

# Evaluación de la Capacidad del Canal de Control del Sistema TETRA

P. Plans<sup>1</sup>, J. Paradells<sup>1</sup>, J. Olmos<sup>2</sup>, F. Lopez<sup>3</sup>, R. Agustí<sup>2</sup>

<sup>(1)</sup> Departamento de Redes Inalámbricas, <sup>(2)</sup> Departamento de Teoría del Señal

Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)

Jordi Girona, 1-3, C-3, 08034 Barcelona, España

Tel. 934017808, Fax. 934011058

{ppplans, teljpa}@entel.upc.edu, olmos@tsc.upc.edu, ramon.agusti@upc.edu

<sup>(3)</sup> Centro de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información (CTTI)

Pg. de Gràcia, 11 Esc. A 3a. planta

Tel. 934842000, Fax. 934842043

francesc.lopezi@gencat.net

## Resumen

*En este artículo se evalúa la capacidad del canal de control de una red TETRA (TERrestrial TRunked RAdio). Si bien el dimensionado de los sistemas trunking ha sido ampliamente estudiado el canal de control, y en particular el de TETRA no ha recibido la atención que merece. No solamente es necesario dimensionar el sistema con los canales de tráfico suficientes sino que el canal de control debe ser capaz de soportar esta carga además de las recientes aplicaciones que cada día están cogiendo más peso como las conocidas aplicaciones de localización, servicios de datos en modo paquete, etc. Como columna principal que es, el canal de control debe ser considerado cuando se evalúa el sistema. Con este fin, este artículo pretende describir de forma clara el funcionamiento del canal de control y cómo es usado en los diferentes procedimientos y finalmente se derivan unas relaciones simples que permiten dimensionar la capacidad de una celda TETRA con diferentes tipos de servicios (llamadas de voz, mensajes cortos, localizaciones y sesiones de datos en modo paquete).*

## 1. Introducción

Si bien el dimensionado de los sistemas trunking ha sido ampliamente estudiado el canal de control, y en particular el de TETRA [1] no ha recibido la atención que merece. Recientemente con la proliferación de aplicaciones de localización y el uso del acceso en modo paquete en TETRA se ha percibido el riesgo de limitación de canal de control y con ello la necesidad de un diseño correcto del mismo. Podríamos decir, sin riego a equivocarnos, que el canal de control es el elemento más importante del sistema TETRA. Todas las comunicaciones, incluso las de voz, necesitan en algún momento usar el canal de control. Esta restricción sucede en otros sistemas como el MPT1327 (Ministry of Post and Telecommunications) o el GSM (Global System for Mobile communications), pero la capacidad disponible en estos otros sistemas, permite olvidarse del dimensionado del canal. En TETRA se puede llegar a hacer un uso intensivo del canal de control y este sobredimensionado teórico deja de ser cierto.

TETRA es un estándar abierto definido por la ETSI (European Telecommunications Standards Institute) para comunicaciones radio digitales destinado a los usuarios de los sistemas PMR (sistemas profesionales o privados de comunicaciones móviles radio). Las llamadas de grupo, el establecimiento de la llamada rápido, la variedad de niveles de seguridad, o las comunicaciones en modo directo entre terminales son algunas de las características principales que ofrecen estos sistemas. Algunos de

estos servicios condicionan el dimensionado del sistema. En el caso de las llamadas de grupo, por ejemplo, el tráfico de comunicaciones generado por un usuario puede reproducirse en múltiples estaciones base (TBSs) consumiendo muchos más recursos que una simple llamada individual (entre dos usuarios). Servicios adicionales como el “shifting areas” pueden optimizar el uso de recursos radio de tráfico de usuario, pero generan más tráfico de señalización. Un ámbito de aplicación muy común del sistema TETRA son los servicios de emergencia. Estos sistemas añaden una doble dificultad a su diseño. Por un lado la demanda es muy difícil de predecir y por otro lado se debe asegurar su correcto funcionamiento incluso en situaciones de saturación.

Desde el punto de vista del canal de control se debe prestar una atención especial a aquellas acciones que implican la intervención de éste y en que medida lo hacen. El establecimiento de llamadas, los servicios de localización automática ya sea AVL como APL (Automático Vehicle/Person Location), las actualizaciones para la gestión de la movilidad o el establecimiento de flujos para envío de paquetes, ... son algunas de las acciones más relevantes que afectan al canal de control.

En este trabajo se pretende describir de forma clara el funcionamiento del canal de control y cómo es usado en los diferentes procedimientos. Así como también se indican las diferentes alternativas para descongestionar este canal (uso de más de un canal de control, señalización asociada a una llamada de grupo, uso de canales dedicados,...). Por último se

derivan unas relaciones simples que permiten dimensionar la capacidad de una celda TETRA con diferentes tipos de servicios (llamadas de voz, mensajes cortos, localizaciones y sesiones de datos en modo paquete).

Uno de los objetivos de este trabajo es dar la importancia que merece el canal de control a la hora de dimensionar un sistema TETRA. No solamente es necesario dimensionar el sistema con los canales de tráfico suficientes sino que el canal de control debe ser capaz de soportar esta carga. La evaluación de la capacidad del sistema se debe llevar a cabo sin olvidar su indispensable columna principal: el canal de control.

El resto de este documento está organizado del siguiente modo. En la primera parte, con el fin de familiarizar al lector con el sistema TETRA, se presenta una visión general. A continuación se presentan los aspectos más relevantes que hay que considerar para el dimensionado de un sistema TETRA. Seguidamente se detalla el funcionamiento del canal de control y se presenta el modelo analítico propuesto para caracterizarlo. Para finalizar el artículo se aplica el modelo propuesto en dos escenarios típicos en los que un sistema TETRA puede dar soporte. Concretamente se trata de dos escenarios donde se requiere un servicio de localización con distintos requerimientos. Finalmente se proponen alternativas que puedan disminuir la ocupación del canal de control y se exponen conclusiones.

## **2. Visión General del Sistema TETRA**

El sistema TETRA ha sido diseñado y desarrollado principalmente como sistema de comunicaciones móviles para servicios de emergencias y seguridad. TETRA es un sistema digital PMR moderno que puede operar en modo infraestructura (basado en una arquitectura celular) y en modo directo (de terminal a terminal). Conocido también como TMO (Trunked Mode of Operation) y DMO (Direct Mode of Operation) respectivamente. Sin embargo para este estudio nos centramos solamente en el TMO donde los principales protagonistas son los terminales y la infraestructura o también llamada SwMI (Switching and Management Infrastructure).

TETRA tiene ciertas similitudes con el sistema GSM. Se usan portadoras de 25kHz que se dividen en canales mediante una estructura TDMA de 4 slots (cada uno de 14,167 ms). Cada 4 slots consecutivos constituyen una trama y 18 tramas constituyen una multitrama. Existe además la hypertrama que está compuesta por 60 multitramas. Cada slot se puede dividir en 2 subslots (o halfslots) que pueden ser usados independientemente (como diferentes canales lógicos) [2].

Cada portadora soporta cuatro canales simultáneos que pueden clasificarse entre canales de tráfico y canales de control. Cada estación base (TBS) tiene como mínimo un canal de control común mediante el cual se gestiona el uso del resto de canales.

Cuando el sistema opera en modo normal, el canal de control común principal (MCCH) se usa para toda la señalización de control común. Si embargo una TBS puede tener más de un canal de control operando simultáneamente ya sean canales comunes o canales asignados. Estos canales reciben el nombre de canales de control secundarios (SCCH) y si están presentes se dice que el sistema opera en modo extendido. Como caso opuesto, una TBS puede operar en el llamado modo mínimo, en el cual se puede usar el MCCH para tráfico o como SCCH asignado además de su funcionalidad propia.

