Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada

ANALISIS DEL DESEMPENO DE LA SUBCAPA MAC EN UNA RED INALAMBRICA MULTIMEDIA COMPATIBLE CON EL ESTANDAR IEEE 802.11

TESIS
MAESTRIA EN CIENCIAS

JULIO CESAR CRUZ MENDOZA

ENSENADA, B. C., NOVIEMBRE DEL 2000.

TESIS DEFENDIDA POR

Julio César Cruz Mendoza

Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ

M.C. Jorge Enrique Preciado Velasco

Director del Comité

Dr. José Luis Medina Monroy

Miembro del Comité

Dr. Francisco Javier Esparza Hernández

Miembro del Comité

Dr. José Luis Medina Monroy

Jefe del Departamento de
Electrónica y Telecomunicaciones

Dr. Federico Graef Ziehl

Director de Estudios de Posgrado

16 de Noviembre del 2000

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y
DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA

DIVISIÓN DE FÍSICA APLICADA

DEPARTAMENTO DE
ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA SUBCAPA MAC EN UNA RED INALÁMBRICA MULTIMEDIA COMPATIBLE CON EL ESTÁNDAR IEEE 802.11

TESIS

Que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de Maestro en Ciencias presenta:

JULIO CÉSAR CRUZ MENDOZA

Ensenada, Baja California, México. Noviembre 2000.

RESUMEN de la tesis de **Julio César Cruz Mendoza**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de **MAESTRO en CIENCIAS** en **ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**. Ensenada, Baja California, México. Noviembre del 2000.

ANÁLISIS DEL DESEMPEÑO DE LA SUBCAPA MAC EN UNA RED INALÁMBRICA MULTIMEDIA COMPATIBLE CON EL ESTÁNDAR IEEE 802.11

Resumen aprobado por:

M.C. Jorge E. Preciado Velasco
Director de Tesis

En los últimos años, las comunicaciones inalámbricas han tenido un crecimiento sorprendente debido a la necesidad de mantener comunicadas a las personas aun estando en movimiento, así como a las recientes tecnologías en computadoras portátiles, y dispositivos para computadoras de escritorio, tales como módems inalámbricos y las mismas redes inalámbricas. Dicha necesidad se expande no solo a la transmisión de datos, sino también a la transmisión de voz y video, o en otras palabras una comunicación multimedia. Para satisfacer las necesidades de las redes inalámbricas, el grupo de estudio 802.11 fue formado bajo el proyecto de IEEE 802 para recomendar un estándar internacional para Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN). Se tiene el Acceso Múltiple con Detección de Portadora con Evasión de Colisiones (CSMA/CA) como la base del Control de Acceso al Medio (MAC) para WLAN del estándar IEEE 802.11. Una parte importante del estándar son los protocolos MAC necesarios para soportar una transmisión asíncrona y limitada en tiempo. El desempeño de la subcapa MAC, el cual consiste de la Función de Coordinación Distribuida (DCF) y la Función de Coordinación de Punto (PCF) se crearon para la transmisión asíncrona y limitada en tiempo (voz y video) respectivamente en una red de infraestructura a 2 Mbps.

En este trabajo, se estudia uno de los principales problemas que existen al utilizar una red inalámbrica, como es la subcapa MAC. Debido a que se convierte en un sistema de acceso múltiple, esta capa se encuentra estrechamente relacionada con la capa física adoptada. Por lo tanto, este trabajo se enfoca a la implementación del protocolo 802.11 del estándar IEEE para la transmisión de servicios limitados en tiempo utilizando el programa de computo OPnet (Herramientas de Ingeniería para optimización de redes) para evaluar el desempeño de este con diferentes números de usuarios así como con diferentes tipos de tráfico (real e ideal). La evaluación del desempeño considerando el efecto de captura y la presencia de terminales ocultas es otro de los puntos importantes.

Palabras claves: Redes Inalámbricas, MAC, PCF, DCF, estándar IEEE 802.11, Tráfico Real, Voz y Video.

Abstract of the Thesis of Julio César Cruz Mendoza, presented as partial requirement to obtain the **MASTER in SCIENCES** degree in **ELECTRONICS AND TELECOMUNICATIONS**. Ensenada, Baja California, México. Noviembre del 2000.

ANALYSIS PERFORMANCE OF MAC SUBLAYER OVER A MULTIMEDIA WIRELESS NETWORK COMPATIBLE WITH IEEE 802.11 STANDARD

In the last years, the wireless communications have had a surprising growth due to the necessity to even maintain communicated the people being in movement, as well as the application of recent technological advances in laptop computer and wireless data communications devices to desktop computers, such as wireless modems and wireless LAN's. This necessity expands not only to the data transmission, but also to the transmission of voice and video, or in other words, to multimedia communications. To satisfy the needs of wireless networking, study group 802.11 was formed under IEEE project 802 to recommend an international standard for Wireless Local Area Networks (WLANs). It has a Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA) to the basis for the IEEE802.11 standard to WLAN MAC protocols. A key part of standard are the Medium Access Control (MAC) protocols needed to support asynchronous and time bounded delivery. The performance of the Medium Access Control (MAC) sublayer, which consist of the Distributed Coordination Function (DCF) and the Point Coordination Function (PCF), is determined by transmiting asynchronous data traffic and time bounded services (voice and video) in a 2 Mbps infrastructure network.

In this work, one of the main problems that exist when using a wireless network is studied, as it is the sublayer MAC, because it becomes a system of multiple access, this layer is related to the adopted physical layer closely.

Therefore, this work focuses to the implementation of protocol 802.11 of the IEEE standard for the transmission of time bounded services using the compute program OPnet (Optimization networks Engineering Tools) to evaluate the performance of this with different numbers of users as well as different types of traffic (real and ideal). Performance evaluation about the effect of capture, and presence of hidden stations are developed.

Key words: Wireless networks, MAC, PCF, DCF, standard IEEE 802,11, Real Traffic, Voice and Video.

Dedicatoria

Dedico este trabajo y todo el esfuerzo que ello implicó a:

Mis padres

Benito Cruz Rivera

Ma. Ramona Mendoza Alcaraz

Mis hermanos

José Alejandro

Daniel Ángel

Mi hermana

Eréndira Janeth

Mis abuelos

Hilario y Catalina

Mi novia

la tortuguita (Mari Tere)

Agradecimientos

A **Dios** por la fe para mantenerme fiel a cumplir con mis aspiraciones

A mis padres por apoyarme en mis decisiones y darme siempre lo mejor

A mi asesor M.c. Jorge Enrique Preciado Velasco por el apoyo brindado y la amistad incondicional mostrada

A los miembros de mi comité por el tiempo y los consejos dados

Al Dr. Dimitrios Makrakis por la oportunidad y apoyo brindado para la realización de esta tesis en la UWO.

Al Dr. José R. Gallardo, su esposa Betty y su hija Martha Lucia por el apoyo y amistad brindada en mi estancia en London.

Al M.c. Maged Zaki por el apoyo y gran aportación a esta tesis.

Al M.c. Ricardo Chávez por su ayuda valiosa en los tramites extras que le genere.

Al ing. Enrique Pacheco por su valiosa participación: recuperar mi tesis, además de su amistad.

A las secretarias del DET Rosy y la Sra. Mari, por su paciencia y apoyo.

A los telecos (Arlette, Erica, Marlenne, Ramón, Juan, Alejandro, Ramiro, Gerardo y Javier) por todos los buenos y malos momentos que pasamos.

A los micronderos (Nars, Carlos, Plazaca, Meyran) por la amistad, apoyo y compañerismo mostrado.

Al CICESE por la oportunidad de realizar mis estudios en esta institución.

Al CONACYT por el apoyo económico brindado.

A María Teresa Romero de la Cruz (la tortuguita) por el invaluable apoyo y comprensión incondicional a través de todo este tiempo, por la paciencia que va a la velocidad de una tortuga veloz, que sin ella, no existirían los agradecimientos anteriores.

Índice

I.- INTRODUCCIÓN 1

I.1 ANTECEDENTES. 1
I.2 MOTIVACIÓN 2
I.3.- OBJETIVOS 4
I.4.- ORGANIZACIÓN DE LA TESIS. 4

II.- TECNOLOGÍA INALÁMBRICA LAN 6

II.1.- WLANS DE PROPÓSITO ESPECÍFICO (AD-HOC). 6
II.2.- WLANS TIPO INFRAESTRUCTURA. 7
II.2.1.- Tráfico de enlace de bajada. 8
II.2.2.- Tráfico de enlace de subida. 9
II.3.- ESTÁNDARES ACTUALES PARA WLANS 9
II.4.- REQUERIMIENTOS DEL PROTOCOLO MAC EN LANS INALÁMBRICAS 11
II.4.1.- Confiabilidad. 11
II.4.2.- Transparencia. 12
II.4.3.- Caudal eficaz 12
II.4.4.- Seguridad 12
II.4.5.- Movilidad 13
II.4.6.- Consumo de energía (batería) 13
II.4.7.- Retraso 14
II.4.8.- Acceso equitativo 14
II.4.9.- Detección de colisiones 14
II.4.10.- Terminal oculta 15
II.4.11.- Transferencia entre celda 15

III.- ARQUITECTURA DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11 16

III.1.- CAPA FÍSICA 16
III.1.1.- Infrarrojo (IR): 16
III.1.2.- Secuencia Directa mediante Espectro Esparcido (DSSS): 17
III.1.3.- Saltos en Frecuencia mediante Espectro Esparcido (FHSS): 18
III.2.- SUBCAPA DE CONTROL DE ACCESO AL MEDIO (MAC) 19
III.2.1.- Funciones distribuidas y puntos de coordinación. 20
III.2.2.- Función de Coordinación Distribuida (DCF) 22
III.2.2.1.- SIFS 23
III.2.2.2.- PIFS 23
III.2.2.3.- DIFS 23
III.2.2.4.- Servicio Asíncrono. 28
III.2.3.- Función de Punto de Coordinación (PCF) 30
III.2.3.1.- Servicios de tiempo limitado. 30
III.2.3.2.- Función de Punto de Coordinación. 31
III.2.3.3.- Estructura del Supermarco. 32
III.2.3.4.- Protocolo PCF 33

IV.- MODELOS DE FUENTES DE TRÁFICO. 39

IV.1.- MODELO DE TRÁFICO DE DATOS. 39
IV.2.- MODELO DE TRÁFICO DE VOZ 41
IV.3.- MODELO DE TRÁFICO DE VIDEO 44
IV.4.- MODELO DE TERMINAL OCULTA 44
IV.5.- MODELO DE EFECTO DE CAPTURA. 45

V.- MODELO EN OPNET DE LA SUBCAPA MAC DEL ESTÁNDAR IEEE 802.11 46

V.1.- CONSIDERACIONES PARA EL MODELADO. 46
V.2.- MODELO DE RED 48
V.3.- MODELO DE NODO 49
V.3.1.- Modelo de nodo para estaciones en el período DCF. *50*
V.3.1.1.- Fuente de tráfico. 50
V.3.1.2.- Proceso para la subcapa MAC. 51
V.3.1.3.- Sensor del canal. 52
V.3.2.- Modelo de nodo para el Punto de Acceso (AP) en período PCF. *53*
V.3.2.1.- Proceso para la subcapa MAC en el AP en PCF. 54
V.3.2.2.- Modelo de nodo para estaciones en período PCF que responden al AP. ..54

VI.- MODELO DE SIMULACIÓN 55

VI.1.- MODELO DE RED MANTENIENDO EL NÚMERO DE USUARIOS FIJO. 56
VI.2.- MODELO DE RED TRANSPORTANDO TRÁFICO REAL EN PCF Y TRÁFICO DE POISSON EN DCF VARIANDO EL NÚMERO DE USUARIOS EN LA RED. 59
VI.3.- RED TRANSPORTANDO TRÁFICO DE PARETO Y POISSON EN DCF Y TRÁFICO REAL EN PCF. 63
VI.4.- RED TRANSPORTANDO TRÁFICO DE PARETO EN DCF Y TRÁFICO REAL EN PCF PARA DIFERENTE TAMAÑO DE PERÍODO EN DCF. 67

VII.- CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO 71

VII.1.- INTRODUCCIÓN 71
VII.2.- CONCLUSIONES 73
VII.3.- TRABAJO A FUTURO. 75

ACRÓNIMOS 77

REFERENCIAS. 79

Lista de figuras

FIGURA 1.- RED DE PROPÓSITO ESPECÍFICO (AD-HOC) 7
FIGURA 2.- RED DE TIPO INFRAESTRUCTURA 8
FIGURA 3.- MODELO DEL SERVICIO MAC 21
FIGURA 4.- ESTRUCTURA DE UN SUPERMARCO 21
FIGURA 5.- MÉTODO DE ACCESO BÁSICO 25
FIGURA 6.- DIAGRAMA DEL MECANISMO DE TIEMPO DEL EMPLEO DE RTS/CTS 26
FIGURA 7.- INCREMENTO EXPONENCIAL DE CW 28
FIGURA 8.- CONSTRUCCIÓN DE UN SUPERMARCO PCF 32
FIGURA 9.- BEACONS Y CFPS 34
FIGURA 10.- MECANISMO DEL PROTOCOLO PCF 36
FIGURA 11.- MODELO DE FUENTE DE TRÁFICO INDIVIDUAL UTILIZANDO DISTRIBUCIÓN DE PARETO 40
FIGURA 12.- MODELO DE MARKOV DE DETECTOR DE ACTIVIDAD DE VOZ LENTO 42
FIGURA 13.- MODELO DE MARKOV DE DETECTOR DE ACTIVIDAD DE VOZ RÁPIDO 43
FIGURA 14.- MODELO DE RED 49
FIGURA 15.- MODELO DE NODO EN DCF 50
FIGURA 16.- FUENTE DE TRÁFICO EN PERÍODO DCF 51
FIGURA 17.- SUBCAPA MAC EN PERÍODO DCF. 52
FIGURA 18.- MODELO DEL SENSOR DEL CANAL 53
FIGURA 19.- MODELO DE NODO PARA AP EN PCF 53
FIGURA 20.- SUBCAPA MAC EN AP EN PERÍODO PCF 54
FIGURA 21.- MODELO DE NODO 54
FIGURA 22.- RETRASO PARA TRÁFICO DE DATOS AFECTADO POR DIFERENTES VALORES DE TERMINAL OCULTA Y EFECTO DE CAPTURA 56
FIGURA 23.- RETRASO PARA TRÁFICO DE VIDEO AFECTADO POR DIFERENTES VALORES DE TERMINAL OCULTA Y EFECTO DE CAPTURA 57
FIGURA 24.- RETRASO PARA TRÁFICO DE VOZ AFECTADO POR DIFERENTES VALORES DE TERMINAL OCULTA Y EFECTO DE CAPTURA 57
FIGURA 25.- PÉRDIDAS EN TRÁFICO DE VIDEO POR DIFERENTES VALORES DE TERMINAL OCULTA Y EFECTO DE CAPTURA 58
FIGURA 26.- PÉRDIDAS EN TRÁFICO DE VOZ POR DIFERENTES VALORES DE TERMINAL OCULTA Y EFECTO DE CAPTURA 59
FIGURA 27.- RETRASO PARA TRÁFICO DE VIDEO AFECTADO POR DIFERENTES VALORES DE TERMINAL OCULTA Y EFECTO DE CAPTURA, INCREMENTANDO EL NÚMERO DE USUARIOS. 60
FIGURA 28.- RETRASO PARA TRÁFICO DE DATOS AFECTADO POR DIFERENTES VALORES DE TERMINAL OCULTA Y EFECTO DE CAPTURA, INCREMENTANDO EL NÚMERO DE USUARIOS. 61
FIGURA 29.- RETRASO PARA TRÁFICO DE VOZ AFECTADO POR DIFERENTES VALORES DE TERMINAL OCULTA Y EFECTO DE CAPTURA, INCREMENTANDO EL NÚMERO DE USUARIOS 61

FIGURA 30.- PÉRDIDAS PARA TRÁFICO DE VIDEO AFECTADO POR DIFERENTES VALORES DE TERMINAL OCULTA Y EFECTO DE CAPTURA, INCREMENTANDO EL NÚMERO DE USUARIOS 62
FIGURA 31.- PÉRDIDAS PARA TRÁFICO DE VOZ AFECTADO POR DIFERENTES VALORES DE TERMINAL OCULTA Y EFECTO DE CAPTURA, INCREMENTANDO EL NÚMERO DE USUARIOS 62
FIGURA 32.- RETRASO EN DATOS CON DIFERENTE TIPO DE TRÁFICO EN EL PERÍODO DCF..... 64
FIGURA 33.- RETRASO EN VIDEO CON DIFERENTE TIPO DE TRÁFICO EN EL PERÍODO DCF. 64
FIGURA 34.- RETRASO EN VOZ CON DIFERENTE TIPO DE TRÁFICO EN EL PERÍODO DCF..... 65
FIGURA 35.- PÉRDIDAS EN VIDEO CON DIFERENTE TIPO DE TRÁFICO EN EL PERÍODO DCF..... 65
FIGURA 36.- PÉRDIDAS EN VOZ CON DIFERENTE TIPO DE TRÁFICO EN EL PERÍODO DCF..... 66
FIGURA 37.- PÉRDIDAS EN DATOS CON DIFERENTE TIPO DE TRÁFICO EN EL PERÍODO DCF..... 66
FIGURA 38.- RETRASO EN DATOS CON DIFERENTES PERÍODOS DE TIEMPO EN DCF, EMPLEANDO PARETO. 67
FIGURA 39.- RETRASO EN VIDEO CON DIFERENTES PERÍODOS DE TIEMPO EN DCF, UTILIZANDO PARETO..... 68
FIGURA 40.- RETRASO EN VOZ CON DIFERENTES PERÍODOS DE TIEMPO EN DCF, EMPLEANDO PARETO..... 68
FIGURA 41.- PÉRDIDAS EN VOZ CON DIFERENTES PERÍODOS DE TIEMPO EN DCF, UTILIZANDO PARETO..... 69
FIGURA 42.- PÉRDIDAS EN DATOS CON DIFERENTES PERÍODOS DE TIEMPO EN DCF, EMPLEANDO PARETO 69
FIGURA 43.- PÉRDIDAS EN VIDEO CON DIFERENTES PERÍODOS DE TIEMPO EN DCF, UTILIZANDO PARETO..... 70

Tablas

TABLA I.- PARÁMETROS DE SIMULACIÓN..... 47

I.- Introducción

En los últimos años, el mercado de las comunicaciones inalámbricas ha tenido un gran crecimiento. Dicha tecnología es capaz de transmitir y recibir información como voz, video y datos desde y a cualquier punto de la Tierra. Cientos de millones de personas intercambian información cada día, empleando localizadores personales, teléfonos celulares y otros productos de comunicación inalámbrica. Con dicho crecimiento, es difícil sorprenderse al saber que este tipo de comunicación está empleándose en las redes de cómputo.

Las telecomunicaciones es una de las industrias más grandes en el mundo. La cual tuvo ganancias en el año de 1996 de $900 mil millones de dólares, y tuvo un crecimiento del 50% para 1999 [Katz, 1999]. Para el año de 1997 se tenían 400 millones de usuarios móviles suscritos. Este número es mucho mayor comparado con los usuarios de redes fijas [Shafi *et al.*, 1997]. Así pues, la comunicación inalámbrica será la tecnología de acceso dominante en el mercado. El costo de instalación y mantenimiento de una red inalámbrica es generalmente menor que el de una red alámbrica.

I.1 Antecedentes.

El primer sistema celular fue basado en técnicas de transmisión analógica. El propósito de estos sistemas era el de brindar a un usuario móvil el acceso continuo en cualquier parte donde el operador brindara servicio.

La segunda generación se basa en transmisión digital en la cual la capacidad de los sistemas móviles de segunda generación es insuficiente. Mientras tanto, en las redes inalámbricas la demanda por altas velocidades se incrementa continuamente, con requerimientos que puedan soportar aplicaciones multimedia (transmisión de voz, datos y video). En consecuencia, el futuro de las redes inalámbricas dependerá en gran medida de la habilidad para acomodar eficientemente el tráfico multimedia generado por estas aplicaciones mientras mantenga una calidad de servicio aceptable (QoS por sus siglas en inglés) para las aplicaciones mencionadas anteriormente.

La tercera generación ofrecerá más capacidad, mejor desempeño y mejor costo-beneficio. Cuando ocurra el lanzamiento de los sistemas inalámbricos de tercera generación, después del 2001, los suscriptores notarán las ventajas sobre los sistemas inalámbricos actuales. La tercera generación de sistemas inalámbricos se está desarrollando para permitir servicios multimedia tales como voz a altas velocidades, acceso a Internet y videoconferencia. El acceso de datos con los sistemas de tercera generación será 20 veces más rápido que lo que se tiene actualmente.

I.2 Motivación

En los últimos años, Internet ha tenido un crecimiento sin precedentes, llegando a ser la primera red "global". Con el incremento de suscripciones en Internet y servicios inalámbricos una cantidad significante de tráfico se conduce a través de redes inalámbricas, por lo que estas redes se están haciendo día a día más populares en ambientes locales. Así,

el futuro de las redes inalámbricas dependerá en gran medida de la habilidad para acomodar eficientemente el tráfico integrado generado por las aplicaciones sobre Internet (ftp, telnet, voz, video, http, etc.) mientras se mantenga una calidad de servicio (QoS por sus siglas en inglés) aceptable para las aplicaciones asociadas.

La capa de acceso al medio (MAC) es la que controla la mejor manera de compartir el acceso al medio físico, la cual tiene influencia en el retraso de principio a fin resultando este parámetro crucial para aplicaciones de multimedia. Así pues el protocolo de la subcapa MAC juega un papel importante en la QoS para las aplicaciones multimedia. El estándar IEEE802.11 [IEEE 802.11, 1998], incorpora dos esquemas de acceso en la capa MAC; un esquema básico de acceso para brindar servicio a tráfico asíncrono y un mecanismo de acceso centralizado para brindar servicio a tráfico limitado en tiempo. En este segundo esquema, un controlador centralizado garantiza una parte fija de los recursos para aplicaciones sensibles al retraso, garantizando así, su QoS.

Partiendo del hecho de que la tecnología inalámbrica LAN, ofrece movilidad y bajo costo en su instalación comparado con las redes fijas, la tecnología inalámbrica continúa compitiendo con su contraparte fija, por lo que se espera lograr un protocolo MAC, el cual sea capaz de soportar cualquier número de estaciones que aun teniendo velocidades y puntos de acceso diferentes, compartan el mismo canal. Asimismo, deberá proveer capacidad de poder transmitir información multimedia, la cual es una de las características más importantes que se espera de las WLAN's.

