

Uso de Redes de Petri Coloreadas para la Formalización y Análisis de la Activación de Operaciones de la Capa MAC/Física Alternativa (AMP) en Bluetooth 3.0

Mayerlin Blanco ¹, María Elena Villapol ¹

¹ Universidad Central de Venezuela, Caracas, Venezuela

RESUMEN

Bluetooth es una tecnología de comunicación inalámbrica de radio frecuencia (RF), que permite la comunicación a corto alcance de voz y data, ya que funciona en la banda de frecuencia comprendida entre 2.4 y 2.485 GHz. Bluetooth 3.0 incorpora la posibilidad de utilizar una capa MAC/Física Alternativa (AMP, Alternate MAC/PHYS) para la transferencia de datos, y contempla el uso de un Capa de Adaptación del Protocolo (PAL, Protocol Adaptation Layer), la cual puede hacer uso de IEEE 802.11 para la transmisión de datos. Por otro lado las Redes de Petri Coloreadas (Colored Petri Nets, CPNs) son una técnica formal utilizada para modelar sistemas, en particular protocolos de comunicación.

En esta investigación se modeló la máquina de estados asociada a la activación de operaciones AMP usando las CPNs. Las operaciones de la capa AMP involucran un movimiento de canales en la capas de Adaptación y Control de Enlace Lógico (L2CAP, Logical Link and Adaptation Protocol). Bajo la asunciones realizadas la activación de operación AMP funcionó como era esperado y no se obtuvo ninguna anomalía en su comportamiento.

ABSTRACT

Bluetooth is a wireless communication technology of radio frequency (RF), which allows short-range communication of voice and data, it operates in the frequency band between 2.4 and GHz 2485. Bluetooth 3.0 incorporates the possibility of using an Alternative MAC / Physics layer (AMP, Alternate MAC / PHYS) for data transfer, and contemplates the use of a Protocol Adaptation layer (PAL, Protocol Adaptation layer), which can make use of IEEE 802.11 for data transmission. On the other hand Coloured Petri Nets (Colored Petri Nets, CPNs) are a formal technique used to model systems, including communication protocols.

This research modeled the state machine associated with the activation of AMP operations using CPNs. The operations in AMP layer involve a movement of channels in the layer of Adaptation and Logical Link Control (L2CAP, Logical Link and Adaptation Protocol). Under the assumptions made, the activation of AMP operation worked as expected and there was not any anomaly in their behavior.

Keywords: Bluetooth, Redes de Petri Coloreadas, AMP, L2CAP, PAL

1. Introducción

Bluetooth es una tecnología de comunicación inalámbrica de radio frecuencia (RF), que permite la comunicación a corto alcance de voz y data en cualquier parte del mundo, ya que funciona en la banda de frecuencia comprendida entre 2.4 y 2.485 GHz. Bluetooth 3.0 incorpora la posibilidad de utilizar una capa MAC/Física Alternativa (AMP, *Alternate MAC/PHY*) para la transferencia de datos, y contempla el uso de un protocolo de capa de adaptación (PAL, *Protocol Adaptation Layer*), la cual puede utilizar 802.11 para la transmisión de datos [BLU09].

Dada la novedad de la especificación Bluetooth 3.0, en este trabajo se contempla modelar formalmente la máquina de estados asociada a la activación de operaciones AMP, lo que involucra un movimiento de canales en la capa de Adaptación y Control de Enlace Lógico (L2CAP, *Logical Link and Adaptation Protocol*), para que sea efectivo el cambio de controlador en el dispositivo. Todo esto haciendo uso de las Redes de Petri Coloreadas, para lograr un modelado formal del protocolo.

A pesar de ser una tecnología compleja pero ampliamente

utilizada, han sido pocos los trabajos de investigación destinados a estudiar formalmente Bluetooth. Entre estos se encuentran los trabajos de Feldmann et al. [FHK03] y Bereznyuk M.V et al [BGZ07], quienes modelan una red Bluetooth usando las CPNs, para estudiar el rendimiento de la red. Otro trabajo es el de Oliveira, L et al [OLI08] quienes modelan la gestión de manos libres en Bluetooth para determinar su uso adecuado en el desarrollo de aplicaciones. Adicionalmente se tiene el trabajo de Villapol [VIL06] donde se modeló y validó el establecimiento de la conexión Bluetooth para un dispositivo maestro y otro esclavo usando CPNs. Todos estos trabajos se basaron en especificaciones de Bluetooth anteriores a la 3.0. Adicionalmente, a diferencia de estos trabajos, la presente investigación estudia un protocolo no incluido en las especificaciones anteriores a la 3.0.

Con la finalidad de alcanzar los objetivos planteados, este artículo se divide en las siguientes secciones. La sección dos describe las características de Bluetooth 3.0, la sección 3 detalla la máquina de estado correspondiente a la activación de operación AMP. En la sección 4 se describe el modelo realizado y en la sección 5 se analizan los resulta-

dos obtenidos. Finalmente se presentan las conclusiones.

