11. Arquitectura de protocolos IEEE 802.11



Fuente: Autor

1.2.8.1 Funciones de Administración. La BSS es el bloque fundamental de una red inalámbrica IEEE 802.11. Hay dos tipos de BSS, la BSS independiente (IBSS), que es una asociación ad-hoc de estaciones que se comunican directamente entre sí, y el BSS infraestructura, que es enganchado por medio de un AP y puede ser conectado a un sistema de distribución (DS) y a través del cual se transfieren la mayoría de los datos en la zona cubierta.

Una estación que tenga conocimiento de la existencia de un BSS por medio del escaneo, que está pasivamente buscando *beacons* o activamente probando la existencia de un AP.

Una estación pertenece a una BSS dinámicamente. La estación puede conectarse o desconectarse, la estación puede ser móvil y estar dentro o fuera del área cobertura de la BSS. Una estación empieza a ser miembro de una BSS con el proceso de asociación. Al salir de la BSS, empieza la estación el proceso desasociación. En una ESS compuesta por múltiples infraestructuras BSS's, una estación puede migrar de una BSS a otra BSS con el ESS a través del proceso de reasociación.

1.2.8.2 Beacons. Un AP en modo Infraestructura BSS, periódicamente está enviando tramas *beacons* en forma de *broadcast*. El *beacon* define los periodos programados TBTT (beacon transmission time) y las tramas *beacon* así mismo transmiten lo más cerca el TBTT a posibles terminales en el medio inactivo. La tramas *beacon* lleva la información requerida sobre la red inalámbrica, capacidad información y información para el sistema BSS.

1.2.8.3 Función de Coordinación Distribuida (DCF). Los servicios de contienda implican que cualquier estación con una MSDU en cola para transmitir debe contender para acceder al canal, y una vez que la MSDU es transmitida debe volver a contender en todas las tramas siguientes de la misma fuente. La

subcapa DCF está basada en un algoritmo de acceso múltiple con detección de portadora y evitación de colisión CSMA/CA (*Carrier Sense Multiple Acces with Collision Avoidance* (Crow, 2002).

Una MPDU es una unidad de datos completa que le pasa la subcapa MAC a la capa física. En el campo duración de la cabecera de la MPDU se indica la cantidad de tiempo (en microsegundos) después del final de la presente trama que se necesita para la transmisión exitosa de la trama de gestión o de datos. Las estaciones en la BSS emplean este campo de duración para actualizar su NAV (*Network Allocation Vector*) que les indica el tiempo que deben esperar hasta que la transmisión actual termina y se puede volver a mirar el estado del canal a la espera de que esté vacío. El acceso al medio inalámbrico se controla mediante el uso de unos retardos denominados espacio entre tramas (IFS, *Interframe Space*).

DCF ha sido diseñado para proveer igual probabilidad de acceso al medio a todas las estaciones conteniendo para acceder a él de una manera distribuida. La anterior tecnología DCF no tiene medios para distinguir distintas prioridades en las tramas de usuarios. DCF no contiene los mecanismos para garantizar ancho de banda, retraso de paquetes, límites de retraso o *jitter* para flujos multimedia de gran prioridad. DCF ha sido diseñado básicamente para proveer un servicio del tipo *best-effort*.

1.2.8.4 Función de Coordinación Puntual (PCF). PCF es un método de acceso alternativo implementado sobre DCF, cuya función consiste en un sondeo realizado por un elemento central de sondeos (coordinado puntual, *Point Coordinator*). El PC permite a las estaciones sondeadas transmitir sin la necesidad de contienda por el canal. La función del PC está realizada por el AP dentro de cada BSS. Las estaciones que pueden funcionar en el periodo libre de contención (CFP, *Contention Free Period*) reciben el nombre de *CF-aware stations*.

El intervalo de repetición de CFP (*CFP_rate*) se usa para determinar con qué frecuencia ocurre el PCF. Dentro de un intervalo de repetición una parte del tiempo es asignada a tráfico libre de contienda y el resto es asignado a tráfico por contienda. El intervalo de repetición CFP se inicia con una trama *beacon* transmitida por el AP. Su función es la sincronización y la temporización. Una vez que la *CFP_rate* se establece se procede a decidir la duración del CFP.

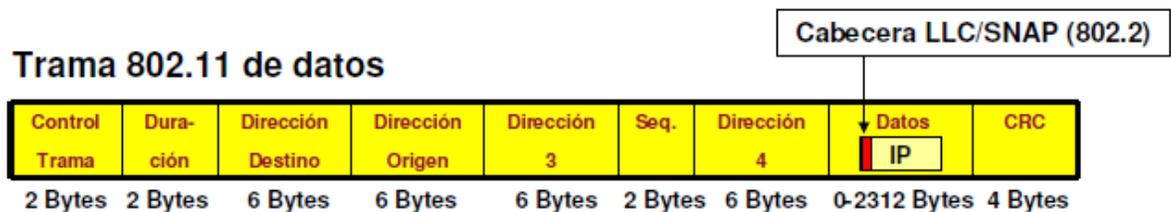
La máxima duración del CFP está determinada por un parámetro llamado *CFP_Max_Duration*. El valor mínimo de *CFP_Max_Duration* es el tiempo para transmitir dos MPDUs de tamaño máximo, incluyendo sobrecarga, la trama *beacon* inicial y una trama CF-End. El valor máximo de la *CFP_Max_Duration* es el intervalo de repetición CFP menos el tiempo para transmitir correctamente una MPDU de tamaño máximo durante el CP. Durante el CFP solo pueden transmitir estaciones en respuesta a un sondeo del PC o para transmitir un ACK un tiempo SIFS después de la recepción de una MPDU.

Al comienzo del intervalo CFP, el PC sondea el medio. Si aparece vacío durante un periodo PIFS, el PC transmite una trama *beacon* para iniciar el CFP. El PC empieza la transmisión CF un periodo SIFS después de la transmisión de la trama *beacon* enviando una CF-poll (no datos), Data o CF-poll + Data trama. El PC puede terminar inmediatamente el CFP enviando una trama CF-End. La habilidad para combinar tramas de sondeo con asentimientos y tramas de datos provoca un aumento de la eficiencia. Si el PC falla al recibir un ACK de una trama transmitida, el PC espera un intervalo de PIFS y continúa emitiendo por la siguiente estación en la lista de sondeo. Aunque PCF ha sido diseñado para soportar tráfico con limitaciones temporales hay varios

1.2.9 Trama Mac IEEE 802.11. Para satisfacer las necesidades de un enlace de datos inalámbrico, el MAC se vio obligado a adoptar varias características únicas, tomando cuatro (4) campos para su uso. No todas las tramas toman los cuatro (4)

campos de direcciones y los valores asignados de los campos pueden cambiar de acuerdo al tipo de trama MAC que está siendo transmitida. IEEE 802.11 MAC no incluye algunas características de la trama MAC Ethernet, lo más destacado es el tipo, tamaño del campo y el preámbulo. El preámbulo es una parte de la capa física; y encapsula tanto detalles del tipo y el tamaño presente en la cabecera como datos transmitidos en la trama IEEE 802.11

Figura 12. Trama MAC IEEE 802.11



Fuente: Autor

- **Medio Inalámbrico a Medio Cableado (802.11 a Ethernet).** Cuando una trama es recibida en una interfaz inalámbrica de un AP unido a una red cableada, el AP debe puentear la trama entre los dos medios. Estas son las tareas realizadas por el AP (**Matthew, 2002**):
 1. Cuando la trama es recibida en el Access Point, este primero revisa su integridad básica (Las cabeceras de la capa física y validación del FCS en la trama IEEE 802.11).
 2. Después de verificar que la trama se haya recibido sin errores, el AP decide si puede retransmitir la trama.
 - a. La trama se envía con la MAC del AP (BSSID) en el campo *Address 1* de la cabecera MAC IEEE 802.11. Las tramas que no encuentran el BSSID del AP deberían ser descartadas. (paso implementado en algunos productos).

- b. La MAC IEEE 802.11 detecta y remueve tramas duplicadas. Las tramas pueden ser duplicadas por varias razones, pero una de las más comunes es que se pierde o corrompe el ACK. Para simplificar este alto nivel de procesamiento, el MAC IEEE 802.11 debe filtrar un eliminar tramas duplicadas.
- 3. Una vez el AP determina que la trama puede procesar el reenvío, este debe descryptar las tramas protegidas mediante un algoritmo de seguridad de capa de enlace.
- 4. Cuando la trama es descryptada satisfactoriamente, esta es chequeada para observar si esta es parte de un fragmento de una trama grande que necesita ser reensamblada. Las tramas reensambladas son sujetas a protección de integridad.
- 5. Si el AP debe puentear la trama, como se especifica, la complejidad de la cabecera *wireless* MAC es trasladada a una cabecera MAC tipo Ethernet.
 - a. La dirección destino, que es encontrada en el campo *Address 3* de la cabecera MAC IEEE 802.11, es copiada a la dirección destino del Ethernet.
 - b. La dirección origen, que es encontrada en el campo *Address 2* de la cabecera MAC IEEE 802.11, es copiada a la dirección origen del Ethernet.
 - c. El tipo de código Ethernet es copiado desde la cabecera SNAP en el campo de datos 802.11 al tipo de código en la trama Ethernet.

- d. La secuencia de la información es usada en fragmentos reensamblados, pero es descartado cuando la trama es puenteada.
 - e. Cuando la calidad de servicio procesado es estandarizado, el QoS que viene desde la interfaz será realizada en la interfaz Ethernet.
6. El FCS es recalculado. El *Ethernet* y el IEEE 802.11 usan el mismo algoritmo para calcular el FCS, pero la trama IEEE 802.11 tiene gran cantidad de tramas extras que están protegidas por el FCS.
 7. La nueva trama es transmitida a la interfaz Ethernet.
- **Conversión de medio cableado a medio Inalámbrico (*Ethernet* a IEEE 802.11).** El paso de una trama *Ethernet* a un *Access Point* en un medio inalámbrico es similar a su proceso inverso:
 1. Después de validar el FCS *Ethernet*, el *Access Point* primero verifica la trama recibida, proceder por en verificar la dirección destino de la estación actualmente asociada al *Access Point*.
 2. La cabecera SNAP prepara los datos de la trama *Ethernet*. Los paquetes son encapsulados con una SNAP cabecera cuyo tipo de código es copiado del tipo de código Ethernet. La trama Ethernet usa SNAP así como la cabecera completa SNAP puede ser copiada.
 3. La trama es programada para transmisión. IEEE 802.11 incluye un complejo ahorro de energía, esto puede causar que un *Access Point* mantenga la trama en un *buffer* antes de colocarla en la cola de transmisión.

4. Una vez la trama ha sido encolada para transmisión, y le asigna un número de secuencia. Los datos resultantes son protegidos por un control de integridad. Si la fragmentación es requerida, la trama se dividirá según la configuración del límite de la fragmentación. Si la trama es fragmentada, el número de fragmento en el campo de control de secuencia será también asignado.
5. Si se requiere protección de la trama, el cuerpo de la trama (o cada fragmento) es encriptado.
6. La cabecera IEEE 802.11 MAC es construida de la cabecera *Ethernet* MAC.
 - a. La dirección *Ethernet* es copiada en el campo de dirección uno (1) de la cabecera IEEE 802.11 MAC.
 - b. El BSSID es colocado en la dirección del campo 2 de la cabecera MAC, como transmisor de la trama en medio inalámbrico.
 - c. La dirección origen de la trama es copiada en el campo tres (3) de la cabecera MAC.
 - d. Los otros campos en la cabecera MAC se rellenan. el tiempo de transmisión esperado se colocará en el campo de duración, la bandera correspondiente se llena en la trama de control.
7. El FCS es recalculado. tanto Ethernet utiliza el mismo algoritmo para calcular el FCS, pero la trama IEEE 802.11 tiene varios campos adicionales que están protegidos por el FCS.
8. La nueva trama es transmitida en la interface IEEE 802.11

1.2.10 Diseño Experimental. El diseño estadístico de experimentos (DEE), también conocido como diseño experimental básicamente es una metodología en la que se utilizan herramientas matemáticas y estadísticas con el fin de ayudar al experimentador a seleccionar una estrategia experimental pertinente que permita obtener la información buscada y además con tal información, evaluar los resultados experimentales obtenidos, garantizando la más alta confiabilidad en las conclusiones que se obtengan.

El diseño experimental puede ser considerado como parte del proceso científico y una de las formas en que aprendemos acerca de la forma en que funcionan los sistemas o procesos

Por lo general, este aprendizaje se da a través de una serie de actividades en las cuales hacemos conjeturas sobre un proceso, realizamos experimentos para generar datos a partir del proceso, y entonces usamos la información del experimento para establecer nuevas suposiciones, que llevan a realizar nuevo experimentos, y así sucesivamente comportándose cíclicamente.

Algo fundamental en el diseño experimental es definir cuáles son las pruebas o ensayos a realizar en cada proceso y la cantidad de repeticiones de cada una, de manera que se obtenga la máxima información sobre el fenómeno de estudio. Actualmente, existen diversos tipos de diseños experimentales en donde cada uno de ellos permite estudiar situaciones que ocurren en la vida práctica, ajustándose a las necesidades de investigador. Es muy importante saber cómo elegir el más adecuado para el problema que se quiere resolver pues de él depende la confiabilidad del experimento **(Gutierrez, 2008, p. 25)**.

