

Una Revisión Formal a la Especificación del Servicio para la Gestión de las Conexiones en la Capa MAC IEEE 802.16

Ana V. Morales¹ y María E. Villapol¹

¹Laboratorio de Redes Móviles e Inalámbricas y Sistemas Distribuidos (ICARO), Escuela de Computación, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela

RESUMEN

Muchos de los estándares y tecnologías de comunicación desarrollados hacen muy poco uso de métodos formales para especificar y describir los protocolos de comunicación que los soportan, resultando en documentos, muchas veces ambiguos, difíciles de entender e imprecisos. El estándar IEEE 802.16 y sus posteriores revisiones, se encarga de especificar y describir la interfaz aire de los Sistemas BWA (Broadband Wireless Access, Sistemas Acceso Inalámbricos de Banda Ancha,) punto-multipunto fijos y móviles para redes de área metropolitana; y se limita a la descripción de las capas MAC (Medium Access Control, Control de Acceso al Medio) y física (PHY). La capa MAC está orientada a la conexión, por lo cual algunas de sus funciones están relacionadas a la gestión de las conexiones, y para éstos procesos han sido definidas en el estándar un conjunto de primitivas de servicio. Sin embargo, la revisión presentada evidencia que la descripción de la especificación del servicio carece de una adecuada y detallada descripción. En el presente trabajo han sido utilizadas las Redes de Petri Coloreadas como método formal para llevar a cabo una descripción minuciosa y detallada de la especificación del servicio para la gestión de las conexiones de la MAC.

Palabras Claves: IEEE 802.16, Sistemas BWA, Capa MAC, Primitivas de Servicio, Especificación del Servicio

ABSTRACT

Many of the standards developed and communication technologies make little use of formal methods to specify and describe the communication protocols that support them, resulting in documents, often ambiguous, difficult to understand and imprecise. The IEEE 802.16 standard and its subsequent revisions, is responsible for specifying and describing the air interface of the BWA systems (Broadband Wireless Access Systems, Broadband Wireless Access,) point to multipoint fixed and mobile networks, metropolitan area, and is limited the description of the MAC layer (Medium Access Control, Medium Access Control) and physical (PHY). The MAC layer is connection-oriented, so that some functions are related to connection management, and for these processes have been defined in the standard set of service primitives. However, the review presented evidence that the description of the service specification lacks an adequate and detailed description. In the present study have been used Coloured Petri Nets as a formal method for conducting a thorough and detailed description of the service specification to manage connections to the MAC.

Keywords: IEEE 802.16, BWA Systems, MAC Layer, Service Primitives, Service Specification

1. Introducción

Hoy en día el campo de las redes inalámbricas ha exhibido un acelerado crecimiento. En las últimas dos décadas se han desarrollado un conjunto de tecnologías y estándares que han permitido que el acceso a la información a través del uso de tecnologías inalámbricas sea cada vez más demandado por los usuarios requiriendo altos niveles de seguridad, mayores velocidades de acceso, y calidad de servicio (QoS).

Las WMAN's (Wireless Metropolitan Area Network, Redes de Área Metropolitana Inalámbricas) son tecnologías de acceso que permiten a los usuarios a través de dispositivos móviles e inalámbricos tales como Laptops, asistentes personales (PDAs), tabletas (tablets PCs), teléfonos inteligentes (SmartPhones) entre otros, gozar de servicios ofrecidos por las redes de datos tales como Internet, voz IP

(VoIP), Comercio Electrónico, y Telemedicina entre muchos otros.

El estándar IEEE 802.16 es una tecnología para WMAN's y ha sido desarrollado con el objetivo de proveer acceso inalámbrico a altas tasas de datos (sobre los 75 Bits/s) sobre grandes áreas de cobertura (aproximadamente hasta 50Km), a un gran número de usuarios como una forma de acceso alternativa a las tradicionales redes cableadas, especialmente en las zonas rurales y más alejadas de las grandes ciudades, donde prestar servicios de acceso de banda ancha de forma cableada resulta inviable.

Muchos de los estándares y tecnologías desarrollados hacen muy poco uso de métodos formales para especificar y describir los protocolos de comunicación, tales como tablas de estado y primitivas de servicio, resultando en documentos, muchas veces ambiguos, difíciles de entender e imprecisos.

La especificación del servicio en un sistema de comunicación describe el servicio que se proporciona al usuario. Esto se da a menudo como una secuencia de eventos que son posibles en una interfaz abstracta entre el usuario (una aplicación u otro protocolo) y el protocolo. La especificación del servicio puede estar descrita en el documento de la especificación del protocolo o en un documento separado [Vill03]. En el estándar IEEE 802.16, el servicio se encuentra especificado en el documento oficial del mismo [IEEE02]. Según cómo se especifica en tal documento [IEEE02], la subclase de definición de servicios MAC no impone ningún tipo de formatos de mensajes ó máquinas de estado para el uso de las primitivas de servicio definidas para la gestión de las conexiones. Esta carencia de formalismo en la definición de las primitivas de servicio, deja cabida a posibles omisiones, y errores de implementación, del proceso de gestión de las conexiones.