2. Bluetooth 3.0

La tecnología inalámbrica Bluetooth es un sistema de comunicación de corto alcance destinado a sustituir el o los cable(s) que conectan dispositivos portátiles y / o dispositivos electrónico fijos. Las características clave de la tecnología inalámbrica Bluetooth son la robustez, la baja potencia y el bajo costo. Muchas de las funciones de la especificación del núcleo son opcionales, permitiendo la diferenciación de productos. El núcleo del sistema Bluetooth consiste en un host y uno o más controladores como se observa en la Figura 1. Un host se define como todas las capas por debajo de los perfiles y por encima de la interfaz del controlador (HCI, *Host Controller Interface*). Un controlador se define como todas las capas por debajo de HCI. Dos tipos de controladores se definen en esta versión de la especificación del núcleo [BLU09]:

a) Basic Rate / Enhanced Data Rate Controller: que incluye radio, banda base, control de enlace y opcionalmente el HCI.

b) Una MAC alternativa/PHY (AMP): que incluye el controlador PAL AMP (Protocol Adaptation Layer), AMP MAC, el PAL, y opcionalmente, HCI.

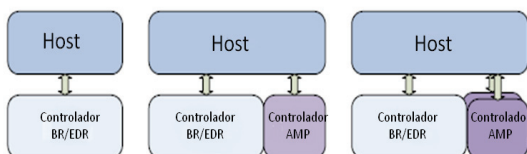


Figura 1: Combinación de host Bluetooth y controladores: solo BR/EDR, BR/EDR con un AMP y un BR/EDR con múltiples AMPs [BLU09].

2.1 Operación de BR/EDR

La tasa básica/mejorada (BR/EDR, Br / Enhanced Data Rate) RF (capa física) opera en la banda sin licencia ISM de 2.4 GHz. El sistema emplea un salto de frecuencia que combate la interferencia y el desvanecimiento y provee muchas portadoras FHSS. La tasa de símbolo es de 1 Mega símbolo por segundo (Ms/ps) soportando la tasa de bit de 1 Megabit por segundo (Mb/s) o, con tasa mejorada, a lo largo del aire de 2 o 3Mb/s. Estos modos son conocidos como tasa básica y tasa mejorada respectivamente.

Durante una operación típica un canal físico de radio es compartido por un grupo de dispositivos que son sincronizados a un reloj común y a un patrón de salto de frecuencia. Un dispositivo provee la referencia de sincronización y es conocido como el maestro. Todos los otros dispositivos son conocidos como esclavos. Un grupo de dispositivos sincronizados en esta manera forman una *piconet*. Esta es la forma fundamental de comunicación en la tecnología Bluetooth.

Los dispositivos en una *piconet* usan un patrón de frecuencia específica, la cual es algorítmicamente determinada por un cierto campo en la dirección Bluetooth y el reloj del maestro. El patrón básico de salto es pseudos aleatorio.

El canal físico está sub-dividido en unidades conocidas como bloques (slots). Los datos son transmitidos entre dispositivos Bluetooth en paquetes, los cuales son posicionados en estos bloques. Cuando las circunstancias lo permiten, un número de bloques consecutivos puede colocarse en un único paquete. El salto de frecuencia toma lugar entre la transmisión y recepción de paquetes. La tecnología Bluetooth provee el efecto de transmisión full dúplex a través del uso del esquema de división por tiempo dúplex (TDD, Time-División Duplex).

Por encima del canal físico hay una capa de enlaces con canales y protocolos de control asociados. La jerarquía de los canales y enlaces desde el canal físico hacia arriba es: canal físico, enlace físico, el transporte lógico, enlace lógico y el canal L2CAP.

Dentro del canal físico, un enlace físico es formado entre dos dispositivos que transmiten paquetes en cualquier dirección entre ellos. En la *piconet* existe restricciones de cual dispositivo puede formar un enlace físico. Existen un canal físico entre cada esclavo y el maestro. El enlace físico no está formado directamente entre los esclavos en una *piconet*.

El enlace físico es usado como un transporte por uno o más de los enlaces lógicos que soporten el sincronismo unicast, tráfico asíncrono e isócrono, y tráfico broadcast. El tráfico en el enlace lógico es multiplexado en el enlace físico al ocupar bloques asignados por una función de planificación en el manejador de recursos.

Un protocolo de control para banda base y las capas físicas es llevado sobre el enlace lógico en conjunto con los datos de usuario. Este es el protocolo de control de enlace (LMP, Link Manager Protocol). Los dispositivos que son activados en una *piconet* tienen por defecto un transporte lógico asíncrono orientado a conexión que es usado para transportar los mensajes de señalización del protocolo LMP. Por razones históricas esto es conocido como el transporte lógico ACL. El transporte lógico por defecto (ACL) es el que es creado cuando un dispositivo se une a una *piconet*. Transportes lógicos pueden ser creados adicionalmente para transportar flujos de datos síncronos cuando es requerido.