El SCCH común tiene la misma funcionalidad que el MCCH pero se usa solamente para una parte de los usuarios. Estos canales deben estar en la portadora principal, juntamente con el MCCH, por lo tanto puede haber un máximo de 3 canales SCCH comunes por TBS. Un terminal radio, en "idle mode" (i.e. está registrado en el sistema pero no transmite información), debe ser capaz de recibir información del MCCH o de algún SCCH común. Estos canales, compartidos por varios usuarios, son la vía de acceso al sistema y utilizan un protocolo de acceso aleatorio tipo aloha ranurado. Desde aquí en adelante cuando hagamos referencia al MCCH nos referiremos tanto a los MCCH como a los SCCH comunes debido a que tienen la misma funcionalidad desde el punto de vista de nuestro estudio.

Los SCCH asignados se utilizan para continuar señalización de control (e.g. para continuar la señalización del establecimiento de una llamada en modo circuito) y para intercambio de datos (e.g. datos en modo paquete). Puede existir varios SCCHs asignados por TBS los cuales se pueden usar como canal de datos general, compartido por varios terminales que hacen uso intermitente del mismo.

Mientras los MCCHs (y los SCCH comunes) no pueden ocupar más de 1 slot por trama TDMA, los SCCH asignados pueden ser multislot (ocupando hasta 4 slots por trama cuando usan otra portadora que no sea la principal).

TETRA soporta tres servicios portadores: modo circuito (voz y datos), datos modo paquete (orientado o no a conexión) y servicio de datos cortos (SDS). A través de cada uno de estos servicios se soportan llamadas individuales, llamadas de grupo con o sin confirmación y llamadas broadcast. Tanto las llamadas de grupo como las broadcast son comunicaciones punto-multipunto que sólo operan en modo half-duplex (mientras un participante habla los demás escuchan). Las comunicaciones de voz están basadas en el modo PTT (Push To Talk). Un usuario puede ser miembro (estar suscrito) de más de una llamada en modo grupo, sin embargo solamente puede estar activo en una al mismo tiempo (en aquella donde el usuario habla cuando aprieta el botón de PTT). Para las llamadas de grupo con confirmación, primero se asigna el canal de tráfico y a continuación, antes de proceder con la llamada, se comprueba

individualmente si todos los usuarios del grupo están presentes.

Para el envío de datos, cada uno de estos tres servicios portadores opera de modo distinto. El servicio de datos en modo circuito funciona del mismo modo que una llamada de voz, donde el terminal que desea enviar datos accede a través del MCCH y seguidamente es redireccionado a un canal de tráfico. El servicio SDS, con el cual se pueden enviar mensajes de hasta 2047 bits, funciona habitualmente a través del MCCH. El mensaje de acceso (enviado en un subslot de acceso) puede transportar datos de usuario. En el caso de que la unidad de datos LLC (Link Layer Control) recibida no quepa en el subslot de acceso (bloque MAC de acceso o MAC-ACCESS PDU) se aplica el proceso de fragmentación. La fragmentación es una operación a nivel MAC, por lo tanto, la trama de datos entera solo contiene una cabecera LLC. Además, de todos los bloques MAC resultantes de la fragmentación, únicamente el primero contiene la cabecera MAC entera con la correspondiente información de direccionamiento. Los fragmentos no están numerados, hay que enviarlos en orden y en caso de error en uno de ellos se debe retransmitir la unidad completa. El proceso de fragmentación no está pensado para mensajes largos y se aplica únicamente en el llamado enlace básico (BL). El estándar recomienda que la fragmentación no se use para unidades de datos que ocupen más de 4 slots además del subslot de acceso. De hecho, el estándar recomienda no enviar mensajes SDS más grandes de 1017 bits cuando se utilice el BL.

El servicio de datos en modo paquete utiliza usualmente un SCCH asignado una vez el terminal ha accedido al sistema a través del MCCH. Los datos en modo paquete son enviados a través del llamado enlace avanzado (AL) para intercambiar mensajes de tamaño grande. El AL soporta el proceso de segmentación (diferente a la fragmentación del BL) mediante el cual se segmenta la unidad al nivel de LLC si ésta excede el tamaño disponible del bloque MAC. Debido a que la segmentación es a nivel LLC, cada segmento puede ser reconocido individualmente por su cabecera LLC. Los segmentos están numerados con lo cual pueden ser retransmitidos individualmente en caso de error. El envío de datos en modo paquete, igual que el servicio SDS, se puede realizar en el mismo MCCH por donde se ha accedido al sistema, sin embargo, esta opción puede degradar significativamente el funcionamiento del canal y por tanto el rendimiento global del sistema.

El SCCH asignado para envío de datos en modo paquete recibe el nombre de PDCH (Canal de datos en modo paquete). Cabe destacar que este canal también se puede usar para el envío de mensajes SDS largos.

### 3. Dimensionado de una Red TETRA

Un modo de determinar la cantidad de recursos necesarios para satisfacer la demanda de comunicaciones de los usuarios es a través de simular el funcionamiento global del sistema. Sin embargo, debido a que este método puede ser una tarea complicada, los sistemas se suelen dimensionar mediante la estimación del comportamiento de éste a través de ingeniería de tráfico. Existe mucha literatura referente a la ingeniería de tráfico aplicada a sistemas trunking que proponen varios métodos pero habitualmente se aplica el modelo Erlang C y su correspondiente expresión analítica para calcular el número de canales necesarios [3].

En esta sección pretendemos exponer una serie de características principales que afectan al dimensionado y que se deben tener en cuenta para la planificación de la capacidad de un sistema TETRA. Y finalmente concluimos la sección resumiendo el efecto que cada servicio portador TETRA, produce en la asignación de canales.

#### 3.1. Características principales

- **TETRA utiliza tecnología trunking** mediante la cual todos los usuarios comparten un mismo conjunto de canales resultando en un uso más eficiente del espectro. TETRA soporta, además, diferentes tipos de métodos trunking: “message”, “transmission” y “quasi-transmission” trunking. Según la configuración específica de la red, el canal no se libera hasta que la conversación ha terminado (“message” trunking), o se libera después de cada transacción de la comunicación (“transmission” trunking) i.e. el canal se asigna solamente durante cada turno de la comunicación: desde que se presiona el PTT hasta que se suelta. Una solución intermedia es el método “quasi-transmission” trunking, con el cual se libera el canal (se devuelve al conjunto de canales disponibles) después de cada transacción siempre y cuando haya transcurrido un determinado tiempo de reserva adicional. De este modo, si una transacción empieza antes que este tiempo de reserva haya transcurrido no se requerirá hacer un nuevo acceso al sistema ya que el canal aún está asignado. Existe entonces un compromiso entre el número de accesos y la cantidad de recursos ocupados (tiempo de ocupación de los recursos).

- **Red compartida.** Las redes TETRA se pueden compartir entre más de una organización independiente que además posiblemente requiere diferentes grados de servicio. Los canales pueden compartirse entre las organizaciones de un modo trunking (todas usan los canales del mismo grupo común) o bien cada organización disponer de su propio conjunto de canales. Compartir a modo de trunking resulta más eficiente en frecuencia, pero a cambio algunos de los colectivos pueden verse afectados por el uso de otros. En este caso es importante garantizar y aplicar correctamente las políticas de prioridad.

- **Asignación independiente de los slots del enlace ascendente y descendente.** A diferencia de los sistemas tradicionales, donde el enlace ascendente y el descendente forman un único canal lógico, TETRA permite que el enlace ascendente y el descendente del mismo slot de la misma portadora aparejada se asignen independientemente para diferentes propósitos. Por ejemplo, mientras una llamada de grupo se sirve en una celda ocupando solamente el canal descendente, el canal ascendente se puede usar para otros propósitos.