En una revisión minuciosa realizada a las versiones publicadas del estándar y bibliografía asociada a éste [IEEE02][EMS*02][EMP*06][Mor11][MV10], se ha podido comprobar la carencia de una descripción detallada y formal de ciertos hechos que deberían ocurrir en la secuencia de ejecución de las primitivas de servicio. La especificación del estándar no es totalmente clara, dejando algunos vacíos de información al lector, por lo cual en el presente trabajo se presenta una revisión y descripción detallada de la misma. Para ello se utilizó la metodología de Billington [Bill91] para la especificación formal de protocolos, utilizando a las Redes de Petri Coloradas (Coloured Petri Nets, CPNs) como método formal.

Las CPNs son técnicas formales con bases matemáticas sólidas las cuales ya han sido utilizadas para el modelado de diversos sistemas tales como los protocolos de comunicación, éstas han permitido obtener una descripción más precisa y detallada de los mismos [BGB73][JK09][VB04][Vil06][Vill08]. El formalismo de modelado de las Redes de Petri proporcionan técnicas para soportar el diseño y mantenimiento de los protocolos de comunicación, igualmente permiten la utilización de una conveniente visualización gráfica de los modelos de sistemas, y ayuda a los diseñadores de sistemas y desarrolladores de estándares, y protocolos a asegurar y analizar las propiedades de corrección y rendimiento de los mismos.

En la sección 2, se presenta una descripción del estándar IEEE 802.16 y se realiza una descripción de la Especificación del servicio. En la sección 3, se presentan brevemente la Metodología de Verificación de Protocolos. En la sección 4 se presentan algunos aspectos relevantes de la especificación del servicio en función de la aplicación de la metodología. Y finalmente en la sección 4 se presentan algunas conclusiones.

2. Una Visión General del Estándar IEEE 802.16

El estándar IEEE 802.16 en su primera versión, fue desarrollado y completado en Octubre del 2001 [IEEE02], teniendo como principal meta ser una de las principales formas de proveer acceso inalámbrico de banda ancha para enlazar a los hogares y negocios hacia el núcleo de las redes de telecomunicaciones alrededor del mundo. Fue desarrollado para soportar usuarios fijos y móviles, proveer

soporte para topologías malladas (modo *Mesh*) y proveer *handoff* (traspaso) de la señal entre estaciones base.

El estándar fue diseñado para acoger a un conjunto de interfaces de aire basados en un protocolo MAC común, pero con diferentes especificaciones de capa física dependiendo del uso del espectro radioeléctrico y las regulaciones asociadas a éstos [EMS*02].

2.1 Componentes de la Arquitectura IEEE 802.16

El estándar define dos componentes principales: el plano de control/datos y el plano de gestión [IEEE02][EMP*06]. El plano de control/datos forma parte del modelo de referencia definido en el estándar. Cada dispositivo que posea una implementación IEEE 802.16 debe implementar los componentes asociados a éstos planos. Adicionalmente, el estándar base especifica entidades básicas de operación en su arquitectura (ver figura 1).

Estación Base (Base Station (BS)): es un dispositivo generalizado que provee el servicio de control, gestión y conectividad a la estación suscriptor y que posee las instancias de las entidades de las capas MAC y PHY.

Estación Suscriptor (Subscriber Station (SS)): es un dispositivo generalizado que provee conectividad entre un equipo suscriptor y una estación base, y que posee las instancias de las entidades de las capas MAC y PHY.

Estación Móvil (Mobile Station, (MS)): es una entidad optativa definida en versiones posteriores, posee las mismas funcionalidades de las SSs agregándoles capacidades adicionales de movilidad a velocidad vehicular, así mismo, éstas requieren de un soporte adicional para funciones específicas en las SS tales como gestión de *handoff* y ahorro de energía. Esté nuevo componente por lo tanto, especifica un sistema combinado de acceso inalámbrico de banda ancha fijo y móvil.

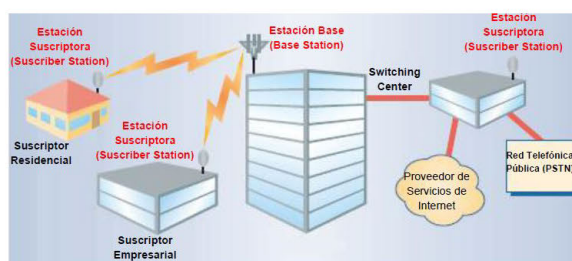


Figura 1: Componentes Básicos de la Arquitectura IEEE 802.16

2.2 Modelo de Referencia

El modelo en capas definido en el IEEE 802.16 [IEEE02][EMP*06] se observa que la capa MAC se subdivide en tres subcapas las cuales son: la Subcapa de Convergencia (*Convergente Sublayer, CS*), la Subcapa MAC Parte Común (*Common Part Sublayer, MAC CPS*) y la Subcapa de Seguridad (*Security Sublayer*) ver figura 2. En el plano de control/datos se define como la información es encapsulada o desencapsulada a nivel MAC y modulada o desmodulada a nivel físico. El plano de

gestión conforma el sistema de gestión de la red cuyas funciones son: clasificación, seguridad, aplicación de QoS y configuración de las conexiones entre otras.

El estándar IEEE 802.16 define un conjunto de primitivas de servicios para la comunicación entre la CS y la MAC CPS. Estas primitivas permiten definir la información que debe ser intercambiada entre estas dos subcapas en una comunicación entre pares de entidades para permitir los procesos relacionados a la gestión de las conexiones (es decir, establecimiento, cambios y terminación de una conexión).