La función del control de enlace usa LMP para controlar la operación de los dispositivos en la *piconet* y proveer servicios para manejar las capas más bajas de la arquitectura (radio y banda base). Por encima de la capa banda base la capa L2CAP provee una abstracción basada en canales de las aplicaciones y servicios. Lleva a cabo la segmentación y reensamblaje de los datos de las aplicaciones y multiplexa y demultiplexa los múltiples canales sobre un canal lógico compartido. L2CAP tiene un protocolo de control de canal que es llevado sobre el ACL. Los datos proveniente de las aplicaciones suministradas al protocolo L2CAP puede ser llevada en cualquier enlace lógico que soporte el protocolo L2CAP.

2.2 Operación de AMP (Alternatate MAC/Phys)

La capa MAC/Física alternativa (AMP) son los controladores secundarios en el núcleo del sistema Bluetooth 3.0. BR/EDR, la radio primaria, es usada para realizar descubrimientos, asociaciones, establecimiento de la conexión y

mantenimiento de la conexión. Una vez que una conexión L2CAP ha sido establecida entre dos dispositivos sobre el radio BR/EDR, el manejador AMP puede descubrir los AMPs que se encuentran disponibles en el otro dispositivo. Cuando una AMP es común entre dos dispositivos, el núcleo del sistema provee mecanismos para mover el tráfico de los datos desde el controlador BR/EDR al controlador AMP.

Cada AMP consiste de un protocolo de capa de adaptación (PAL, *Protocol Adaptation Layer*) en el tope de una capa MAC y una capa física. PAL es responsable por mapear los protocolos y comportamientos Bluetooth (como lo especifica el HCI) con el protocolo específico de la capa MAC y capa Física subyacentes.

Los canales L2CAP pueden ser creados en, o movidos a un AMP. Los canales L2CAP pueden también ser movidos de regreso al radio BR/EDR cuando esas capacidades no son necesarias o cuando el enlace físico AMP ha sobrepasado el tiempo de espera. Las AMPs pueden estar habilitadas o deshabilitadas dependiendo de la necesidad, lo mismo se hace, para minimizar el consumo de energía en el sistema.

3. Máquina de Estado

La especificación de Bluetooth 3.0 contempla una sección de máquinas de estados, en donde se establece el comportamiento en el intercambio de mensajes para la activación de la operación AMP como se observa en la Figura 2.

Los siguientes estados son definidos [BLU09]:

- OPEN: estado de transferencia de datos.
- WAIT_MOVE: una solicitud de mover el canal actual a otro controlador ha sido enviada, y se ha recibido un mensaje de respuesta que indica que la solicitud está pendiente debido a que es necesario modificar o crear el enlace. Este estado no es modelado en este trabajo.
- WAIT_MOVE_RSP: una solicitud de mover el canal a otro controlador ha sido enviada. Está pendiente una respuesta.

- WAIT_MOVE_CONFIRM: una respuesta a la solicitud de mover el canal ha sido enviado, se está esperando por confirmación de la operación de movimiento del iniciador.

- WAIT_CONFIRM_RSP: una confirmación de mover el canal ha sido enviado, se está esperando una respuesta de confirmación de mover el canal.

En la máquina de estado, el L2CAP_Data_message corresponde a uno de los formatos PDU usado en los canales de datos orientados a conexión. En la máquina de estado estos eventos internos entre otros son definidos [BLU09]:

- MoveChannel_Req: una entidad local L2CAP se le solicita mover el canal actual a otro controlador.
- ControllerLogicalLinkInd: un controlador indica la aceptación o rechazo de una solicitud de enlace lógico.

Existe una única máquina para cada canal L2CAP orientado a conexión que este activo. Para este trabajo se decidió modelar la máquina de estados correspondiente a la activación de operaciones AMP más no la creación del canal, partiendo del punto en que ya se ha establecido la conexión Bluetooth y que se recibe un evento interno solicitando la activación del AMP (se recibe un MoveChannel_Req).

4. Modelo de activación de operaciones AMP

En la especificación de Bluetooth no se describen claramente las transiciones entre los estados mostradas en la Figura 2. A continuación se presenta un modelo de la activación de AMP basado en la interpretación de la especificación de Bluetooth 3.0. El modelo es creado usando las CPNs con la ayuda de CPN Tools versión 3.2.2.