I.3.- Objetivos

El objetivo principal del presente trabajo es evaluar el desempeño de la subcapa MAC en la transmisión de información multimedia bajo consideraciones descritas en el estándar IEEE 802.11 para redes inalámbricas. Para realizar la evaluación de redes bajo el estándar 802.11, se deberán considerar condiciones tales como el efecto de terminal oculta, efecto de captura, el desarrollo de un mecanismo de control para adaptar el comportamiento de la aplicación de acuerdo a las variaciones de tiempo, características de la red, adaptación de los parámetros de los procesos de codificación, transmisión, recepción y decodificación a la fuente y al destino. Lo anterior se debe considerar debido al impacto que tienen dichos parámetros en el desempeño de las redes inalámbricas, así como en la escalabilidad de la red con diferente número de usuarios y diferentes fuentes de tráfico.

I.4.- Organización de la Tesis.

El presente trabajo de tesis está organizado de la siguiente manera. El capítulo 2 trata acerca de la tecnología LAN inalámbrica; los tipos de LAN's existentes, los estándares con los que se cuenta, así como los requerimientos del protocolo MAC. En el capítulo 3 se proporciona una descripción breve del estándar 802.11 de IEEE, que incluye la capa física y la subcapa MAC. En el capítulo 4 se tiene la definición de los modelos de tráfico utilizados en esta tesis, y las características con las que cuenta la red que se esta analizando, como son el efecto de captura y efecto de terminal oculta. En el capítulo 5 se describe la

implementación de la subcapa MAC del estándar IEEE 802.11 en el software que se empleó para simular la red inalámbrica (OPnet). En el capítulo 6 se presentan los resultados obtenidos del análisis para diferentes escenarios donde se contemplan situaciones diferentes de la red, con el fin poder evaluar el desempeño del protocolo en condiciones lo más ideales posibles. Finalmente, en el capítulo 7 se presentan las conclusiones sobre los resultados de las evaluaciones relacionadas con el objetivo de este trabajo, así como las aportaciones y trabajo a futuro.

II.- Tecnología inalámbrica LAN

Las redes locales de datos proporcionan servicios para el flujo y acceso de información en una organización. El medio físico utilizado normalmente para la transmisión, es el cable de cobre, el cual es económico y fácil de instalar. Debido a la necesidad de contar con más ancho de banda, se empezó a emplear fibra óptica. Pero en la actualidad, los usuarios demandan algo más: movilidad, por lo cual, las redes alámbricas se enfrentan a la gran restricción de brindar dicho servicio. Los dispositivos inalámbricos, donde el espacio libre es el medio por el cual se transmite la información, satisfacen dicha demanda, además de satisfacer casi todas las características que brinda una red alámbrica.

Las LANs inalámbricas (WLANs, por sus siglas en inglés) generalmente son de dos tipos, las conocidas como tipo infraestructura y las de propósito específico (ad-hoc).

II.1.- WLANs de Propósito específico (Ad-hoc).

Redes Ad-hoc es un concepto en comunicaciones computacionales, el cual significa que los usuarios desean comunicarse con otros usuarios en una red temporal, sin ninguna forma de administración centralizada (como sucede en las redes de infraestructura), sin la ayuda de una dorsal, ya sea inalámbrica o fija. Cada nodo participante en este tipo de red (ad-hoc) actúa tanto como un servidor (host), así como un enrutador (router).

Los nodos en una red ad-hoc pueden consistir en computadoras personales tipo laptops, como asistentes digitales personales. Una de las características importantes de las redes Ad-hoc, es la topología dinámica con la que se cuenta, lo cual es a consecuencia de la movilidad de los nodos, donde los nodos pueden cambiar de posición frecuentemente.

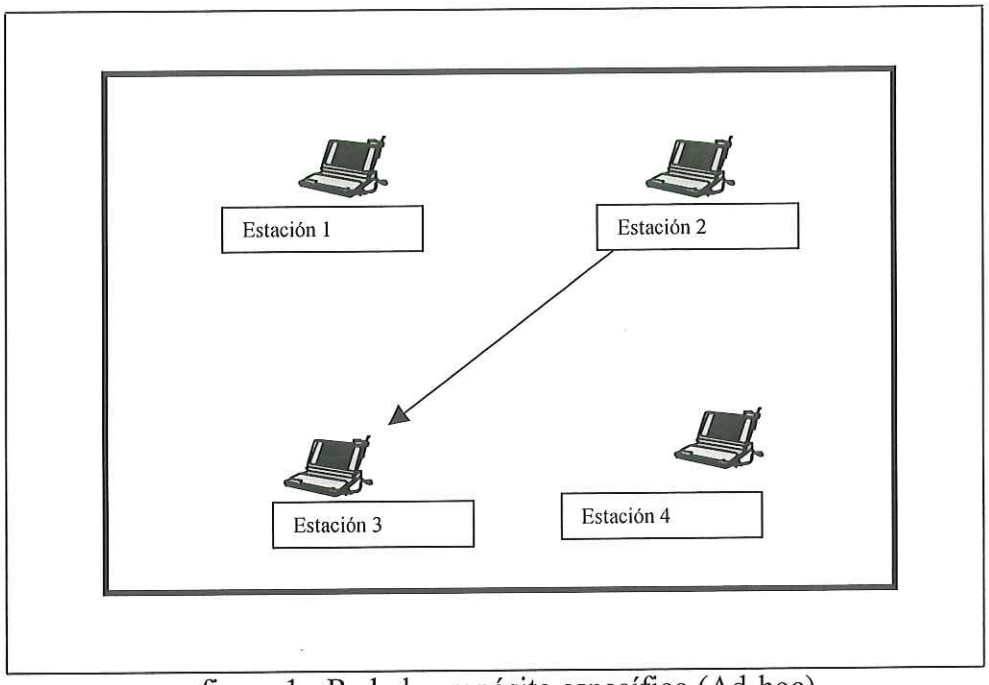

figura 1.- Red de propósito específico (Ad-hoc)

II.2.- WLANs tipo infraestructura.

En las WLANs del tipo infraestructura, se incluyen nodos especiales llamados puntos de acceso, los cuales se interconectan por medio de un sistema de distribución que permite a una red de estaciones inalámbricas abarcar la mayor área posible, y tener acceso a las redes

fijas existentes. Por lo tanto, se puede dividir el tráfico típico de la red en dos direcciones: enlace de subida (hacia la dorsal) y enlace de bajada (de la dorsal) .

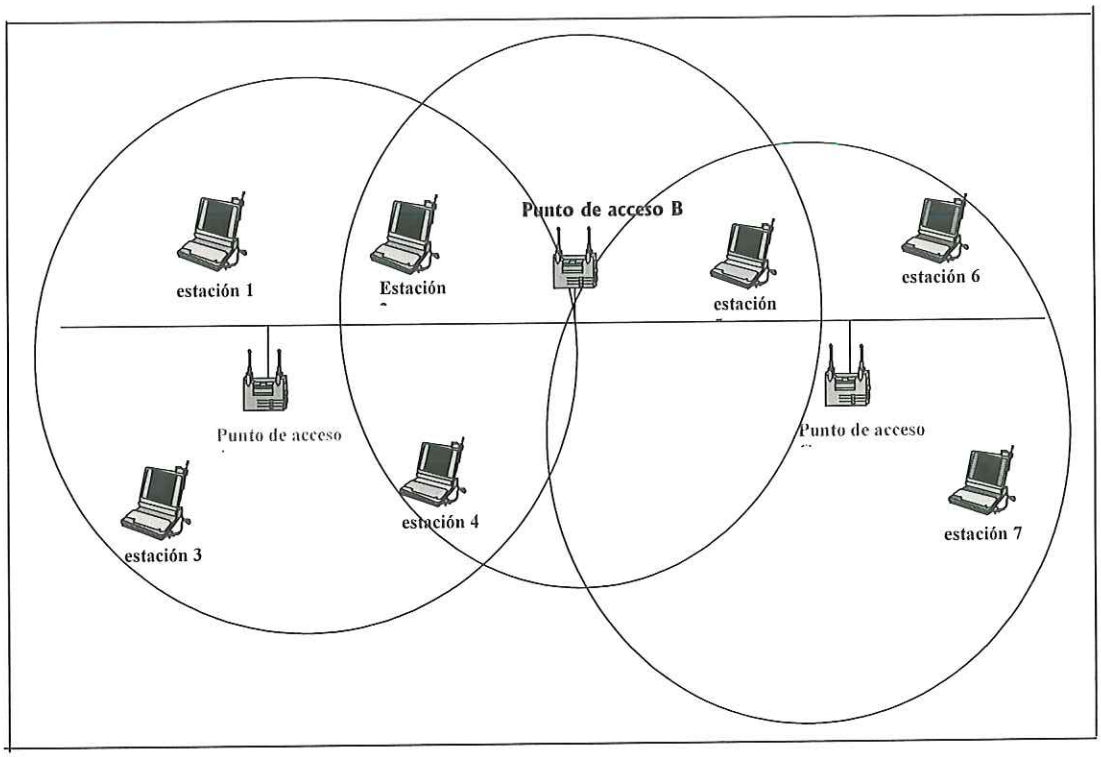

figura 2.- Red de tipo infraestructura

II.2.1.- Tráfico de enlace de bajada.

Debido al ancho de banda limitado de las WLANs, típicamente se utiliza un canal común para la comunicación entre puntos de acceso y los nodos móviles. La comunicación de enlace de bajada se logra transmitiendo en este canal común. Más preciso, el punto de acceso transmite a todos los nodos móviles aún si es un solo destino. La actividad del enlace de bajada constituye casi el 75 u 80% del total del tráfico en redes inalámbricas [Chen, 1994].

II.2.2.- Tráfico de enlace de subida.

El enlace de subida es una consideración importante de la subcapa MAC en el diseño de redes inalámbricas, puesto que es necesario reconocer y registrar a los usuarios nuevos que entran a la red, y aquellos que la dejan, a cualquier hora, y en cualquier lugar. Generalmente se necesita un protocolo de acceso múltiple para organizar las transmisiones de nodos móviles [Chen, 1994].

II.3.- Estándares actuales para WLANs

Existen dos estándares para redes inalámbricas. Uno es el estándar IEEE 802.11 [IEEE 802.11, 1998], y el segundo es el HIPERLAN (High Performance European Radio LAN por sus siglas en inglés) el cual fue propuesto por el Instituto Europeo de Estándares en Telecomunicaciones (ETSI por sus siglas en inglés) [HIPERLAN, 1995]. Ambos estándares limitan su trabajo a la capa física y a la subcapa MAC. También, los dos estándares emplean esquemas de acceso aleatorios, debido a las ventajas que representa sobre los protocolos fijos o sobre aquellos en función de la demanda. Los accesos aleatorios permiten la movilidad de una estación dentro y fuera del radio de la celda. Sin embargo, el precio para este comportamiento no determinístico tiene sus consecuencias para garantizar una QoS.

HIPERLAN es totalmente opuesto al estándar IEEE 802.11. Este estándar fue diseñado por un comité de investigadores dentro del ETSI, sin la fuerte influencia de los fabricantes de equipo y vendedores y es considerablemente diferente a los productos existentes. El estándar es bastante simple, y a la fecha sólo se están esperando productos que salgan al mercado [Pahlavan *et al.*, 1997; LaMaire *et al.*, 1996].

Existen diferencias considerables entre ambos estándares. Mientras que HIPERLAN puede soportar servicios limitados en tiempo asignando prioridad de acceso al canal dinámicamente, el IEEE 802.11 soporta este servicio también, pero utilizando un punto de coordinación para garantizar una parte fija de los recursos de la red. Otra de las diferencias es la frecuencia a la que trabajan ambos estándares. Mientras que HIPERLAN trabaja en las frecuencias de los 5.15 - 5.30 GHz y 17.1 - 17.2 GHz, el IEEE emplea la frecuencia de los 2.4 GHz [LaMaire *et al.*, 1996]. HIPERLAN transmite a una velocidad de 23.529 Mbps, mientras que el IEEE 802.11 a 2 Mbps [IEEE 802.11, 1998]. El protocolo utilizado por HIPERLAN es una variante de CSMA/CA basado en el tiempo de vida y la prioridad para el tiempo del paquete, y las retransmisiones en el nivel de la subcapa MAC [Wolisz *et al.*, 1996]. El protocolo incluye una encriptación opcional y ahorro de energía. Otra característica de HIPERLAN aparte de la alta velocidad, es el enrutamiento de redes de tipo específico: si el destino está fuera de alcance, nodos intermedios darán la ruta óptima dentro de la red HIPERLAN. HIPERLAN es totalmente de tipo especifico, no necesitando así un controlador central, como su contraparte IEEE 802.11.

II.4.- Requerimientos del protocolo MAC en LANs inalámbricas

Teóricamente, las redes inalámbricas deberían de proveer los mismos servicios y capacidades que se tienen en las redes alámbricas, sin embargo, esto no ocurre. Esto se debe a la naturaleza del medio inalámbrico, el cual es muy diferente al cable de cobre o la fibra óptica. Así, muchas de las funciones que se implementan fácilmente en un medio alámbrico, no son tan fáciles o no son posibles de implementar en un medio inalámbrico. Estas diferencias hacen que el diseño de los protocolos MAC para redes inalámbricas sea una tarea muy complicada. Aquí se discutirán algunas cuestiones de ese tipo.

II.4.1.- Confiabilidad.

El medio inalámbrico tiene que ser tan confiable como el sistema alámbrico. Los errores no se pueden prevenir totalmente. El aire es uno de los medios menos confiables, dependiendo principalmente del ambiente donde está operando. Pueden existir interferencias de otras fuentes eléctricas o electrónicas, y se deben de tomar precauciones en ello para que el nivel de errores sea bajo. Esta es una tarea difícil de lograr puesto que los sistemas inalámbricos emplean relaciones señal-ruido más pequeñas que los sistemas alámbricos.

II.4.2.- Transparencia.

Dado que las redes inalámbricas no reemplazarán a las redes alámbricas, tendrán que compartir el mismo ambiente. De tal manera que el software tendrá que ser compatible para ambos casos. El modelo OSI contempla que sólo las dos primeras capas serán diferentes. Existen interfaces que son totalmente transparentes al usuario.

II.4.3.- Caudal eficaz

Dado que el espectro es un recurso escaso, el caudal eficaz es una de las consideraciones más críticas en el protocolo MAC. Las redes inalámbricas deberían de ser capaces de transmitir a las mismas velocidades que las redes alámbricas. Dichas velocidades están aún demasiado lejos de las posibilidades tecnológicas para los medios inalámbricos. Por ejemplo, las terminales interactivas, donde la movilidad es un objetivo, pueden trabajar adecuadamente en el intervalo de los 64 Kbps (texto), y hasta 20 Mbps para aplicaciones gráficas [Chen, 1994].

II.4.4.- Seguridad

La encriptación de la información es necesaria en medios inalámbricos. Para evitar degradar el desempeño de la red, esto puede efectuarse en el hardware utilizando códigos de encriptación, o por el mismo método de transmisión (empleando técnicas de espectro

esparcido, por ejemplo). Si no se tiene un control de seguridad, se podrían tener accesos no deseados en la red [Chen, 1994].

II.4.5.- Movilidad

La aplicación primaria de las redes inalámbricas es para servir a usuarios móviles. Sin embargo, tal movilidad puede ser muy dinámica, ocurriendo en pocos milisegundos. El protocolo debe permitir dicha movilidad [Chen, 1994].

II.4.6.- Consumo de energía (batería)

Dado que el servicio primordial de las redes inalámbricas es dar servicio a usuarios móviles y la fuente de alimentación para dichos usuarios típicamente es por medio de una batería, la utilización eficiente de la transmisión y recepción es otra importante consideración para el protocolo MAC. La recepción puede consumir más energía que la transmisión, dado que las señales modernas de comunicación digital necesitan una potencia de alrededor de 100 mW, y considerando que el tiempo de recepción es mucho mayor que el de transmisión, pero necesita de 100 mA para soportar el proceso de la señal digital en el receptor. Si no se tiene el ahorro de energía, el receptor tiene que mantenerse escuchando el canal todo el tiempo y decodificar cada paquete recibido [Chen, 1994].

II.4.7.- Retraso

El retraso de los paquetes es una característica importante para todas las aplicaciones, pero especialmente para los servicios limitados en tiempo y aplicaciones multimedia, tales como voz y video [Chen, 1994].

II.4.8.- Acceso equitativo

El desvanecimiento del canal puede causar una recepción de potencia diferente a la normal. Tal situación puede resultar en un acceso no equitativo hacia la red [Chen, 1994]. Esto es, que una estación puede recibir mucho menos potencia en la señal que otro usuario. Cuando el protocolo está operando en el período de contienda, la estación que tenga poca señal de recepción estará en desventaja de accesar al medio. El protocolo MAC deberá de poder resolver esta situación dado que la captura se puede realizar con potencias tan pequeñas que pueden tener una diferencia de hasta 9 dB [Chen, 1994].

II.4.9.- Detección de colisiones

Las terminales móviles en las redes inalámbricas, no tienen la capacidad de sensar el medio mientras mandan su información, dado que tienen solamente una antena para transmitir y recibir. Por consiguiente, existirá un tiempo en el cual se cambiará del medio de emisor al de receptor. Esto hace que la detección de colisiones sea más difícil, ya que se necesita

estar monitoreando el medio continuamente, otro problema que se tiene en la detección de colisiones es aquel causado por el "problema de terminal oculta".

II.4.10.- Terminal oculta

Un par de terminales en la misma red pueden no escucharse entre ellas, esto puede ocasionar que si una está transmitiendo, la otra sense el medio libre e inicie la transmisión, repercutiendo esto en colisiones [Hadzi-Velkov y Gavrilovska, 1999].

II.4.11.- Transferencia entre celda

La función que permite a los nodos móviles comunicarse con el punto de acceso en una celda, y poder cambiar a otro punto de acceso en otra celda, es llamado "handoff" o "handover". El propósito de esto, es mantener el servicio para los nodos móviles a través de diferentes celdas [Chen, 1994].

Se utilizan los términos handoff y handover en el idioma inglés debido a que en esta área de las telecomunicaciones no existe una traducción literal al español que indique su significado en forma precisa.

III.- Arquitectura del estándar IEEE 802.11

III.1.- Capa física

El estándar 802.11 que trata sobre las técnicas de acceso al medio bosqueja tres diferentes capas posibles que se utilizarán: Infrarrojo (IR por sus siglas en inglés), Secuencia Directa mediante Espectro Esparcido (DSSS por sus siglas en inglés) y Saltos en Frecuencia mediante Espectro Esparcido (FHSS por sus siglas en inglés). En la siguiente sección se describen brevemente las tres diferentes capas físicas mencionadas.

III.1.1.- Infrarrojo (IR):

Para transmitir en infrarrojo, se emplean longitudes de onda de 850 nm a 950 nm, similar a su utilización en enlaces de fibra óptica, los sistemas IR detectan solo la amplitud de la señal, reduciendo así grandemente la interferencia. Estos sistemas no están limitados en su ancho de banda. Por lo tanto, se puede transmitir a muy altas velocidades, a diferencia de otros sistemas. Dado que opera en el espectro de luz no se requiere licencia de uso de la FCC en Estados Unidos [IEEE 802.11, 1998]. Existen dos formas de implementar un sistema con este tipo de transmisión:

a).- Tener una línea de vista, con una buena distancia de transmisión (algunos kilómetros), ofreciendo gran ancho de banda y altas velocidades.

b).- Esparcir la señal en todas direcciones, reduciendo la cobertura a 1 o 2 metros.

III.1.2.- Secuencia Directa mediante Espectro Esparcido (DSSS):

El proceso de DSSS se realiza multiplicando una portadora de Radio Frecuencia (RF por sus siglas en inglés) y una señal digital (pseudo-ruido (PN por sus siglas en inglés)). Primero el código del PN se modula sobre la señal de información apoyándose en alguna técnica de modulación (BPSK, QPSK, etc.), después se multiplica la portadora de RF con la señal de información modulada PN. Las señales generadas aparecen como ruido en el dominio de la frecuencia. El ancho de banda que tiene dicha señal permite que la potencia caiga por debajo del umbral de ruido sin la pérdida de información. Para este propósito se emplean secuencias de código binario tan pequeñas como 11 bits o tan grandes como $[2*10^{89} - 1]$ bits, teniendo tasas de transmisión desde un bit por segundo hasta cientos de megabits por segundo.

En DSSS, la energía de RF es esparcida a través de todo el ancho de banda sustituyendo cada bit de datos por múltiples sub bits, llamados chips que ocupan el mismo intervalo de tiempo. La longitud de la secuencia de chips se conoce como ganancia de procesamiento.

En Estados Unidos y Europa, DSSS opera en el intervalo de frecuencias de 2.4 GHz a 2.4835 GHz. En Japón, opera en el intervalo de frecuencias de 2.471 GHz a 2.497 GHz. La velocidad de 1 Mbps es codificada utilizando DBPSK (differential binary phase shift keying). El 0 se codifica con fase 0 y el 1 se codifica con fase π. La velocidad de 2 Mbps se logra empleando codificación DQPSK (differential quadrature phase shift keying). Los símbolos 00, 01, 10, 11 son codificados en 0, $\pi/2$, π, $3\pi/2$ respectivamente [Taylor *et al.*, 1991; Viterbi, 1995].

III.1.3.- Saltos en Frecuencia mediante Espectro Esparcido (FHSS):

En sistemas de FHSS, los saltos del radiotransmisor a partir de una frecuencia portadora a otra, es un modelo específico que parece ser al azar. La interferencia se limita, acotando el tiempo que se tiene en cada frecuencia, disminuyendo así la posibilidad de que dos transmisores intenten utilizar la misma frecuencia al mismo tiempo. FHSS trabaja en la banda de los 2.4 GHz (banda Industrial, científica y médica por sus siglas en inglés ISM). En Estados Unidos y Europa. Se tienen 79 canales en el grupo de saltos. El primer canal está centrado en 2.402 GHz y los canales subsecuentes están espaciados 1 MHz, dichos saltos de frecuencia no deben de estar demasiado tiempo en cualquiera de los canales. En Japón, el espectro se divide en 23 canales, en donde el primer canal está centrado en 2.473 GHz y todos los canales subsecuentes están separados a 1 MHz. La razón mínima de salto permitida es 2.5 saltos por segundo. El acceso básico de 1 Mbps utiliza dos niveles GFSK (gaussian frequency shift keying). Para el acceso a 2 Mbps, se emplean 4 niveles de GSFK

además de limitar la interferencia de fuentes externas, esta tecnología puede ayudar a evitar que dos redes instaladas en el mismo edificio interfieran entre ellas. En muchos casos, todos los puntos de acceso en una LAN se programan con el mismo código de salto de frecuencia. Cuando un solo código no puede manejar a todos los usuarios, una solución es dividir la red en varias más pequeñas, cada uno con su propio código. Con los sistemas de secuencia directa, los códigos son diseñados para ser mutuamente ortogonales, de tal manera que las transmisiones de una red aparezcan como ruido en las otras y reduciendo al mínimo la interferencia de la red [Taylor *et al.*, 1991; Viterbi, 1995; IEEE 802.11, 1998].