1.2.10.1 Objetivo del Diseño

Un experimento diseñado tiene por objetivo (**Mongomery, 2004, p. 2**):

- Determinar cuáles son las variables que tienen mayor influencia en la variable de respuesta.
- Determinar el mejor valor de las variables controlables que influyen en la respuesta, de manera que está tenga casi siempre un valor cercano al valor nominal deseado.
- Determinar la mejor combinación de las variables controlables que ayuden a reducir la variabilidad de la respuesta.
- Establecer la combinación óptima de las variables controlables, con el objetivo de minimizar los efectos de las variables incontrolables

1.2.10.2 Terminología. El diseño experimental tiene su propio lenguaje, el cuál es necesario para su mejor comprensión y utilización. A continuación se describen los términos más importantes:

- Factor: Una de las variables dependientes que son estudiadas en el experimento. Esas variables pueden ser cuantitativas o cualitativas.
- Nivel: Son los valores que pueden tener el factor a estudiar.
- Combinación: Es la asignación de un solo nivel a un factor, o de varios niveles a todos los factores en una corrida experimental.
- Variable de respuesta: Es el resultado de una corrida experimental. Variable a estudiar.

- Efecto: Es el cambio en la variable respuesta por el cambio del nivel de un factor.
- Interacción: Cuando uno o más factores trabajan juntos para producir un efecto diferente que los efectos producidos por aquellos factores de manera individual.
- Corrida Experimental: Implementación de cada una de las combinaciones.
- Bloque: Agrupación planeada de factores o combinaciones. Es realizada a maneara de minimizar la variación no incluida en el diseño.
- Replicación: Repetición de la corrida experimental

1.2.10.3 Directrices para el diseño de experimentos. Para analizar un experimento de manera adecuada, es necesario que se tenga una idea clara sobre el problema que se va a estudiar, el modo de la recolección de los datos y su análisis. Se presenta a continuación la metodología que se emplea en un estudio (**Mongomery, 2004, p. 13**).

- Identificación y exposición del problema: Aunque pareciese obvio, resulta complicado diseñar un planteamiento claro y aceptable. Un planteamiento claro del problema contribuye a tener un mejor conocimiento del fenómeno y de la solución final del problema.
- Elección de los niveles los factores y los rangos: El experimentador debe elegir los factores y niveles específicos a los cuáles variará el experimento, tal conocimiento suele una combinación de experiencia y comprensión teórica.

- Selección de la variable respuesta: Debe asegurarse que la medición de esta pueda realmente proveer información sobre el proceso estudiado
- Elección del diseño experimental: Para elegir el diseño es necesario considerar el número de repeticiones, seleccionar un orden adecuado para los ensayos y determinar si hay implicado un bloqueo u otras restricciones de aleatorización.
- Realización del experimento: Cuando se realiza el experimento, es vital monitorear el proceso para asegurar que todo se haga conforme a lo planeado, ya que los errores en esta fase suelen anular la validez experimental.
- Análisis Estadístico de datos: Deben emplearse métodos estadísticos para analizar los datos de forma que los resultados y las conclusiones sean más objetivos que apreciativos. Actualmente este análisis se puede hacer o complementar con paquetes de software como el minitab.
- Conclusiones y recomendaciones: Una vez que se han analizado los datos, el experimentador debe sacar conclusiones prácticas acerca de los resultados y recomendar un curso de acción. Los métodos gráficos suelen ser útiles en esta etapa, en particular para presentar los resultados. También deberán realizarse corridas de seguimientos o pruebas de confirmación para validar las conclusiones del experimento

1.2.10.4 Diseño Factorial. El objetivo de un diseño factorial es estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés sobre todos los factores. Uno de los objetivos particulares más importantes que en ocasiones tiene un diseño factorial es determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea

mejor. Para estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de respuesta es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos.

En general, la familia de diseños factorial 2^k consiste en k factores, todos con dos niveles de prueba; y la familia de diseño factoriales 3^k consiste en k factores cada uno con tres niveles de prueba. Es claro que si los k factores no tienen la misma cantidad de niveles, debe escribirse el producto de manera explícita; por ejemplo, con $k=3$ factores el primero con cuatro (4) niveles y los dos restantes con dos niveles, se tiene el diseño factorial $4 \times 2 \times 2$.

1.2.10.5 Tamaño de la Muestra. Un aspecto de gran importancia al realizar un diseño experimental es la decisión del número de réplicas que se hace por cada tratamiento; a esto se le llama tamaño de la muestra o tamaño muestral. Por lo general, si se esperan diferencias pequeñas entre tratamientos será necesario un mayor tamaño de muestra. Aunque existen varios métodos para estimar el tamaño muestral, muchas veces tienen poca aplicabilidad porque requieren cierto conocimiento previo sobre la varianza del error experimental. Si recurrimos a la experiencia vemos que el número de réplicas en la mayoría de las situaciones experimentales en las que se involucra un factor varía entre cinco (5) y diez (10); incluso algunos trabajos se deciden hasta por treinta (30) réplicas.

1.2.10.6 Efecto Principal y Efecto de interacción. El efecto de un factor se define como el cambio observado en la variable de respuesta debido a un cambio de nivel en tal factor. El efecto principal es igual a la respuesta promedio observada en nivel alto de un factor, menos la respuesta promedio en el nivel bajo. EL efecto de interacción se refiere por ejemplo, a dos factores interactuando de manera significativa sobre la variable de respuesta cuando el efecto de uno depende del nivel en que esta el otro (**Gutierrez, 2008, p. 129**).

1.2.10.7 Ventajas de los Diseños actoriales

1. Permiten estudiar el efecto individual y de interacción de los distintos factores.
2. Son diseños que se pueden aumentar para formar diseños compuestos en caso de que se requiera una exploración más completa. Por ejemplo, es útil aumentar el diseño si el comportamiento de la respuesta no es lineal en los factores controlados
3. Se pueden correr fracciones de diseños factoriales, las cuales son de gran utilidad en las primeras etapas de una investigación que involucra a muchos factores, cuando interesa descartar de manera económica los que no son importantes, antes de hacer un estudio más detallado con los factores que sí son importantes
4. Pueden utilizarse en combinación con diseños de bloques en situaciones en las que no puede correrse todo el diseño factorial bajo las mismas condiciones. Por ejemplo, cuando cada lote de material sólo alcanza para correr la mitad del experimento, éste se puede realizar en dos bloques (dos lotes), lo cual implica repartir las pruebas en los dos lotes de la manera más conveniente posible.
5. La interpretación y el cálculo de los efectos en los experimentos factoriales se puede hacer con aritmética elemental, en particular cuando cada factor se prueba en dos niveles (**Gutierrez, 2008, p. 133**).

1.2.10.8 Diseños Factoriales con tres Factores. Cuando se quiere investigar la influencia de tres factores (A, B y C) sobre una o más variables de respuesta, y el número de niveles de prueba en cada uno de los factores es a, b y c, respectivamente, se puede construir el arreglo factorial $a \times b \times c$, que consiste de $a \times b \times c$ tratamientos o puntos experimentales. Entre los arreglos de este tipo que se utilizan con frecuencia en aplicaciones diversas se encuentran: el factorial 2^3 , el

factorial 3^3 y los factoriales mixtos con no más de cuatro niveles en dos de los factores, por ejemplo, el factorial $4 \times 3 \times 2$ y el factorial $4 \times 4 \times 2$, por mencionar dos de ellos (**Gutierrez, 2008, p. 143**).

2. METODOLOGÍA

En ingeniería y otros sectores donde es necesario obtener información de interrogantes de algunos procesos y tareas; aparece el diseño experimental como una herramienta estadística-matemática que a partir de la realización de pruebas intencionadas, recolección de sus datos y análisis brinda al investigador evidencia veraz sobre el objeto en estudio.

Cualquier problema experimental incluye dos aspectos: el diseño del experimento y el análisis estadístico de los datos. Estos dos aspectos se encuentran íntimamente relacionados porque el método de análisis depende directamente del diseño empleado (**Mongomery, 2004, p. 12**).

La presente investigación está centrada bajo el marco de las ciencias aplicadas en ingeniería, lo cual permite por sus condiciones aplicar el diseño experimental para realizar el estudio y obtener como resultado el modelo empírico que permita evaluar el rendimiento una red inalámbrica para ISP basada en el estándar IEEE 802.11.

Cuando se desea realizar un experimento, se deben establecer claramente cada una de las siguientes etapas (**Gutierrez, 2008, p. 130**).

- **Planeación:** Es una de las etapas más importantes para el desarrollo del experimento, debido a que si no se realiza adecuadamente, podría generar posteriormente resultados errados y con ello no cumplir a satisfacción el objetivo principal de la investigación. Dentro de esta etapa se debe identificar claramente: el problema de investigación, determinar los factores que deben estudiarse acorde con la influencia que estos podrían tener sobre la variable objeto de estudio, elegir las variables de respuesta que serán medidas en cada punto del diseño garantizando que se miden de

manera confiable, seleccionar el diseño experimental adecuado a los factores que se tienen y al objetivo del experimento, planear y organizar el trabajo experimental y finalmente realizar el experimento.

- **Análisis:** En esta etapa se debe determinar el modelo de análisis de varianza ANOVA y la técnica estadística que mejor describa el comportamiento de los datos.
- **Interpretación:** En esta etapa se debe ir más allá del análisis estadístico formal, en donde se analice con detalle lo que ha ocurrido con el experimento, desde contrastar las conjeturas iniciales con los resultados del experimento, hasta observar los nuevos aprendizajes que sobre el proceso se lograron, verificar los supuestos y establecer el mejor tratamiento.
- **Conclusiones finales:** En esta etapa se describen cada uno de los resultados obtenidos en el desarrollo del experimento, en donde se recomienda establecer las medidas requeridas para implementar y generalizar el resultado del estudio realizado.

2.1 PLANEACIÓN

Siguiendo los lineamientos de trabajo citados anteriormente se expondrán los elementos fundamentales y de interés para el caso de estudio presente:

2.1.1 Identificación del Problema. La utilización de redes inalámbricas de estándar IEEE 802.11 para transmisión de datos supone la implementación de redes de datos de alto rendimiento con un costo bajo en relación a otros estándares y medios de comunicación. Además la utilización de frecuencias no licenciadas, permisos de uso y no pago de prestaciones al ente regulador hace

atractivo y fácil el manejo del estándar. Sin embargo al estar implementado en frecuencias libres, la complejidad de la red crece debido a tener un medio mucho más congestionado, lo cual genera reducción del ancho de banda, retardo y pérdidas de transmisión.

Teniendo en cuenta las limitaciones que presenta este tipo tecnologías, es importante presentar estudios que establezcan un modelo que permita evaluar el comportamiento de redes bajo el estándar IEEE 802.11. El presente estudio busca conocer el rendimiento de parte de la infraestructura implementada en la empresa Aros Comunicaciones Ltda, y además que sirva como base de estudio para el análisis de otras redes de características.

La empresa Aros Comunicaciones Ltda es una empresa privada constituida legalmente el año 2007 bajo escritura pública No 0000517 de notaría pública. Cuenta con Título de Habilitante Convergente No 90101 otorgado por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones que da la facultad de ofrecer servicios de telecomunicaciones a nivel nacional.

Opera como proveedor de servicio de internet con acceso inalámbrico en el municipio de Cimitarra en el departamento de Santander, posee actualmente más de doscientos (200) usuarios conectados a una infraestructura compuesta por siete puntos de acceso "AP" que funcionan directamente desde el nodo central o como un repetidores inalámbricos.

2.1.2 Rendimiento. En cualquier tipo de redes y especialmente en redes inalámbricas (por su sensibilidad en el medio de transmisión) es de suma importancia conocer la calidad en la comunicación. Para esto es necesario hacer un análisis de la red y así determinar su rendimiento. En el presente estudio se tendrán en cuenta factores básicos como lo son: Throughput y retardo.

2.1.3 Throughput. Es el parámetro de mayor relevancia al analizar el rendimiento de una red de datos. Se define como la relación entre la información útil y el tiempo de transmisión de la comunicación. Sin embargo, no todas las tecnologías se comportan de igual forma, así por ejemplo el throughput en una red Ethernet, no es lo mismo que en una red WLAN o una red tipo PLC.

Partiendo de que entre los objetivos de la investigación está diseñar un modelo empírico que permite evaluar una red IEEE 802.11, y que uno de los parámetros de importancia en esa labor es el *throughput*, es importante presentar su definición matemática (Vesga, 2011):

(1)

$$Thr = \frac{L_M - L_C}{[T_M + T_{ACC}]}$$

Donde,

- L_M** Longitud total del mensaje
- L_C** Bits de control del mensaje
- T_M** Tiempo de transmisión del mensaje
- T_{ACC}** Tiempo de acceso al medio

2.1.4 Retardo de Propagación. Este retardo se define como el tiempo que se demoran en llegar los datos al extremo receptor desde que los datos están en el canal de transmisión.

En la ejecución del proyecto se dispondrá de equipos inalámbricos fundamentados en el estándar IEEE 802.11 con el propósito de hacer mediciones de *Throughput* y Retardo de Transmisión sobre una red tipo infraestructura. Con estas mediciones se pretende determinar los cambios producidos por los parámetros a considerar de forma planeada en el desarrollo del experimento. Los parámetros o factores a

los que se hace referencia son: frecuencia de operación, número de terminales inalámbricos conectados al punto de acceso, y distancia entre el terminal y el punto de acceso

El tipo de diseño experimental seleccionado es el tipo factorial, cuyo objetivo consiste en estudiar el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas. Es decir, lo que se busca es estudiar la relación entre los factores y la respuesta, con la finalidad de conocer mejor cómo es esta relación y generar conocimiento que permita tomar acciones y decisiones que mejoren el desempeño del proceso. Para poder estudiar la manera en que influye cada factor sobre la variable de interés, es necesario elegir al menos dos niveles de prueba para cada uno de ellos. Con el diseño factorial completa se corren aleatoriamente en el proceso todas las posibles combinaciones que pueden formarse con los niveles seleccionados **(Gutierrez, 2008, p. 150)**.