Las combinaciones posibles que presenta el estándar TETRA son las siguientes (las cuales se indican en el enlace descendente mediante los mensajes llamados ACCESS-ASSIGN): los dos enlaces asignados a la misma llamada en modo circuito, los dos enlaces asignados a diferentes llamadas en modo circuito y finalmente, uno de los enlaces asignado a llamada en modo circuito mientras que el otro se asigna a un SCCH.

- **Llamadas de grupo y el servicio de las “shifting areas”.** En principio, las llamadas de grupo se sirven en un conjunto de TBSs previamente definido según el área en la cual se desee operar. El tráfico de comunicaciones en cada celda para cada llamada de grupo dependerá, por lo tanto, de: i) si la TBS está definida para la llamada de grupo (referente al tráfico en el enlace descendente), ii) la cantidad de usuarios de esta llamada de grupo que están bajo la cobertura de la TBS (referente al tráfico que pueden generar en el enlace ascendente). Existe un servicio mediante el cual una llamada de grupo sólo se sirve en aquellas celdas (del grupo de TBSs previamente definidas) en las que hay usuarios suscritos a esta llamada de grupo. Este servicio recibe el nombre de “shifting areas” y cuando se aplica, el tráfico de cada llamada de grupo servido en la TBS depende de la distribución geográfica de los usuarios suscritos a esta llamada de grupo. La llamada se sirve en una TBS si hay uno o más usuarios miembros del grupo. La probabilidad de que al menos haya un usuario en la TBS es:

$$P_{some\_usr\_present} = 1 - P_{no\_usr\_present} = 1 - (P_{usr\_no\_present})^{num\_usrs}$$

|                          |                                                                        |
|--------------------------|------------------------------------------------------------------------|
| $P_{some\_usr\_present}$ | Probabilidad de que algún usuario esté presente en la celda            |
| $P_{no\_usr\_present}$   | Probabilidad de que ningún usuario esté presente en la celda           |
| $P_{usr\_no\_present}$   | Probabilidad de que un usuario específico no esté presente en la celda |
| $num\_usrs$              | Número de usuarios total                                               |

La probabilidad de que un usuario específico no se encuentre bajo esta TBS depende directamente de la distribución de usuarios. Si suponemos, por ejemplo, que los usuarios están uniformemente distribuidos por el territorio, entonces la probabilidad depende del porcentaje de área que cubre la TBS ( $cell\_area\_percentage$ ).

$$P_{usr\_no\_present} = 1 - cell\_area\_percentage$$

El tráfico de las comunicaciones generadas por una llamada de grupo  $i$  en una determinada TBS  $j$  ( $Traffic\_GroupCall_i\_in\_TBS_j$ ) puede estimarse usando la siguiente fórmula propuesta (tráfico en el enlace descendente):

$$Traffic\_GroupCall_i\_in\_TBS_j = Traffic\_GroupCall_i \cdot (1 - (1 - TBS_j\_area\_percentage)^{num\_usrs_i})$$

Cabe notar que este ejemplo es específico para una distribución uniforme de usuarios. Para otro tipo de distribución de usuarios únicamente es necesario actualizar la probabilidad de que algún usuario este en la celda conforme a la nueva distribución (la  $P_{some\_usr\_present}$ ).

- **Duración de las llamadas.** En los sistemas PMR el operador usualmente limita la duración de las llamadas con tal de asegurar que ningún usuario monopoliza el canal. En estos casos, se debe tener en cuenta esta duración máxima para estimar el tráfico de modo más preciso.

- **Trato preferencial.** En TETRA se puede aplicar un trato preferencial tanto a nivel de llamadas como a nivel de usuarios. Las llamadas de emergencia, por ejemplo, pueden echar a otras llamadas que se estén cursando con prioridad inferior. Un ejemplo de prioridad entre diferentes grupos de usuarios es el que se puede aplicar cuando se realiza el acceso al sistema. Más adelante veremos que se pueden asignar distintas cantidades de oportunidades de acceso para diferentes grupos de usuarios.

- **Otros aspectos.** Existen muchos otros servicios y opciones que también pueden influir en el dimensionado del sistema de algún modo u otro. Sin embargo nos hemos centrado en los previamente citados por ser los más relevantes para el estudio que presentamos.

### 3.2. Asignación de canales

Cada uno de los servicios portadores de TETRA influye de diferente modo en la planificación de la capacidad del sistema. A continuación presentamos de manera resumida el efecto de los servicios en la asignación de canales.

En una llamada en modo circuito, ya sea de voz o datos, la infraestructura asigna un canal de tráfico. Este canal puede ser asignado durante toda la llamada o bien se libera entre transacciones, dependiendo del modo trunking en el que la infraestructura está trabajando. La estimación de los canales de tráfico necesarios para soportar la demanda de los usuarios depende de las características del tráfico y del grado de servicio deseado (obtenido, por ejemplo, mediante el modelo Erlang C).

Los mensajes SDS y los datos en modo paquete se transportan a través de canales de control ya sea el MCCH o un SCCH asignado en cuyo caso el acceso preliminar en el MCCH es igualmente necesario. La cantidad de canales destinados (i.e. SCCH asignados) necesarios depende de la cantidad de

datos que se quiere transmitir y las prestaciones que se desea obtener.

Por un lado, la demanda de tráfico de los usuarios se puede cubrir teóricamente asignando un determinado número de canales ya sean de tráfico o de datos en modo paquete, por cada celda. Debido a que los canales de datos en modo paquete y los canales de tráfico se asignan de un mismo conjunto de canales, el sistema habitualmente aplica prioridades para los canales de tráfico de voz. Asimismo se intenta garantizar que siempre haya slots disponibles para llamadas de voz.

Por otro lado, la columna vertebral del sistema, el MCCH, debe ser capaz de soportar la demanda. Nuestro estudio se centra en la evaluación de la capacidad del MCCH lo que se puede considerar como un paso más allá en el dimensionado del sistema tradicional.

#### **4. Canales de control**

##### **4.1. MCCH o SCCH común**

El enlace ascendente del MCCH (o SCCH común) se usa principalmente para acceder al sistema mientras que el enlace descendente es usado para difundir tanto información del sistema como información específica de usuarios. Además, tanto el enlace ascendente como descendente se pueden usar para transmitir otra información de control ya sea señalización o también, en el caso de TETRA, mensajes SDS.

Debido a que el medio es compartido entre varios usuarios, el MCCH usa un protocolo de acceso aleatorio tipo aloha ranurado para gestionar las posibles colisiones de los accesos de los usuarios. En la mayoría de los casos las transmisiones son iniciativa del terminal (i.e. no son solicitadas por la red) y por lo tanto el acceso es aleatorio. En otras ocasiones la red sabe que un terminal tiene información para transmitir; ya sea por que la infraestructura pide explícitamente que lo haga o porque el terminal necesita enviar más información de la que se puede incluir en un primer mensaje de acceso. En estas ocasiones el sistema puede planificar y reservar los accesos evitando así el problema de la contención y por lo tanto resultando más eficiente. Por ejemplo, si el sistema pide que un cierto usuario transmita información, la infraestructura indica directamente al terminal que existe una oportunidad de acceso reservada para él. También, si el terminal necesita enviar más información de la que se pueda incluir en un mensaje de acceso, primero realiza un acceso aleatorio y se puede continuar con accesos sobre slots reservados. La TBS pone a disposición de los terminales una serie de oportunidades de acceso en el MCCH. Estas oportunidades de acceso pueden ser comunes para todos los terminales o bien se pueden subdividir en grupos. Asimismo cada grupo tiene sus propias oportunidades de acceso que se definen dinámicamente. Pueden distinguirse hasta 4 grupos,

cada uno de ellos se identifica con un código de acceso (los llamados AC “access codes”). Además también se define una prioridad mínima de PDU (unidad de datos) para cada código de acceso. Se pueden aplicar restricciones de uso para códigos de acceso específicos según grupos de terminales o de clases de abonados. De este modo un terminal estará autorizado a usar un determinado subslot solamente si la prioridad de su PDU y su clase de abonado son las mismas que las asociadas al recurso.