III.2.- Subcapa de Control de Acceso al Medio (MAC)

La parte MAC del protocolo 802.11, define un mecanismo de acceso llamado DFWMAC (MAC inalámbrica con Fundación Distribuida, por sus siglas en inglés). DFWMAC incorpora un método básico de acceso distribuido y un método de acceso centralizado opcional. Estos dos métodos de acceso pueden coexistir, y de hecho el método de acceso distribuido forma la base para el método centralizado. Estos dos métodos (o "coordinación de funciones") se utilizan para soportar dos tipos de tráfico: asíncrono y limitado en tiempo [IEEE 802.11, 1998].

III.2.1.- Funciones distribuidas y puntos de coordinación.

Una función de coordinación en una LAN inalámbrica es un mecanismo que determina cuando una estación en particular puede transmitir. Con una función de coordinación distribuida, esta determinación es responsabilidad de los nodos individualmente y puede dar lugar a transmisiones simultáneas múltiples, mientras una función de punto de coordinación centraliza esta decisión en cualquier momento dado y por lo tanto se asegura que solamente un solo nodo puede transmitir.

El método de acceso fundamental con DFWMAC es una función de coordinación distribuida conocida como Acceso Múltiple con Detección de Portadora Evitando Colisiones, o CSMA/CA. El empleo de este método de acceso es obligatorio para todos los puntos de acceso, y se utiliza dentro de las dos configuraciones mencionadas anteriormente, como son la de tipo específico y la de infraestructura [IEEE 802.11, 1998].

DFWMAC incorpora una función de punto de coordinación, implementada encima del protocolo básico de CSMA/CA. Como se muestra en la figura 3, el PCF se estructura arriba del DCF basado en CSMA/CA, utilizando la prioridad de acceso proporcionadas por este esquema. Este método de acceso utiliza un punto de coordinación (típicamente el punto de acceso) para determinar cual estación tiene derecho de transmitir. La operación es esencialmente una encuesta del punto de coordinación. El empleo de la función del punto de coordinación DFWMAC es opcional, y de hecho, requiere que la configuración de la red

no permita traslapes de puntos coordinados en un Grupo de Servicio Básico (BSS por sus siglas en inglés) en el mismo canal. Un BSS que funcione bajo una Función de Coordinación Distribuida (DCF por sus siglas en inglés) puede traslaparse con otro BSS.

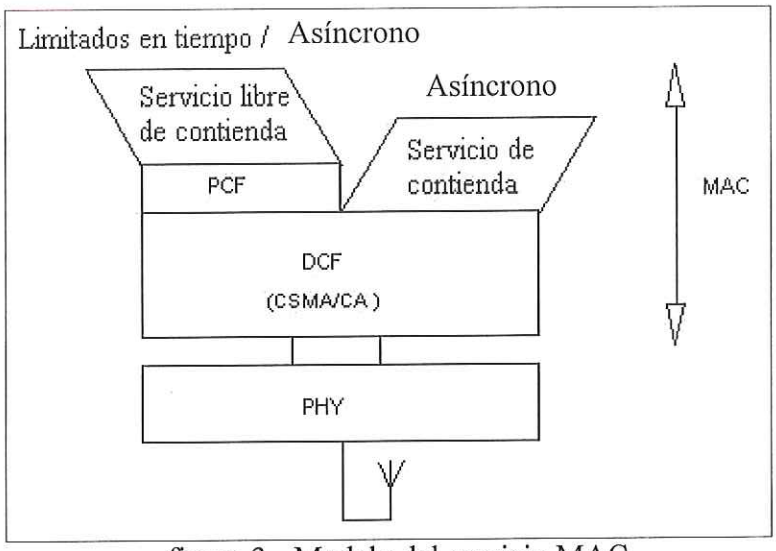

figura 3.- Modelo del servicio MAC

Los dos métodos de acceso están integrados en un concepto de supermarco, en el cual un inicio libre de contienda ocurre al iniciar el supermarco, seguido por un período de contienda. La figura 4 muestra la estructura del supermarco [IEEE 802.11, 1998].

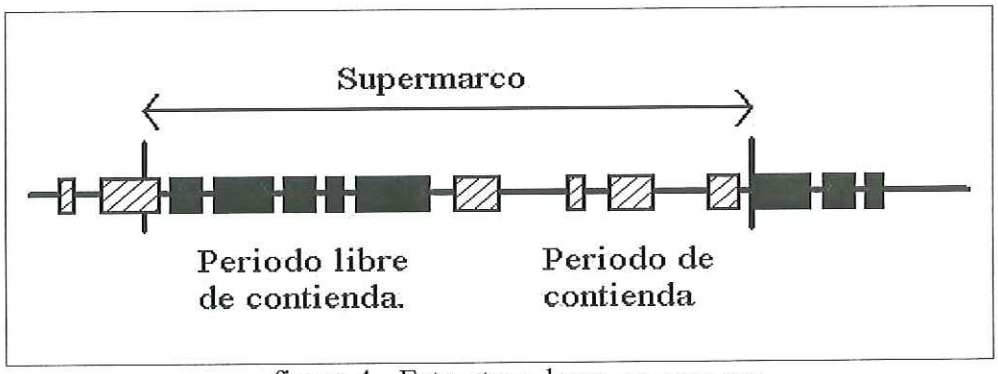

figura 4.- Estructura de un supermarco.

III.2.2.- Función de Coordinación Distribuida (DCF)

La detección de colisiones no es posible en los medios inalámbricos, dado que las estaciones son incapaces de escuchar el canal para sensar el medio que no tenga colisiones mientras transmite. Para superar este problema, el protocolo MAC evita las colisiones utilizando CSMA/CA. Cuando el medio está libre después de un período de estar ocupado, estaciones múltiples podrían estar esperando por el medio para iniciar su transmisión. El sensado de portadora se puede efectuar por mecanismos físicos o virtuales. El sensado de portadora físicamente detecta la actividad en el canal, observando la potencia de la señal de los otros usuarios. En el sensado de portadora virtual, la estación fuente establece la duración en un campo del encabezado del marco de datos, o se emplean marcos de control (RTS y CTS petición de envío / permiso para enviar, por sus siglas en inglés respectivamente). La duración del campo indica el período de tiempo después del marco actual, que el medio estará reservando para completar con éxito su transmisión y recibir el acuse de recibo. Al detectar las estaciones el campo de duración para la transmisión, estas ajustan su vector de asignación de red (NAV por sus siglas en inglés) el cual define el período de tiempo hasta que se completa la transmisión actual. El intervalo de tiempo entre marcos es llamado espacio entre marcos (IFS por sus siglas en inglés). Una estación determinará que el medio está inactivo a través de la función de sensado de portadora por el intervalo IFS especificado. Existen tres intervalos diferentes IFS para definir diferentes prioridades de acceso al medio inalámbrico; espacio entre marco corto (SIFS por sus siglas en inglés), espacio entre marco en la Función de Punto de Coordinación (PCF por sus siglas

en inglés) (PIFS), y espacio entre marco en la Función de Coordinación Distribuida (DCF por sus siglas en inglés) (DIFS) [IEEE 802.11, 1998]. La descripción de los diferentes tiempos IFS se describen a continuación:

III.2.2.1.- SIFS

El período SIFS se utiliza para acciones de respuesta inmediata. Por ejemplo: se envía un marco CTS en respuesta a un marco RTS recibido correctamente. Además, durante el período libre de contienda (CFP por sus siglas en inglés), el punto de coordinación PC esperará un período SIFS antes de mandar cualquier marco a las estaciones y las estaciones que estén bajo este esquema, responderán después de esperar un período SIFS [IEEE 802.11, 1998].

III.2.2.2.- PIFS

El período PIFS es más grande que el período SIFS. El período PIFS se emplea solamente en PCF en el Punto de Acceso (AP por sus siglas en inglés) para ganar el acceso al medio al inicio del período libre de contienda (CFP) [IEEE 802.11, 1998].

III.2.2.3.- DIFS

El período DIFS es más grande que el período PIFS. El período DIFS se utiliza en estaciones que operan bajo el esquema DCF para transmitir marcos de datos (MPDUs) y

manejo de marcos (MMPDUs). Una estación que emplea el esquema DCF, y que desea iniciar la transmisión de un marco RTS, o marco de datos (sin la opción RTS/CTS), estará autorizado a transmitir si su mecanismo de sensado de portadora determina que el medio estuvo ocioso por un período de tiempo DIFS [IEEE 802.11, 1998].

Descripción del mecanismo de acceso básico:

Una estación antes de iniciar con su transmisión sensa el canal por un período para determinar si otra estación está transmitiendo. Si el medio se encuentra ocioso por un intervalo que excede el período DIFS, la estación iniciará un tiempo aleatorio para al final de éste, iniciar la transmisión. Las colisiones pueden ocurrir al final de este tiempo, en el caso de que dos estaciones tengan el mismo tiempo aleatorio de espera. Si antes de que termine el tiempo de espera para intentar iniciar la transmisión (backoff) de una estación, otra inició la transmisión, en el instante en que se detecte el canal ocupado, el tiempo de backoff se detiene, para cuando el medio se detecte libre nuevamente, la estación esperará por el tiempo de backoff restante de cuando este se detuvo, e iniciará su transmisión cuando este tiempo de backoff sea cero [IEEE 802.11, 1998].

El método básico de acceso se ilustra a continuación en la figura 5:

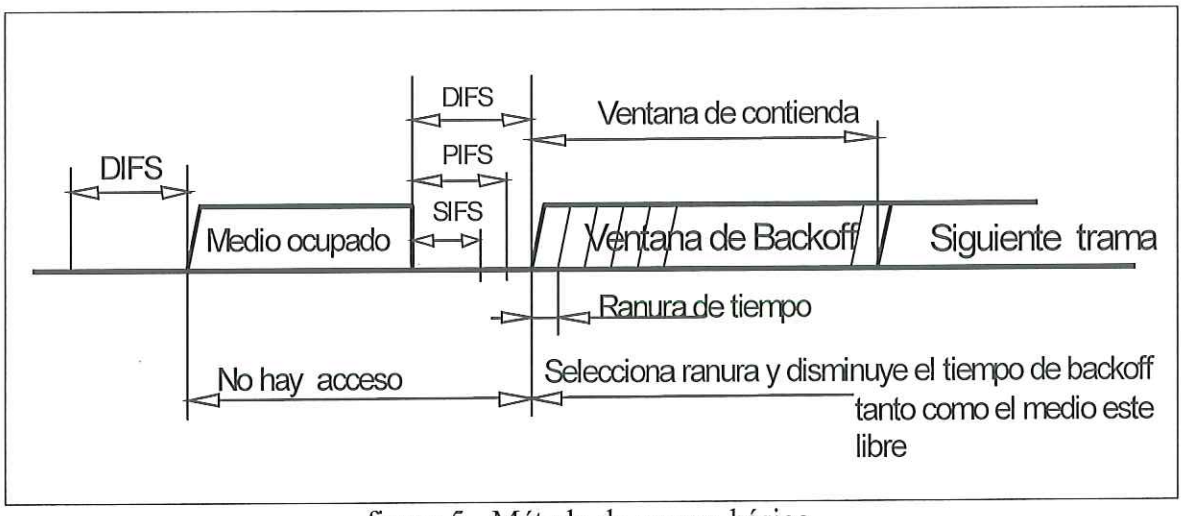

figura 5.- Método de acceso básico.

Puesto que una estación que está transmitiendo no puede escuchar su propia transmisión, cuando ocurre una colisión la estación transmisora continúa mandando la trama de datos hasta completarlo. Si la trama de datos es grande, entonces se desperdiciará bastante ancho de banda del canal por la trama corrupta. Los marcos de control RTS y CTS pueden ser empleados por una estación para reservar el ancho de banda antes de la transmisión de una trama de datos, con el propósito de minimizar el ancho de banda desperdiciado cuando una colisión ocurre. RTS y CTS son tramas de control relativamente pequeñas (RTS es de 20 octetos y CTS es de 14) comparados con la longitud máxima de una trama (2346 octetos). La estación que utiliza este mecanismo sigue el esquema de acceso básico para contender por el medio. La estación fuente manda un marco RTS después de que el canal a estado libre por el período DIFS. La estación destino responde al paquete RTS con un paquete CTS después de un período SIFS. Después de que el intercambio de paquetes RTS/CTS ha sucedido, ahora sí se pueden mandar los paquetes de datos. En dado caso que el marco CTS no se reciba dentro de un cierto intervalo de tiempo, el RTS se retransmite, siguiendo las

reglas del tiempo aleatorio especificadas en el procedimiento de acceso básico. Los marcos RTS y CTS contienen un campo de duración que indica el período por el cual estará reservado el canal para la transmisión de información. Si una estación captura un paquete RTS y no es para ella, lee del campo de duración el período que el canal estará ocupado, y actualiza su vector de asignación de red a esta duración y se abstiene de mandar información en este tiempo. Lo mismo ocurre si solamente se recibe un paquete CTS por una estación que no le corresponda recibir este paquete, pero que si está dentro del BSS, actualizará su NAV. Una estación no está permitida a iniciar una transmisión si su NAV no es cero. Esto garantiza que todas las estaciones dentro del intervalo de la fuente o destino tienen conocimiento acerca de la transmisión y su duración [IEEE 802.11, 1998].

Sin embargo, para una carga que no es muy grande, emplear RTS/CTS implica incrementar el retraso por el encabezado de estos. Por esta razón, el RTS/CTS se utiliza para paquetes de tamaño grande. En la figura 6 se ilustra como trabaja el RTS/CTS [IEEE 802.11, 1998].

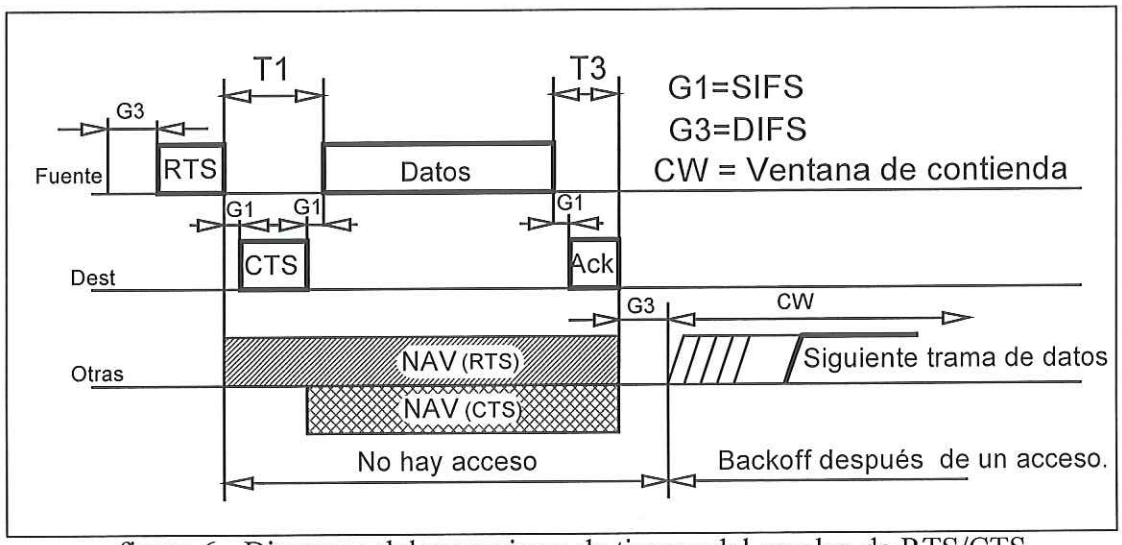

figura 6.- Diagrama del mecanismo de tiempo del empleo de RTS/CTS

El tiempo aleatorio de espera se selecciona de acuerdo a la siguiente ecuación:

Backoff Time = Random() * aSlotTime

Donde:

aSlotTime = al tiempo estimado en que el medio se encuentre libre más el tiempo que tarda el viaje completo de transmisión y recepción más el tiempo de propagación en el aire.

aSlotTime = Clear channel assessment time + RX-TX turnaround time + Air propagation time

y

Random() = entero pseudo aleatorio extraído de una distribución uniforme sobre el intervalo [0,CW], donde CW es un entero dentro del intervalo de los valores característicos de la capa física CWmin ≤ CW ≤ CWmax. Es importante la necesidad de una independencia estadística entre el flujo del número aleatorio entre estaciones [IEEE 802.11, 1998].

El parámetro de la ventana de contienda (CW) tomará un valor inicial CWmin. La CW se incrementa al doble cada vez que un intento de transmisión de una trama de datos fracasa, hasta que la CW alcanza el valor máximo. Una vez que ha sido alcanzado el valor máximo, se mantiene hasta que se reinicia nuevamente. Esto mejora la estabilidad del protocolo de acceso bajo condiciones de grandes cargas. La CW se reiniciará después de que cada intento por transmitir una trama de datos se logre con éxito. El grupo de valores de CW

será ascendente en potencias de $(2^n) - 1$ iniciando con un CWmin y continuando hasta alcanzar un CWmax [IEEE 802.11, 1998], como se ilustra en la figura 7.

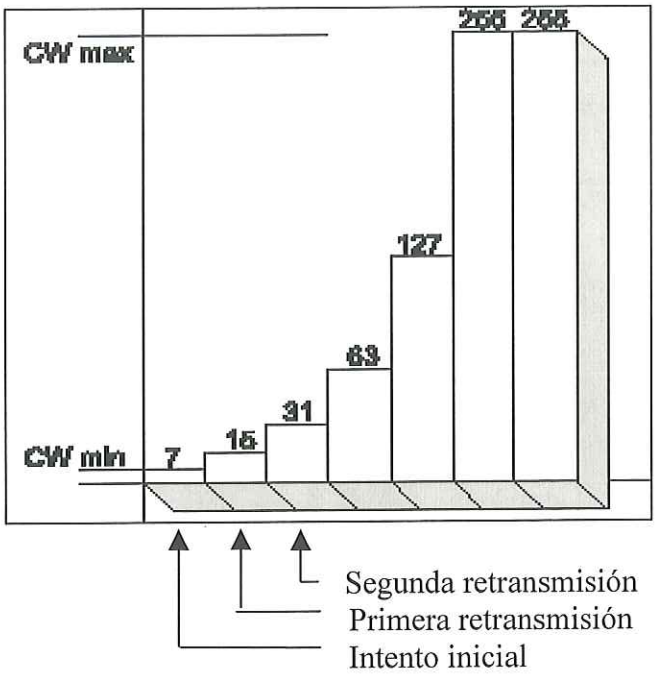

figura 7.- Incremento exponencial de CW

III.2.2.4.- Servicio Asíncrono.

El servicio asíncrono ocurre en las configuraciones ad-hoc y de infraestructura, empleando CSMA/CA y funciones de puntos de coordinación.

DFWMAC mejora la robustez de CSMA/CA para un tráfico asíncrono empleando un acuse de recibo del nivel MAC. La parte de CSMA/CA se diseña para compartir el medio de una manera espectralmente eficiente. El acuse de recibo del nivel MAC permite la detección de una trama perdida y su recuperación por la retransmisión en el nivel MAC. Esta es la

manera en que el tráfico asíncrono se maneja dentro de una configuración pura de Función de Distribución Coordinado (DCF por sus siglas en inglés) (ejemplo, una red ad-hoc o una red de infraestructura que utiliza solamente el DCF). De igual manera, CSMA/CA junto con el acuse de recibo se utilizan dentro del período de contienda de un supermarco cuando una función de punto de coordinación está presente. Todas las transmisiones asíncronas del marco utilizan el CSMA/CA+Ack, a excepción de los marcos de Broadcast/Multicast dirigidos a las estaciones, las cuales no las reconocen. Los marcos de Broadcast/multicast que se generan por las estaciones y deben ser remitidos por un punto de acceso serán reconocidos por el punto de acceso [IEEE 802.11, 1998].

Para mejorar la robustez del mecanismo básico CSMA en situaciones de estaciones ocultas, se transmite un marco particular utilizando el mecanismo RTS/CTS en el cual tanto el remitente como el receptor hacen saber su intento por transmitir en una duración específica a otras estaciones. Puesto que este mecanismo es particularmente apropiado para proteger marcos largos de transmisión, su empleo se controla por un parámetro que la estación determina de acuerdo al tamaño, es decir se determina que marco será transmitido con RTS/CTS y cual será transmitido sin este [IEEE 802.11, 1998].

Las transmisiones asíncronas libres de contienda se pueden administrar por la función del punto de coordinación. Aquí el punto de coordinación puede permitir a la estación que participe en el inicio libre de contienda, durante el cual transmite sus marcos asíncronos. Una estación que participa en tal servicio puede utilizar también el período de contienda para sus marcos asíncronos, y las oportunidades de transmisión libres de contienda se

pueden apreciar como desempeño del funcionamiento para la estación dada. El empleo del período libre de contienda para las transmisiones asíncronas es posible con un supermarco solamente si las estaciones limitadas en tiempo han tenido ya sus requerimientos resueltos [IEEE 802.11, 1998].

III.2.3.- Función de Punto de Coordinación (PCF)

III.2.3.1.- Servicios de tiempo limitado.

Las estaciones que requieren una variación limitada de retardo en sus transmisiones, pueden utilizar el servicio de tiempo limitado DFWMAC. Este se establece en el período libre de contienda (punto de coordinación) de un supermarco. Cada estación realiza una conexión con el punto de coordinación, cuando este les haga la petición a cada estación que trabaje bajo el protocolo PCF. El punto de coordinación (típicamente el punto de acceso) se asegurará que la estación reciba tales oportunidades en intervalos regulares (al menos una vez dentro de cada supermarco). Como el servicio limitado en tiempo se basa en la función de punto de coordinación, es posible solamente en las configuraciones en las cuales el punto de coordinación BSS no se traslapa con ningún otro punto de coordinación BSS. Cada BSS es el que se encarga de controlar el sistema de petición para cada estación. La implementación del mecanismo de acuse de recibo es algo diferente para el servicio limitado en tiempo [IEEE 802.11, 1998].

III.2.3.2.- Función de Punto de Coordinación.

DFWMAC utiliza opcionalmente una función del punto de coordinación (PCF), que puede proporcionar servicios libres de contienda. El empleo de este PCF está restringido, porque puede ser utilizado solamente en ciertos ambientes. La restricción básica es que un PCF no puede traslaparse con otro PCF en el mismo canal, así que debe haber suficiente aislamiento entre múltiples PCF's. Esto se debe a que la contienda entre múltiples traslapes de PCF's no se pueden resolver por el protocolo. Esto limita la utilidad del PCF a operar donde existe un solo BSS de un ESS, o donde los ambientes múltiples del canal puedan asegurar el suficiente aislamiento entre PCF's vecinos. El PCF no se puede emplear en redes Ad-Hoc debido a que el PCF requiere de un punto de coordinación, el cual se representa por el punto de acceso (AP), y las redes Ad-Hoc no cuentan con él [IEEE 802.11, 1998].

El PCF permite servicios libres de contienda, los cuales pueden ser utilizados por servicios limitados en tiempo así como con servicios asíncronos. Los servicios libres de contienda se utilizan solamente en el modo de infraestructura. Estaciones y AP's tienen la opción de implementar el PCF. Pueden ser utilizadas solamente cuando una estación y un AP tienen esta opción implementada, permitiendo al AP controlar la comunicación utilizando métodos de encuesta [IEEE 802.11, 1998].