Al Concluir el proyecto investigativo se espera definir la influencia que tienen uno o más factores de entrada sobre la variable de salida o respuesta, buscando con esto herramientas que representen información importante y permitan evaluar el rendimiento de una red implementadas bajo el protocolo IEEE 802.11.

2.1.5 Dispositivos utilizados y aspectos técnicos. Para el desarrollo de las pruebas en la investigación propuesta, se usó parte del hardware de la topología de la red de la empresa AROS COMUNICACIONES LTDA y otros dispositivos: Access Point, antenas, CPEs, computadoras portátiles.

- **Access Point:** Para la realización de las pruebas se utilizaron 3 (tres) Access point marca Ubiquiti de los cuales 2 (dos) trabajan en la frecuencia de 5.8Ghz y 1 (uno) en la frecuencia de 2.4Ghz. Los modelos utilizados fueron de la serie Rocket.

Figura 13. Access Point marca ubiquiti modelo serie Rocket



Fuente: <http://www.4netonline.com/ws/wp-content/uploads/images/products/p-2763-RM2-GPS-2.jpg>

Tabla 5. Puntos de Acceso ubiquiti serie rocket

Características Puntos de Acceso		
Modelo	Rocket M5	Rocket M2
Dimensiones	160 x 80 x 30 mm	160 x 80 x 30 mm
Peso	1.1 LB	0,5 Kg
Interfaz de Red	10/100 Mbit	10/100 Mbit
Rf Conector	2 RP-SMA	2 RP-SMA
Max Power consume	8 W	8 W
Modulación	MCS0 hasta MCS15 OFDM, TDMA AIRMAX	MCS0 hasta MCS15, OFDM TDMA AIRMAX
Max Potencia Tx	27 dbm	28 dbm
Modo Operación	A/N	b/g/n
Wireless	5,8Ghz	2,4Ghz
Alimentación	24V, 1A PoE Adapter	24V, 1A PoE Adapter
Memoria SDRAM	64MB	64MB
Velocidad	150Mbps Real TCP/IP	150Mbps Real TCP/IP
MIMO 2X2	SI	SI
Procesador	400Mhz	400Mhz
Operación frec.	5170 - 5875Mhz	2412-2462 MHz
Enclosure (Protector)	SI	SI

Fuente: Autor

- **Antenas:** Para la realización de las pruebas se utilizaron antenas marca ubiquiti en frecuencias de 2.4Ghz y 5.8Ghz. Los modelos utilizados fueron AM-5G20-90 y AM-2G15-120

Figura 14. Antena marca ubiquiti modelo serie M



Fuente: <http://www.4netonline.com/ws/product/am-5g19-120-5ghz-19dbi-120-degrees-2x2-mimo-basestation-sector-antenna/>

Tabla 6. Especificaciones técnicas antenas utilizadas

Especificaciones Técnicas Antenas		
Modelo	AM-5G20-90	AM-2G15-120
Dimensiones (mm)	700 x 135 x 70	700 x 145 x 93
Peso	5.9 kg	4.0 kg
Rango Frecuencia	5.15 - 5.85 GHz	2.3 - 2.7 GHz
Ganancia	19.4 - 20.3 dBi	15.0 - 16.0 dBi
Hpol Ancho	91° (6 dB)	123° (6 dB)
Vpol Ancho	85° (6 dB)	118° (6 dB)
Ancho del Haz	4°	9°
Modo Operación	A/n	b/g/n
Mas VSWR	1.5:1	1.5:1
Resistencia Viento	125 mph	125 mph
Carga Viento	26 lbf @ 100 mph	24 lbf @ 100 mph
Polarización	Vertical/Horizontal	Vertical/Horizontal
MIMO 2X2	SI	SI
ETSI Especificación	EN 302 326 DN2	EN 302 326 DN2
Tipo	Sectorial	Sectorial

Fuente: Autor

- **CPEs (Equipo de usuarios):** La empresa AROS COMUNICACIONES LTDA utiliza gran variedad de equipos marca ubiquiti en sus redes, sin embargo para las mediciones solo se tuvieron en cuenta modelos de la serie NanoStation M.

Figura 15. CPE marca ubiquiti modelo serie Nanostation M



Fuente: <http://www.4netonline.com/ws/product/locom2-2-4ghz-outdoor-airmax-cpe-8dbi-export-only/>

Tabla 7. Especificaciones técnicas CPEs utilizados

Características CPE Cliente		
Modelo	NSM5	NSM2
Procesador	Atheros MIPS 24KC, 400MHz	Atheros MIPS 24KC, 400MHz
Memoria	32MB SDRAM, 8MB Flash	32MB SDRAM, 8MB Flash
Interface	2 X 10/100 BASE-TX (Cat. 5, RJ-45)	2 X 10/100 BASE-TX (Cat. 5, RJ-45)
Inalambrica Certificado	FCC Part 15.247, IC RS210, CE	FCC Part 15.247, IC RS210, CE
Frecuencia Operación	5470MHz-5825MHz	2412MHz-2462MHz
Tx Power	27 dbm	28 dbm
Data rate	MCS0	MCS0
Rx Sensibilidad	-96dBm	-96dBm
Tamaño	29.4 cm x 8 cm x 3cm	29.4 cm x 8 cm x 3cm
Peso	0,4kg	0,4kg
Maximo consumo	8W	8W
Alimentación	15 V, 0,8 A	24 V, 0,8 A
frecuencia Rango	4,9 - 5,9 Ghz	2.32-2.55 GHz
Ganancia	14,6 - 16,1db	10.4-11.2 dBi
Polarización	Doble	Doble
Hpol	43 deg	55 deg
Vpol	41 deg	53 dg
Elevación	15 deg	27dg

Fuente: Autor

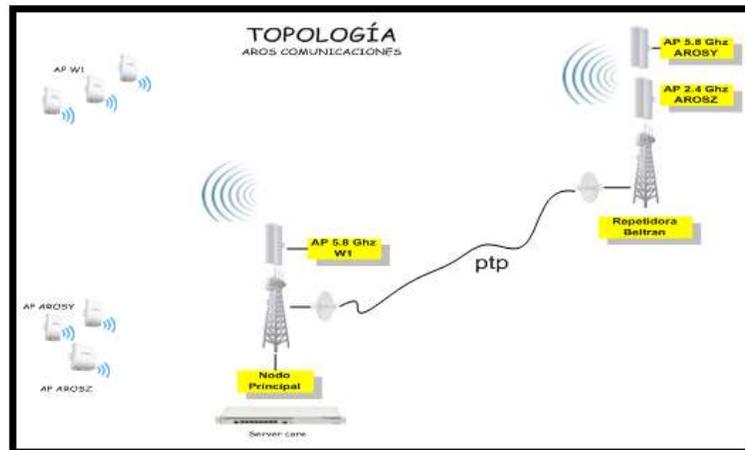
2.2 DESCRIPCIÓN DEL EXPERIMENTO

Actualmente en el mercado de las redes informáticas existen diferentes clases de software como lo son: IPERF, DITG, MGEN, entre otros, que brindan la posibilidad de generar tráfico artificial, simulando el comportamiento de determinados tipos de datos; sin embargo para el presente proyecto se decidió hacer las mediciones con tráfico real generado desde un servidor (ubicado en el nodo de distribución), donde se alojó un archivo para realizar las respectivas pruebas de descarga con velocidad limitada únicamente por la capacidad del canal o medio de transmisión (medio inalámbrico).

Para establecer una comunicación inalámbrica de tipo infraestructura entre dos terminales, se requiere como mínimo un equipo que actúe como punto de acceso y los terminales correspondientes. En el caso de estudio se dispone de la infraestructura de la empresa AROS COMUNICACIONES Ltda para realizar las respectivas pruebas y mediciones.

El experimento consiste en conectar a determinada distancia un equipo terminal inalámbrico tipo CPE de prueba marca UBIQUITI, modelo NM2 ó NM5 (ver tabla 6) a los puntos de acceso existentes de la marca UBIQUITI, modelo ROCKET M2 ó M5 (ver tabla 4). El mecanismo de conexión entre el host (usuario) y el servidor se realiza con una arquitectura donde el terminal está configurado en modo estación-router y el punto de acceso en modo AP-Bridge actuando de forma transparente gracias al protocolo WDS (*Wireless distribution system*).

Figura 16. Topología AROS COMUNICACIONES Ltda



Fuente: Autor

Cada muestra experimental consiste en conectar un equipo CPE de prueba al punto de acceso correspondiente en los lugares ya definidos estratégicamente con las distancia establecidas (Ver Anexo A); ya realizada la conexión se procede a iniciar la descarga del archivo alojado en el servidor, se toma la medida del tiempo

desde que se inicia la descarga hasta que finaliza (Ver Anexo B). Cada medición se toma del promedio de cinco repeticiones buscando una mayor confiabilidad en los datos obtenidos.

Para la medición del throughput se tomó como referencia la medición del tiempo total de la descarga del archivo y el tamaño del mismo; utilizando simplemente la ecuación tradicional para obtener el valor del parámetro deseado.

(2)

$$Thr = \frac{Long.Mensaje}{T.descarga}$$

En cuanto al retardo de transmisión, corresponde a la medición del mismo tiempo en segundos mencionado anteriormente.

Los factores y niveles considerados en el desarrollo del experimento se presentan en la siguiente tabla

Tabla 8. Factores y niveles de factor

Factores	Niveles
Frecuencia de Operación	Una red de 2.4Ghz, Dos redes de 5.8Ghz
Distancia	40m, 1000m, 2500m
Cantidad de estaciones Activas	13, 16, 37 CPE

Fuente: Autor

En relación con los datos presentados en la tabla anterior, se elige un diseño factorial mixto de 2 x 3 x 3= 18 combinaciones de tratamientos o muestras experimentales. La cantidad de replicaciones del experimento es cinco (5), lo que representa un total de 18 x 5 = 90 mediciones para cada variable de salida o

respuesta, datos suficientemente confiables para obtener resultados de los efectos de cada factor principal y cada una de sus interacciones.

2.3 TOMA DE DATOS EN LA EXPERIMENTACIÓN

Los datos fueron tomados de tal forma que todas las estaciones vinculadas a los puntos de acceso son usuarios activos reales dentro de la red de Aros Comunicaciones, que pudieron generar tráfico aleatorio en cualquier momento de la prueba, es importante destacar este aspecto ya que hablamos de un escenario real, lo cual supone mayor veracidad en los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos a partir de la experimentación se ilustran en la tabla 9.

En etapa de la experimentación cabe resaltar que la recolección de datos se toma a partir de la infraestructura existente y activa de Aros Comunicaciones (Ver Anexo C); Por el mismo motivo se observan unos datos equivalentes a cero (0) o nulos. Estos datos nulos sencillamente corresponden combinaciones de parámetros inexistentes en la infraestructura dispuesta.

Tabla 9. Matriz Diseño de Throughput y Retardo de Propagación (Mbps, Seg)

MATRIZ TROUGHPUT Mbps									
	13 CPE			16 CPE			37 CPE		
	40m	1000m	25000m	40m	1000m	2500m	40m	1000m	2500m
2.4GHz	0	0	0	19,388608	14,725819	17,900051	0	0	0
	0	0	0	18,950442	14,753136	15,426509	0	0	0
	0	0	0	17,20938	18,986231	17,180092	0	0	0
	0	0	0	17,790285	12,833745	19,049662	0	0	0
	0	0	0	22,732929	14,38827	18,346058	0	0	0
5.8Ghz	28,18334	29,306567	28,957443	0	0	0	17,496321	17,097246	16,19995
	31,094636	32,26259	30,5261	0	0	0	16,55607	19,227538	14,609282
	32,169813	27,6307	34,062775	0	0	0	21,268944	18,028136	18,292965
	25,601372	26,559788	25,067438	0	0	0	20,419847	21,694124	14,049622
	25,972736	29,640216	29,217722	0	0	0	15,917871	12,209148	21,277291
MATRIZ RETARDO DE TRANSMISIÓN Segundos									
	13 CPE			16 CPE			37 CPE		
	40m	1000m	25000m	40m	1000m	2500m	40m	1000m	2500m
2.4GHz	0	0	0	76,868	101,51	83,212	0	0	0
	0	0	0	78,62	101,52	97,562	0	0	0
	0	0	0	87,586	78,86	88,86	0	0	0
	0	0	0	83,844	116,08	78,486	0	0	0
	0	0	0	65,54	103,624	81,192	0	0	0
5.8Ghz	52,918	50,964	51,534	0	0	0	85,162	87,262	92,428
	48,234	46,216	48,872	0	0	0	91,826	78,656	102,628
	46,478	54,002	43,798	0	0	0	70,442	84,254	83,478
	58,18	56,734	59,724	0	0	0	73,836	68,974	107,012
	57,35	50,312	51,636	0	0	0	94,34	122,268	72,222

Fuente: Autor

3. RESULTADOS

Con la toma de datos obtenida anteriormente, se continuará con la elección de una técnica matemática estadística que permita inferir de manera confiable sobre el comportamiento de una red IEEE 802.11. Para este propósito se tomará como herramienta el análisis de varianza (ANOVA). En la presenta investigación se estudia más de un factor en particular y la influencia que pueda tener el uno con el otro, teniendo en cuenta este tipo de condiciones es necesario realizar un diseño factorial.