Los parámetros específicos del acceso y las órdenes inmediatas se transmiten a través del enlace descendente. La red envía a los terminales los mensajes ACCESS-ASSIGN y ACCESS-DEFINE principalmente para dar información sobre las oportunidades de acceso.

Por un lado, los mensajes ACCESS-DEFINE contienen información sobre el acceso aleatorio para cada código de acceso. Estos mensajes indican características globales de los códigos de acceso (i.e. los parámetros de configuración): tipo de prioridad para los códigos de acceso, número de reintentos permitidos antes de abandonar la tentativa de acceso aleatorio, número de oportunidades de acceso durante las cuales el terminal espera hasta que decide transmitir de nuevo, vinculación de los códigos de accesos con los terminales, son algunos ejemplos de la información que pueden contener. Habitualmente este mensaje se transmite en la trama número 18 usando el segundo subslot. Pero el estándar permite también que se envíe en otros canales físicos.

Por otro lado, los mensajes ACCESS-ASSIGN se transmiten en cada slot del enlace descendente. Su objetivo es especificar el uso de este slot y dar derechos de acceso para el correspondiente slot del enlace ascendente (el cual está retardado en tiempo 2 slots respecto al del enlace descendente) especificando así también su uso. Estos mensajes indican, por ejemplo, si el slot está reservado o si se trata de un slot CLCH (Common Linearization CHannel) destinado a linearización. Si se desea asignar diferentes derechos de acceso para cada uno de los subslot que conforman el slot, es necesario que el slot del enlace descendente no este asignado. Si éste está asignado únicamente queda un campo disponible mediante el cual hay que definir los derechos de acceso de los dos subslots por lo tanto los dos subslots tendrán los mismos derechos.

##### **4.2. SCCH asignado**

El SCCH asignado se usa habitualmente para el envío de datos en modo paquete y mensajes SDS largos. Si el sistema decide asignar un SCCH en la TBS para el transporte de datos en modo paquete, éste puede ser usado por un solo AL (de un modo similar al uso de un canal para llamadas en modo circuito) o bien como canal general de datos soportando varios ALs y compartido por varios terminales los cuales pueden enviar datos a velocidades bajas o intermitentemente. En los dos casos, la gestión de la utilización del canal es llevada a cabo por la TBS (el tipo de acceso a realizar, i.e. si

bien es aleatorio o reservado). De modo que el funcionamiento de los terminales es el mismo. A continuación describimos el funcionamiento del PDCH y las consecuencias que éste puede tener en el uso del MCCH.

### El canal PDCH

El protocolo Sndcp (The SubNetwork Dependent Convergence Protocol) es un protocolo de TETRA que se encarga de negociar y mantener los contextos PDP (Paquet Data Protocol) entre estaciones móviles y la infraestructura además de controlar las transferencias de datos que se producen entre éstos.

Antes de poder acceder a los servicios Sndcp el terminal debe realizar el proceso de registro mediante la activación del contexto PDP donde se negocian los parámetros a usar durante las transferencias (e.g. la dirección IP). Antes de poder iniciar las transmisiones de datos de debe establecer un AL, únicamente se permite uno por terminal, en el PDCH siempre y cuando el contexto PDP este activado. Una vez establecido el AL, éste permanece activo incluso cuando el terminal se encuentra en el MCCH. En esta situación se debe igualmente pedir permiso para transmitir.

Cuando un terminal que se encuentra en el MCCH tiene datos para transmitir, envía una petición de transmisión (SN-DATA TRANSMIT REQUEST) a través del BL y seguidamente la TBS responde incluyendo la indicación del canal que se le asigna. Entonces, se redirecciona el terminal al canal PDCH indicado incluso en el caso de que el AL aún no esté establecido. Si el AL no está establecido, éste debe establecerse con el correspondiente intercambio de mensajes (AL-SETUP) con el fin de fijar los parámetros del enlace; en este punto, por ejemplo, es donde se puede pedir un enlace multislot. Ya con el AL establecido, el terminal puede empezar a enviar datos (SN-DATA). En cada transmisión (y recepción) de un SN-DATA se actualiza un temporizador (tanto en el terminal como en la SwMI) de modo que cuando se recibe el último SN-DATA, el temporizador expirará desencadenando el proceso de liberación del canal: envío de un SN-END OF DATA y redirección del terminal al canal especificado (por ejemplo el MCCH). Se recomienda que el PDCH sea liberado por la infraestructura y que la liberación por parte del terminal sea considerada como una opción alternativa de modo que los temporizadores se deben ajustar debidamente para que se expire primero el de la infraestructura (i.e. fijar el temporizador de la SwMI a un valor inferior que el valor enviado al terminal).

El proceso en sentido inverso, envío de datos desde la SwMI al terminal, funciona del mismo modo con una pequeña diferencia: la primera petición por parte del terminal para enviar datos obviamente no se realiza en este caso sino que ahora la TBS envía directamente el mensaje al terminal a través de un BL en el MCCH incluyendo la asignación del canal.

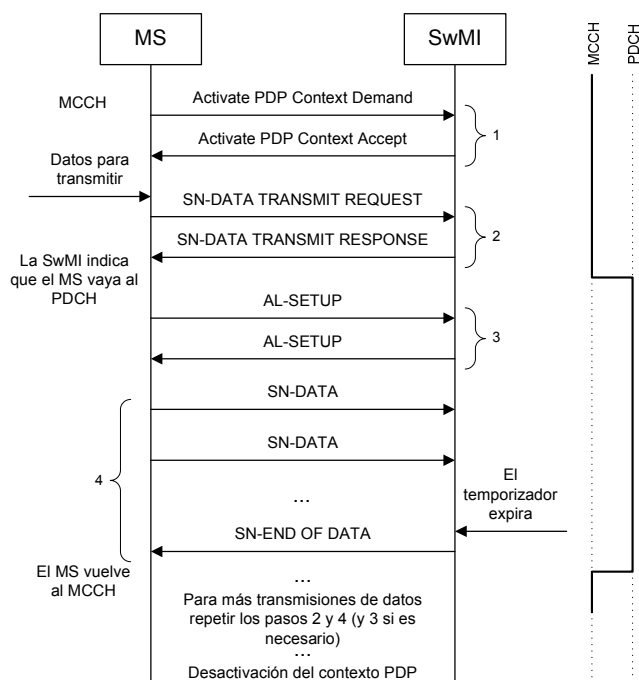


Figura 1. Ejemplo del intercambio de mensajes en el proceso de activación y uso de un portador de paquetes en TETRA

Tanto la SwMI como el terminal pueden restaurar el AL con el fin de cambiar los parámetros de QoS. Después del proceso de desactivación del contexto PDP, el AL se suprime. Apuntar que la Fig.1 muestra los mensajes relevantes que se intercambian para la activación y uso de un portador de datos en modo paquete..

### 4.3. Acciones Relevantes del Canal de Control Común

A continuación se consideran las acciones más comunes que los usuarios de un sistema TETRA realizan y se presenta el impacto que estas tienen sobre el MCCH (i.e. que ocupación del MCCH resulta de cada acción). Las acciones que hemos considerado, y pensamos que son las más relevantes en cuanto al uso del enlace ascendente del MCCH, son las siguientes.

