

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERIA
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**“DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOCOLO MAC PARA
WIRELESS ATM”**

TESIS

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRÓNICO

**PRESENTADO POR:
JOHNNY CHOQUE OLLACHICA
PROMOCIÓN
1993-2**

**LIMA-PERU
2001**

A mis padres, la razón de ser para superarme

A mis hermanos, por ser los mejores

A mi familia, por sus enseñanzas.

**DISEÑO Y EVALUACIÓN DE UN PROTOCOLO MAC
PARA WIRELESS ATM**

SUMARIO

El Modo de Transferencia Asíncrono (ATM) ha sido adoptado como la infraestructura de transporte y conmutación para la futura Red Digital de Servicios Integrados de Banda Ancha (B-ISDN). En la actualidad, la proliferación de equipos portátiles multimedia están impulsando a que los servicios de banda ancha sean llevados al ambiente inalámbrico. Aunque hay varias tecnologías que pueden proporcionar estos servicios, tales como las redes celulares de tercera generación (por ejemplo, PCS) y las redes de área local inalámbrica (WLAN), Wireless ATM tiene la ventaja de ofrecer de manera intrínseca capacidades multimedia extremo a extremo con calidad de servicio garantizado. Diversos aspectos de la estructura ATM deben ser resueltos para llegar a constituir una red Wireless ATM, uno de los más importantes es el diseño de un protocolo MAC (Control de Acceso al Medio) óptimo, el cual constituye la base del presente trabajo. Se propone un nuevo protocolo MAC para redes Wireless ATM y se evalúa su rendimiento frente a modelos de tráfico de voz y datos mediante procesos de simulación utilizando la herramienta BONES DESIGNER. Los resultados son comparados con uno de los principales protocolos MAC para Wireless ATM propuesto por Dipankar Raychaudhuri, llegándose a establecer las ventajas del protocolo propuesto.

INDICE

	Pág.
PROLOGO	1
CAPÍTULO I	
FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA WIRELESS ATM	7
1.1. ¿Por qué Wireless ATM?	11
1.2. Protocolos MAC para Wireless ATM	14
1.2.1. Introducción	14
1.2.2. Características Generales de los Protocolos de Asignación por Demanda	18
1.2.3. Principales Protocolos MAC Propuestos	23
1.2.4. Ventajas y Desventajas de TDD vs. FDD	25
1.3. Conceptos sobre ATM	27
1.3.1. Modelo de Referencia ATM	29
1.3.2. Aspectos de Gestión de Tráfico	33
1.3.3. Categorías de Servicio ATM	35
1.4. Caracterización de Fuentes en Redes ATM	38
1.4.1. Servicios CBR	39
1.4.2. Servicios VBR	41
1.4.3. Servicios ABR y UBR	43

1.5.	Modelado de Fuentes de Tráfico ATM	46
1.5.1.	Introducción	46
1.5.2.	Modelado de Fuentes CBR	49
1.5.3.	Modelado de Fuentes VBR y ABR	50
CAPÍTULO II		
ESTUDIO DEL PROTOCOLO MAC PROPUESTO		55
2.1.	Consideraciones de la Capa Física	55
2.1.1.	Cobertura de la Estación Base	56
2.1.2.	Antena Adaptativa	56
2.1.3.	Frecuencia Portadora	58
2.1.4.	Modulación Digital	61
2.1.5.	Velocidad de transmisión del Canal	62
2.2.	Consideraciones de la Capa de Red	63
2.2.1.	Introducción	63
2.2.2.	Árbol de Conexiones Virtuales	64
2.2.3.	Implementación	67
2.2.4.	Control de Admisión	68
2.3.	Diseño del Protocolo	69
2.3.1.	Señalización	69
2.3.2.	Descripción del Protocolo	73
2.3.3.	Duración de la Trama	77
2.3.4.	Overhead de la Trama	79
2.3.5.	Número de Ranuras	80
2.3.6.	Parámetros de la Trama	81

2.3.7. Técnica de Acceso	83
2.3.8. Política de Asignación de Recursos	84
2.3.9. Parámetros del Tráfico	87
2.3.10. Políticas de Servicio de Colas	90

CAPÍTULO III

SIMULACIÓN DEL PROTOCOLO PROPUESTO	92
3.1. Modelo de las Fuentes CBR	94
3.1.1. Bloque "Generación de Llamadas de Voz"	95
3.1.2. Bloque "Petición de Voz"	96
3.1.3. Bloque "Transmisión de Voz"	98
3.2. Modelo de las Fuentes ABR	99
3.2.1. Bloque "Generación de Tráfico ABR"	100
3.2.2. Bloque "Petición de Datos"	102
3.2.3. Bloque "Transmisión de Datos"	103
3.3. Modelo de la Estación Base	104
3.3.1. Bloque "Clasificación de Peticiones"	105
3.3.2. Bloque "Gestor CBR"	106
3.3.3. Bloque "Gestor ABR" (con disciplina FCFS)	107
3.3.4. Bloque "Gestor ABR (con TOE)"	109
3.3.5. Bloque "Estadística de Pérdida de Paquetes"	110
3.3.6. Bloque "Estadística de Tráfico Ofrecido-Cursado"	110

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	112
4.1. Análisis de la Carga Ofrecida	113

4.2.	Análisis de la Carga Cursada	114
4.3.	Análisis del Tráfico CBR	115
4.4.	Análisis del Tráfico ABR	119
	CONCLUSIONES	124
	ANEXO A HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN	128
	ANEXO B VARIABLES Y BLOQUES DE LA SIMULACIÓN	136
	ANEXO C GLOSARIO	153
	ANEXO D ACRONIMOS	157
	BIBLIOGRAFÍA	159

PROLOGO

En los últimos años se están produciendo dos grandes tendencias en la tecnología de las comunicaciones: movilidad y multimedia. Junto con ello el uso cada vez mayor de los terminales móviles y portátiles entre los usuarios, obliga a los sistemas de comunicación inalámbrica soportar nuevos conceptos de servicios y una demanda de ancho de banda cada vez mayor. Estudios realizados anteriormente [1] han demostrado que los actuales estándares de comunicación móvil, tales como GSM y DECT, no son adecuados para enviar información multimedia debido a que fueron diseñados en un principio solo para cursar tráfico de voz. Para dar solución a estas necesidades y limitaciones, muchas propuestas han sido realizadas englobadas en términos tales como Sistemas Inalámbricos de Banda Ancha (*Wireless Broadband System*) [2]. Debido a que es visible la migración de las redes fijas actuales a B-ISDN basado en ATM, una de las propuestas, para cursar tráfico multimedia a través de una red de comunicación inalámbrica de banda ancha, es extender las capacidades de las redes fijas ATM al campo inalámbrico denominándose a esto como la tecnología **Wireless ATM**.

El concepto de Wireless ATM está siendo ahora activamente considerado como una estructura potencial para las redes de comunicación

inalámbrica de la siguiente generación capaz de soportar servicios multimedia integrados con diferentes requerimientos de calidad de servicios. Para realizar esto, varios aspectos claves en el diseño de los subsistemas de la red fija ATM y red inalámbrica necesitan ser vueltos a tratar en el ámbito de Wireless ATM. Uno de los subsistemas claves es el desarrollo de un apropiado protocolo de control de acceso al medio (MAC), el cual debe tener la capacidad de extender la multiplexación estadística de las redes fijas ATM en el medio inalámbrico.

De allí nace el objetivo principal de la tesis, proponer un protocolo de control de acceso al medio que permita a los terminales inalámbricos acceder a los recursos brindados por las redes ATM por cable con la misma calidad de servicio ofrecidos a los terminales fijos.

El campo de los sistemas inalámbricos es muy amplio, y ciertamente Wireless ATM no es la excepción. Para realizar un estudio adecuado de un determinado asunto, se debe seleccionar un reducido pero razonable ámbito de dicho estudio.

La tesis asume que el lector está familiarizado con ATM y por lo tanto no discute con profundidad los fundamentos de ATM, aunque se describen algunos conceptos que se consideran importantes recordar por estar muy relacionados con el estudio de los protocolos MAC para Wireless ATM. Para un estudio más detallado de los aspectos de la tecnología ATM se puede recurrir a literatura especializada [3].

Los aspectos de los sistemas Wireless ATM podrían ser aproximadamente divididos en los aspectos de *red* y *radio*. El enfoque de la

tesis está centrado en los aspectos de red de Wireless ATM, y dentro de este, en el Nivel 2 de la estructura OSI. Aunque el protocolo MAC guarda mucha relación con las características del Nivel Físico y Nivel de Red elegido, no se realiza un estudio profundo de los mismos, solo se delinearán aquellas características más importantes que influyen en el diseño del protocolo MAC propuesto.

Desde hace varios años diversas compañías y proyectos han desarrollado infraestructuras basadas en prototipos para implementar la tecnología Wireless ATM. De estos, tres prototipos importantes fueron desarrollados en Lucent ([4], [5]), NEC [6], y el proyecto Magic WAND [7] del programa de investigación ACTS en Europa. Para unir las diferentes investigaciones realizadas sobre Wireless ATM, en 1996 se formó en el ATM Forum el grupo de trabajo de Wireless ATM. Este grupo tiene entre sus objetivos definir un estándar para las comunicaciones inalámbricas de banda ancha usando tecnología ATM. La investigación en este campo continúa y por el momento ninguna organización internacional en telecomunicaciones, como ITU o ATM Forum, ha lanzado estándar alguno.

La tesis tiene la siguiente estructura:

En el Capítulo I se describen las razones por las cuales surge la necesidad de ofrecer comunicación en banda ancha a los terminales móviles. De entre las propuestas ofrecidas para satisfacer esta necesidad del usuario, se fundamenta las bondades que ofrece Wireless ATM. A continuación se realiza un breve estudio de las principales características que debe cumplir un protocolo MAC para Wireless ATM.

En general casi todos los aspectos de ATM están relacionados con Wireless ATM, en este capítulo se resaltan especialmente aquellos relacionados directamente con el control de tráfico, asignación de recursos y las categorías de servicios que brinda ATM.

Las fuentes de tráfico son aquellas que generan la información a ser transportada de un extremo a otro de la red. Debido a que la tecnología ATM brinda servicios en función del tipo de tráfico que genera la fuente, en este capítulo también se describe las características de los principales tipos de tráfico y los requisitos de calidad de servicio que exigen.

Debido que al final, la evaluación del protocolo MAC propuesto será realizada observando el desempeño del mismo ante los diferentes tipos de tráfico, al final del Capítulo I se describen los principales modelos para generar dichas fuentes de tráfico. Previamente, se realiza una breve introducción al modelado de tráfico y posteriormente se presentan los criterios que determinaron la elección de los modelos de tráfico utilizados en la presente tesis.

Como todo protocolo MAC está enclavado en el Capa 2 de la estructura OSI, el propuesto para Wireless ATM también se encuentra dentro de la Capa de Enlace de Datos y por lo tanto guarda relación con las capas adyacentes: Físico y Red. Por ello al principio del Capítulo II, se plantean algunas consideraciones en la Capa Física que se deben tener en cuenta para el diseño del protocolo MAC. También se describen las principales características de la Capa de Red dentro del cual se desarrolla el

protocolo propuesto, basada en una propuesta denominada "Arbol de Conexiones Virtuales".

A continuación se realiza el estudio del protocolo MAC propuesto, se describe las características del protocolo y se analiza el diseño de sus principales parámetros.

Para evaluar el desempeño del protocolo MAC propuesto se realiza la simulación del mismo. Para ello se utiliza una herramienta de simulación denominada BONES DESIGNER, construyéndose dentro de la misma bloques de simulación en función de los modelos de tráfico seleccionados y las características de protocolo MAC propuesto. Una descripción de los principales bloques de la simulación se describe en el Capítulo III.

Obtenidos los resultados de la simulación, en el Capítulo IV se realiza un análisis de los mismos. Se muestran las curvas de desempeño del protocolo ante los diferentes tipos de tráfico y se realizan comparaciones con las curvas de desempeño de otro protocolo MAC para Wireless ATM propuesto por Dipankar Raychaudhuri.

Finalmente, se delinear las conclusiones y recomendaciones que surgen del presente trabajo.

Adicionalmente, se incluye el Anexo A en el cual se describe brevemente las diferentes herramientas de simulación y en especial el BONES DESIGNER; así como también el Anexo B en el cual se muestran todos los bloques utilizados para modelar el protocolo MAC propuesto.

Para finalizar, deseo agradecer a las personas e instituciones que lograron un mayor desarrollo académico, científico y profesional en mi

persona; al Ph.D. Luis Muñoz y Ms.C. Marta García, integrantes del Grupo de Investigación en Ingeniería Telemática (GIT) del Departamento de Ingeniería de Comunicaciones de la Universidad de Cantabria (España).

CAPÍTULO I FUNDAMENTOS DE LA TECNOLOGÍA WIRELESS ATM

En los últimos años, un considerable interés ha comenzado a centrarse en el proceso de extender los servicios que ofrecen las redes fijas ATM al medio inalámbrico. Esta extensión ha sido motivada por la creciente producción de aplicaciones de computación/telecomunicación para terminales móviles y portátiles en los mercados del negocio y el consumidor. Dicha extensión también proporcionará a estos terminales un acceso global a cualquier otra aplicación en cualquier lugar. La Figura 1 muestra un diagrama de red ilustrando el concepto de red ATM fija/inalámbrica.

Wireless ATM combina las principales ventajas de las redes inalámbricas y de las redes fijas ATM. De las redes inalámbricas aprovecha la libertad de movimiento que se puede dar a los usuarios finales ya que no dependen de conexiones fijas. De las redes fijas ATM utiliza la capacidad de asignar de manera flexible el ancho de banda a cada tipo de tráfico (multiplexación estadística) y la calidad de servicios garantizado. Dichas calidades de servicio no son soportadas en las redes de área local (LAN) inalámbricas que actualmente existen, las cuales fueron diseñadas principalmente teniendo en mente el tráfico de datos LAN convencional. Diversos estándares, tales como IEEE 802.11, han sido diseñados para

proporcionar acceso inalámbrico a redes LAN corporativas, pero no incorporan tecnología ATM sobre la interfaz aire.

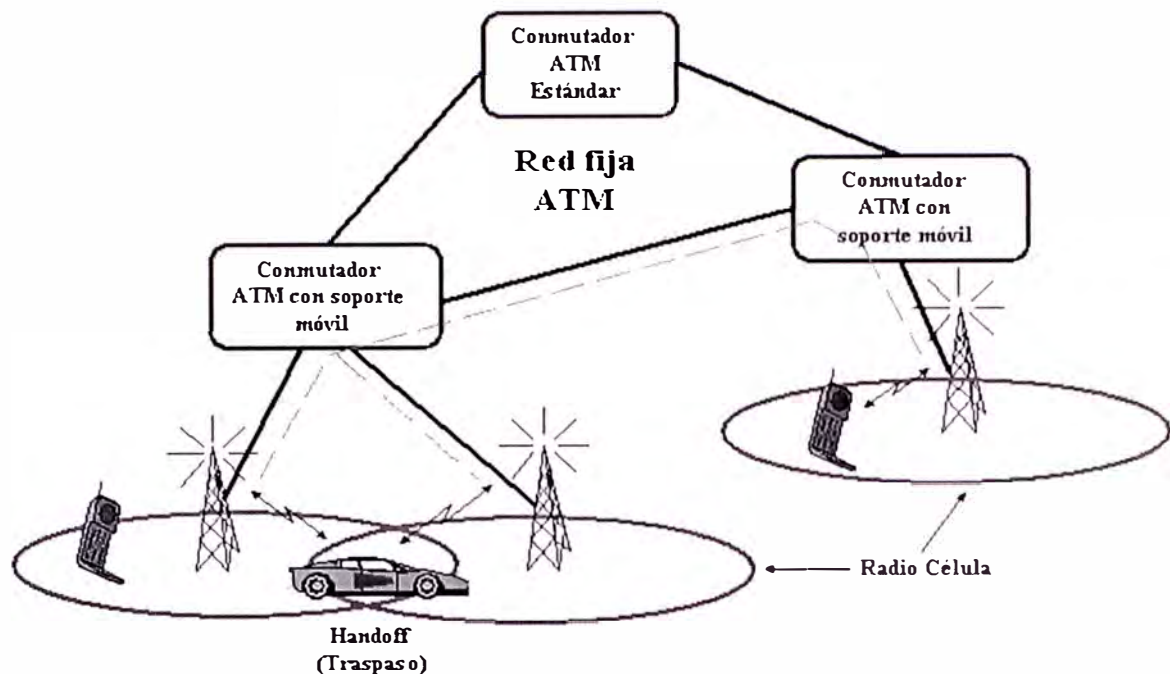


Figura 1 Concepto de Red ATM fija/inalámbrica

Una reacción típica al concepto Wireless ATM es para preguntar acerca de la compatibilidad entre los diversos aspectos de la pila de protocolos (protocol stack) ATM y el medio inalámbrico. Primero, ya que ATM fue diseñado para un medio que tenga un bajo BER (alrededor de 10^{-10}), es cuestionable si ATM trabajará adecuadamente en el medio inalámbrico caracterizado por ser un ambiente muy ruidoso y variable con el tiempo. Segundo, el medio inalámbrico tiene recursos limitados y costosos en términos de ancho de banda, en donde ATM fue diseñado para un ambiente rico en ancho de banda. Ante tales situaciones el diseño del protocolo MAC juega un papel fundamental debido a que tiene que cubrir las deficiencias del ambiente inalámbrico. Para el primer punto, el presente

trabajo plantea el uso de antenas adaptativas (ver Sección 2.1.2), mientras que para el segundo punto se plantea el uso de TDMA con asignación según demanda (ver Sección 1.2.2) como técnica de acceso al medio el cual permitirá realizar un uso eficiente de los recursos radioeléctricos debido a la característica de multiplexación estadística de ATM.

Por otra parte, debemos tener en cuenta que el envío de celdas ATM por el medio inalámbrico introducirá un *overhead* adicional al que ya viene incorporado según el formato de la celda ATM (ver Sección 1.3.1). La cabecera de la celda ATM (5 bytes) representa un 10% de overhead respecto al tamaño de la celda ATM (53 bytes); dicho porcentaje de overhead se incrementará debido a que el medio inalámbrico requiere que su propia pila de protocolos de control añada información, lo que al final implica una reducción en la eficiencia del ancho de banda del canal inalámbrico. El incremento desmesurado de este overhead es altamente indeseable en tales medios costosos, y mantenerlo a un mínimo es un reto de la investigación. Existen propuestas que plantean extraer la cabecera de múltiples celdas ATM en la estación base (BS) y su envío simultáneo en un solo paquete por el medio inalámbrico. Dichas propuestas implican mayor complejidad y cálculo computacional en la estación base, lo cual se plasmaría en mayores retardos en la transmisión de los paquetes.

Para reducir la complejidad del puente entre las redes fijas y las inalámbricas así como el tiempo de procesamiento, es muy importante que una red Wireless ATM esté diseñada de tal forma que proporcione una conectividad transparente con la red fija ATM. A esta característica de

integración se denomina *seemless internetworking*, el cual se realiza implementando en el terminal móvil (MT) una pila de protocolos que permitan transmitir las celdas ATM a través del medio inalámbrico sin involucrar a los protocolos del Nivel de Adaptación ATM (AAL). La Figura 2 muestra la pila de protocolos involucrados en el proceso de integrar a los terminales móviles dentro de una red fija ATM.

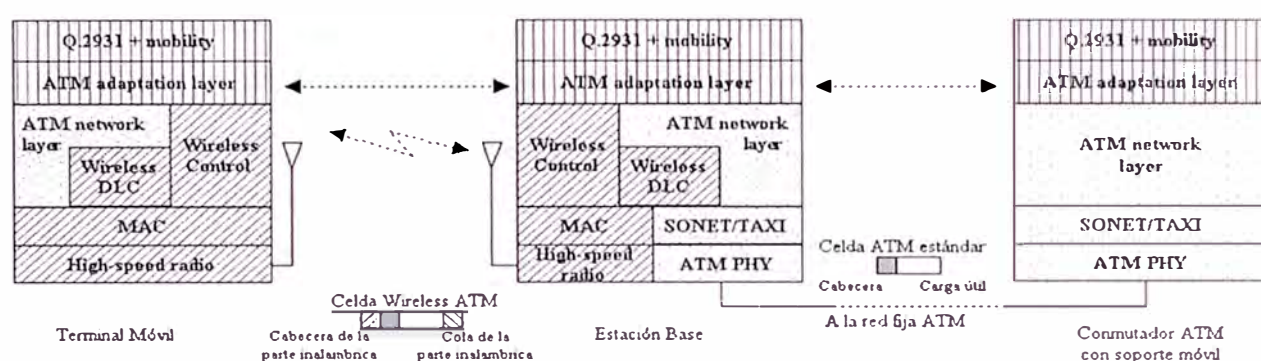


Figura 2 Pila de protocolos para la integración de la red ATM fija/inalámbrica

La estación base proporciona la puerta para que la red fija ATM acceda a la red ATM inalámbrica (Wireless ATM). Hay dos escenarios para el papel que desempeña la estación base en la red Wireless ATM. El primer escenario involucra los protocolos que permiten la movilidad y gestión del tráfico hasta el Nivel AAL, como muestra la Figura 2. El segundo escenario está relacionado con los protocolos que permiten la transmisión de las celdas ATM de un lado a otro de la red fija e inalámbrica. En el segundo escenario propuesto, la estación base no realiza ninguna de las funciones del Nivel AAL. Ésta es otra de las ventajas de la técnica *seemless internetworking*.

Puesto que las conexiones ATM de banda ancha serán extendidas sobre los enlaces inalámbricos, el desempeño de extremo a extremo de una conexión será determinada principalmente por el desempeño sobre el enlace inalámbrico. Cuando se añade las posibilidades de comunicación inalámbrica dentro del desarrollo de la tecnología ATM se introduce dos aspectos principales: las denominadas extensiones del protocolo e innovaciones del protocolo. Las innovaciones del protocolo son los nuevos planteamientos que se tienen que hacer en la pila de protocolos para que permitan a los terminales móviles compartir un medio de transmisión no fiable como es el inalámbrico. Dichas innovaciones pueden ser descompuestas en varios componentes claves del diseño: nivel físico radio de alta velocidad (PHY), control de acceso al medio (MAC), control de enlace de datos (DLC), y administración del recurso radio. Las extensiones del protocolo son las modificaciones que se tienen que hacer a la pila de protocolos para poder dar, por ejemplo, movilidad al terminal. Dichas extensiones pueden ser descompuestas en varios componentes claves del diseño: movilidad del terminal, control de *handoff*, administración de la localización, control de enrutamiento y calidad de servicio.

1.1. ¿Por qué Wireless ATM?

Si deseamos especificar las razones por las que Wireless ATM está siendo planteado de manera preferente como solución para las comunicaciones inalámbricas multimedia podemos identificar una serie de aspectos de índole tecnológico y de mercado así como también desde el

punto de vista del usuario. En esta sección presentamos brevemente algunos de los aspectos más relevantes.

Un aspecto clave, que conduce a soluciones inalámbricas más avanzadas, es la rápida sofisticación de los servicios y aplicaciones de telecomunicación para el usuario final. En ninguna parte esta tendencia se hace notar con más claridad que en World Wide Web (WWW). En solo unos años, la WWW ha transformado Internet de tener un aspecto “no amigable” y solo para “profesionales”, basado esencialmente en caracteres, a una auténtica explosión de toda clase de servicios multimedia, fácilmente accesible por millones de usuarios técnicos y no técnicos. Como consecuencia del éxito de la WWW, los fabricantes y operadores de tecnología inalámbrica están intentando desesperadamente subirse al exitoso tren de los servicios multimedia. Tal tendencia, una vez empezada, es imposible de detener ya que los usuarios que han llegado a usar el cómodo y vistoso WWW, nunca estarán satisfechos con algo menor.

De la mano con la introducción de los servicios multimedia van el desarrollo de *plataformas portátiles para usuarios finales con capacidad multimedia*. Los ordenadores laptop de hoy ya pueden ser equipados con una completa capacidad multimedia, incluyendo soporte de sonido y vídeo. Aun el más pequeño, como los equipos hand-held (a menudo referido como organizador personal o Personal Digital Assistants, PDA) lucen muchas características multimedia. Esto llega a ser una buena razón para asumir que al menos muchos clientes de las futuras redes inalámbricas accederán a

ellos usando equipos que son muy portátiles pero también tienen altas capacidades multimedia.

Finalmente, estamos frente al surgimiento de ATM. Aunque otras tecnologías de red han ascendido rápidamente, desde los laboratorios de investigación a los titulares de las revistas de redes y de allí a las conferencias de marketing ofrecidas por los proveedores de red, ATM tiene sus ventajas. El mercado no tiene suficiente experiencia para promocionar de manera real las ventajas de ATM. Sin embargo, la ausencia de un serio competidor y el rápido descenso del costo de los equipos ATM asegurarán que ATM juegue un papel importante en las redes de telecomunicación de las siguientes décadas. No obstante, algunos aspectos necesitan ser encaminados por los diseñadores de redes móviles y esto es posible puesto que ATM tiene un número de características intrínsecas que permiten crear nuevas oportunidades a los diseñadores de sistemas inalámbricos. Entre los diversos beneficios que ofrece la tecnología ATM a las comunicaciones inalámbricas podemos resaltar el soporte que ofrece ATM a toda clase de tráfico (voz, vídeo y datos), el hecho de que ATM será usada tanto en entornos públicos como privados y la capacidad que tiene ATM para soportar diferentes velocidades de transmisión.

Aunque ATM muestre grandes promesas como la infraestructura tecnológica a elegir para las redes inalámbricas, existen sin embargo un número de áreas en donde el desarrollo de ATM ha sido menos óptimo. ATM es una tecnología de alta velocidad pero no es

simple. Conforme fue progresando el trabajo de estandarización y desarrollo se llegó a la conclusión que ATM sería una tecnología altamente compleja debido a la expectativa de soportar todo tipo de servicios.

Por lo tanto, es obvio que el proceso de desarrollo y estandarización de ATM no afrontará fácilmente la carga adicional que resulta de introducir movilidad. Por otra parte, investigaciones como la presente tesis, pretenden proponer diversas soluciones a las implícitas limitaciones de extender la tecnología ATM al entorno inalámbrico, entre ellas la ausencia de soporte de movilidad.

1.2. Protocolos MAC para Wireless ATM

1.2.1. Introducción

Un protocolo MAC es un conjunto de reglas para controlar el acceso a un medio de comunicación compartido entre varios usuarios, en nuestro caso este medio de comunicación es el inalámbrico. Estos usuarios, en el contexto de la red de comunicación inalámbrica, están conformados por los usuarios activos, aquellos que ya están dentro de la radio-célula (usuarios locales), por los usuarios que han pasado de radio-células vecinas (handoff), y por los nuevos usuarios que solicitan acceso a la radio-célula.

Para Wireless ATM, el protocolo MAC definido debe proporcionar soporte para los servicios ATM como se define en los estándares ATM existentes, esto incluye a las clases de tráfico CBR, VBR, ABR, y UBR (ver Sección 1.3.3). Por lo tanto, el protocolo MAC definido debe expandir la multiplexación estadística de los multiplexores ATM al escenario inalámbrico

de una manera diferente a la división rígida del sistema celular digital de conmutación de circuitos de segunda generación, junto con la forma de soportar movilidad y mantener la calidad de servicio adecuada.

Todo protocolo MAC está relacionado íntimamente con la técnica de acceso múltiple que se utilice. Estas técnicas son necesarias para que los usuarios puedan compartir los costosos y escasos recursos radioeléctricos. En la práctica un protocolo MAC utiliza una combinación de las técnicas acceso múltiple básicos FDMA, TDMA y CDMA. En FDMA, el ancho de banda disponible se divide en radiocanales, cada uno de los cuales se asigna de manera permanente a un usuario mientras dura la comunicación. En TDMA, se asigna todo el ancho de banda (asociado a una portadora) a cada usuario durante una fracción de tiempo (ranuras de tiempo; en la literatura inglesa se denomina *time slot*). De esta forma, se multiplexan las diferentes conexiones en el tiempo agrupándolas en secuencias periódicas denominadas tramas. En CDMA, todo el ancho de banda es asignado a cada usuario los cuales pueden transmitir simultáneamente y de manera continuada. La distinción entre las señales de cada usuario se realiza asignándoles distintos códigos digitales.

En redes Wireless ATM, la escasez de frecuencias disponibles y los requerimientos de asignación dinámica de ancho de banda, especialmente para conexiones de tasa binaria variable (VBR), hacen que el uso de FDMA sea ineficiente. Por otra parte, CDMA tiene varias ventajas tales como retardo de acceso al canal casi cero, eficiencia en el ancho de banda, y excelente multiplexación estadística. Sin embargo, sufre de significativos

inconvenientes tales como limitaciones en la velocidad de transmisión, problemas de control de potencia, y complejidad de la estación base. Estos problemas, especialmente la limitación en la velocidad de transmisión, han hecho inapropiado el uso de CDMA en las redes Wireless ATM. Por consiguiente, muchos protocolos en esta área usan un esquema TDMA.

La técnica TDMA define como recurso a compartir cada ranura de tiempo de una trama determinada. La asignación de dichos recursos puede ser clasificada en tres categorías:

- Asignación fija
- Acceso aleatorio
- Asignación por demanda

Asignación fija

Las técnicas de asignación fija reservan permanentemente una ranura para cada conexión durante toda su duración, desempeñándose muy bien para conexiones con tasa binaria constante en términos de calidad de servicio y eficiencia del canal. Sin embargo, su desempeño disminuye dramáticamente cuando es necesario que soporten varios usuarios con conexiones en la que transmiten de manera esporádica y con tasa variable o tráfico a ráfagas, siendo en este caso más eficiente la técnica de asignación aleatoria.

Asignación aleatoria

Las técnicas de acceso aleatorio hacen uso de un recurso durante cortos períodos de tiempo, en forma aleatoria. Si dos o más usuarios envían

su información simultáneamente sobre un mismo recurso ocurre una colisión, y los paquetes que han colisionado son retransmitidos después de un retardo aleatorio. El esquema ALOHA ranurado es un ejemplo típico de esta técnica. Es muy conocido que, aunque los protocolos tipo ALOHA son fáciles de implementar y presentan retardos mínimos sobre carga ligera, sufren grandes retardos e inestabilidad sobre fuerte carga de tráfico.

Asignación por demanda

En esta técnica se exige a los usuarios que proporcionen información explícita o implícita respecto a sus necesidades de ancho de banda (para TDMA implica un mayor o menor número de ranuras por lo que también se denomina TDMA Dinámico), el cual será asignado según su demanda. Por lo tanto, para usuarios con requerimientos de tráfico VBR el ancho de banda será asignado de acuerdo a la longitud de la ráfaga. Cada vez que el usuario VBR ingresa en el período de inactividad, el ancho de banda será asignado a otro usuario. A diferencia de la asignación fija, los esquemas de asignación por demanda minimizan el desperdicio de ancho de banda asignando ancho de banda de acuerdo a la demanda solicitada. También, a diferencia de la asignación aleatoria, los protocolos de asignación por demanda evitan el desperdicio de ancho de banda debido a la colisión proporcionando a las conexiones con un ancho de banda libre de contención durante los períodos de actividad. Debido a esas características, los protocolos MAC basados en asignación según demanda son los más apropiados para los requerimientos de Wireless ATM.

Un protocolo de asignación por demanda es dividido en dos fases: reservación y transmisión. En la fase de reservación, los usuarios solicitan al sistema la porción de ancho de banda requerida para sus necesidades de transmisión, y el sistema responde reservando el ancho de banda e informando al usuario acerca de su solicitud, mientras que en la segunda fase se realiza la transmisión de la información. Los protocolos de asignación por demanda son usualmente complejos, pero se desempeñan bien sobre un amplio rango de condiciones, aunque la fase de reservación resulte en consumo de tiempo y ancho de banda.

1.2.2. Características Generales de los Protocolos de Asignación por Demanda

En vista que los protocolos MAC con técnicas de asignación según demanda son los más adecuados para los requerimientos de Wireless ATM, en esta sección se describe con más detalle un modelo de protocolo genérico que utiliza este tipo de técnica.

En general, en los protocolos de asignación por demanda el ancho de banda del canal es ranurado en el tiempo, en forma similar a TDMA, y está representado por una o varias tramas, dependiendo de la velocidad del canal y el tipo y velocidad de las aplicaciones. Cada trama está dividida en períodos de Enlace Ascendente, comunicaciones desde el terminal móvil a la estación base, y Enlace Descendente, comunicaciones desde la estación base al terminal móvil, cada una de las cuales es además dividida en dos subperíodos. El tráfico descendente puede ser transmitido en un canal separado (usando una banda de frecuencia diferente) mediante la técnica

dúplex por división de frecuencia (FDD), o compartir un solo canal en una única trama junto con el tráfico ascendente usando la técnica dúplex por división de tiempo (TDD). El último proporciona mejor flexibilidad en controlar el ancho de banda disponible asignando dinámicamente la longitud de cada período. La Figura 3 muestra la asignación del ancho de banda del canal bajo la forma TDD.

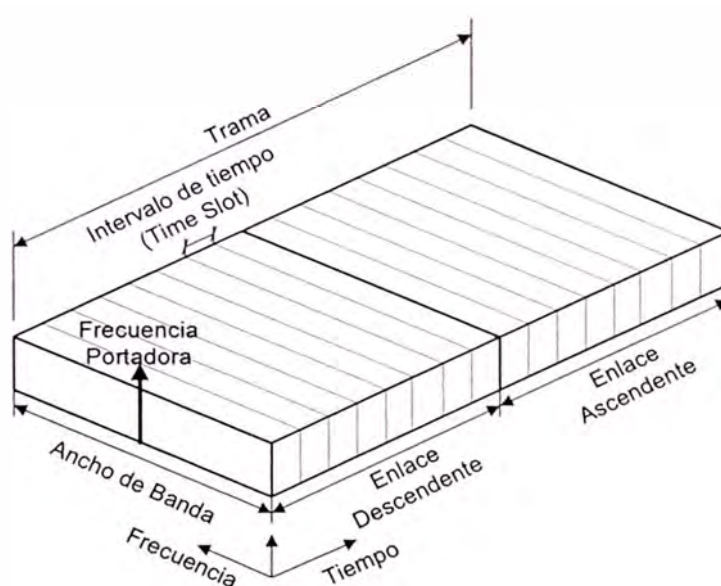


Figura 3 Estructura de una trama TDMA/TDD

Cada período de una trama se divide a su vez en dos subperíodos como se muestra en la Figura 4. El enlace ascendente es subdividido en dos subperíodos: Solicitud de Acceso y Transmisión de Datos Ascendente. En el subperíodo de Solicitud de Acceso, los usuarios transmiten sus paquetes de petición a la estación base solicitando la asignación de ancho de banda. La estación base identifica los usuarios cuyos paquetes de petición no han sufrido una colisión y posteriormente les asignará el ancho de banda, si está disponible, en el subperíodo Transmisión de Datos Ascendente.

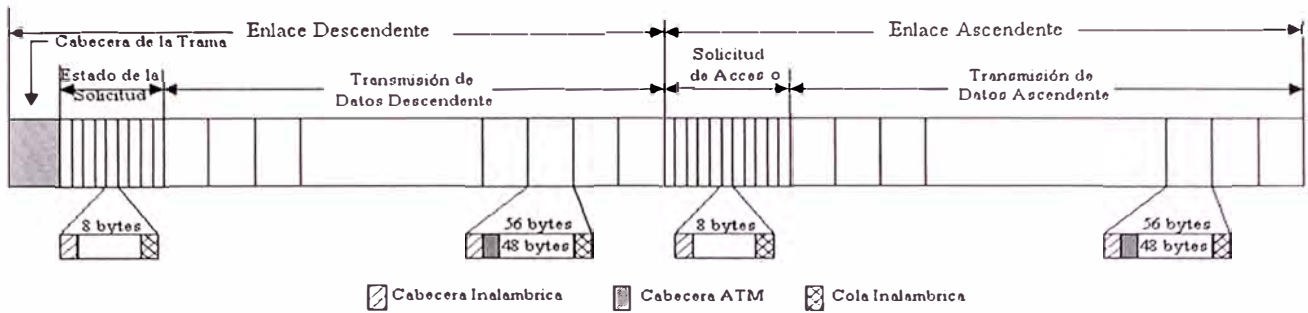


Figura 4 Asignación de ancho de banda según TDD

El enlace descendente es subdividido en dos subperíodos: Estado de la Solicitud y Transmisión de Datos Descendente. En el subperíodo Estado de la Solicitud, la estación base envía a los terminales móviles que han tenido éxito en su petición, un paquete de confirmación indicando la posición del recurso asignado. En el subperíodo Transmisión de Datos Descendente, la estación base transmite datos a los terminales móviles destinos. La longitud de cada subperíodo es determinada por el diseñador del protocolo. Es válido mencionar que los paquetes de peticiones y de confirmación son mucho más pequeños que los paquetes de datos enviados durante los subperíodos de Transmisión de Datos; por lo tanto, dichos intervalos de tiempo son denominados como *minislots*. También, los paquetes de peticiones y de confirmación pueden que no tengan el mismo tamaño. Esto depende de qué clase de información necesita ser enviado en cada caso.

Las transmisiones descendentes son gobernadas por la estación base y generalmente soportan una multiplexación por división de tiempo (TDM) libre de contención en modo *broadcast*. Ya que un canal TDM puede ser operado con una alta eficiencia (cerca del 80% o más) y bajo retardo, el canal descendente no es un punto crítico en el desempeño del sistema.

El dividir el enlace ascendente en dos subperíodos es debido a las diferentes funciones que cumple cada subperíodo, pero también es debido a los diferentes esquemas de acceso múltiple que pueden implementar. Tener en mente que aquí consideramos que el número de terminales cubierto por la estación base es mucho más grande que los canales disponibles. Sin embargo, no todos los terminales están activos simultáneamente. Por lo tanto el esquema MAC usado en el subperíodo Solicitud de Acceso puede ser aleatorio, tal como ALOHA y sus versiones. Por otra parte, un esquema TDMA según demanda o CDMA puede ser usado en los subperíodos de Transmisión de Datos. Aunque hay una gran controversia en la comunidad de investigadores de protocolos MAC para Wireless ATM acerca de cual esquema es mejor, hay una gran aceptación por el momento que hace a TDMA el más favorable.