En general los diseños factoriales son los más eficientes para este tipo de experimentos. Por diseño factorial se entiende que en cada ensaño o replica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producida por un cambio en nivel del factor (**Mongomery, 2004, p. 170**).

3.1 MODELO ESTADÍSTICO Y ANÁLISIS DE VARIANZA PARA THROUGHPUT

El presente modelo es representado por un diseño factorial de tres (3) factores abc que modela el comportamiento de una respuesta o variable de salida Y que puede expresarse mediante: (Universidad Nacional de Colombia)

(3)

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$$i = 1, \dots, a; j = 1, \dots, b; k = 1, \dots, c; l = 1, \dots, n$$

a = frecuencia de operación

b = distancia entre CPE y AP

c = Cantidad de CPEs

N = Número de replicas del experimento

Y_{ijkl} = *Throughput* para frecuencia de operación (i) a una distancia entre CPE Y AP (j), con un número de estaciones (k), para la replicación (l).

μ =Media general sin efectos de interacciones

A_i = efecto del i – ésimo nivel del factor A

B_j = efecto del i – ésimo nivel del factor B

C_k =Efecto del i – ésimo nivel del factor C

$(AB)_{ij}$ =Efecto de la interacción entre los factores Frecuencia y distancia

$(AC)_{ik}$ =Efecto de la interacción entre los factores frecuencia y cantidad de CPE

$(BC)_{jk}$ =Efecto de la interacción entre los factores distancia y cantidad de CPE

$(ABC)_{ijk}$ =Efecto de la interacción de los tres factores

ε_{ijkl} =Error aleatorio

Los efectos a estudiar en este caso de tres factores (abc) son A, B, C, AB, AC, BC y ABC; Además se debe tener en cuenta para el estudio los niveles utilizados para cada factor. En el represente caso se observan siete (7) interacciones, con las que se plantea siete (7) hipótesis nulas (H_o) cada una emparentada con una hipótesis alternativa (H_A). Las hipótesis a contemplar para los tres (3) factores y sus respectivas interacciones son:

(4)

$$\begin{array}{ll} H_o: \text{Efecto } A = 0, & H_A: \text{Efecto } A \neq 0 \\ H_o: \text{Efecto } B = 0, & H_A: \text{Efecto } B \neq 0 \\ H_o: \text{Efecto } C = 0, & H_A: \text{Efecto } C \neq 0 \\ H_o: \text{Efecto } AB = 0, & H_A: \text{Efecto } AB \neq 0 \\ H_o: \text{Efecto } AC = 0, & H_A: \text{Efecto } AC \neq 0 \\ H_o: \text{Efecto } BC = 0, & H_A: \text{Efecto } BC \neq 0 \\ H_o: \text{Efecto } ABC = 0, & H_A: \text{Efecto } ABC \neq 0 \end{array}$$

Para casos en los que todos los factores del experimento son fijos, es posible formular y probar fácilmente hipótesis acerca de los efectos principales y las interacciones. Para el caso de modelos de efectos fijos, los test para probar las hipótesis sobre cada efecto principal y las interacciones se pueden construir dividiendo el CM correspondiente del efecto o la interacción por el CM_E . Los grados de libertad para cada efecto principal son los niveles del factor menos uno y el número de grados de libertad para una interacción es el producto del número de grados de libertad asociados con los componentes individuales de esta (**Moreno, 2002, p. 330**)

Procedimiento de la experimentación:

Variable dependiente: THROUGHPUT

Factores: (A) Frecuencia de operación

(B) Distancia

(C) Cantidad de CPEs

Número de muestras experimentales: 90

Con el fin de comprender fácilmente los cálculos se recomienda presentar la información de los factores correspondientes para encontrar las SC.

Tabla 10. Datos Combinación factor A vs factor B

	B		
A	40	1000	2500
2.4	96,071644	75,6872004	87,9023722
5.8	234,6809512	233,6560514	232,260588
	330,7525952	309,3432518	320,16296

Fuente: Autor

Los datos obtenidos en la tabla anterior son resultado de la sumatoria de cada una de las réplicas para las combinaciones existentes entre los factores frecuencia de operación (A) y distancia entre CPE y AP (B). La representación de datos presentada es utilizada en el cálculo del efecto del factor B y el efecto de la interacción entre los factores AB...Esta información es extraída de la tabla 9...

Tabla 11. Datos Combinación factor A vs factor C

A	C		
	13	16	37
2,4	0	259,6612166	0
5,8	436,253236	0	264,344354
	436,253236	259,6612166	264,344354

Fuente: Autor

Los datos obtenidos en la tabla anterior son resultado de la sumatoria de cada una de las réplicas para las combinaciones existentes entre los factores frecuencia de operación (A) y cantidad de CPE's (C). La representación de datos presentada es utilizada en el cálculo del efecto del factor C y el efecto de la interacción entre los factores AC...Esta información es extraída de la tabla 9...

Seguidamente se procederá a realizar los respectivos cálculos de análisis de varianza para *throughput*, extrayendo los datos consignados en las tablas 9, 10 y 11. La ecuación matemática para determinar el factor correlación (FC) es:

(5)

$$FC = \frac{Y^2}{abn}$$

$$FC = \frac{Y^2}{abn} = \frac{922096,976}{90} = 10245,52196$$

Para realizar los cálculos de la suma de cuadrados (SC) se utilizará la siguiente expresión:

(6)

$$SC_{TOT} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n Y_{ijkl}^2 - FC = 22140,44378 - 10245,52196 = 11894,92182$$

Tabla 12. Datos Combinación factor A vs factor B vs factor C

	13 CPE			16 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	25000m (B)	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0	0	0	96,0716 44	75,68720 04	87,90237 22
5,8GHz (A)	143,02189 74	145,39986 04	147,83147 8	0	0	0

	37 CPE			Totales
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)	
2,4GHz (A)	0	0	0	259,6612166
5,8GHz (A)	91,6590538	88,256191	84,4291094	700,5975902

Fuente: Autor

Los datos obtenidos en la tabla anterior son resultado de la sumatoria de cada una de las réplicas para las combinaciones existentes entre los factores frecuencia de

operación (A), distancia entre CPE y AP (B) y cantidad de CPE's (C). Los valores totales son el resultado de la sumatoria de los datos en forma horizontal. La representación de datos presentada es utilizada en el cálculo del efecto del factor A, y el efecto de la interacción entre los factores ABC.

(7)

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i...}^2}{bcn} - FC$$

$$SC_A = \frac{(259,6612166)^2 + (700,5975902)^2}{45} - 10245,52196$$

$$SC_A = 2160,276506$$

Tabla 13. Efecto Throughput factor B

	B		
A	40	1000	2500
2.4	96,071644	75,6872004	87,9023722
5.8	234,6809512	233,6560514	232,260588
	330,7525952	309,3432518	320,16296

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_B se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se muestra a continuación:

(8)

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - FC$$

$$SC_B = \frac{(330,7525952)^2 + (309,3432518)^2 + (320,1629598)^2}{30} - 10245,52196$$

$$SC_B = 7,639627155$$

Tabla 14. Efecto Throughput factor C

	C		
A	13	16	37
2,4	0	259,6612166	0
5,8	436,253236	0	264,344354
	436,253236	259,6612166	264,344354

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_C se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se presenta a continuación:

(9)

$$SC_C = \sum_{k=1}^c \frac{Y_{..k}^2}{abn} - FC$$

$$SC_C = \frac{(436,253236)^2 + (259,6612166)^2 + (264,3443542)^2}{30} - 10245,52196$$

$$SC_C = 675,1037415$$

Tabla 15. Efecto Throughput interacción de factores A-B

	B		
A	40	1000	2500
2.4	96,071644	75,6872004	87,9023722
5.8	234,6809512	233,6560514	232,260588

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_{AB} se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se presenta a continuación:

(10)

$$SC_{celdas-AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij..}^2}{cn} - FC$$

$SC_{celdas}(A - B)$

$$= \frac{(96,071644)^2 + (75,6872004)^2 \dots + (232,260588)^2}{15} - 10245,52196$$

$$= 2174,50604$$

$$SC_{AB} = SC_{celdas-AB} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AB} = 2174,50604 - 2160,276506 - 7,639627155 = 6,589903145$$

Tabla 16. Efecto Throughput interacción de factores A-C

	C		
A	13	16	37
2,4	0	259,6612166	0
5,8	436,253236	0	264,344354

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_{AC} se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se presenta a continuación:

(11)

$$SC_{celdas-AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{Y_{i.k.}^2}{bn} - FC$$

$$SC_{celdas}(A - C) = \frac{(0)^2 + (259,6612166)^2 \dots + (264,344354)^2}{15} - 10245,52196$$

$$= 11595,7294$$

$$SC_{AC} = SC_{Celdas-AC} - SC_A - SC_C$$

$$SC_{AC} = 11595,7294 - 2160,276506 - 675,1037415 = 8760,349191$$

Tabla 17. Efecto Throughput interacción de factores B-C

	C		
B	13	16	37
40	143,0218974	96,071644	91,6590538
1000	145,3998604	75,6872004	88,256191
2500	147,8314782	87,9023722	84,4291094

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_{BC} se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se presenta a continuación:

(12)

$$SC_{Celdas-BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{jk}^2}{an} - FC$$

$$SC_{celdas}(B - C)$$

$$= \frac{(0143,0218974)^2 + (96,071644)^2 \dots + (84,4291094)^2}{10}$$

$$- 10245,52196$$

$$SC_{celdas}(B - C) = 699,926096$$

$$SC_{BC} = SC_{Celdas-BC} - SC_B - SC_C$$

$$SC_{BC} = 699,926096 - 7,639627155 - 675,1037415 = 17,18272718$$

Tabla 18. Efecto Throughput interacción de factores A-B-C

	13 CPE			16 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	25000m (B)	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0	0	0	96,071644	75,6872004	87,9023722
5,8GHz (A)	143,0218974	145,3998604	147,831478	0	0	0

	37 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0	0	0
5,8GHz (A)	91,6590538	88,256191	84,4291094

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_{ABC} se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se presenta a continuación:

(13)

$$SC_{Celdas-ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{ijk}^2}{n} - FC$$

$$\begin{aligned}
 SC_{celdas}(A - B - C) &= \frac{(0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (096,071644)^2 \dots + (84,4291094)^2}{5} \\
 &= 10245,52196 \\
 SC_{celdas}(A - B - C) &= 11645,3741
 \end{aligned}$$

$$SC_{ABC} = SC_{Celdas-ABC} - SC_A - SC_B - SC_C - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC}$$

$$SC(ABC) = 11645,3741 - 2160,276506 \dots - 17,18272718 = 18,23245119$$

La SC_E se determina por la siguiente expresión:

(14)

$$SC_E = SC_{TOT} - SC_{Celdas-ABC}$$

$$SC_E = 11894,9218 - 11645,3741$$

$$SC_E = 249,5476723$$

En el siguiente cuadro se ilustra en análisis de varianza para Throughput:

Tabla 19. ANOVA para Throughput

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	Fo	Valor P
Frecuencia (A)	346,4971257	1	346,497126	623,29	0
Distancia (B)	4872,084635	2	2436,04232	1,1	0,338
#CPE (C)	5539,548749	2	2769,77437	97,39	0
AB	1820,369284	2	910,184642	0,95	0,391
AC	10574,12857	2	5287,06429	1263,78	0
BC	-4847,262281	4	-1211,81557	1,24	0,302
ABC	-1795,546929	4	-448,886732	1,32	0,273
Error	-4614,897335	72	-64,0957963		
Total	11894,92182	89			

Fuente: Autor

Tomando como referencia la tabla anterior, el efecto es significativamente estadístico cuando su P-Valor es menor al especificado para α , por lo que se sugiere tomar como estadísticamente significativos los valores cuyo P-Valor menos a 0,05 (5%).

El ANOVA se fundamenta en la descomposición de la variación completa de los datos de la variable en cuestión (Throughput) con respecto a la media global (SCTot), debido a los factores que intervienen en el proceso o experimento

Ya que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los *p – value* comprueban la importancia estadística de cada uno de los factores. Teniendo en cuenta el análisis de varianza presentado anteriormente se identifican tres efectos con P-Valor menos a 0,05 (A, C, A-C). Estos factores muestran un efecto significativamente estadístico para throughput con un 95% de confianza, y que rechaza la hipótesis H_0 .

3.2 VERIFICACIÓN DE LOS SUPUESTOS DEL MODELO PARA THROUGHPUT

La validez de los resultados obtenidos en cualquier análisis de varianza queda supeditada a que los supuestos del modelo se cumplan. Estos supuestos son: normalidad, varianza constante (igual varianza de los tratamientos) e independencia. Esto es, la respuesta (Y) se debe distribuir de manera normal, con la misma varianza en cada tratamiento y las mediciones deben ser independientes. Estos supuestos sobre Y se traducen en supuestos sobre el término error (ϵ) en el modelo (**Gutierrez, 2008, p. 81**).

La comprobación de los supuestos se puede hacer de forma analítica (matemática) o de forma gráfica, esta última, la más utilizada por su relativa sencillez. La forma gráfica no es del todo confiable, pero lo suficiente para que en situaciones reales muestre evidencias para aceptar o negar el supuesto.

Para la negación se requiere un marcado efecto visual que soporte la decisión tomada.