4.1 Alcance

Para este trabajo se plantea el modelado de la activación de operación de AMP, lo cual involucra un movimiento de canales en la capa de Adaptación y Control de Enlace Lógico (L2CAP, Logical Link and Adaptation Protocol), para que sea efectivo el cambio de controlador en el dispositivo. Este proceso conlleva un intercambio de mensajes entre los dispositivos, por lo que se incluye en el modelo la posibilidad de colisiones y el apropiado manejo de las mismas, en donde dependiendo del caso es posible que se produzca un intercambio de roles entre los dispositivos.

No obstante, no se modela el proceso de creación del nuevo canal lógico, asumiendo así la existencia de un canal disponible y configurado para establecer la comunicación entre los nuevos controladores. No se considera la pérdida de paquetes ya que inicialmente se desea modelar el funcionamiento del protocolo tal como está especificado en la Figura 2. Adicionalmente, aunque las CPNs soportan el modelado de las restricciones temporales, en esta versión del modelo ellas han sido omitidas. Esto es porque principalmente se está interesado en la especificación funcional de todas las transiciones mostradas en la Figura 2.

4.2 Descripción del Modelo

En este trabajo se utilizan los constructores jerárquicos de las CPNs [VIL03]. Las jerarquías se construyen usando la noción de *transición de sustitución*, la cual puede ser considerada como una macro expansión. El modelo se inicia con un diagrama CPN en el nivel superior, el cual

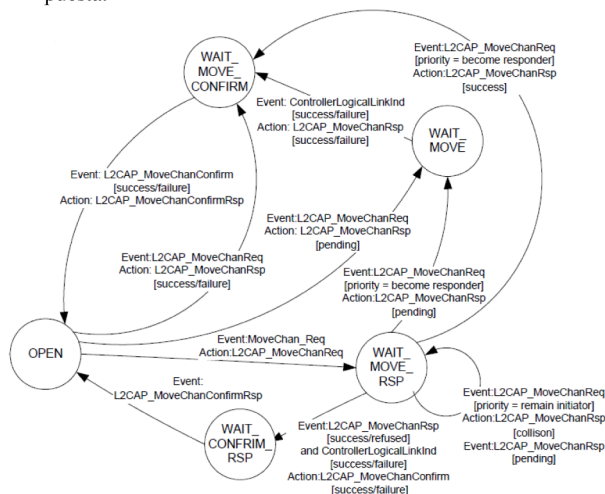


Figura 2: Estados y transiciones activación de operación AMP [BLU09].

proporciona una visión general del sistema que está siendo modelado y su ambiente. En las CPNs jerárquicas, este diagrama en el nivel superior contendrá un número de transiciones de sustitución. Cada una de estas transiciones de sustitución es refinada en otro diagrama CPN, el cual puede a su vez contener transiciones de sustitución. El diagrama en el nivel superior y cada una de las transiciones de sustitución son definidas por *módulos*.

El modelo se dividió en tres vistas. La primera permite representar una vista general del modelo, una capa de abstracción de alto nivel, identificando a través de transiciones de sustitución (dibujada en forma de rectángulo) los participantes en el intercambio de mensajes, el Initiator y el Responder como se observa en la Figura 3.

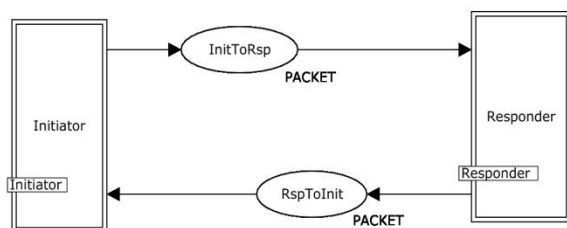


Figura 3: Vista jerárquica de la activación AMP

Otro componente básico de una CPN es una *plaza* la cual es dibujada en forma de círculo o elipse y puede representar una condición o un estado. Cada plaza tiene un tipo asociado o un *conjunto de colores* (colour set), el cuál determina el tipo de datos que la plaza puede tener. En la Figura 3, las plazas *InitToRsp* y *RspToInit* son del tipo *PACKET* (el cual es descrito en la Sección 4.3) y representan los paquetes L2CAP que viajan hacia y desde los dispositivos. Las plazas y transiciones de sustitución están conectadas por arcos, los cuales indican el tipo de data requerida o producida por las transiciones de sustitución.

Los módulos y sub módulos de una CPN se interconectan a través de plazas puertos y zócalos. Las sub módulos tienen plazas puertos, que les permiten recibir y entregar marcas de los módulos de un nivel más alto. Las plazas conectadas con la transición de sustitución *Initiator* tiene una plaza entrante y una saliente (*InitToRsp* y *RspToInit*, respectivamente), que se llaman zócalos. Los zócalos son relacionados con las plazas puertos en los correspondientes sub módulos proporcionando las asignaciones de puertos.