En general, los protocolos de asignación por demanda proporcionan una mayor utilización del canal que los esquemas de asignación fija y asignación aleatoria. Sin embargo, a causa de la frecuente asignación de ancho de banda habrá un *overhead* (ver Anexo C) debido al retardo de acceso al canal (tiempo de espera) y el intercambio de señales de control el cual podría llevar a ineficiencia. El retardo de acceso al canal está constituido por dos tipos de retardo: de acceso del paquete y de acceso a la conexión. El retardo de acceso del paquete es el tiempo requerido para que los paquetes de peticiones y los paquetes de datos logren acceder al canal (ver Figura 5). El retardo de acceso a la conexión sucede en el subperíodo

Solicitud de Acceso debido a las colisiones y tendrá un impacto significativo en las solicitudes de retransmisión.

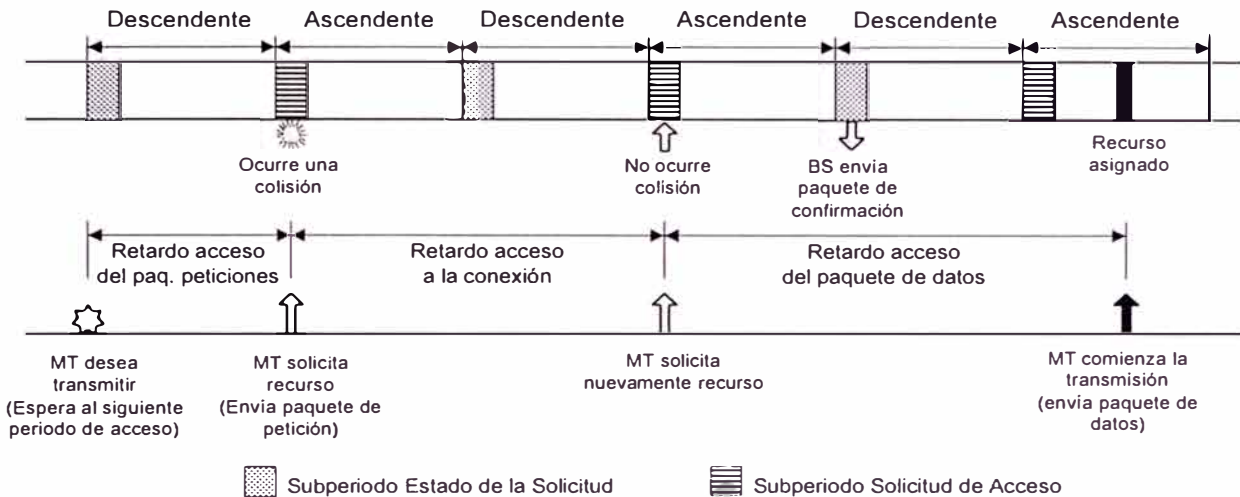


Figura 5 Retardos en TDMA

El retardo de acceso del paquete es el más serio debido a que aplicaciones VBR, ABR y UBR presentan períodos de actividad e inactividad. Al ingresar en un período de inactividad pierden su conexión y deben realizar una nueva solicitud de acceso para reanudar su transmisión al retornar a un nuevo período de actividad. El retardo de acceso del paquete es experimentado en el subperíodo Transmisión de Datos, por tanto, tiene un gran impacto en la longitud de la cola (*buffer*) del terminal móvil. Si la longitud de la cola es demasiado pequeña para contener los paquetes acumulados por el retardo de acceso se producirá el desborde de la cola con la consiguiente pérdida de paquetes. Si por el contrario la longitud de la cola es excesivamente grande se acumularán paquetes con un retardo de transmisión cada vez mayor, lo que influirá negativamente en la calidad de

servicio. Éste problema afecta directamente a los servicios activos real-time VBR, mientras que para los servicios activos non-real-time VBR los datos podrían ser almacenados en las capas OSI superiores, por lo tanto, en este caso el retardo de acceso del paquete podría no afectar las colas de salida de los terminales.

Además, el retardo de acceso del paquete causa un incremento del *jitter* lo que implica un serio problema para una red Wireless ATM, específicamente para aplicaciones real-time VBR. Por lo tanto, cualquier protocolo MAC diseñado para la especificación de una red Wireless ATM debe proporcionar algoritmos eficientes para superar estos problemas.

1.2.3. Principales Protocolos MAC Propuestos

En años recientes se han propuesto una diversidad de protocolos de acceso múltiple para las redes inalámbricas integradas, bien para una simple integración entre voz y datos o para una red Wireless ATM. Ellos tienen un amplio rango de diferentes configuraciones; sin embargo, dándoles una mirada de cerca uno encuentra que caen dentro de la configuración previamente descrita. Todos ellos tienen alguna clase de mecanismo para los subperíodos Solicitud de Acceso, Estado de la Solicitud, y Transmisión de Datos Ascendente y Descendente. En general, los protocolos MAC propuestos hasta la fecha se pueden clasificar según la técnica dúplex que utilizan (FDD o TDD).

Protocolos MAC basados en FDD

La técnica FDD utiliza dos canales por estación base, uno para el enlace ascendente y otra para el enlace descendente. Usualmente, el enlace ascendente es usado por los terminales móviles para enviar solicitudes y paquetes de información, de acuerdo a algún algoritmo de contención y reserva, mientras que el enlace descendente es usado por la estación base en un modo programado, para el envío del estado de las solicitudes y también paquetes de información. Debido a la disponibilidad de estos dos canales, es posible tener una respuesta casi inmediata (dependiendo de la distancia y la tasa binaria) desde la estación base a fin de saber en el terminal móvil si la solicitud fue exitosa o ha ocurrido una colisión.

Los protocolos MAC propuestos más representativos que utilizan la técnica FDD son:

- Distributed Queuing Request Update Multiple Access (DQ-RUMA) [8]
- Packet Reservation Multiple Access with Dynamic Allocation (PRMA/DA) [9]
- Dynamic TDMA with Piggybacked Reservation (DTDMA/PR) [10]

Protocolos MAC basados en TDD

Estos protocolos solo usan una frecuencia portadora para comunicar ambos enlaces ascendente y descendente. Estos permiten ahorrar más hardware en los terminales móviles ya que tanto el transmisor como el receptor operan a la misma frecuencia, pero generalmente añaden un retardo extra debido a la rotación entre los modos de transmisión y recepción.

Los protocolos MAC propuestos más representativos que utilizan la técnica TDD son:

- Mobile Access Scheme Based on Contention and Reservation for ATM (MASCARA) [11]
- Packet Reservation Multiple Access with Adaptive Time-Division Duplex (PRMA/ATDD) [12]
- Dynamic TDMA with Time-Division Duplex Protocol (DTDMA/TDD) [13]

1.2.4. Ventajas y Desventajas de TDD vs. FDD

Al parecer los protocolos basados en FDD pueden manejar en forma más rápida los procedimientos de acceso al canal en modo de contención. Sin embargo, el uso de una sola portadora de frecuencia (como en los protocolos que usan TDD) puede ser ventajoso en algunas situaciones donde las frecuencias son escasas.

Cuando se considera el ruido, el desvanecimiento, y las características de alta interferencia de muchos ambientes inalámbricos, es muy importante contemplar un método para una rápida resolución de colisiones en la etapa de acceso aleatorio. En este contexto es conveniente el uso de pequeños slots (minislots) para los canales de acceso aleatorio tal que las colisiones no produzcan una significativa degradación del throughput (ver Anexo C).

También puede ser conveniente manejar los paquetes que indican el estado de las solicitudes de acceso (desde la estación base a los terminales móviles) en base a slot por slot. Esto significa que la resolución de las colisiones y la definición del ancho de banda asignado a cada terminal móvil

debe ser realizado dentro del mismo período en el que se realiza las solicitudes de acceso. Para los protocolos donde la estación base envía el resultado del procedimiento de contención en base a trama por trama, los terminales móviles involucrados en un proceso de acceso aleatorio tienen que esperar hasta la siguiente trama para conocer el resultado del proceso de contención; después (en caso de falla) ellos pueden intentar otro acceso. Esto puede representar un desgaste de ancho de banda, especialmente en situaciones de tráfico medio (donde pueden quedar algunos slots libres). También puede representar un desgaste de tiempo, el cual puede ser crítico en el caso de que un terminal móvil justo realice un traspaso entre radio-células (handoff) y esté usando un servicio sensible al retardo como CBR (o VBR).

El manejo de los paquetes que indican el estado de las solicitudes en base a slot por slot es más fácil de implementar en un sistema FDD que en un TDD, lo cual puede indicar una ventaja de FDD sobre TDD. Sin embargo, esta ventaja debe ser evaluada contra la desventaja de que FDD requiere dos portadoras de frecuencia.

Una ventaja de TDD sobre FDD es que cuando el tráfico del enlace descendente es más grande que el tráfico del enlace ascendente, TDD usa el ancho de banda en forma más eficiente mediante la asignación de un número mayor de slots a la subtrama correspondiente al enlace descendente. El tráfico en el enlace descendente puede ser más grande que el tráfico en el enlace ascendente cuando varios terminales móviles están descargando grandes archivos o recibiendo vídeo según demanda.

También es importante considerar las restricciones de calidad de servicio que presentan los diferentes servicios ATM (CBR, VBR, ABR, y UBR). Ello implica que se debe dar mayor importancia a determinados tipos de tráfico según el servicio ATM que les han sido asignado. Esto desde el punto de vista del protocolo MAC puede ser reflejado en la asignación de diferentes prioridades a los paquetes de solicitud en los algoritmos de resolución de colisión.

Finalmente, una evaluación más realista del rendimiento de un protocolo MAC propuesto necesitaría tomar en cuenta las perturbaciones específicas del canal RF. Para compensar parcialmente esas perturbaciones, alguna forma de corrección de error como FEC debería ser usada, al menos en las señales de control y acceso.

1.3. Conceptos sobre ATM

ATM puede ser considerado como una tecnología de conmutación de paquetes de alta velocidad con unas características particulares:

- Los paquetes son pequeños y de tamaño constante (53 bytes) denominados celdas ATM.
- Es una tecnología de naturaleza conmutada y orientada a la conexión.
- Los nodos que componen la red no tienen mecanismos para el control de errores o control de flujo.
- Las cabeceras de las celdas ATM tienen una funcionalidad limitada.

Simplificando al máximo, podemos ver que una red ATM está compuesta por nodos de conmutación, elementos de transmisión y equipos terminales de usuarios. La información empaquetada en celdas ATM son

encaminadas por los nodos a través de unos caminos conocidos como *Conexiones de Canal Virtual*. El enrutamiento de las celdas ATM en los nodo de conmutación es un proceso hardware, mientras que el establecimiento de conexiones y el empaquetamiento/desempaquetamiento de las celdas ATM son procesos software.

Bajo un punto de vista basado exclusivamente en la transmisión, ATM se puede dividir en tres niveles que se combinan de forma jerárquica de modo que cada capa superior puede tener uno o varios de los elementos inferiores (ver Figura 6).

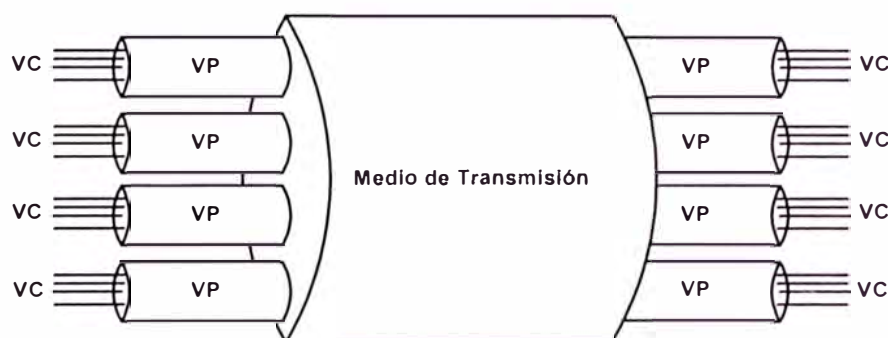


Figura 6 Estructura de la transmisión ATM

Canal Virtual (*Virtual Channel – VC*), se llama así a la conexión unidireccional entre usuarios. Es importante resaltar la unidireccionalidad: si dos usuarios quisieran estar conectados en *Full-Duplex* deberán utilizar dos canales. Los VC, además de transportar datos entre usuarios, también son utilizados para transportar la señalización y la gestión de la red.

- **Ruta Virtual** (*Virtual Path – VP*), se trata del conjunto de canales virtuales que atraviesan multiplexadamente un tramo de la red ATM. Los VP

facilitan la conmutación de los canales virtuales pues conectan tramos enteros de la red ATM. De no existir los VP, por cada conexión entre usuarios se tendría que reelaborar todas las tablas de enrutamiento de los nodos atravesados, lo cual supondría un incremento del tiempo necesario para establecer una conexión y la posterior conmutación de las celdas ATM.

- **Sección Física** (*Physical Section – PS*), conecta y proporciona continuidad digital entre los diferentes elementos que componen la red controlando el flujo de bits. Debe mantener en óptimas condiciones las señales físicas, eléctricas u ópticas, regenerándolas cuando resultan afectadas por atenuaciones, ruido o distorsiones.

1.3.1. Modelo de Referencia ATM

Bajo una perspectiva arquitectónica, ATM se divide en tres niveles que ocupan las capas 1 y parte de la 2 del modelo de referencia OSI. Estos niveles son Nivel AAL, Nivel ATM y Nivel Físico (ver Figura 7).

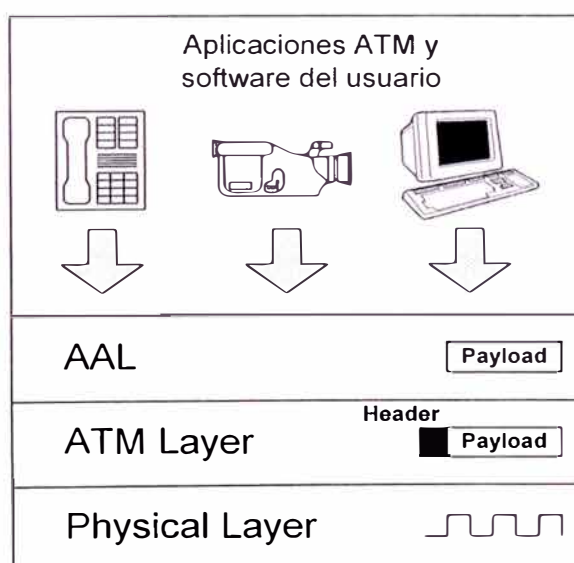


Figura 7 Arquitectura ATM

Nivel de Adaptación ATM (ATM Adaptation Layer – AAL)

Es el responsable de las relaciones con el mundo externo y por esta razón el nivel AAL sólo se encuentra en los nodos terminales. Su misión es la de aceptar la información adaptando los niveles superiores de comunicación no ATM a los formatos ATM. Internamente el AAL se divide en dos partes:

El subnivel de convergencia (CS), es la capa más externa y ejecuta funciones como la detección y demultiplexión de datos, detección de celdas ATM perdidas y mantenimiento del sincronismo de la conexión.

- **El subnivel de segmentación y reensamblado (SAR)**, esta capa segmenta los datos en celdas ATM y las envía al nivel ATM para que les ponga la cabecera. El proceso inverso se realiza al lado opuesto cuando recibe las celdas ATM y reconstruye la información original.

El Nivel AAL proporciona una gran variedad de servicios que se clasifican según tres parámetros que relacionan origen y destino: sincronización, velocidad y modo de conexión. Dependiendo de la combinación de estos parámetros, el ITU-T (Recomendación I.371) ha definido cuatro clases de servicios:

- **Clase A:** Servicio con conexión, proporciona una velocidad de acceso constante y una relación sincronizada entre los usuarios; en otras palabras, es un servicio que emula las prestaciones de un circuito. Un tráfico de este tipo es el generado por la telefonía sin comprimir.
- **Clase B:** Servicio con conexión, permite velocidades de tráfico variable, por lo que resulta adecuado para aplicaciones en tiempo real que

necesitan una sincronización aunque no una velocidad constante. La transmisión de la señal de vídeo comprimido utiliza este servicio.

- **Clase C:** También proporciona una velocidad de acceso variable pero no basada en el tiempo, por lo que resulta apropiado para datos insensibles al retardo. La distribución de software podría ser una aplicación que hiciera uso de este servicio.
- **Clase D:** Servicio sin conexión equivalente al modo datagrama de las redes de paquetes. Acepta tramas que contienen la suficiente información de direccionamiento para llegar a su destino sin necesidad de establecimiento de una conexión previa. La interconexión de LAN está basada para utilizar este servicio.

Las diferentes clases de servicios enumerados anteriormente están ligadas a un conjunto de tipos de AAL como se indica en la Tabla 1. Algunos también consideran la ALL-0, que es precisamente la ausencia de AAL y que permite acceder a las celdas ATM directamente.

Clases	Sincronización	Velocidad	Modo de conexión
A: AAL-1	Requerida	Constante	Orientado a la conexión
B: AAL-2	Requerida	Variable	Orientado a la conexión
C: AAL-3/4	No requerida	Variable	Orientado a la conexión
D: AAL-5	No requerida	Variable	Sin conexión

Tabla 1 Parámetros de las clases de servicio

Nivel ATM (ATM Layer)

Este nivel es el núcleo principal sobre el que se desarrolla la tecnología ATM. Sus funciones son fundamentales y comunes a cualquier nodo, y se encargan de la manipulación de las celdas ATM mediante la ejecución de los siguientes procesos:

- Construcción o extracción de cabeceras
- Enrutamiento entre los nodos
- Multiplexión y demultiplexión de las celdas ATM

Las celdas ATM son estructuras de datos de 53 bytes compuestas por dos campos:

- **Cabecera** (Header), sus 5 bytes tienen tres funciones principales: identificación del canal, información para la detección de errores y si la celda es o no utilizada.
- **Carga útil** (Payload), tiene 48 bytes fundamentalmente con datos del usuario y protocolos AAL que también son considerados como datos del usuario.

Dos de los conceptos más significativos de ATM, canales virtuales y rutas virtuales, están materializados en dos identificadores en la cabecera de cada celda: VCI (Virtual Channel Identifier) y VPI (Virtual Path Identifier). Ambos identificadores determinan el enrutamiento entre nodos.

Los conmutadores de VP modifican los identificadores de VPI para redirigir las rutas de entrada hacia una salida específica. Un conmutador de VP no analiza ni modifica el campo VCI, ya que al operar en un nivel inferior conmuta todos los canales asociados a dicha ruta. Los conmutadores de VC

aplican un mayor nivel de complejidad, ya que manejan atributos como nivel de errores, calidad de servicio, ancho de banda o servicios relacionados con la tarificación. Las tablas de enrutamiento de cada nodo pueden estar ya predefinidas, o bien deben construirse dinámicamente durante el tiempo de establecimiento de las conexiones realizadas mediante el protocolo ITU-T Q.2931.

1.3.2. Aspectos de Gestión de Tráfico

La red es el único recurso común el cual tiene que ser compartido por varios servicios y conexiones cada quien con diferentes características. La tasa binaria requerida por esas conexiones puede variar desde algunos Kbps hasta Mbps. Algunos servicios tienen restricciones de tiempo real más fuertes que otros; algunos servicios pueden tolerar la pérdida de algunas celdas ATM, otros no. Sin embargo, ATM promete soportar todos estos diferentes requerimientos dentro de la misma red. Con tal red todas las conexiones pueden impactar en cada una de las otras. Por lo tanto, es tarea del control de tráfico limitar estos efectos y alcanzar dos objetivos principales:

- Proporcionar niveles de calidad de servicio específicos y garantizados.
- Usar eficientemente los recursos disponibles de la red.

Para proporcionar el rendimiento deseado, una red ATM tendrá que proporcionar un conjunto de capacidades de control de tráfico y control de congestión. La recomendación ITU-T I.371 identifica todas esas capacidades de las cuales solo estudiaremos brevemente el Control de Admisión de la Conexión por estar más relacionada a los objetivos de esta tesis.

Control de Admisión de la Conexión (CAC)

El control de admisión de la llamada o conexión (una llamada es una asociación establecida entre usuarios para utilizar las capacidades de la red y puede tener cero o más conexiones) se refiere a un conjunto de acciones realizados por la red durante la fase de establecimiento de la llamada (o durante la fase de renegociación de la llamada) para decidir si una conexión VC/VP puede ser aceptada (admitida) o no. Las condiciones generales para la admisión de la conexión son:

- La conexión es aceptada solo cuando están disponibles suficientes recursos de la red para establecer la conexión desde un nodo terminal al otro con la calidad de servicio exigida por la conexión.
- La admisión de dicha conexión (la cual es nueva) no debe afectar la calidad de servicio de ninguna de las conexiones existentes.

El CAC es realizado teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

- Parámetros de tráfico, los cuales describen las características inherentes de la fuente. Estos parámetros son:

Peak Cell Rate (PCR)

Minimum Cell Rate (MCR)

Maximum Burst Size (MBS)

Sustainable Cell Rate (SCR)

- Descriptores de tráfico, los cuales identifican la calidad de servicio requerida. Estos son:

Cell Transfer Delay (CTD)

Cell Delay Variation (CDV)

Cell Loss Rate (CLR)

Al final el CAC establece una clase de “contrato de tráfico” entre el nodo terminal y la red, lo que determinará la aplicación de diferentes configuraciones en la red. Para realizar esto se especifican diferentes tipos de tráfico, o categorías de servicio como lo define ATM Forum, a los cuales se les aplicará diferentes algoritmos CAC. Dichas categorías de servicio son: CBR, rt-VBR, nrt-VBR, ABR y UBR, las cuales se describen a continuación.

1.3.3. Categorías de Servicio ATM

Constant Bit Rate (CBR)

La categoría de servicio CBR es usada por conexiones que requieren una cantidad constante de ancho de banda. Se caracteriza por un valor PCR que es fijo durante todo el tiempo de vida de la conexión. Aunque este tipo de tráfico especifique un valor fijo de PCR, una fuente CBR puede emitir celdas ATM hasta el valor PCR o por debajo de ella y para cualquier duración, o también podría estar en silencio.

Esta categoría es deseable para aplicaciones de tiempo real, es decir, aquellos que requieran muy fuertes limitaciones de CTD y CDV, aunque no está limitado solo a esas aplicaciones. Sería apropiado para aplicaciones de voz y vídeo, así como para servicios de emulación de circuitos.

El compromiso básico hecho por la red es que una vez que la conexión es establecida, la calidad de servicio negociada es asegurada para todas las celdas ATM. Se asume que aquellas celdas ATM que son retardadas más allá del valor especificado por CTD pueden ser de un valor menos significativo para la aplicación.

Real-Time Variable Bit Rate (rt-VBR)

La categoría de servicio real-time VBR es deseable para aplicaciones sensibles al tiempo, es decir, aquellas que exigen muy fuertes limitaciones en el retardo y variaciones del retardo (jitter), siendo apropiado para aplicaciones de voz y vídeo con tales características. Las fuentes VBR transmiten a velocidades que varían mucho con el tiempo.

Los parámetros de tráfico son PCR, SCR y MBS. Las celdas ATM cuyos retardos van más allá del valor especificado por CTD se asumen que son de un valor menos significativo para la aplicación. Los servicios Real-time VBR pueden soportar multiplexación estadística de fuentes de tiempo real.

Non-Real-Time Variable Bit Rate (nrt-VBR)

La categoría de servicio non-real-time VBR es deseable para aplicaciones que tienen características de tráfico por ráfagas y no tienen fuertes limitaciones en el retardo y variaciones del retardo. Al igual que para rt-VBR, los parámetros de tráfico son PCR, SCR y MBS. Para aquellas celdas ATM que son transferidas dentro del tráfico contratado, la aplicación espera un bajo valor de CLR. Para todas las celdas ATM, se espera un límite en el CTD. Los servicios nrt-VBR pueden soportar multiplexación estadística de conexiones.

Available Bit Rate (ABR)

Este tipo de tráfico es deseable para fuentes que tienen la habilidad de reducir o incrementar su velocidad de información si la red requiere que así lo hagan. Esto les permite explotar los cambios en las características de

transferencia del Nivel ATM, es decir, disponibilidad de ancho de banda, después de haberse realizado el establecimiento de la conexión.

Se sabe que hay muchas aplicaciones que tienen vagos requerimientos para su rendimiento. Ellos pueden ser expresados como un rango de valores aceptables, es decir, un máximo y un mínimo, en lugar de un valor promedio (que es típico de la categoría VBR). Para reunir este requerimiento durante el establecimiento de una conexión ABR, el sistema deberá especificar un máximo y un mínimo ancho de banda a utilizar. Eso es especificado mediante los valores de PCR y MCR (el valor de MCR puede ser especificado como cero), respectivamente. El ancho de banda que pone a disposición la red, el cual es variable, es la suma del MCR y una tasa de celda variable. Este último resulta de compartir la capacidad disponible entre todas las conexiones ABR activas a través de una política definida e imparcial. Se especifica un mecanismo de control de flujo para soportar varios tipos de realimentación para controlar la velocidad de la fuente.

Aunque ningún parámetro de calidad de servicio específico es negociado con ABR, se espera que el sistema adapte su tráfico de acuerdo con la realimentación para que experimente un bajo CLR y logre compartir de manera justa el ancho de banda disponible de acuerdo a la política de asignación específica de la red. El CDV no es controlado en este servicio. El servicio ABR no es deseable para soportar aplicaciones en tiempo real.

Unspecified Bit Rate (UBR)

UBR es una categoría de servicio "del mejor esfuerzo" deseable para aplicaciones no críticas, los cuales no requieren muy fuertes limitaciones de

retardo y variaciones de retardo, ni una calidad de servicio específica. Las fuentes UBR transmiten ráfagas no continuas de celdas ATM. El servicio UBR soporta un alto grado de multiplexación estadística entre las fuentes.

El servicio UBR no especifica ningún tipo de garantía. Específicamente, UBR no incluye la noción de negociación de ancho de banda por conexión. No hay ningún compromiso numérico tanto para CLR como para CTD en una conexión UBR.

1.4. Caracterización de Fuentes en Redes ATM

Se espera que las redes ATM soporten un conjunto diverso de aplicaciones con un amplio rango de características. Desafortunadamente, por el momento, no hay medidas detalladas que permitan a los diseñadores indicar satisfactoriamente las características de los diversos tipos de aplicaciones ATM de una manera exacta.

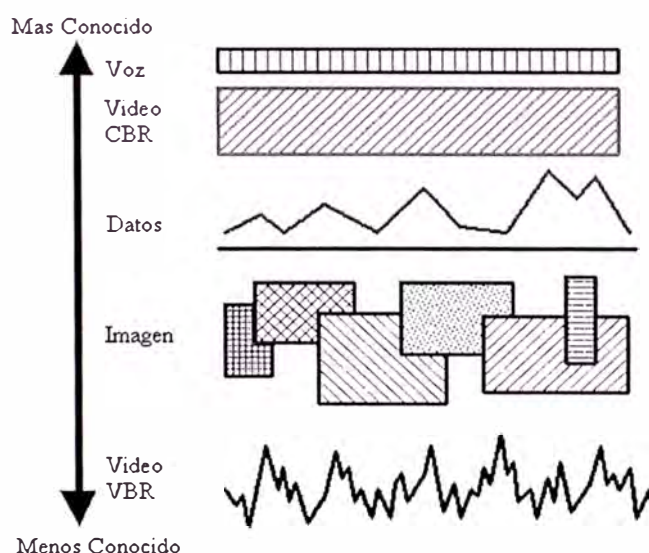


Figura 8 Nivel de conocimiento actual de los diferentes tipos de tráfico

La Figura 8 ilustra una idea de las características de tráfico de los diferentes tipos de aplicaciones. En esta sección se presentan las

características más importantes de las fuentes de tráfico clasificados en base a los servicios ATM [14].

1.4.1. Servicios CBR

El servicio CBR genera tráfico a una tasa constante y puede ser descrito por su tasa pico, por lo tanto, el nivel de rafageo (burstiness, ver Anexo C) de una fuente CBR es igual a uno, y la fuente está activa durante la duración de la conexión (en los períodos de silencio también se transmite a la velocidad pico). Ejemplos típicos de servicios CBR incluyen voz, vídeo y audio, con requerimientos de ancho de banda dados como referencia en la Tabla 2.

Servicio	Ancho de Banda (Kbps)
Telefonía	64, 32, o 16
Audio de alta calidad	1,400
Fax grupo III	14.4
Fax grupo IV	64

Tabla 2 Requerimientos de ancho de banda de algunos servicios CBR

En las redes ATM la voz CBR es transmitida utilizando AAL tipo 1 mediante la técnica PCM (Pulse Code Modulation). La recomendación ITU-T G.711 especifica las características de codificación de voz CBR a 64 Kbps. Muchas redes privadas, PBXs y multiplexores usan técnicas de codificación más eficientes, y requieren solo 16 o 32 Kbps, como la técnica DPCM (Differential PCM) especificada en la recomendación ITU-T G.728. Por lo tanto, técnicas de codificación eficientes pueden ser usadas para comprimir

voz de 3.4 kHz en ancho de banda a valores más bajos que 64 Kbps sin reducir la calidad de la voz.

Las técnicas actuales para la transmisión de audio y vídeo confían en la codificación CBR debido principalmente a la existencia de redes de datos que no permiten la asignación de ancho de banda variable.

Conceptualmente, audio CBR no es diferente que voz. Las principales diferencias entre las dos aplicaciones son que el audio requiere más niveles de cuantificación y que son muestreadas a velocidades más altas. De allí su necesidad de requerimientos más exigentes.

Criterios de Desempeño

a) Pérdidas de Información

El oído humano es tolerante a cortos errores intermitentes en la voz que pueden ser causados por errores de bits producidos en los medios de transmisión. Estos aparecen a los oyentes como "clicks" en la comunicación o como "cortes" (*clipping*) de voz. En el transporte de voz sobre ATM, a mayor compresión de la señal más significativo es el efecto de los bits errados o la pérdida de celdas ATM. Por otra parte, "clicks" y "cortes" son menos aceptados cuando el oyente se ha suscrito a un servicio mejorado.

Sin embargo, los receptores de los servicios de voz son más tolerantes a la pérdida de información que en el caso, por ejemplo, de transmisión de datos entre ordenadores. Unos esporádicos bits errados en los servicios de voz implican "clicks" en el receptor aunque el mensaje de voz en general es reconocible, mientras que en los servicios de transmisión de datos los bits errados impedirían reconstruir la información transmitida.

De allí que en los servicios de transmisión de datos se exige una tasa de pérdida de información aproximadamente cero. Por lo tanto, se puede concluir que los servicios de voz son, en general, tolerantes al error o la pérdida de celdas ATM a un grado que depende del servicio individual y el esquema de codificación.

b) Retardo

Los servicios de voz son intolerantes a los retardos ya que un retardo del orden de 100 a 200 ms dificulta el flujo de la conversación entre la persona que habla y la que responde. Estándares internacionales especifican requerimientos de retardos extremo a extremo para servicios de voz con valores menores a 100 ms, dependiendo del número de ciudades o países que atraviesa la llamada.

c) Jitter

Los servicios de audio en general son intolerantes al jitter ya que hacen difícil el reconocimiento de la voz. Esto es importante con referencia al uso de ATM para el transporte de voz, puesto que implica que el retardo de las celdas ATM en las colas de los nodos intermedios de la red deben variar de forma mínima con cada cambio en la carga de la red, o que el almacenamiento temporal (*buffering*) usado en la red periférica absorba el jitter.

1.4.2. Servicios VBR

Existen muchos tipos de fuentes que generan información a una tasa de bits variable. Para el presente estudio solo hemos considerado las

fuentes de voz VBR realizadas por codec que aprovechan las características de actividad de la voz.

Las fuentes de voz alternan entre períodos activos (*talk spurt*), típicamente promediado entre 0.4-1.2 segundos de longitud, seguido por períodos de silencio (inactivo), promediado entre 0.6-1.8 segundos de longitud [15]. En los servicios de voz CBR la transmisión se realiza tanto durante los períodos de silencio como los períodos de actividad, el cual no es una forma eficiente de usar los recursos de la red. Para alcanzar una más alta utilización del recurso, se puede usar un detector de actividad de voz en las fuentes de voz tal que los paquetes de voz solo sean generados cuando la fuente está activa, de esta forma, se incrementa la eficiencia de transmisión.

Criterios de Desempeño

En general el tráfico de voz VBR cumple los mismos criterios de desempeño especificados para voz CBR. En la Tabla 3 [16] y Tabla 4 [17] se muestra valores de retardo y jitter para algunas características de tráfico B-ISDN.

Aplicación	Retardo (ms)	Variación (ms)
64 Kbps videoconferencia	300	130
1.5 Mbps MPEG NTSC vídeo	5	6.5
20 Mbps HDTV vídeo	0.8	1
16 Kbps voz comprimida	30	130
256 Kbps MPEG voz	7	9.1

Tabla 3 Retardo y Variación del Retardo para servicios de audio y vídeo

Categoría de Servicio	Rango del ancho de banda	Tipo de tráfico	Tolerancia a la pérdida de celdas ATM	Tolerancia al retardo de celdas ATM
Voz PCM	64 Kbps	CBR	10-4 a 10-6	10-150 ms
Voz ADPCM	32 Kbps	CBR	10-4 a 10-7	10-150 ms
Voz con codificación predictiva	16 Kbps	VBR	10-6 a 10-8	10-150 ms
Videoconferencia	128 Kbps - 14 Mbps	CBR/VBR	10-9	150-350 ms

Tabla 4 Características de varios tipos de tráfico

1.4.3. Servicios ABR y UBR

Existe la necesidad de que ATM soporte el gran legado de aplicaciones de datos existentes, en el cual TCP es ampliamente usado como protocolo de transporte. En redes ATM, tanto los servicios ABR o UBR pueden ser usados para soportar tráfico de datos.

El servicio UBR está diseñado para aquellas aplicaciones de datos que desean usar cualquier capacidad sobrante y no es sensible a la pérdida de paquetes y al retardo. Tales conexiones no son rechazadas en base a la escasez de ancho de banda (es decir, no hay control de admisión de la conexión) y no hay política para el comportamiento de su uso. Durante la congestión, se pueden perder celdas ATM pero no se espera que las fuentes reduzcan su tasa de celdas ATM. En su lugar, esas aplicaciones pueden tener su propio mecanismo de recuperación y retransmisión de celdas ATM

perdidas a un nivel más alto, tales como el control de flujo por ventanas empleado por TCP.

Aunque actualmente los estándares para el servicio ABR no requieren que se garantice CTD y CLR, es deseable para los conmutadores minimizar estos valores tanto como sea posible. Dependiendo del estado de congestión de la red, se solicita a la fuente controlar su tasa de transmisión. Se permite a los usuarios declarar un MCR, el cual es garantizado a la conexión virtual por la red. Muchas conexiones virtuales solicitarán una MCR de cero, ya que aquellas con MCR más altos se les pueden denegar conexión sino está disponible el ancho de banda suficiente.

La tecnología ATM ha sido diseñada para proporcionar un servicio a nivel de transporte a lo largo de toda la conexión, así, estrictamente hablando, no hay necesidad de tener TCP o IP si la ruta entera desde la fuente al destino es ATM. Sin embargo, en el futuro previsible este escenario será muy raro. Un escenario más común sería aquel donde solo parte de la ruta es ATM. En este caso, TCP es necesario para proporcionar funciones de transporte extremo a extremo (es decir, control de flujo, retransmisión), y las redes ATM son usadas simplemente como "tuberías de bits".

Estudios realizados en [18] y [19] demuestran que el uso de TCP sobre ABR ofrece buen desempeño en términos de escalabilidad, utilización del enlace, y relativamente pequeño requerimiento de buffer en comparación con UBR. A pesar de ello, estudios como [20] predicen que el throughput potencial de TCP/IP sobre ATM es tan bajo como 34%. La razón para afirmar esto se basa en la diferencia entre la unidad de transmisión para la

red ATM, una celda de 53 bytes, y el paquete TCP/IP el cual es mucho más grande. Aun si solo se perdiera una celda de un paquete TCP/IP, el paquete entero sería retransmitido.

Criterios de Desempeño

a) Pérdida de Información

Todos los servicios de datos en general son altamente sensibles a la pérdida de información y el uso de ATM introduce pérdidas de información debido a la posibilidad de desbordamiento del buffer. Por lo tanto se deben implementar técnicas de retransmisión de paquetes ya sea en el nivel AAL y/o en los protocolos de las capas OSI 3 y 4 de los equipos del usuario final.

b) Retardo

Los servicios de datos con usuarios humanos en un extremo requieren un retardo extremo a extremo menor de 2 segundos, un retardo en LAN para el cual muchos usuarios están acostumbrados (por ejemplo, con una aplicación telnet). Muchos usuarios esperan una comunicación "transparente" de la información, independiente de donde esté localizado. Los requerimientos de retardo extremo a extremo de 2 segundos corresponden a un tiempo de transferencia de red de 1 segundo después de los retardos en los equipos del usuario.

Cuando no hay usuario humano involucrado, la transferencia de datos entre máquinas puede ser más tolerante a los retardos (por ejemplo, en una aplicación FTP). La principal limitación en este caso es el mecanismo de *timeout* en los protocolos de transporte de alto nivel. Cuando un paquete es enviado, se solicita un acuse de recibo dentro de un cierto período de

tiempo. Si no es recibido, la máquina origen asume que el paquete se ha perdido y lo retransmite. Si el retardo en la recepción del acuse de recibo es debido a la congestión de la red más que a la pérdida de paquetes, entonces el proceso de retransmisión solo servirá para agravar la congestión. Una solución para este problema es ajustar la configuración de los parámetros de *timeout* en los protocolos de comunicaciones.

c) Jitter

El tráfico de datos es insensible al jitter. La variabilidad del retardo entre paquetes usualmente no es notoria para el usuario, particularmente cuando ellos están involucrados con la transmisión de un archivo entero consistente de varios paquetes.

1.5. Modelado de Fuentes de Tráfico ATM

1.5.1. Introducción

Durante las dos primeras décadas del siglo XX nació una de las ramas más antiguas de la ingeniería, el *teletráfico*, de mano del ingeniero danés A. K. Erlang y sus sistemas de cola. Esto permitió caracterizar las llamadas telefónicas desde el punto de vista de su duración y aparición en el tiempo mediante distribuciones estadísticas, definiendo parámetros como tasa de llegada, duración media, hora cargada, etcétera. El estudio estadístico de las llamadas telefónicas como una secuencia de eventos aleatorios fue motivada por la necesidad de proporcionar suficientes recursos para obtener una cierta calidad del servicio telefónico, el cual, aparte de la calidad de la voz, afectaba principalmente a la probabilidad de bloqueo y al retardo en el establecimiento de la llamada. Debido a que se

comprobó empíricamente que la llegada de llamadas seguía un comportamiento similar al de un proceso de Poisson, se utilizaron modelos de colas relativamente simples para explotar su característica de sistema sin memoria. Así, la ingeniería de teletráfico se estableció como una herramienta cotidiana a través de las conocidas tablas de Erlang y las fórmulas Engset [21].