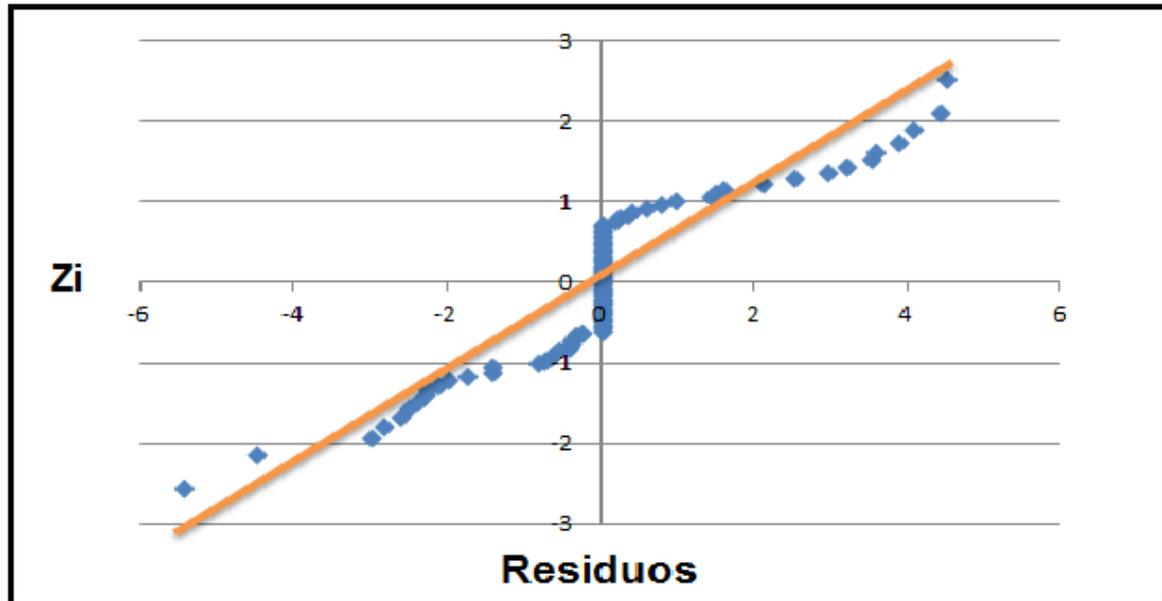
Algunos puntos que se pudieran salir del comportamiento normal de un supuesto, no se deben considerar como condiciones extremas que vulneren el supuesto cuestionado. Estos casos pueden interpretarse como mediciones atípicas, ya que pueden afectar sensiblemente los análisis resultantes.

3.2.1 Supuesto de Normalidad

Un procedimiento gráfico para verificar el cumplimiento del supuesto de normalidad de los residuos consiste en graficar los residuos en papel o en la gráfica de probabilidad normal que se incluye casi en todos los paquetes estadísticos. Esta gráfica del tipo X-Y tiene las escalas de tal manera que si los residuos siguen una distribución normal, al graficarlos tienden a quedar alineados en una línea recta; por lo tanto, si claramente no se alinean se concluye que el supuesto de normalidad no es correcto.

Cabe enfatizar el hecho de que el ajuste de los puntos a una recta no tiene que ser perfecto, dado que el análisis de varianza resiste pequeñas y moderadas desviaciones al supuesto de normalidad. **(Gutierrez, 2008, p. 83)**

Figura 17. Valores residuales para throughput en papel ordinario



Fuente: Autor

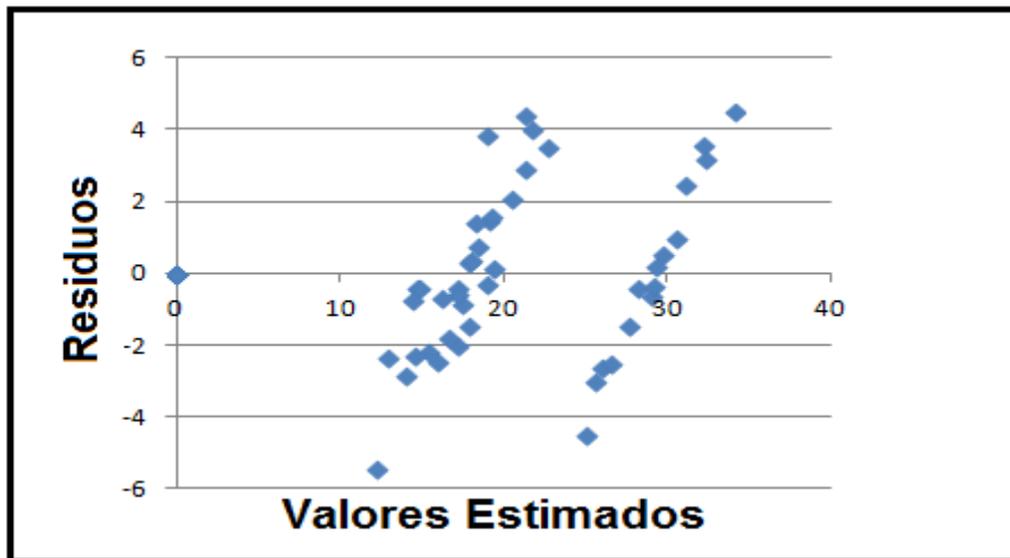
En la figura anterior, correspondiente a la gráfica de probabilidad, se observa que algunos residuos no se ajustan de forma adecuada a la recta graficada; lo que no impide el cumplimiento del supuesto de normalidad ya que estos datos pueden considerarse como atípicos sin llegar sensibles en la consideración.

3.2.2 Supuesto de Varianza Constante

Una forma de verificar el supuesto de varianza constante (o que los tratamientos tienen la misma varianza) es graficando los valores estimados contra los residuos (\hat{Y}_{ij} vs ε_{ij}). Generalmente, \hat{Y}_{ij} va en el eje X (horizontal) y los residuos en el eje vertical. Si los puntos de la gráfica de residuos contra los estimados se distribuyen aleatoriamente en una banda horizontal, sin ningún patrón claro y contundente, entonces es señal de que cumple con el supuesto de que los tratamientos tienen igual varianza. Por el contrario, si se distribuyen con algún patrón claro y contundente, como por ejemplo una corneta o un embudo, entonces es señal de

que no se está cumpliendo el supuesto de varianza constante. En particular, la parte estrecha del embudo indica que en esos niveles estimados para la variable respuesta, se espera una menor variabilidad, por lo que se debe analizar si estos valores ayudan a maximizar o a minimizar el resultado deseado (Moreno, 2002, p. 330).

Figura 18. Valores residuales vs valores estimados para throughput



Fuente: Autor

En la figura anterior, se observa que el supuesto de varianza constante en el que se grafica los valores residuales vs valores estimados es cumplido, teniendo como referencia los criterios puntualizados anteriormente donde indica un comportamiento sin un patrón claro en los datos graficados.

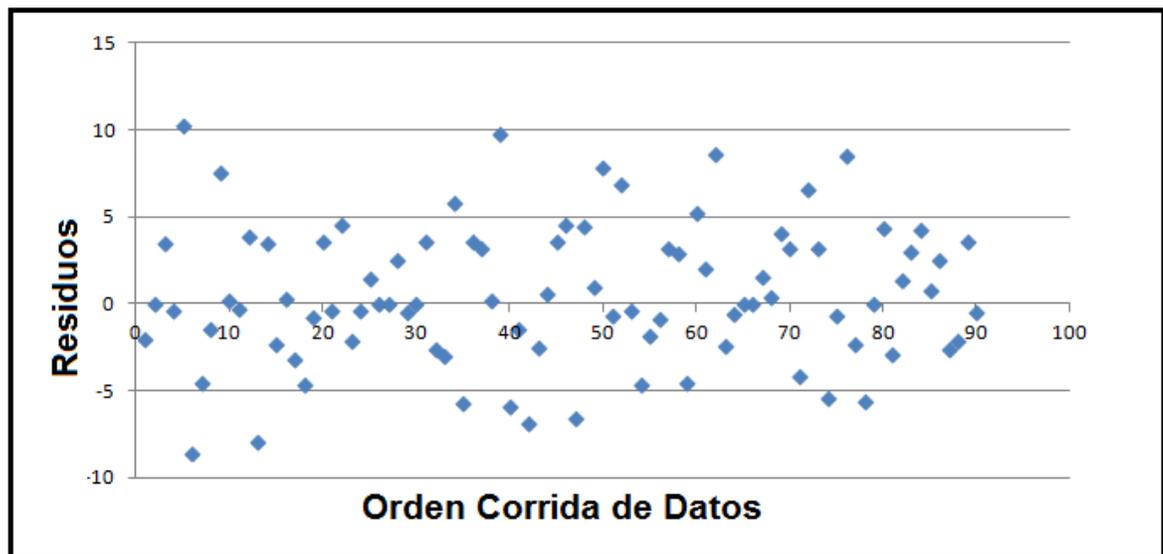
3.2.3 Supuesto de Independencia

La suposición de independencia en los residuos puede verificarse si se grafica el orden en que se colectó un dato contra el residuo correspondiente. De esta manera, si al graficar en el eje horizontal el tiempo (orden de corrida) y en el eje

vertical los residuos, se detecta una tendencia o patrón no aleatorio claramente definido, esto es evidencia de que existe una correlación entre los errores y, por lo tanto, el supuesto de independencia no se cumple. Si el comportamiento de los puntos es aleatorio dentro de una banda horizontal, el supuesto se está cumpliendo.

En la siguiente figura, se puede ver que los valores residuales se encuentran distribuidos de forma aleatoria sobre la franja horizontal. Esto indica que el supuesto de independencia es cumplido teniendo en cuenta los criterios definidos.

Figura 19. Residuos vs el Orden en la toma de datos

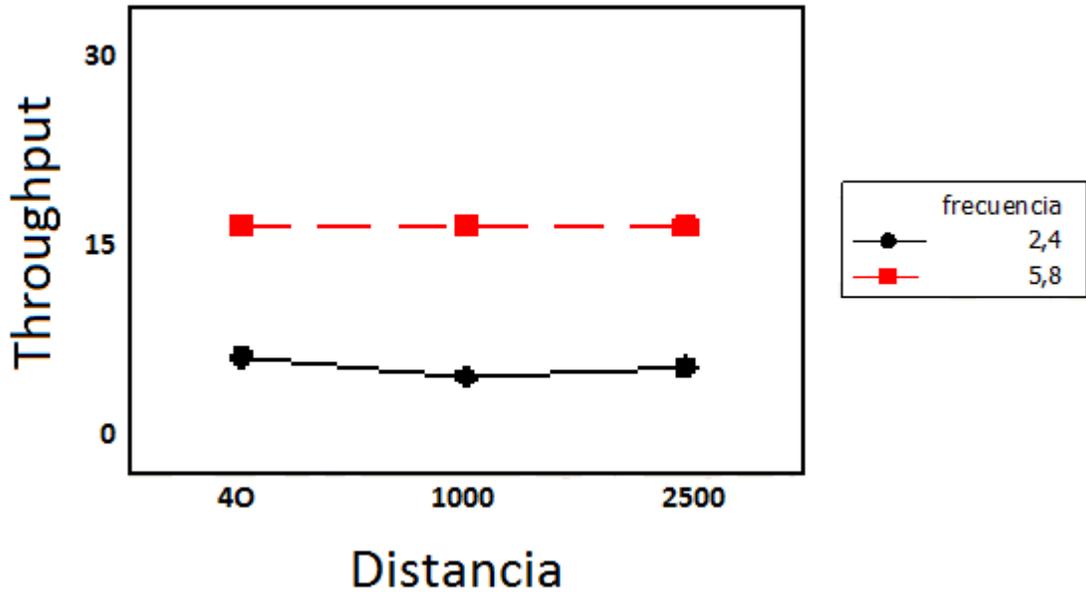


Fuente: Autor

3.3 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS EFECTOS ACTIVOS

Mediante el software estadístico Minitab, se realizó el análisis multifactorial de varianza tipo ANOVA para Throughput, el cual permite obtener resultados y gráficos que se prestan para determinar los factores que tienen un efecto estadísticamente significativo en la variable de salida determinada.

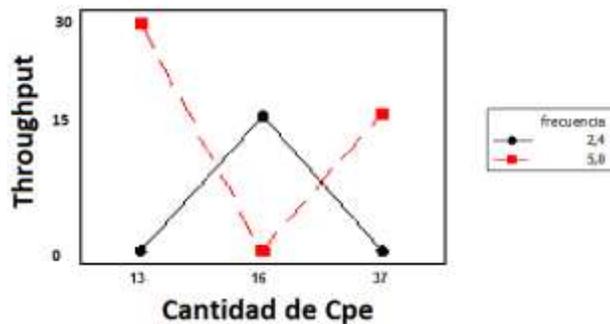
Figura 20. Interacción entre distancia y frecuencia



Fuente: Autor

En la figura anterior se puede observar una baja relevancia entre el factor distancia y frecuencia de operación, ya que las líneas describen una forma paralela entre sí. Por otra parte, se evidencia que la pendiente de las rectas es prácticamente cero, demostrando la falta influencia entre el valor distancia y el throughput para las condiciones planteadas en el caso de estudio.