- **Establecimiento de llamada.** Para cada establecimiento de llamada, cualquiera que sea el tipo (llamada de grupo, individual con señalización hook, individual directa,...), iniciada por un terminal, se realiza una petición de acceso aleatorio al MCCH.

El impacto que tienen las llamadas sobre la utilización del MCCH, aparte de este primer acceso al sistema, está también condicionado por el tipo de trunking en el que la red opere; ya sea “message”, “transmission” or “quasi-transmission” trunking. Dependiendo del modo seleccionado, se realizan un número distinto de accesos al sistema durante una llamada, que puede ir desde un solo acceso por toda la llamada (“message” trunking) hasta un acceso para cada una de las transacciones de la llamada (“transmisión” trunking).

La ocupación del MCCH depende, por un lado, de la cantidad de accesos que se realizan, lo cual está

directamente ligado con el tráfico generado, y por el otro lado, del número de slots que cada acceso consume. Para el establecimiento de una llamada, ya sea individual o de grupo, se requiere como mínimo el envío del subslot de acceso por parte del llamante. Cabe destacar que en algunos casos se puede requerir el uso de más slots del MCCH para el establecimiento de la llamada, en estos casos el terminal seguirá las instrucciones de la red. En otros casos se puede requerir que el terminal llamado envíe información antes de establecer la llamada. Para ello se pueden reservar slots en el MCCH de la celda del terminal llamado. Por ejemplo, cuando se solicita confirmación o autorización del terminal llamado.

- **AVL/APL.** Hoy en día, casi todos los terminales TETRA están equipados con un receptor GPS (Sistema de Posicionamiento Global) con el cual se mantiene al terminal continuamente informado de su localización. Con la finalidad de aplicar los servicios AVL/APL (seguimiento de los terminales o tracking), cada terminal debe reportar su posición al sistema. Aunque existen varios métodos, el más comúnmente usado para enviar estos mensajes cortos es a través del servicio SDS en el MCCH.

Desde el punto de vista de la utilización del MCCH, el terminal realiza un acceso al MCCH cada vez que desea enviar un mensaje de localización. Además de la ocupación resultante de este acceso, se requiere ocupar slots adicionales debido a que la información a enviar no cabe en el espacio disponible en el acceso. Uno de los formatos actuales más corto, conocido como formato compacto, ocupa 11 bytes. Este tipo de formatos de mensaje compacto disminuyen significativamente el tamaño que requiere un mensaje NMEA tal como el GLL, GGA, GSA... (El formato GLL típicamente puede contener 48 bytes).

Dependiendo de la cabecera utilizada en el paquete MAC-ACCESS (cabecera cuyo peso puede ir de 16 a 36 bits) enviado en el slot de acceso, se dispone de 76 a 56 bits para el mensaje SDS que a su vez también dispone de su cabecera propia. Aplicando el proceso de fragmentación cuando sea necesario, obtenemos la siguiente relación de slots para cada tipo de mensaje SDS.

TABLA I SLOTS NECESARIOS PARA CADA TIPO DE SDS

| Tipo de mensaje                         | Slots necesarios   |
|-----------------------------------------|--------------------|
| <b>SDS 1</b> (16 bits)                  | 0,5 (acceso)       |
| <b>SDS 2</b> (32 bits)                  | 0,5 (acceso) + 0,5 |
| <b>SDS 3</b> (64 bits)                  | 0,5 (acceso) + 0,5 |
| <b>SDS 4</b> (por ejemplo de 1017 bits) | 0,5 (acceso) + 4   |

Aunque se muestren los 4 tipos de mensajes SDS, en la práctica los más usados son el SDS 1 (cuando transportan códigos preestablecidos reciben el nombre de mensajes de status) y el SDS 4 por su capacidad. Comentar también que existe el protocolo SDS-TL que se encuentra por encima del servicio SDS (concretamente utiliza los mensajes SDS 4). El objetivo de este protocolo es asegurar

interoperabilidad entre diferentes aplicaciones usando el servicio SDS. Las mejoras principales que introduce son: confirmación extremo a extremo, "store and forward" (almacenar y reenviar) y básicamente asegurar que las aplicaciones que lo usan interpreten los datos de usuario de un mismo modo.

Los mensajes SDS 4 pueden transportar de 0 a 2047 bits pero hemos considerado como ejemplo el caso de 1017 bits ya que es lo máximo recomendado por el estándar para enviar en un enlace básico (BL). En la práctica, los terminales permiten escribir mensajes de hasta 140 caracteres.

Además de la ocupación que cada transmisión produce en el MCCH, lo cual está determinado por el tamaño del mensaje enviado, la cantidad de transmisiones de cada terminal afecta también directamente a la ocupación del canal. Estas vienen determinadas por la resolución que se desea para el servicio de AVL/APL. Cuando hablamos de resolución nos referimos a la distancia con la cual podemos determinar donde está un terminal, la cual depende de la frecuencia de envío de mensajes más que de la propia resolución de la información de localización. De aquí en adelante nos referiremos a esta resolución como la "resolución de seguimiento". El servicio de AVL/APL suele estar configurado por tiempo, por distancia o incluso por combinaciones de ambos. En el primer caso, el número de mensajes enviado es fijo según el tiempo configurado. En el segundo caso, la cantidad de mensajes enviados depende de la velocidad a la que se mueve el terminal. Y finalmente, un ejemplo de combinación de ambos es cuando cada cierto tiempo se envía un mensaje incluso si la distancia configurada no ha sido recorrida. Existe la posibilidad de configurar un terminal específico remotamente a través de mensajes SDS enviados por la infraestructura. De este modo se puede realizar un seguimiento puntual con más resolución del que una configuración cotidiana permitiría.

El uso de otros métodos alternativos para el envío de localizaciones GPS, diferentes al envío de mensajes SDS a través del MCCH, puede disminuir parcialmente o en su totalidad la ocupación del MCCH. Algunos de estos métodos son: el uso de un SCCH asignado, el uso de un FACCH asociado a una llamada de grupo, etc. Desde el punto de vista del funcionamiento del sistema, consideramos que el uso del servicio SDS en el MCCH es el más apropiado en gran parte por que los mensajes usados no son excesivamente largos y ocupan un pequeño número de slots.

- **Actualizaciones de posición.** Como otros sistemas celulares, la movilidad de los terminales se gestiona mediante los mensajes de actualización de posición enviados desde los terminales y los mensajes de paging (o búsqueda) enviados desde la SwMI. Existen varios estudios enfocados a determinar la cantidad de señalización que se debe intercambiar

para obtener un funcionamiento óptimo del sistema en ciertos entornos [5].

Nuestro interés recae en los mensajes de actualización de posición enviados desde el terminal ya que éstos se envían a través del enlace ascendente del MCCH realizando accesos aleatorios. Cada vez que un terminal cruza un área de localización (LA, agrupación de una o más celdas) envía un mensaje a la red. Si la LA no forma parte de la área de registro (RA, agrupación de LA donde el terminal es buscado) el terminal debe efectuar un proceso de registro.

La cantidad de mensajes enviados por un terminal depende directamente de su patrón de movimiento y la configuración de la red (tamaño de las LAs, i.e. número de celdas que pertenecen a una LA).

La ocupación del MCCH está condicionada al número de mensajes enviados y al tamaño de estos al igual que en las demás acciones estudiadas.