Sin embargo, con la aparición de los ordenadores en los años 60, así como los equipos de comunicación basados en éstos, surgió una nueva clase de problema en un campo que en ese momento no estaba directamente relacionado con las telecomunicaciones. Nuevos tópicos como los tiempos de espera en los sistemas de tiempo compartido, el almacenamiento de información en un nodo antes de su envío al siguiente nodo, el desarrollo de protocolos de acceso múltiple, etcétera, iniciaron una segunda era para la ingeniería de teletráfico. Esta rápida evolución de las comunicaciones de datos llegó a desembocar en los años 80 en redes de banda ancha con servicios integrados, es decir, transportando tráfico multimedia (voz, dato, vídeo, etc.). Actualmente, ingeniería de teletráfico está omnipresente en el campo de las redes de comunicaciones, siendo soportada por investigadores matemáticos en muchos centros académicos.

En la era telefónica, una llamada telefónica requería una cantidad fija de ancho de banda, y consecuentemente, conocer el número y la duración de las llamadas fue suficiente para determinar los recursos necesarios. Por el contrario, el tráfico multimedia se caracteriza por tener gran variabilidad en sus necesidades de ancho de banda. Por ejemplo, durante la transmisión de

una película de vídeo codificado, las necesidades de ancho de banda pueden fácilmente fluctuar por un factor de 10; las comunicaciones de datos entre terminales usualmente resultan en cortos períodos de alta actividad seguidos por largos períodos de silencio. Así, en la era multimedia, no sólo interesa el número y duración de las llamadas sino también las propiedades estadísticas del flujo de la información durante la llamada, para hacer un uso eficiente de los recursos mientras se garantiza una alta calidad de servicio.

Partiendo de resultados empíricos acerca del comportamiento del tráfico multimedia, un número de modelos han tratado de imitar sus principales rasgos. Los *modelos de fuentes* se encargan de simular el comportamiento del tráfico generado por un terminal (un ordenador transfiriendo archivos, un servidor de vídeo bajo demanda, etc.); mientras que modelos más generales deben representar el tráfico multiplexado de múltiples fuentes, denominando al conjunto total *tráfico agregado*. Estos modelos basados en procesos estocásticos, deben satisfacer dos criterios:

- Proporcionar las propiedades estadísticas relevantes del tráfico real y
- Permitir el estudio del comportamiento dentro de una red

La segunda condición significa esencialmente que uno debería ser capaz de estudiar el rendimiento, por ejemplo, de un multiplexor, modelado como un sistema de colas cuando es alimentado por dicho modelo de tráfico. Por esta razón, la teoría de colas es otro ingrediente importante en la caja de herramientas del ingeniero de tráfico.

Las técnicas de modelado incluyen: técnicas analíticas, simulación por ordenador, y experimentación que permitan capturar las características

estadísticas del tráfico real [22]. Si los modelos de tráfico no representan exactamente el tráfico real, se puede sobrestimar o subestimar el comportamiento de la red.

Si se desea profundizar sobre las técnicas de caracterización y modelado de tráfico se debe acudir a la bibliografía [23] y [24]. En esta tesis se han implementado los modelos de tráfico considerados más adecuados y que se ajustan mejor al tráfico real generado por los diversos tipos de fuentes, según los últimos estudios indicados en las referencias.

1.5.2. Modelado de Fuentes CBR

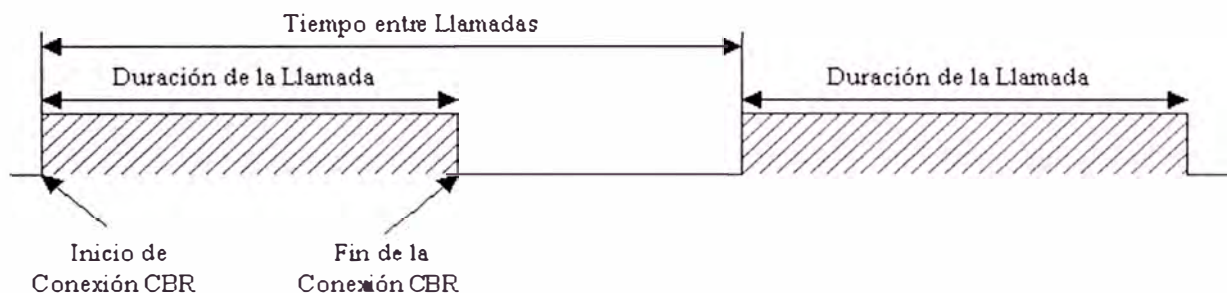


Figura 9 Modelo de fuentes CBR

Cada conexión CBR se considera asociada a una llamada telefónica en modo circuito conmutado, por lo que dicha conexión se mantiene mientras dure la llamada. Durante todo ese tiempo se genera información a una tasa binaria constante según las características del servicio CBR especificadas en la Sección 1.3.3. Por lo tanto, para modelar una fuente CBR se utilizan los modelos de tráfico telefónico ampliamente conocidos. Se consideran los eventos de inicio y finalización de las llamadas telefónicas como una variable aleatoria con distribución de Poisson. Como nuestro interés es la duración de cada llamada y el tiempo entre llamadas, utilizamos

la distribución exponencial negativa para obtener el valor de estas dos variables aleatorias.

De la función de densidad acumulada (CDF) de la distribución exponencial negativa [Ec. 1] se obtienen las expresiones para calcular el valor de las variables aleatorias que representan la duración [Ec. 3] y el tiempo entre llamadas [Ec. 4], respectivamente.

$$CDF = 1 - e^{-\lambda x} \quad [\text{Ec. 1}]$$

$$x = -\frac{1}{\lambda} \ln(1 - CDF) \quad [\text{Ec. 2}]$$

$$Duracion_de_la_Llamada = -\mu \ln[1 - U(0,1)] \quad [\text{Ec. 3}]$$

$$Tiempo_entre_Llamadas = -\frac{1}{\lambda} \ln[1 - U(0,1)] \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde $U(0,1)$ es una función generadora de números aleatorios entre 0 y 1 con distribución uniforme; μ es el valor medio de la duración de una llamada, en segundos; λ es la tasa de llegada de llamadas expresada en llamadas por segundo.

1.5.3. Modelado de Fuentes VBR y ABR

Como se ha mencionado en la Sección 1.4.2, para los servicios VBR y ABR se propone un modelado de fuentes que generan información con tasa binarias variables en el tiempo. Para ello se ha elegido el modelo de fuentes ON-OFF, el cual conmuta entre dos estados: un período activo (estado ON) cuando genera paquetes a una tasa constante y un período de inactividad (estado OFF) cuando la fuente no genera información. Tradicionalmente, los períodos ON y OFF son generados mediante variables aleatorias con distribución exponencial negativa con duraciones medias T_{ON} y T_{OFF}

respectivamente. Esto es así porque el tráfico de datos se supone modelado de la misma manera que el tráfico de voz, es decir, siguen procesos de Poisson conmutados (tales como Batch Poisson, MMPP, etc).

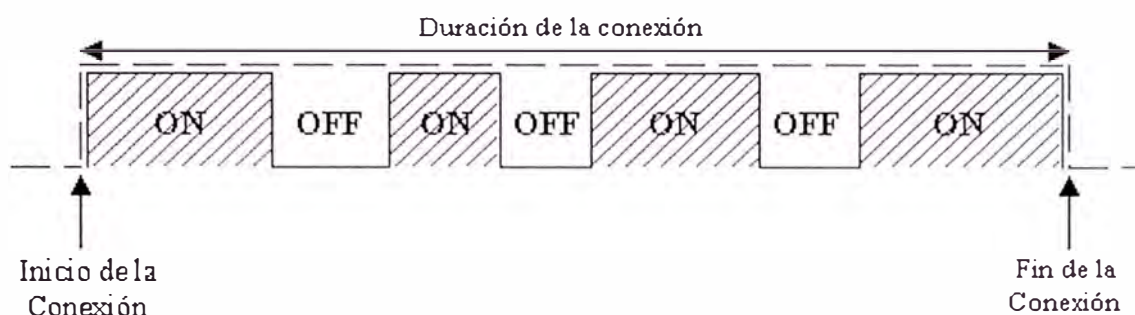


Figura 10 Modelo de fuentes VBR y ABR

Sin embargo, recientes estudios de tráfico de datos en redes de área local [25] han contribuido a mejorar más aún los modelos tradicionales sobre las características de tráfico de datos, revelando su naturaleza *autosimilar* (o característica fractal) y su dependencia a largo plazo. Medidas realizadas con tráfico de datos indican que la distribución de un mensaje es bimodal. Puesto que cada mensaje se compone de una ráfaga de paquetes, ello sugiere que la ráfaga de los paquetes pueda estar bimodalmente distribuida. Es decir, una fuentes es capaz de generar largas ráfagas de datos, como por ejemplo una transferencia de archivos, alternándolas con ráfagas cortas correspondientes a comandos. Esto ha venido a definirse como *burstiness* a través de un amplio rango de escalas de tiempo que abarcan desde los milisegundos hasta los minutos u horas. Las características de este tráfico son marcadamente diferentes de aquellos modelos usados tradicionalmente. Por ejemplo, estudios realizados en fuentes individuales de tráfico de datos

RDSI han concluido que los tiempos de mantenimiento entre ambos estados de la distribución bimodal sigue una tendencia llamada *heavy tailed* (o distribución con cola extendida). Dichas fuentes de datos pueden ser caracterizadas adecuadamente mediante distribuciones heavy tailed tal como la distribución de Pareto, cuya función de densidad acumulada es la siguiente:

$$CDF = 1 - \left(\frac{k}{x}\right)^\alpha \quad [\text{Ec. 5}]$$

Despejando se obtiene la fórmula para el cálculo de la variable aleatoria x con distribución de Pareto, en función de una variable aleatoria con distribución uniforme $U(0,1)$ que representa a CDF (la fórmula ha sido expresada en función del \log_{10} para facilitar su implementación en el programa de simulación)

$$x = \frac{k}{10^{\frac{\log[1-U(0,1)]}{\alpha}}} \quad [\text{Ec. 6}]$$

Sabemos que la media μ de la distribución de Pareto es:

$$\mu = k \frac{\alpha}{\alpha - 1} \quad [\text{Ec. 7}]$$

De aquí se obtiene la fórmula para el cálculo del parámetro k , el cual define la posición y la escala de la curva CDF .

$$k = \frac{\mu}{\left(\frac{\alpha}{\alpha - 1}\right)} \quad [\text{Ec. 8}]$$

La cola de la distribución de Pareto decae más lentamente que una distribución exponencial debido a que sigue una ley de potencia. Una

variable aleatoria con distribución de Pareto toma un valor más grande con una probabilidad más alta que una variable aleatoria distribuida exponencialmente. Cuanto mayor sea el parámetro α (parámetro de forma), más gruesa es la cola de la distribución. Además, si se cumple que $1 < \alpha < 2$ la distribución tiene varianza infinita.

Las características anteriores permiten comprender mejor el comportamiento de las fuentes individuales dando lugar a un flujo de tráfico autosimilar. La autosimilitud es cuantificada mediante el parámetro *Hurst*:

$$H = \frac{3 - \alpha}{2} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Los procesos autosimilares con $0.5 < H < 1$ son también dependientes a largo plazo. Los procesos que tengan un parámetro Hurst cercano a la unidad ($\alpha \approx 1$) se comportan principalmente a ráfagas, mientras aquellos que tengan un parámetro Hurst cercano a 0.5 ($\alpha \approx 2$) presentan características más continuas. Por lo tanto, si se desea caracterizar una fuente de tráfico de datos con alta tasa de ráfagas se podría tomar, por ejemplo, un valor de **$H=0.9$** , lo que correspondería a un valor de **$\alpha=1.2$** . Con esto, el valor del parámetro k de la distribución de Pareto sería:

$$k = \frac{\mu}{6} \quad [\text{Ec. 10}]$$

Finalmente la expresión generadora de la variable aleatoria x con distribución de Pareto tendría la siguiente forma:

$$x = \frac{\mu / 6}{10^{\frac{\log[1-U(0,1)]}{\alpha}}} \quad [\text{Ec. 11}]$$

La distribución bimodal planteada será modelada mediante una fuente ON-OFF con tiempos de actividad (ON) e inactividad (OFF) igual a variables aleatorias con distribución de Pareto. De esta forma, durante los tiempos de actividad se tienen longitudes de paquetes de varianza infinita, es decir, ráfagas pequeñas y grandes, e intervalos de inactividad también con varianza infinita, produciendo conjuntamente una alta variabilidad en la tasa de llegada de paquetes.

En éste Capítulo se han descrito las características de la tecnología Wireless ATM, poniendo énfasis en los aspectos de protocolos MAC, servicios ATM y modelado de tráfico, que serán utilizados en más adelante. En el siguiente capítulo se realizará un estudio detallado del protocolo MAC propuesto desde el punto de vista del modelo de referencia OSI.

CAPÍTULO II ESTUDIO DEL PROTOCOLO MAC PROPUESTO

En este capítulo se presenta una propuesta de protocolo MAC que, teniendo en cuenta lo estudiado en el Capítulo I, cumple con las características exigidas para transportar tráfico ATM por el medio inalámbrico manteniendo la calidad de servicio definido durante el establecimiento de llamada. Además, se plantean diferentes condicionantes que se deben tener en cuenta para el diseño del protocolo, ya que estos determinan las características del formato de la trama y su eficiencia para el transporte de información ATM.

2.1. Consideraciones de la Capa Física

Existen ciertos parámetros del sistema que son básicos y constituyen el punto de partida del diseño del protocolo. Estos son los siguientes:

- Cobertura de la estación base
- Tipo de multiplexación de los enlaces ascendentes y descendentes
- Frecuencia portadora
- Velocidad de transmisión del canal
- Velocidad de transmisión de los terminales móviles
- Tipo de modulación
- Velocidad máxima de desplazamiento de los terminales móviles.

2.1.1. Cobertura de la Estación Base

La limitación de frecuencias disponibles impone límites a la intensidad de tráfico que puede cursarse dentro de una radio-célula, por lo que para atender una demanda de tráfico determinada habrá que acotar el tamaño de la radio-célula [26]. Ello incide favorablemente en la cobertura ya que, al reducirse la distancia, disminuye la pérdida de propagación dependiente de la distancia por lo que queda un margen mayor para la penetración en interiores. Las radio-células puede clasificarse según su tamaño en:

- Macro-células: con radios comprendidos entre 1 km y 20 km para cobertura rural, carreteras y poblaciones cercanas.
- Micro-células: con radios comprendidos de 300 mt a 1 km para cobertura de ciudades con elevada densidad de tráfico y penetración en interiores de edificios.
- Pico-células: con radios comprendidos de 30 a 300 mt para coberturas localizadas en interiores: Aeropuertos, Centros comerciales, Bancos, etc.

El protocolo propuesto se diseña para trabajar en un sistema de comunicaciones móvil micro-celular y pico-celular, permitiendo de esta forma atender una mayor demanda de tráfico requerida por los terminales móviles con aplicaciones multimedia.

2.1.2. Antena Adaptativa

En un sistema de comunicaciones móviles, la señal transmitida puede llegar al receptor a través de múltiples caminos debido a la reflexión y difracción que sufre la señal al incidir en los obstáculos del entorno. Este fenómeno es conocido como *propagación multicamino*, provocando sobre la

señal recibida fluctuaciones de amplitud, fase y ángulo de llegada. La consecuencia de este fenómeno es lo que se denomina *desvanecimiento multicamino*. Los desvanecimientos pueden clasificarse en:

- Desvanecimientos a pequeña escala, o de tipo Rayleigh, cuando la propagación multicamino es producida por obstáculos próximos al terminal móvil.
- Desvanecimientos a gran escala, o de tipo Log-normal, cuando la propagación multicamino es causado por reflexiones en obstáculos lejanos al terminal móvil.

Para controlar el desvanecimiento tipo Rayleigh se utilizan técnicas de diversidad, como por ejemplo, diversidad espacial. Las antenas adaptativas (También denominadas antenas inteligentes - *Smart Antenna*) utilizan diversidad espacial para contrarrestar los efectos del desvanecimiento tipo Rayleigh. Este tipo de antenas está compuesta por un conjunto de elementos básicos, o dipolos, distribuidos geoméricamente en forma lineal, circular o rectangular (*array*). Esto permite que las antenas adaptativas operen en el dominio espacial, puesto que cada elemento del array recibe la señal por diferentes caminos de propagación. El uso de antenas adaptativas en la estación base permite reducir las perturbaciones del canal radioeléctrico que varía con el tiempo para producir, con una muy alta probabilidad, un bajo BER necesario para el transporte de celdas ATM.

Por otra parte, las antenas adaptativas logran alcanzar sus mejores prestaciones cuando la transmisión y la recepción se efectúan sobre una única frecuencia portadora, pues en este caso el canal de transmisión se

supone que es recíproco, es decir, el modelo de canal en un determinado instante es el mismo para el enlace ascendente que para el descendente. Así, los valores de los coeficientes de la antena en un sentido son los mismos (en realidad, los coeficientes en un extremo son los complejos conjugados del otro) que los valores en el sentido opuesto. Esto hace que el diseño del protocolo MAC se realice con un esquema para el enlace ascendente y descendente de tipo TDD.

La investigación de las antenas adaptativas viene realizándose desde mediados de 1980, pero su desarrollo se ha intensificado en los últimos años. En 1995, Nortel introdujo la tecnología de antenas adaptativas en sus sistemas PCS-1900. Otras compañías, tales como Metawave y ArrayComm, también han introducido dicha tecnología en sus sistemas de comunicaciones, y el proyecto TSUNAMI de la European Advanced Communications Technologies and Services (ACTS) está considerando el uso de antenas adaptativas para los sistemas inalámbricos de tercera generación. Un estudio más detallado de la tecnología de antenas adaptativas así como de sus usos prácticos en los sistemas de comunicaciones inalámbricos se puede ver en [27].

2.1.3. Frecuencia Portadora

Para controlar los efectos causados por los desvanecimientos a gran escala los sistemas de comunicaciones móviles utilizan en el receptor diferentes técnicas de ecualización. La característica que tienen en común la gran mayoría de técnicas y algoritmos de ecualización es la de disponer de una secuencia de bits conocidos tanto por la estación base como por el

terminal móvil, que insertadas en una o más partes de la trama, son utilizadas por el ecualizador del receptor para estimar la respuesta del canal en un instante temporal concreto, calculando de esta manera los coeficientes adecuados para procesar la información que se reciba posteriormente. Esta porción de bits se denomina *secuencia de entrenamiento* que junto con el campo de información posterior, forma lo que se denomina *período de ecualización* (T_{ec}). La secuencia de entrenamiento, dependiendo del sistema que se trate y del grado de hostilidad del entorno, puede variar en longitud.

El período de ecualización es dependiente de la frecuencia portadora. Para el cálculo del máximo período de ecualización se considera que las condiciones de propagación se mantienen constantes durante el tiempo que un terminal móvil, con velocidad V_T , tarda en recorrer un 10% de la longitud de onda de la señal portadora (λ), por lo que se ha de fijar el tamaño del período de ecualización a un valor inferior. Entonces el período de ecualización máximo será igual el tiempo que demora un terminal móvil recorrer la distancia de 0.1λ a la velocidad V_T , y se muestra en [Ec. 12] expresado en las unidades de medida más utilizadas para cada parámetro y que permitirán dar una idea más directa del valor asignado en la Tabla 5.

$$T_{ec(\max)}(ms) = \frac{\lambda (cm)}{V_T (Km/h)} \times 3.6 \quad [\text{Ec. 12}]$$

En la Tabla 5 se muestran los tiempos (ms) para diferentes casos de frecuencia portadora (velocidad de la luz/ λ) y velocidad del terminal.

Estos valores de tiempo limitan la duración del período de ecualización. Si cada slot de datos dentro de la trama posee una secuencia

de entrenamiento para ecualización, estos tiempos definen la duración de dicho slot en ambos sentidos de transmisión. Además, para frecuencias portadoras altas, si el tamaño del slot se reduce se ha de incrementar la velocidad de transmisión para que la cantidad de información transmitida por slot siga siendo la misma. Ambos aspectos se verán en la Sección 2.3.6

Velocidad del Terminal (Km/h)	Frecuencia portadora (GHz) / Longitud de onda (cm)			
	0.450/66.6	0.900/33.3	2.4/12.5	5.8/5.17
50	4.800	2.400	0.900	0.372
100	2.400	1.200	0.450	0.186
200	1.200	0.600	0.225	0.093

Tabla 5 Período de ecualización máximo (ms)

Por lo que parece, la elección de la frecuencia portadora es más adecuada cuanto menor sea ésta. Sin embargo, para poder proporcionar una buena calidad de servicio a una amplia población de terminales son necesarios cumplir dos requisitos importantes: disponer de un número adecuado de canales para gestionar eficazmente el reuso de frecuencias evitando interferencias indeseadas, y ofrecer una elevada velocidad de transmisión que minimice los retardos de acceso y transmisión a la vez que se asegura un ancho de banda por usuario aceptable. Ambas premisas hacen que la elección de la banda de frecuencias sea un compromiso entre las condiciones de diseño impuestas por el medio físico y por la planificación celular del sistema, además de tener en cuenta la calidad del servicio final. Por supuesto, en un sistema real, la elección de la banda de frecuencias

depende del organismo regulador que se encargue de su asignación, así como de la disponibilidad de dichas frecuencias. En este estudio, se ha elegido la banda de frecuencias de 2.4 GHz, ya que posee un compromiso entre la duración máxima de un slot de la trama TDMA, la velocidad de transmisión requerida y la degradación que el medio de transmisión inalámbrico puede producir en esa frecuencia.

2.1.4. Modulación Digital

Los sistemas de modulación empleados en comunicaciones móviles dependen de la técnica de acceso empleada. Para los sistemas con acceso TDMA, los métodos de modulación deben cumplir las siguientes características:

- Elevada eficiencia espectral (ν), definida como el cociente entre la velocidad de transmisión del sistema y la anchura de banda ocupada.
- Escasa radiación en canales adyacentes
- Envolvente constante de la señal modulada, para evitar que se produzca distorsión de la intermodulación de las etapas amplificadoras.
- Buena característica de error en cuanto a la relación portadora/ruido (C/N) y portadora/interferencia (C/I), lo que influye sobre la reutilización de las frecuencias.
- Sencillez en la implementación física de los módulos moduladores-demoduladores, que permita minimizar el tamaño de los mismos, para conseguir un adecuado tamaño y peso de los equipos.

Los sistemas de modulación que se han propuesto para comunicaciones móviles digitales son:

- GMSK ($\nu = 1.35$ bits/seg/Hz)
- GFSK ($\nu = 0.67$ bits/seg/Hz)
- $\pi/4$ -DQPSK ($\nu = 1.44$ bits/seg/Hz)

Las tres son modulaciones con envolvente constante, lo que beneficia al comportamiento del amplificador de potencia del transmisor. Aunque no todas las modulaciones cumplen con todas las características especificadas anteriormente debemos decantarnos por una de ellas. Para este estudio proponemos utilizar la modulación $\pi/4$ -DQPSK debido a que presenta una mayor eficiencia espectral y su realización es simple, aunque requiere un amplificador lineal y podría ofrecer poca eficiencia en cuanto a la potencia en la etapa de radiofrecuencia.

2.1.5. Velocidad de transmisión del Canal

La velocidad de transmisión del sistema tiene una estrecha dependencia con las características del canal y el tamaño de la trama TDMA. Cuando la velocidad de transmisión es baja, la duración de los símbolos de la secuencia digital modulada es mayor que la respuesta al impulso del canal, con lo que los efectos sobre la señal transmitida serán leves. Sin embargo, la duración de la trama será lo suficientemente elevada como para que se produzcan desvanecimientos profundos con una frecuencia relativamente alta de tramas. Por el contrario, si la velocidad de transmisión es excesiva, la respuesta del canal abarca varios símbolos de la señal transmitida, la interferencia entre símbolos producida es grande y la distorsión de la señal será difícilmente contrarrestada por los ecualizadores y las antenas adaptativas. Sin embargo, la duración de la trama será menor, y

por consiguiente los episodios de desvanecimientos afectarán a un menor porcentaje de tramas.

Aunque se tiene que tener en consideración lo planteado anteriormente, la elección de la velocidad de transmisión dependerá, finalmente, de la cantidad de información que se desee transmitir en cada trama, junto con la velocidad de transmisión de las fuentes CBR como se explicará en la Sección 2.3.3.

2.2. Consideraciones de la Capa de Red

2.2.1. Introducción

Debido principalmente a la pequeña área de cobertura de las micro/picocélulas los eventos de *handoff* en futuros sistemas microcelulares ocurrirán con mayor frecuencia en comparación con los sistemas macrocelulares de hoy, y el control de tales sistemas introducirá un nuevo conjunto de desafíos tecnológicos.

Las conexiones entre terminales móviles pueden ser contempladas como caminos o rutas a través de la red fija central (*backbone*) de banda ancha cuyo origen y destino son los radioenlaces entre los terminales móviles y la estación base. Cuando la calidad de un radioenlace entre un terminal móvil y la estación base se degrada, se debe encontrar una nueva estación base que asegure una calidad aceptable. El cambio de una estación base a otra es lo que se denomina *traspaso* (del término inglés *handoff*). Para ello, se tienen que invocar a las funciones de control y de establecimiento de llamada de la red fija e inalámbrica. En la red central, el traspaso requiere el establecimiento de una nueva ruta que transporte los

paquetes destinados al terminal móvil a la nueva estación base. Esto implica que deberán ser invocadas las funciones para el establecimiento de nuevas conexiones en los nodos ATM intermedios de la nueva ruta. Estas funciones son ejecutadas por el procesador de llamadas de cada nodo ATM el cual utiliza diversas políticas de gestión de tráfico, entre ellas CAC (ver Sección 1.3.2). Por el lado de la red inalámbrica, el procesador de llamadas de la nueva estación base debe primero asegurar que la nueva conexión inalámbrica no sobrecargue la estación base y a continuación crear un radioenlace entre el terminal móvil y la nueva estación base.

Como se puede ver, para cada evento de traspaso se deben invocar un número substancial de procesos y funciones de control tanto en la red central como en la red inalámbrica. Si tales funciones son realizadas en un modo centralizado, el procesamiento de los eventos de traspaso impondría un cuello de botella importante en la capacidad de las futuras redes microcelulares. Por estas razones, se estudian métodos de control distribuido que sean más rápidos y eficientes basados en el agrupamiento jerárquico de los recursos de la red fija e inalámbrica.

2.2.2. Árbol de Conexiones Virtuales

El concepto de *árbol de conexiones virtuales* como se describe en [28] y [29] permite reducir la carga en el procesador de llamadas de los nodos intermedios producida al establecer y encaminar una conexión, de manera que pueden ser soportados un gran número de conexiones móviles. Como se puede ver en la Figura 11, un árbol de conexiones virtuales es una colección de estaciones base, nodos intermedios de la red fija y enlaces

entre ellos. La raíz del árbol es un nodo de la red fija central y las hojas del árbol son las estaciones base. Para cada conexión con un terminal móvil, el árbol proporciona dentro de la red central un conjunto de conexiones virtuales en cada sentido estableciendo de esta manera un camino desde la raíz hacia una hoja. También, el árbol establece una conexión virtual fija desde el nodo raíz hacia un puerto de la red fija si la conexión es a un puerto fijo, o a la raíz de algún otro árbol si la conexión es a otro terminal móvil.

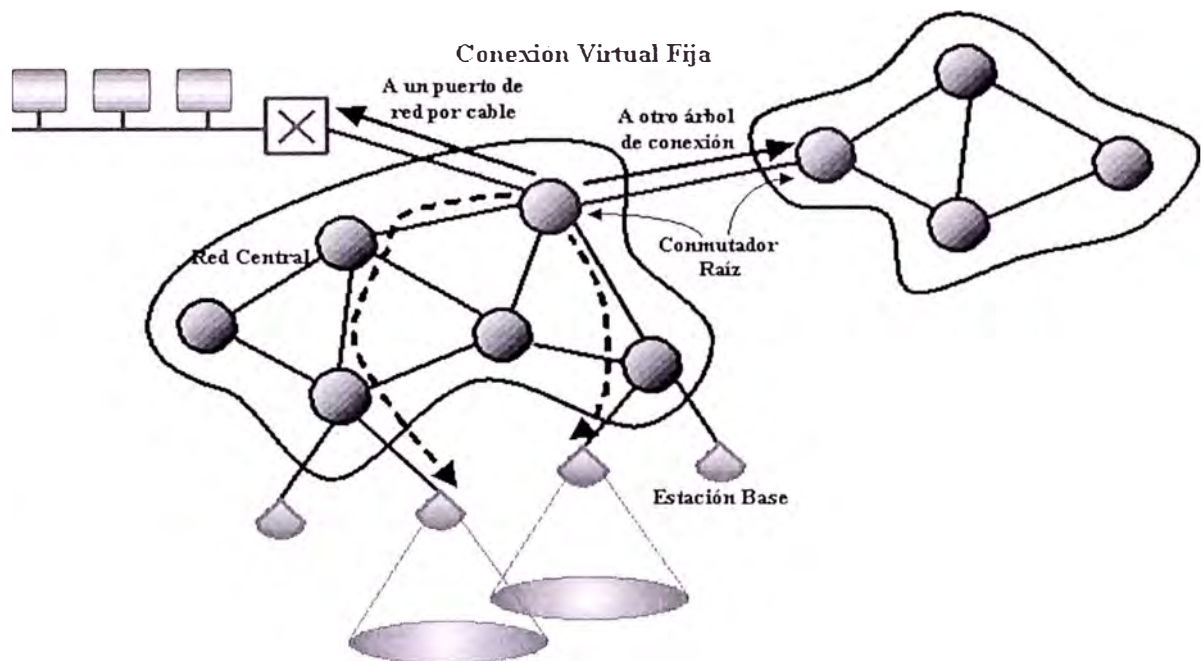


Figura 11 Árbol de conexión virtual

En el momento que una conexión a un terminal móvil es admitida en un árbol de conexiones virtuales, el procedimiento para el establecimiento de llamada es ejecutado en dos pasos. Primero, se establece la porción fija de la conexión virtual entre la raíz del árbol y un punto de la red fija, ya sea ésta un terminal de usuario fijo o la raíz de otro árbol. Esta porción fija se mantiene establecida durante todo el tiempo que el móvil se encuentre

dentro del área de cobertura del árbol de conexiones virtuales. Segundo, dentro del árbol virtual se asigna a cada nodo intermedio dos conjuntos de números denominados *números de circuito virtual (VCN)*; un conjunto es asignado a cada sentido de la conexión. Luego, se actualizan las tablas de enrutamiento de los nodos dentro del árbol para que incluyan los nuevos VCN. En cualquier momento, solo se utilizan dos conexiones virtuales (uno en cada sentido) entre la estación base elegida por el terminal móvil y la raíz del árbol.

Cuando un terminal móvil ya admitido a un árbol de conexiones virtuales desea realizar un traspaso a otra estación base dentro del mismo árbol, simplemente empieza a transmitir paquetes con el VCN asignado a la estación base elegida por el terminal móvil para el traspaso. Usando el camino preestablecido entre la nueva estación base a la raíz del árbol, los paquetes de dicho terminal móvil fluirán a la raíz, y a través de la porción fija de la red, a su destino final. De esta forma, el procesador de llamadas no es invocado en el traspaso. En dirección contraria, el primer paquete que llegue a la raíz desde un terminal móvil mostrando un nuevo VCN es interpretado apropiadamente (en hardware) como evidencia de un traspaso. Conociendo el VCN asignado para esa conexión desde la raíz del árbol a la nueva estación base, se actualiza la tabla de enrutamiento en el nodo raíz tal que los paquetes que fluyan desde la raíz a dicho terminal móvil reciban el VCN apropiado para enviar estos paquetes a la nueva estación base.

Cuando un terminal móvil alcanza los límites geográficos de un árbol virtual, se solicita admisión en un nuevo árbol. En este punto, el procesador

de llamadas de la red debe otra vez ser invocado. Sin embargo, ya que la cobertura geográfica de un árbol virtual es grande comparado con el tamaño de las radio-células que constituyen el árbol, la tasa de traspaso a nivel de árbol virtual se asume que sea aceptablemente bajo y manejable por el procesador de llamadas. Para prevenir que la conexión de un terminal móvil situado en los límites de dos árboles oscile de uno a otro, los árboles deben solaparse en el espacio, es decir, algunas estaciones base deben pertenecer a dos árboles, de manera que cuando un terminal móvil se aproxime a los límites geográficos de su árbol actual, se traspase y aparezca dentro del control del nuevo árbol sin ningún tipo de incertidumbre.

2.2.3. Implementación

Debido a que el terminal móvil cambia continuamente de estación base nuevas rutas deben ser establecidas sin requerir la intervención de un intenso cálculo computacional del procesador de llamadas. Esto se realiza por medio del árbol de conexiones virtuales. Durante el tiempo de establecimiento de la llamada se establecen las rutas desde cada estación base a la raíz del árbol, es decir, se inicializan las tablas de búsqueda de los nodos intermedios, permitiendo que las celdas ATM fluyan desde cualquier estación base a la raíz del árbol y, desde allí, a lo largo de la ruta fija hacia un puerto de la red fija o a la raíz de otro árbol.

El proceso de localizar la estación base actual que utiliza un terminal móvil, y seleccionar la ruta apropiada para que las celdas ATM fluyan desde la raíz del árbol a esa estación base, es realizado en tiempo real por una pieza especial de un equipo que se encuentra únicamente en el nodo raíz

del árbol. Una vez que la actual estación base ha sido identificada, es decir, una vez que una ruta particular fuera de las N establecidas durante el tiempo de establecimiento de la llamada conduce a la estación base seleccionada, las celdas ATM fluyen a lo largo de esa ruta por medio de tablas de búsqueda convencionales contenidas en los nodos intermedios. Mientras que los terminales móviles se desplazan dentro del área cubierta por un árbol virtual, todas las celdas ATM originadas desde un terminal móvil fluyen a través del mismo puerto de salida del nodo raíz.

La implementación del árbol de conexiones virtuales permite en general elevar a la Capa de Red y capas OSI superiores todo el control por procesos de traspaso y movilidad del terminal. Esto permite disminuir la complejidad y cálculo computacional en la Capa de Enlace de Datos dentro del cual se desarrolla el protocolo MAC.

2.2.4. Control de Admisión

Cada conexión móvil, debe invocar al CAC para determinar el acceso a cada uno de los dos conjunto de recursos de la red. Primero, la llamada debe ser admitida a la porción fija de su ruta. Esto puede ser hecho por medio de varias formas (ver por ejemplo [30] y [31]), de tal manera que la calidad de servicio que disfrutan las otras conexiones que comparten cualquier enlace de la ruta fija no sea degradada de manera inaceptable; si esto no puede ser hecho, la solicitud para la conexión debe ser rechazado. Segundo, la conexión móvil debe ser admitida al apropiado árbol de conexiones virtuales, cada uno de los cuales se ven como un único recurso colectivo de la red móvil. El Control de Admisión de las conexiones móviles a

un árbol de conexiones virtuales es obligatorio ya que, una vez admitida, los usuarios móviles pueden libremente traspasarse a cualquier estación base dentro del árbol de conexión, y, como resultado, pueden ocurrir sobrecarga o congestión en cualquier estación base si un gran número de usuarios móviles simultáneamente solicitan acceso a través de la capacidad limitada de la misma estación base. Ya que la sobrecarga de la estación base puede causar pérdidas y retardos en la celda ATM, el propósito del Control de Admisión en el árbol de conexiones virtuales es limitar el número de conexiones establecidas concurrentemente a través del árbol de tal forma que se cumplan los objetivos adecuados de calidad de servicio a nivel de celda ATM.

2.3. Diseño del Protocolo

2.3.1. Señalización

La implementación de un protocolo compatible con la utilización de antenas adaptativas y la arquitectura del árbol de conexiones virtuales está basada en la disponibilidad de ciertos mensajes de señalización, control y temporización de los que se encarga la Capa física. La Figura 12 muestra una estructura capaz de soportar estas operaciones. Asumiendo que el árbol virtual incluye B estaciones bases, entonces la supertrama contiene B tramas. Cada trama contiene un *intervalo de señalización* y un *intervalo de comunicación*. Durante el intervalo de señalización, solo una radio-célula está en operación, por lo tanto cada radio-célula es responsable por uno de los B intervalos de señalización asociados con una supertrama, mientras que durante los intervalos de comunicación todas las radio-células operan a la

vez. El intervalo de señalización soporta los mensajes necesarios por el terminal móvil para adquirir sincronización, generar solicitudes de conexión virtual, aceptar llamadas, elegir una estación base, ejecutar un traspaso, declarar su localización, etc. Los mensajes de señalización, puesto que van destinados a todos los terminales en modo *broadcast*, no pueden ser tratadas de manera individualizada por los algoritmos de la Capa Física, por lo que han de ser protegidos mediante técnicas como DS/SS, ya que es una técnica robusta frente a interferencias y desvanecimientos multicamino.

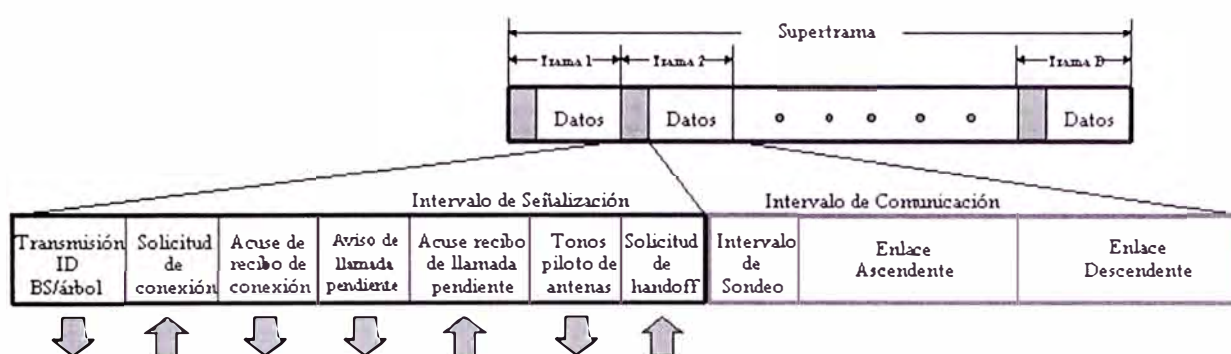


Figura 12 Señalización del protocolo MAC propuesto

Cada intervalo de señalización se divide en siete campos. Durante el **campo 1**, la estación base transmite una señal denominada *frame marker*. Dicha señal contiene una palabra única asociada con el número de identificación de la estación base que la emite y el árbol virtual al cual pertenece. Inicialmente, cada terminal móvil escucha el *frame marker*. En general, durante cada supertrama un terminal móvil escucha el *frame marker* enviado por cada una de las estaciones base que pertenecen al árbol virtual; luego elige la señal recibida con mayor potencia y utiliza una de las *B* tramas para posteriores propósitos de señalización.