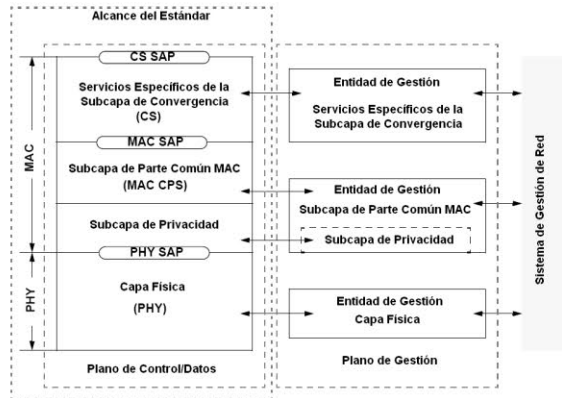


Figura 2: Modelo de Referencia y Capas de Protocolos del estándar IEEE 802.16, mostrando los puntos de Acceso a los Servicios (SAPs) IEEE 802.16

- **Subcapa de Convergencia (CS):** provee cualquier información o mapeo de datos de redes externas, recibidos a través de los Puntos de Acceso a Servicios (*Service Access Points, SAPs*), contenidas dentro de las Unidades de Datos de Servicios MAC (*Service Data Unit, SDUs*), las cuales son recibidas por la MAC CPS a través de los MAC SAPs. Esto incluye la clasificación de las SDUs externas y su respectiva asociación con el apropiado Flujo de Servicio (*Service Flow, SFID*) e Identificador de Conexión (*Connection ID, CID*).
- **Subcapa de Parte Común MAC (MAC CPS):** es la segunda capa del modelo, provee las funcionalidades bases del sistema de acceso, asignación de ancho de banda, establecimiento de conexiones, mantenimiento y terminación de las mismas. Esta subcapa recibe datos desde varias CSs, a través del MAC SAP y los clasifica en una conexión de transporte MAC particular. También en ésta subcapa se aplica QoS para la planificación y transmisión de los datos sobre la capa PHY. La MAC CPS provee los mecanismos que permiten compartir eficientemente el medio inalámbrico.
- **Subcapa de Privacidad:** se encarga de proporcionar privacidad a los suscriptores en la red inalámbrica, proporcionando autenticación e intercambio de claves seguras y encriptación en las conexiones establecidas entre las SSs, MSs y la BS.
- **Capa Física (PHY):** incluye múltiples especificaciones, cada una adecuada a un rango de frecuencias y aplicación particular. La primera capa física especificada para el estándar es la denominada "*WirelessMAN-SC*" es un sistema *single-carrier* (ó portador simple) asumiendo propa-

gación con línea de vista (LOS) para terminales fijos. Luego de varias discusiones y de lo flexible de la capa MAC se crearon varios grupos de trabajo y las siguientes versiones del estándar incluyeron tres especificaciones adicionales.

2.3 Gestión de las Conexiones

La MAC CPS está orientada a la conexión. Las actividades de gestión de las conexiones son soportadas a través de un conjunto de primitivas de servicio entre las entidades de la SC y la MAC CPS, entre las SSs y la BS. Los aspectos que engloban la gestión de una conexión se describen a continuación [IEEE02][Mor11]:

- **Establecimiento de las Conexiones:** luego que una SS se registra en la BS, se procede al establecimiento de conexiones de transporte, las cuales están asociadas a flujos de servicio, a fin de proveer un marco de referencia a las futuras solicitudes de ancho de banda. Una conexión de transporte define la relación entre las SCs pares (usuarios del servicio) que utilizan la MAC y los flujos de servicio. Adicionalmente, nuevas conexiones se pueden establecer cuando se requiere cambiar las características de un servicio del cliente ya establecido.
- **Cambios en las Características de las Conexiones:** una vez establecida una conexión la misma puede requerir ser mantenida activamente, los requerimientos de mantenimientos varían dependiendo del tipo de servicio conectado. La modificación de las conexiones pueden requerir mantenimiento estimulado por las SSs o por la red de la conexión (BS).
- **Finalización de las Conexiones:** las conexiones pueden terminarse, lo cual generalmente ocurre cuando un servicio contratado por el cliente ya no es requerido y se solicita su terminación. La terminación de una conexión puede ser iniciada tanto por la BS como por la SS.

Estas actividades de gestión de las conexiones descritas anteriormente se soportan a través del uso de configuraciones estáticas, y adiciones, modificaciones y terminaciones dinámicas de la conexión, a través del intercambio de primitivas de servicio entre entidades pares a nivel de la Capa MAC.

2.4 Definición de los Servicios MAC

Los protocolos de comunicación generalmente se encuentran estructurados en capas. Los protocolos de red estructurados en capas permiten la interacción entre capas pares funcionalmente ubicadas en locaciones distintas. La comunicación entre capas de dos entidades que implementan el protocolo (es decir, entidades pares) son definidas utilizando un conjunto de cuatro tipos de transacciones denominadas primitivas de servicio [Blac91]. Tales primitivas según son: *Request* (Solicitud), *Indication* (Indicación), *Response* (Respuesta) y *Confirm* (Confirmación) [Blac91]. Por su parte el usuario se comunica con el proveedor del servicio a través de una dirección ó un identificador común conocido como *Service Access Point* (SAP, Punto de Acceso al Servicio) ver figura 3.

En IEEE 802.16 las primitivas de servicio proporcionan una forma abstracta de describir la interacción entre la CS (usuario del servicio) y el proveedor del servicio (la MAC CPS) siguiendo el estándar definido en [Blac91] tal y como se ilustra en la figura 4.