4.3 Declaraciones globales

La Figura 4 muestra los conjuntos de colores (color sets) declarados. El *color set* *MNG* representa los posibles mensajes que pueden ser intercambiados entre los participantes en la comunicación, los mismos son descritos a continuación:

- *L2CAP_MoveChanReq*: mensaje enviado para solicitar el cambio de canal.
- *L2CAP_MoveChanRspS*: respuesta exitosa ante una solicitud de cambio de canal.
- *L2CAP_MoveChanRspF*: respuesta fallida ante una solicitud de cambio de canal.
- *L2CAP_MoveChanRspC*: respuesta de que la solicitud de cambio de canal ha producido una colisión.

- *L2CAP_MoveChanConfirmS*: confirmación positiva ante una respuesta de solicitud de cambio de canal exitosa.
- *L2CAP_MoveChanConfirmF*: confirmación fallida ante una respuesta de solicitud de cambio de canal fallida.
- *L2CAP_MoveChanConfirmRspS*: respuesta positiva ante una confirmación de solicitud de cambio de canal exitosa.
- *L2CAP_MoveChanConfirmRspF*: respuesta fallida ante una confirmación de solicitud de cambio de canal fallida.

```

Declarations
Standard declarations
colset MNG=with L2CAP_MoveChanReq|
L2CAP_MoveChanRspS
|L2CAP_MoveChanRspF|
L2CAP_MoveChanRspP|
L2CAP_MoveChanRspC|
L2CAP_MoveChanConfirmS|
L2CAP_MoveChanConfirmF|
L2CAP_MoveChanConfirmRspS|
L2CAP_MoveChanConfirmRspF;
colset STATE=with OpenO|
OpenN|
Wait_Move_Rsp|
Wait_Confirm_Rsp|
|Wait_Move_Confirm;
colset BD_ADDR=string;
colset COLLISIONRSP=product BD_ADDR*BD_ADDR;
colset HEXA=int with 0..14;
colset PACKET= product MNG*BD_ADDR*BD_ADDR;
var iniAddr : BD_ADDR;
var respAddr : BD_ADDR;
var collisionResult:COLLISIONRSP;
val hexa="012345679ABCDEF";
fun swap(x,y)=(y,x);
fun noSwap(x,y)=(x,y);
fun HexaNumber
fun GenerateAddress
fun HexaPosition
fun HexaToDecimal
fun compare
fun ProcessCollison
val ini=GenerateAddress(0,"");
val rp=GenerateAddress(0,"");

```

Figura 4: Declaración global

El colorset *STATE* representa todos los posibles estados que pueden tomar los dispositivos Bluetooth involucrados en la activación de la operación AMP, los mismos son descritos a continuación:

- *OpenO*: estado de transferencia de datos en el controlador BR/EDR.
- *OpenN*: estado de transferencia de datos en el controlador AMP. Este estado indica que el proceso de activación de operación AMP ha sido exitoso.
- *Wait_Move_Rsp*: se ha enviado una solicitud de mover el canal a otro controlador. Está pendiente una respuesta.
- *Wait_Confirm_Rsp*: se ha enviado una confirmación de mover el canal, se está esperando una respuesta de confirmación de mover el canal.
- *Wait_Move_Confirm*: se ha enviado una respuesta a la solicitud de mover el canal, se está esperando por una confirmación de la operación de movimiento del iniciador.

El colorset *BD_ADDR* representa la dirección de cada dispositivo Bluetooth. Está formada por 12 caracteres hexadecimales.

El colorset *PACKET* se utiliza para representar los paquetes intercambiados entre los dispositivos y es el producto entre el colorset *MNG* y dos colorset *BD_ADDR*.