Cuando un terminal móvil desea solicitar una conexión virtual, envía una petición a través del **campo 2** de la trama a la cual está actualmente sincronizada. Puesto que la señalización en este campo es compartido por todos los terminales móviles dentro de una radio-célula, las peticiones pueden sufrir colisiones si dos o más terminales móviles, sincronizados a la misma radio-célula, solicitan una conexión simultáneamente. La ausencia de un acuse de recibo, enviado por la estación base en el **campo 3**, indica que dicha petición a sufrido una colisión. Después de esperar algún número aleatorio de supertramas el terminal móvil solicitará de nuevo una conexión. Un acuse de recibo de la estación base puede tomar una de dos formas. Si el CAC determina que la solicitud de admisión no puede ser aceptada dentro del árbol virtual sin una inaceptable degradación de la calidad de servicio, el acuse de recibo tomará la forma de un mensaje de servicio denegado. Por el contrario, si la petición de conexión puede ser acomodada, el CAC inicializa el árbol virtual, establece la porción fija de la ruta desde el nodo raíz, y asigna los VCN de entrada y salida para ser usados por la conexión, los cuales son enviados al terminal móvil como parte del acuse de recibo.

El **campo 4** es usado por la estación base para enviar un aviso a un terminal móvil inactivo indicándole que tiene una llamada pendiente. El mensaje consiste de un identificador único que pertenece a dicho terminal seguido por un conjunto de VCN asignados por el CAC, el cual primero asegura que se hayan reunido las garantías de calidad de servicio necesarias. El aviso es transmitido secuencialmente por cada estación base en el árbol utilizando cada una su respectiva trama, ya que no se conoce con

antelación en qué radio-célula se encuentra el terminal móvil destino de la llamada. El mensaje de aviso puede extenderse sobre varias supertramas; por lo tanto, un determinado móvil escuchara el mensaje de aviso en una de las B tramas de la supertrama al cual está sincronizado. En respuesta a dicho mensaje de aviso, el terminal confirma su recepción enviando un mensaje a través del **campo 5** de la trama al cual está sincronizado, indicando de este modo su localización actual. Luego, la estación base correspondiente incluirá dicho terminal móvil como parte de su ciclo de sondeo dentro de los intervalos de comunicación de todas sus tramas.

El **campo 6** es usado por la estación base para enviar secuencialmente tonos pilotos desde cada uno de los elementos de su array de antenas. Este campo es escuchado en cada trama por cada terminal. Luego el terminal, usando un algoritmo idéntico al usado por la estación base en la elección de los pesos de la antena, puede deducir la calidad del canal que ofrece cada estación base. Con esta información cada terminal móvil puede decidir cuándo iniciar un proceso de traspaso y a qué radio-célula unirse. Cuando esto sucede, una solicitud de traspaso es enviado usando el **campo 7** dentro de la trama correspondiente a la radio-célula al cual el terminal móvil desea unirse. Puesto que la señalización de dicho campo es compartida por todos los terminales móviles, pueden ocurrir colisiones. Después de enviar una solicitud de traspaso, el terminal móvil escucha para comprobar si ha sido incluida dentro del ciclo de sondeo de la estación base elegida. Si el móvil es sondeado, el traspaso ha sido completado. Si no es así, ha ocurrido una colisión, y el terminal móvil espera

un número aleatorio de supertramas para volver a enviar su solicitud de traspaso.

Con respecto al intervalo de comunicación, ésta es utilizada principalmente para transmitir celdas ATM entre los terminales móviles y la estación base a la cual pertenecen. Debido a ello este intervalo es fundamental y de su correcto diseño dependerá la eficiencia con la que se transmita la información. La estructura de este intervalo es estudiado en la siguiente sección.

2.3.2. Descripción del Protocolo

De acuerdo al estudio realizado en el Capítulo I (Sección 1.2), se propone un protocolo de control de acceso al medio que utilice básicamente un esquema TDMA. Así, todo el ancho de banda es utilizado de manera alternada dividiendo el tiempo en ranuras o *slots* formando tramas que se repiten periódicamente. Para que el esquema propuesto se adapte a las características del tráfico ATM, la asignación de recursos se realizará de manera dinámica dependiendo del tipo de servicio ATM solicitado por los terminales móviles y los recursos disponibles en la estación base. Con respecto a la multiplexación del enlace ascendente y descendente se utilizará un esquema TDD. Esto permitirá utilizar una única frecuencia portadora y por consiguiente un solo ancho de banda, ocupando por lo tanto un menor espacio radioeléctrico. Por otra parte, para proteger de manera efectiva la transmisión de las celdas ATM de las hostilidades del medio inalámbrico, se propone que cada estación base utilice un array de antenas adaptativas.

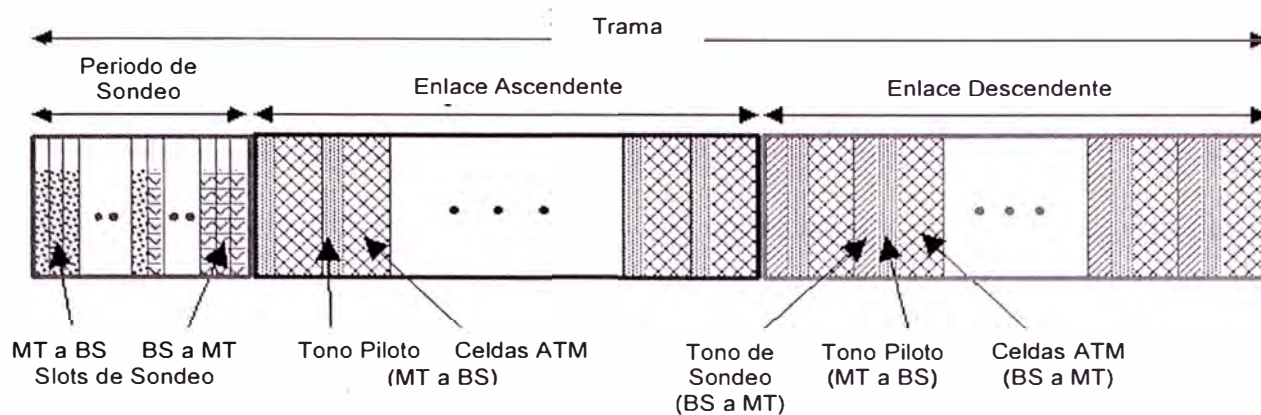


Figura 13 Estructura del protocolo MAC propuesto

La Figura 13 muestra la estructura de la trama que cumple con las características especificadas anteriormente. La trama está constituida por dos partes: un segmento de peticiones y un segmento de datos. El primer segmento se denominada *Período de Sondeo (Polling Segment Period)*, y es utilizado por los terminales móviles para enviar sus peticiones de recursos, así como también para recibir la información del recurso asignado. El segundo segmento está constituido principalmente por ranuras de datos (*dataslot*) utilizados para la transmisión de celdas ATM entre los terminales móviles y la estación base. Este segmento de datos se divide en dos partes: *Enlace Ascendente (Uplink Period)*, utilizado para la comunicación desde el terminal móvil (MT) a la estación base (BS) y *Enlace Descendente (Downlink Period)*, utilizada para la comunicación en sentido contrario, es decir, de BS a MT.

El Periodo de Sondeo está dividido a su vez en dos partes. La primera parte es usado por los terminales móviles para solicitar recursos a la estación base cuando tienen información en cola para enviar; la segunda parte es usada por la estación base para responder a los terminales móviles

con información acerca de los recursos que le han sido asignados. Puesto que este segmento de la trama no está protegida por el array de antenas adaptativas, se propone utilizar DS/SS, de manera similar al utilizado durante el intervalo de señalización. En la primera parte, el terminal móvil envía su petición utilizando su propio código de ensanchamiento (denominado *spreading sequense* en la literatura inglesa) ocupando completamente el ancho de banda del canal. Debemos tener en cuenta que la información en las ranuras de datos es enviada a una tasa binaria que consume todo el espectro asignado, por lo tanto la velocidad de transmisión de la señal ensanchada (denominado *chip rate* en la literatura inglesa) durante el *Período de Sondeo* debe ser igual a la tasa binaria utilizada durante el segmento de datos. Además, el código de ensanchamiento debe ser elegido con un tamaño adecuado que permita asignar a cada terminal móvil un código de identificación (#ID), mitigar las interferencias y reducir el efecto del multicamino. En la segunda parte, una vez la estación base conoce todas las peticiones de los terminales móviles, determina los recursos a asignar en función del tipo de tráfico ATM que el terminal móvil desea enviar y le informa a cada móvil acerca de la posición de los slots asignados.

Con respecto al segmento de datos, al principio de cada ranura de datos del Enlace Ascendente el terminal móvil envía un breve Tono Piloto (*Pilot Tone*), éste permite a la estación base calcular rápidamente los pesos adecuados de los elementos del array de antenas. De esta forma, la estación

base puede recibir correctamente las celdas ATM enviadas a continuación por el mismo terminal móvil.

De manera similar, al principio de cada ranura del Enlace Descendente la estación base envía un estímulo al terminal móvil al cual desea enviar información. Éste estímulo denominado Tono de Sondeo (*Polling Tone*) está constituido por una secuencia de espectro ensanchado que lleva el código de identificación del terminal móvil. El terminal móvil responde a este estímulo enviando un breve tono piloto para que la estación base calcule los pesos correctos del array de antenas y permitir de esta manera que la estación base transmita de forma correcta la información al terminal móvil.

Como se puede observar con este esquema cada ranura de datos que lleva información ATM, en cualquier dirección, es siempre precedida por un tono desde el terminal móvil a la estación base, el cual es usado para rápidamente adquirir los pesos correctos de las antenas adaptativas. Esto contribuye a que sea posible transportar más de una celda ATM en cada ranura de datos.

La estructura de la trama del protocolo propuesto está también optimizada para lograr menores retardos de acceso a los recursos por parte de los terminales móviles. Como se estudió en la Sección 1.2.2, la estructura de la trama TDMA originalmente planteada (ver Figura 4) presentaba grandes retardos para acceder a los recursos. El unir los subperíodos en los cuales se realiza la petición de recursos y la confirmación de los mismos ha logrado reducir grandemente los retardos de acceso debido a que ya

no es necesario esperar a la siguiente trama para saber el estado de la petición (ver Figura 14). Esto último, añadido al hecho de que el protocolo propuesto utiliza acceso por sondeo, el cual evita los retardos por colisiones, hace que éste protocolo muestre un menor retardo total (desde que el terminal genera la información hasta que lo transmite sobre el recurso asignado).

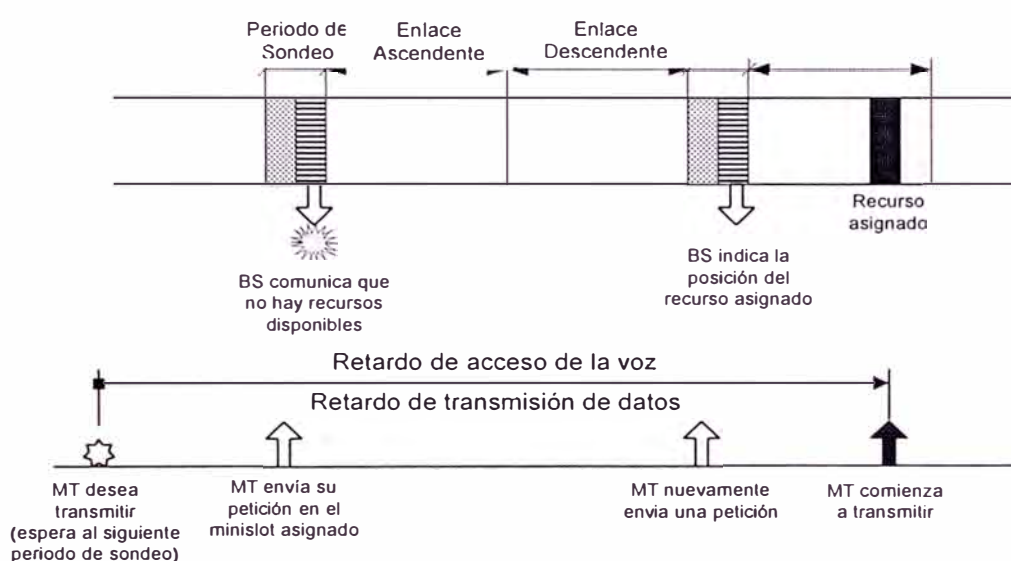


Figura 14 Retardos del protocolo propuesto

2.3.3. Duración de la Trama

Cuando se ofrecen servicios de tipo CBR, en el que los recursos se utilizan en modo circuito conmutado, es necesario asignar una ranura de la trama de forma permanente durante todo el tiempo que dure la conexión. El tipo de comunicación asociada a esta modalidad suele ser una llamada de voz. De esta forma, si la velocidad de la fuente de voz es V_V , y el tamaño de la ranura de datos sin overhead es B_P , se ha de cumplir necesariamente que:

$$V_V = \frac{B_P}{T_F} \quad [\text{Ec. 13}]$$

donde T_F es la duración de la trama. Si por el contrario, esta condición no se cumple, implica que debe existir un exceso o deficiencia en la velocidad de transmisión de la fuente de voz con respecto a la velocidad de transmisión de la trama. Esto trae como consecuencia, fluctuaciones en la transmisión de la voz (jitter), lo cual degradaría la calidad de servicio (ver Sección 1.4.1).

La dependencia con la velocidad de la fuente de voz acarrea importantes consecuencias en el diseño de la trama, pues si la voz se comprime hasta reducir en gran medida su velocidad de transmisión, puede provocar que la duración de la trama sea excesivamente grande.

En este punto de diseño del protocolo debemos decidir el valor del primer parámetro: el tamaño de las ranuras de datos. Considerando las características de diseño descritas en la Sección 2.3.2 y con el objeto de incrementar la eficiencia de la trama, se ha decidido transportar $N_C=2$ celdas ATM en cada ranura ($B_D=848$ bits). Por lo tanto, el tamaño de la información contenida en cada ranura de datos, sin considerar las cabeceras de las celdas ATM, es $B_U=768$ bits. Con este parámetro fijado podemos determinar la duración de la trama para diferentes velocidades de fuente de voz, en función de su codificación y compresión, como se muestra en la Tabla 6.

Para elegir la adecuada velocidad de transmisión de la fuente de voz debemos tener en consideración dos aspectos. Primero, a mayor compresión de la voz más significativo es el efecto de la pérdida de celdas ATM (ver Sección 1.4.1) lo que implica degradación en la calidad de servicio

ofrecida. Segundo, si se desea proporcionar la posibilidad de realizar conexiones CBR a las aplicaciones de datos, se necesitan velocidades de transmisión más altas. Por lo tanto, se ha elegido la velocidad $V_V=64$ kbps para las conexiones CBR, permitiendo además de asegurar una calidad de voz óptima, proveer al usuario con la opción de utilizar un canal CBR para transmitir datos.

Tipo de fuente de voz	Velocidad de transmisión (Kbps)	Duración de la trama (ms)
PCM	64	12
ADPCM	32	24
VCELP	9.6	80

Tabla 6 Duración de la trama en función de la velocidad de la fuente de voz

La elección de la velocidad de fuente CBR, junto con la decisión de transportar 2 celdas ATM en cada ranura de datos, conduce a una duración de la trama $T_F = 12$ milisegundos. La velocidad de fuente de los terminales de tipo VBR o ABR no influyen en este valor, ya que estos trabajan en modo conmutación de paquetes y no requieren la asignación permanente de recursos.

2.3.4. Overhead de la Trama

Como se describió en la Sección 2.3.2 el protocolo propuesto aprovecha las características de las antenas adaptativas para transportar de manera fiable las celdas ATM, esto implica el uso de ciertas señales de radiofrecuencia o tonos que sirven para calcular los pesos en las antenas y

que por lo tanto no llevan información del usuario, llegando a formar parte de la información adicional útil solo para el sistema.

También debido a que el protocolo propuesto trabaja con un esquema TDMA debemos tener en cuenta el sincronismo a nivel de slot (el sincronismo a nivel de trama se hace durante el intervalo de señalización ver sección 2.3.1) Esto consiste en reservar unos bits entre slots consecutivos denominado período de guarda (*guard period*). Este período es necesario ya que el terminal móvil no es capaz de aumentar y disminuir su potencia de salida de manera instantánea. En este período de guarda, el móvil puede completar sus rampas de subida y bajada de potencia transmitida.

Teniendo en cuenta lo anterior y considerando el porcentaje promedio utilizado para este caso en sistemas como GSM y TETRA, podemos asumir para los tonos (Pilot Tone y Polling Tone) un tamaño B_P y B_S igual al 10% del tamaño de las ranuras de datos B_D . También asumimos el tamaño de cada slot de acceso (Polling Slot) B_A igual al de una celda ATM.

2.3.5. Número de Ranuras

Hasta este punto del diseño hemos definido diversos parámetros del protocolo propuesto. Ahora toca definir uno de los últimos parámetros: el número de ranuras N_S que contiene el *Período de Sondeo* para atender las peticiones de los terminales móviles. Definido el valor de la duración de la trama, el número de ranuras N_S determinará el total de bits de la trama B_T y por lo tanto la velocidad (o capacidad) del enlace V_C . Es obvio que no podemos tomar valores muy altos de N_S porque la velocidad del enlace

aumentaría y se tendría que utilizar un mayor ancho de banda. Por el contrario, valores bajos para N_S trae como consecuencia una mayor probabilidad de bloqueo y grandes retardos debido a que la trama se saturaría rápidamente al soportar pocos terminales móviles.

Aquí nuevamente debemos tomar una decisión coherente que equilibre ambos extremos. Teniendo en cuenta además que los resultados del protocolo propuesto se deben comparar a los del protocolo de Raychaudhuri, hemos asumido un valor $N_S=60$, similar el utilizado por Raychaudhuri en el diseño de su protocolo. Como veremos en la siguiente sección, este valor de N_S define un valor para $V_C=11.875$ Mbps, el cual dividido por la eficiencia espectral definido en la sección 2.1.4 nos indica que el protocolo propuesto ocuparía un ancho de banda razonable.

2.3.6. Parámetros de la Trama

Con los valores de las secciones anteriores podemos calcular el número total de bits por trama B_T y la Capacidad del Enlace V_C .

$$\text{Tamaño período peticiones} = N_S * B_A$$

$$\text{Tamaño enlace ascendente} = N_S * (B_P + B_D)$$

$$\text{Tamaño enlace descendente} = N_S * (B_S + B_P + B_D)$$

$$B_T = N_S * B_A + N_S * (B_P + B_D) + N_S * (B_S + B_P + B_D)$$

$$B_T = 142500 \text{ bits}$$

$$V_C = \frac{B_T}{T_F} = 11.875 \text{ Mbps} \quad [\text{Ec. 14}]$$

Teniendo en cuenta el valor de eficiencia espectral definido en la sección 2.1.4 ($\nu = 1.44$ bits/seg/Hz) el ancho de banda del canal es:

$$W_c = \frac{V_c}{v} = 8.25 \text{ MHz} \quad [\text{Ec. 15}]$$

También podemos calcular dos parámetros importantes. Primero, la eficiencia de la trama definido como:

$$\eta = \frac{\text{Número_de_bits_de_información}}{\text{Número_total_de_bits_en_la_trama}} \quad [\text{Ec. 16}]$$

$$\eta = \frac{N_s \times B_D \times 2}{B_T} = 0.7141$$

Es decir, el 71.4% de la trama está dedicada a transmitir información generada por las aplicaciones de los terminales móviles, mientras que el 28.6% está constituido de información útil para el funcionamiento del protocolo: ranuras de peticiones, tonos pilotos y tonos de sondeo.

El segundo parámetro se deriva de las consideraciones estudiadas en la sección 2.1.3, en el cual se definió el período máximo de ecualización. De la estructura de la trama observamos que la ranura más grande son las correspondientes al enlace descendente (ver Figura 13), las cuales están constituidas por un tono de sondeo, un tono piloto y la ranura de datos. El tamaño total de cada una de estas ranuras sería por tanto de 1018 bits. Ahora, considerando que la velocidad del enlace es de 11.875 Mbps, se tendría que la duración de estas ranuras sería de 0.086 ms. Teniendo en cuenta los valores de la Tabla 5, para un terminal móvil que se desplaza a una velocidad de 100 km/h y una frecuencia portadora de 2.4 Ghz, se llega a la conclusión que las ranuras que transportan información tienen una duración menor al valor máximo del período de ecualización definido para el

protocolo propuesto, por lo tanto las celdas ATM están suficientemente protegidas de las perturbaciones del medio inalámbrico.

Parámetro	Expresión	Valor
Número de slots	N_S	60
Número de celdas ATM por slot	N_C	2
Tamaño del slot de datos	$B_D = 53 \cdot 8 \cdot N_C$	848 bits
Tamaño útil del slots de datos	$B_U = 48 \cdot 2 \cdot 8$	768 bits
Tamaño del slot de acceso	$B_A = 53 \cdot 8$	424 bits
Tamaño del tono piloto	$B_P = 0.1 \cdot B_D$	85 bits
Tamaño del tono de sondeo	$B_S = 0.1 \cdot B_D$	85 bits
Tamaño de la trama	B_T	142.5 Kbits
Duración de la trama	T_F	12 ms
Capacidad del canal	V_C	11.875 Mbps
Ancho de banda del canal	W_C	8.25 MHz

Tabla 7 Parámetros del protocolo

La Tabla 7 resume los parámetros del protocolo calculados hasta el momento.

2.3.7. Técnica de Acceso

El protocolo propuesto pone a disposición de los terminales móviles un número N_S ranuras, *Polling Slots*, para que puedan realizar sus peticiones de recursos. La manera cómo por los terminales utilicen esas ranuras

determinará en buena parte la eficiencia del protocolo. Las técnicas de acceso pueden ser agrupadas en dos: por sondeo o por contención.

El acceso por contención es una técnica poco eficiente cuando la cantidad de peticiones es alta (ver Sección 1.2). En este caso el número de colisiones aumenta y por lo tanto el retardo de acceso al recurso también se incrementa. Por el contrario la técnica de sondeo soporta con mayor eficiencia el acceso a los recursos una vez que el terminal móvil haya sido aceptado por la estación base.

La primera parte de la trama está diseñada para el uso del acceso por sondeo. Para tal efecto se divide en dos: la primera parte es una transmisión ascendente y la utilizan los terminales para solicitar recursos a la estación base cuando tienen información en cola para enviar; la segunda parte es descendente y corresponde a las respuestas enviadas por la estación base sobre los recursos que les han sido asignados a cada terminal (ver Figura 13). Para ello se utilizan N_S minislots para las peticiones y N_S minislots para las respuestas de la estación base, con un tamaño de $B_A/2$ bits por minislot.

2.3.8. Política de Asignación de Recursos

El protocolo propuesto utiliza la técnica de asignación por demanda con control centralizado, en donde la estación base es la encargada de gestionar y controlar el acceso a los recursos. Debido a que en el enlace ascendente (*Uplink*) los terminales móviles envían su información a la estación base a través del mismo canal radioeléctrico, la estación base debe controlar el acceso al mismo y por lo tanto la eficiencia del protocolo recae principalmente sobre esta parte de la trama. De allí que el proceso de

simulación del protocolo solo se realice sobre el enlace ascendente. Para el enlace descendente (*Downlink*) la estación base es la única encargada de enviar en forma programada la información a los terminales móviles respectivos, por lo tanto no tiene un efecto significativo sobre la eficiencia del protocolo.

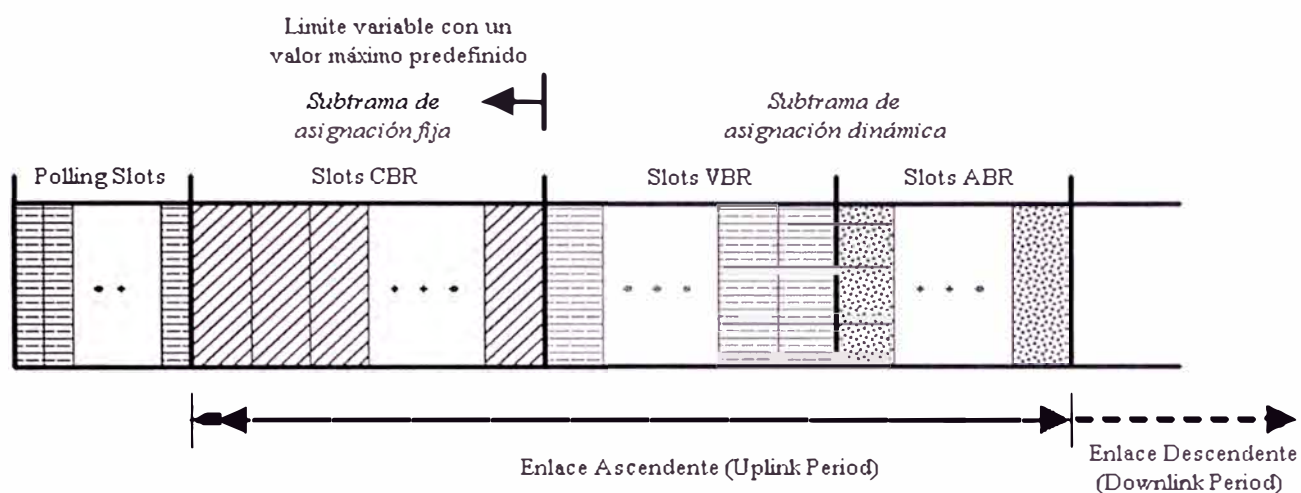


Figura 15 Estructura del enlace ascendente

La Figura 15 muestra el orden en que son distribuidos los slots durante el enlace ascendente. En ella se observa que los slots disponibles en la trama se estructuran en función del tipo de servicio a transportar. En este orden, se cursa primero el tráfico CBR, después los paquetes VBR y, si hay slots libres, se cursa tráfico ABR. A continuación, se explica detalladamente la asignación para cada tipo de tráfico.

Asignación de tráfico CBR

Cuando un terminal CBR solicita permiso para transmitir y lo obtiene, se le asigna un slot CBR en la trama durante todo el tiempo que dure la comunicación, independientemente de lo que suceda en los demás slots

CBR o incluso de otro tipo. El terminal disfruta de una conexión en modo circuito conmutado. Además, durante la comunicación, se puede reasignar esa conexión a otro slot CBR diferente con el fin de no malgastar slots VBR o ABR. Por ejemplo, si a un terminal se le asigna el slot 5 porque están ocupados del 1 al 4, y en un determinado momento el slot 3 queda libre, las conexiones 4 y 5 serán reubicadas en los slots 3 y 4 respectivamente. De esta forma, se aseguran que no existan "huecos" en la trama sin utilizar. Por supuesto, en la trama existe un número máximo de slots CBR, denominado ventana CBR, por lo que si se están cursando el número máximo de comunicaciones que soporta la ventana CBR, la próxima que lo intente será bloqueada y se perderá.

Asignación de tráfico VBR

En principio, la filosofía del tráfico VBR es aprovechar todos los slots disponibles después del último slot CBR ocupado. Para el tráfico VBR, la asignación es realizada en base a un algoritmo de multiplexación estadística en el cual los recursos disponibles son distribuidos en función de la cantidad de información que cada terminal VBR activo desea transmitir. Es decir, a mayor información a transmitir mayor número de slot se asignarán, teniendo cada terminal VBR activo como mínimo un slot para transmitir. Se considera un terminal VBR como activo, cuando teniendo una conexión con la estación base tiene información que transmitir. Se considera un terminal VBR inactivo, cuando a pesar que no tiene información que transmitir mantiene su conexión con la estación base.

Asignación de tráfico ABR

El tráfico ABR es el que menor prioridad tiene de todos. Por eso, los paquetes de este tipo de tráfico disponen del espacio de la trama que hayan dejado sin utilizar las conexiones CBR y los paquetes VBR. Así, se puede dar el caso de que un paquete ABR se transmite de manera discontinua, cursando segmentos del mismo en diferentes tramas, haciendo que el retardo de transmisión sea el más alto de todos los tráficos. Para mitigar este hecho, la política de colas empleada juega un papel muy importante en el rendimiento final del protocolo.

2.3.9. Parámetros del Tráfico

Tráfico de Voz

El número máximo de conexiones de voz que pueden ser asignadas en una trama, denominada ventana CBR, está limitada por el valor del parámetro "Slot Voz Máximo", cuyo valor es un factor entre la carga de voz y carga ofrecida. La elección de este factor está basada en estudios realizados en [32], el cual indica que tal factor proporciona un buen balance entre la probabilidad de bloqueo de voz y el retardo de los paquetes de datos.

La Carga Ofrecida es el porcentaje de la carga total que soporta el sistema, a ser generada por todos terminales móviles. Para la simulación asumimos que el 50% de la carga ofrecida será generada por los terminales de voz y el otro 50% por los terminales de datos. Para el cálculo del número de terminales de voz se parte de los conceptos básicos de tráfico [33]. Sabemos que el tráfico ofrecido por un terminal a un solo canal (o slot en nuestro caso) es igual a λ/μ , donde λ y μ son las tasas de nacimiento y

muerte, respectivamente, de una clase especial de los procesos de Markov denominado proceso de nacimiento y muerte. Se demuestra que λ es igual a la tasa de llegada de eventos de Poisson y $(1/\lambda)$ es igual a la duración media entre eventos de Poisson (en nuestro caso, duración media de una llamada). Ahora, debido a que el protocolo asigna un solo canal a cada terminal de voz, el número máximo de canales sería igual a (Capacidad del Enlace / tasa de bits de voz), de los cuales solo se utilizan el 50% ya que el protocolo propuesto trabaja en modo TDD. Esto nos permite determinar la fórmula que calcula el número total de terminales que generan tráfico de voz, el cual se muestra en la Tabla 8.

Nombre del Parámetro	Expresión	Valor(es)
Carga Ofrecida		0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8
Tasa de Llegada de Voz		5.0E-4 llamadas/seg
Duración Media de Voz		180 seg
Tiempo Acceso Max. Voz		5 seg
Tasa de Bits de Voz		64000 bits/seg
Carga de Voz	0.5 * 'Carga Ofrecida'	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4
Num. Terminales de Voz	round (('Capacidad del Enlace' / 'Tasa de Bits de Voz' * 'Carga de Voz' * (1.0 / ('Tasa de Llegada de Voz' * 'Duracion Media de Voz')))*0.5)	52, 103, 155, 206, 258, 309, 361, 412
Slots Voz Maximo	round ('Num. Polling Slots' * 'Carga de Voz' / 'Carga Ofrecida')	30

Tabla 8 Parámetro de las fuentes de voz

Tráfico de Datos

En forma similar podemos determinar la fórmula para calcular el número de terminales de datos. Para esto, asumimos que los terminales de datos transmiten a la velocidad del enlace radioeléctrico. Según el modelo de las fuentes ABR descrito en la Sección 1.5.4, la duración media entre eventos de Poisson sería igual $T_{ON} + T_{OFF}$, el cual a su vez sería igual a la media de la distribución exponencial ($1/\lambda$), donde λ = tasa de llegada de eventos de Poisson. Teniendo en cuenta que la duración media del tiempo de actividad es T_{ON} , podemos deducir la carga ofrecida por un terminal como:

$$\text{Carga_de_un_terminal} = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda \times \text{Duración_media} = \frac{1}{T_{ON} + T_{OFF}} \times T_{ON}$$

A esta última expresión hemos denominado "*Factor de utilización*". Luego para N_d terminales de datos tenemos: Carga de datos = N_d * Factor de Utilización. De esta expresión se deduce la fórmula mostrada en la Tabla 9 para el cálculo del número de terminales de datos.

Para la simulación, asumimos que el 25% del tráfico de datos generado es de tipo crítico y el resto de tipo no crítico. Esto se define por el parámetro "Alfa".

Nombre del Parámetro	Expresión	Valor(es)
Carga Ofrecida		0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8
Carga de Datos	$0.5 * \text{'Carga Ofrecida'}$	0.05, 0.1, 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4
Num. Terminales de Datos	$\text{round}(\text{'Carga de Datos'} / \text{'Factor de Utilización ABR'})$	250, 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750, 2000
Tiempo Medio OFF	$\text{'Tiempo Medio ON'} * (1.0 - \text{'Factor de Utilización ABR'}) / \text{'Factor de Utilización ABR'}$	4.31 seg
Tiempo Medio ON	$\text{'Longitud Media del Paquete'} / \text{'Capacidad del Enlace'}$	4.31E-4 seg
Longitud Media del Paquete		5120 bits
Factor de Utilización ABR		1.0E-4
Timeout Crítico		0.05 seg
Timeout No Crítico		1.0 seg
Alfa		0.25

Tabla 9 Parámetros de las fuentes de datos

2.3.10. Políticas de Servicio de Colas

Existen dos principales políticas de colas para atender tráfico ABR. La primera se denominada FCFS, en el cual los paquetes son atendidos según su orden de llegada. Cuando le toca su turno de ser atendido se verifica que su tiempo de expiración no ha sido sobrepasado, en tal caso el paquete es cursado. La segunda política se denominada TOE, en la cual los paquetes son almacenados en la cola según prioridad. Se establecen dos clases de paquetes: críticos, con un tiempo de expiración más pequeño, y no críticos con un tiempo de expiración comparativamente más grande. Se asigna una mayor prioridad a los paquetes críticos sobre los paquetes no críticos, por lo

tanto los paquetes críticos son colocados delante de la cola y por lo tanto siempre atendidos antes que un paquete no crítico. Cuando le toca su turno de ser atendido, ya sea un paquete crítico o no crítico, se verifica que su tiempo de expiración no ha sido sobrepasado, en tal caso el paquete es cursado, caso contrario el paquete es desechado.

En éste capítulo se ha realizado el diseño del protocolo MAC propuesto. Resultado de éste estudio se han obtenido los valores de los parámetros del protocolo los cuales serán utilizados en el siguiente capítulo para construir los bloques que simulen el funcionamiento del protocolo.

CAPÍTULO III

SIMULACIÓN DEL PROTOCOLO PROPUESTO

Para evaluar el desempeño del protocolo propuesto se utilizó un software de simulación de propósito general orientado a gráfico denominado Block Oriented Network Simulator (BONES) DESIGNER (ver Anexo A) [34]. Es un software integrado gestionado por eventos que realiza el modelado y la simulación de sistemas de transferencia de datos, permite construir bloques para modelar todo tipo de protocolos y simula su comportamiento ante el tráfico generado, también, por fuentes modeladas. Se realizaron múltiples simulaciones cada una consistente de un millón de tramas, utilizando estaciones de trabajo HP 9000 Modelo 712 (CPU 60 MHz, RAM 96 MB, HD 10 GB) y Sun Sparcstation 10 (CPU 70 MHz, RAM 120 MB, HD 10 GB), ambos bajo sistemas operativos UNIX, único sistema operativo soportado por Bones Designer.

En este capítulo describiremos el funcionamiento de los bloques más importantes que se han construido para modelar el protocolo propuesto y la generación de tráfico de los terminales móviles. Tal descripción se realizará en forma jerárquica, partiendo de los bloques de mayor a menor nivel. Las diferentes estructuras de datos utilizadas para la generación de tráfico o para la transferencia de información entre los diferentes bloques son mostradas

en el ANEXO B, en dicho anexo también se muestra todos los bloques de la simulación.

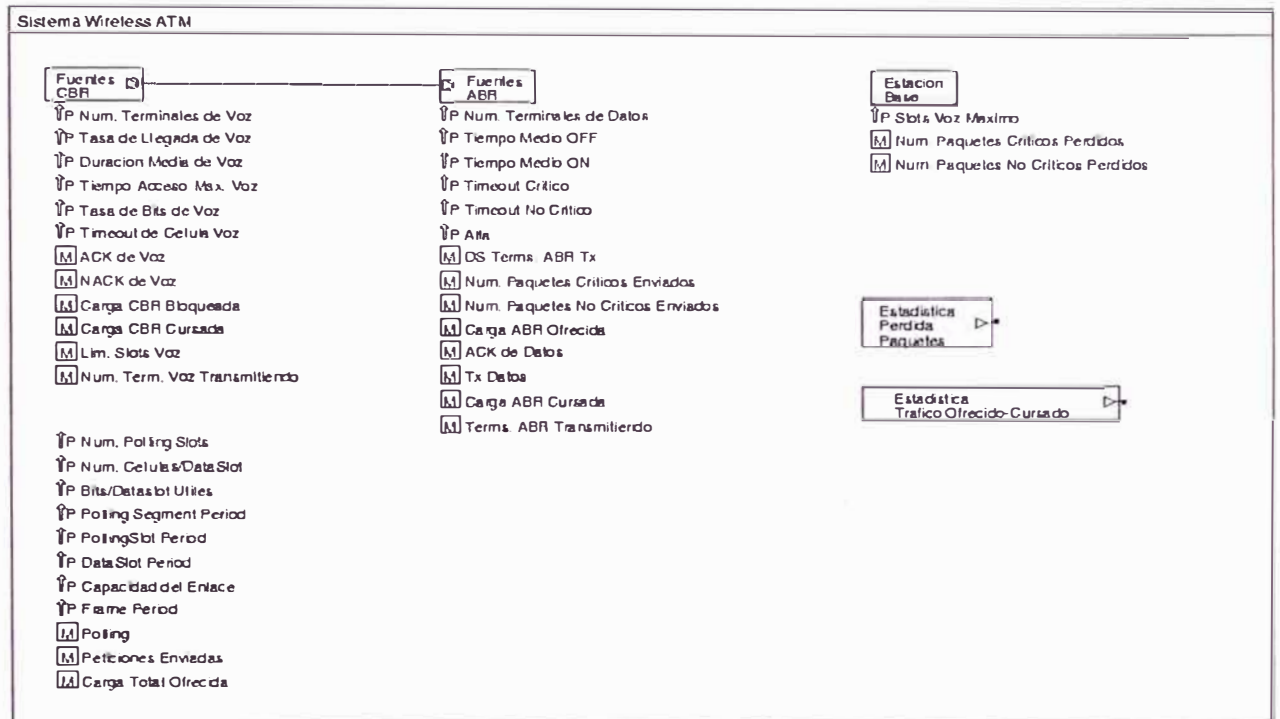


Figura 16 Sistema Wireless ATM

La Figura 16 muestra el bloque de más alto nivel de la simulación. En primer lugar, podemos ver dos bloques correspondientes a las fuentes generadoras de tráfico. Estos bloques simulan a un conjunto de terminales móviles que solicitan a la estación base servicios CBR y ABR. Un tercer bloque representa la estación base, encarga de recibir las peticiones de los terminales móviles, asignar los recursos disponibles y controlar el uso del mismo por parte de los terminales móviles. Por último, dos bloques adicionales que implementan funciones de índole estadística. Permiten calcular el porcentaje de pérdida de paquetes ABR y el porcentaje de tráfico cursado durante la comunicación entre los terminales móviles y la estación base.