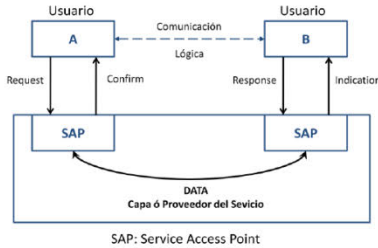


Figura 3: Comunicación entre entidades pares, y entre las capas CS y MAC CPS.

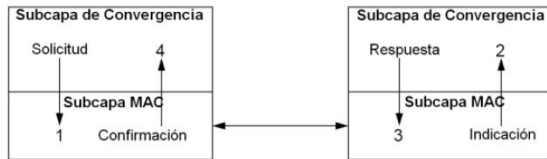


Figura 4: Comunicación entre entidades pares, y entre las capas CS y MAC CPS.

El documento oficial del estándar define las primitivas de servicio mostradas en la tabla 1 para llevar a cabo las funciones de gestión de las conexiones en la capa MAC.

La ocurrencia de una primitiva de servicio desencadena la ocurrencia de una secuencia de primitivas de servicios, que puede incluir algunas ó todas las primitivas de servicios definidas anteriormente. Una secuencia de primitivas de servicios que incluya una confirmación (Servicio Confirmado), incluirá todas las primitivas de servicio antes descritas, y se expresará de forma explícita de parte del proveedor del servicio (MAC CPS) al usuario del servicio (CS) que emitió la solicitud. Si el servicio no es confirmado, no se requerirá una confirmación explícita por parte del proveedor del servicio. Así, una secuencia de primitivas de servicio no confirmada incluirá solamente una solicitud, una indicación y probablemente una respuesta.

En IEEE 802.16 bajo ciertas circunstancias no es necesario el envío de información a la estación par receptora, por lo cual la primitiva “confirmación” es emitida por la MAC-CPS en la entidad solicitante. Ejemplos de ésta situación se dan cuando una solicitud de gestión de conexión es rechazada por la MAC CPS en la entidad solicitante, ó por el proveedor del servicio de red. En los casos donde es necesario mantener al otro lado del enlace informado, una respuesta no solicitada podría ser enviada, lo que conllevará a su vez a que se produzca una confirmación no solicitada a beneficio de la CS. En cualquier lugar de la ruta en el enlace entre una entidad solicitante y solicitada, las solicitudes pueden ser rechazadas, por ejemplo, por falta de recursos en la red, terminado de ésta manera con el protocolo.

Tabla1: Primitivas de Servicio para la gestión de las conexiones

Establecimiento de las Conexiones	MAC_CREATE_CONNECTION.Request MAC_CREATE_CONNECTION.Indication MAC_CREATE_CONNECTION.Response MAC_CREATE_CONNECTION.Confirmation
Cambio de características de una Conexión	MAC_CHANGE_CONNECTION.Request MAC_CHANGE_CONNECTION.Indication MAC_CHANGE_CONNECTION.Response MAC_CHANGE_CONNECTION.Confirmation
Terminación de una conexión	MAC_TERMINATE_CONNECTION.Request MAC_TERMINATE_CONNECTION.Indication MAC_TERMINATE_CONNECTION.Response MAC_TERMINATE_CONNECTION.Confirmation

2.5 Secuencia de Primitivas de Servicio

Las secuencias de primitivas de servicio permitidas a cada usuario del servicio a los fines de realizar procesos de gestión de las conexiones en IEEE 802.16 son mostradas en las tablas 2 y 3 [Mor11][MV10], en ellas se describen las primitivas de servicio que pueden estar inmediatamente seguidas por una primitiva dada en las interfaces de servicio en la entidad solicitante y solicitada. Una primitiva listada en una columna podrá sólo estar seguida por las primitivas marcadas con una “X” en cada fila. Las filas sombreadas indicarán las secuencias que pueden ocurrir en el lado de la entidad solicitante, y las no sombreadas identificarán a las secuencias que pueden ocurrir en el lado de la entidad solicitada.

La ocurrencia de algunas primitivas de servicio de tipo “Request y Confirmation” en las columnas dependerá de la ocurrencia de primitivas de servicio de tipo “Confirmation”, que exprese rechazo ó aceptación a una solicitud. Por ejemplo, si la primitiva de servicio MAC_CREATE_CONNECTION.Confirmation expresa en sus parámetros una respuesta negativa a la creación de una conexión, podría ocurrir en el lado solicitante inmediatamente después de la primitiva MAC_CREATE_CONNECTION.Confirmation nuevamente una primitiva MAC_CREATE_CONNECTION.Request. Situaciones como ésta, son expresadas en las tabla 2 y 3 de la forma “X*”.