III.2.3.3.- Estructura del Supermarco.

El PCF utiliza un concepto de supermarco como se muestra en la figura 8. Dentro de un período dado de supermarco, el PCF será activado en el período libre de contienda, mientras que el DCF se utiliza en el período de contienda.

El período libre de contienda puede ser variable en un supermarco, sin ningún encabezado adicional. Al principio del supermarco, el PCF ganará control sobre el medio con la condición de que el medio se detecte libre. Si el medio se detecta ocupado, entonces el PCF se esperará hasta el extremo del marco, y ganará control sobre el medio tan pronto como detecte que se encuentra disponible por un período de tiempo utilizado por el protocolo de acceso PCF que es el que le asigna la prioridad de tener acceso al medio sobre el protocolo DCF [IEEE 802.11, 1998].

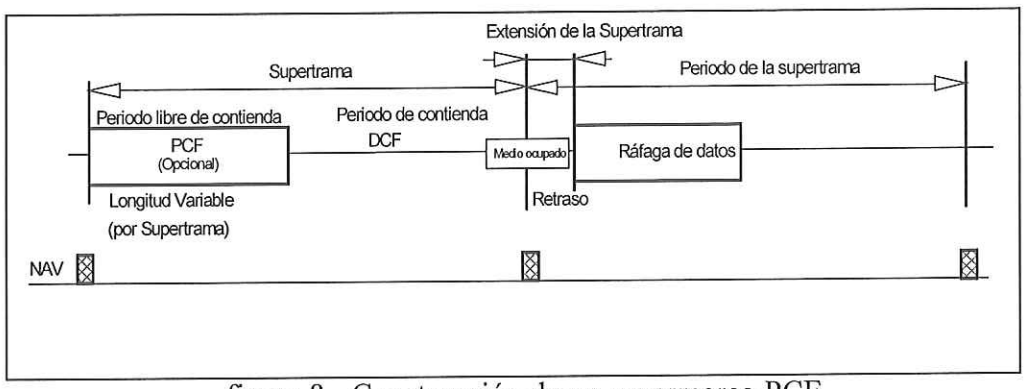

figura 8.- Construcción de un supermarco PCF

El tráfico asíncrono que utiliza el DCF, se esperará automáticamente hasta después del período libre de contienda, porque utiliza el nivel de prioridad PCF del protocolo de acceso

CSMA/CA, que causa una ráfaga de tráfico con las intertramas que son más pequeñas que el período mínimo DIFS necesario por el protocolo CSMA/CA [IEEE 802.11, 1998].

Para evitar la contienda al inicio del período de supermarco entre el tráfico de contienda y el PCF, se puede emplear una función Tx-Blackout. Esto se puede ver como un programa de NAV de la primera ranura al inicio de cada supermarco. La longitud de un supermarco podría ser un parámetro manejable, la cual puede depender de los servicios proporcionados, y quizás del tipo de PHY utilizado. En una PHY con saltos en frecuencia se requiere que el tiempo que dure el salto sea un múltiplo de un número entero del período del supermarco [IEEE 802.11, 1998].

III.2.3.4.- Protocolo PCF

Cada Período Libre de Contienda (CFP por sus siglas en inglés) iniciará con una trama llamada Beacon que contiene un "Mensaje de Indicación de entrega de Tráfico" DTIM. La trama beacon se emplea para efectuar la sincronización y para actualizar relojes. El Punto de Coordinación (PC por sus siglas en inglés) genera períodos libres de contienda a una razón de repetición libre de contienda (CFPRate) el cual se define como un número de intervalos [IEEE 802.11, 1998], como se ilustra en la figura 9

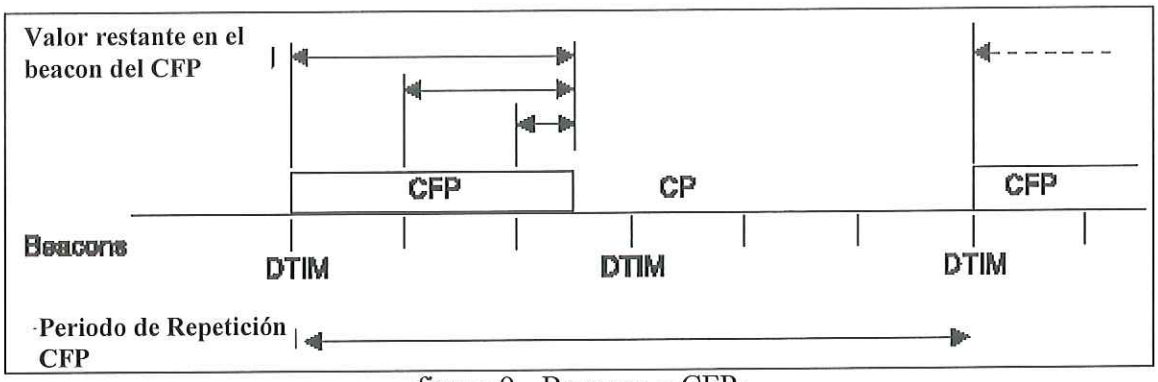

figura 9.- Beacons y CFPs

La longitud del período libre de contienda se controla por el punto de coordinación, con un valor máximo especificado por el parámetro de Duración Máxima del Período Libre de Contienda (CFP-MaxDuration por sus siglas en inglés) en el parámetro libre de contienda, colocado en el punto de coordinación. El valor mínimo para CFP-MaxDuration es el tiempo requerido para transmitir dos tramas de datos con la longitud máxima cada una (2346 octetos) incluyendo el encabezado, el marco de beacon inicial y el marco de Fin de Período Libre de Contienda (CF-End por sus siglas en inglés). Este tiempo será suficiente para mandar un marco de datos a la estación vía el punto de acceso, mientras le manda el marco de encuesta, y la estación responda con un marco de datos. El valor máximo para CFPMaxDuration es el período libre de contienda menos el tiempo requerido para transmitir una trama de datos con la longitud máxima durante el Período de Contienda (CP por sus siglas en inglés), expresado en microsegundos [IEEE 802.11, 1998].

El protocolo de Función de Punto de Coordinación se basa en un esquema de encuesta. Las estaciones necesitan solicitar el servicio libre de contienda, el cual cuando se concede puede ser utilizado hasta que el servicio se cierra. Si el servicio se concede por AP, después

el protocolo de PCF pondrá esa estación en la lista de encuesta, de tal manera que pueda participar en el servicio [IEEE 802.11, 1998].

El punto de acceso enviará el tráfico de la cola (CF-down) para estaciones libres de contienda con una prioridad específica PCF. Un bit de encuesta en el encabezado de estos marcos revisará las estaciones para enviar sus datos (CF-up). Las estaciones reaccionarán a la encuesta inmediatamente cuando tengan un marco en la cola para transmitir en el período libre de contienda, para enviar este marco después del intervalo de tiempo SIFS. Esto resulta en una ráfaga de tráfico libre de contienda [IEEE 802.11, 1998].

Al inicio de cada período libre de contienda, el punto de coordinación (normalmente es el punto de acceso) sensará el medio. Cuando el medio este libre por un período PIFS, el PC transmitirá un marco beacon, después de transmitir el marco inicial, el punto de coordinación esperará un período SIFS para iniciar la transmisión. Después del beacon, iniciará mandando un paquete, ya sea de encuesta únicamente, o de encuesta incluyendo los datos, para la primera estación que se encuentra en la lista de encuesta. Para los servicios que requieren el acuse de recibo de MAC, como es el caso en el empleo de la función de punto de coordinación, este se hace a través de un bit en el encabezado de la respuesta o en marcos subsecuentes. Este es el bit de Ack_Previous_Frame (marco previamente recibido, APF por sus siglas en inglés). El marco U1 en la figura 10 tiene el bit APF para el acuse de recibo del marco anterior D1. También el marco D2 contendrá el bit APF para el acuse de recibo de U1, esto, con la finalidad de optimizar el sistema de encuesta, ya que así, se evita tener que mandar el acuse de recibo en un paquete, o los datos en otro, dado que el sistema

realiza una transmisión a las estaciones cuando transmite, todas reciben el paquete, y si tiene información para alguna de ellas lo toma, de lo contrario lo desecha. La información que puede contener un paquete para cada estación puede ser datos, de acuse de recibo o bien de petición de envío de información [IEEE 802.11, 1998].

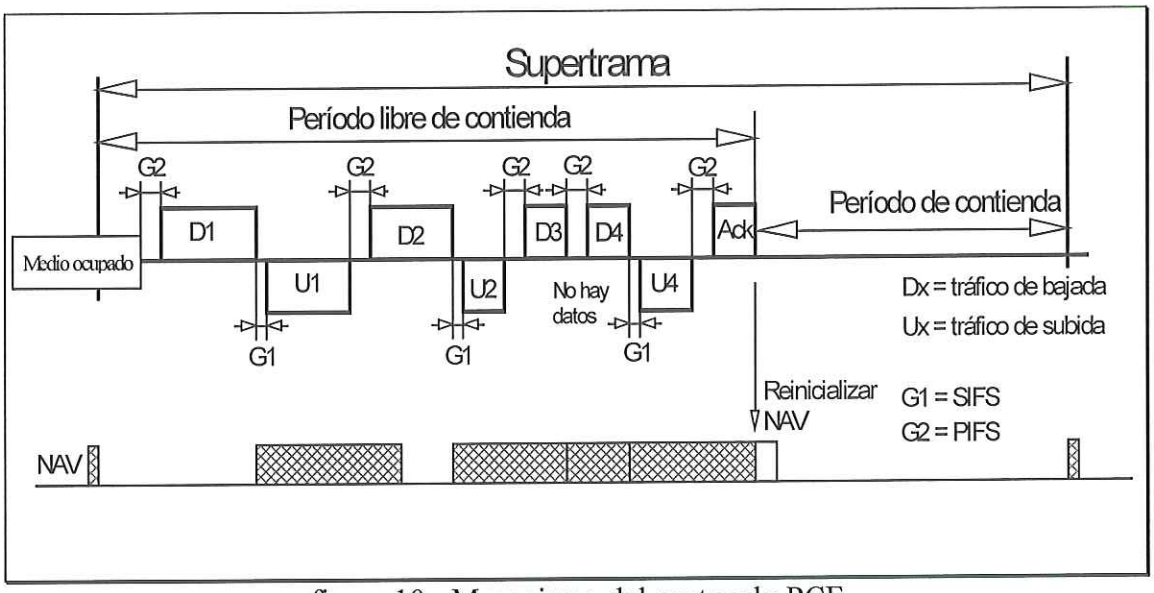

figura 10.- Mecanismo del protocolo PCF

La duración de los marcos puede ser variable, sólo está limitada por una longitud máxima negociada durante el servicio libre de contienda. Si una estación no reacciona dentro del tiempo de retardo de PIFS, entonces la función de punto de coordinación en el punto de acceso tomará control y transmitirá el siguiente marco que se encuentre en la cola. Obsérvese que una estación no responderá en la siguiente situación: cuando la estación no tiene tráfico CF-up para mandar, y no se requiere ningún acuse de recibo para ser regresado por el marco precedente CF-down. Por ejemplo, cuando el marco CF-down tiene una longitud de zona de datos de 0, es decir, que el PC no mandó datos a dicha estación [IEEE 802.11, 1998].

En el encabezado de todos los marcos libres de contienda que vienen del punto de acceso (CF-down) se proporciona una indicación para actualizar a NAV en cada estación, que difiere para el inicio del período libre de contienda. Esto evitará que las estaciones que no escuchan a la estación que responde (oculta), comiencen inadvertidamente su transmisión durante el inicio de período libre de contienda, y esperen al período de contienda para poder transmitir [IEEE 802.11, 1998].

Obsérvese que se asume que todas las estaciones escucharán al punto de acceso, de modo que la información que se reciba por cada estación, puede entonces proteger el marco CF-up, el cual puede no ser escuchado por todas las estaciones en el BSS.

La función de punto de coordinación generará un marco al final del período libre de contienda que tiene las siguientes funciones:

- Mandar acuse de recibo al último marco de CF-Up recibido si necesitó el bit de APF.
- Reajustar el NAV en todas las estaciones que estén escuchando.

Esto se puede hacer por ejemplo en un acuse de recibo o marco de aviso. Es importante actualizar el NAV, debido a la medida variable del marco de respuesta de la estación. El NAV se fija a una longitud prevista máxima del marco de respuesta. Una función de Reset_NAV (reinicializar el vector de asignación de red) es necesaria para permitir a todas

las estaciones asíncronas, utilizar el período de contienda inmediatamente después de que termine el período libre de contienda.

Cuando el punto de coordinación no tiene más marcos para transmitir, o estaciones que encuestar, este mandará un marco CF-End para marcar el final de la transmisión del CFP. Si se recibe un acuse de recibo al tiempo que se transmite el CF-End, el punto de coordinación transmitirá un marco CF-End+ACK (marco de fin de periodo de contienda incluyendo el acuse de recibo). Todas las estaciones que reciban dicho marco, actualizarán sus NAV y podrán intentar transmitir durante el período de contienda.

IV.- Modelos de fuentes de tráfico.

El empleo de modelos de teletráfico reales en el análisis de desempeño de redes es indispensable para la precisión, credibilidad de resultados y un diseño acertado de nuevas tecnologías.

Algunos estudios han considerado el análisis de desempeño de tráfico real tal como el empleo de fuentes de tráfico de voz reales para evaluar el desempeño de la red [Wim Diepstraten, 1993]. Pero no se ha considerado la utilización de aplicaciones de video, el cual se contempla en este trabajo. Se emplearon modelos de tráfico reales para la obtención de información precisa como se describe a continuación: en la fuente de tráfico de datos se utiliza una distribución de Pareto en la longitud del paquete, la cual proporciona un comportamiento más real en la transmisión de datos. En la fuente de voz, ésta se produce por un detector rápido de actividad de voz, el cual se modela por el modelo de Markov de tres estados, mientras que para la fuente de video, se produce empleando el estándar H.261.

IV.1.- Modelo de tráfico de datos.

La mayoría de los estudios de análisis de desempeño reportados utilizan modelos de tráfico convencionales, tales como el de Poisson [Bertsekas, Gallager, 1992], y el de Bernoulli [Yuan *et al.*, 1999]. Esto se debe a que son matemáticamente simples para darles solución y

son modelos sin memoria. Por lo tanto son incapaces de tener ráfagas de tráfico real debido a su naturaleza sin memoria.

Se utiliza el modelo ON-OFF [Paxson y Floyd, 1995; Hadzi-Velkov y Gavrilovska, 1999], para modelar el comportamiento de las fuentes de tráfico. En este modelo, la fuente opera en uno de los dos estados. Cuando está en el estado ON, la fuente produce información para ser transmitida, y cuando está en el estado OFF, no produce información. Existe un período de completa inactividad, que representa el no existir usuarios trabajando en la estación, y existe actividad nuevamente (con algunas pequeñas pausas) cuando un usuario se conecta e inicia una sesión.

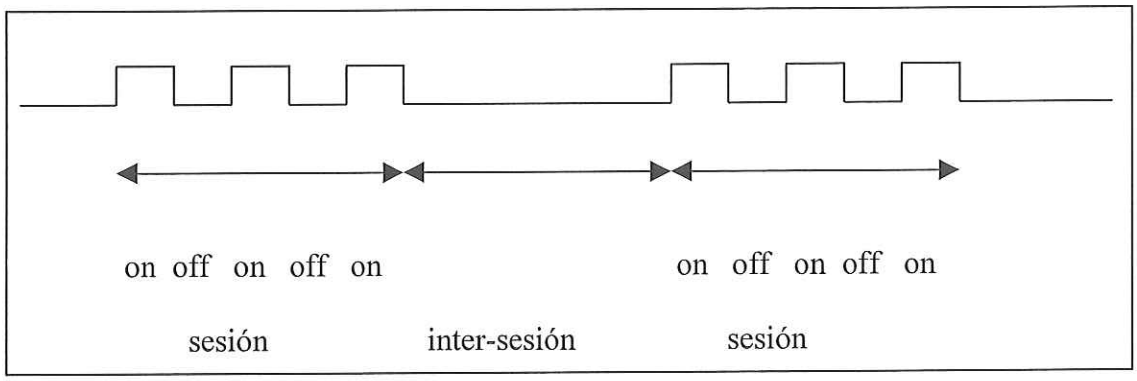

figura 11.- Modelo de fuente de tráfico individual utilizando distribución de Pareto

En el modelo propuesto, cada ráfaga se transmite durante un período ON que tiene una longitud aleatoria que sigue una distribución de Pareto.

La distribución de Pareto tiene una Función de Distribución Acumulativa dada por

$$F(x) = \mathrm{P}[\mathrm{X} \leq x] = 1 - \left(\frac{\alpha}{x}\right)^{\beta} \qquad x \geq \alpha \qquad (1)$$

donde el parámetro de localización α define el valor mínimo de x y el parámetro β es el que define cuando será generada la ráfaga.

La función de densidad de probabilidad (pdf) de una distribución de Pareto esta dada por:

$$f(x) = \beta \alpha^{\beta} x^{-\beta-1} \qquad (2)$$

y su valor medio es:

$$\mathrm{E}(x) = \frac{\alpha\beta}{-1+\beta} \qquad (3)$$

con una varianza infinita.

IV.2.- Modelo de tráfico de voz

La comunicación de señales de voz esta compuesta de períodos con actividad de voz y períodos de silencio, correspondiendo dichos períodos a lo que en una conversación es el hablar, esperar a que contesten y escuchar. Para esto, se utiliza un detector de actividad de voz. Para utilizar mejor los recursos de la red, el usuario debería interrumpir la transmisión de información en los momentos de silencio. Para lograr lo anterior, se utiliza un detector de actividad de voz lento, que se emplea para separar los períodos de silencio y de voz. El

codificador de voz hace un muestreo y digitaliza la señal de voz durante el momento en que se habla a una razón de 8000 muestras por segundo. Ya digitalizada la voz, el paquete se produce. En este caso, el silencio es suprimido. Para lograr lo anterior, se utiliza un modelo Markoviano de dos estados. Los momentos de voz y silencio tienen una duración exponencial. A continuación se muestra el sistema Markoviano de dos estados [Goodman *et al.*, 1991].

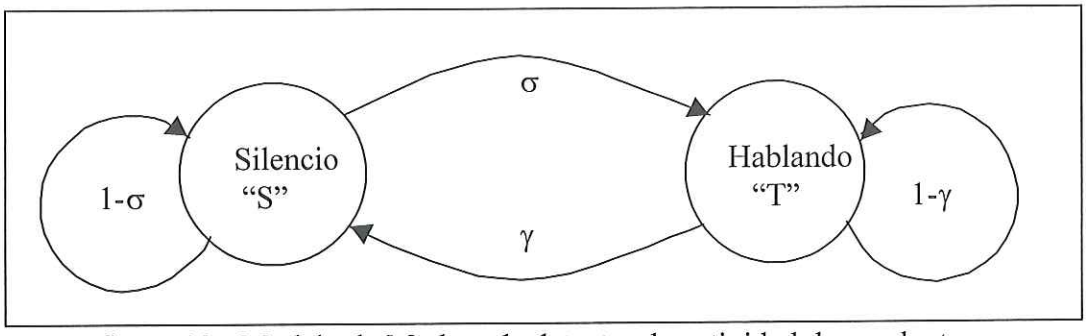

figura 12.- Modelo de Markov de detector de actividad de voz lento.

En realidad al momento de hablar se tienen también períodos de mini habla, y mini silencio. Para poder aprovechar al máximo la transmisión de voz, se utiliza un detector de actividad de voz rápido, el cual es más sensible y permite identificar estos mini períodos, con el fin de poder distinguir entre ellos. Para modelar lo anterior, se aplica un modelo Markoviano de tres estados, conteniendo un estado de habla, otro de silencio, y un tercero de mini habla. La figura 13 muestra un modelo de Markov de tres estados, el cual representa un detector de actividad rápido de voz [Goodman *et al.*, 1991].

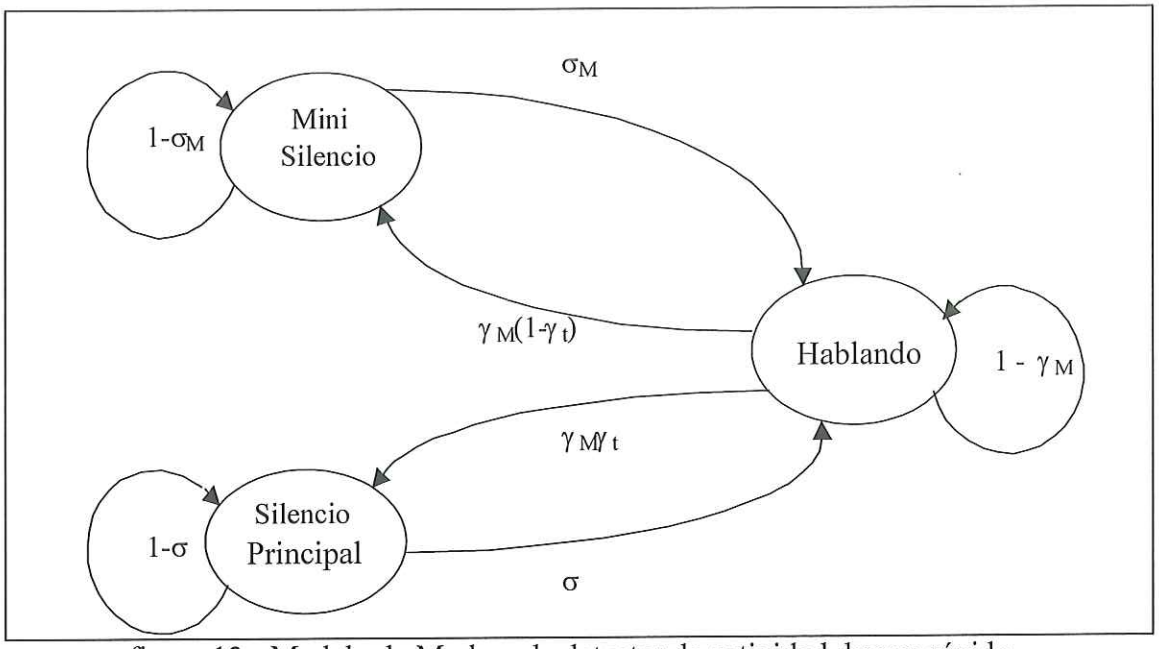

figura 13.- Modelo de Markov de detector de actividad de voz rápido

Como se muestra en la figura 13, la probabilidad de cambiar de estado de silencio principal a hablando es

$$\sigma = 1 - \exp(-\tau / t_2) \tag{4}$$

La probabilidad de cambiar del estado de hablando a cualquier otro estado es:

$$\gamma_M = 1 - \exp(-\tau / t_3) \tag{5}$$

La media de mini hablar en el estado de hablando es $t_1 / (t_3 + t_4)$.