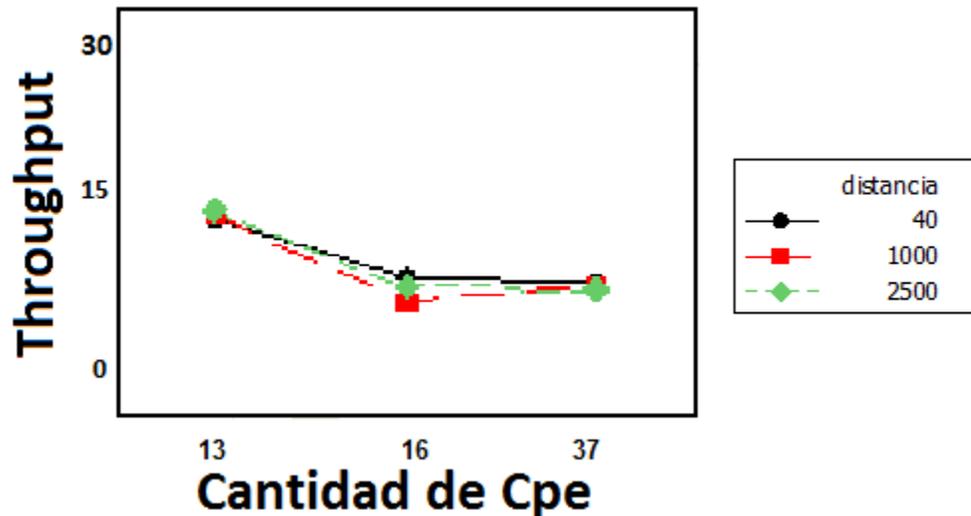
Figura 21. Interacción entre cantidad de CPE y frecuencia



Fuente: Autor

Observando la figura anterior y teniendo en cuenta las mediciones registradas se puede analizar una interacción bastante marcada pues las curvas mostradas presentan formas totalmente diferentes.

Figura 22. Interacción entre cantidad de CPE y distancia



Fuente: Autor

En la figura anterior se evidencia de manera visual una muy poca importancia de la interacción entre la cantidad de CPE y la distancia existente en la red, debido a que las líneas se encuentran casi paralelas entre sí. Por otro lado se observa una disminución considerable del *throughput* cuando aumenta la cantidad de CPE de 13 a 16 unidades en todas las distancias; además se observa que la disminución del *throughput* después de 16 CPE continua pero de forma menos abrupta.

3.4 ANÁLISIS DE VARIANZA PARA RETARDO DE TRANSMISIÓN

En esta sección se desarrollara el modelo estadístico, ANOVA y verificación de los resultados obtenidos experimentalmente para la variable de salida Retardo de Transmisión.

Tal como se presento en el modelo para Throughput, se utilizará un diseño factorial de tres (3) factores abc.

(15)

$$Y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (BC)_{jk} + (ABC)_{ijk} + \varepsilon_{ijkl}$$

$$i = 1, \dots, a; j = 1 \dots b; k = 1 \dots c; l = 1 \dots n$$

a = frecuencia de operación

b = distancia entre CPE y AP

c = Cantidad de CPEs

N = Número de replicas del experimento

Y_{ijkl} = Retardo de Transmisión para frecuencia de operación (i) a una distancia entre CPE Y AP (j), con un número de estaciones (k), para la replicación (l).

μ =Media general sin efectos de interacciones

A_i = efecto del i – ésimo nivel del factor A

B_j = efecto del i – ésimo nivel del factor B

C_k =Efecto del i – ésimo nivel del factor C

$(AB)_{ij}$ =Efecto de la interacción entre los factores Frecuencia y distancia

$(AC)_{ik}$ =Efecto de la interacción entre los factores frecuencia y cantidad de CPE

$(BC)_{jk}$ =Efecto de la interacción entre los factores distancia y cantidad de CPE

$(ABC)_{ijk}$ =Efecto de la interacción de los tres factores

ε_{ijkl} =Error aleatorio

Los efectos a estudiar en este caso de tres factores (abc) son A, B, C, AB, AC, BC y ABC; Además se debe tener en cuenta para el estudio los niveles utilizados para cada factor. En el represente caso se observan siete (7) interacciones, con las que se plantea siete (7) hipótesis nulas (H_o) cada una emparentada con una hipótesis alternativa (H_A).

Las hipótesis a contemplar para los tres (3) factores y sus respectivas interacciones son.

(16)

$$\begin{aligned}H_o: \text{Efecto } A &= 0, & H_A: \text{Efecto } A &\neq 0 \\H_o: \text{Efecto } B &= 0, & H_A: \text{Efecto } B &\neq 0 \\H_o: \text{Efecto } C &= 0, & H_A: \text{Efecto } C &\neq 0 \\H_o: \text{Efecto } AB &= 0, & H_A: \text{Efecto } AB &\neq 0 \\H_o: \text{Efecto } AC &= 0, & H_A: \text{Efecto } AC &\neq 0 \\H_o: \text{Efecto } BC &= 0, & H_A: \text{Efecto } BC &\neq 0 \\H_o: \text{Efecto } ABC &= 0, & H_A: \text{Efecto } ABC &\neq 0\end{aligned}$$

Para casos en los que todos los factores del experimento son fijos, es posible formular y probar fácilmente hipótesis acerca de los efectos principales y las interacciones. Para el caso de modelos de efectos fijos, los test para probar las hipótesis sobre cada efecto principal y las interacciones se pueden construir dividiendo el CM correspondiente del efecto o la interacción por el CM_E . Los grados de libertad para cada efecto principal son los niveles del factor menos uno y el número de grados de libertad para una interacción es el producto del número de grados de libertad asociados con los componentes individuales de esta. **(Gutierrez, 2008, p. 151)**

Procedimiento de la experimentación:

Variable dependiente: RETARDO DE PROPAGACIÓN

Factores: (A) Frecuencia de operación
(B) Distancia entre CPE y AP
(C) Cantidad de CPEs

Número de muestras experimentales: 90

Con el fin de comprender fácilmente los cálculos se recomienda presentar la información de los factores correspondientes para encontrar las SC.

Tabla 20. Datos combinación factor A vs factor B

	B		
A	40	1000	2500
2.4	392,458	501,594	429,312
5.8	678,766	699,642	713,332
Totales	1071,224	1201,236	1142,644

Fuente: Autor

Los datos obtenidos en la tabla anterior son resultado de la sumatoria de cada una de las réplicas para las combinaciones existentes entre los factores frecuencia de operación (A) y distancia entre CPE y AP (B). La representación de datos presentada es utilizada en el cálculo del efecto del factor B y el efecto de la interacción entre los factores AB.

Tabla 21. Datos combinación factor A vs factor C

	C		
A	13	16	37
2,4	0	1323,364	0
5,8	776,952	0	1314,788
Totales	776,952	1323,364	1314,788

Fuente: Autor

Los datos obtenidos en la tabla anterior son resultado de la sumatoria de cada una de las réplicas para las combinaciones existentes entre los factores frecuencia de operación (A) y cantidad de CPE's (C). La representación de datos presentada es utilizada en el cálculo del efecto del factor C y el efecto de la interacción entre los factores AC.

Seguidamente se procederá a realizar los respectivos cálculos de análisis de varianza para Retardo de Propagación, extrayendo los datos consignados en la tabla 9, 19 y 20.

La ecuación matemática para determinar el factor correlación (FC) es:

(17)

$$FC = \frac{Y^2}{abn}$$

$$FC = \frac{Y^2}{abcn} = \frac{11662935,3}{90} = 129588,17$$

Para realizar los cálculos de la suma de cuadrados (SC) se utilizará la siguiente expresión:

(18)

$$SC_{TOT} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^n Y_{ijkl}^2 - FC = 278092,562 - 129588,17 = 148504,392$$

Tabla 22. Datos combinación factor A vs factor B vs factor

	13 CPE			16 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	25000m (B)	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0	0	0	392,458	501,594	0
5,8GHz (A)	263,16	258,228	255,564	0	0	263,16

	37 CPE			Totales
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)	
2,4GHz (A)	429,312	0	0	1323,364
5,8GHz (A)	0	415,606	441,414	2091,74

Fuente: Autor

Los datos obtenidos en la tabla anterior son resultado de la sumatoria de cada una de las réplicas para las combinaciones existentes entre los factores frecuencia de operación (A), distancia entre CPE y AP (B) y cantidad de CPE's (C). La representación de datos presentada es utilizada en el cálculo del efecto del factor A y el efecto de la interacción entre los factores ABC.

(19)

$$SC_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i...}^2}{bcn} - FC$$

$$SC_A = \frac{(1323,364)^2 + (2091,74)^2}{45} - 129588,17$$

$$SC_A = 6560,01864$$

Tabla 23. Efecto Retardo de Propagación factor B

	B		
A	40	1000	2500
2.4	392,458	501,594	429,312
5.8	678,766	699,642	713,332
Totales	1071,224	1201,236	1142,644

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_B se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se muestra a continuación:

(20)

$$SC_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{j..}^2}{an} - FC$$

$$SC_B = \frac{(1071,224)^2 + (1201,236)^2 + (1142,644)^2}{30} - 129588,17$$

$$SC_B = 282,632878$$

Tabla 24. Efecto Retardo de Propagación factor C

	C		
A	13	16	37
2,4	0	1323,364	0
5,8	776,952	0	1314,788
	776,952	1323,364	1314,788

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_C se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se muestra a continuación:

(21)

$$SC_C = \sum_{k=1}^c \frac{Y_{..k.}^2}{abn} - FC$$

$$SC_C = \frac{(776,952)^2 + (1323,364)^2 + (1314,788)^2}{30} - 129588,17$$

$$SC_C = 6532,30205$$

Tabla 25. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores A-B

	B		
A	40	1000	2500
2.4	392,458	501,594	429,312
5.8	678,766	699,642	713,332

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_{AB} se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se muestra a continuación:

(22)

$$SC_{Celdas-AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij..}^2}{cn} - FC$$

$$SC_{celdas}(A - B) = \frac{(392,458)^2 + (501,594)^2 \dots + (713,332)^2}{15} - 129588,17$$

$$= 7011,3876$$

$$SC_{AB} = SC_{Celdas-AB} - SC_A - SC_B$$

$$SC_{AB} = 7011,3876 - 6560,01864 - 282,632878 = 168,736081$$

Tabla 26. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores A-C

	C		
A	13	16	37
2,4	0	1323,364	0
5,8	776,952	0	1314,788

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_{AC} se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se muestra a continuación:

(23)

$$SC_{Celdas-AC} = \sum_{i=1}^a \sum_{k=1}^c \frac{Y_{i.k.}^2}{bn} - FC$$

$$SC_{celdas(A-C)} = \frac{(0)^2 + (1323,364)^2 \dots + (1314,788)^2}{15} - 129588,17 = 142652,774$$

$$SC_{AC} = SC_{Celdas-AC} - SC_A - SC_C$$

$$SC_{AC} = 142652,774 - 6560,01864 - 6532,30205 = 129560,454$$

Tabla 27. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores B-C

	C		
B	13	16	37
40	263,16	392,458	415,606
1000	258,228	501,594	441,414
2500	255,564	429,312	457,768

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_{BC} se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se muestra a continuación:

(24)

$$SC_{Celdas-BC} = \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{.jk.}^2}{an} - FC$$

$$SC_{celdas}(B - C) = \frac{(263,16)^2 + (392,458)^2 \dots + (457,768)^2}{10} - 129588,17$$

$$SC_{celdas}(B - C) = 7242,09647$$

$$SC_{BC} = SC_{celdas-BC} - SC_B - SC_C$$

$$SC_{BC} = 7242,09647 - 282,632878 - 6532,30205 = 427,161539$$

Tabla 28. Efecto Retardo de Propagación interacción de factores A-B-C

	13 CPE			16 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0	0	0	392,458	501,594	429,312
5,8GHz (A)	263,16	258,228	255,564	0	0	0

	37 CPE		
	40m (B)	1000m (B)	2500m (B)
2,4GHz (A)	0	0	0
5,8GHz (A)	415,606	441,414	457,768

Fuente: Autor

Para el cálculo de SC_{ABC} se utilizan los datos de la casilla totales de la tabla anterior como se muestra a continuación:

(25)

$$SC_{celdas-ABC} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^c \frac{Y_{ijk}^2}{n} - FC$$

$$SC_{celdas}(A - B - C) = \frac{(0)^2 + (0)^2 + (0)^2 + (392,458)^2 \dots + (457,768)^2}{5} - 129588,17$$

$$SC_{celdas}(A - B - C) = 144072,363$$

$$SC_{ABC} = SC_{celdas-ABC} - SC_A - SC_B - SC_C - SC_{AB} - SC_{AC} - SC_{BC}$$

$$SC(ABC) = 144072,363 - 6560,01864 \dots - 427,161539 = 541,058335$$

La SC_E se determina por la siguiente expresión:

(26)

$$SC_E = SC_{TOT} - SC_{celdas-ABC}$$

$$SC_E = 148504,392 - 144072,363$$

$$SC_E = 4432,02866$$

En el siguiente cuadro se ilustra en análisis de varianza para Retardo de Propagación:

Tabla 29. ANOVA para Retardo de Propagación

FUENTE DE VARIACIÓN	SUMA DE CUADRADOS	GRADOS DE LIBERTAD	CUADRADO MEDIO	Fo	Valor P
Frecuencia (A)	6560,01864	1	6560,01864	106,57	0
Distancia (B)	282,632878	2	141,316439	2,3	0,108
#CPE (C)	6532,30205	2	3266,15102	53,06	0
AB	168,736081	2	84,3680407	1,37	0,261
AC	129560,454	2	64780,2269	1052,38	0
BC	427,161539	4	106,790385	1,73	0,152
ABC	541,058335	4	135,264584	2,2	0,078
Error	4432,02866	72	61,5559536		
Total	148504,392	89			

Fuente: Autor

Tomando como referencia la tabla anterior, el efecto es significativamente estadístico cuando su P-Valor es menor al especificado para α , por lo que se

sugiere tomar como estadísticamente significativos los valores cuyo P-Valor menos a 0,05 (5%).