Tabla 2: Secuencias de Primitivas de Servicio Parte1

	MAC_CREAT_CONNECTION				MAC_CHANGE_CONNECTION			
	Req	Ind	Rsp	Conf	Req	Ind	Rsp	Conf
MAC_CREAT_CONNECTION.Request	X*			X				
MAC_CREAT_CONNECTION.Indication			X*					
MAC_CREAT_CONNECTION.Response		X	X					
MAC_CREAT_CONNECTION.Confirmation	X			X				
MAC_CHANGE_CONNECTION.Request	X			X	X*			X
MAC_CHANGE_CONNECTION.Indication		X	X			X*	X	
MAC_CHANGE_CONNECTION.Response		X	X			X	X	
MAC_CHANGE_CONNECTION.Confirmation	X			X	X			X
MAC_TERMINATE_CONNECTION.Request	X*			X	X*			X
MAC_TERMINATE_CONNECTION.Indication		X	X*			X	X	
MAC_TERMINATE_CONNECTION.Response		X	X			X	X	
MAC_TERMINATE_CONNECTION.Confirmation	X			X	X			X

Tabla 3: Secuencias de Primitivas de Servicio Parte 2

	MAC_TERMINATE_CONNECTION			
	Req	Ind	Rsp	Conf
MAC_CREAT_CONNECTION.Request	X*			X*
MAC_CREAT_CONNECTION.Indication		X*	X*	
MAC_CREAT_CONNECTION.Response		X*	X*	
MAC_CREAT_CONNECTION.Confirmation	X			X*
MAC_CHANGE_CONNECTION.Request	X*			X*
MAC_CHANGE_CONNECTION.Indication		X*	X*	
MAC_CHANGE_CONNECTION.Response		X*	X*	
MAC_CHANGE_CONNECTION.Confirmation	X			X*
MAC_TERMINATE_CONNECTION.Request	X*			X*
MAC_TERMINATE_CONNECTION.Indication		X*	X*	
MAC_TERMINATE_CONNECTION.Response		X	X*	
MAC_TERMINATE_CONNECTION.Confirmation	X			X*

3. Metodología para la Verificación de Protocolos

Un protocolo de comunicación necesita satisfacer un conjunto de propiedades que están definidas para el servicio de comunicación que proporciona. El comprobar que un protocolo satisface tales propiedades (como por ejemplo, que se establezcan satisfactoriamente las conexiones ó que los datos nunca se pierdan), es conocido como verificación de protocolos [BGB73].

Los errores encontrados en la especificación de un servicio provisto por un protocolo, pueden conllevar a poca confiabilidad del servicio provisto por éste, y consecuentemente insatisfacción del cliente. En éste entorno es apropiado y esencial la utilización de metodologías, técnicas y herramientas computarizadas que soporten el correcto diseño y mantenimiento de los protocolos de comunicación. A éstas actividades se le denomina “Ingeniería de Protocolos”. La Ingeniería de Protocolos se encarga de describir las actividades involucradas en el riguroso diseño y mantenimiento de los protocolos, utilizando métodos formales, es decir aquellos métodos con bases matemáticas [Bill91][BGB73].

3.1 Actividades de Ingeniería de Protocolos

La ingeniería de protocolos abarca un conjunto de actividades que están relacionadas al diseño y desarrollo de los mismo [Bill91], ellas son:

- Definición de los requerimientos de los usuarios.
- Diseño de la arquitectura del protocolo en un alto nivel, normalmente desarrollando una jerarquía de servicios proporcionados por el conjunto de protocolos.
- Especificación del servicio a ser proporcionados en cada nivel dentro de la jerarquía (es decir, definición de servicios OSI [Blac91]).
- Especificación de los protocolos en cada nivel de la jerarquía.
- Implementación.

El proceso de verificación de protocolos es el que permite determinar que la especificación del protocolo proporciona los requerimientos declarados en la especificación del servicio, por lo tanto, se puede decir que la especificación del protocolo es un refinamiento de la especificación del servicio, y que está cumple con la secuencia de correcta de eventos observables por el usuario (es decir, las primitivas del servicio) [BGB73].

La especificación y verificación formal de protocolos implica un conjunto de actividades, que se extienden desde la descripción de la arquitectura de protocolo hasta la veri-

ficación del modelo propuesto. Billington et al. [Bill91][BGB73] presentan estas actividades como un conjunto de pasos sistemáticos y los denomina metodología de verificación de protocolos. Los pasos que describen tal metodología se presentan en la figura 5.

En éste trabajo, se utilizaron el conjunto de pasos presentados en la figura 5 para describir y desarrollar una especificación formal de la especificación del servicio para los procesos involucrados en la gestión de las conexiones a nivel de la capa MAC IEEE 802.16 con la finalidad de presentar una descripción mucho más formal, completa, entendible y libre de ambigüedades, que la hasta el momento encontrada por los autores en la bibliografía relacionada al estándar.

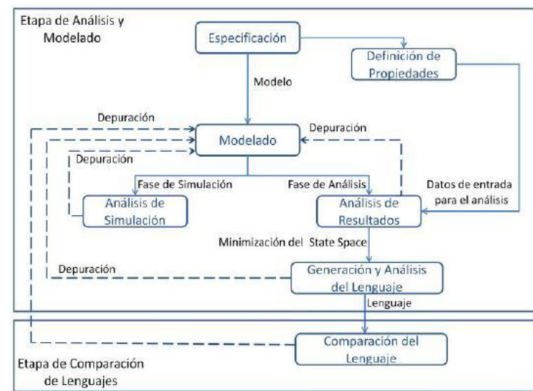


Figura 5: Vista Abstracta de la Metodología: Especificación y Verificación tanto del Protocolo como del Servicio.

Para la tarea de especificación del servicio se utilizaron artefactos como la narrativa, diagramas de bloque y se definieron las secuencias de Primitivas de Servicio, mostradas en las tablas 2 y 3 [Mor11][MV10].