Sin embargo,

$$\gamma_t = (t_3 + t_4) / t_1 \tag{6}$$

es la probabilidad de que cualquier mini hablada sea el final del estado hablando

En este trabajo se utiliza un modelo de Markov de tres estados, con una tasa de transmisión de 32 Kbps en donde cada usuario de voz genera un paquete por trama, aceptando un máximo retraso de 500 mseg. y una tasa de error no mayor al 1% [Goodman *et al.*, 1989]. Y donde t_1 e el tiempo de habla principal, t_2 es el tiempo de silencio principal, t_3 es el tiempo de mini habla, t_4 es el tiempo de mini silencio y τ es el tiempo en el que se examina la actividad del detector.

IV.3.- Modelo de tráfico de video

Anteriormente se empleaban modelos ON-OFF para el modelado de tramas de video. Sin embargo, las propiedades estadísticas de esos modelos no tienen un comportamiento igual al comportamiento real de las tramas de video. En este trabajo se utilizaron secuencias de trazos de video real comprimido de acuerdo al estándar H.261. Para satisfacer las necesidades de QoS para aplicaciones de video, si un paquete de video no se entrega en 72 mseg, este paquete se desecha. Además se considera una tasa de pérdidas que no debe de exceder el 0.001%

IV.4.- Modelo de Terminal Oculta

Algunos estudios modelan el problema de terminal oculta asumiendo una configuración fija de terminales obstáculos teniendo de esta forma que las estaciones ocultas son las mismas

para toda la simulación. Se asume que una estación puede estar oculta de cualquier otra terminal a cualquier tiempo con una probabilidad $P_{h.}$ [Hadzi-Velkov y Gavrilovska, 1999].

IV.5.- Modelo de efecto de captura.

Captura se refiere a la habilidad para recibir un paquete con éxito de una estación dada, cuando varias estaciones están transmitiendo simultáneamente. Se puede tener un algoritmo de acceso justo utilizando un algoritmo de control de potencia eficiente. Sin embargo las características de desvanecimiento real en el canal pueden causar una recepción equívoca de potencia, aun estando implementado el algoritmo de control, además del costo involucrado en la implantación de dicho control [Hadzi-Velkov y Gavrilovska, 1999; Chen, 1994]. En este trabajo se utilizaron diferentes condiciones de captura. Captura perfecta (a=1) es cuando se tienen dos o más transmisiones simultáneas, y al menos una de ellas se complete. Por el otro lado, captura con ($a = \infty$) indica que todas las tramas son destruidas.

V.- Modelo en OPNET de la subcapa MAC del estándar IEEE 802.11

Con la finalidad de tener elementos para el análisis del desempeño del protocolo para la subcapa MAC del protocolo 802.11, se auxilió de un simulador de redes de telecomunicaciones en este caso el OPnet. A continuación se describen las consideraciones que se tomaron en cuenta para realizar el modelado.

V.1.- Consideraciones para el modelado.

- No se considera el error de marco debido al error introducido por el ruido del canal (por ejemplo, debido a la transmisión de otro BSS y al desvanecimiento de las multitrayectorias).
- Se considera que es una estación móvil limitada, es decir, que se puede desplazar de un lugar a otro, solo si no esta transmitiendo o recibiendo información.
- El retraso del paquete se considera desde que el paquete se genera y se coloca en la cola para ser transmitido hasta el momento mismo en que se procesa por el receptor.
- Todas las estaciones que funcionan bajo el esquema de PCF solo pueden tener una comunicación directa con el punto de acceso, el cual se encargará de retransmitir la información a la estación correspondiente.
- Las estaciones que funcionan bajo el esquema DCF pueden transmitir información entre ellas, y si se manda información a alguna del esquema PCF, esta tiene que ir a través del punto de acceso.

- Para los diferentes escenarios que se plantean, las condiciones de terminal oculta, efecto de captura y número de usuarios son diferentes.
- OPnet considera 3 fases para el modelado: modelado de red, de nodo y de proceso. Estas fases permiten presentar y visualizar la simulación a nivel general (modelo de red), a nivel de nodo (que describe las diferentes funciones que se realizan en cada nodo) y finalmente a nivel de proceso en el cual se muestran a detalle los procesos que se realizan en cada función.

Tabla I.- Parámetros de simulación.

Parámetro	**Valor**
Acceso al medio	DS-CDMA
Intervalo de frecuencia	2.4 GHz a 2.4835 GHz.
Velocidad del canal	2 Mbps
Tiempo_SIFS	10e-6 Seg.
Tiempo_PIFS	30e-6 Seg.
Tiempo_DIFS	50e-6 Seg.
Tam_max_paq	2304 Bytes
Limite de intentos para transmitir	16
CWmax (ventana de contienda mínima)	31
CWmax (ventana de contienda máxima)	1023
β	1.2
α	2e6

V.2.- Modelo de red

En este modelo se considera que las estaciones están distribuidas a través del BSS como se muestra en la figura 14, donde el modelo del ducto se modificó para que se obtenga un comportamiento de tipo inalámbrico. La velocidad de transmisión del canal es de 2 Mbps, considerando el modo de transmisión DSSS, definido anteriormente en el capítulo III.

Este modelo de red tiene todas las estaciones dentro del mismo BSS y un punto de acceso para el período PCF. Asimismo las estaciones que funcionan bajo el período DCF se comunican directamente entre ellas.

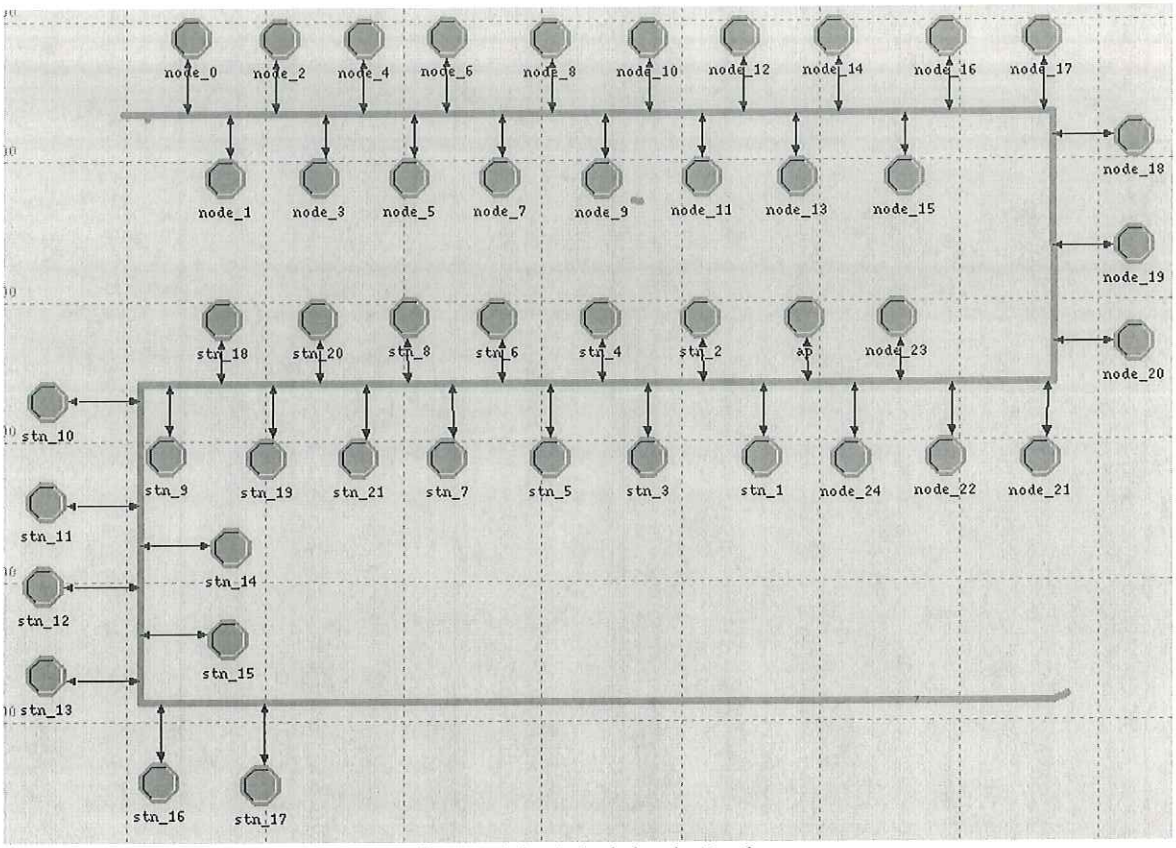

figura 14.- Modelo de Red.

V.3.- Modelo de nodo.

Para la implementación de la red se tienen 3 modelos de nodo, que dependen del período en que ha de funcionar la estación, y cual es la función que ha de desempeñar. Así pues, para el período de DCF, se tiene un solo modelo para todas las estaciones que funcionan en este período y para el período de PCF se tienen dos modelos implementados, uno que es el del punto de acceso, y otro que es el que le corresponde a las estaciones que responden al sistema de encuesta (realizado por el punto de acceso).

El modelo implementado para los que responden al esquema de encuesta, es prácticamente el mismo para todas las estaciones que se tienen en este período, La diferencia radica en la fuente generadora de tráfico, que ha de ser de video, de voz o de datos.

V.3.1.- Modelo de nodo para estaciones en el período DCF.

Dentro del modelo de nodo (figura 15) para estas estaciones se cuenta con varios procesos, como son: fuente de tráfico (source), MAC (mac), sensor del canal (defer), el transmisor (bus_tx0), y el receptor (bus_rx0).

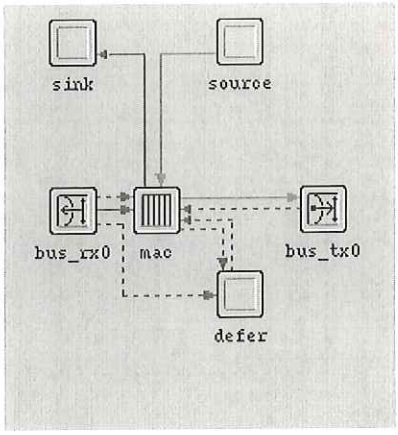

figura 15.- Modelo de nodo en DCF

V.3.1.1.- Fuente de tráfico.

En este proceso (figura 16) se genera el tráfico que ha de transmitirse a través de la red, se define la carga que se desea, así como el tipo de tráfico y la distribución estadística definida por el comportamiento de dicho tráfico. Todos los paquetes que aquí se generan, se transmiten inmediatamente al proceso MAC. La fuente utiliza distribuciones de Pareto (simulación de tráfico real) y de Poisson (simulación de tráfico ideal) para generar los paquetes.

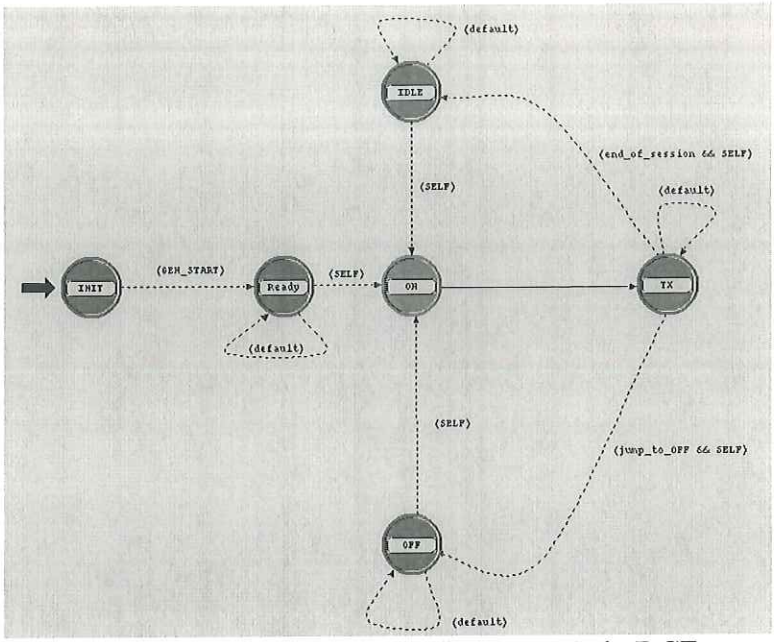

figura 16.- Fuente de tráfico en período DCF.

V.3.1.2.- Proceso para la subcapa MAC.

Aquí es donde se implementa el estándar 802.11 para la subcapa MAC (figura 17), recibiendo de la fuente de tráfico los paquetes generados ahí para colocarlos en una cola de tipo FIFO (First Input, First Output por sus siglas en inglés), después se envía a través del canal, así como también se hacen las retransmisiones de aquellos paquetes que sufren alguna colisión en su trayecto al receptor. Dependiendo del tipo de información que reciba, será la acción que tomará, es decir, procesará la información que recibe, ya sea un paquete dirigido a dicha estación, efectuará una transmisión para informar a las estaciones si se libera el canal para el período DCF o si el período PCF tiene el control del canal.

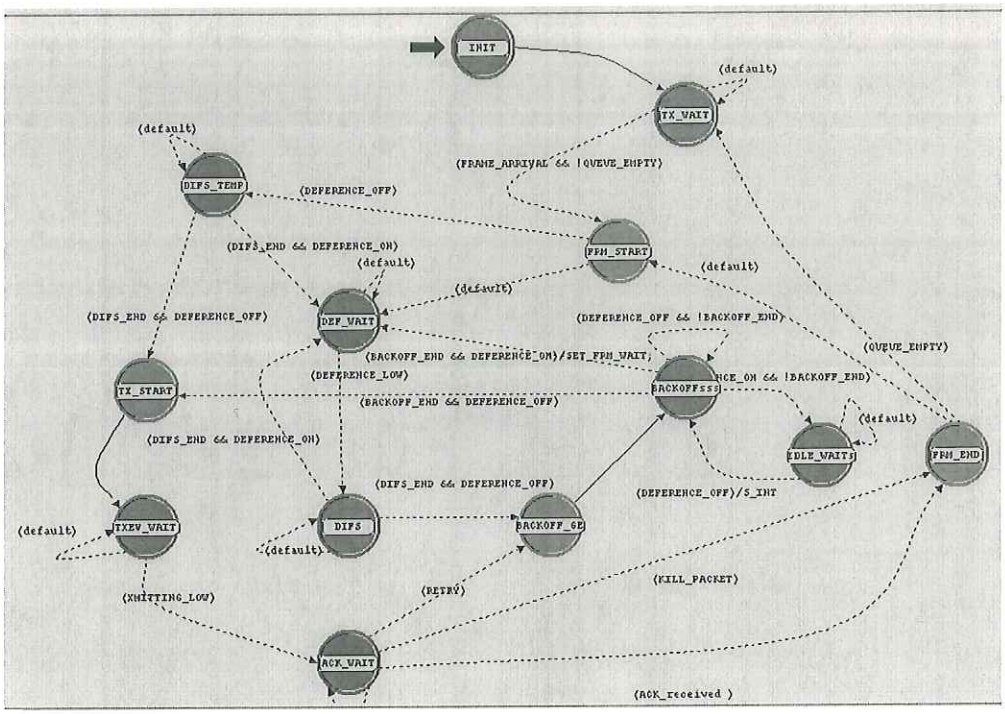

figura 17.- Subcapa MAC en período DCF.

V.3.1.3.- Sensor del canal.

Este proceso se encarga de avisar a la subcapa MAC que es lo que sucede en el canal, quien tiene el control, si es posible transmitir, o si debe de mantenerse en espera. La figura 18 muestra la estructura de este sensor, en donde este proceso depende del receptor.

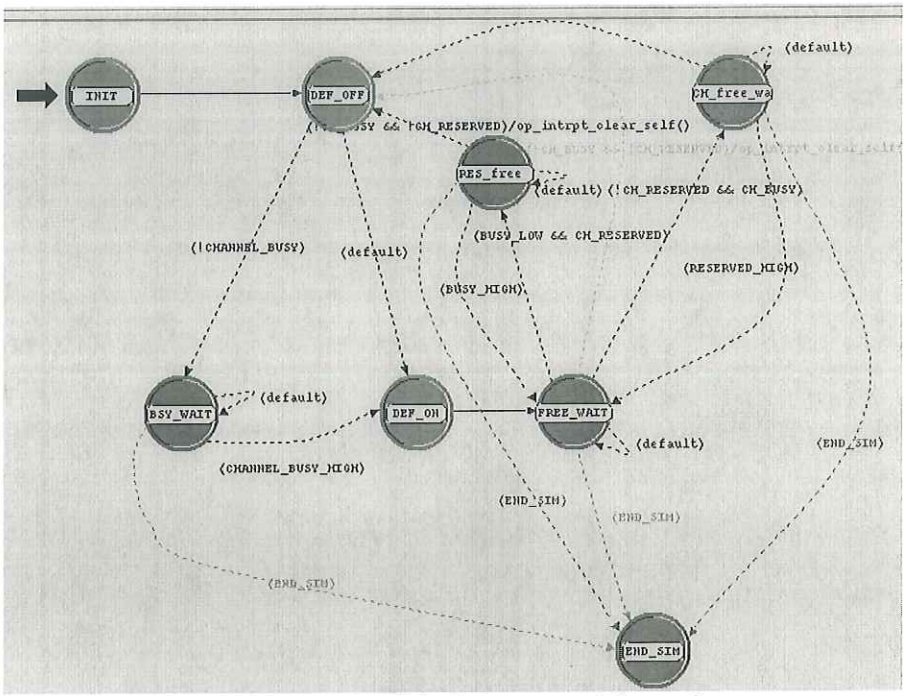

figura 18.- Modelo del sensor del canal

V.3.2.- Modelo de nodo para el Punto de Acceso (AP) en período PCF.

Para el período PCF se tienen dos modelos de nodo diferentes: uno para el punto de acceso, el cual es básicamente igual que el DCF, la diferencia está en la implementación del modelo de nodo para la subcapa MAC. En la figura 19 se muestra como esta estructurado dicho modelo. El otro modelo se menciona posteriormente.

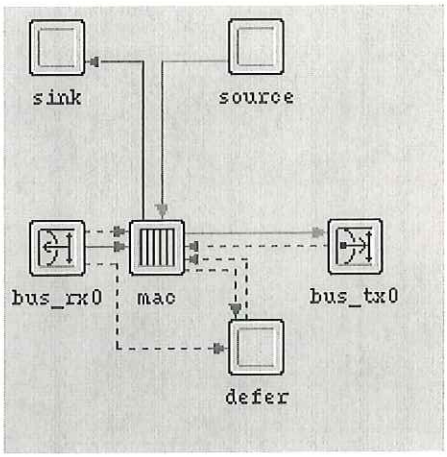

figura 19.- Modelo de nodo para AP en PCF

V.3.2.1.- Proceso para la subcapa MAC en el AP en PCF.

Este proceso es el que se encarga de tomar control del medio cada vez que termina el período del DCF, además de avisar a todas las estaciones. Ya sea aquellas que funcionan en el período DCF, como aquellas que lo hacen en el período PCF, en que se ha tomado el control del medio. En la figura 20 se muestra la estructura de dicho proceso.

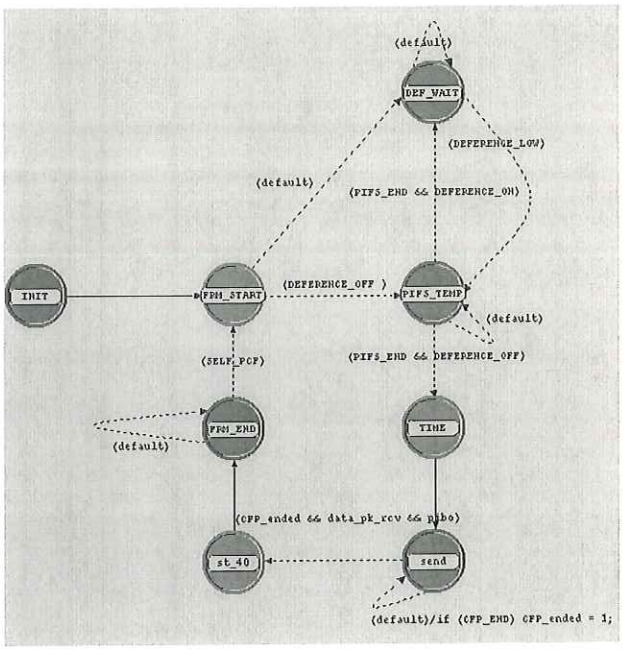

figura 20.- Subcapa MAC en AP en período PCF.

V.3.2.2.- Modelo de nodo para estaciones en período PCF que responden al AP.

Para estas estaciones se tiene básicamente el mismo modelo de nodo con la diferencia de que no cuentan con el sensor del canal, ya que únicamente responden a la encuesta del punto de acceso, quien es el que les da la instrucción de que el medio está disponible para el período PCF, y no responden a las estaciones que funcionan bajo el período DCF. En la figura 21 se muestra como esta estructurado dicho modelo

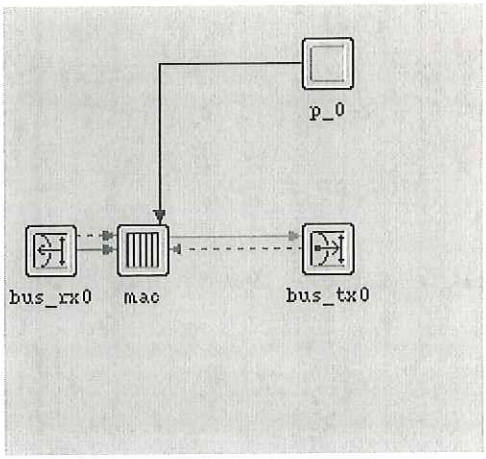

figura 21.- Modelo de nodo

VI.- Modelo de simulación

El modelo de tráfico de datos, el cual se emplea en el período de contienda, reproduce el tráfico generado por un número de aplicaciones populares. Se analiza la red transportando tráfico real con la finalidad de entender las posibles consecuencias de un modelo inexacto en el tráfico de información. Nuestra investigación considera que el desempeño de la red bajo tráfico real (distribución de Pareto para datos, tramas de video reales para video y modelo de Markov de tres estados para voz) no es aceptable comparado con trafico ideal (trafico que tenga una distribución de Poisson). Este trabajo analiza el efecto del problema de terminal oculta y el efecto de captura en términos de retraso y pérdidas.

Se considera como modelo de simulación a un número finito de estaciones distribuidas uniformemente a través del BSS. Las estaciones se encuentran generando información, tal como voz, datos o video. Dentro de este contexto, se considera que las estaciones que generen el mismo tipo de información tienen un mismo volumen de tráfico. Por ejemplo, si dentro del modelo de simulación dos estaciones se encuentran generando voz, entonces las dos tendrán el mismo volumen de tráfico pero diferente volumen que el de una estación que genera video o datos. Otros factores que se consideran en el modelo de simulación son la probabilidad de terminal oculta y el efecto de captura los cuales serán los mismos para todas las estaciones.

VI.1.- Modelo de Red manteniendo el número de usuarios fijo.