Según el estándar TETRA, el mensaje de actualización de posición puede ocupar un mínimo de 1 subslot. Este es el caso donde no se incluye ninguno de los elementos opcionales que el mensaje puede transportar. Dependiendo de las implicaciones del cambio de celda se puede ocupar más recursos (e.g. si se trata de un cambio de celda donde se requiere registro o se pide la acción de asociarse/desasociarse de una llamada de grupo, etc). Si consideramos el caso favorable donde solamente se ocupa un subslot, la información se puede enviar con el subslot de acceso sin necesidad de usar futuros slots reservados.

**- Datos en Modo Paquete.** Como ya se ha comentado previamente, el método más usado para el envío de datos en modo paquete es a través del PDCH después de haber completado el acceso inicial a través del MCCH.

Referente a la utilización del MCCH, prestamos atención especial a la activación del contexto PDP y a las diferentes peticiones de transmisión que se pueden dar durante el envío de datos ya que éstas son las acciones que se realizan a través del MCCH.

Los contextos PDP usualmente se activan para largos periodos de tiempo y la cantidad de información enviada desde el terminal es variable dependiendo de las opciones que se piden (un caso típico puede ser de 98 bytes si se pide asignación de IP dinámica, compresión de cabeceras, compresión V.42bis y autenticación entre otras opciones). Los accesos para petición de transmisión de información (SN-DATA TRANSMIT REQUEST) se pueden incluir dentro del mismo subslot de acceso sin necesidad de reservar slots adicionales según la información que el estándar obliga incluir.

La ocupación de MCCH depende de la cantidad de datos enviados y el intervalo entre las diferentes transmisiones (que condiciona la cantidad de mensajes a intercambiar).

Cabe destacar que algunas acciones como el traspaso entre celdas (handover) también afecta el uso del MCCH. Sin embargo, en sistemas PMR, donde las

llamadas son de corta duración en media, la probabilidad de que un usuario cambie de celda mientras tiene una llamada en curso es bastante menor que en los sistemas móviles comerciales [6]. Consideramos que para este estudio el número de trasposos que se pueden producir no es relevante comparado con las otras acciones previamente presentadas.

## 5. Modelo Analítico

Una vez identificadas las acciones comunes más relevantes y presentado el efecto que estas causan en la utilización del MCCH, procedimos a parametrizar cada acción específica y evaluamos el impacto que estas causan. En esta sección proponemos un modelo analítico que permite caracterizar la ocupación del MCCH.

Siguiendo la estructura TDMA del sistema TETRA, el MCCH presenta  $n_{oport}$  oportunidades de acceso

durante un cierto tiempo  $t_n$ . Si bien una gran parte de estas oportunidades están disponibles para realizar accesos aleatorios, existe otra gran porción de oportunidades que se reservan para el uso de usuarios específicos con previo acuerdo. Estas oportunidades reservadas son mayoritariamente destinadas a transmisiones de mensajes por parte de los terminales aunque también se usan para linearización de transmisores. Si descontamos los  $n_{reserv}$  slots reservados de los disponibles obtenemos el total de slots destinados a accesos aleatorios. Según el protocolo aloha ranurado, el máximo caudal que se puede conseguir es del 36% ( $1/e$ ) de la capacidad disponible. Este límite viene dado por la expresión  $G \cdot e^{-G}$  que caracteriza el comportamiento del protocolo. Cuando el valor de entrada es máximo, i.e.  $G=1$ , la salida (o caudal) es de 36% aproximadamente. Entonces aplicando este factor sobre el total de oportunidades disponibles para accesos aleatorios ( $n_{oport} - n_{reserv}$ ), obtenemos el máximo número de oportunidades reales (i.e. la máxima utilización que se puede obtener).

Además, hay que tener en cuenta la inestabilidad que puede presentar el protocolo aloha cuando trabaja a la máxima carga (las retransmisiones pueden aumentar hasta tal punto que solo se transmitan retransmisiones). Por este motivo aplicamos un factor de carga (*load* en la fórmula) el cual debe ser menor del 100% (los valores recomendados son alrededor de 60-70%).

Mediante la siguiente fórmula caracterizamos la utilización del enlace ascendente del MCCH, donde se puede determinar, por ejemplo, la tasa de accesos soportada ( $\lambda_{access}$ ).

$$\frac{(n_{oport} - n_{reserv})}{t_n} \cdot G \cdot e^{-G} \cdot load = \lambda_{access}$$

En la mayoría de los casos los  $n_{reserv}$  slots están relacionados con la tasa de accesos ya que pueden ser parte de los mensajes que no han cabido en los respectivos subslots de acceso sin embargo también puede haber otros que sean independientes de los accesos. Estos últimos pueden ser especialmente relevantes cuando se usan mecanismos que requieren reservas continuas como por ejemplo mecanismos de polling, petición de informes periódicos, etc. Cuando no se hace uso de estos mecanismos, la mayoría de slots reservados son continuación de un acceso aleatorio y el resto (los que son independientes del acceso aleatorio) son poco relevantes comparado con la cantidad de los primeros.

A continuación mostramos una fórmula más detallada donde se incluye un desglose de todas las acciones y permite tratar separadamente la influencia de cada una.

$$\frac{(n_{oport} - (\lambda_{call} \cdot n_{call\_res} + \lambda_{sds} \cdot n_{sds\_res} + \lambda_{data} \cdot n_{data\_res} + \lambda_{lu} \cdot n_{lu\_res}))}{t_n} \cdot G \cdot e^{-G} \cdot load = \lambda_{call} + \lambda_{sds} + \lambda_{data} + \lambda_{lu}$$

TABLA II DETALLE PARAMETROS FORMULA

| Acción                 | Tasa acceso      | # subslots reservados |
|------------------------|------------------|-----------------------|
| Llamadas               | $\lambda_{call}$ | $n_{call\_res}$       |
| Mensajes SDS           | $\lambda_{sds}$  | $n_{sds\_res}$        |
| Datos modo paquete     | $\lambda_{data}$ | $n_{data\_res}$       |
| Actualización posición | $\lambda_{lu}$   | $n_{lu\_res}$         |

Cabe destacar que en esta fórmula se considera el uso de un único código de acceso. Si se considerara el uso de más códigos de acceso, se debería suponer como oportunidades no utilizables aquellas destinadas a los otros códigos de acceso (i.e. como si se tratara de otro tipo de oportunidades reservadas).

## 6. Análisis cuantitativo

Dado un escenario determinado podemos cuantificar la ocupación del MCCH. Por un lado, cada una de las acciones consume una serie de recursos y por otro lado, las características del escenario (la operación de los usuarios y la configuración de la red) determinan la tasa de mensajes enviados a través del canal. A continuación, describimos dos escenarios en los cuales se hace un uso distinto del MCCH y presentamos números concretos para cada tipo de operación. Finalmente obtenemos la ocupación del MCCH para cada situación con lo que tenemos una base para evaluar las distintas soluciones.

### 6.1. Escenarios

Los dos escenarios propuestos como ejemplo numérico son los siguientes:

- **Flota autobuses.** Servicio de localización de una flota de autobuses de transporte público metropolitano.

- **Flota transporte.** Servicio de localización de una flota de vehículos de una empresa de mensajería.

Ambos casos operan en un entorno urbano denso. En la TABLA III se muestran las características principales de cada escenario.

TABLA III CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES ESCENARIOS

|                   | Flota autobuses     | Flota transporte    |
|-------------------|---------------------|---------------------|
| # vehículos       | 1000                | 1000                |
| velocidad media   | 12 km/h             | 20 km/h             |
| Tráfico llamadas  |                     |                     |
| $\lambda$ (media) | 2 llamadas/hora     | 2 llamadas/hora     |
| $\mu$ (media)     | 10 seg.             | 10 seg.             |
| Área operación    | 100 Km <sup>2</sup> | 100 Km <sup>2</sup> |
| # TBS             | 7                   | 7                   |
| Localización      | GPS                 | Nivel de celda      |

Las dos flotas están compuestas por la misma cantidad de vehículos y cada uno de ellos genera el mismo tráfico de llamadas. La zona de operación y las estaciones base que se utilizan para dar el servicio es también la misma para los dos grupos. Se considera también que el área total está cubierta por las 7 TBSs en el mismo porcentaje.