Se desarrolló un modelo basado en la especificación desarrollada usando como técnica formal las Redes de Petri Coloreadas (CPNs), con la ayuda de la herramienta de software CPN Tools 2.0. Durante la tarea de modelado también se definieron un conjunto de propiedades propia de las CPNs de comportamiento que se esperaban observar en al modelo, como por ejemplo la no presencia de abrazos mortales (*deadlocks*) y *livelocks* [Mor11][MV10].

Las simulaciones son utilizadas para eliminar errores iniciales del modelo. Fueron empleadas las herramientas de simulación automática e interactiva proporcionada por CPN Tools que proporciona un soporte para encontrar errores tales como inscripciones erróneas en arcos y secuencias de eventos del protocolo erróneas. A medida que fueron encontrados errores en la simulación, el modelo fue sufriendo modificaciones y las actividades de simulación debieron repetirse [Mor11][MV10].

Para el análisis del modelo se realizó una verificación de algunas de las propiedades de comportamiento del de las CPNs estudiando el resultado obtenido de la aplicación del método del grafo de estado (OG) incluido en CPN Tools (también llamado grafo de ocurrencias o grafo OCC). Los resultados del análisis pueden arrojar algunos errores. Los errores requirieron ser analizados para determinar sus causas y pueden ser una consecuencia de, por ejemplo, un

error en el modelo (por ejemplo, inscripciones erróneas), una inexactitud de la especificación o las asunciones hechas en el modelo.

Otra actividad de análisis incluyó realizar una reducción (minimización) del OG, el cual puede ser visto como un Automata de Estado Finito (*Finit State Automaton, FSA*), a fin de generar las correctas secuencias de primitivas de servicio, y para simplificar el análisis del OG y generación del lenguaje del servicio [Mor11][MV10]. Para realizar las actividades de reducción fue utilizado FSM Tools [MPR10]. Una vez generado el grafo reducido se obtuvo el lenguaje del servicio. En la figura 6 [Mor11][MV10] se puede observar el FSA que representa la ocurrencia de las primitivas de servicio derivado del grafo de estado. Las etiquetas de los arcos, representan el identificador numérico correspondiente a la ocurrencia de una primitiva de servicio en el modelo de la especificación de servicio para la gestión de las conexiones en la MAC IEEE 802.16. En la tabla 4 se presenta un subconjunto del lenguaje del servicio derivado del FSA minimizado [Mor11][MV10].

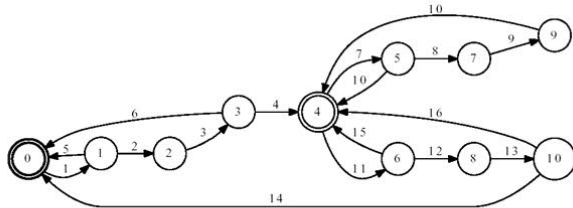


Figura 6: FSA resultante luego de la minimización

Cada secuencia de primitiva de servicio inicia en el nodo “0” (estado inicial), y termina en un estado terminal remarcados con doble círculo (los nodos “0” y “4”).

Tabla 4: Subconjunto de *Secuencias de Primitivas de Servicio que definen el Lenguaje del Servicio*

Secuencias de primitivas de servicio según los ID de las transiciones	Secuencias de primitivas de servicio según las abreviaturas de los nombre de las transiciones
1,5	CrtReq2, CrtCf2 ó CrtReq, ConfrRj
1, 2, 3, 6	CrtReq, Crtind, CrtRsp2, CrtCFRech
1, 2, 3, 4	CrtReq, Crtind, CrtRsp, CrtCf
1, 2, 3, 4, 7, 10	CrtReq, Crtind, CrtRsp2, CrtCf, ChgReq2, ChgCF2 ó CrtReq, Crtind, CrtRsp2, CrtCf, ChgReq, ConfrRj
1, 2, 3, 4, 7, 10, 7, 10	CrtReq, Crtind, CrtRsp, CrtCf, ChgReq2, ChgCF2, ChgReq2, ChgCF2 ó CrtReq, Crtind, CrtRsp, CrtCf, ChgReq, ConfrRj, ChgReq, ConfrRj
1, 2, 3, 4, 7, 10, 11, 15	CrtReq, Crtind, CrtRsp, CrtCf, ChgReq2, ChgCF2, TerReq2, TerCF2 ó CrtReq, Crtind, CrtRsp, CrtCf, ChgReq2, ChgCF2, TerReq, ConfrRj
1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10	CrtReq, Crtind, CrtRsp, CrtCf, ChgReq, Chgind, ChgRsp, ChgCf ó CrtReq, Crtind, CrtRsp, CrtCf, ChgReq, Chgind, ChgRsp, ChgCFRech

4. Aspectos Relevantes sobre la Especificación del Servicio

Siguiendo los pasos sistemáticos que plantea la metodología de Billington [Bill91], en la fase de especificación del servicio se pudo constatar que el documento del estándar presenta ciertos vacíos de información y algunos aspectos no son claramente especificados [Mor11][MV10]. Algunos de ellos son que el documento del estándar, carece de una descripción formal y detallada referente al estado en el cual deberían de quedar las interfaces de servicio cuando por alguna razón el proveedor del servicio en la entidad iniciadora del proceso decide terminar el protocolo.