En este escenario se analiza la red transportando tráfico real en PCF y tráfico de Poisson en DCF para evaluar el desempeño de la red con diferentes valores de terminal oculta (Ph) y efecto de captura (a) manteniendo el número de usuarios fijo. Las figuras 22, 23 y 24 muestran como el retraso extremo a extremo para diferentes valores de efecto de captura y tipos de tráfico, se incrementa cuando la probabilidad de terminal oculta se incrementa. Esto se debe a que hay más colisiones y la eficiencia del sistema se reduce. El retraso extremo a extremo para un paquete incluye el tiempo desde que se genera y se coloca en la cola, se transmite y se procesa en el lado del receptor. El trasladarse desde un efecto de captura a=1 hasta a>1, así como incrementar el efecto de terminal oculta, genera una disminución notable en el aprovechamiento de la red.

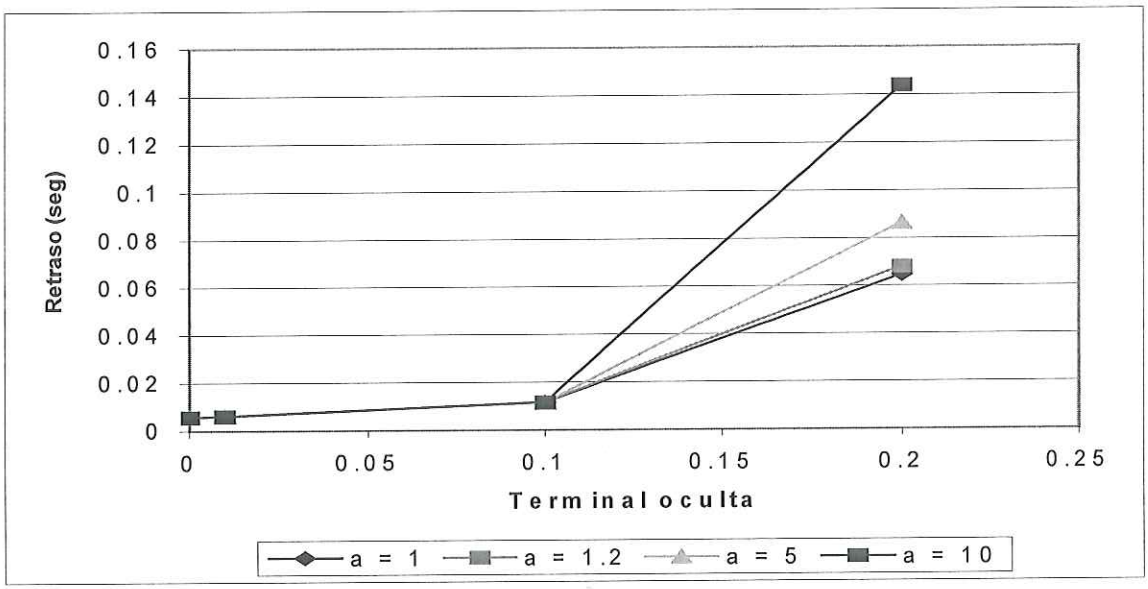

figura 22.- Retraso para tráfico de datos afectado por diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura

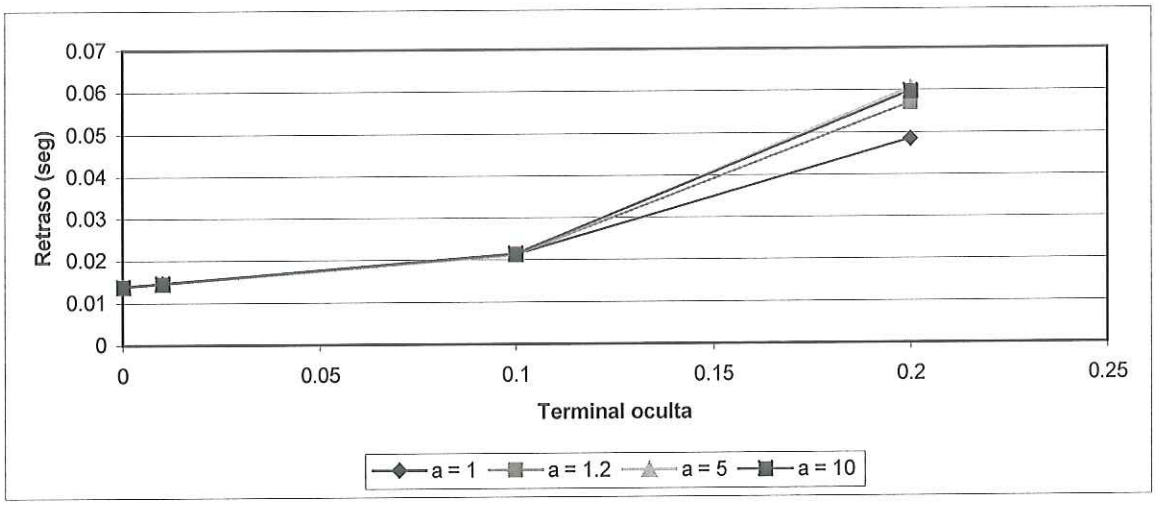

figura 23.- Retraso para tráfico de video afectado por diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura

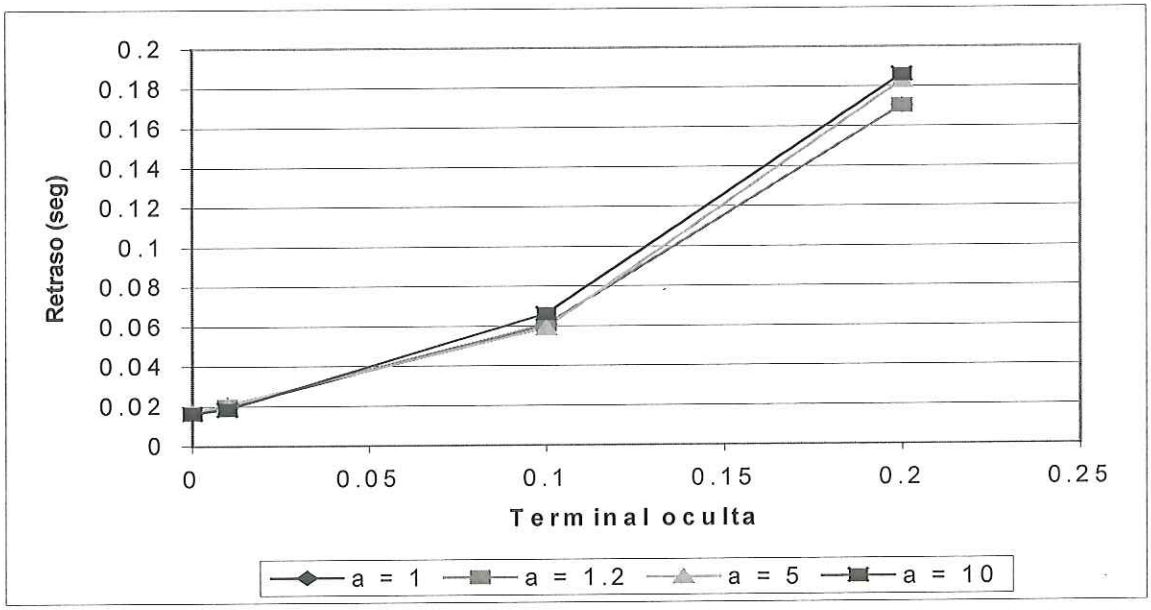

figura 24.- Retraso para tráfico de voz afectado por diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura

Como se aprecia en las gráficas anteriores, en ninguno de los casos, se excede el retraso (para diferentes valores de Ph y a) permitido para cada una de las aplicaciones, las cuales, están limitadas en tiempo, determinando que el sistema funcione adecuadamente.

Las pérdidas que se presentan, al igual que el retraso, dependen también en gran parte tanto del número de estaciones que se tengan, como del tipo de aplicación con que se cuenta (voz, video o datos). Dependiendo del tipo de información que se genere en cada estación el tiempo de retraso será diferente, siendo el más crítico el de video, ya que por el tamaño de la trama (tramas de longitud variable de hasta 25 KBytes) se consume un tiempo relativamente mayor que provoca un retraso para otras aplicaciones (como voz y datos) que tienen una longitud de trama fija y más pequeña.

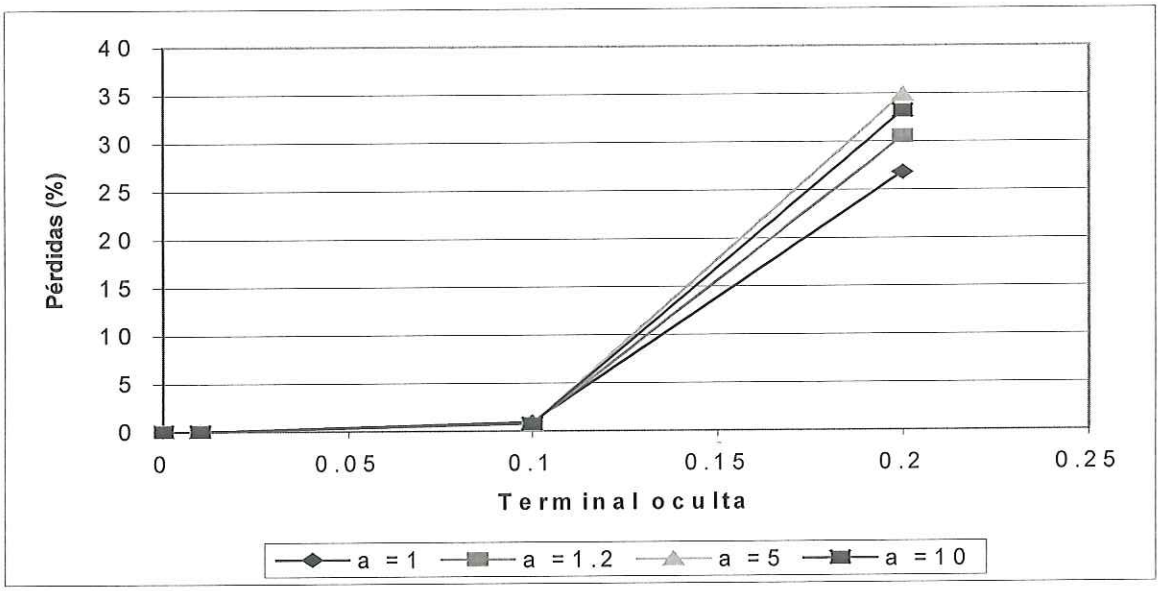

figura 25.- Pérdidas en tráfico de video por diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura

En las figuras 25 y 26 se puede observar que lo que limita el buen desempeño de la red, son en gran parte las pérdidas que se tienen por el efecto de captura, y el de terminal oculta, ya que, aunque se recibe información y está dentro del limite de retraso, existe otra que no llega, que se destruye por el efecto de captura, u ocasiona colisiones por el efecto de terminal oculta.

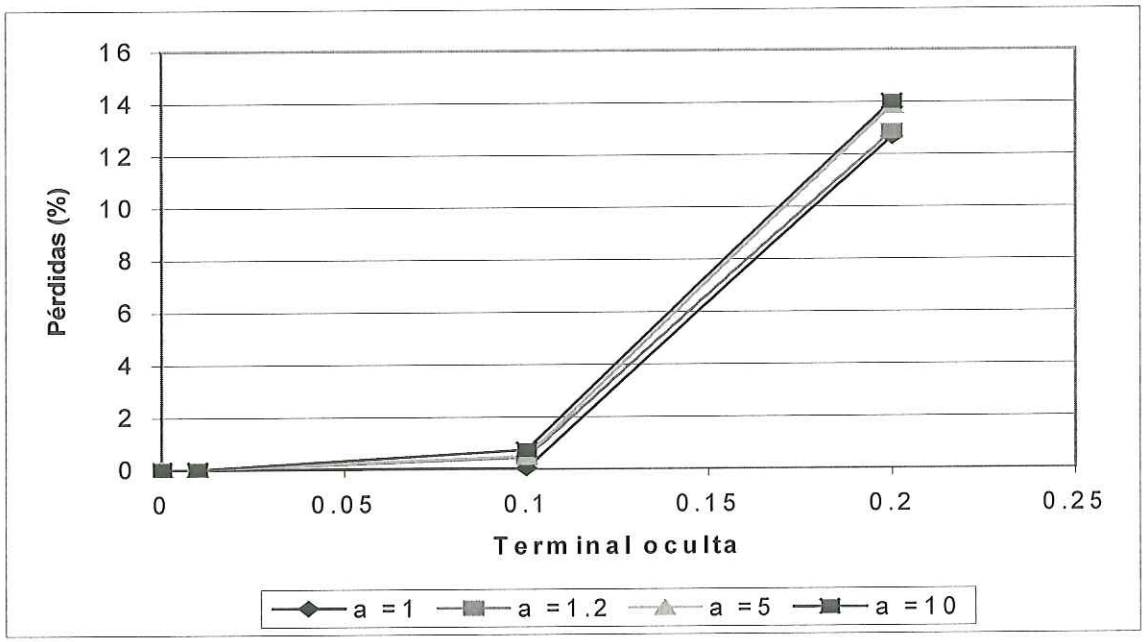

figura 26.- Pérdidas en tráfico de voz por diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura

VI.2.- Modelo de Red transportando tráfico real en PCF y tráfico de Poisson en DCF variando el número de usuarios en la red.

El mantener los valores óptimos tanto para el efecto de captura como para la terminal oculta, permite conocer como se afectará el retraso al aumentar el número de usuarios, debido a que el controlador requiere de mayor tiempo para realizar las encuestas a todas las estaciones. A mayor número de estaciones, mayor es el tiempo que se requiere para que el

ciclo de encuesta se lleve a cabo. Al variar los valores de terminal oculta y efecto de captura ocurre un incremento en el retraso para las diferentes aplicaciones, siendo este un incremento no lineal ocasionado por las pérdidas y colisiones que se generan al no tener un medio de transmisión óptimo.

La figura 27, 28 y 29 muestran el retraso de los paquetes cuando se incrementa el número de usuarios y al variar los valores de terminal oculta y efecto de captura.

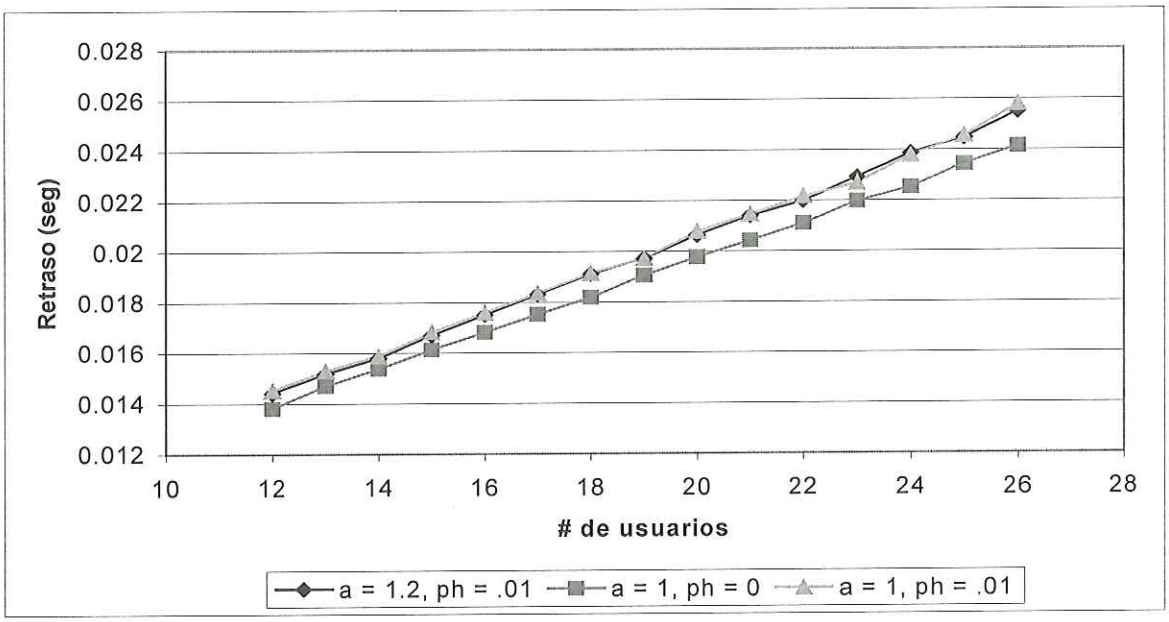

figura 27.- Retraso para tráfico de video afectado por diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura, incrementando el número de usuarios.

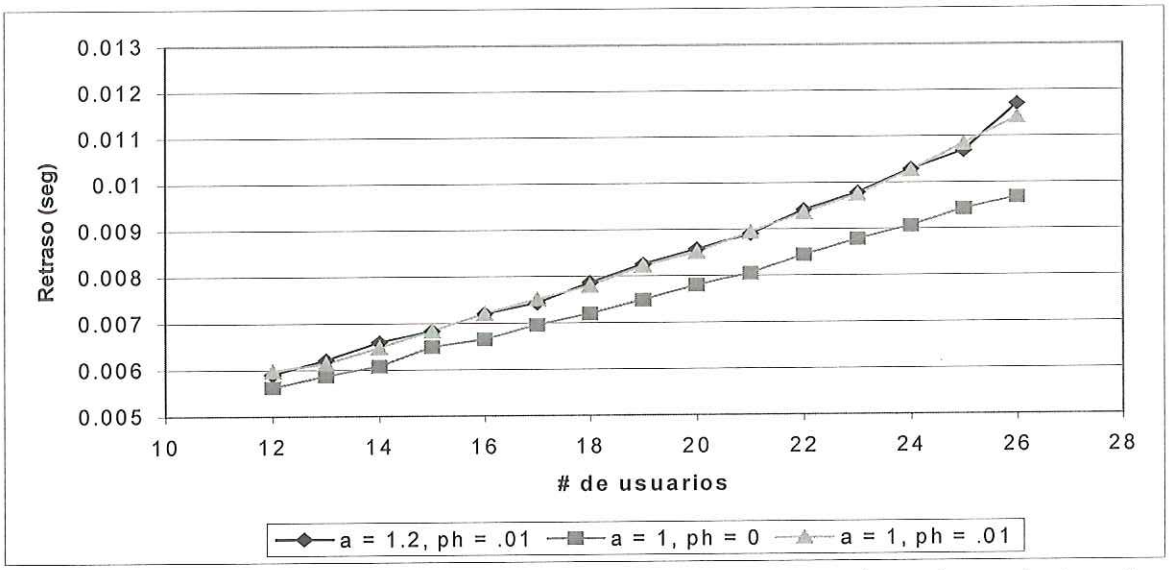

figura 28.- Retraso para tráfico de datos afectado por diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura, incrementando el número de usuarios.

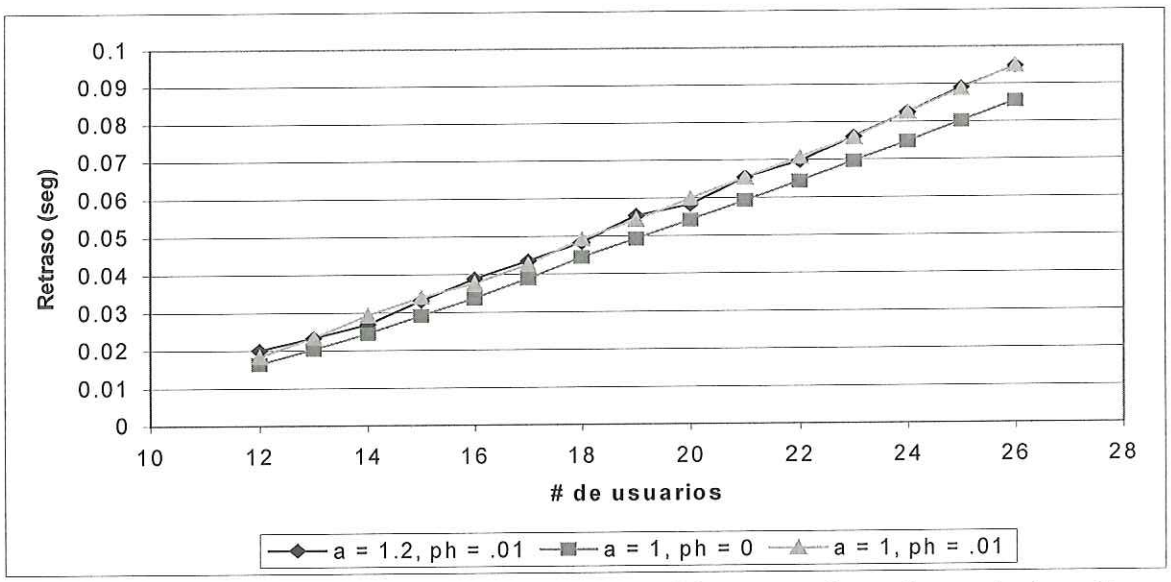

figura 29.- Retraso para tráfico de voz afectado por diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura, incrementando el número de usuarios

Las pérdidas para un número de usuarios diferente con valores de terminal oculta y efecto de captura diferentes a los ideales genera un porcentaje de pérdidas mayor que cuando se consideran valores ideales. Esto se debe a las colisiones por las retransmisiones que se generan a un tiempo mayor de encuesta por contar con mas usuarios que atender.

