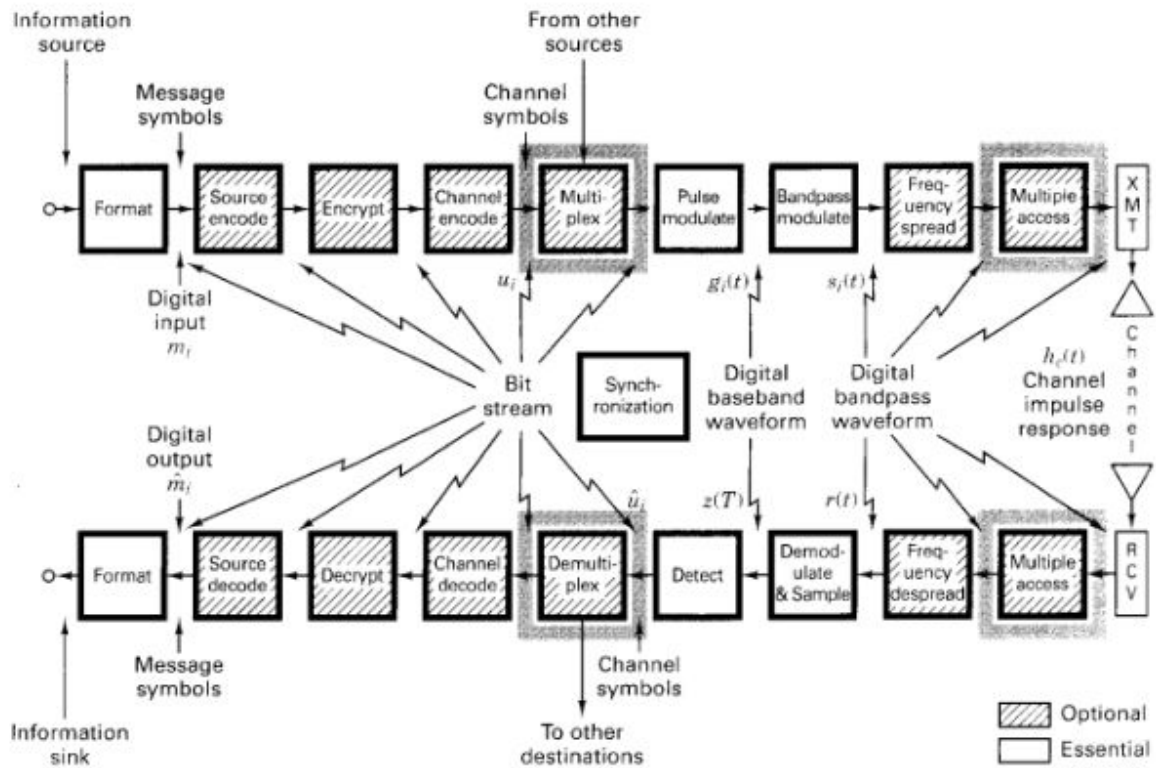


# Métodos de Acceso

## Capítulo 1 y 1 bis



¿Por qué tienen lugar los métodos de acceso dentro de los sistemas de comunicación y a qué hacen referencia? Los métodos de acceso tienen su origen en todo tipo de comunicación donde existe una conexión multipunto entre dispositivos terminales. Ya no se considera que existe una relación única entre transmisor y receptor como en CDA o un enlace broadcast (único transmisor, múltiples receptores), sino que existen múltiples relaciones entre múltiples transmisores y un único receptor. Esto implica que existe un único canal útil y múltiples usuarios para compartir dicho recurso.

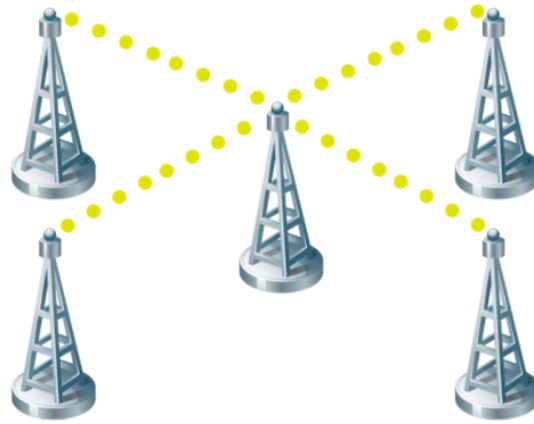


Figura :

Como se puede observar en la imagen anterior, las estaciones bases transmisoras, son las que están ubicadas en los extremos de la imagen y la estación receptora está ubicada al centro. De alguna manera, debe existir un conjunto de reglas y asignaciones que permitan 4 comunicaciones simultáneas con la menor interferencia posible, una para cada par de estaciones (Estación transmisora/ Estación receptora).