De igual forma, no está claramente especificado que significa en el documento estándar [IEEE02] “terminar el protocolo”. Así mismo, el documento del estándar no especifica claramente que acción toma la entidad MAC no iniciadora de los procesos de gestión de las conexiones cuando se recibe un mensaje de gestión del tipo DSA-ACK (reconocimiento de solicitud de creación de conexión), ó DSC-ACK (reconocimiento de solicitud de cambios en una conexión), de parte de la entidad iniciadora en correspondencia a la recepción de un mensaje del tipo DSA-RSP (respuesta a una solicitud de creación de conexión) ó DSC-RSP (respuesta a una solicitud de cambios en una conexión) rechazando el servicio solicitado.

Por otra parte, en el documento del estándar no se especifica claramente de que manera le es informado a la CS iniciadora sobre un rechazo de solicitud de gestión de una conexión de transporte (creación, cambios ó terminación) de parte de la red.

Luego de modelados y analizados los procesos involucrados en la gestión de las conexiones en la MAC IEEE 802.16, se plantean algunas sugerencias implementadas y validadas en el modelo elaborado utilizando CPNs a los aspectos antes mencionados, algunas de ellas son [Mor11][MV10]:

- Como una decisión importante de diseño en el modelo al aspecto de “terminar el protocolo” del lado de la MAC CPS en la entidad iniciadora (debido a la situación de un rechazo interno), se plantea regresar a las interfaces de servicio al estado inmediatamente anterior a la generación de una solicitud de servicio rechazada.
- Se plantea que el estado de la MAC no iniciadora, regrese al estado en el que se encontraba previo a la recepción de un mensaje de reconocimiento de recepción de una respuesta de rechazo a la solicitud de la entidad iniciadora (es decir, recepción de un mensaje DSA-REQ ó DSC-REQ).
- Finalmente, se plantea que la forma como la CS iniciadora debe ser informada de una rechazo a su solicitud es a través de la ocurrencia de una primitiva de servicio de tipo “Confirmation Rejected” que permite expresar claramente ésta situación.

Por otra parte el análisis del OG demuestra que no existen problemas funcionales significativos, y que el comportamiento de los procedimientos modelados involucrados en la gestión de las conexiones es el esperado. Así mismo, de tal análisis, y minimización del FSA se ha desprendido un conjunto adicionales de resultados. El FSA resultante pre-

senta ciclos. Esto es esperado ya que siempre que no se haya establecido una conexión la entidad solicitante podrá solicitar la creación de una conexión tantas veces como se requiera. Una vez creada una conexión, se podrán solicitar tantos cambios ó terminaciones (siempre que la solicitud a la terminación de la conexión sea rechazada) de la misma como se requiera.

5. Conclusiones

En el estudio que se ha hecho a la bibliografía publicada sobre el estándar IEEE 802.16, se evidencia que se han realizado pocos estudios utilizando métodos formales, encontrando sólo dos trabajos en los cuales se intenta trabajar con métodos formales en el estándar ó algún aspecto del mismo [Mor11][NRY*06].

Una vez culminada la etapa de modelado y análisis de la especificación del servicio para la gestión de las conexiones, es posible observar que la utilización de métodos formales (específicamente las CPNs) en las actividades de Ingeniería de Protocolos son una herramienta altamente poderosa, para la validación de los mismos y sus procedimientos internos, puesto que hoy en día, no es posible diseñar protocolos de alta calidad utilizando sólo ingeniería intuitiva, ya que los costos de rectificar errores asociados a la especificación luego de llevada a cabo su implementación podrían ser considerablemente altos.

Este trabajo permitió constatar que el documento oficial del estándar IEEE 802.16 y la bibliografía oficial asociada a éste presenta ciertos vacíos de información y algunos aspectos no son claramente especificados [Mor11][MV07]. Entre ellos:

- Carencia de una descripción detallada referente al estado en el cuál deberían de quedar las interfaces de servicio cuando la entidad iniciadora del proceso decide terminar el protocolo.
- No está claramente especificado que significa en el documento estándar “terminar el protocolo”.
- No se especifica claramente que acción toma la entidad MAC no iniciadora de los procesos de gestión de las conexiones cuando se recibe un mensaje de gestión del tipo ACK (Reconocimientos).
- No se especifica claramente de que manera le es informado a la CS iniciadora sobre un rechazo de solicitud de gestión de una conexión de parte de la red.

Los errores encontrados en la especificación de un servicio provisto por un protocolo, pueden conllevar a poca confiabilidad del servicio provisto por éste, y consecuentemente insatisfacción del cliente.

En cuanto al chequeo de las propiedades generales de las CPNs, los resultados obtenidos fueron satisfactorios pues los mismos eran esperados y proporcionan una visión y nivel de confianza sobre la correctitud del modelo. El reporte del grafo de ocurrencias muestra que no hay transiciones muertas. Esto es esperado ya que no debería haber “código muerto” en la especificación servicio. De igual forma, se puede observar de los resultados obtenidos que el modelo está libre de Deadlocks, lo cual también es esperado.

Para simplificar y hacer comprensible el análisis del OG, así como para la correcta generación de la secuencia de primitivas de servicio (es decir, el lenguaje del servicio), fue necesario generar los estados terminales para el FSA, que determinan la finalización de una secuencia de primitivas de servicio. Tales estados terminales son determinados con la ocurrencia de las secuencias de primitivas de servicio mostradas en la tabla 5.