Las variables precedidas por la letra **P** son parámetros externos propias del diseño del protocolo o de las fuentes generadoras de tráfico. Los valores de estos parámetros son definidos antes de la simulación y mediante ellos se especifican las características del protocolo y de las fuentes generadoras de tráfico. Las variables precedidas por la letra **M** son variables internas (denominadas memorias), que se utilizan para transferir información entre los bloques y está relacionada con el comportamiento del protocolo y el tráfico que está cursando en cada momento.

A continuación describiremos cada uno de los bloques que constituyen el modelo del sistema Wireless ATM.

3.1. Modelo de las Fuentes CBR

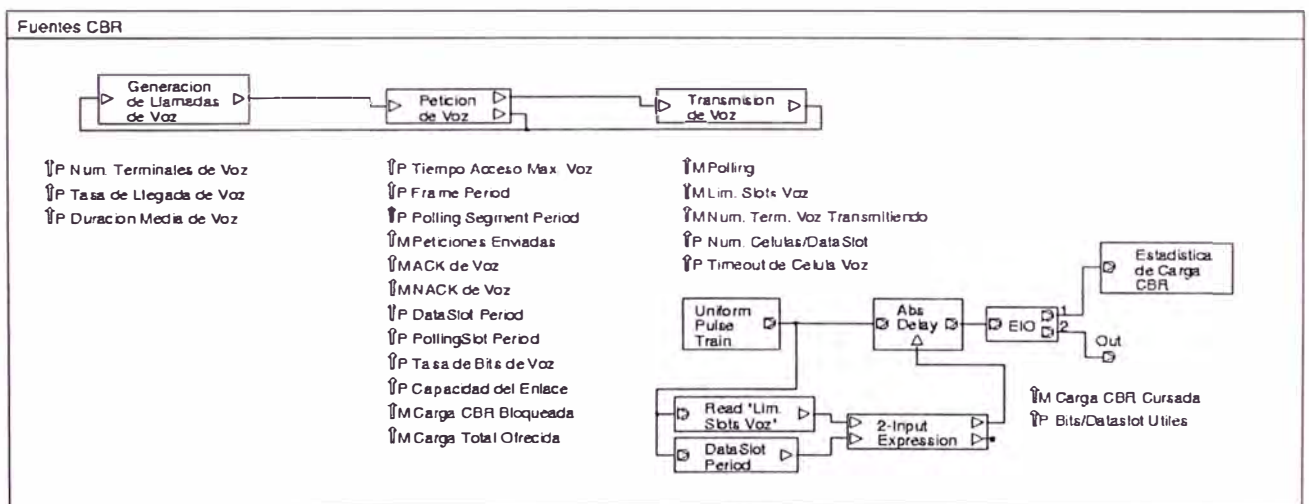


Figura 17 Modelo de Fuentes CBR

La Figura 17 muestra el desarrollo del modelo para fuentes CBR. Este modelo representa a todos los terminales CBR que demandan servicios orientados a la conexión, en este caso particular mediante llamadas telefónicas a una tasa de bits constante, según el modelo de tráfico

explicado en la Sección 1.5.2. A continuación se explican brevemente los bloques que constituyen el modelo de fuentes CBR.

3.1.1. Bloque “Generación de Llamadas de Voz”

Cuando la simulación empieza, se generan las estructuras de datos “Voz DS” que representan a cada terminal de voz. Esto se realiza mediante un lazo que se repite tantas veces según el parámetro “*Num. Terminales de voz*”, insertándose en cada estructura de datos el valor del campo “*Terminal ID*”. Se genera un número aleatorio con distribución exponencial negativa, de media “*Tasa de Llegada de voz*”, que representa el tiempo entre llamadas de cada terminal y con este valor se coloca la estructura en el bloque de retardo. Cada vez que una estructura “Voz DS” sale del bloque de retardo significa que un terminal de voz empieza una llamada, por lo tanto, se inserta valores para los campos “*Tiempo de Creacion*” y “*Duracion de la Llamada*”. Este último valor consiste de un número aleatorio con distribución exponencial negativa de media “*Duracion Media de voz*”.

Los terminales que finalizan una llamada entran por el puerto “*In Terminales de voz Idle*”, se les genera un nuevo tiempo de retardo e ingresan al bloque de retardo para que cumplan su tiempo entre llamadas.

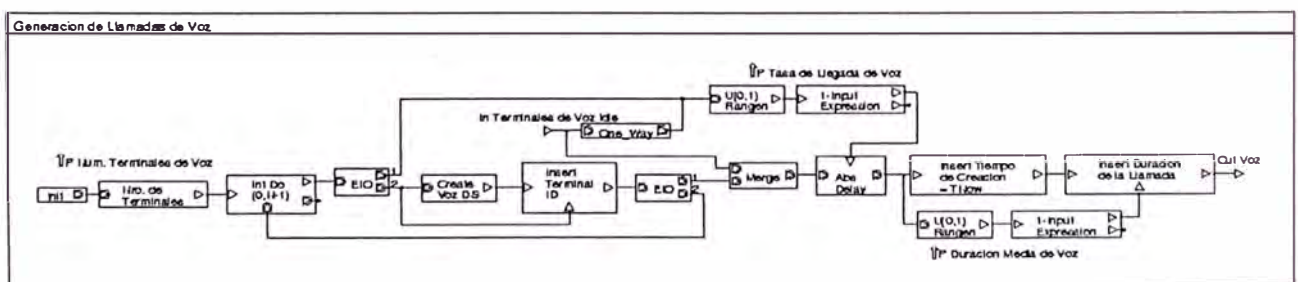


Figura 18 Modelo de generación de llamadas de voz

3.1.2. Bloque “Petición de Voz”

Cuando se inicia una llamada se realiza una petición a la estación base para que este asigne un slot durante el período de enlace ascendente (“*Uplink Period*”). Para realizar esto, se crea una nueva estructura de datos llamada “*Petición*” en la cual se inserta los campos “*Terminal ID*”, “*Num. Slots Pedidos*” (para el protocolo propuesto se asigna un slot por cada terminal de voz CBR) y “*Tipo de Tráfico*” (en este caso “*Voz*”). Se calcula el tiempo que debe esperar la petición para ser enviada y con este valor se coloca la estructura de datos “*Petición*” en el bloque de retardo. En este modelo de voz CBR se ha considerado que las peticiones se realicen al final del período de sondeo “*Polling Segment Period*” de la siguiente trama respecto al momento en que la petición se genera. Cuando se alcanza el tiempo en el cual se deben lanzar las solicitudes de petición, éstas se envían a la estación base a través de la memoria “*Peticiones Enviadas*”.

En este bloque también se recibe información de la estación base acerca del éxito o fracaso de las peticiones realizadas. Mediante la memoria “*NACK de voz*” la estación base informa que una petición a sido rechazada debido a que la ventana de asignación CBR está utilizada al máximo y por lo tanto no se puede asignar recurso para dicha petición. Se comprueba si se ha sobrepasado el tiempo máximo de establecimiento de una conexión de voz; si es así, se considera como una llamada bloqueada, se envía una copia de la estructura de datos “*Voz DS*” al bloque “*Probabilidad de Bloqueo de voz CBR*” para fines estadísticos y otra copia al bloque “*Generación de Llamadas de voz*” para que el terminal bloqueado genere una nueva llamada

telefónica. Si por el contrario no se ha sobrepasado el tiempo máximo de establecimiento el terminal volverá a realizar otra petición en la siguiente trama.

Ahora, si la petición ha tenido éxito se recibe una confirmación de la estación base a través de la memoria "ACK de Voz" con información de la posición del slot asignado. Con ello se calcula el tiempo de inicio y finalización de la llamada, se inserta dichos valores en los campos "Tiempo de inicio" y "Tiempo de Finalización" de la estructura de datos "Voz DS" correspondiente y se envía dicha estructura al bloque "Transmisión de Voz".

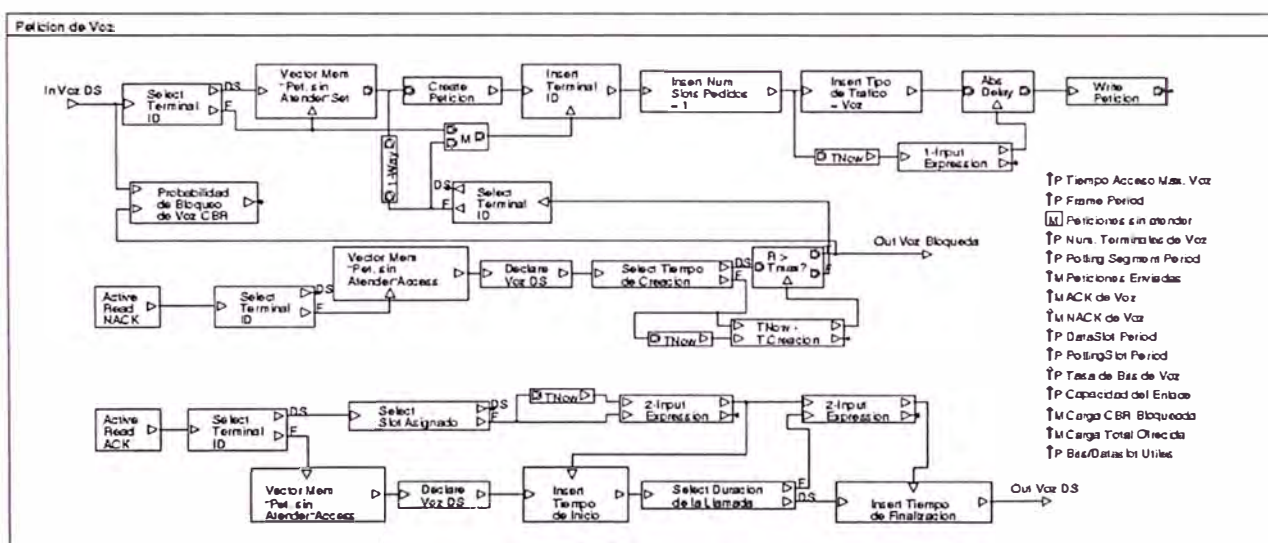


Figura 19 Modelo de petición de voz

Dentro del bloque "Probabilidad de Bloqueo de voz CBR" se calcula el número de llamadas generadas y el número de llamadas bloqueadas para determinar, al final de la simulación, la probabilidad de bloqueo del servicio CBR. Además, también se acumula la duración de las llamadas bloqueadas para determinar la "Carga CBR Bloqueada".

3.1.3. Bloque “Transmisión de Voz”

Cuando la estructura de datos “Voz DS” ingresa a este módulo se incrementa la memoria “Num. Term. Voz Transmitiendo” y se coloca dicha estructura en el bloque de retardo hasta la finalización de la llamada, simulándose de esta forma la conexión dedicada ofrecida por todo servicio CBR. Previamente, durante la asignación de recursos, la estación base ha reservado una posición de la memoria “Polling” para indicar que un slot CBR está siendo utilizado por un terminal móvil. Cuando una estructura sale del bloque de retardo, se elimina la posición que ocupaba en la memoria “Polling” para que dicha posición sea asignada por la estación base a otra petición. También se disminuye en 1 las memorias “Num. Term. Voz Transmitiendo” y “Lim. Slots Voz”. Esto último nos indica el tamaño actual de la ventana de asignación para los terminales de voz CBR.

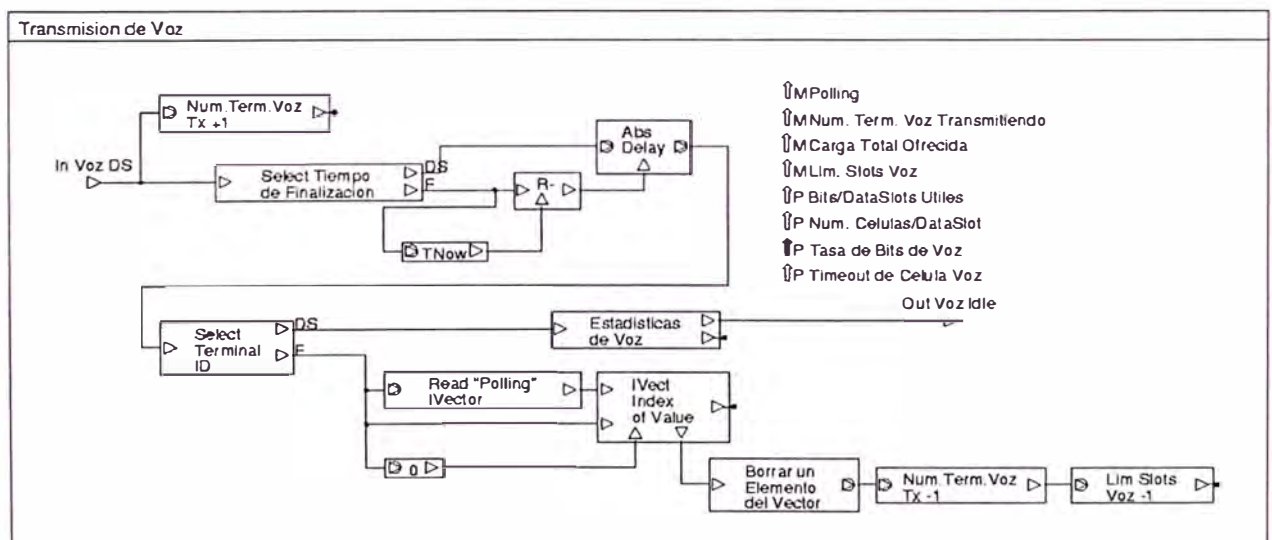


Figura 20 Modelo de transmisión de voz

La estructura "Voz DS" que sale del bloque de retardo es enviada al bloque "Estadísticas de Voz". En este bloque, al final de la simulación, se calcula el tiempo medio de acceso a la conexión CBR.

3.2. Modelo de las Fuentes ABR

El modelo de fuentes ABR se ha desarrollado según las características explicadas en la Sección 1.5.4. Se modela un conjunto de terminales de datos que generan tráfico según el modelo de fuentes ON-OFF con períodos de actividad "*Tiempo medio ON*" muy breves en comparación con los períodos de inactividad "*Tiempo medio OFF*", esto se determina según el valor del parámetro "*Factor de Utilización ABR*". El valor de cada período es generado según una distribución de Pareto. Durante los períodos de actividad se generan paquetes con una longitud media determinada por el parámetro "*Longitud Media del Paquete*".

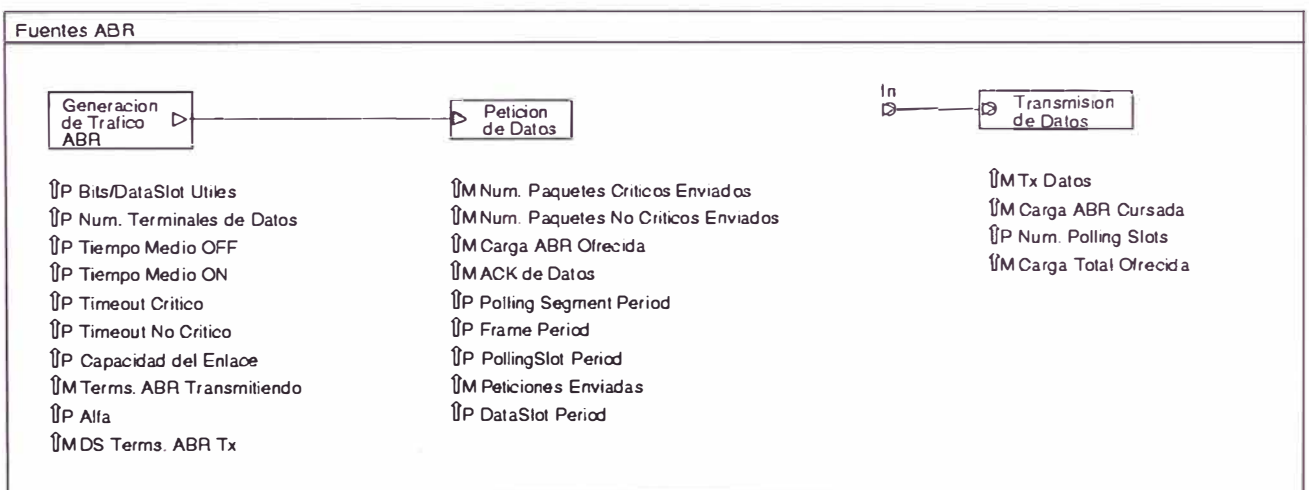


Figura 21 Modelo de Fuentes ABR

Los datos que generan los terminales se dividen en dos grupos, aquellos que son de tiempo real ("*crítico*") los cuales tienen un reducido

tiempo de expiración determinado por el valor del parámetro "*Timeout Crítico*", y aquellos que son de tiempo no real ("*no crítico*") los cuales tienen un tiempo de expiración comparativamente grande determinado por el valor del parámetro "*Timeout No Crítico*". El porcentaje de paquetes "*críticos*" respecto al total de paquetes ("*críticos*" más "*no críticos*") es determinado por el parámetro "*Alfa*".

A continuación se describen los principales bloques que constituyen el modelo de fuentes ABR.

3.2.1. Bloque "Generación de Tráfico ABR"

Como un terminal ABR genera tráfico a ráfagas durante una conexión, el modelado de generación de tráfico para este tipo de terminales es diferente al de un terminal CBR, el cual genera tráfico de forma constante durante toda su conexión.

Al inicio de la simulación se generan pulsos dentro de un lazo que se repite según el valor del parámetro "*Num. Terminales de Datos*". Cada pulso, que contiene el valor del "*Terminal ID*", es retardado un determinado tiempo el cual es generado en forma aleatoria según una distribución de Pareto con parámetro "*Tiempo Medio OFF*", dicho tiempo representa el tiempo de inactividad del terminal de datos. Al salir del bloque de retardo, se verifica en la memoria "*Terms. ABR Transmitiendo*" si el terminal de datos está transmitiendo en este momento; si es así, se retorna el valor del "*Terminal ID*" al bloque de retardo con un nuevo valor de período de inactividad. Caso contrario, se indica en la memoria "*Terms. ABR Transmitiendo*" que dicho terminal está en período de actividad y se crea una estructura de datos

denominada "Datos DS" que contiene las características de la información generada por el terminal. En función de un número aleatorio generada según la distribución de Pareto con parámetro "Tiempo Medio ON" se calcula el tamaño del paquete y se inserta dicho valor en el campo "Message Length". También en función de este último valor se calcula el "Num. Slots Pedidos".

Luego se genera un número aleatorio entre 0 y 1 según una distribución uniforme para determinar el valor del parámetro "Alfa". En función del valor de "Alfa" se determina si el paquete es "crítico" o "no crítico", según esto se asigna el valor del timeout respectivo y se calcula el tiempo límite de transmisión. Insertado los valores de los campos de la estructura "Datos DS" se lo envía al bloque "Petición de Datos".

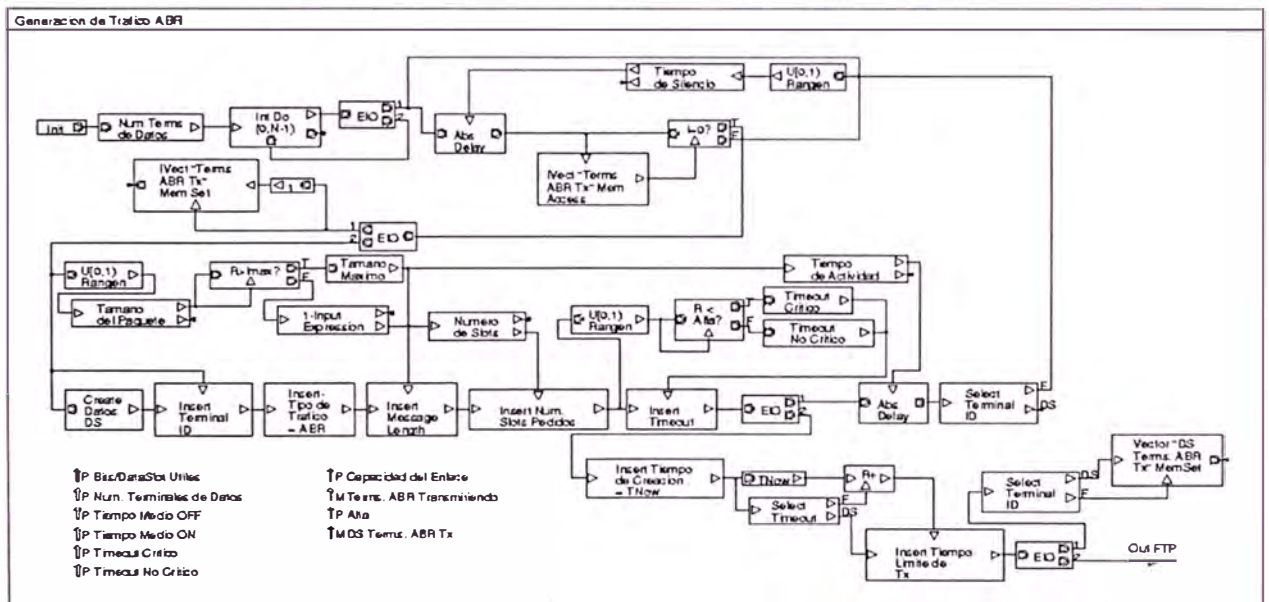


Figura 22 Modelo de generación de tráfico ABR

Una copia de la estructura "Datos DS" es colocada en un bloque de retardo durante un tiempo que representa el período de actividad, el cual es

calculado como el tiempo que se tarda en cursar todo el paquete a la velocidad del enlace. Al salir de este bloque de retardo se coloca la estructura en el bloque de retardo que simula el período de inactividad.

3.2.2. Bloque “Petición de Datos”

Cuando un terminal de datos entra en el período de actividad genera un paquete de longitud variable según una distribución de Pareto, luego realiza una petición a la estación base para que este le asigne los slots necesarios para cursar su información. Por lo tanto, la estructura “*Datos DS*” que ingresa a este bloque crea una estructura de datos denominada “*Petición*”, en ella se insertan los valores de los campos “*Terminal ID*”, “*Num. Slots Pedidos*” y “*Tiempo de Expiración*” necesarios para que la estación base determine la asignación de recursos. Se calcula el tiempo que debe esperar la petición para que sea enviada a la estación base, el cual ocurre al final del siguiente período de *sondeo* “*Polling Segment Period*”, para lo cual se coloca la estructura “*Datos DS*” en el bloque de retardo. Al salir del bloque de retardo la petición es enviada a la estación base a través de la memoria “*Petición*”.

La estructura “*Datos DS*” que ingrese a este bloque es utilizada también para fines estadísticos en el bloque “*Estadística de Datos Generados*”, el cual al final de la simulación calcula el total de paquetes “*críticos*” y “*no críticos*” enviados y la carga de datos ofrecida al sistema.

Según las características del tráfico ABR explicada en los capítulos anteriores, no se rechaza ninguna petición ABR debido a considerarse no sensible al retardo, por lo tanto, todas las peticiones se guardan en una cola

tiempo de finalización de la transmisión del tráfico generado por el terminal en función del último slot asignado por la estación base. También se indica, mediante la memoria “*Terms ABR Transmitiendo*”, que la información generada por el terminal ha sido transmitida en su totalidad y por lo tanto puede generar nuevo tráfico.

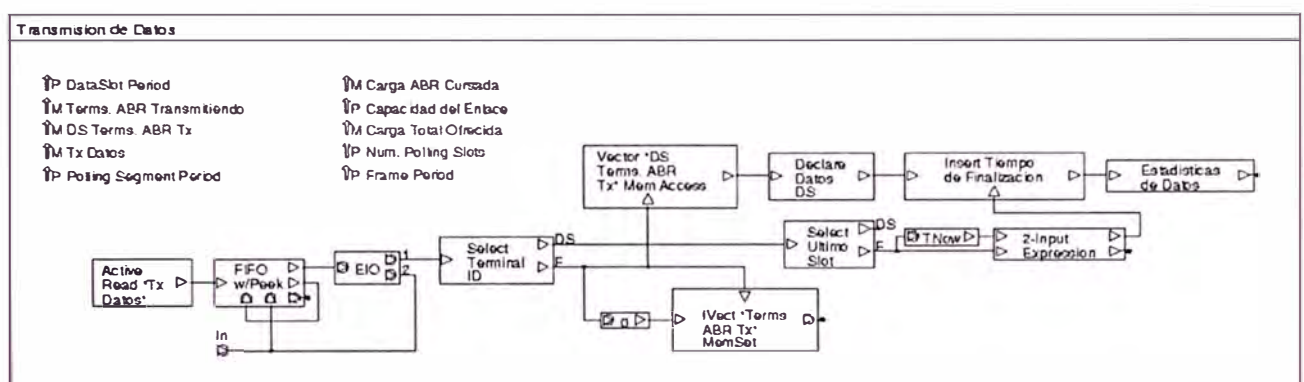


Figura 24 Modelo de transmisión de datos

También una copia de la estructura “*Datos DS*” es enviada al bloque “*Estadísticas de Datos*” para fines estadísticos. En este último bloque, al final de la simulación, se calcula el retardo medio de transmisión y la carga ABR cursada.

3.3. Modelo de la Estación Base

Debido a que el protocolo propuesto pertenece al grupo protocolos de asignación por demanda con control centralizado, la estación base es la parte del sistema que coordina y gestiona la asignación de recursos del enlace radioeléctrico a los terminales móviles cualesquiera sea el tráfico que estos generen. Según las características del protocolo propuesto explicadas en los capítulos anteriores, una vez que un terminal móvil es aceptado

dentro del árbol de conexión virtual, no tiene necesidad de entrar en contención para solicitar recursos ya que éste le es asignado, al menos en un valor mínimo, dependiendo del tipo de tráfico generado y de la cantidad de recursos disponible. La estación base se encarga de determinar en todo momento la cantidad de recursos disponibles y su distribución de acuerdo al tipo de petición realizada por los terminales móviles, así como también determina si un terminal móvil es aceptado dentro del árbol de conexión virtual.

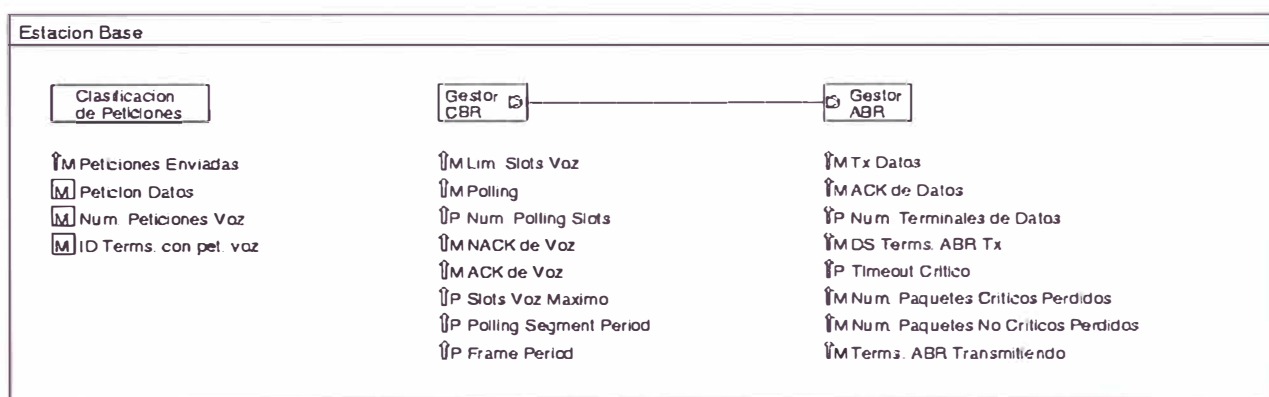


Figura 25 Modelo de la estación base

A continuación se describen los principales bloques que constituyen el modelo de la estación base.

3.3.1. Bloque “Clasificación de Peticiones”

Este bloque se encarga de clasificar las peticiones de los terminales móviles en función del tipo de servicio que solicitan “Voz” o “ABR”. Para las peticiones que solicitan servicio de voz se determina el número total de terminales que han realizado dicha petición en el presente período de sondeo “*Num. Peticiones de Voz*”, así como también se guardan en un

vector los ID's de los terminales "*ID. Terms. con pet. Voz*". Esto permitirá al gestor CBR atender cada petición de voz hasta el límite que impone la ventana de voz CBR. El resto de las peticiones serán rechazadas. Como esto último no ocurre para el caso de ABR, las peticiones de este tipo de servicio son almacenadas en una cola FIFO a través de la memoria "Petición Datos" hasta que sean atendidas por el gestor ABR.

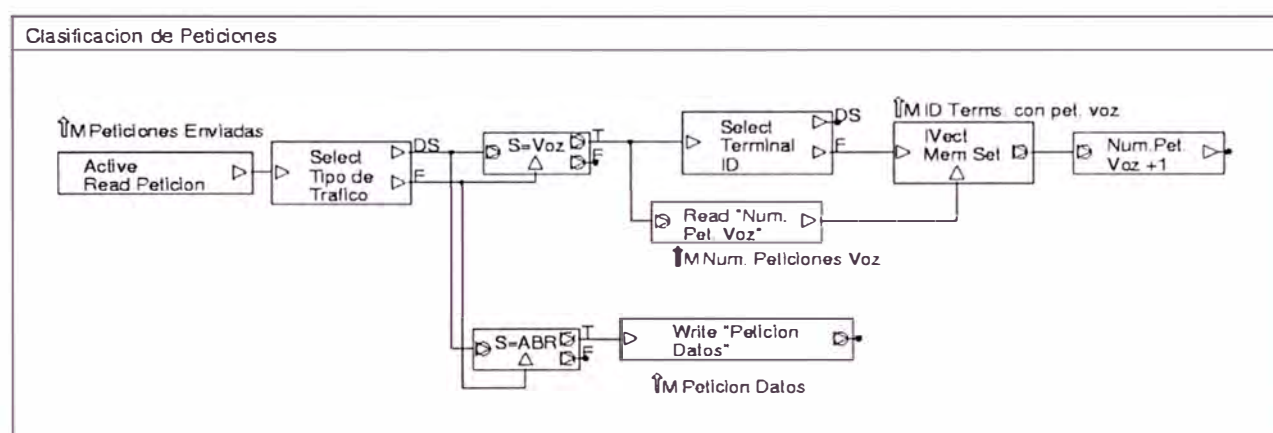


Figura 26 Modelo de clasificación de peticiones

3.3.2. Bloque "Gestor CBR"

A través de la memoria de tipo vector de enteros "*Polling*" el gestor CBR controla los slots asignados a las conexiones CBR. Al inicio de la simulación todos los campos del vector "*Polling*", cuyo tamaño es determinado por el parámetro "*Num. Polling Slots*", son inicializados a un valor -1 el cual indica que el slot no ha sido asignado. Cuando un slot es asignado a una conexión CBR se coloca en el "*Polling*" el valor del "*Terminal ID*" en la misma posición del slot asignado indicando de esta forma que dicho slot está ocupado hasta que finalice la duración de la llamada. El número máximo de slots CBR que se pueden asignar está en función del

tamaño máximo de la ventana de asignación para tráfico CBR, el cual depende del valor del parámetro “*Slots Voz Máximo*”. El tamaño actual de la ventana CBR se almacena en la memoria “*Lim. Slots Voz*”.

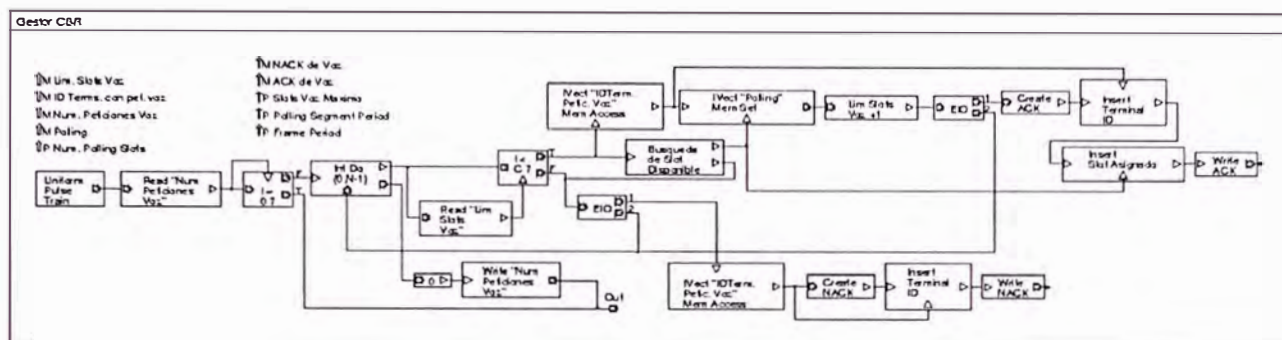


Figura 27 Modelo del gestor CBR

Dentro del gestor CBR se ejecuta un lazo que se repite tantas veces según el valor de la *memoria “Num. Peticiones Voz”*. Para cada petición primero se determina si la ha alcanzado el límite máximo de la ventana CBR; si es así, se rechaza la petición y se informa del mismo al bloque “*Petición de Voz*” de la fuente CBR a través de la memoria “*NACK de Voz*”.

Si por el contrario la memoria “*Lim. Slots Voz*” indica que no se ha alcanzado el límite de la ventana CBR, entonces se asigna el siguiente slot libre a la petición CBR, se incrementa el valor de la memoria “*Lim. Slots Voz*”, se fija el valor del “*Terminal ID*” en el vector “*Polling*” y se informa al bloque “*Petición de Voz*” que la petición ha sido aceptada a través de la memoria “*ACK de Voz*”.

3.3.3. Bloque “Gestor ABR” (con política de cola FCFS)

En este bloque todas las peticiones ABR son almacenadas en una cola FIFO. Luego, cada petición es atendida de acuerdo al orden que

mantienen en la cola. Dentro del bloque “*Comprueba Timeout*” se verifica si se ha sobrepasado el tiempo de expiración del paquete; si es así, el paquete es desechado y dependiendo si es un paquete “*crítico*” o “*no crítico*” se incrementa los valores de los contadores que al final de la simulación determinarán la cantidad de paquetes “*críticos*” y “*no críticos*” perdidos.

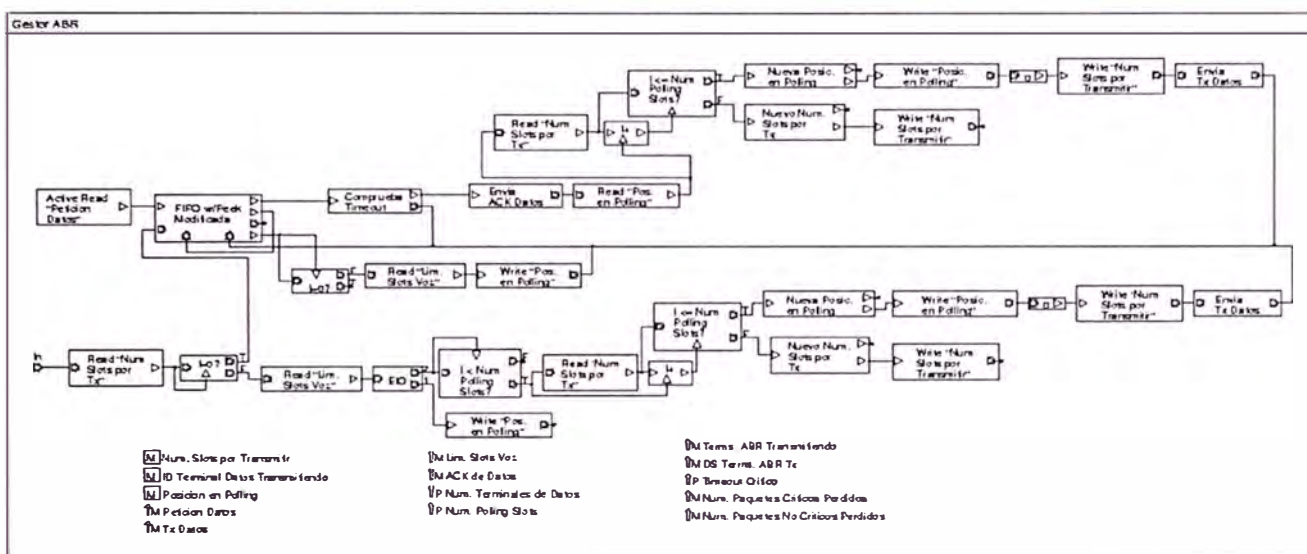


Figura 28 Modelo del gestor ABR (con FCFS)

Si por el contrario el tiempo de expiración no ha sido sobrepasado, se envía una estructura de datos denominada “*ACK de datos*” al bloque “*Petición de Datos*” indicando el ID del terminal y el primer slot asignado para el cálculo del inicio de la transmisión. Esto se realiza en el bloque “*Envía ACK Datos*”. Después, dependiendo del último slot disponible en el “*Polling*”, el cual es guardado en la memoria “*Posición en Polling*”, se calcula si todos los slots solicitados pueden ser asignados. Si es así, en el bloque “*Envía Tx Datos*”, se envía al bloque “*Transmisión de Datos*” una estructura a través de la memoria “*Tx Datos*” indicando el ID del terminal y el último slot asignado.

3.3.5. Bloque “Estadística de Pérdida de Paquetes”

Al final de la simulación se calculan los valores de las memorias “Num. Paquetes Críticos Perdidos”, “Num. Paquetes Críticos Enviados”, “Num. Paquetes No Críticos Perdidos” y “Num. Paquetes No Críticos Enviados” y con ellas se calculan en este bloque los valores del porcentaje de pérdida de paquetes “críticos”, “no críticos” y pérdida total de paquetes. Estos valores son recogidos por un punto de prueba “probe” de BONES DESIGNER que se coloca en la salida “Out” para realizar las gráficas de pérdidas de paquetes.