El ANOVA se fundamenta en la descomposición de la variación completa de los datos de la variable en cuestión (Throughput) con respecto a la media global (SCTot), debido a los factores que intervienen en el proceso o experimento.

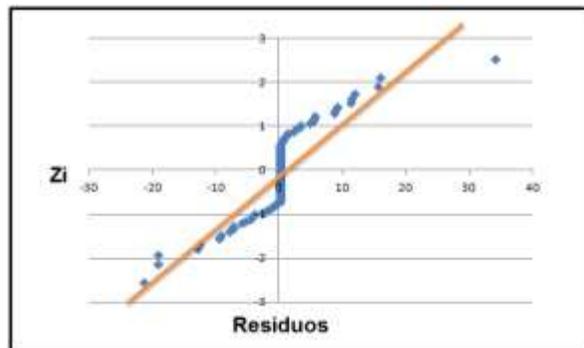
Ya que se ha elegido la suma de cuadrados Tipo III (valor por defecto), se ha medido la contribución de cada factor eliminando los efectos del resto de los factores. Los *p – value* comprueba la importancia estadística de cada uno de los factores. Teniendo en cuenta el análisis de varianza presentado anteriormente se identifican tres efectos con P-Valor menos a 0,05 (A,C, A-C). Estos factores muestran un efecto significativamente estadístico para throughput con un 95% de confianza, y que rechaza la hipótesis Ho.

3.4.1 Verificación de los Supuestos del Modelo por Retardo de Transmisión

A continuación se presentan gráficamente los tres (3) supuestos que dan veracidad al desarrollo del análisis ANOVA para la variable de salida Retardo:

3.4.1.1 Supuesto de Normalidad

Figura 23. Valores residuales para Retardo de Propagación en papel ordinario

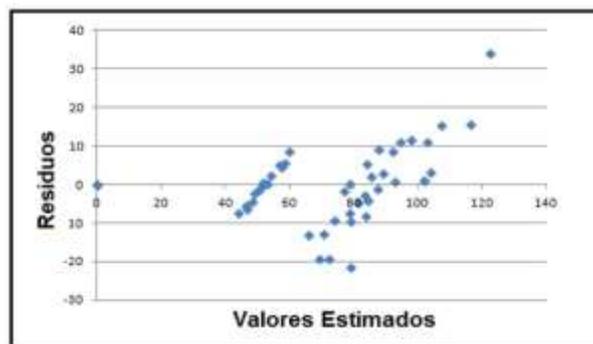


Fuente: Autor

En la gráfica anterior, se observa claramente que se cumple con el supuesto de normalidad teniendo en cuenta que los datos de los residuos están ubicados sobre una línea de referencia.

3.4.1.2 Supuesto de Varianza Constante

Figura 24. Valores residuales vs valores estimados para Retardo de Propagación



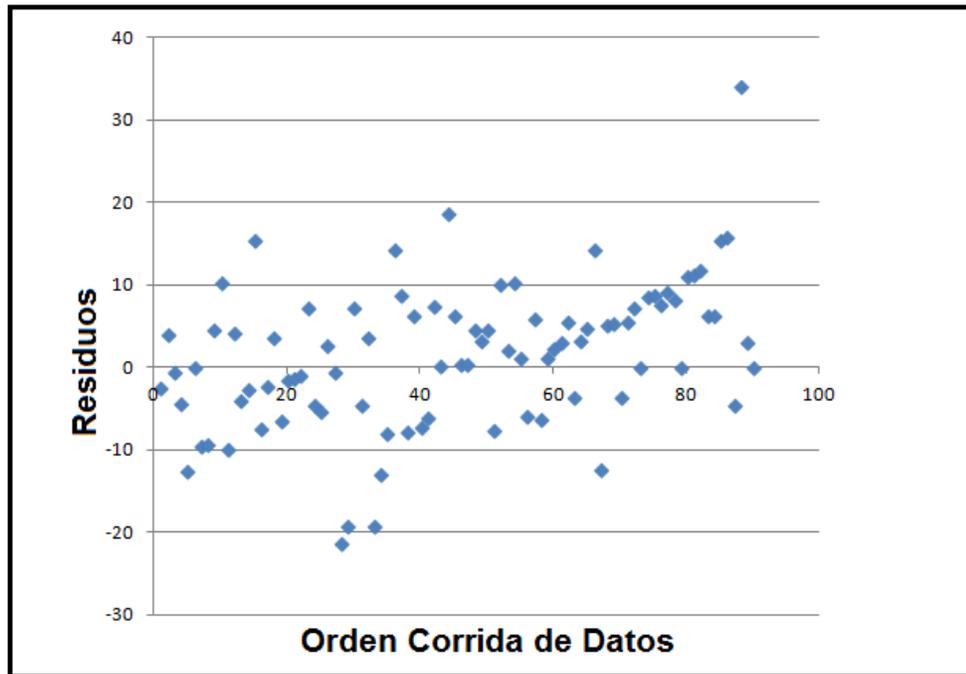
Fuente: Autor

En la figura anterior, se observa que el supuesto de varianza constante en el que se grafica los valores residuales vs valores estimados es cumplido, teniendo como referencia los criterios puntualizados anteriormente donde indica un comportamiento sin un patrón claro en los datos graficados.

3.4.1.3 Supuesto de Independencia

En la siguiente figura, el comportamiento de los puntos dentro de la banda horizontal es aleatorio, es decir no presenta un patrón claro, lo que indica que el supuesto de independencia es cumplido. Se demuestra con esto, que la experimentación es planeada, ejecutada y aleatorizada correctamente.

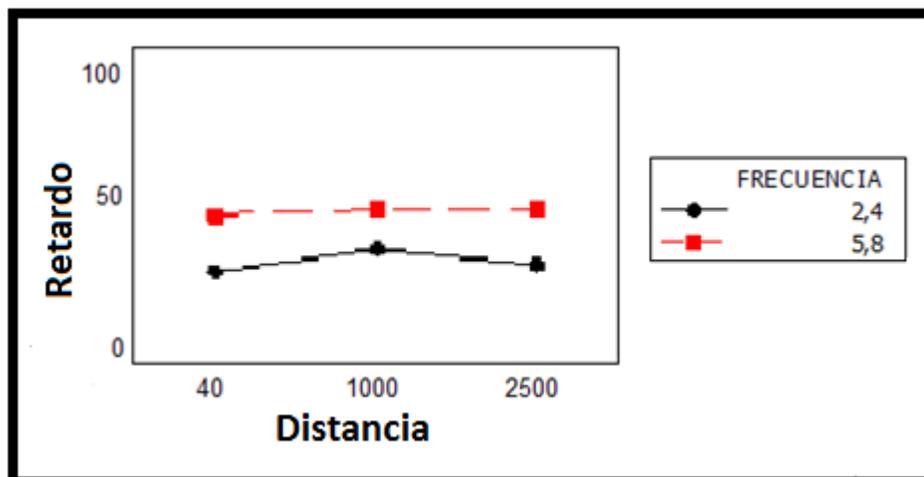
Figura 25. Residuos vs el orden en la toma de datos



Fuente: Autor

3.4.2 Análisis e Interpretación de los Efectos Activos para Retardo de Transmisión

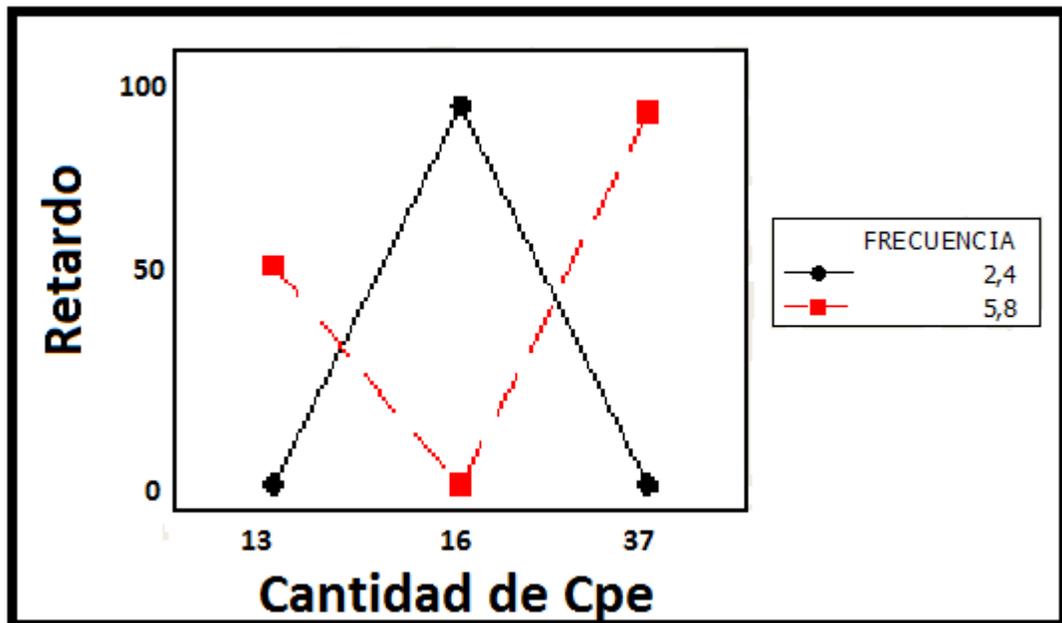
Figura 26. Interacción entre cantidad de CPEs y frecuencia



Fuente: Autor

En la figura anterior se puede observar una baja relevancia entre el factor distancia y frecuencia de operación, ya que las líneas describen una forma paralela entre sí. Por otra parte, se evidencia que la pendiente de las rectas es prácticamente cero, demostrando la falta influencia entre el valor distancia y el throughput para las condiciones planteadas en el caso de estudio.

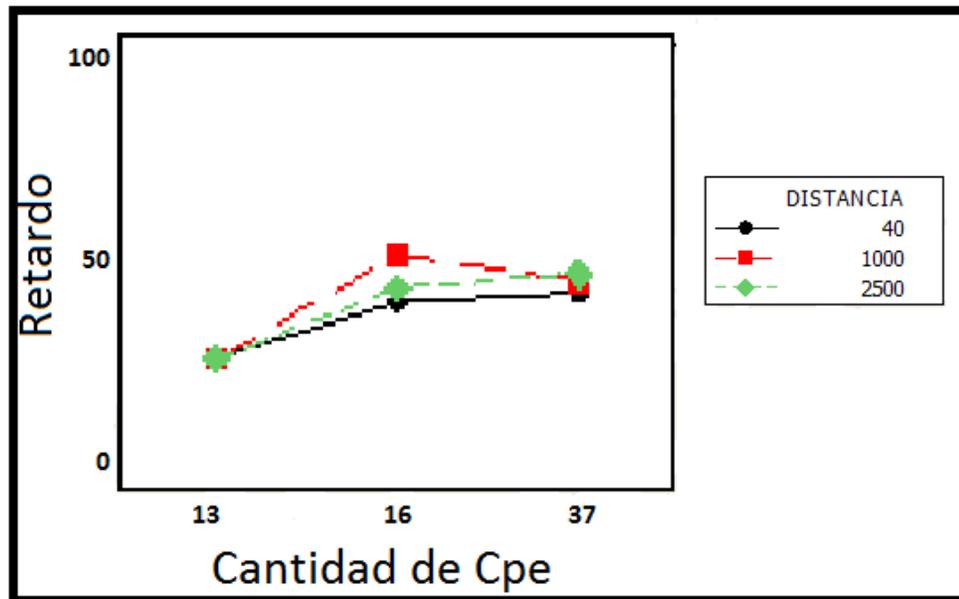
Figura 27. Interacción entre cantidad de CPEs y frecuencia



Fuente: Autor

Observando la figura 28 y teniendo en cuenta las mediciones registradas se puede analizar una interacción bastante marcada pues las curvas mostradas presentan formas totalmente diferentes.

Figura 28. Interacción entre cantidad de CPEs y distancia



Fuente: Autor

Al observar la figura se deduce el poco aporte que tiene la interacción de cantidad de CPEs y la Distancia, dado que las gráficas tiene la tendencia a una forma paralela. Se evidencia un aumento considerable en el retardo cuando crecen la cantidad de CPEs de trece (13) unidades a diez y seis (16) unidades; al aumentar la cantidad de CPEs a treinta y siete (37) unidades el retardo disminuye levemente, prácticamente manteniendo su promedio en las condiciones del sistema en estudio.

4. CONCLUSIONES

Los sistemas de comunicación que operan bajo el estándar IEEE 802.11 han alcanzado altas tasas de transferencia, convirtiéndose en una alternativa para las diferentes aplicaciones en redes de datos. Entre los estándares IEEE 802.11 es importante resaltar los estándares IEEE 802.11n y el IEEE 802.11ac en actual auge, logrando altas velocidades de transmisión. El contexto del presente trabajo se enmarca en una red tipo infraestructura con evolución IEEE 802.11n la cual alcanza velocidades de transmisión de hasta 40 Mbps como se observa en la tabla 9.

Las mediciones efectuadas en el experimento resaltan mayores niveles de throughput para frecuencias de 5.8GHz en relación con las de 2.4GHz. Actualmente la alta proliferación de dispositivos de redes de datos y otros, operando en frecuencias de 2.4GHz genera altos niveles de interferencia lo que produce reducción en las tasas de transferencia de información. Para el caso particular, en la figura 22 se observan diferencias amplias para las dos frecuencias de la variable en mención.