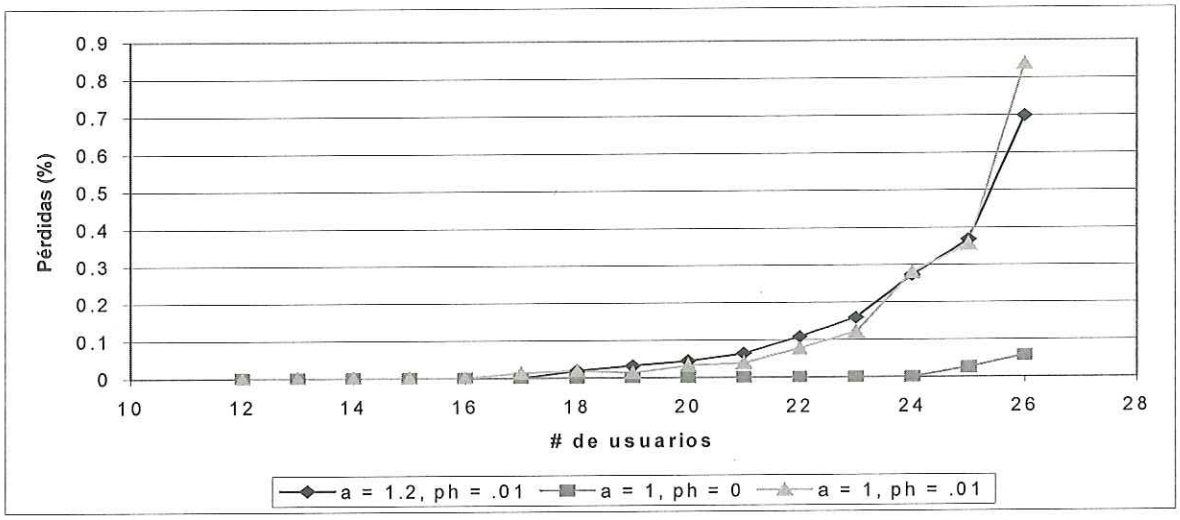

figura 30.- Pérdidas para tráfico de video afectado por diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura, incrementando el número de usuarios

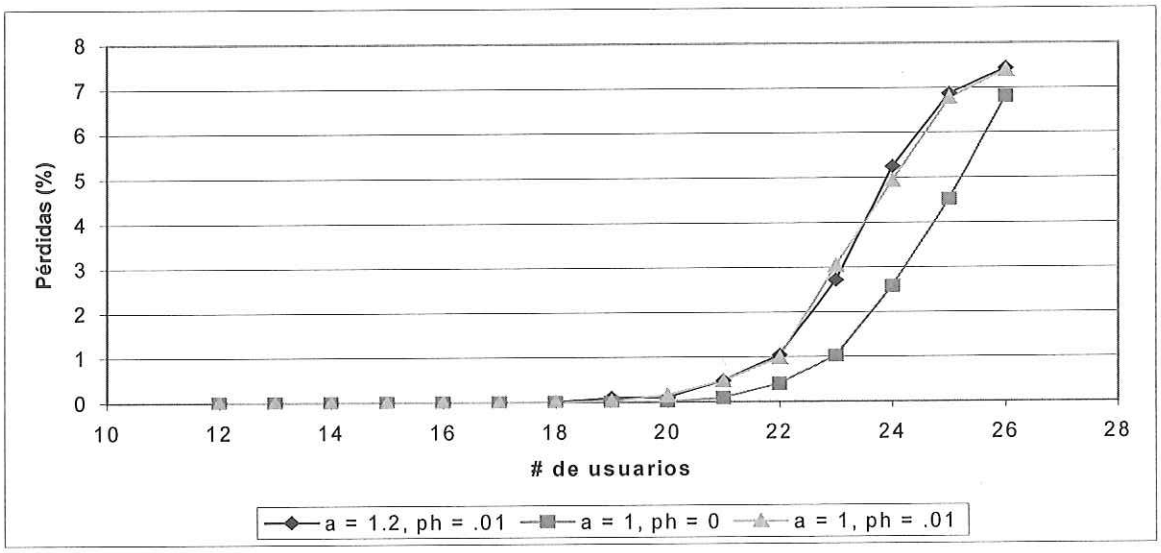

figura 31.- Pérdidas para tráfico de voz afectado por diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura, incrementando el número de usuarios

VI.3.- Red transportando tráfico de Pareto y Poisson en DCF y tráfico real en PCF.

En este escenario, se compara el desempeño de la red transportando tráfico de Pareto y Poisson. Se simula con una arquitectura tipo infraestructura con 12 estaciones móviles distribuidas aleatoriamente en una celda como inicio, y estas se van incrementando hasta tener un total de 27 estaciones.

Cuando las estaciones móviles requieren transmitir su información, necesitan contender por conseguir el medio de comunicación.

Durante el período de ráfagas, el tráfico aumenta, por lo que en los almacenadores de entrada se forman colas esperando ser transmitidas. Esto se traduce en incrementos en el tiempo de retardo. Por otro lado, al introducir más usuarios el número de colisiones también se incrementa con el subsecuente deterioro en el desempeño de la red.

El existir un tráfico real e ideal en el período de DCF, proporciona pérdidas y retrasos totalmente diferentes entre ellos. Las gráficas en las figuras 32, 33 y 34 muestran los retrasos de paquetes considerando un tráfico de Poisson y de Pareto en el período DCF, permitiendo realizar una comparación entre diferentes tipos de tráfico (real e ideal) en el período DCF y como es que repercuten en el período PCF.

Los retrasos siempre son mayores con la aplicación de tráfico de Pareto en el período DCF que con el empleo de Poisson, independientemente de intervalo el período de DCF

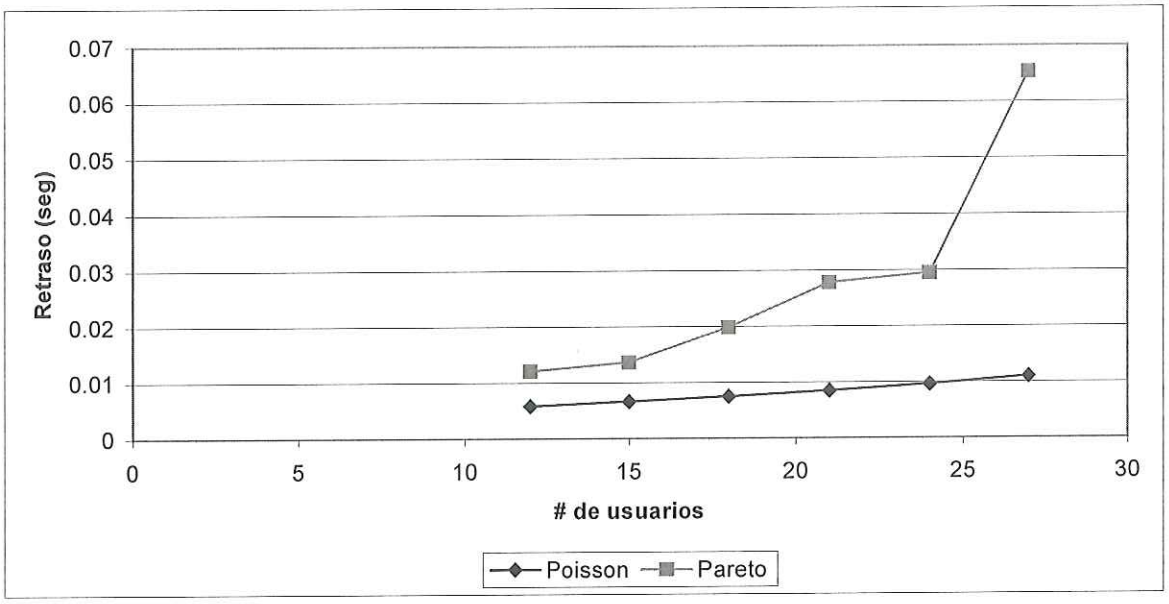

figura 32.- Retraso en datos con diferente tipo de tráfico en el período DCF.

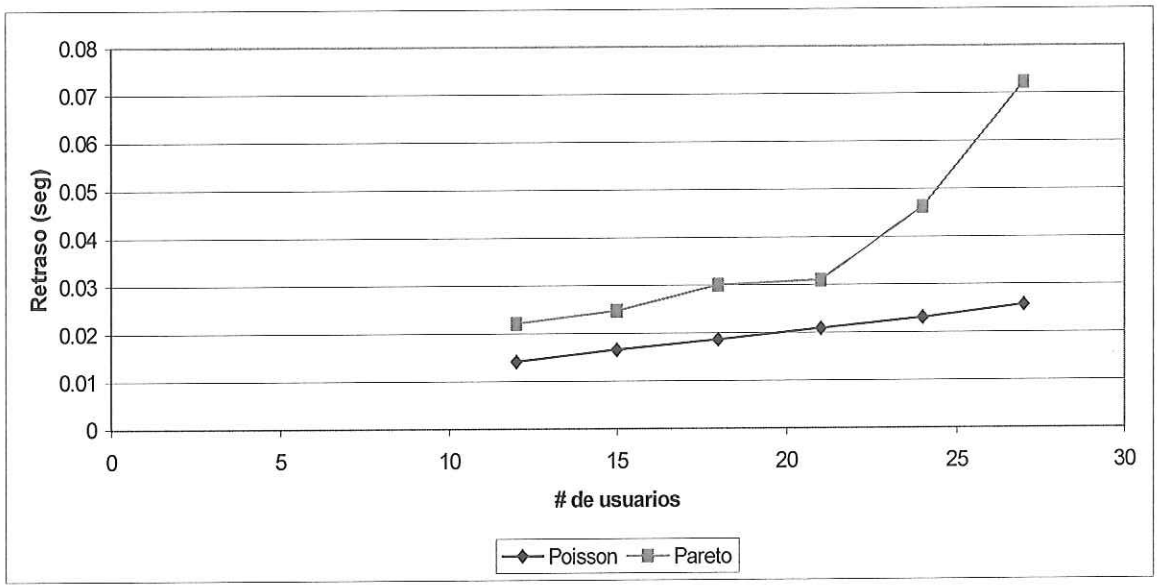

figura 33.- Retraso en video con diferente tipo de tráfico en el período DCF.

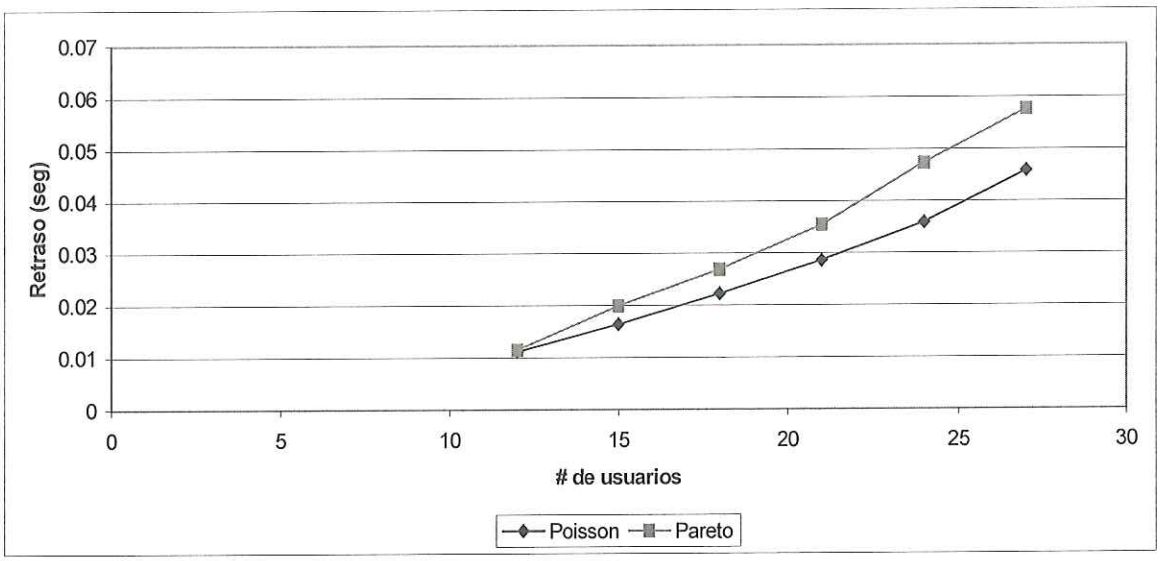

figura 34.- Retraso en voz con diferente tipo de tráfico en el período DCF.

Las figuras 35, 36 y 37 muestran los resultados obtenidos del porcentaje de paquetes perdidos, considerando los mismos parámetros de entrada.

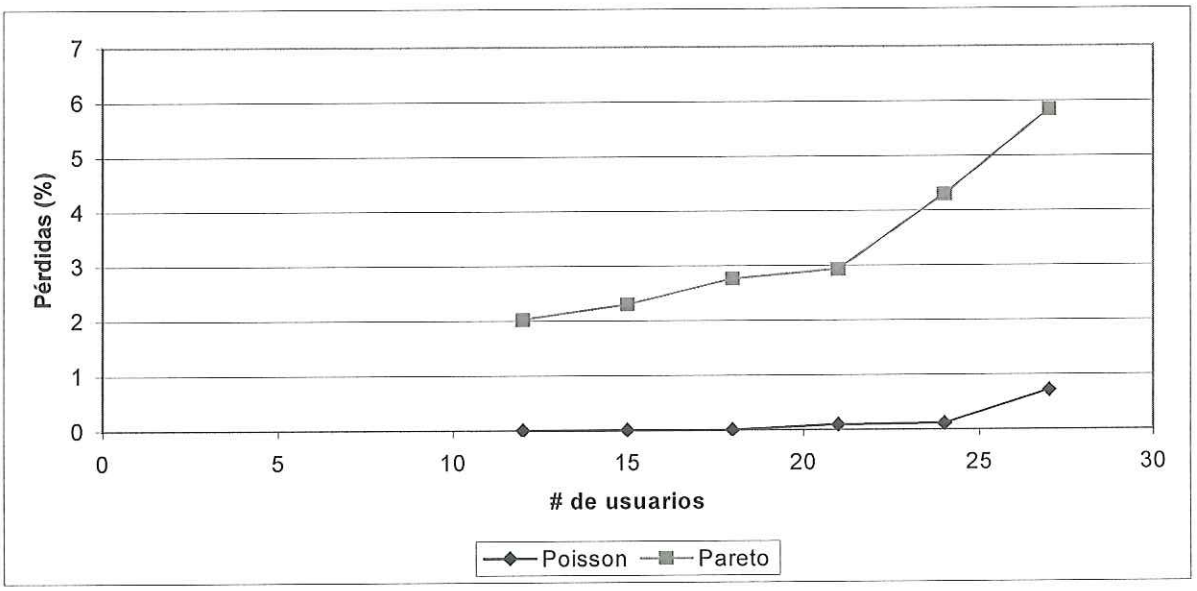

figura 35.- Pérdidas en video con diferente tipo de tráfico en el período DCF.

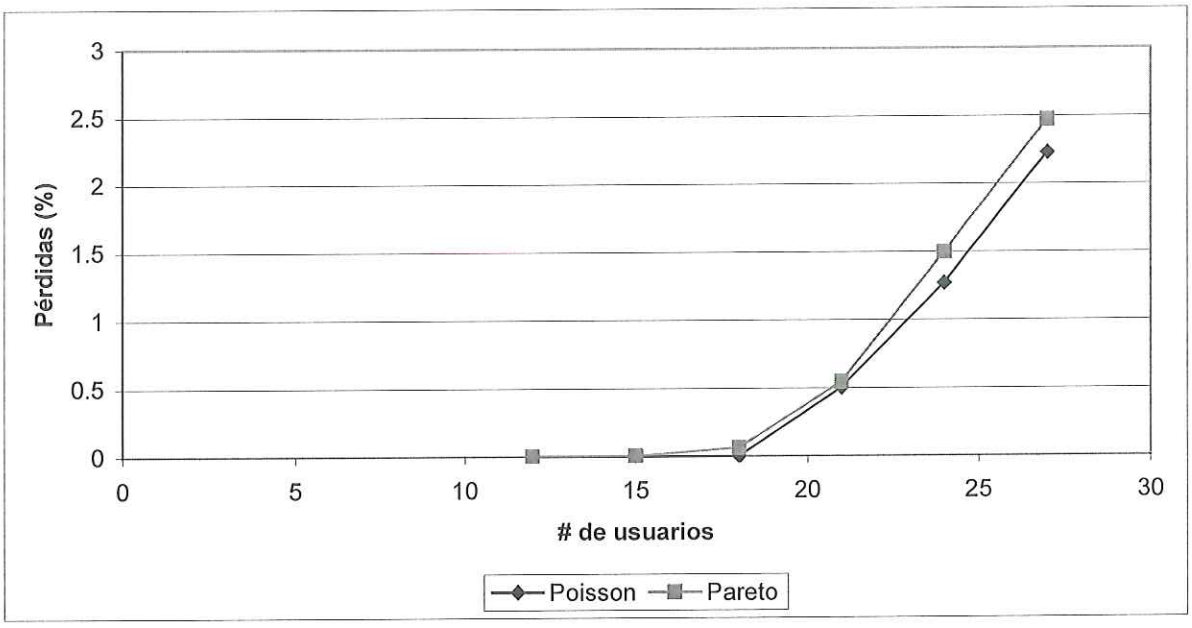

figura 36.- Pérdidas en voz con diferente tipo de tráfico en el período DCF

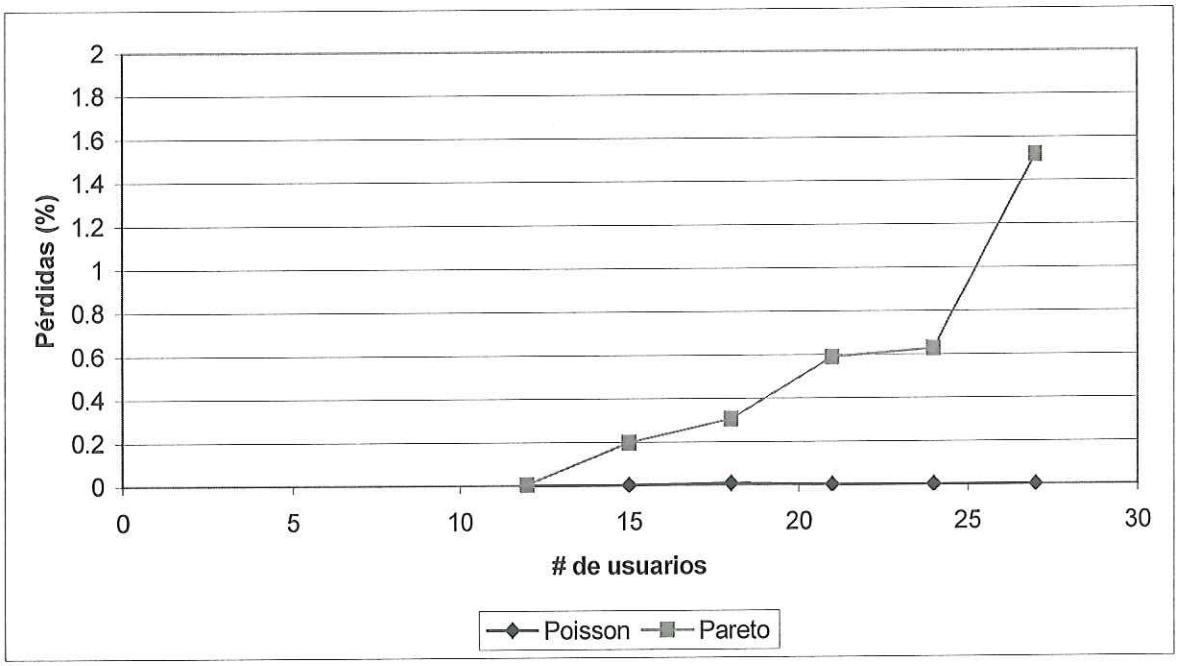

figura 37.- Pérdidas en datos con diferente tipo de tráfico en el período DCF

VI.4.- Red transportando tráfico de Pareto en DCF y tráfico real en PCF para diferente tamaño de período en DCF.

Para este escenario, se contemplan dos períodos de tiempo para el DCF, lo que permite que se transmita al menos un paquete que sería en el caso de contar con un período más corto, o más de uno, para un tiempo mayor. Al tener un período corto de DCF, se esta garantizando un mayor tiempo para el período PCF. Por lo tanto, el retraso que se tiene en este período es menor, al incrementar el tiempo del período DCF. De la misma manera, el retraso en la información para transmitir en el período PCF se incrementa, ya que se tarda mas tiempo para tomar control del medio nuevamente, incrementando con esto el retraso en el PCF. El retraso para este caso se muestra en las figuras 38, 39 y 40. Las pérdidas se muestran en las figuras 41, 42 y 43.

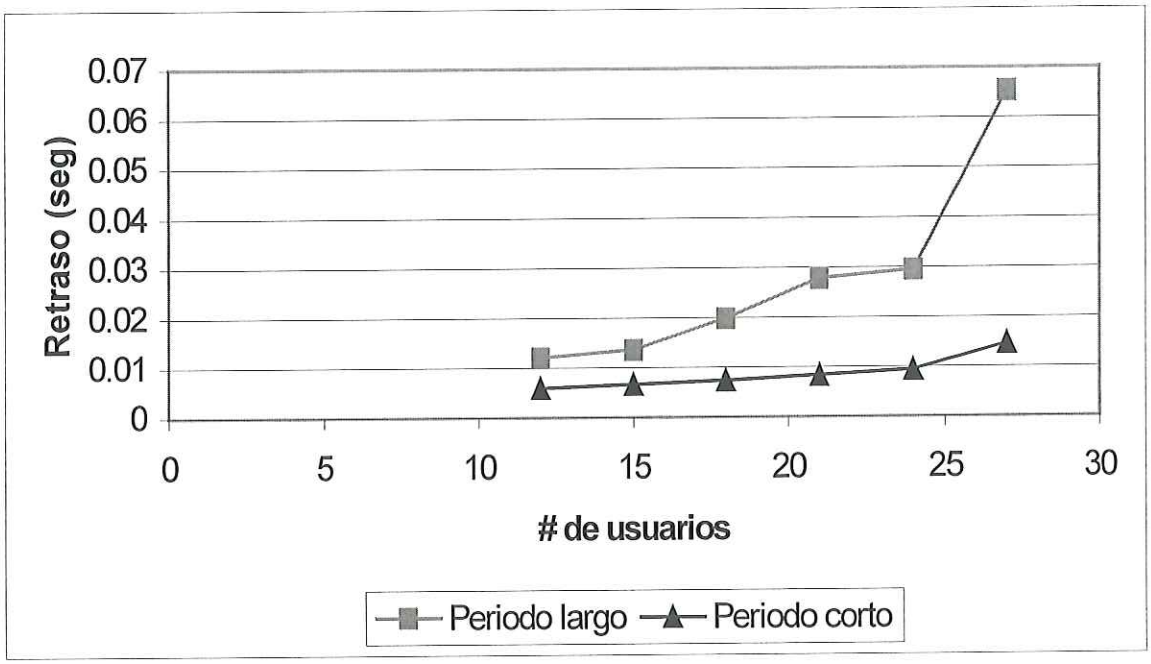

figura 38.- Retraso en datos con diferentes períodos de tiempo en DCF, empleando Pareto.

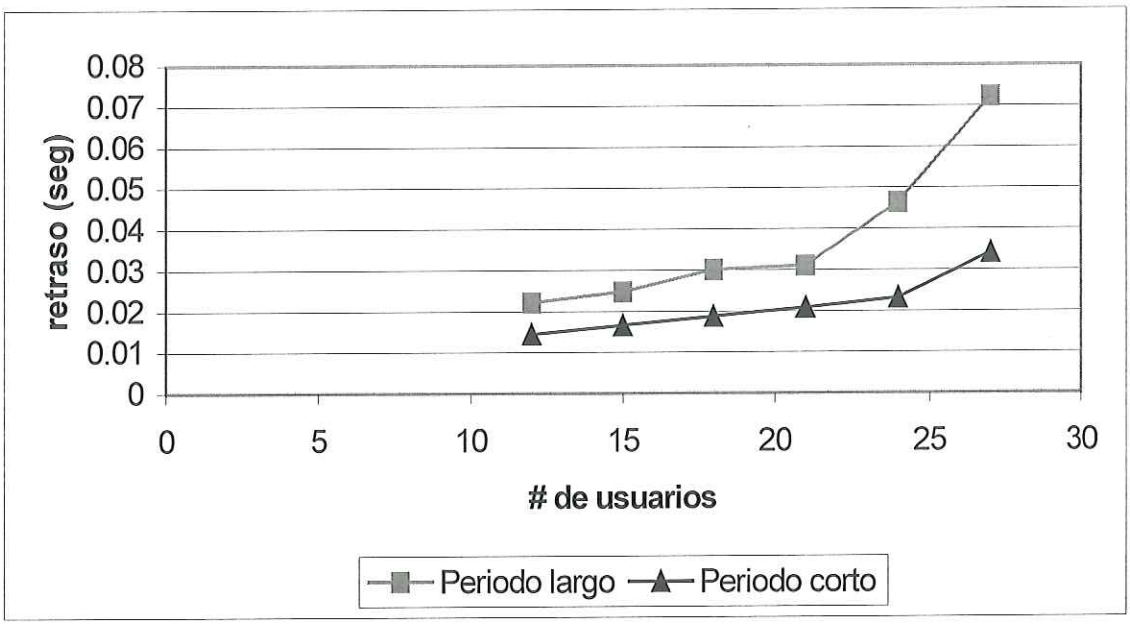

figura 39.- Retraso en video con diferentes períodos de tiempo en DCF, utilizando Pareto.