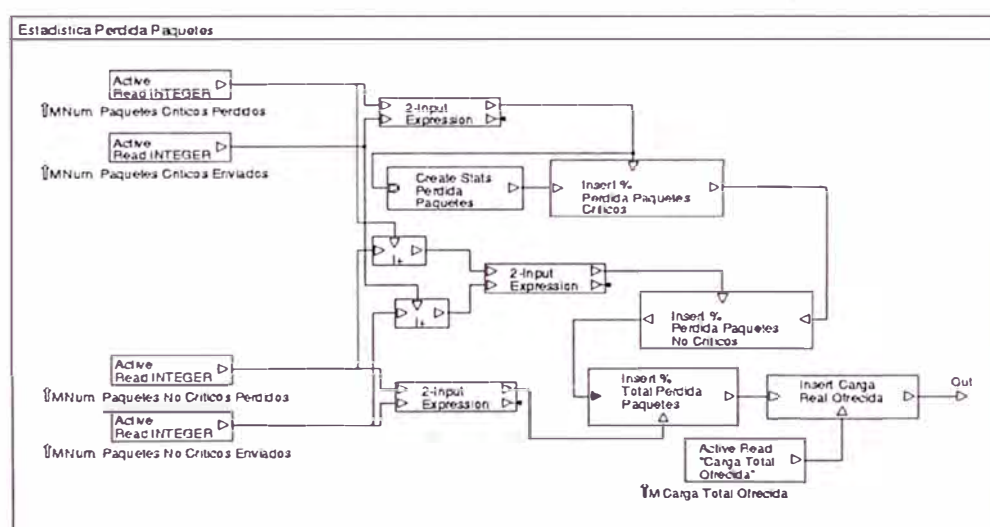


Figura 30 Modelo de estadística de pérdida de paquetes

3.3.6. Bloque “Estadística de Tráfico Ofrecido-Cursado”

Al final de la simulación se calculan los valores de las memorias “Carga CBR Ofrecida”, “Carga CBR Cursada”, “Carga ABR Ofrecida” y “Carga ABR Cursada” en los bloques “Fuentes CBR” y “Fuentes ABR” respectivamente. Estos valores representan al tráfico real tanto ofrecido

como cursado, es decir, el tráfico generado por todos los terminales de voz y datos, y el tráfico cursado por el sistema. Los parámetros “Carga de Voz” y “Carga de Datos”, los cuales están en función del parámetro “Carga Ofrecida”, solo son valores de referencia para calcular el número de terminales tanto de voz como de datos que generaran el tráfico real.

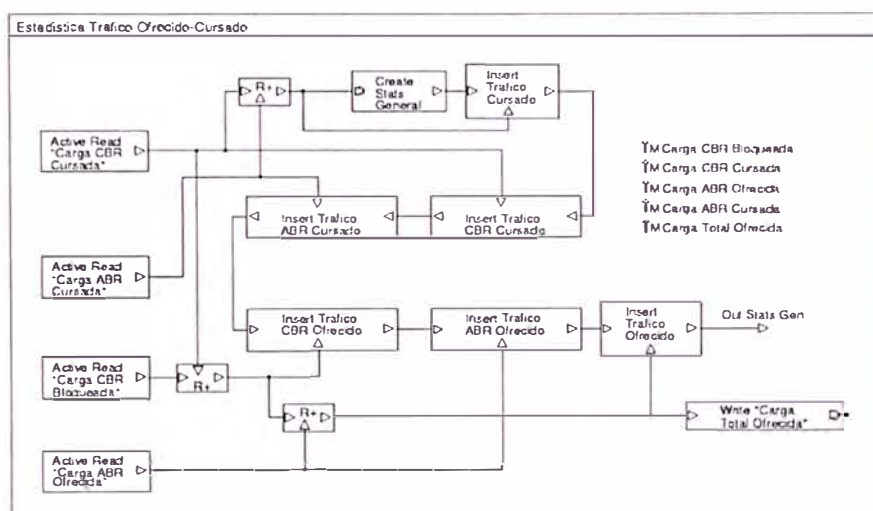


Figura 31 Modelo de estadística de tráfico ofrecido – cursado

En éste capítulo se ha descrito la funcionalidad de los diferentes bloques que han servido para modelar el protocolo MAC propuesto y, de ésta manera, simular su funcionamiento. Los resultados de la simulación serán analizados en el siguiente capítulo, confrontándose su comportamiento frente a un protocolo similar.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Los resultados de la simulación del protocolo propuesto ([35],[36],[37]) son comparados con los obtenidos para el protocolo de Raychaudhuri en [38]. En dicho artículo se evalúa el desempeño del protocolo D-TDMA con un modelo de datos más ajustado a la realidad, como lo es el tráfico generado por un proceso con características autosimilares. Debido a que el protocolo propuesto también utiliza este modelo para las fuentes de datos, así como la asignación dinámica de recursos propuesto por Raychaudhuri, es factible utilizar dichos resultados para determinar el nivel de rendimiento del protocolo propuesto. Es importante notar que aunque existan similitudes entre el protocolo propuesto y el de Raychaudhuri que nos permitan realizar comparaciones con sus curvas de desempeño, también existen grandes diferencias entre dichos protocolos, como el hecho de utilizar TDD (Protocolo propuesto) y FDD (Raychaudhuri). Como se podrá apreciar en este capítulo, esto último influye grandemente en los resultados del protocolo propuesto y se podría considerar que la comparación no es adecuada. No hemos encontrado en la literatura las curvas de rendimiento del protocolo de Raychaudhuri bajo la técnica TDD y

que utilicen las mismas características presentadas en el protocolo original bajo FDD [39].

4.1. Análisis de la Carga Ofrecida

La Figura 32 muestra las curvas de la carga generada por los terminales de ambos protocolos en estudio. En el eje horizontal se muestran los valores porcentuales de la carga ofrecida la cual es especificada como un parámetro del protocolo. Como se estudió en la Sección 2.3.9, de este parámetro se obtiene el número de terminales que generan la carga que realmente es ofrecida al protocolo. Dicha carga es graficada en el eje vertical. Tener en cuenta que en el cálculo del número de terminales se ha utilizado el factor 0.5 debido a que solo hemos simulado el enlace ascendente, de allí que la carga real ofrecida (eje vertical) sea aproximadamente la mitad de la mostrada en el eje horizontal. Estos valores no son exactos a la mitad debido a que son producto de la carga generada por los terminales de manera aleatoria. También, para fines de comparación, hemos aplicado el factor de 0.5 a la carga generada por los terminales en el caso del protocolo de Raychaudhuri puesto que éste protocolo genera carga durante los 12 ms que dura de la trama, mientras que el protocolo propuesto sólo durante, aproximadamente, la mitad (enlace ascendente).

Esto nos permite verificar que la carga ofrecida en ambos protocolos es prácticamente la misma a pesar de tener algunos parámetros con valores diferentes. Como ambos protocolos soportan la misma carga podemos comparar sus curvas de rendimiento y deducir de ellas la eficiencia del protocolo propuesto.

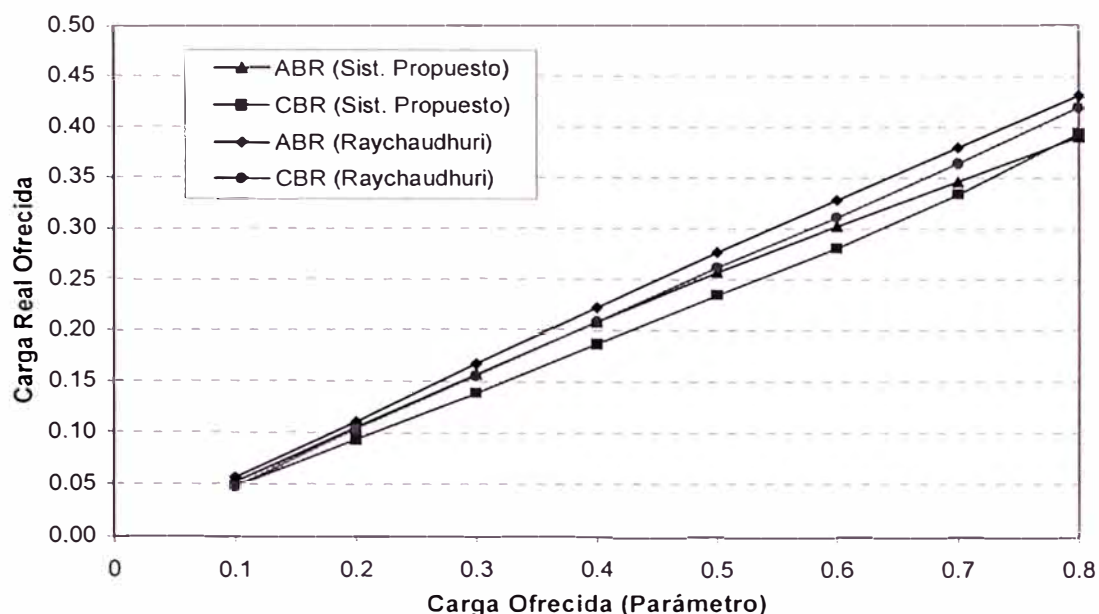


Figura 32 Comparativa de Carga Ofrecida

4.2. Análisis de la Carga Cursada

En la Figura 33 se observan las curvas que muestran la eficiencia de los protocolos al cursar la carga ofrecida para tres escenarios. Una curva es generada por el protocolo de Raychaudhuri utilizando un servicio de colas FCFS para el tráfico de datos, y las otras dos curvas son generadas por el protocolo propuesto utilizando los servicios de colas FCFS y TOE.

Comparando con la curva de referencia (en donde toda la carga ofrecida es cursada), se observa que hasta una carga del 50% se cursa prácticamente todo el tráfico ofrecido. Para valores mayores de carga ofrecida las curvas del protocolo propuesto tienden a un valor del 60% frente a un 65% del protocolo de Raychaudhuri. Esta última diferencia es debida a la mayor probabilidad de bloqueo que soportan las conexiones de voz en el protocolo propuesto, lo que produce mayores pérdidas. Esto se explicará en la siguiente sección.

Se observa también que, para el protocolo propuesto, el servicio TOE muestra una mejora en cursar la carga ofrecida debido a que es una técnica de colas con prioridad. La influencia de los servicios de colas se observará en las curvas de eficiencia para el tráfico de datos.

Por lo tanto, podemos notar que el protocolo propuesto muestra un buen comportamiento respecto al transporte de la carga ofrecida, teniendo en consideración que soporta diversos parámetros similares al protocolo de Raychaudhuri que lo ponen en desventaja. Esto se explicará en las siguientes secciones.

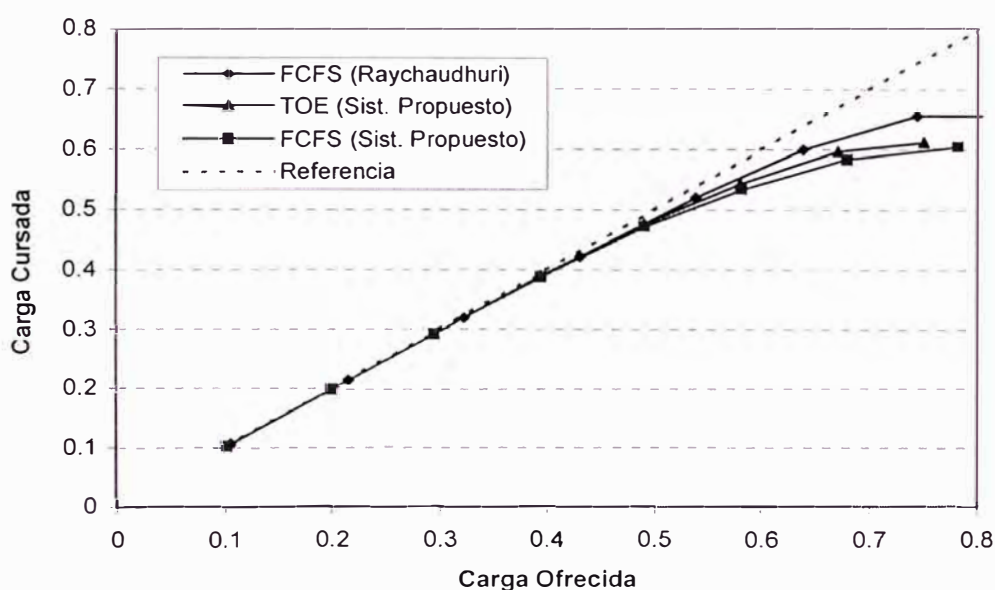


Figura 33 Tráfico cursado versus Carga ofrecida (voz + datos)

4.3. Análisis del Tráfico CBR

Definimos la probabilidad de bloqueo de la voz como el factor del número total de peticiones de voz rechazadas entre el número total de peticiones de voz solicitadas. La figura 34 muestra las curvas de probabilidad de bloqueo de la voz de los protocolos en estudio. Para el

protocolo propuesto se observa una subida abrupta en la región de 40%-50% frente a la región de 50%-60% del protocolo de Raychaudhuri. Esto es debido a que el número de terminales que generan tráfico de voz en el protocolo propuesto es poco más del doble del número de terminales de voz del protocolo de Raychaudhuri.

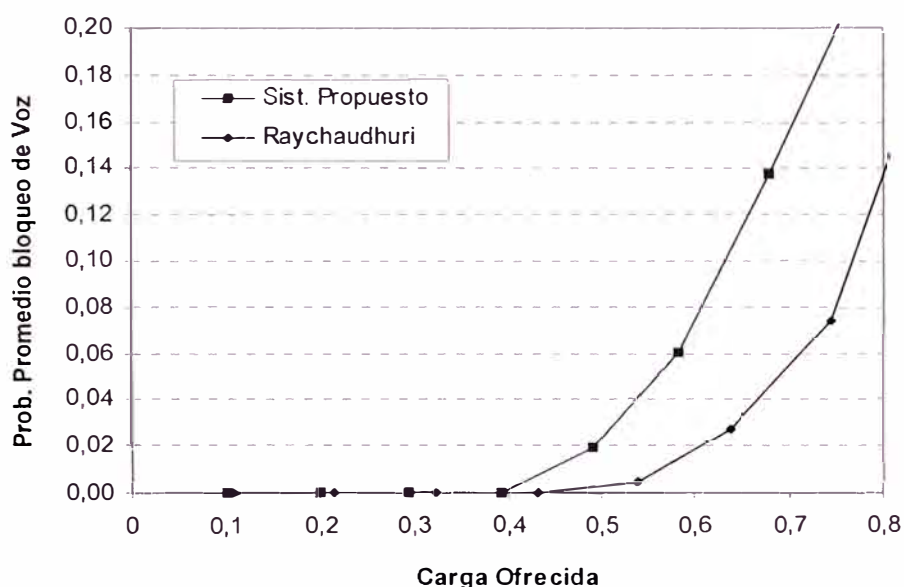


Figura 34 Probabilidad de bloqueo de voz vs. Carga ofrecida

Al tomar como referencia las curvas de desempeño del protocolo de Raychaudhuri para fines de comparación y teniendo en cuenta las diferentes características entre ambos protocolos, tuvimos que igualar las cargas ofrecidas en ambos protocolos, lo que obligó a utilizar un número mayor de terminales para el protocolo propuesto, generando por lo tanto mayor probabilidad de bloqueo para cargas altas. Por ejemplo, para una probabilidad de bloqueo de voz del 1% se obtiene un valor de carga ofrecida del 44% para el protocolo propuesto, frente al 56% del protocolo de

Raychaudhuri. Esta alta probabilidad de bloqueo debería ser reducido si se actuase sobre algún parámetro del sistema que afectase directamente sobre ésta.

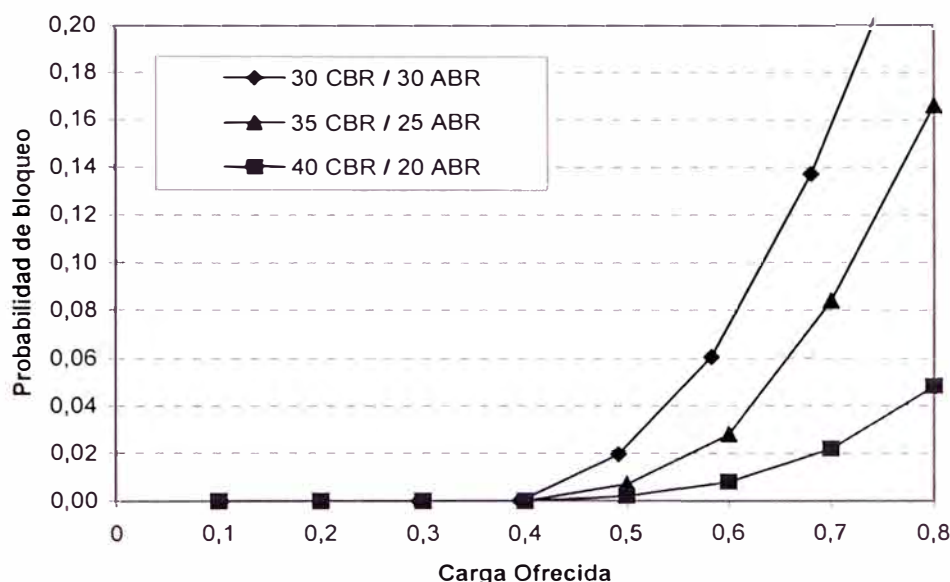


Figura 35 Prob. de bloqueo para diferentes tamaños de la ventana CBR

El principal parámetro que influye en mejorar la probabilidad de bloqueo es el tamaño de la ventana CBR. Aumentando el número de slots CBR mientras que disminuimos el número de slots ABR, para mantener constante el número total de slots, disminuye la probabilidad de bloqueo, como se muestra en la Figura 35. Sin embargo, las consecuencias de este aumento van en detrimento directo de las prestaciones del tráfico de datos, ya que si se mantiene constante el número de slots de la trama, habrían menos slots para cursar paquetes de datos.

Para generar mayor carga ofrecida, se utiliza un número mayor de terminales. Si además, utilizamos un número de terminales mayor que el utilizado por el protocolo de Raychaudhuri, entonces se genera un mayor

número de peticiones de conexión CBR. Por lo tanto, para cargas altas los recursos disponibles por el sistema, para conexiones CBR, se saturan rápidamente lo que produce un mayor número de conexiones bloqueadas. A pesar que existe un intervalo de tiempo (5 segundos) durante el cual una petición solicita insistentemente un recurso disponible, la saturación de los recursos CBR con conexiones de voz con duración media 120 segundos, produce un mayor tiempo de espera para acceder a un recurso hasta que se libere una conexión CBR. Este comportamiento se observa en la Figura 36. Definimos el retardo de acceso de la voz como el tiempo que transcurre desde que un terminal genera una petición solicitando un recurso CBR hasta que dicho terminal inicia la transmisión de la voz sobre el recurso que le ha sido asignada por la estación base.

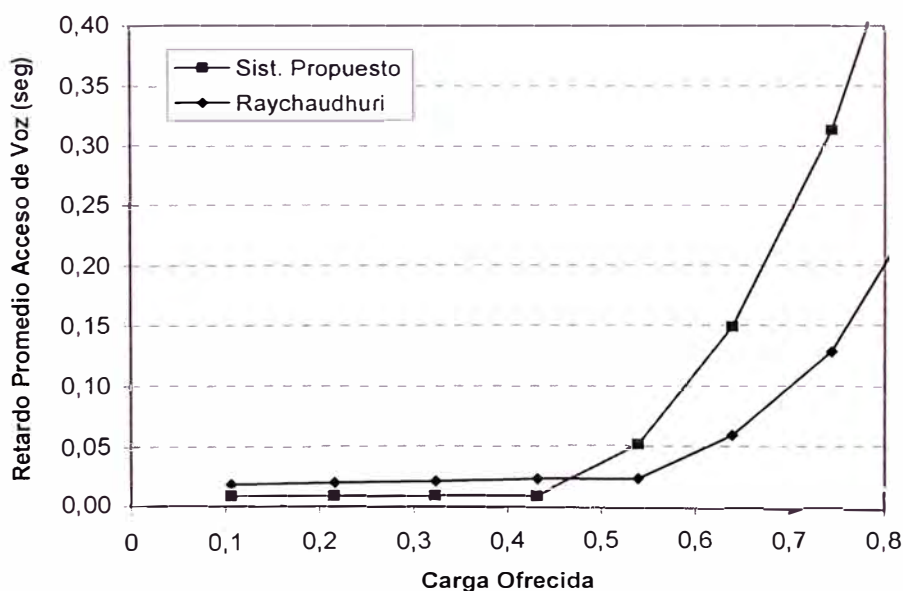


Figura 36 Retardo promedio acceso de voz vs. Carga ofrecida

Se observa que para cargas bajas, menores al 45%, el protocolo propuesto muestra mejor rendimiento frente al protocolo de Raychaudhuri con un retardo de 9 y 20 milisegundos, respectivamente. Esto es debido al efecto que produce las diferentes técnicas de resolución de peticiones que utilizan ambos protocolos (contención y sondeo) y a las diferencias en el diseño del protocolo. Para cargas altas este efecto pasa desapercibido porque es más fuerte el efecto que produce la saturación de los recursos para la asignación de peticiones de voz.

4.4. Análisis del Tráfico ABR

Definimos el porcentaje de pérdida de paquetes como el factor del número de paquetes perdidos entre el número de paquetes cursados (enviados). La Figura 37 muestra las curvas del porcentaje de pérdida de paquetes ABR para los protocolos en estudio. Se observa que para un valor de operación nominal del 50% las pérdidas de paquetes no críticos muestran un valor alrededor del 2% para ambos protocolos, mientras que para los paquetes críticos son de 20% para el protocolo propuesto y 15% para el protocolo de Raychaudhuri. Esta diferencia es debida a lo siguiente. Como el cálculo de los tiempos de ON y OFF está en función de la capacidad del enlace, y al tener el protocolo propuesto una capacidad del enlace seis veces mayor que el protocolo de Raychaudhuri, se generan mayores peticiones de datos a pesar de contar con el mismo número de terminales de datos en ambos protocolos.

La política de colas FCFS atiende las peticiones en el orden en que estas llegan sin importar su nivel de prioridad, el cual está en función del

tiempo de expiración del paquete, por lo tanto al tener mayor número de peticiones de datos los recursos del sistema se saturan rápidamente teniendo los paquetes que soportar mayores tiempo de espera. Esto puede ser soportado en forma adecuada por los paquetes no críticos pero no por los paquetes críticos, de allí la gran diferencia que muestran las curvas del protocolo propuesto frente al de Raychaudhuri para valores altos de carga ofrecida.

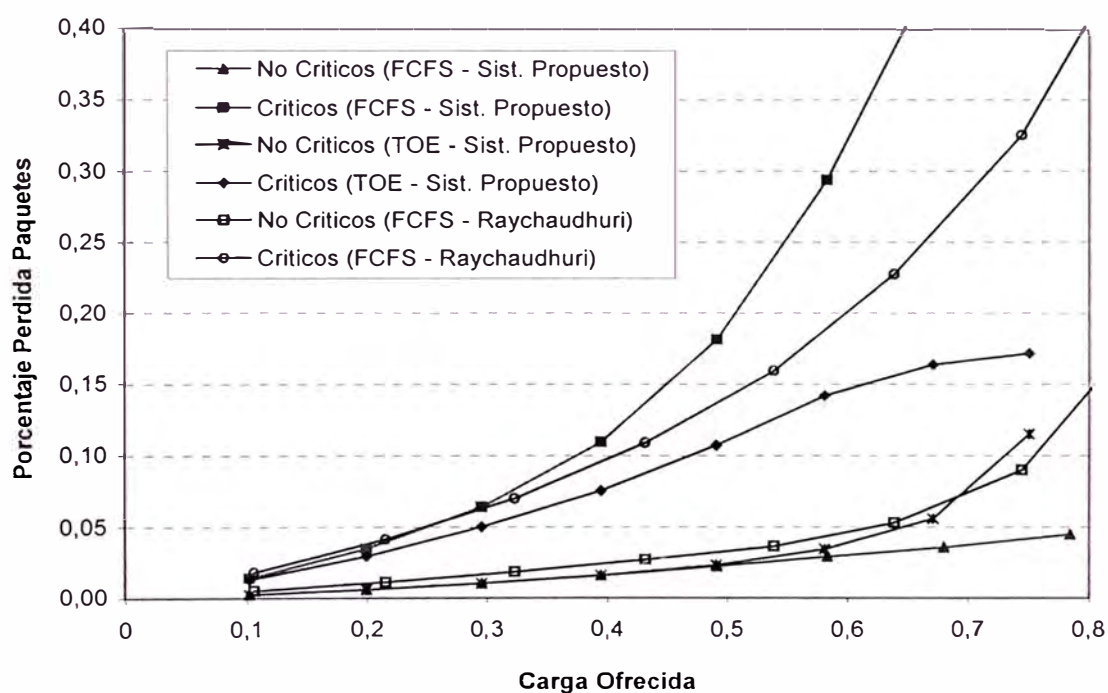


Figura 37 Porcentaje pérdida de paquetes vs. Carga ofrecida

También se observa que las curvas muestran una mejora muy notoria al utilizar TOE como política de colas para atender peticiones de datos. Esto es debido a que TOE atiende los paquetes en función del nivel de prioridad de los mismos. Esta mejora supera incluso las curvas del protocolo de Raychaudhuri con servicio de colas FCFS, lo que permitiría transportar

tráfico de datos multimedia sensibles al retardo de manera eficiente, como el tráfico VBR.

La tabla 10 muestra los valores de porcentajes de pérdida de paquetes para el punto de operación nominal del 50% de carga ofrecida.

	Protocolo Propuesto		Protoc. Raychaudhuri
	FCFS	TOE	FCFS
Paquetes Críticos	19,5%	11,5%	14,5%
Paquetes No Críticos	2,5%	2,5%	3,5%

Tabla 10 Comparación de porcentaje de pérdida de paquetes

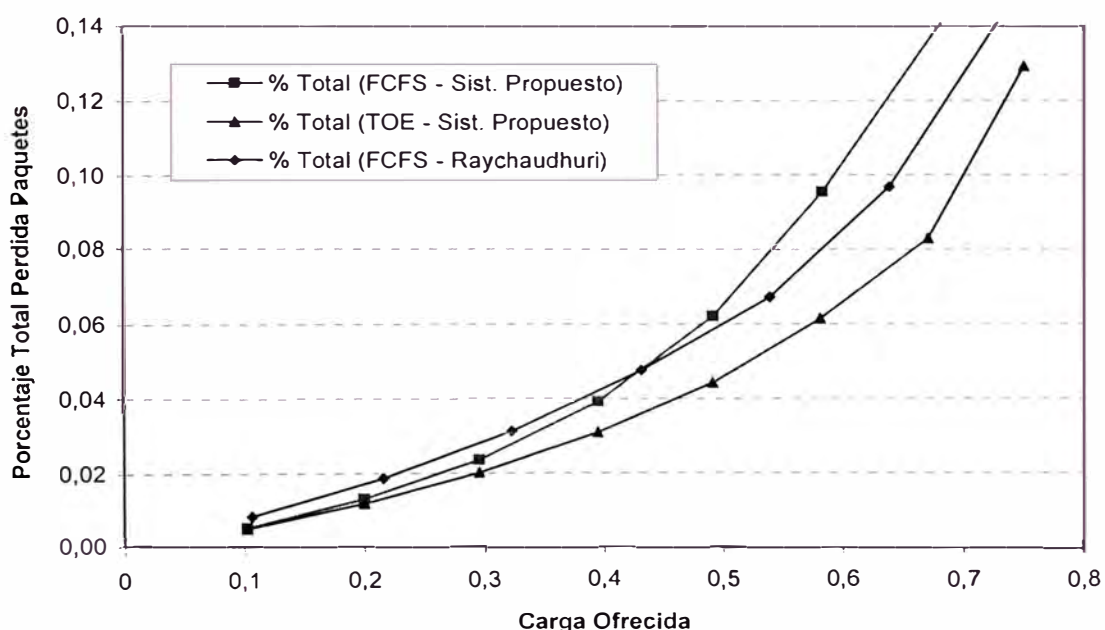


Figura 38 Porcentaje total pérdida paquetes vs. Carga ofrecida

La Figura 38 muestra las curvas del porcentaje total (críticos más no críticos) de pérdida de paquetes para los protocolos en estudio. Se observa que para cargas inferiores al 50% las curvas de pérdida total de paquetes del protocolo propuesto muestran un mejor rendimiento respecto a las curvas del protocolo de Raychaudhuri. Esto es debido a que en el protocolo

propuesto las peticiones no sufren colisiones y para cargas bajas este efecto es notorio. Aún para cargas altas el porcentaje total del protocolo propuesto muestra valores cercanos al protocolo de Raychaudhuri.

Definimos el retardo de transmisión de los paquetes de datos como el tiempo que transcurre desde que el terminal móvil solicita una petición de recursos ABR hasta el inicio de la transmisión de los paquetes, después que la estación base asigna al terminal móvil los recursos disponibles. El mayor tiempo de espera que soportan las peticiones de datos ante una elevada carga ofrecida se ve plasmado en las curvas de la Figura 39, en donde se muestra el retardo promedio de transmisión total (paquetes críticos y no críticos). Para una carga ofrecida del 50%, los retardos superan los 50 milisegundos que es el valor límite para transmitir un paquete crítico (según los parámetros de la simulación), por lo tanto para cargas mayores al 50% el aumento del retardo de transmisión es debido principalmente al retardo producido por los paquetes no críticos, como se observa en las curvas de la Figura 40. Esto se nota mucho más cuando se utiliza una política de colas TOE, debido a que la misma obliga a los paquetes no críticos a colocarse al final de la cola y por consiguiente son atendidos siempre al último mientras exista algún paquete crítico en cola, lo que aumenta mucho más los valores de retardos.

Las curvas de retardo de transmisión de datos merecen un comentario adicional. Para valores de carga menores al 50% se observa que el protocolo propuesto presenta menores retardos de transmisión de datos, sin importar en esencia la política de colas que se utilice. Al igual que para el

retardo de acceso a la conexión de voz, mostrado en la Figura 39, esto es debido a las diferentes técnicas de resolución de peticiones que utilizan ambos protocolos (contención y sondeo).

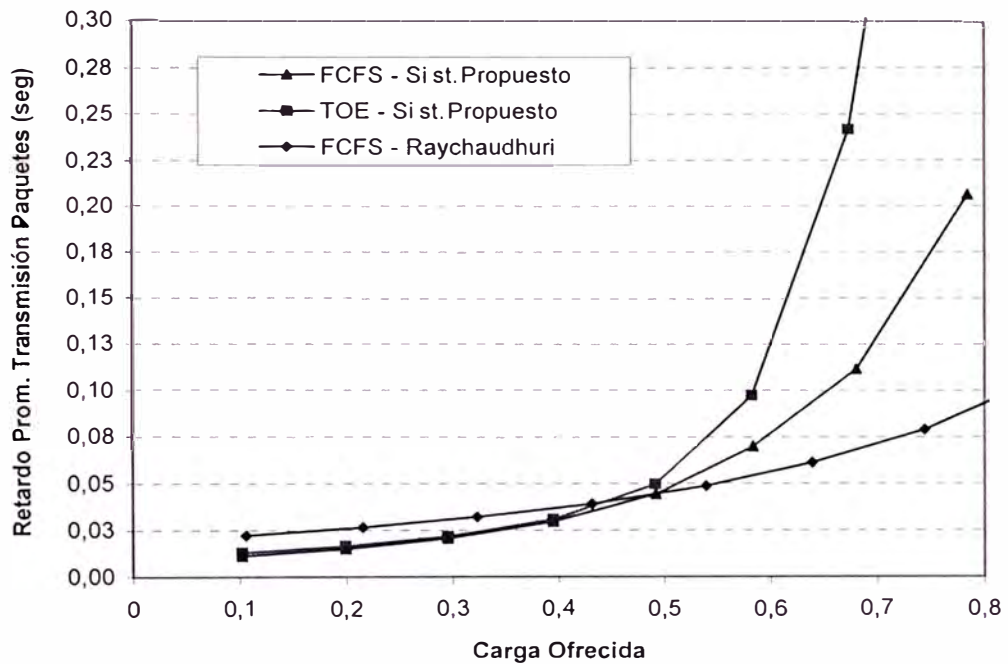


Figura 39 Retardo promedio transmisión paquetes (Total)

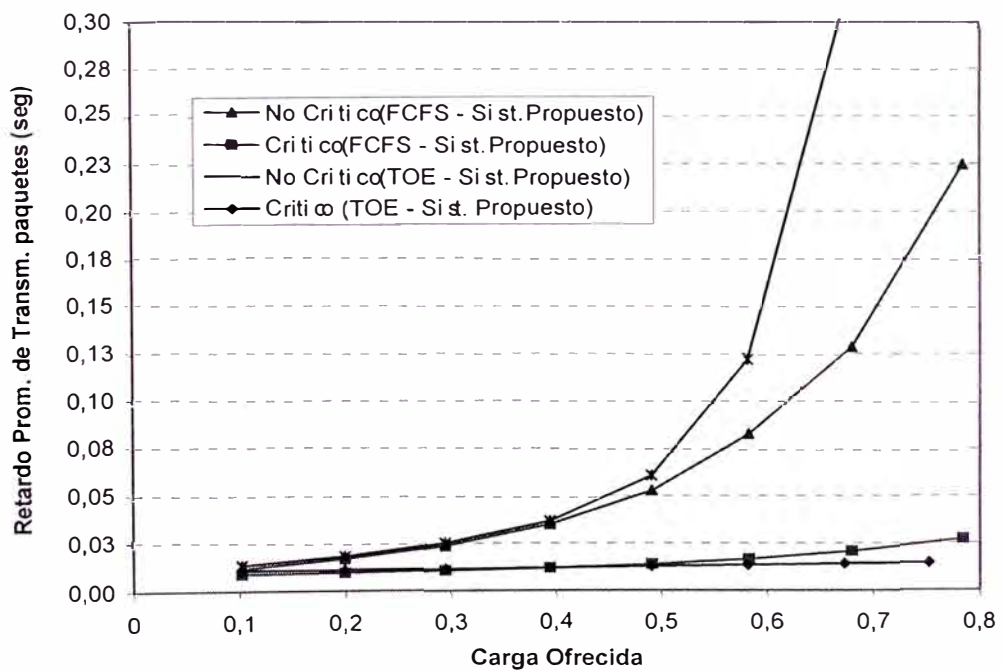


Figura 40 Retardo promedio transmisión paquetes (desagregado)

CONCLUSIONES

La era de las comunicaciones inalámbricas ha empezado y probablemente en un futuro muy próximo se transformará en la era de las comunicaciones inalámbricas de banda ancha. Wireless ATM es una tecnología emergente que pretende poseer todas las capacidades requeridas para proporcionar exitosamente una adecuada plataforma de red para los sistemas inalámbricos de banda ancha. Las capacidades básicas de ATM tales como multiservicio, capacidades multimedia, aplicación a un amplio rango de servicios sin importar su ancho de banda, forman una sólida base para los servicios omnipresentes. Esto hace de ATM una única base tecnológica para redes inalámbricas de banda ancha.

En esta tesis hemos presentado una nueva propuesta de protocolo MAC para redes de comunicación multimedia de banda ancha. Han sido detallados los principales criterios de diseño a nivel MAC, y algunos parámetros dependientes de la Capa física han sido propuestos de forma general. El tomar las principales ventajas de los protocolos propuestos en su momento por Acampora y Raychaudhuri nos permite presentar un protocolo más relacionado con su aplicación física al contener parámetros vinculados fuertemente con la forma de envío de los paquetes al ambiente inalámbrico.

Podemos resumir como principales puntos de aportación de la presente tesis los siguientes:

- La eficiencia del protocolo propuesto es evaluada mediante modelos de tráfico que guardan mayor relación con el tráfico real. Dichos modelos son las fuentes ON-OFF con distribuciones de Pareto en lugar de la tradicional distribución de Poisson, que no se ajustan a la realidad, especialmente a nivel de fuentes que generan tráfico de datos.
- La implementación de la técnica TDD en lugar de la FDD para los enlaces ascendente y descendente, lo que permite optimizar el uso del escaso y costoso recurso radioeléctrico.
- La resolución de solicitudes de recursos de los terminales móviles mediante el método de sondeo (polling) en lugar de contención, lo que permite ahorrar ancho de banda y reducir los retardos.
- El estudio de los parámetros de la capa Física y Red que influyen sobre el diseño del protocolo propuesto.

Del análisis de los resultados de la simulación podemos concluir que el protocolo propuesto muestra un buen rendimiento pese a la fuerte limitación debida al uso de la técnica TDD frente al protocolo de Raychaudhuri. Notamos claramente que no existe una dependencia entre la asignación de recursos a los diferentes tipos de tráfico, como si lo hay en el protocolo de Raychaudhuri. Esto es debido a la ventaja de utilizar el método de sondeo en lugar de contención. Dicha ventaja nos permite ver que el mejor rendimiento que puede ofrecer el protocolo propuesto depende del

número de terminales de voz para tráfico CBR y del nivel de *burstiness* de los terminales de datos para el tráfico ABR.

Como vimos, utilizar el método de sondeo permite asignar un recurso de petición fija a cada terminal que es aceptado dentro del árbol de conexión virtual. Esta última propuesta permite subir a las capas OSI superiores, específicamente a la Capa de Red, la congestión y el retardo que producen los eventos de traspaso.

Podemos plantear como nuevas metas las siguientes:

- La posibilidad de mejorar los resultados obtenidos mediante algunas modificaciones del protocolo propuesto, y la evaluación del grado de influencia que realizan las capas OSI adyacentes que aun no han sido estudiados, como son la Capa Física y la Capa de Red, según las características planteadas para soportar el diseño del protocolo MAC propuesto.
- La eficiencia de la trama puede ser mejorada ajustando la cantidad de bits de los tonos piloto en función de las características específicas de la Capa Física. Podemos también utilizar un solo tono piloto para un conjunto de slots que transmiten celdas ATM hacia o desde un mismo terminal de datos.
- Durante la simulación, se ha asumido un tamaño fijo para los enlaces ascendente y descendente. Una mejora sustancial del protocolo podría ser el considerar dinámico el límite entre los enlaces ascendente y descendente en función del tráfico generado en ambas direcciones. Esto

nos permitiría, en determinados momentos, utilizar un mayor número de slots.

- Durante la etapa de resolución de peticiones (Polling Segment Period), existe un desperdicio de ancho de banda al asignar un slot a cada terminal de datos debido a que los mismos no necesitan una conexión permanente como los terminales de voz. Basado en esto, podemos mejorar el rendimiento y la eficiencia del protocolo propuesto utilizando el método de sondeo para peticiones CBR y el método de contención para peticiones ABR.
- Debido a la naturaleza de las conversaciones de voz, la ocupación del medio con actividad vocal es aproximadamente del 50%, mientras que la otra mitad del tiempo está compuesta de silencios entre frases, palabras e incluso sílabas. Si se dispone de un equipo que realice la detección de la actividad de la voz, se pueden aprovechar estos silencios para transportar paquetes de datos. De esta manera, también podríamos aumentar el tamaño de la ventana CBR y mejorar la eficiencia del protocolo con respecto al tráfico de voz.