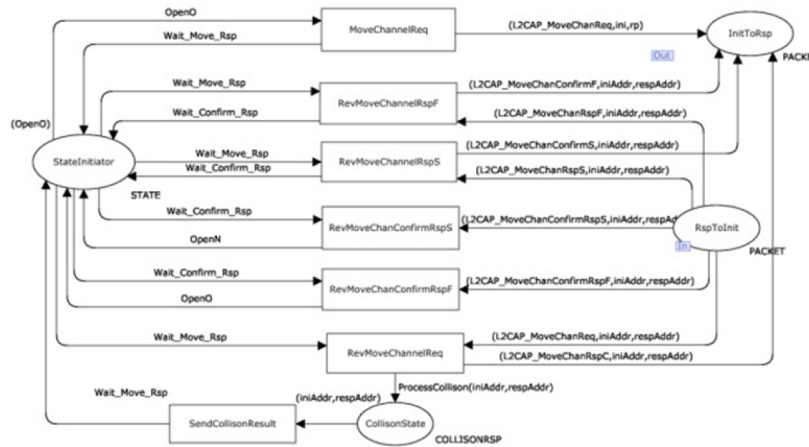


Figura 5: Initiator

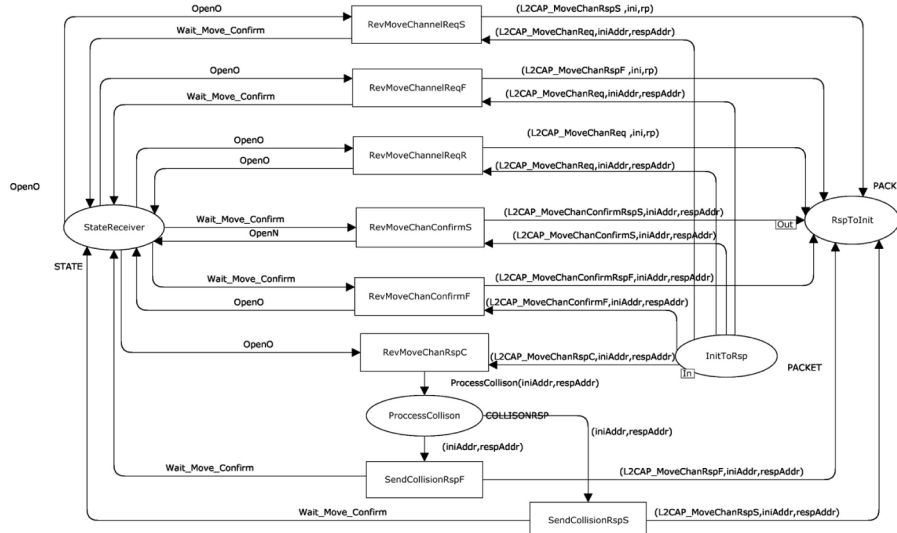


Figura 6: Responder

Por último se define el coloset Hexa utilizada para generar las direcciones de los dispositivos. El resto son variables (var) y funciones usadas en el modelo.

La segunda vista modela al iniciador (Initiator) de la petición de cambio de controlador como se observa en la Figura 5. El iniciador parte del estado OpenO, ya que el proceso de establecimiento de conexión Bluetooth para este momento debe haber ocurrido y todo inicia con el evento *MoveChannel_Req*, el cual es disparado por otra capa.

La tercera vista modela el comportamiento del receptor (Responder) de la solicitud de cambio de controlador (ver Figura 6). El receptor parte del estado de OpenO. En el momento que el iniciador envía el mensaje *L2CAP_MoveChanReq*, el cual produce luego de recibir el evento *MoveChannel_Req*, se inicia el proceso de cambio de controlador en el Receptor y si es exitoso termina en el estado OpenN.

Es importante destacar que es posible la ocurrencia de colisiones, significando esto que el dispositivo receptor puede enviar una solicitud de cambio de controlador al mismo tiempo que el iniciador. Para este caso es necesario

aplicar el procedimiento de manejo de colisiones el cual establece que al ser detectada una colisión es necesario que cada dispositivo compare las direcciones entre sí (BD_ADDR) y el que tenga la dirección más grande debe rechazar la petición y el proceso debe continuar, esto significa que puede ocurrir un cambio de roles entre los dispositivos.

5. Análisis y Simulación del Modelo CPN

El modelo descrito anteriormente es simulado y analizado para estudiar su comportamiento. En esta sección se describe como es el comportamiento dinámico de un sistema CPN y el análisis del modelo usando la técnica del grafo de estado.

5.1 Comportamiento Dinámico de las CPNs

El comportamiento dinámico de un sistema CPN se puede describir como el cambio del marcado de la red según las ocurrencias de las transiciones, que dependen de las expresiones en sus arcos circundantes. Un *marcado* de una plaza comprende un (*multi*) conjunto de valores (cono-

cidos como *tokens* o *marcas*) tomadas del tipo de la plaza. El *marcado inicial* incluye la distribución de *tokens* en cada una de las plazas del modelo [VIL03] [VIL06].

Una transición puede ocurrir si está *habilitada* (*enabled*). Para que una transición este habilitada en el marcado actual, debe ser posible *asociar* (asignar) valores de los datos a las variables que aparecen en las expresiones circundantes al arco y en el *guard* y ciertas condiciones debe ser satisfechas. Una transición puede tener una expresión *boolean* asociada a ella denominada *guard* y se incluye entre corchetes. Similarmente a la expresión de un arco, un *guard* puede tener variables. Así, para que una transición ocurra, en primer lugar, cada una de las expresiones de los arcos entrantes evalúa a las marcas que están presentes en las plazas de entrada correspondientes. En segundo lugar, si hay cualquier *guard*, debe evaluar a verdad [VIL06].

La ocurrencia de una transición remueve marcas de las plazas entrantes y agrega marcas a las plazas salientes. Las marcas removidas son el resultado de evaluar las expresiones en los arcos entrantes correspondientes, mientras que los valores de las marcas agregadas son el resultado de evaluar las expresiones del arco en los arcos salientes correspondientes [VIL06].