### 6.2. Uso del MCCH

Según el servicio de localización requerido y el entorno determinado estimamos las acciones que realizan los usuarios sobre el MCCH.

El servicio de localización en el caso de los autobuses se realiza enviando las posiciones GPS. Se desea mantener información actualizada de la localización de la flota cada 20 segundos. Si la velocidad media de un autobús es de 12 km/h y éste envía un mensaje GPS cada 20 segundos, podemos estimar que en media cada 66,6 metros se envía un mensaje.

En el caso de la flota de vehículos de mensajería, suponemos que con una localización a nivel de celda es suficiente. Esta información es la que posee la red fruto de los mensajes de actualización de posición si cada celda se define como una LA. La velocidad de los vehículos es de 20 km/h en media (razonable para un entorno urbano denso con limitación de velocidad a 50 km/h).

- **Mensajes de localizaciones GPS.** Suponemos que el formato de mensaje GPS usado es un formato compacto que requiere tan solo 11 bytes. Si se envía a través de un mensaje SDS, se requerirá un mensaje SDS tipo 4 (el tipo de mensaje que permite transportar más de 64 bits) que ocupará 2 subslots (el primero de los cuales es el subslot de acceso y el otro el reservado) fruto de aplicar el proceso de fragmentación (MAC-ACCESS y MAC-END-HU PDU). Partiendo de la distribución de usuarios, su movilidad y la resolución de seguimiento deseada para la localización se puede estimar el número de localizaciones GPS reportadas en cada celda por los autobuses.

En el caso de la flota de mensajería, no se envían mensajes de localización GPS.

- **Mensajes de actualización de posición.** Uno de los modelos de movilidad más usado es el modelo de flujos. Las suposiciones que se hacen en este modelo son los siguientes: los usuarios se mueven a una velocidad media ( $v$ ) y la dirección del movimiento está uniformemente distribuida entre  $[0, 2\pi]$ . Es decir, los terminales se pueden mover con igual probabilidad en todas las direcciones. Si se considera una densidad de usuarios uniforme ( $\rho$ ) y que la frontera (perímetro) del área estudiada mide  $L$ , entonces se ha demostrado que la tasa de cruces ( $C$ ) que un terminal realiza a través de esta frontera se puede expresar con la siguiente fórmula [4].

$$C = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\pi}$$

Este modelo analítico describe la movilidad en términos de “el número de usuarios en media que cruzan la frontera de una área determinada” lo cual nos da la cantidad media de mensajes de actualizaciones de posición enviados si consideramos que el área de estudio es justamente la LA.

Este tipo de modelos, basados en modelar en una escala microscópica, centran el interés en el comportamiento global de los usuarios por lo tanto trabaja en promedios y valores medios.

Los modelos “random walk” o modelos markovianos son otro tipo de modelos frecuentemente usados de los que también se pueden derivar tasas de cruce de usuarios a través de la frontera de una cierta área.

Para la flota de autobuses, consideramos que la LA está definida como la agrupación de todas las TBSs, de modo que los autobuses no envían mensajes de actualización de posición a la red. Sin embargo, en el caso de la flota de transporte, debemos definir una LA para cada TBS con el fin de localizar los terminales a nivel de celda.

- **Datos en modo paquete.** Tanto en el caso de la flota de autobuses como en el caso de la flota de transporte no hemos considerado el envío de datos en modo paquete por lo tanto el MCCH no se ve afectado por esta acción.

- **Mensajes de establecimiento de llamada.** En los sistemas PMR, el modo más común de comunicaciones es a través de las llamadas de grupo. Habitualmente el uso de llamadas individuales se restringe a ciertos usuarios y raramente se utiliza como solución de uso cotidiano. Por lo tanto, el tráfico de las llamadas individuales es irrelevante en la mayoría de los escenarios. Según la distribución de usuarios y su tasa de llamadas asociada se puede determinar el número de accesos para establecimiento de llamadas que se realiza en cada TBS. En el caso de estudio, cada usuario genera un 2 llamadas por hora de 10 segundos de duración en media. Si consideramos que la red opera en modo “message” trunking (caso favorable), cada usuario realiza entonces 2 accesos por hora en el MCCH.

### 6.3. Resultados

A modo de resumen en la TABLA IV se muestran los parámetros de configuración de la red para cada acción considerando el caso más favorable (mínima ocupación de recursos).

TABLA IV PARÁMETROS DE CONFIGURACIÓN DE LA RED

| Acción  | # subslots acceso | # subslots reservados |
|---------|-------------------|-----------------------|
| Llamada | 1                 | 0                     |
| SDS     | 1                 | 1                     |
| LU      | 1                 | 0                     |
| DATOS   | 1                 | 0                     |

Si nos centramos a nivel de celda (en este caso todas son iguales, ya que hemos considerado un porcentaje de cobertura igual para cada una y una distribución de usuarios uniforme), obtenemos la siguiente relación de accesos por segundo (a/s) para cada una de las flotas. También se muestra la carga del MCCH expresada en porcentaje.

TABLA V UTILIZACIÓN DEL MCCH

|                      | Flota Autobuses | Flota transporte |
|----------------------|-----------------|------------------|
| $\lambda_{lu}$       | 0 a/s           | 0,24 a/s         |
| $\lambda_{llamadas}$ | 0,08 a/s        | 0,08 a/s         |
| $\lambda_{sds}$      | 7,14 a/s        | 0 a/s            |
| $\lambda_{datos}$    | 0 a/s           | 0 a/s            |
| Carga MCCH           | 69,39%          | 2,44%            |

Comparando la carga del MCCH en el caso de la flota de transporte y la flota de autobuses, se puede observar que las localizaciones mediante los mensajes de LU resultan en una carga muy inferior a las localizaciones mediante mensajes SDS. Lo cual es de esperar ya que en un caso se obtiene una resolución de seguimiento muy elevada (un refresco de 20 segundos, i.e. unos 66 metros en media) mientras que en el otro se localiza solamente a nivel de celda ( $14,3 \text{ km}^2$ ). Cabe destacar que el MCCH en el caso de la flota de autobuses, trabaja a casi el 70%, máxima carga a la cual recomendamos que trabaje el canal. Para estos índices de carga se produce un número elevado de retransmisiones que puede llegar a ocasionar bloqueo de llamadas si se supera un cierto número de reintentos. Se debe recordar también que estas ocupaciones son medias y los incrementos sobre estos valores producen degradaciones puntuales de las prestaciones del sistema.

Este modelo analítico nos permite también obtener cuales son los máximos accesos permitidos por el canal en un entorno determinado. A continuación mostramos un ejemplo de la resolución de seguimiento que se podría manejar para una flota de estas características dada una carga objetivo del MCCH. Tomando el caso de la flota de autobuses y permitiendo que el MCCH trabaje a una carga máxima del 60%, se puede realizar 6,33 a/s en la TBS. A partir del número de usuarios y la velocidad de estos, podemos estimar que cada terminal envía

un mensaje cada 75 metros (cada usuario envía un mensaje de posición cada 22,5 segundos).