Finalmente, demostrada la adecuada eficiencia que muestra el protocolo propuesto podemos liberarlo de toda dependencia del protocolo de Raychaudhuri para poder explotar al máximo las ventajas que presenta y obtener mejores curvas de eficiencia realizando los cambios sugeridos.

ANEXO A HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN

La complejidad de las redes de comunicación ha crecido considerablemente durante las últimas décadas. El uso ampliamente extendido de las redes de área local y de las nuevas tecnologías tales como ATM, Frame Relay, SMDS, y sistemas de comunicación personal están creando nuevos problemas para los administradores y diseñadores de redes de telecomunicación. La sofisticación de las redes de comunicación actual incrementa el tiempo y el esfuerzo requerido para su análisis. Sin embargo, los ordenadores pueden ayudar en el diseño y administración de las redes de comunicación. La simulación juega un papel importante en el análisis y diseño asistido por ordenador de redes de comunicación.

Un gran conjunto de conocimientos han sido desarrollado en las áreas técnicas y metodológicas para la simulación de redes de comunicación. Producto de ello, un número de herramientas comerciales han sido desarrolladas y son ampliamente usadas para simular una variedad de sistemas, imponiéndose como norma el lema: "simular antes de comprar o construir".

A.1 Tipos de software de comunicación

Existen tres principales tipos de software para simular redes de comunicación [40]

- Lenguaje de simulación de propósito general
- Lenguaje de simulación orientado a comunicaciones
- Simulador orientado a comunicaciones

Un *lenguaje de simulación de propósito general* es un paquete de simulación que es general en naturaleza, pero puede tener características especiales para comunicaciones tales como módulos explícitos para Ethernet o Token Ring. Ejemplo de este tipo de lenguajes de simulación son Arena, BONES DESIGNER, GPSS/H, MODSIM II, SES/workbench, SIMAN/Cinema V, SIMSCRIP II.5, y SLAMSYSTEM (solo BONES DESIGNER y SES/workbench tienen módulos de comunicación). Un modelo dentro de este tipo de software se desarrolla escribiendo un programa (empleando sintaxis o gráficos) usando modelos construidos dentro del lenguaje, los cuales incluyen entidades (mensajes) atributos (tipo de mensaje o destino), recursos (nodos o enlaces), y colas (buffers). La principal ventaja de este tipo de lenguaje es su habilidad para modelar casi cualquier clase de redes de comunicación, sin importar su complejidad. Una posible desventaja de este tipo de lenguaje es la necesidad de experiencia en programación y posiblemente el empleo de mucho tiempo en la codificación y depuración que está asociado con el modelado de redes complejas.

Un ***lenguaje de simulación orientado a comunicaciones*** es aquella que está específicamente orientada hacia redes de comunicaciones – OPNET Modeler es uno de estos paquetes. Las ventajas son posiblemente reducir el tiempo de programación y la construcción de modelos orientados hacia los sistemas de comunicación.

Un ***simulador orientado a comunicaciones***, en su forma más básica, es un paquete de simulación que permite simular una red en una clase específica de redes de comunicación sin programación alguna. Ejemplos de este tipo de software son COMNET III, L-NET II.5, y NETWORK II.5. La red particular de interés (en el dominio del paquete) es seleccionado para la simulación eligiendo ítems desde menús, llenado cajas de diálogos (forms), y mediante el uso de gráficos. Las construcciones de modelos típicos para un simulador LAN son tipos de LAN (Ethernet, token ring, etc.) estaciones en la LAN (PCs o workstations), dispositivos de interconexión LAN (bridges y routers), y generadores de tráfico (mensajes). La principal ventaja de un simulador es que el tiempo empleado para desarrollar la simulación puede ser considerablemente menor que para un lenguaje de simulación. Esto puede ser muy importante dado el limitado tiempo que existe en entorno empresarial.

Otra ventaja es que estos simuladores tienen construidos modelos cercanamente relacionados a los componentes de una red de comunicación, una característica muy deseable para algunas personas como los administradores de red. También, las personas sin conocimientos de

programación y aquellos quienes solo ocasionalmente usan simulación a menudo prefieren simuladores debido a la facilidad de su uso.

La principal desventaja de los simuladores básicos es que ellos están limitados a modelar solo aquellas configuraciones de red permitidas por los bloques que ya vienen contruidos dentro del paquete. Así, si un sistema de comunicación tiene alguna característica única, tendrían que ser modeladas de una manera aproximada cuando se usan ciertos simuladores. Existen, sin embargo, varios simuladores que permiten modificar los modelos existentes dentro del paquete o construir nuevos modelos, con lo cual incrementa su flexibilidad.

A.2 BONES DESIGNER

Block Oriented Network Simulator (BONES) DESIGNER es un lenguaje de simulación de propósito general orientado a gráfico que contiene muchas características para el modelado de redes de comunicación. Los principales bloques contruidos son estructuras de datos y diagramas de bloques. Para construir un modelo en DESIGNER, uno primero define una estructura de datos que corresponda aproximadamente a un mensaje y sus campos de datos asociados. Luego el usuario desarrolla un diagrama de bloques que describe como la estructura de datos fluye a través de la red. Un diagrama de bloques, el cual puede ser jerárquico, es un conjunto de bloques conectados por segmentos de línea. Un bloque puede ser uno de las más de 300 primitivas disponibles en DESIGNER (por ejemplo, para manipular un campo de la estructura o para generar tráfico), un modulo opcional (por ejemplo, ethernet o token ring), o un bloque desarrollado por el

usuario desde otros bloques disponibles. Los detalles correspondientes a una estructura de datos o un bloque son especificados a través de cajas de dialogo. Después que una simulación ha sido ejecutada, un usuario puede realizar reportes de resultados a su gusto que son mostrados en forma de gráficos o también disponibles mediante reportes numéricos.

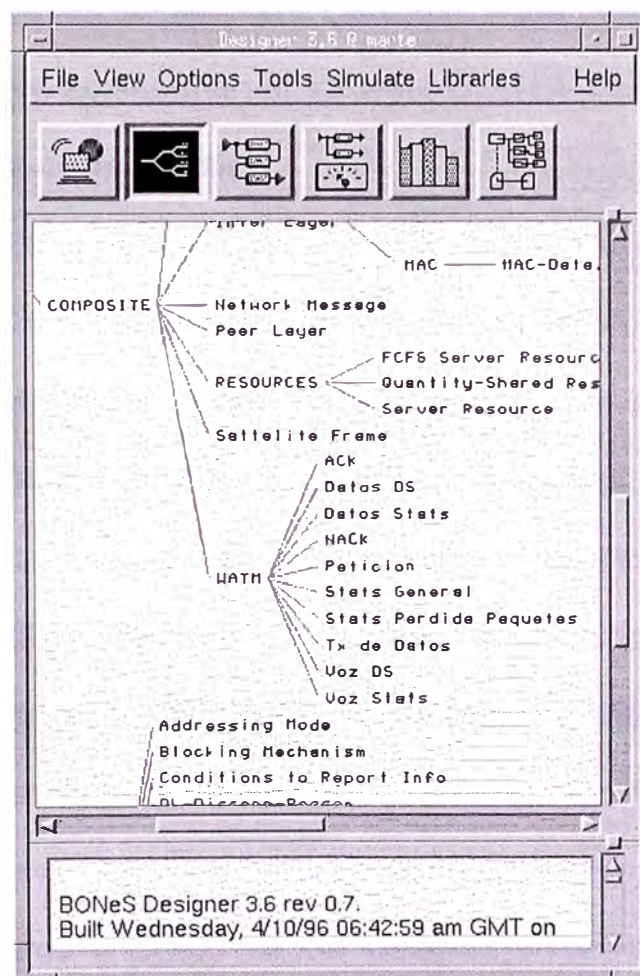


Figura 41 Interfaz de usuario de BONES DESIGNER

Para realizar una simulación en BONES DESIGNER básicamente se tiene que realizar los siguientes pasos:

Crear una librería en el cual se almacena todo el trabajo de la simulación.

Diseñar las estructuras de datos para el modelo a simular con el Data SE.

- Construir el diagrama de bloques del sistema a simular usando el Block Diagram Editor.
- Crear y ejecutar la simulación usando el Simulation Manager.
- Evaluar los resultados de la simulación a través del Post Processor.

A continuación describiremos brevemente algunos de los componentes claves del software Designer. Para mayor referencia consultar los manuales que acompañan al software BONES DESIGNER.

A.2.1 Data Structure Editor

Este editor permite crear las estructuras de datos para un modelo específico. Las estructuras de datos tienen un número arbitrario de campos y son definidos jerárquicamente. Cada campo puede ser de tipo simple (por ejemplo, un entero), un tipo set, u otra estructura de datos. Las estructuras de datos se definen antes de construir el diagrama de bloques de la simulación. El diseño de esas estructuras de datos típicamente se centra en las necesidades de la simulación. Durante la simulación, diversos bloques (por ejemplo, fuentes de tráfico) generan instancias de la estructura de datos necesaria, inicializa los valores de los campos, y procesan las estructuras de datos de acuerdo a como se ha definido en el editor de diagrama de bloques.

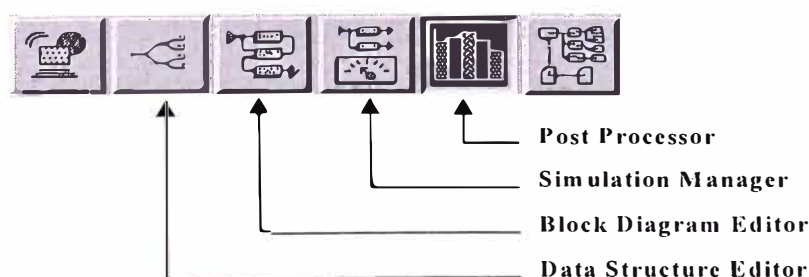


Figura 42 Componentes claves del BONES DESIGNER

A.2.2 Block Diagram Editor

Permite construir gráficamente el modelo del sistema a simular. Se seleccionan bloques de las librerías de Designer, se colocan en el área de diseño, y se conectan según las funciones del sistema que se desea definir. Esto al final es denominado un módulo. Luego se pueden combinar varios módulos para construir el modelo del sistema. Muchos módulos en Designer son representados gráficamente por un símbolo rectangular (bloque) con un nombre (o etiqueta) en el medio. Un modulo puede tener cero o más puertos de entrada y salida a sus lados.

Designer usa un diagrama de bloques de flujo de datos jerárquico como paradigma de modelado para representar sistemas. Para construir un modelo, se especifica la estructura de las entidades que fluirán en el sistema (tales como las estructuras de datos de paquetes o mensajes), las reglas que gobiernan el flujo de las estructuras de datos (funciones del protocolo), la topología del sistema, y el tráfico.

A.2.3 Simulation Manager

Permite crear, editar, y controlar la ejecución de las simulaciones. Antes de ejecutar una simulación, el cual es supervisado por el Simulation Manager, se especifica los valores para todos los parámetros (tales como tasas de tráfico, tamaño del buffer, y velocidad de transmisión), se conectan los "probes" al modelo en los puntos donde se desea recoger datos durante la simulación, y luego se indica si la simulación es ejecutada localmente o en múltiples procesadores en la red. Designer verifica errores, traduce el modelo a una forma adecuada para la simulación, y guarda la definición del

modelo en la librería creada por el usuario para la simulación. Luego Designer ejecuta una simulación manejada por eventos del modelo de la red y guarda los resultados de la simulación en la misma librería.

A.2.4 Post Processor

Permite mostrar y analizar los resultados de la simulación. Medidas estadísticas - tales como promedios o varianzas- o medidas de rendimiento –tales como eficiencia o retardo- pueden ser calculados y mostrados gráficamente o mediante listados. Los resultados de múltiples simulaciones del mismo modelo pueden ser graficados como una función de los parámetros de la simulación –tales como la carga o tamaño de la red.

ANEXO B
VARIABLES Y BLOQUES DE LA SIMULACIÓN

Nombre de la Estructura	Nombre de los Campos	Comentario
ACK	Terminal ID	Indica al terminal que se le ha asignado recursos en la trama
	Slot Asignado	
	Tipo de Tráfico	
Datos DS	Terminal ID	Mantiene información del terminal de datos que solicita un recurso a la estación base
	Message Length	
	Tiempo de Creación	
	Tiempo de Transmisión	
	Tiempo Limite de Tx	
	Num. Slots Pedidos	
	Tipo de Tráfico	
Timeout		
Datos Stats	Retardo Total	Guarda información para el cálculo de estadísticas de los terminales de datos
	Retardo Crítico	
	Retardo No Crítico	
	Carga Real Ofrecida	
NACK	Terminal ID	Negación de Petición
Petición	Num. Slots Pedidos	Estructura a través de la cual el terminal solicita una petición a la estación base
	Terminal ID	
	Tiempo de Expiración	
	Tipo de Tráfico	

Tabla 6 Estructura de Datos y Bloques de la Simulación

Nombre de la Estructura	Nombre de los Campos	Comentario
Stats General	Tráfico Ofrecido	Guarda información para el cálculo de estadísticas acerca del tráfico ofrecido y cursado
	Tráfico Cursado	
	Tráfico CBR Ofrecido	
	Tráfico ABR Ofrecido	
	Tráfico CBR Cursado	
	Tráfico ABR Cursado	
Stats Pérdida Paquetes	% Pérdida Paquetes Críticos	Guarda información para el cálculo de estadísticas de pérdida de paquetes
	% Pérdida Paquetes No Críticos	
	% Total Pérdida Paquetes	
	Carga Real Ofrecida	
Tx de Datos	Terminal ID	Posición del slot en que un terminal de datos inicia su tx.
	Ultimo Slot	
Voz DS	Terminal ID	Mantiene información del terminal de voz que solicita un recurso a la estación base
	Duración de la Llamada	
	Tiempo de Creación	
	Tiempo de Finalización	
Voz Stats	Tiempo Medio de Acceso	Guarda información para el cálculo de estadísticas de los terminales de voz
	Probabilidad de Bloqueo	
	Carga Real Ofrecida	

Tabla 6 Estructura de Datos y Bloques de la Simulación (continuación)