5.2 Análisis del Modelo

El modelo descrito anteriormente es analizado generando el grafo de estado o *Grafo de Ocurrencias* (*Occurrence Graph, OG*) y su correspondiente grafo de *Componentes Fuertemente Conectados* (*Strongly Connected Component, SCC*). El grafo de estado incluye todos los marcados posibles que se puedan alcanzar desde el marcado inicial y se representa como un grafo dirigido donde los nodos representan los marcados y los arcos los elementos de asociación que ocurren.

Por otra parte, un *Componente Fuertemente Conectado* (*Strongly Connected Component, SCC*) del grafo de estado es un sub-grafo máximo, cuyos nodos son mutuamente accesibles entre cada uno de ellos [JENS10]. Un grafo SCC tiene un nodo por cada SCC y arcos que conectan cada nodo del SCC con uno o más nodos SCC. Un SCC sin arcos entrantes se llama SCC inicial, y un SCC sin arcos salientes se llama SCC terminal. Cada nodo en el grafo de estado pertenece solamente a un SCC, así que el grafo SCC será más pequeño o igual que el grafo de estado correspondiente.

En este trabajo, el grafo de estado es usado para investigar algunas propiedades dinámicas de las CPNs [JENS10], tales como acotamiento (boundedness), vivacidad (liveness) y propiedades locales (home properties), así como también para chequear al protocolo. Para la generación del grafo de estado y del reporte con los resultados de las propiedades anteriores se usó CPN Tools versión 3.2.2.

5.2.1 Marcado Inicial

A fin de analizar el modelo las plazas StateInitiator y StateReceiver son inicializadas con el estado OpenO para indicar que existe una conexión BR/ERD ya establecida.

Las demás plazas no tienen ningún *token* en el marcado inicial.

5.2.2 Estadística del Grafo de Ocurrencia

Para el marcado inicial se generó el reporte de estados completos para el análisis del modelo CPN. La información estadística que incluye el tamaño del grafo de estado (OG) y el grafo SCC se muestran en la Tabla 1.

	Resultado
State Space	
Nodos	22
Arcos	77
Tiempo en generarse	0
Scs Graph	
Nodos	9
Arcos	10
Tiempo en generarse	0

Tabla 1: Información estadística del grafo de estado

5.3 Propiedades Generales

Las propiedades de acotamiento y vivacidad son investigadas para validar y depurar el modelo y para estudiar el comportamiento del proceso de activación de operación AMP. Esta información es tomada del reporte de grafo de estado generado por CPN Tools.

5.3.1 Acotamiento

Las *cotas enteras* y las *cotas de los multi-conjuntos* son analizadas para las plazas del modelo. Esta información es resumida en la Tabla 2 para todos los grafos de estados generados. Las cotas enteras superiores describen el máximo número de *tokens* que pueden estar en una plaza, mientras que las cotas de los multi-conjuntos indican que *tokens* pueden estar en una plaza. Las plazas StateInitiator y StateReceiver puede tener una máximo de un *token* ya que un dispositivo solo puede encontrarse en un estado en un momento dado. El valor de las cotas de los multi-conjuntos superiores indican todos los estados en que puede estar los dos dispositivos.

5.3.2 Propiedades Locales y de Vivacidad

La Tabla 3 muestra las propiedades locales y de vivacidad. Un *marcado muerto* (*dead marking*) es un marcado sin elementos de asociación habilitados, es decir, ninguna transición puede ocurrir a partir de dicho marcado. En el modelo existe un marcado muerto, el cual representa el estado correspondiente al cambio efectivo de controladores. Cada uno de los controladores inicia en un estado OpenO que indica que existe una conexión BR/ERD ya establecida y la simulación se detiene cuando se logra el cambio de controlador (activación de AMP) representada por el estado OpenN. Esto quiere decir que el sistema llega a un estado en el cual no puede seguir avanzando.

Una transición está viva si puede ocurrir al menos una vez en una secuencia de ocurrencias para cada marcado de

la red que es alcanzable desde el marcado inicial. Todas las transiciones del modelo están vivas.

Un marcado local (*home marking*) es un marcado que puede ser siempre alcanzado por el resto de los marcados alcanzables. En este caso sólo un marcado local.

Una transición muerta es aquella que no está habilitada en ningún marcado alcanzable. El reporte del grafo de estado generado por CPN Tools muestra que no hay transiciones muertas. Esto es esperado ya que no debería haber “código muerto” en la especificación.

6. Conclusiones

En este artículo, las CPNs han sido utilizadas para desarrollar un modelo de la activación de la operación AMP en Bluetooth 3.0. La especificación de este protocolo, similarmente a otras partes de la especificación Bluetooth, se caracteriza por ser poco clara y en algunos casos ambigua. El modelo presentado en este trabajo define claramente, con la ayuda de un método formal, tal como los son las CPNs, la activación de la operación AMP. El análisis inicial del modelo basado en el grafo de estado y las propiedades generales de una CPN muestra que los resultados que son los esperados y el procedimiento de establecimiento de una conexión funciona acorde a lo especificado cuando el medio de transmisión es confiable, es decir, no existen pérdidas de paquetes.