Tabla 5: Secuencias de Primitivas de Servicio que definen los “Estados Terminales”

Secuencias que definen “Estados Terminales”
MAC_CREATE_CONNECTION.Request, inmediatamente seguida de una primitiva del tipo MAC_CREATE_CONNECTION.Confirmation.
MAC_CREATE_CONNECTION.Request, inmediatamente seguida de la primitiva MAC_CREATE_CONNECTION.Indication, inmediatamente seguida de la primitiva MAC_CREATE_CONNECTION.Response, e inmediatamente seguida de la primitiva MAC_CREATE_CONNECTION.Confirmation.
MAC_CHANGE_CONNECTION.Request, inmediatamente seguida de la primitiva MAC_CHANGE_CONNECTION.Confirmation.
MAC_CHANGE_CONNECTION.Request, inmediatamente seguida de la primitiva MAC_CHANGE_CONNECTION.Indication, inmediatamente seguida de la primitiva MAC_CHANGE_CONNECTION.Response, e inmediatamente seguida de la primitiva MAC_CHANGE_CONNECTION.Confirmation.
MAC_TERMINATE_CONNECTION.Request, inmediatamente seguida de la primitiva MAC_TERMINATE_CONNECTION.Confirmation.
MAC_TERMINATE_CONNECTION.Request, inmediatamente seguida de la primitiva MAC_TERMINATE_CONNECTION.Indication, inmediatamente seguida de la primitiva MAC_TERMINATE_CONNECTION.Response, e inmediatamente seguida de la primitiva MAC_TERMINATE_CONNECTION.Confirmation.

Referencias

[Vill03] Villapol M.E. *Modelling and Analysis of the Resource Reservation Protocol Using Coloured Petri Nets*. Doctoral Thesis, University of South Australia, November 2003.

[IEEE02] IEEE Sta. 802.16-2001. *Local and Metropolitan Area Network, Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*. Octubre 2002.

[Bill91] Billington J. *Formal Specification of Protocols: Protocol Engineering*. Encyclopedia of Microcomputers, Marcel Dekker, New York, 1991, Vol. 7, pp 299-314.

- [JK09] Jensen K. and Kristensen L. Coloured Petri Nets: Modelling and Validation of Concurrent Systems. Springer-Verlag, Berlin. 2009.
- [VB04] Villapol M.E. and Billington J. A Coloured Petri Net Approach to Formalising and Analysing the Resource Reservation Protocol. Special issue of Best Papers presented at CLEI'2002, CLEI (Latinamerican Center for Informatics Studies) Electronic Journal (ISSN 0717-5000), Vol. 6, No. 1, Paper 1 (25 pages), 2004.
- [Vill06] Villapol M.E. Modelado y Análisis Inicial del Establecimiento de una Conexión Bluetooth Usando las Redes de Petri Coloreadas, en Proceedings of the Thirty-Second Latin American Computing Conference, CLEI 2006, Santiago de Chile, Chile, 21-25 de Agosto 2006.
- [Vill08] Villapol M.E. Modelado del establecimiento de la conexión entre dos dispositivos Bluetooth Usando las Redes de Petri Coloreadas. Revista "Avances en Sistemas e Informática", ISSN 1657-7663, Vol. 5, No. 3, Pag. 219-231. Diciembre 2008.
- [EMS*02] Eklud C., Marks R., Stanwood K. and Wang S. *IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access*. IEEE Communication Magazine. Junio 2002.
- [EMP*06] Eklud C., Marks R., Ponnuswamy S., Stanwood K y Van Waes N. *Wireless MAN: Inside IEEE 802.16 Standard for Wireless Metropolitan Area Network (Paperback)*. 1ra Ed., Standard Information Network. IEEE Press. Mayo 2006.
- [Mor11] Morales, A. *Modelado y Análisis de los Procesos involucrados en la gestión de las conexiones en la capa MAC IEEE 802.16 utilizando Redes de Petri Coloreadas (CPNs)*. Trabajo de Ascenso a la Categoría de Asistente. Facultad de Ciencias, Escuela de Computación,UCV, 2011.
- [MV10] Morales Ana y Villapol Maria E. *Towards Formal Specification of the Service in the IEEE 802.16 MAC Layer for Connection Management*. 9th WSEAS International Conference on Computational Intelligence, Man-Machine Systems and Cybernetics (CIMMACS '10). ISSN: 1792-6998. ISBN: 978-960-474-257-8. Pp. 140-146.
- [BGB73] Billington J., Gallasch G. and Bing H. *A Coloured Petri Net Approach to protocol Verification*. Lectures on Concurrency and Petri Nets : advances in Petri nets 1973, vol. 3098, pp. 210-290.
- [Blac91] Black U. *OSI: A Model for Computer Communications Standards*. Prentice-Hall. New Jersey. 1991.
- [MPR10] Mohri M., Pereira F., and Riley M. *FSM Library*. AT&T Labs-Research. <http://www.research.att.com/sw/tools/fsm/>. (revisado en 2010).
- [MV07] Morales A. and Villapol M.E. *Modelado y Análisis Inicial de la Especificación de Servicio de la capa MAC del IEEE 802.16 utilizando Redes de Petri Coloreadas (CPN)*. Proceedings en XXXIII Conferencia Latinoamericana de Informática (CLEI 2007), Costa Rica, 2007.
- [NRY*06] Narayana, P.; Ruiming Chen; Yao Zhao; Yan Chen; Zhi Fu; Hai Zhou. *Automatic Vulnerability Checking of IEEE 802.16 WiMAX Protocols through TL4+*. Proceedings of the 2006 2nd IEEE Workshop on Secure Network Protocols. pp. 44-49. Noviembre 2006.