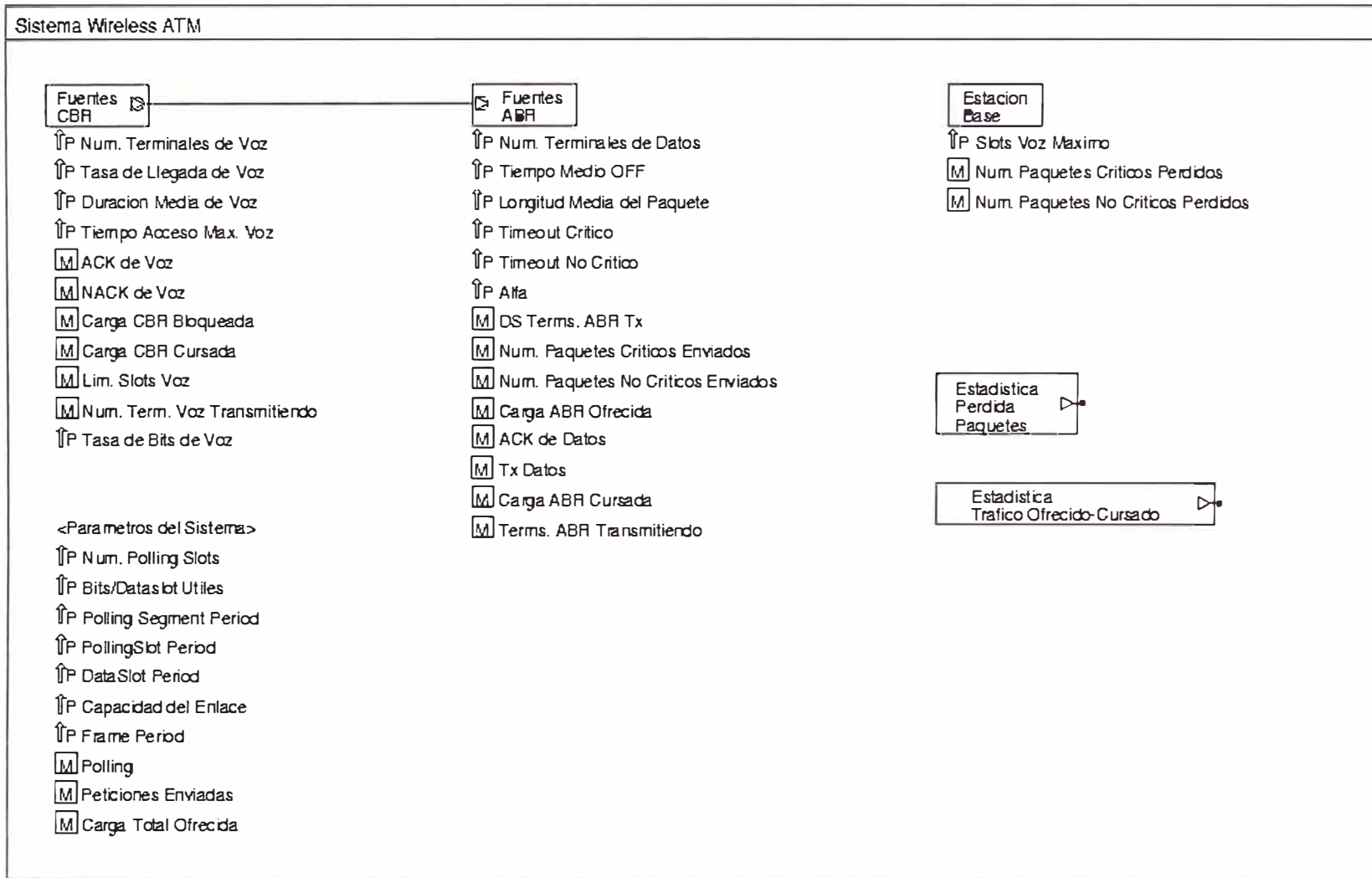


Figura 43 Sistema Wireless ATM

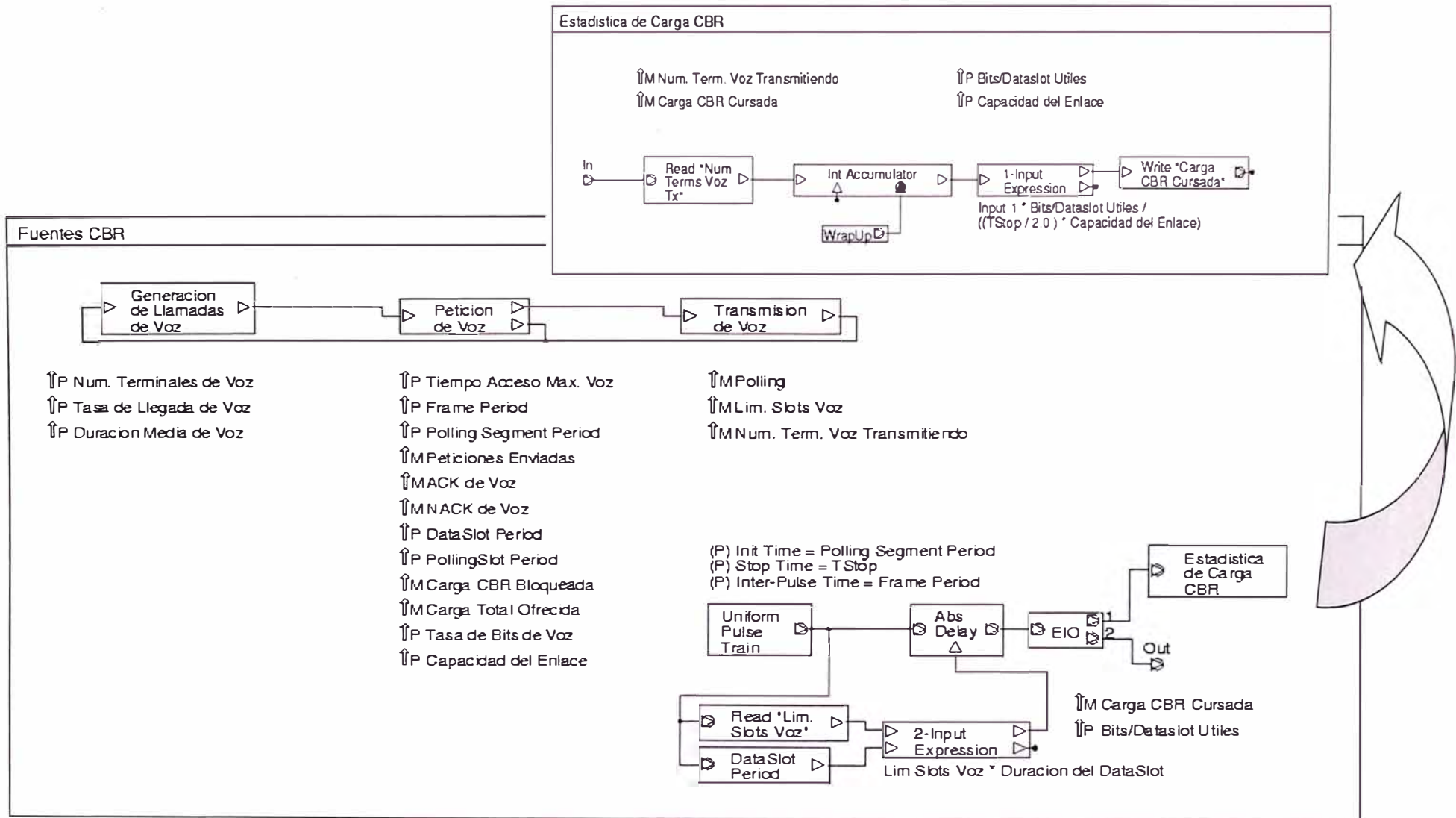


Figura 44 Fuentes CBR en detalle

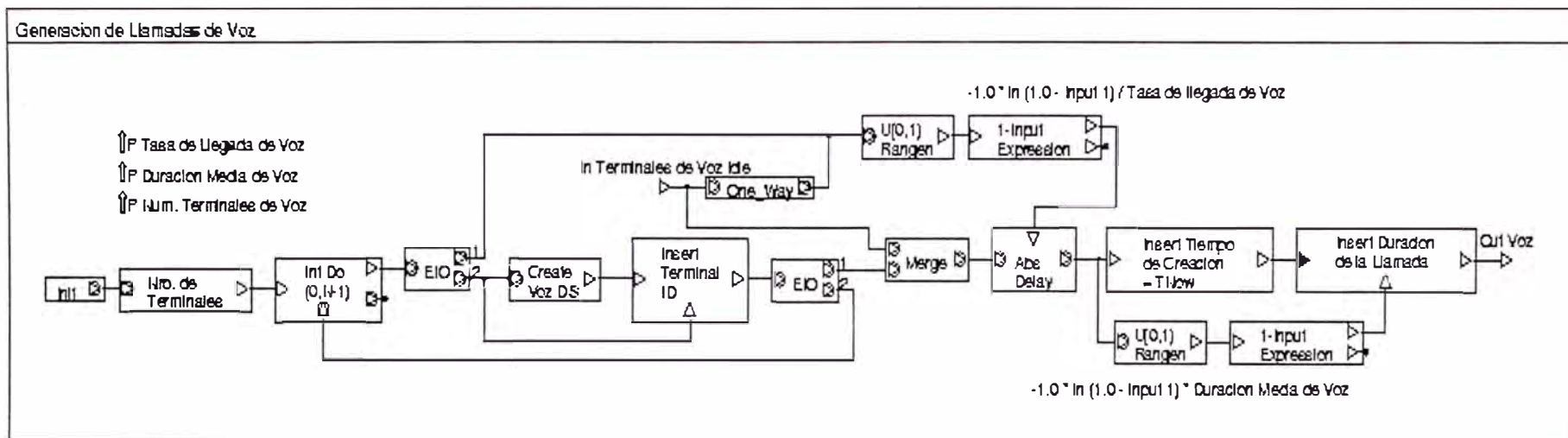


Figura 45 Generación de Llamadas de Voz

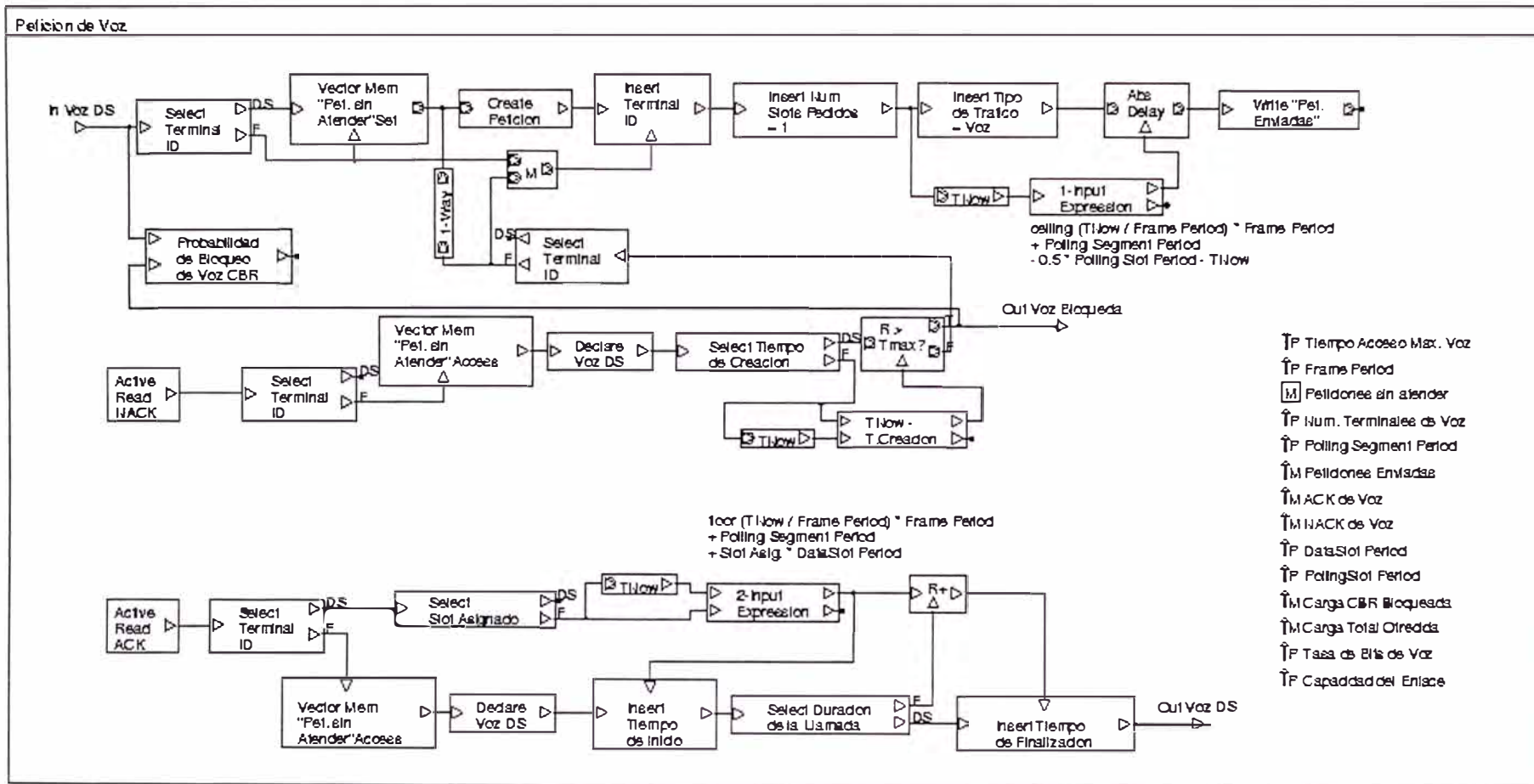


Figura 46 Petición de Voz

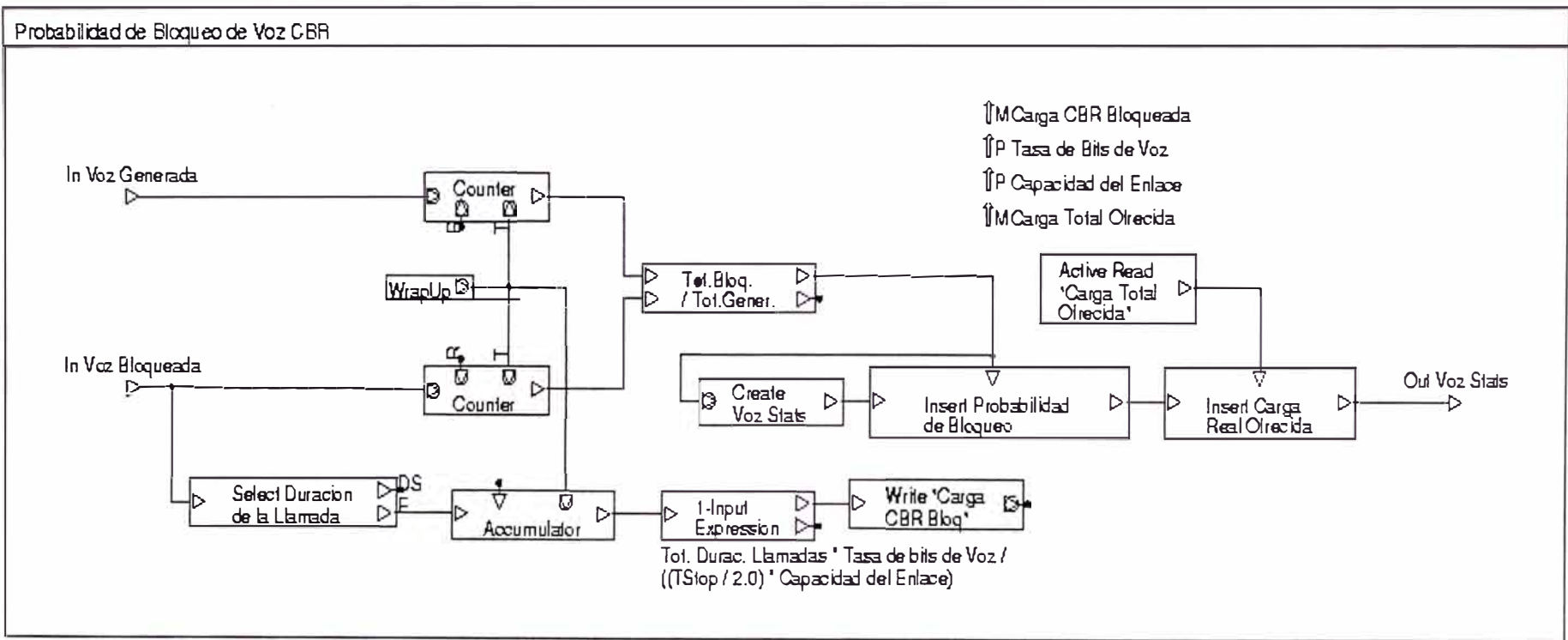


Figura 47 Probabilidad de Bloqueo de Voz CBR

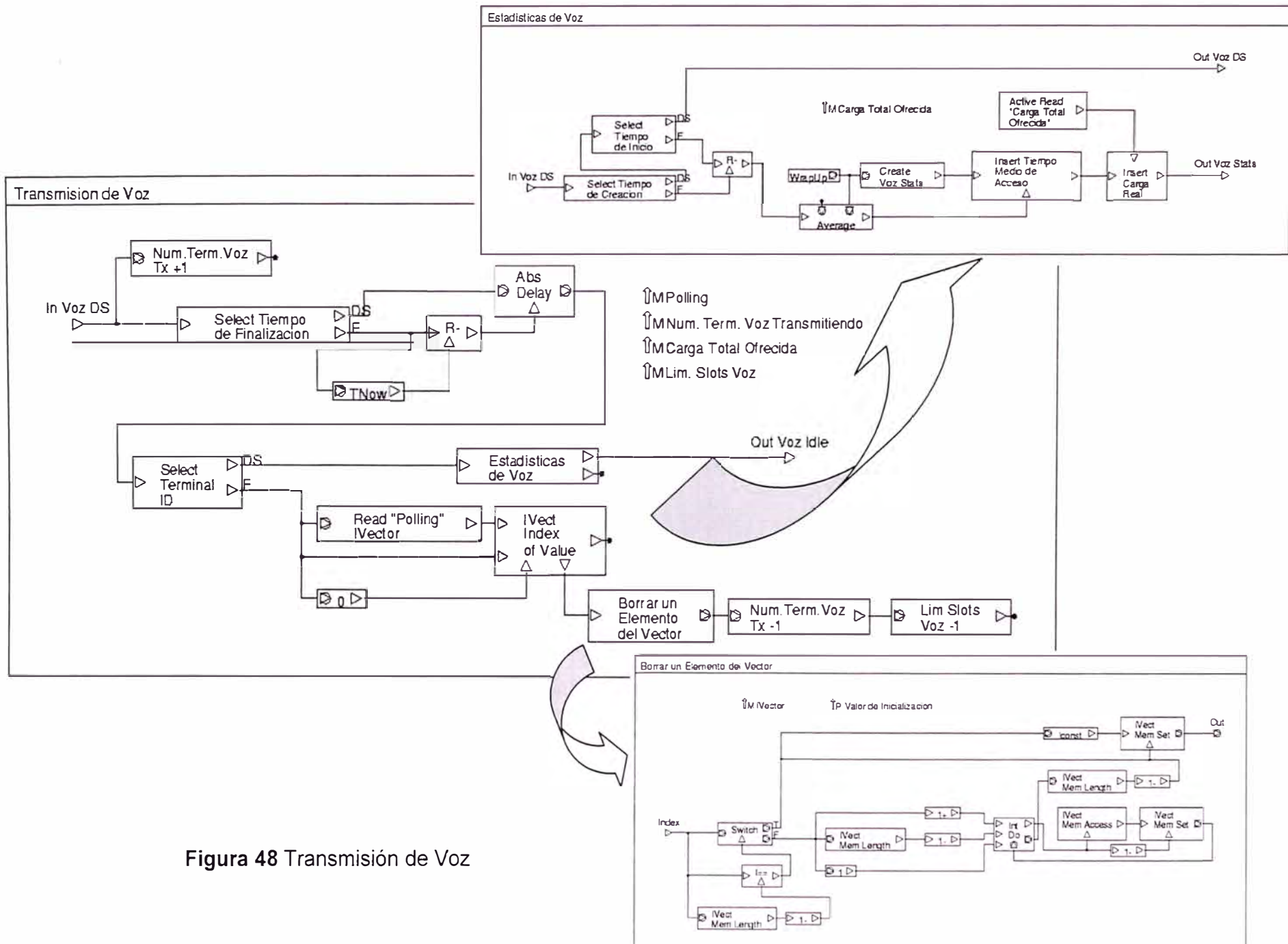


Figura 48 Transmisión de Voz

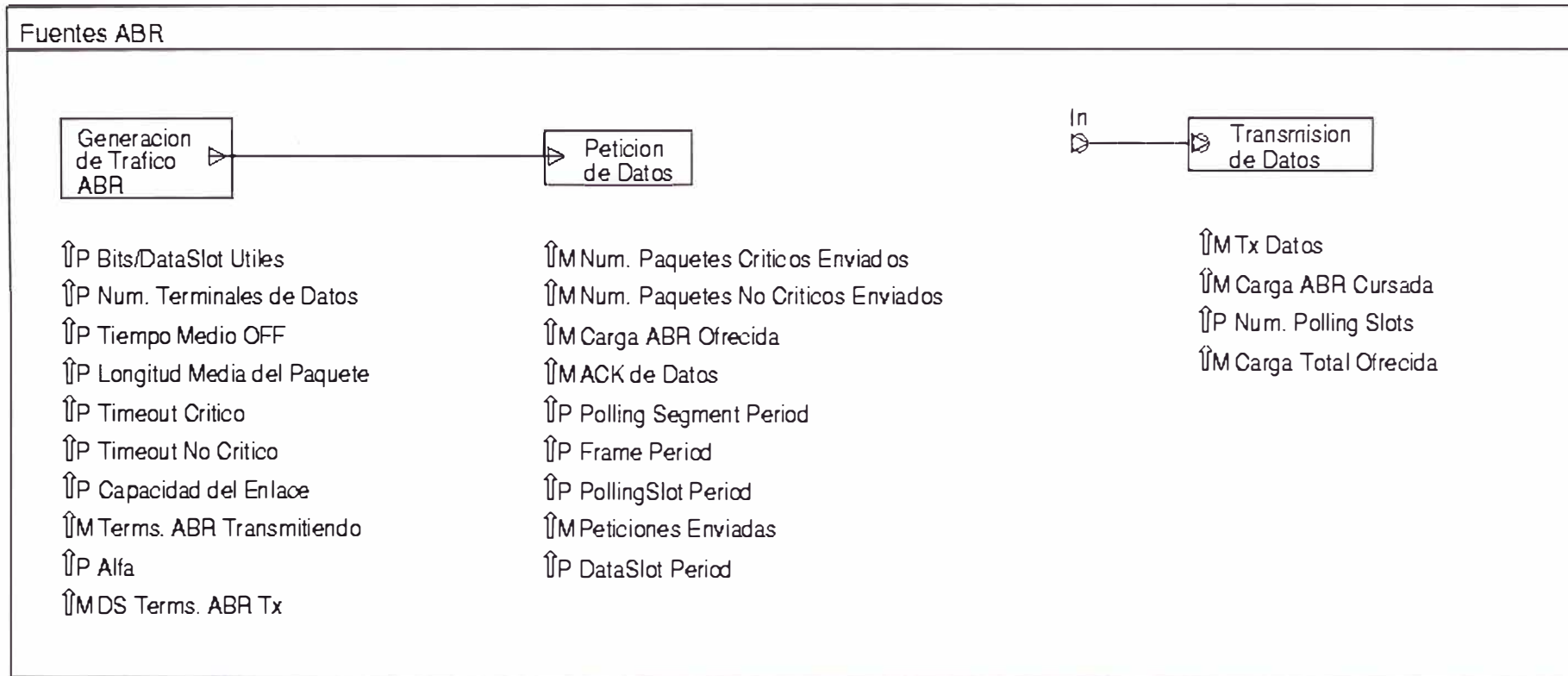


Figura 49 Fuentes ABR

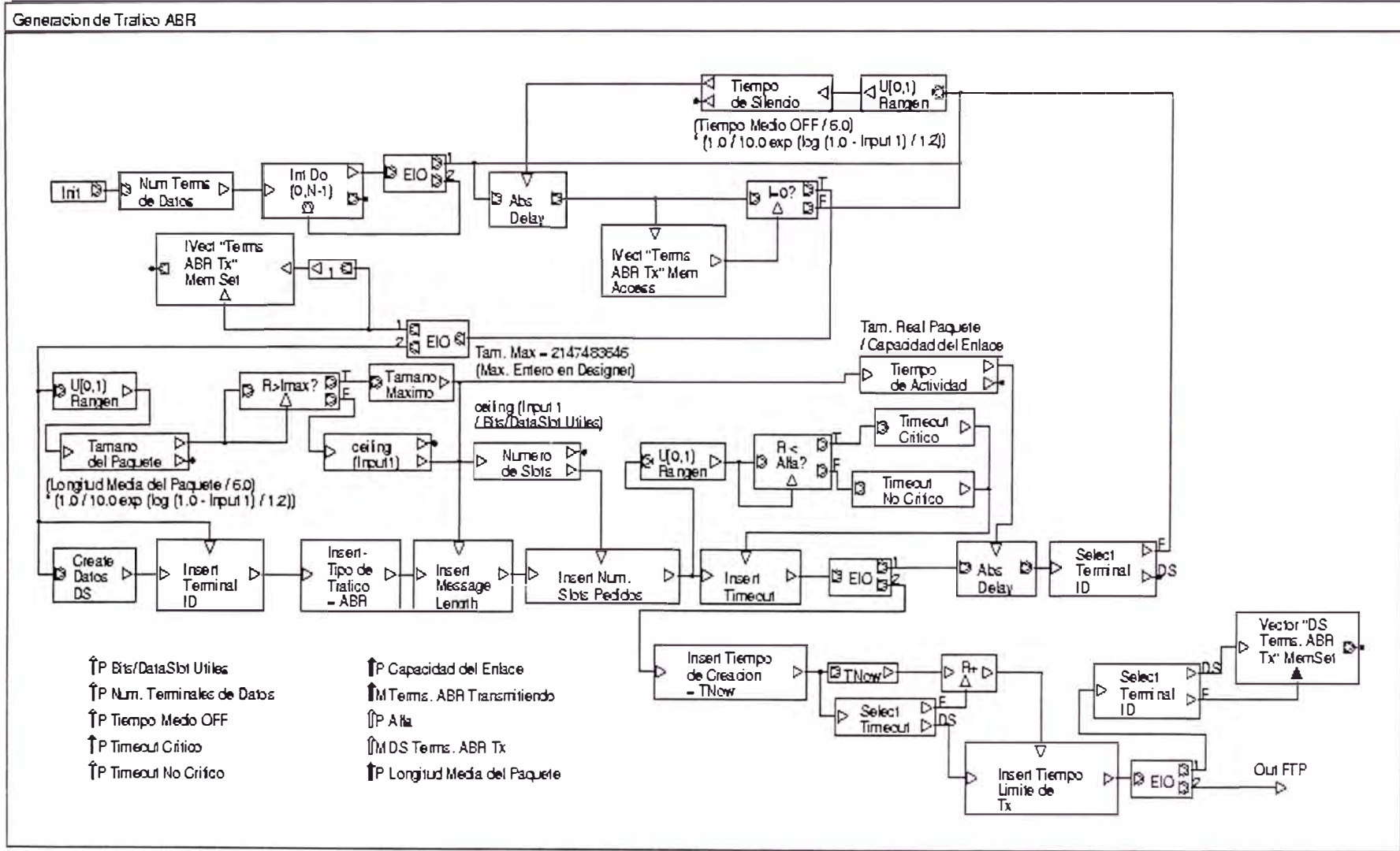


Figura 50 Generación de Tráfico ABR

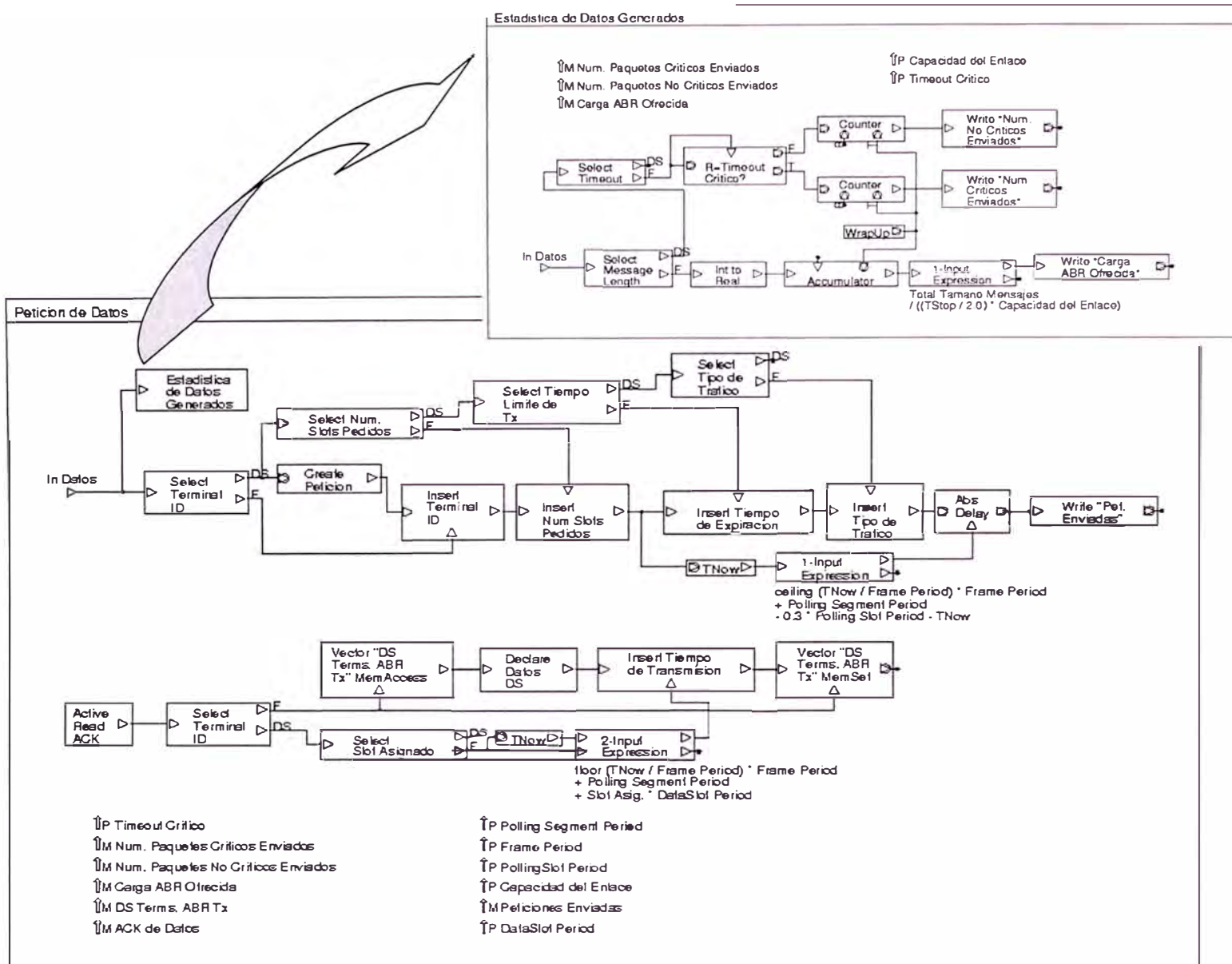


Figura 51 Petición de Datos

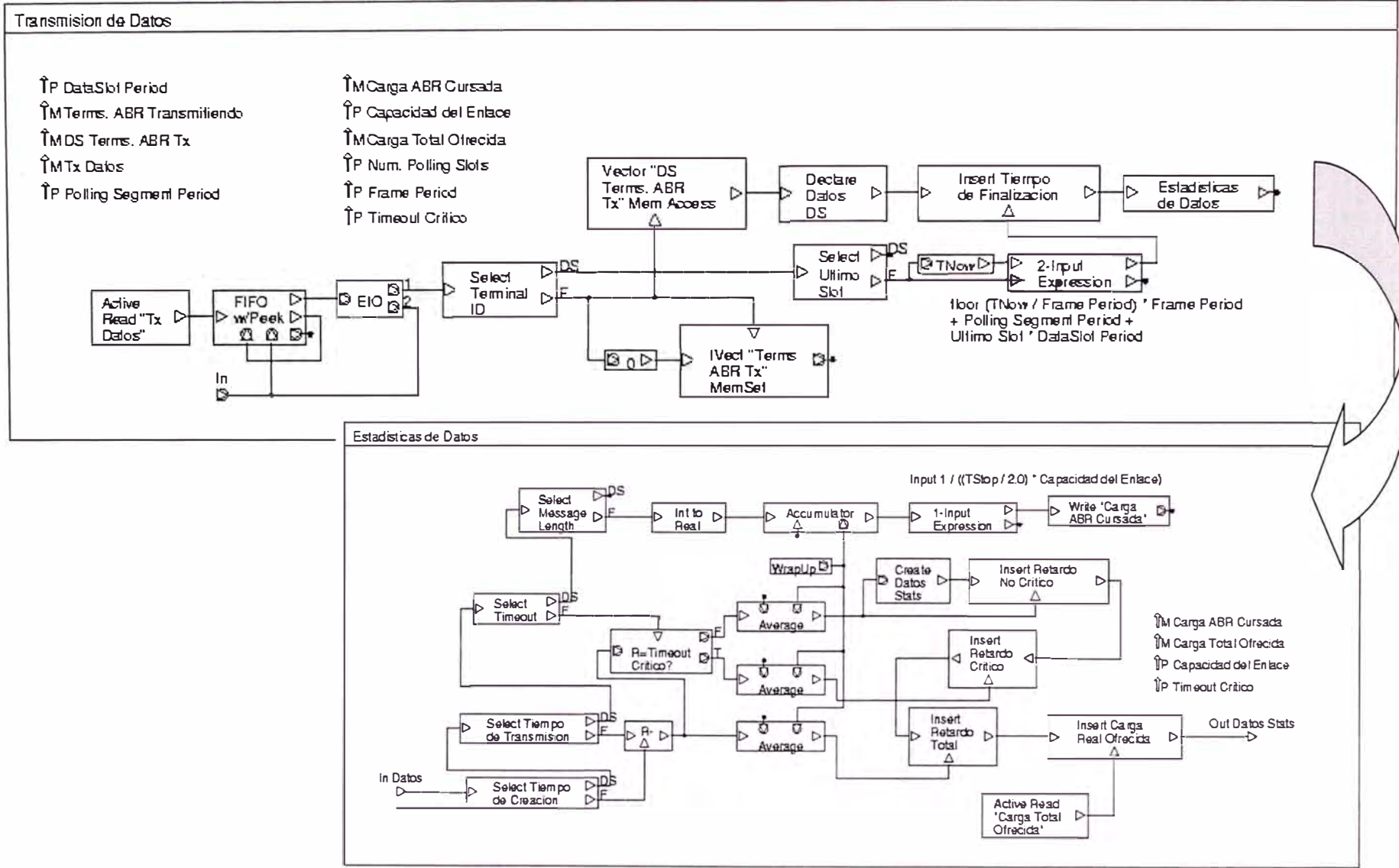


Figura 52 Transmición de Datos

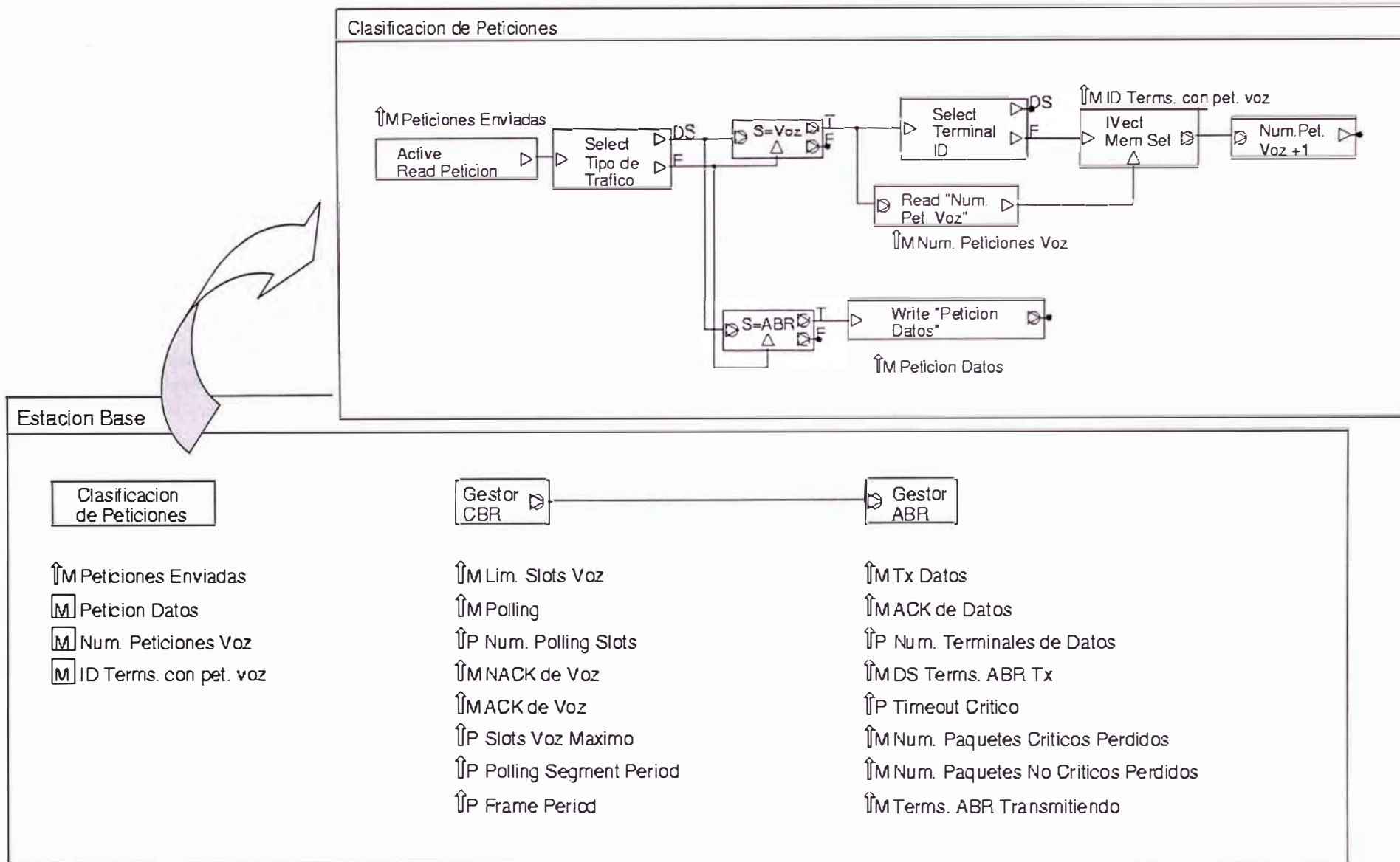


Figura 53 Estación Base en detalle

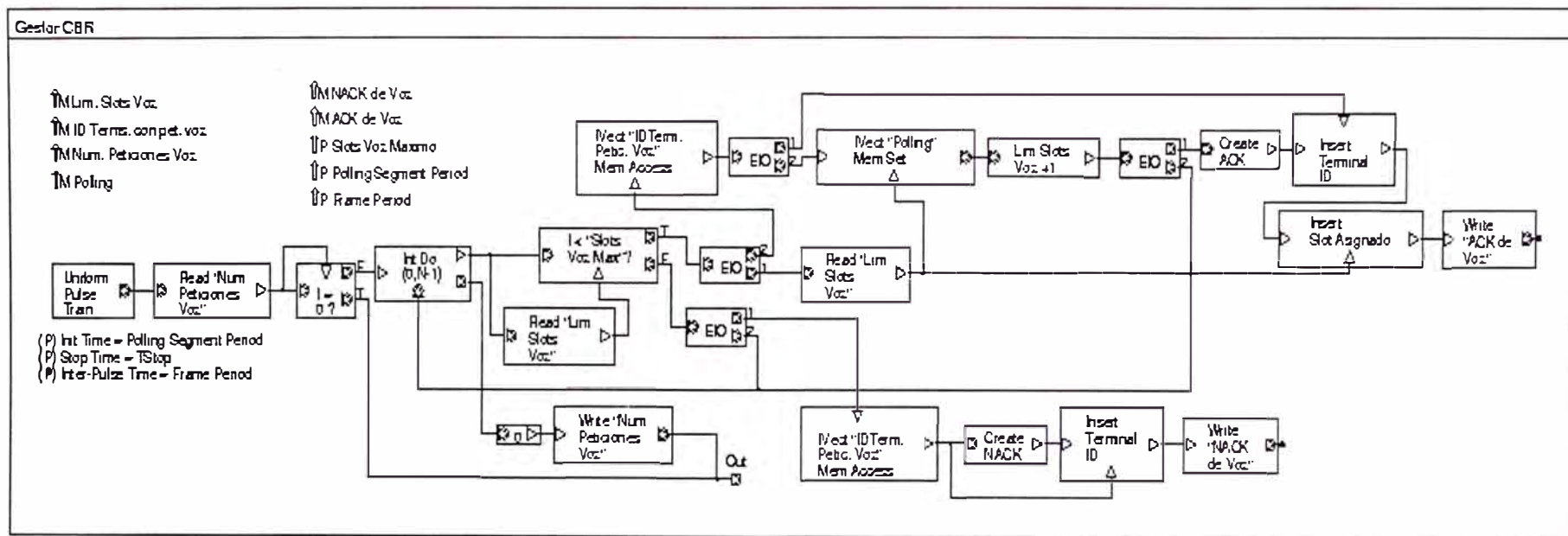


Figura 54 Estación Base en detalle

Estadística Trafico Ofrecido-Cursado

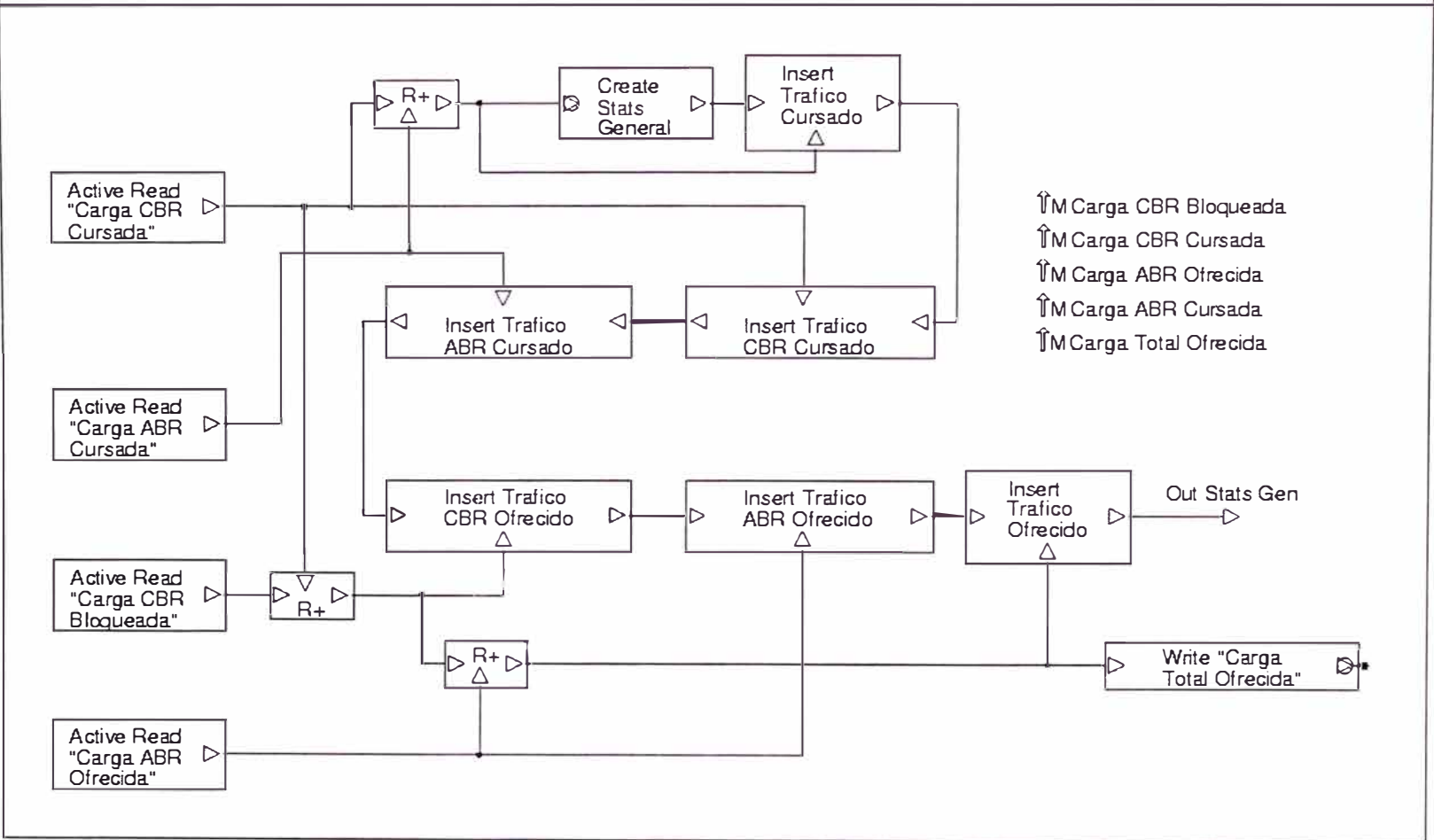


Figura 56 Estadística de tráfico Ofrecido-Cursado

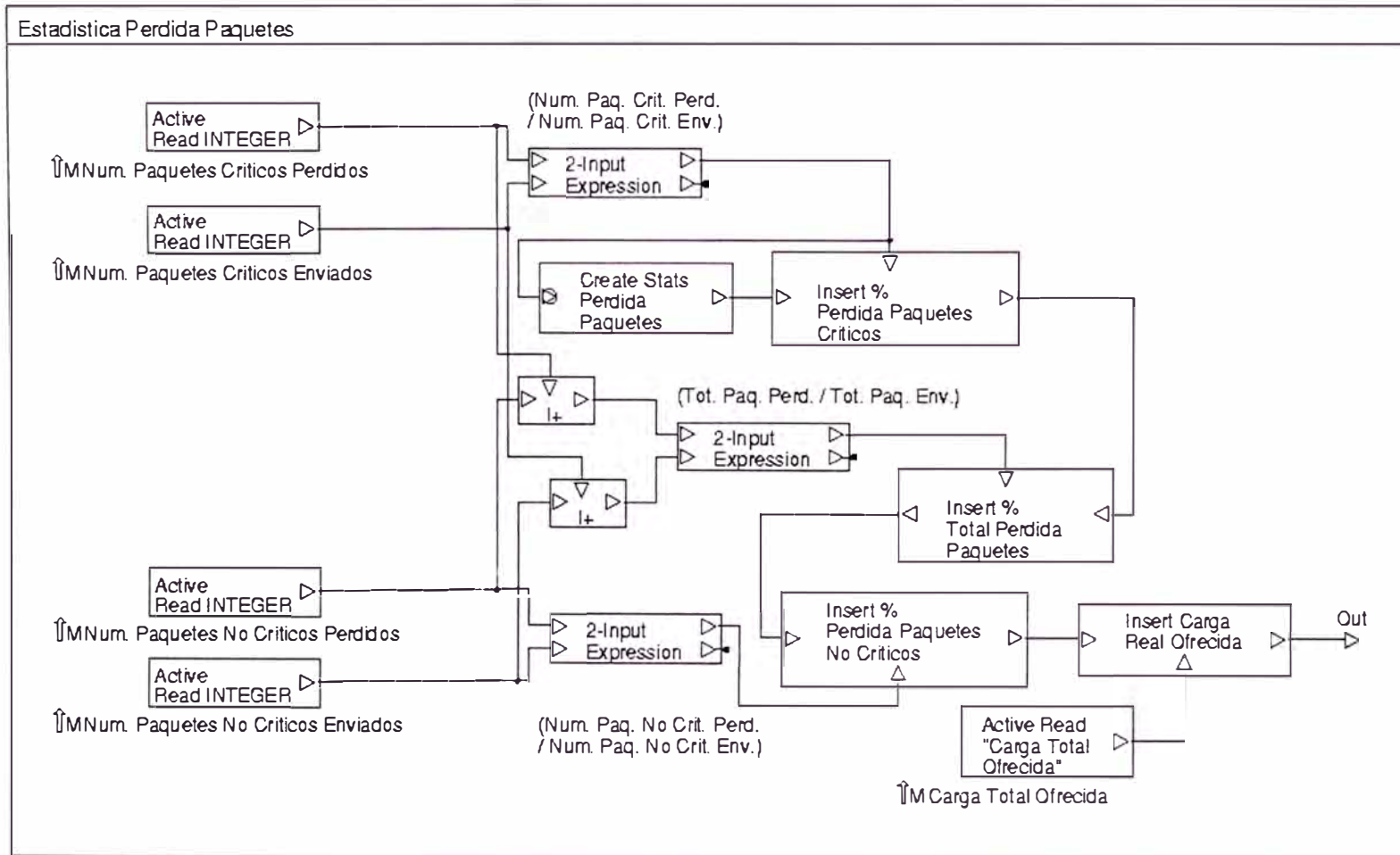


Figura 57 Estadística de pérdida de paquetes

ANEXO C GLOSARIO

Broadcast (Difusión)

Una transmisión a múltiples receptores no especificados

Burstiness (Nivel de Rafageo)

Característica de tráfico que mide el nivel de variación de la ráfaga de un servicio ATM. Es definido como el factor entre la tasa binaria pico y la tasa binaria media del tráfico.

FEC (Forward Error Correction)

Un sistema de control para transmisión de datos en el cual el dispositivo receptor tiene la capacidad de detectar y corregir cualquier carácter o bloque de código que contenga una cantidad de errores menor que un número predeterminado de símbolos. El FEC se realiza añadiendo bits a cada carácter o bloque de código transmitido, usando un determinado algoritmo.

Chip Rate

Tasa binaria de transmisión resultante del producto de las velocidades binarias de la información y la secuencia de bits pseudoaleatorios

Encapsulation (Encapsular)

Técnica usada por los protocolos divididos por niveles en el cual un nivel añade información de cabecera a la Unidad de Datos del Protocolo (PDU)

del nivel superior. Como ejemplo, en términos de Internet, un paquete podría contener una cabecera del Nivel Físico, seguido por una cabecera del Nivel de Red (IP), seguido por una cabecera del Nivel de Transporte (TCP), seguido por los datos del Nivel de Aplicación.

Frame (Trama)

Un “paquete” del Nivel de Enlace de Datos que contiene información para la cabecera y la cola requerida por el medio físico. Esto significa que los paquetes del Nivel de Red son encapsulados para convertirse en tramas.

Handoff (Traspaso)

En los sistemas móviles celulares, es el proceso de transferir una llamada telefónica en progreso desde una radio-célula a otra sin interrumpir la llamada. Es sinónimo del término inglés *handover*.

Header (Cabecera)

Parte del paquete, que precede a los datos, conteniendo la dirección origen y destino, información de sincronismo u otros campos.

Jitter

Variaciones abruptas y no deseadas de una o más características de la señal, tales como el intervalo entre pulsos sucesivos, la amplitud de ciclos sucesivos, o la frecuencia o fase de ciclos sucesivos.

Overhead

Información adicional, tales como control, enrutamiento o caracteres para verificar errores, que es transmitido junto con los datos del usuario.

Packet (Paquete)

Unidad de datos enviado a través de la red. "Paquete" es un termino genérico usado para describir una unidad de datos de cualquier nivel de la pila de protocolos OSI, pero es correctamente más usado para describir unidades de datos del Nivel de Aplicación.

Payload (Carga útil)

Parte de la celda ATM que contiene solo datos del usuario de tamaño igual a 48 bytes.

Protocol Stack (Pila de Protocolos)

Un conjunto de protocolos divididos por niveles que trabajan juntos para proporcionar un conjunto de funciones de red. Cada nivel de protocolo intermedio usa el nivel inferior para proporcionar un servicio al nivel superior. El modelo de siete niveles OSI es un intento de proporcionar una estructura estándar que sirva como referencia para describir las diversas pilas de protocolos.

Spreading Sequence (Código de ensanchamiento)

Secuencia de bits pseudoaleatorios (*chips*) que se utiliza para generar la señal de espectro ensanchado

TAXI

Es una especificación de la Capa Física realizado por ATM Forum para la comunicación mediante fibras ópticas multimodo en redes ATM. TAXI tiene la misma velocidad de transmisión (100 Mbps) que FDI pero no utiliza la arquitectura de tipo anillo.

Timeout

Un período de tiempo preestablecido que se permitirá transcurrir en un sistema antes que suceda un determinado evento, a menos que otro evento ocurra primero; en cualquier caso, el período es determinado cuando se produzca cualquiera de los eventos.

Throughput

Cantidad de datos que un canal de comunicaciones puede llevar, usualmente en byte por segundo.

Trailer (Cola)

Información de control del protocolo localizado al final de la Unidad de Datos del Protocolo (PDU).

ANEXO D ACRONIMOS

Acrónimo	Término en Ingles	Término en Español
AAL	ATM Adaptation Layer	Nivel de Adaptación ATM
ACK	Acknowledgment	Acuse de recibo
ATM	Asynchronous transfer mode	Modo de transferencia asíncrono
BER	Bit error rate	Tasa binaria de error
B-ISDN	Broadband Integrated Services Digital Network	Red digital de servicios integrados de banda ancha
BS	Base Station	Estación Base
CAC	Connection Admission Control	Control de Admisión de Llamadas
CDF	Cumulative Distribution Function	Función de distribución acumulada
CDMA	Code Division Multiple Access	Acceso múltiple por división de código
CDV	Cell Delay Variation	Variación del retardo de celdas
CLR	Cell Loss Rate	Tasa de pérdida de celdas
CSMA/CD	Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection	Acceso múltiple por percepción de portadora con detección de colisión
CTD	Cell Transfer Delay	Retardo de transferencia de celdas
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications	Sistema de telecomunicaciones digital sin hilos mejorado
DS/SS	Direct Sequence Spread Spectrum	Espectro ensanchado con secuencia directa
FDMA	Frequency Division Multiple Access	Acceso múltiple por división de frecuencia
FIFO	First Input First Output	"Primero que ingresa primero que sale"
FCFS	First Come First Served	"Primero que llega primero que se atiende"
GSM	Global System for Mobile communication	Sistema global para comunicaciones móviles
ITU	International Telecommunications Union	Unión internacional de telecomunicaciones

Acónimo	Término en Ingles	Término en Español
MAC	Medium Access Control	Control de acceso al medio
MBS	Maximum Burst Size	Tamaño máximo de la ráfaga
MCR	Minimum Cell Rate	Tasa mínima de celdas
MT	Mobile Terminal	Terminal móvil
OSI	Open Systems Interconnection	Sistemas de interconexión abierto
PCR	Peak Cell Rate	Tasa Pico de Celdas
PCS	Personal Communication System	Sistema de Comunicación Personal
QoS	Quality of Service	Calidad de Servicio
SCR	Sustainable Cell Rate	Tasa de celdas sostenible
SMDS	Switched Multimegabit Data Service	Servicio de datos multimegabit conmutado
TDD	Time division duplexing	Dúplex por división de tiempo
TDM	Time division multiplexing	Multiplexado por división de tiempo
TDMA	Time Division Multiple Access	Acceso Múltiple por división de tiempo
TETRA	TErrestrial TRunked RAdio	Troncal de radio terrestre
TOE	Time of Expiry	Tiempo de expiración
VCI	Virtual Channel Identifier	Identificador de canal virtual
VCN	Virtual Circuit Number	Número de Circuito Virtual
VPI	Virtual Path Identifier	Identificador de ruta virtual
WLAN	Wireless Local Area Network	Red de área local inalámbrica

BIBLIOGRAFÍA

- [1] C. Sinner, R. Sigle, "Toward Wireless Multimedia Communications. Current Standars and Future Directions", International Journal of Wireless Information Networks, Vol. 5, No. 1, 1998
- [2] L. M. Correia, R. Prasad, "An Overview of Wireless Broadband Communications", IEEE Communications Magazine, January 1997
- [3] R. Handel, M. N. Huber, S. Schroder, "ATM Networks: Concepts, Protocols, Applications", Eddison Wesley 1998, ISBN: 0201178176
- [4] P. Agrawal, "SWAN: A Mobile Multimedia Wireless Network", IEEE Personal Communication, April 1996, pp. 18-33
- [5] K. Y. Eng, "BAHAMA: A Broadband Ad-hoc Wireless ATM Local Area Network" Proc. IEEE ICC'95, 1995, pp. 1216-1223
- [6] D. Raychaudhuri, "WATMNet: A Prototype Wireless ATM System for Multimedia Personal Communication", IEEE JSAC, vol. 15, no. 1, jan. 1997, pp. 83-95
- [7] Wireless ATM Network Demostration, <http://www.tik.ee.ethz.ch/~wand/>
- [8] M. J. Karol, Z. Liu, and K. Y. Eng, "Distributed Queuing Request Update Multiple Access (DQRUMA) for Wireless Packet (ATM) Networks" Proc. ICC'95, Seattle, WA, June 1995, pp.1224-1231.

- [9] J. G. Kim and I. Widjaja, "PRMA/DA: A New Media Access Control Protocol for Wireless ATM", Proc. ICC '96, Dallas, TX, June 1996 pp. 1-19
- [10] X. Qiu, V. O. K. Li, J. H. Ju, "A Multiple Access Scheme for Multimedia Traffic in Wireless ATM", J. Special Topics in Mobile Networks and Appls. (MONET), vol. 1, no. 3, Dec. 1996, pp. 259-272
- [11] F. Bauchot et al., "MASCARA, a MAC Protocol for Wireless ATM" Proc. ACTS Mobile Summit '96, Granada, Spain, Nov. 1996, pp. 17-22
- [12] F. D. Priscoli, "Medium Access Control for the MEDIAN System", Proc. ACTS Mobile Summit '96, Granada, Spain, Nov. 1996, pp. 1-8
- [13] H. Xie et al., "Data Link Control Protocols for Wireless ATM Access Channels", Proc. of ICUPC '95, Tokyo, Japan, Nov. 1995, pp. 1-5
- [14] David Wright, Broadband: Business Service, Technologies, and Strategic Impact, ISBN 0-89006-589-6
- [15] Mischa Schwartz, "Broadband Integrated Networks", Prentice Hall 1996, ISBN: 0-13-519240-4
- [16] Raif O. Onvural, "Asynchronous Transfer Mode Networks: Performance Issues", Artech House 1994, ISBN: 0890066620
- [17] William Stallings, "ISDN and Broadband ISDN with Frame Relay and ATM", Prentice Hall 1995, ISBN: 0024155136
- [18] H. Li, K. Siu, H. Tzeng. A Simulation Study of TCP Performance in ATM Networks with ABR and UBR Service. IEEE 1996

- [19] S. Kalyanaraman, R. Jain. "Performance and Buffering Requirements of Internet Protocols over ATM ABR and UBR Services", IEEE Communication Magazine June 1998.
- [20] A. Romanow, S. Floyd. "Dynamics of TCP Traffic over ATM Networks", Proceedings of ACM SIGCOMM'94, 1994, pp. 79-88.
- [21] H. Michiel and K. Laevens, "Teletraffic Engineering in a Broad-band Era", Proceeding of the IEEE, vol. 85, No. 12, December 1997, pp. 2007-2033
- [22] V. Frost and B. Melamed, "Traffic Modeling for Telecommunications Networks", IEEE Communications Magazine, Mar. 1994
- [23] A. Rueda and W. Kinsner, "A survey of traffic characterization techniques in telecommunication networks" in Proc. IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'96), Calgary, Alta., Canada, 1996, pp. 830-833.
- [24] Abdelnaser Adas, "Traffic Models in Broadband Networks" IEEE Communications Magazine, July 1997, pp. 82-89.
- [25] W. Leland, "On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)", IEEE/ACM Trans. Networking, Feb. 1994, pp. 1-15.
- [26] J. Sarnecki, Microcell Design Principles, IEEE Communication Magazine, vol. 31, no. 4, April 1993
- [27] Michael Chryssomallis, "Smart Antennas", IEEE Antennas and Propagation Magazine, June 2000, vol.2, issue 3, pp. 129-136.

- [28] Anthony S. Acampora, Mahmoud Naghshineh, "Control and Quality-of-Service Provisioning in High-Speed Microcellular Networks", IEEE Personal Communications, Second Quarter 1994
- [29] A. S. Acampora, M. Naghshineh, An Architecture and Methodology for Mobile-Executed Handoff in Cellular ATM Networks, IEEE JSAC, vol. 12, no. 8, october 1994
- [30] G. Gallasi, G. Rigolio, and L. Verri, "Resource management and dimensioning in ATM networks", IEEE Network Magazine, Mayo 1990.
- [31] D. Hong, and T. Suda, "Congestion control and prevention in ATM networks", IEEE Network Magazine, July 1991
- [32] N. Wilson, *et al.* "CDMA vs. Dynamic TDMA for access control in an integred voice/data PCN", in Proc. 1st Int. Conference Universal Personal Communication, Sept. 1992, pp. 267-272
- [33] Vicente Casares Giner, "Teletráfico", Universidad de Catalunya, España
- [34] S. J. Schaffer, W.W. LaRue, "BONES DESIGNER: A Graphical Environment for Discrete-Event Modeling and Simulation", MASCOTS'94, Procceding of the Second International Workshop on Modeling, Analysis, and Simulation of Computer and Telecommunication System 1994
- [35] J. Choque, "Propuesta de un protocolo MAC para redes inalámbricas multimedia", INTERCON'99, 19 de Agosto de 1999.

- [36] L. Muñoz, J. Choque, M. García, "Proposal of a P-DTDMA access scheme for multimedia wireless network", Proceedings of the Broadband Access Conference BAC'99, Krokow, Poland, pp. 63-74, Oct.1999
- [37] L. Muñoz, J. Choque, M. García, R. Sanz, "Propuesta de un protocolo de acceso P-DTDMA para redes inalámbricas de banda ancha". II Jornadas de Ingeniería Telemática, JITEL '99, 15-17 de septiembre de 1999, Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Madrid, pp. 413-418
- [38] M. García, L. Muñoz, R. Sanz, "Performance of a Dynamic TDMA Access Protocol under Self-Similar Traffic Input", International Conference on Telecommunications, 15-18 June 1999, Cheju, Korea
- [39] D. Raychaudhuri, N. D. Wilson, "ATM-Based Transport Architecture for Multiservices Wireless Personal Communication Networks", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 12, no. 8, october 1994
- [40] A. M. Law, M. G. McComas, "Simulation Software for Communications Network: The State of the Art", IEEE Communications Magazine, March 1994