TABLA VI EJEMPLO RESOLUCIÓN DE SEGUIMIENTO CUANDO EL MCCH TRABAJA AL 60% DE SU CAPACIDAD

|                       | Flota Autobuses |
|-----------------------|-----------------|
| $\lambda_{lu}$        | 0 a/s           |
| $\lambda_{llamadas}$  | 0,08 a/s        |
| $\lambda_{datos}$     | 0 a/s           |
| Carga                 | 60%             |
| $\lambda_{sds}$       | 6,33 a/s        |
| # usuarios            | 143             |
| Metros/acceso/usuario | 75,1 m/a/usr    |

## 7. Alternativas

En esta sección comentamos algunas de las alternativas que se puede aplicar con el fin de descongestionar el MCCH.

La primera opción que parece simple y lógica es disminuir la ocupación que las acciones previamente expuestas hacen en el MCCH, sin embargo en muchas ocasiones la demanda de los usuarios no lo permite.

En el caso de los mensajes SDS, éstos se pueden enviar a través de canales SCCH asignados pero el acceso a través del MCCH sigue siendo necesario. En el caso donde los mensajes no son muy largos (por ejemplo el caso de las localizaciones GPS usando mensajes de formato compacto) el ahorro de ocupación no es significativo ya que la acción que más ocupa es el acceso.

En la TABLA VII podemos ver la reducción de ocupación sobre el MCCH cuando hacemos uso de un SCCH para enviar los mensajes SDS en el escenario previo de los autobuses.

Cabe destacar que para mensajes largos la ocupación del canal seguiría siendo la misma (hay los mismos mensajes de acceso aunque el mensaje sea más largo) por lo tanto en comparación se produce una disminución significativa (enviar el mensaje entero por el MCCH ocuparía mucho más).

Cuando existen requerimientos de localización exigentes que comportan un envío de mensajes muy elevado, existe la posibilidad de realizar mecanismos de polling. Este mecanismo se basa en responder a las peticiones que realiza la infraestructura y consecuentemente no se realizan accesos aleatorios a la hora de enviar los mensajes SDS. El hecho de no realizar accesos aleatorios, supone un ahorro de recursos elevado ya que del 36% efectivo del aloha ranurado pasamos a poder utilizar el 100% del canal para esta acción concreta. A cambio, hay que tener en cuenta que habitualmente el mecanismo de polling puede incluir el intercambio de mensajes de reconocimiento que ocuparan más recursos que cuando se accede de modo aleatorio, pero aún así se produce un ahorro de recursos. Existe además la posibilidad de realizar optimizaciones en el intercambio de mensajes que, aunque sean soluciones propias, también pueden ser estándar. A efectos de comparación, para poner un ejemplo,

consideramos que la cantidad de datos enviada desde el terminal es la misma en los dos métodos. El MCCH pasa a tener una carga del 25,52% usando polling en frente al 69,39% usando accesos aleatorios.

TABLA VII OCUPACIÓN MCCH

|            | Usando MCCH | Usando MCCH con polling | Usando SCCH |
|------------|-------------|-------------------------|-------------|
| Carga MCCH | 69,39%      | 25,52%                  | 55,62%      |

Otro método que puede utilizarse para descongestionar el MCCH, es el uso de un canal FACCH. Cuando una llamada se está sirviendo en una celda (distinta a la que el llamante reside) el enlace ascendente (FACCH en este caso) se puede usar para enviar los mensajes SDS. No obstante, esta opción presenta algún inconveniente. Si se desea, por ejemplo, mantener cierta periodicidad a la hora de enviar informes de localización de un cierto grupo de usuarios, se deberá asignar una llamada de grupo en la que estos usuarios estén inscritos. Además, con tal de poder usar el enlace ascendente a modo de FACCH en cualquier momento, se requiere que el enlace descendente este asignado por lo tanto se debe asegurar una activación continua mediante lo cual se consume un canal de tráfico.

La posibilidad de usar más de un canal de control común, usando los SCCH comunes, para subgrupos de usuarios es también una solución posible para descongestionar el MCCH, sin embargo se debe evaluar si añadir canales adicionales para control común es factible y compensa el esfuerzo. Actualmente hay sistemas que no soportan el uso de SCCH comunes.

La opción de sectorizar la celda también aporta más capacidad en cuanto a MCCHs, pero en términos de tráfico es muy posible que se siga consumiendo los mismos recursos ya que las llamadas de grupo, que constituyen el tipo de comunicación principal, se deberán servir igualmente en la misma zona.

De un modo similar, existe también la opción de solapar TBSs en un mismo territorio. Por cada TBS que de cobertura a la misma área habrá un MCCH adicional.

## 8. Conclusiones

En este artículo se ha presentado, en primer lugar, una visión global del sistema TETRA haciendo hincapié en los aspectos del dimensionado tanto a nivel de canales de tráfico como de control. A continuación se ha introducido una serie de aspectos a tener en cuenta para el dimensionado de un sistema TETRA y seguidamente nos hemos centrado en el canal de control común; al que consideramos la columna principal del sistema. Hemos detallado el funcionamiento del MCCH y hemos propuesto un modelo analítico para caracterizar el uso de éste. Como ejemplo hemos aplicado el modelo analítico en dos escenarios concretos mediante los cuales hemos podido comparar distintos usos del MCCH y la repercusión que éstos tienen. Se ha visto también

que en algunos casos la carga del MCCH es demasiado elevada y podría dar lugar pérdida de prestaciones que no permita ofrecer servicios básicos como el establecimiento de llamadas. Para finalizar hemos enumerado las alternativas que existen para descongestionar el MCCH mostrando algunos ejemplos numéricos. Algunas de las alternativas son difíciles de aplicar una vez la red está desplegada. Con el fin de poder prevenir en vez de curar, el modelo analítico propuesto nos permite estimar el comportamiento y por lo tanto detectar posibles limitaciones futuras. Si se detecta que la red TETRA tiene unos requerimientos fuertes en cuanto a uso del MCCH antes de desplegarla, se puede prevenir planificando de antemano una cobertura con celdas pequeñas, celdas sectorizadas, celdas sobrepuestas, etc.

Este estudio ha estado basado en el estándar TETRA sin perder el punto de vista de la situación real del mercado actual. Las soluciones existentes en el mercado se basan en el estándar TETRA pero hay ocasiones en que éstas no implementan el estándar en su totalidad o que implementan aspectos adicionales (siempre respetando el estándar para mantener la compatibilidad entre diferentes fabricantes). La flexibilidad que ofrece el estándar TETRA permite la implementación de optimizaciones particulares mediante las cuales también se puede descongestionar el MCCH.

### **Agradecimientos**

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco de una colaboración de la Universidad Politécnica de Cataluña con el Centro de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información (CTTI) de la Generalitat de Catalunya. La investigación ha contado también con la financiación FEDER y el gobierno español a través del proyecto TIC2003-01748. P. Plans agradece también el soporte del DEiU, FSE y la UPC.

### **Referencias**

- [1] John Dunlop, Demessie Girma, James Irvine. "Digital Mobile Communications and the TETRA System", Wiley Ed. 1999. ISBN: 0471987921.
- [2] ETSI EN 300 392-2 V2.5.2 " Terrestrial Trunked Radio (TETRA) Voice plus Data (V+D) Part 2: Air Interface (AI).
- [3] The TETRA MoU Association. Disponible en: <http://www.tetramou.com/>
- [4] R. Thomas, H. Gilbert, and G. Mazziotto, "Influence of the movement of the mobile station on the performance of the radio cellular network," in Proc. 3rd Nordic Sem., Copenhagen, Denmark, Sept. 1988, paper 9.4.
- [5] Amotz Bar-Noy, Ilan Kessler and Moshe Sidi "Mobile users: To update or not to update?" Wireless Networks, 1(2):175--186, 1995.
- [6] Haykin, S., *Digital communications*, John Wiley & Sons, New York, 1988.