Los trabajos futuros comprenden analizar el modelo considerando pérdida de paquetes en función de ciertas propiedades específicas del protocolo usando técnicas tales como el chequeo de modelos (model checking). También, se desea incorporar restricciones de tiempo al modelo de forma tal de realizar algunos análisis en términos de la sincronización entre los dispositivos. A partir del modelo existente es muy sencillo incluir otros dispositivos para formar una piconet más grande a la analizada en este artículo. Esto indudablemente va a influir en el tamaño del grafo de estado y su tiempo de generación. Por lo tanto, los trabajos futuros deben incluir el estudiar técnicas de simplificación de grafos de estado, que se puedan aplicar a este caso.

Referencias

[BLU09] Bluetooth SIG, Inc. Specification of the Bluetooth System version 3.0. Abril 2009.

[JENS10] Jensen K. Coloured Petri Nets: Basic Concepts, *Analysis Methods and Practical Use*. Vol. 1, 2 and 3. Springer-Verlag, 2nd edition, 2010.

[FHK03] Feldmann S, Hartmann T, Kyamakya K. Modeling and Evaluation of Scatternets Performance by using Petri Nets. In *Proceedings of the International Conference on Wireless Networks, ICWN '03*, June 23 - 26, 2003, Las Vegas, Nevada, USA. CSREA Press 2003, ISBN 1-932415-03-3.

Plaza	Cota Entera	Cota de los Multi-Conjuntos
CollisonState	1	1' ("595DBED9BDAB", "5AC09F564C67")
StateInitiator	1	1' OpenO++ 1' OpenN++ 1' Wait_Move_Rsp++ 1' Wait_Confirm_Rsp
InitToRsp	1	1' (L2CAP_MoveChanReq, "5AC09F564C67", "595DBED9BDAB")++ 1' (L2CAP_MoveChanRspC, "5AC09F564C67", "595DBED9BDAB")++ 1' (L2CAP_MoveChanConfirms, "595DBED9BDAB", "5AC09F564C67")++ 1' (L2CAP_MoveChanConfirms, "5AC09F564C67", "595DBED9BDAB")++ 1' (L2CAP_MoveChanConfirmF, "595DBED9BDAB", "5AC09F564C67")++ 1' (L2CAP_MoveChanConfirmF, "5AC09F564C67", "595DBED9BDAB")
RspToInit	1	1' (L2CAP_MoveChanReq, "5AC09F564C67", "595DBED9BDAB")++ 1' (L2CAP_MoveChanRspS, "595DBED9BDAB", "5AC09F564C67")++ 1' (L2CAP_MoveChanRspS, "5AC09F564C67", "595DBED9BDAB")++ 1' (L2CAP_MoveChanRspF, "595DBED9BDAB", "5AC09F564C67")++ 1' (L2CAP_MoveChanRspF, "5AC09F564C67", "595DBED9BDAB")++ 1' (L2CAP_MoveChanConfirmRspS, "595DBED9BDAB", "5AC09F564C67")++ 1' (L2CAP_MoveChanConfirmRspS, "5AC09F564C67", "595DBED9BDAB")++ 1' (L2CAP_MoveChanConfirmRspF, "595DBED9BDAB", "5AC09F564C67")++ 1' (L2CAP_MoveChanConfirmRspF, "5AC09F564C67", "595DBED9BDAB")
ProcessCollison	1	1' ("595DBED9BDAB", "5AC09F564C67")
StateReceiver	1	1' OpenO++ 1' OpenN++ 1' Wait_Move_Confirm

Tabla 2: Cotas superiores de las plazas del modelo

Propiedad	Valor
Marcados Muertos	1
Marcados Locales	1
Transiciones Muertas	Ninguna
Transiciones Vivas	Todas

Tabla 3: Propiedades locales y de vivacidad

- [VIL03] Villapol M.E. Modelling and Analysis of the Resource Reservation Protocol Using Coloured Petri Nets. *Doctoral Thesis*, University of South Australia, November 2003.
- [VIL06] 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.
- [BGZ07] Bereznyuk M.V., Gupta K.K. and Zaitsev D.A. Effectiveness of Bluetooth Address Space Usage. Paris. ICSSEA 2007.
- [OLI08] Oliveira L., Rodrigues A., Gorgonio K., Perkusich A. Specification and analysis of a Bluetooth handoff protocol for real-time applications. *Software, Telecommunications and Computer Networks, 2008. SoftCOM 2008. 16th International Conference on*, vol., no., pp.179-183, 25-27 Sept. 2008.