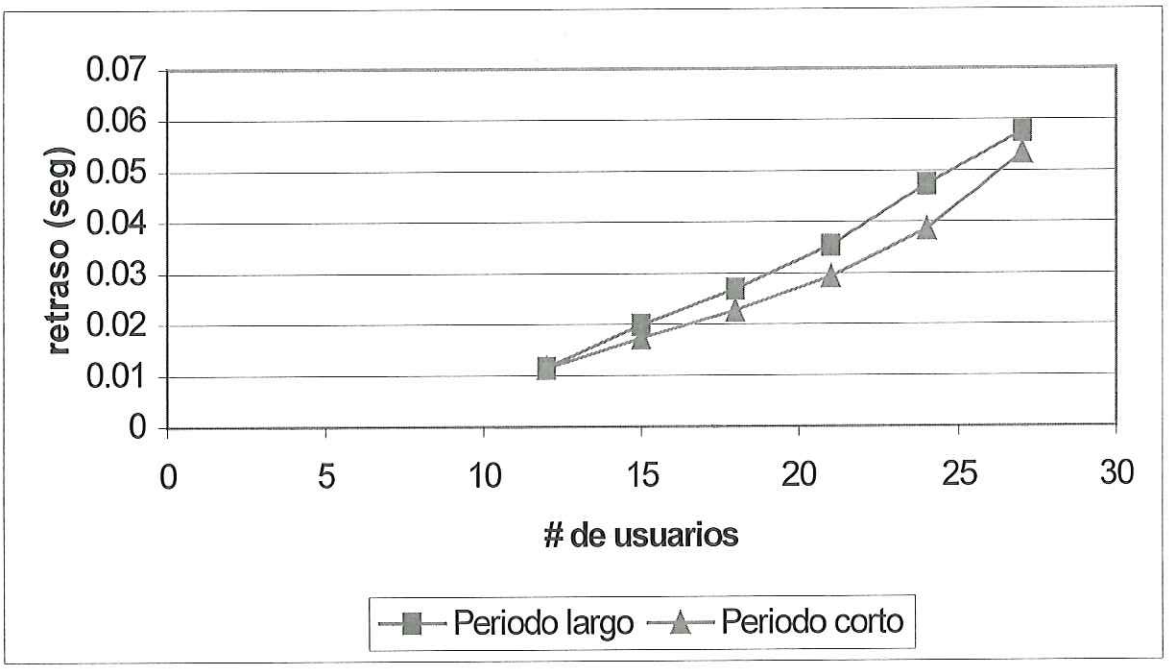

figura 40.- Retraso en voz con diferentes períodos de tiempo en DCF, empleando Pareto.

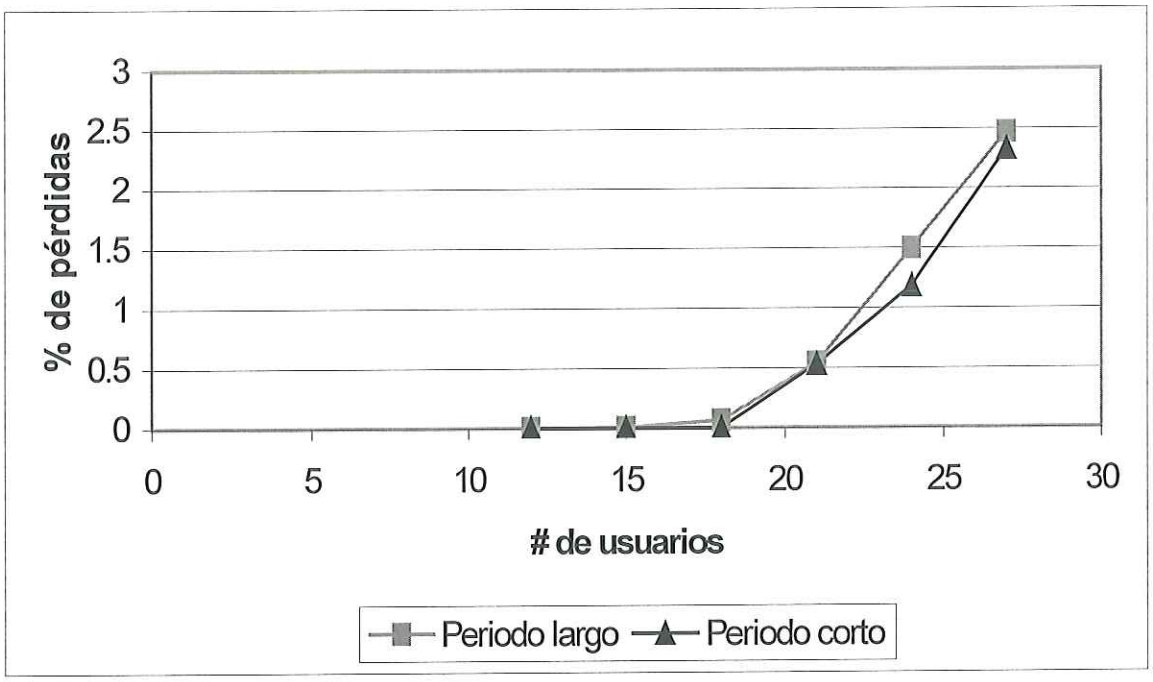

figura 41.- Pérdidas en voz con diferentes períodos de tiempo en DCF, utilizando Pareto

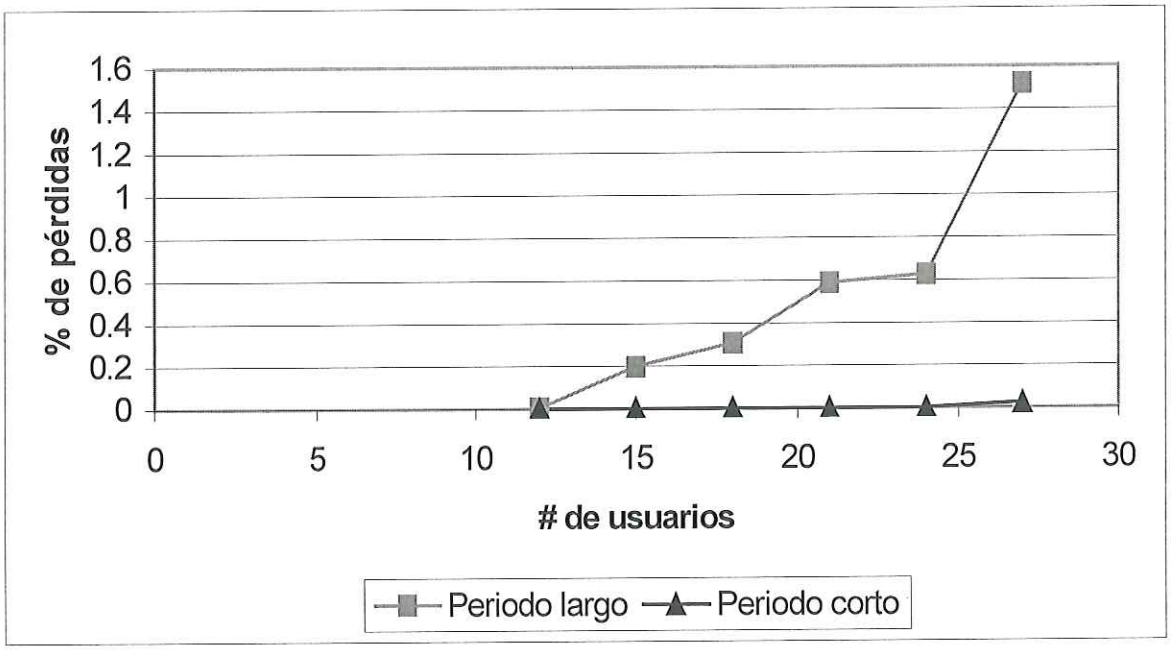

figura 42.- Pérdidas en datos con diferentes períodos de tiempo en DCF, empleando Pareto

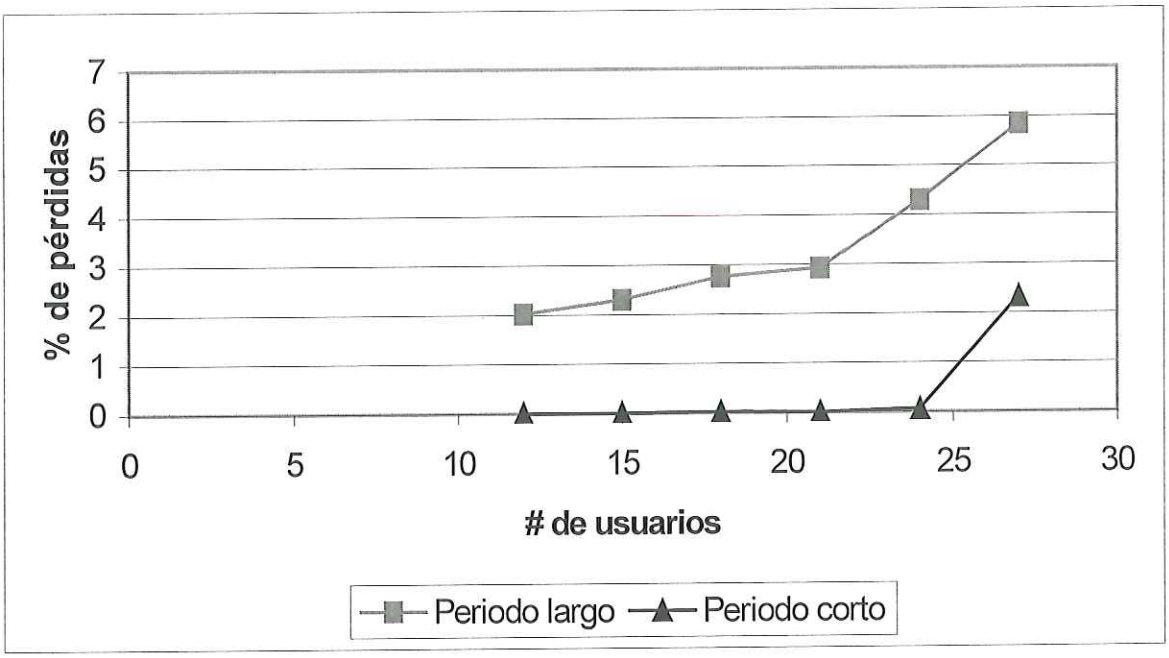

figura 43.- Pérdidas en video con diferentes períodos de tiempo en DCF, utilizando Pareto

VII.- Conclusiones y trabajo futuro

VII.1.- Introducción

La importancia de tener una red inalámbrica totalmente comunicada entre todas las estaciones que la conforman es muy alta, ya que al no tener una buena comunicación entre ellas mismas, se generan problemas en la red, como colisiones, pérdidas y retrasos de paquetes. El análisis del lugar en que se deberá instalar la red debe de garantizar una buena comunicación entre las estaciones que conforman el BSS, evitando que dos o más estaciones pertenecientes al mismo BSS transmitan simultáneamente por no "escucharse" entre ellas mismas.

El efecto de captura en el análisis de una red LAN inalámbrica es importante, dado que de ello depende en parte el buen funcionamiento de la misma. Al no tener un efecto de captura adecuado, las pérdidas en la red se incrementan ya que una estación al recibir mas de un paquete debe de tomar solo uno y destruir el resto, o destruir ambos paquetes, ocasionando por un lado pérdidas por los paquetes destruidos y por otro lado retraso porque estos paquetes destruidos se deben de retransmitir nuevamente. El efecto que produce el considerar las estaciones ocultas es de igual importancia, debido a que contribuyen con tráfico que se introduce en la red al transmitir paquetes de información.

El realizar las simulaciones de una red WLAN considerando los efectos de captura y de terminal oculta, permite tener resultados para el análisis del comportamiento de dicha red

ante situaciones de tráfico real y su comparación cuando se utiliza tráfico ideal (con fuentes de tráfico con distribución de Poisson).

En el presente trabajo se realizaron las simulaciones de las WLANs que transmiten información multimedia utilizando fuentes de tráfico con comportamiento real.

Existen trabajos que tratan acerca de la implementación de tráfico limitado en tiempo, pero solo respecto a voz y datos. En este trabajo se implementa lo que es comunicación multimedia, que abarca, datos, voz y video, lo cual lo hace mas complicado, ya que lograr que esto coexista, reviste mayor dificultad. Se puede observar que la utilización de tráfico ideal no es util para el análisis de una red, ya que no se tiene una visión real acerca de los problemas que se pueden presentar al momento de implementarlas.

Transmitir aplicaciones de tiempo real sobre LANs inalámbricas, es algo nuevo en las redes inalámbricas. Para lograr ese objetivo, se tiene que garantizar que una parte de los recursos de la red estén fijos para aplicaciones en tiempo real. Para ello se tienen que desarrollar mecanismos que permitan una reservación equitativa del medio, y la asignación de recursos. El estándar 802.11 tiene incorporado un método de acceso centralizado (PCF) para reservar estos recursos para aplicaciones de tiempo real.

En esta investigación, se realizó el análisis del estándar 802.11 en redes inalámbricas. Se analiza la función de punto de coordinación (PCF). Se evaluó el sistema bajo diferentes valores de terminal oculta y efecto de captura. También se evaluó el sistema bajo cargas de

tráfico real y tráfico de Poisson, así como con diferentes valores de tiempo del período de contienda.

VII.2.- Conclusiones

Los objetivos principales de este trabajo como lo es visualizar los efectos producidos tanto en el retraso y como en las pérdidas de paquetes debido a los efectos de captura y de terminal oculta así como su incidencia principal en el número de usuarios en la WLAN. Para cumplir con esta meta, en primer lugar se realizó un análisis del efecto de captura y terminal oculta, variando estos parámetros, con un número fijo de usuarios de voz, datos y video en el período PCF y de datos con distribución de Pareto en el período de DCF, para analizar el comportamiento de la red ante estas condiciones.

El tipo de tráfico que se emplea para las estaciones que responden al período de PCF transmiten con fuentes de tráfico que tienen un comportamiento real, dándole con esto a este trabajo una importancia mayor en el análisis de las redes inalámbricas LANs, para evaluar el desempeño de la red ante dichas condiciones

Observando las gráficas 22, 23 y 24, se concluye que el retraso esta dentro de las expectativas que se tienen, no representando para ello problema alguno la terminal oculta y el efecto de captura. Donde se presenta el problema, es en las pérdidas de paquetes que se provocan por el efecto de captura. Analizando dichas pérdidas que se producen al variar los

parámetros de efecto de captura y de terminal oculta, las cuales se incrementan conforme estos valores se alejan de su valor óptimo, dichos valores son para terminal oculta, que todas las terminales se puedan escuchar entre ellas, y para el efecto de captura, que todos los paquetes sean recibidos sin que existan colisiones o se tenga que descartar alguno de ellos, lo cual afecta el desempeño de la red

Además, se efectuó un análisis considerando efectos de captura y terminal oculta diferente, así como también variando el número de usuarios para aquellos en donde se supone un período de PCF (voz, video y datos) y manteniendo constante el número de usuarios en el período DCF, considerando en este tráfico una distribución de Pareto.

Nuevamente, el retardo no presenta problemas para tráfico de voz o video. Las pérdidas que se presentan en este ambiente sobrepasan el máximo establecido para el tipo de tráfico que se maneja (voz y video), por lo que se concluye que el número de usuarios estará determinado por las pérdidas que se puedan aceptar en la red y además del tipo de aplicación que se tenga. El límite que se tuvo fue de 20 usuarios para una transmisión multimedia (período PCF). Dicho límite se debe a las pérdidas que se tuvieron, ya que de acuerdo al retraso, se puede tener hasta un máximo de 27 usuarios, pero para el funcionamiento óptimo de la red, deben considerarse tanto pérdidas como retrasos. Las pérdidas para tráfico de voz permiten un máximo de 20 usuarios que funcionen bajo el período PCF, sin variar los que funcionan bajo el período DCF (20 usuarios). Las pérdidas en transmisión de video permiten 17 usuarios para el período PCF, estando limitada entonces la cantidad de usuarios por el tráfico de video, ya que se fragmenta cada paquete

de video en otros paquetes pequeños, y al existir una colisión en uno de los fragmentos, se tiene que retransmitir todo el paquete nuevamente.

El retraso en la transmisión-recepción empieza a incrementarse conforme el efecto de captura y terminal oculta comienza a aumentar. Esto se debe al hecho de que el tráfico real degrada la calidad de aplicaciones sensibles al tiempo. Utilizando un cancelador de eco se puede mejorar relativamente el desempeño, sin embargo las aplicaciones siguen teniendo pérdidas.

Para resumir, se puede concluir del estudio realizado que las aplicaciones sensibles al tiempo pueden soportarse por redes inalámbricas comerciales disponibles en IEEE 802.11 siendo la aportación principal de este trabajo de tesis, el empleo de tráfico real para el análisis del desempeño de la red, lo cual proporciona una idea mas aproximada del funcionamiento de una red WLAN en la realidad.

VII.3.- Trabajo a Futuro.

Existen varias áreas importantes a estudiar y considerar para trabajos futuros. El impacto del deterioro del canal, tal como el desvanecimiento por multitrayectorias, y los errores del canal en el desempeño del sistema. Otra área que se puede estudiar a futuro es el impacto del desempeño de las redes con las nuevas técnicas de compresión de video. Una parte muy importante sería el estudio del sistema cuando este opere a altas velocidades, que vayan mas allá de los 2 Mbps, así como la interconexión de las redes inalámbricas con las redes

alámbricas ya existentes. Por otro lado, se debe continuar con el estudio de las mismas redes inalámbricas, ya que esto es una parte medular para que las redes inalámbricas existan, siendo la compatibilidad y escalabilidad un requisito primordial a cumplir.

Acrónimos

AP	Punto de Acceso
BSS	Grupo de Servicio Básico
CF-End	Fin de Período Libre de Contienda
CFP	Período Libre de Contienda
CFP-MaxDuration	Duración Máxima del Período Libre de Contienda
CTS	Permiso para enviar
DCF	Función de Coordinación Distribuida
DIFS	Espacio entre marco en la Función de Función Distribuida
DSSS	Secuencia Directa mediante Espectro Esparcido
ETSI	Instituto Europeo de Estándares en Telecomunicaciones
FHSS	Saltos en Frecuencia mediante Espectro Esparcido
FIFO	Primero en entrar primero en salir
HIPERLAN	High Performance European Radio LAN
IFS	Espacio entre marcos
IR	Infrarrojo
NAV	Vector de asignación de red
PC	Punto de Coordinación
PCF	Función de Punto de Coordinación
PIFS	Espacio entre marco en la Función de Punto de Coordinación
QoS	Calidad de Servicio

RF	Radio Frecuencia
RTS	Petición de envío
SIFS	Espacio entre marco corto
WLANs	LANs inalámbricas

Referencias.

Bertsekas Dimitri, Gallager Robert, 1992, "Data Networks", Englewood Cliffs, N.J. Prentice Hall, second edition, 478 p.

Chen Kwang-Cheng, 1994, "Medium Access Control of Wireless LANs for Mobile Computing", IEEE Network, 50-62.

Diepstraten Wim, 1993, "A Distributed Access Protocol Proposal Supporting Time-bounded" Services, IEEE Communications magazine, 70-78 p.

Goodman D. J., Valenzuela R. A., Gaylard K. T. and Ramamurthi B., 1989. "Packet Reservation Multiple Access for Local Wireless Communications", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 37, 885-890 p

Goodman D. J., Valenzuela R. A., Gaylard K. T. and Ramamurthi B., 1991. "Efficiency of Packet Reservation Multiple Access", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 40, 170-176 p

Hadzi-Velkov Zoran and Gavrilovska Liljana, 1999, "Performance of the IEEE 802.11 Wireless LANs Under Influence of Hiden Terminals and Pareto Distributed Packet Traffic", IEEE Communication magazine, 221-225

HIPERLAN Functional Specification, "Draft prETS300652", ETSI Secretariat, July 1995. IEEE 802.11, 1998, "Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", Draft Standard 802.11,8802.11/D10.

Katz Randy H., "Beyond Third Generation Telecommunications Architecture: The convergence of Internet Technology and Cellular Telephony", Mobile Computing and Communications Review, 1999,Volume 2, Number 2.

LaMaire Richard O., Krishna Arvind and Bhagwat Pravin, IBM James Panian, ericson Inc., 1996, "Wireless LANs and Mobile Networking: Standards and future Directions", IEEE Communications Magazine,86-94 p.

Pahlavan Kaveh, Zahedi Ali and Krishnamurthy Prashant, 1997, "Wideband Local Access: Wireless LAN and Wireless ATM", IEEE Communications Magazine, 34-40 p.

Paxson V. and Floyd S., 1995, "Wide Area Traffic: The Failure of Poisson Modeling", IEEE Transactions on Networking, Vol. 3, 226-245 p.

Shafi Mansoor, Hashimoto Akira, Umehiro Masahiro, Ogose Shigeaki, and Murase Takehiro "Wireless Communications in the twenty-First Century: A Perspective", Proceeding of the IEEE. 1997, Vol. 85, No. 10, 34-42 p.

Taylor Jack T., Omura Jim K., Cylink Corporation, 1991, "Spread Spectrum Technology: A Solution to the Personal Communications Services Frequency Allocation Dilemma", IEEE communications magazine, 48-51.

Viterbi Andrew J., 1995, "CDMA Principles of Spread Spectrum Communication", Addison Wesley Wireless Communication Series, Addison Wesley Publishing Company, 3^{era} Edicion, Reading Massachusetts, 670 p.

Wolisz A., Schlaeger M., Weinmiller J., Woesner H., 1996, "Wireless Access to High Speed Networks, High-Speed Networking for Multimedia Applications", W. Effelsberg, O. Spaniol, A. Danthine, D. Ferrari , Kluwer Academic Publishers, 1-21 p.

Yuan L., Fu W., Zhang L., 1999, "Methodology for Traffic Modeling Using Two State Markov-modulated Bernoulli Process", Computer communications, ol 99, 1266-1273 p.