Los resultados de la investigación muestran un comportamiento con poca variabilidad en las mediciones de throughput cuando se aumentan las distancias. El estándar IEEE 802.11 referencia en sus teorías distancias que sólo llegarían a alcanzar unos cientos de metros, pero los fabricantes han desarrollado dispositivos con tecnologías propietarias capaces de llegar incluso a decenas de kilómetros. Este comportamiento se evidencia en la tabla 19 donde se observa que la distancia (factor B) no es estadísticamente significativa en el modelo.

En todo modelo de diseño experimental es necesario crear inferencias sobre factores, variables y otros parámetros que en conjunto actúen en función del

desarrollo y análisis de la investigación. El análisis de varianza ANOVA plasma en sus resultados los efectos individuales e interacciones estadísticamente significativas. Para el Throughput, la evaluación muestra efectos estadísticamente significativos en los factores A y C, además de la interacción entre ellos (AC). En el caso del Retardo de Propagación se observa también que los factores A, C y la interacción entre ellos (AC) son los efectos estadísticamente significativos.

Se observa disminución de throughput a medida que aumenta la cantidad de CPE's conectados pero con tendencia a estabilización en determinado momento. Este fenómeno es de esperarse pues a más equipos conectados a un punto de acceso AP genera un acceso al medio más competido y en algunos casos saturación en los canales de transmisión. La figura 24 muestra una disminución fuerte entre los 13 y 16 CPE's conectados pero que se suaviza posteriormente; además se deduce que la interacción entre cantidad de CPE's y distancia no es estadísticamente significativa.

Los efectos estadísticamente significativos para el retardo de propagación en el estudio resultaron ser similares a los del throughput. Esta característica puede ser explicada pues son dos variables directamente relacionadas. La figura de interacción entre distancia y frecuencia muestra tiempos estables en la transmisión en las dos frecuencias sin importar las distancias; en la figura de interacción entre cantidad de CPE's y distancia, se representan tiempos más altos a medida que aumenta la cantidad de CPE's pero siendo más fuerte esta tendencia entre 13 y 16 CPE's conectados.

En el desarrollo de diseños experimentales en los cuales se utilice el análisis de varianza ANOVA como herramienta, es necesario comprobar la veracidad de los resultados obtenidos. La validez del ANOVA queda supeditada a los supuestos de normalidad, varianza constante e independencia. En la presente investigación de rendimiento para una red inalámbrica operando bajo el estándar IEEE 802.11 se

comprobaron los supuestos del modelo para Throughput y Retardo de Transmisión, garantizando con el análisis de gráficos residuales una muestra aleatoria de distribución normal con media cero y varianza constante.

5. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En general cualquier, trabajo puede ser modificado o continuado para obtener un nivel de conocimiento en la investigación más profundo. Se presentan algunas propuestas a realizar:

Diseñar diferentes modelos de evaluación que al ser comparados con el presentado, revalide la veracidad y confiabilidad del presente estudio.

Realizar simulaciones a nivel de software (preferiblemente NS-3) con los parámetros definidos en la investigación que conlleve a una comparación de resultados. Siendo un punto interesante para medir la seguridad en los resultados obtenidos por parte del simulador.

El análisis realizado en el presente caso de estudio se enmarca bajo ciertos parámetros, lo que indica que no se tienen en cuenta condiciones diferentes y que éstas no aportan información relevante para el desarrollo de la investigación.

Realizar un estudio mediante diseño experimental que presente diferentes parámetros de análisis o que adicione alguno(s) al existente para determinar si existe variabilidad en los resultados y en qué proporción.

El estándar IEEE 802.11 ha presentado grandes avances desde su inicio hasta llegar a la versión IEEE 802.11ac que puede obtener transmisiones en el orden de los Gbps. Resulta de gran importancia entonces, realizar estudios en diferentes contextos que nos brinde información desde métodos científicos del estándar IEEE 802.11ac.

El estándar IEEE 802.11e es la versión referente a la mejora de la calidad del servicio en la capa de enlace de datos para mejorar las transmisiones de datos cuando hay tráfico sensible (audio y video). Toma importancia entonces, realizar una investigación en la que se tengan en cuenta factores inherentes a la capa mencionada como objeto de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

1. Al-Ghazu, N. (2013). *A Study of the Next WLAN Standar IEE802.11 ac Physical Layer*. Estocolmo.
2. Al-Ghazu, N. (2013). *A Study of the Next WLAN Standar IEE802.11 ac Physical Layer*. Estocolmo.
3. Alnuweiri, H., & Yaser, F. (2009). OFDMA-Based Medium Access Control for Next-Generation WLANs. *EURASIP JWCN*.
4. CAMPISTA, M., COSTA, L., & DUARTE, O. (2006). Improving the Multiple Access Method of CSMA/CA Home Networks. *IEEE*.
5. CROW, B. (2002). IEEE 802.11 Wireless Local Área Network.
6. GUTIERREZ, H. (2008). *Análisis y Diseño de Experimentos*. Mexico.
7. Hep.by. (s.f.). *Linux Optimized Link State Routing Protocol (OLSR) IPv6 HOWTO: What about IBSS (IEEE ad-hoc mode)?* Obtenido de <http://www.hep.by/gnu/linux/OLSR-IPv6-HOWTO/intro.html>
8. IEEE COMPUTER SOCIETY. (2007). *IEEE Standard for information technology-Telecommunications and information Exchange between system-Local and metropolitan area networks-specific requirements. IEEE std 802.11tm-2007 LAN/MAN standard committee*. New York.
9. Khattab, T., El-Hadidi, Mahmoud, Mourad, & Hebat-AllahM. (2002). Analysis ofWirelessCSMA/CA Network Using Single Station. *International Journal of Electronics and Communications*.
10. KHATTAB, TAMERM, EL-HADIDI, MAHMOUD, MOURAD, & HEBAT. (2002). Analysis ofWirelessCSMA/CANetworkUsing Single Station. *International Journal of Electronics and Communications*.

11. KUMAR, P, & KRISHNAN. (2010). Throughput Analysis of the IEEE 802.11 Distributed Coordination Function considering Capture Effects. *IEEE*.
12. MARIN, C. (2013). Algoritmo genético para mejorar el rendimiento promedio de redes 802.11g. Mexico D.C.
13. MATTHEW. (2002). *Gast. 802.11 Wireless Network: the definitive guide*. O'Reilly.
14. MINTIC. (2009). *Resolución 002544 de 2009*. Obtenido de http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-3770_documento.pdf
15. MINTIC. (2010). *La necesidad de masificar el internet en Colombia*. Obtenido de <http://www.mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-article-1513.html>
16. MINTIC. (2014). *Proyecto nacional fibra óptica*. Obtenido de <http://www.mintic.gov.co/portal/vivedigital/612/w3-propertyvalue-647.html>
17. MINTIC. (2014). *Rendición de Cuentas MINTIC*. Obtenido de http://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-6423_recurso_5.pdf
18. MINTIC. (Noviembre de 2015). *Boletín Trimestral de las TIC Segundo Semestre 2015*. Recuperado el 5 de Diciembre de 2015, de MINTIC: http://colombiatic.mintic.gov.co/602/articles-14228_archivo_pdf.pdf
19. MINTIC. (2015). *Boletín Trimestral de las TIC Segundo Semestre 2015*. Obtenido de http://colombiatic.mintic.gov.co/602/articles-14228_archivo_pdf.pdf
20. MONGOMERY, D. (2004). *Diseño y Análisis de experimentos*. México.
21. Perahia, E., & Stacey, R. (2008). *Next Generation Wireless LANs*. New York: Cambridge University.
22. SARTTHONG, J., & SUVEPON, S. (2011). Near Theoretical Maximum Throughput Limits of CSMA/CA RTS. *International Conference on Circuits, System and Simulation*.

23. STALLINGS, W. (2000). *Comunicaciones y redes de computadoras*. Madrid.
24. TANTRA, J., HENG FOH, C., & MNAOUER, A. (2005). Throughput and Delay Analysis of the IEEE 802.11e EDCA Saturation. *IEEE*.
25. UBNT. (s.f.). Obtenido de <http://www.4netonline.com/ws/wp-content/uploads/images/products/p-2763-RM2-GPS-2.jpg>
26. UBNT. (s.f.). Obtenido de <http://www.4netonline.com/ws/product/am-5g19-120-5ghz-19dbi-120-degrees-2x2-mimo-basestation-sector-antenna/>
27. UBNT. (s.f.). Obtenido de <http://www.4netonline.com/ws/product/locom2-2-4ghz-outdoor-airmax-cpe-8dbi-export-only/>
28. UNAB. (s.f.). *UNAB*. Obtenido de (http://datateca.unad.edu.co/contenidos/100201/HT2013Exe/leccin_9_redes_wan_y_redes_vpn.html).
29. Universidad Nacional de Colombia. (s.f.). *Universidad Nacional*. Obtenido de http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/2000352/html/un5/cont_504-82.html
30. VESGA, J. (2011). *Análisis Simple del Estándar Home Plug 1.0 Aplicado a la Transmisión de Información Utilizando la Red Eléctrica como medio Físico de Transmisión*. Bucaramanga.
31. VILLEGAS, E., & LOPEZ-AGILERA, E. (2007). Effect of adjacent-channel interference in IEEE 802. 1 WLANs. *IEEE*.
32. W, M. (2002). *Aplicaciones al diseño y análisis de experimentos* (E. UIS, Ed.). Bucaramanga.
33. WANG, X., & KAR, K. (2005). Throughput Modelling and Fairness Issues In CSMA/CA Based Ad-Hoc Networks. *IEEE*.

34. Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications IEEE std 802.11. (1997). *IEEE*.
35. YIN, J. (2007). The Analysis of Performance of IEEE 802.11 MAC Protocol Using Markov Chain. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*.
36. ZHAOY, J., ZHANG, Q., ZIHUA, G., & ZHU, W. (2007). Throughput and QoS Optimization in IEEE 802.11 WLAN. *Microsoft Research Asia*.

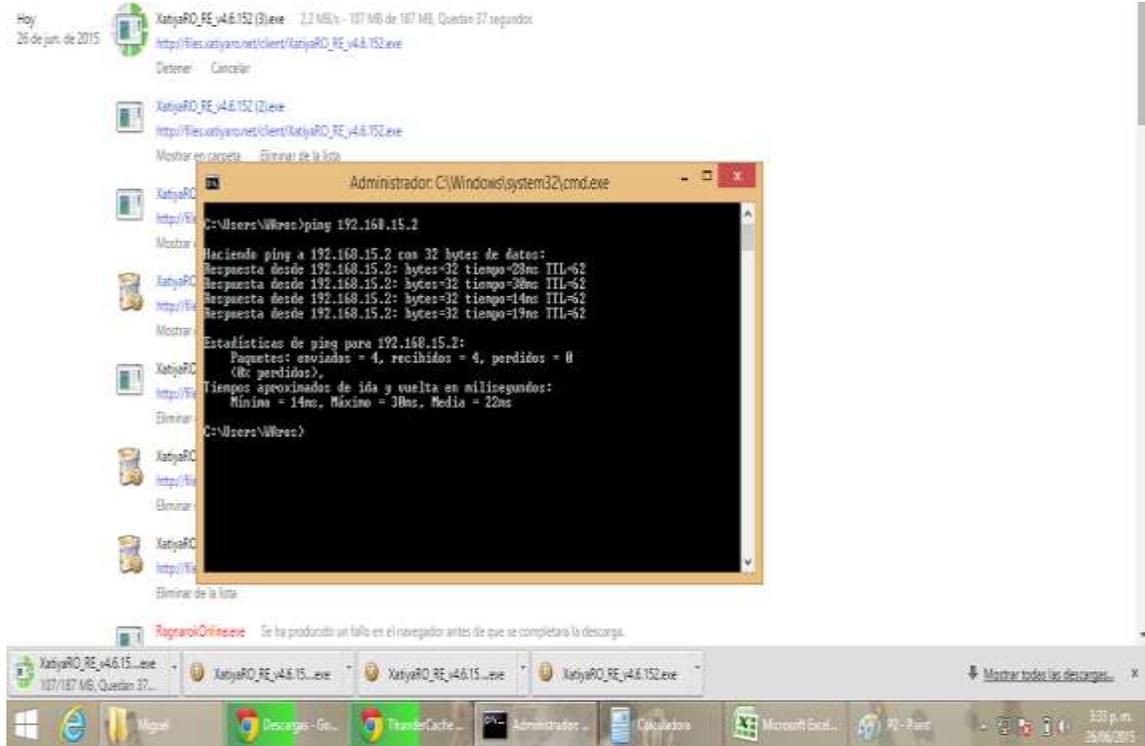
ANEXOS

ANEXO A. CONEXIÓN DE EQUIPO CPE AL NODO DE DISTRIBUCIÓN



Fuente: Autor

ANEXO B. DESCARGA DE ARCHIVO, MUESTRA EXPERIMENTAL



Fuente: Autor

ANEXO C. NODO DISTRIBUCIÓN AROS COMUNICACIONES



Fuente: Autor

En la imagen se ilustra dos (2) paneles sectoriales con su respectivo *Acces Point*, uno en la frecuencia de 2.4 Ghz y otro en 5.8 Ghz. El Disco o plato es un dispositivo Inalámbrico que realiza una conexión punto a punto con el nodo central. La lámina que se observa es un panel solar el cuál energiza los dispositivos ubicados en la torre.