Esto obliga a compartir los recursos dentro del sistema, ya sea tiempos, frecuencias o también lo que se denomina códigos de acceso ortogonales para lograr que todas las comunicaciones tengan su lugar.

Formalmente es posible definir algunos términos que aclaran el significado de los métodos de acceso. **Multiplexado y múltiple acceso.** Ellos se refieren a la estrategia empleada para compartir los recursos de comunicación. Cuando se habla de multiplexado se hace referencia a un plan fijo de asignación de recursos, normalmente pre establecido. Este concepto puede ser puesto en práctica considerando una reunión entre amigos un viernes a la noche a cenar, donde pidieron una pizza para comer. Considerando la pizza como recurso (Tiempo, frecuencia o código) y considerando que son 4 personas, a cada uno le corresponde 2 porciones, si fuera una distribución equitativa e igualitaria del recurso. A nivel general, cada participante del sistema recibe una o más porciones. Esto es importante porque un elemento del sistema no puede prescindir o renunciar a dicho recurso, ya que sin él no es posible efectuar la comunicación y consideramos siempre que en algún momento ellos quieren comunicarse. Dejando en evidencia dicha asignación, también definimos que es fija (una vez servida y asignada la porción, no hay vuelta atrás), esto no debe ser necesariamente así. Existen sistemas de comunicación donde el multiplexado es dinámico respecto al tiempo y a los usuarios, esto plantea un mejor aprovechamiento de la infraestructura y de los recursos que siempre resultan ser limitados.



Figura :

Cuando se menciona al término de múltiple acceso, conocido comúnmente como protocolo de acceso se hace referencia a un plan de préstamo que se resuelve dinámicamente a demanda de los usuarios. Es decir, se plantea que una vez establecido el recurso para cada usuario, cuál es el conjunto de reglas para utilizarlo. Si un protocolo de acceso no utiliza este concepto, en sí mismo ya es un protocolo de acceso, siendo uno del estilo “hagan lo que quieran con el recurso asignado”. La finalidad de estos mecanismos es proponer un plan de uso más eficiente y que se adapte a los recursos disponibles (alocación más eficiente).

Para definir que tan bueno es cada uno de los protocolos de acceso definimos lo que se denomina como throughput (Transmisiones Exitosas (tiempo) / Transmisiones Totales (tiempo)) donde el tiempo de transmisión total implica colisiones, tiempos muertos y transmisiones exitosas. Sin embargo uno podría preguntarse ¿qué es el throughput y que importancia tiene? Es el factor que estará directamente ligado con la experiencia del usuario con el medio, es decir es un parámetro de calidad de servicio y se representa por la tasa de inyección exitosa de paquetes.

Este concepto está totalmente ilustrado en la contratación de ancho de banda a un proveedor de servicio de internet. Cuando por ejemplo, ofrecen un servicio de 10 Mbits/seg, lo que realmente están ofreciendo es una capacidad de canal máxima de 10 Mbits/seg pero no pertenece a un único usuario, sino que es compartida por todos dentro de la red, por lo tanto, en el uso frecuente y continuo del sistema, los usuarios no experimentan dicha tasa de transmisión, perciben lo que se denomina throughput, porque existen colisiones o interferencias y dificultades para comunicarse, que dependen de la congestión de la red (cantidad de usuarios utilizando el sistema de forma simultánea) y así como también de la asignación del recurso y la cantidad de información que deseen transmitir.

Considerando la importancia de este parámetro, existen 3 posibles maneras de realizar un aumento en el throughput para un sistema de comunicaciones, siendo:

- Aumento de eficiencia mediante PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente), generando una reducción en las pérdidas por el aumento de  $E_b/N_0$ .
- Aumento del ancho de banda.
- Por un plan de uso o distribución más eficiente de los recursos.

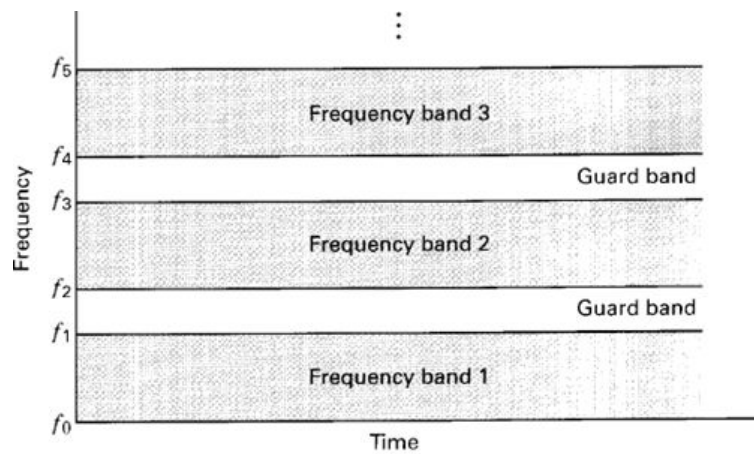
Esta última es la manera que se abordará principalmente durante toda la materia y que está asociada con la implementación de multiplexados y métodos de acceso. Es necesario aclarar que los caminos básicos para la distribución de los recursos de comunicación (multiplexado) son:

- 1- División de Frecuencia (FD).
- 2- División de Tiempo (TD).
- 3- División de Código (CD).
- 4- División de Espacio (SD) → Vinculado con los diagramas de radiación de las antenas, es decir, evitar la radiación de energía en el mismo espacio físico.
- 5- División de Polaridad (PD) → Las polarizaciones verticales y horizontales de las antenas permiten irradiar energía en el mismo espacio físico sin interferencia porque son ortogonales una de la otra.

Un ejemplo que ilustra la utilización de diferentes tipos de multiplexado para un problema de acceso múltiple sería una habitación (que representaría el canal) en la que varias personas desean hablar al mismo tiempo. Si varias personas hablan a la vez, se producirán interferencias y se hará difícil la comprensión. Para evitar o reducir el problema, podrían hablar por turnos (estrategia de división por tiempo o TDMA), hablar unos en tonos más agudos y otros más graves (división por frecuencia o FDMA), dirigir sus voces en distintas direcciones de la habitación (división espacial o SDMA) o hablar en idiomas distintos (división por código, como en CDMA); solamente las personas que conocen el código (es decir, el "idioma") pueden entenderlo.

Multiplexado en el dominio de la frecuencia:

Consiste en la asignación de diferentes bandas de frecuencias donde se encuentra la información de uno o más usuarios. Cuando un usuario o grupo de ellos desea hacer uso del canal ya tiene designado un ancho de banda para cualquier instante de tiempo. Esta asignación se representa de la siguiente manera:



**Figure 11.3** Frequency-division multiplexing.

Figura :

Los usuarios necesitan colocar la información en la banda espectral especificada. Para ello, hacen uso y manejo de moduladores. Para entender conceptualmente como se empezó a utilizar esta tecnología se plantea un modulador analogico AM - BLU (modulacion en amplitud de banda lateral única).

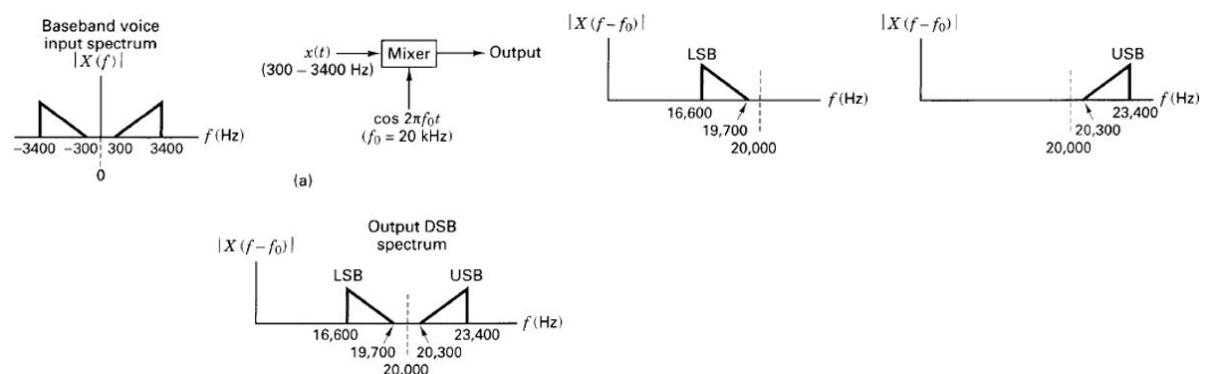


Figura :

Esta técnica permite obtener a la salida del modulador analogico una señal cuyas características espectrales si bien se encuentran contenidas en un rango de frecuencias más altas que las originales (precisamente en aquella zona de frecuencia asignada para el usuario) conservan el ancho de banda de la señal banda base. De esta forma, se optimiza el uso del espectro para una única señal de información. Se sabe de comunicaciones analogicas que las modulaciones en amplitud de doble banda lateral ocupan un ancho de banda del doble que el necesario.

A partir de esto, un esquema básico de multiplexado en el dominio de la frecuencia de tres canales telefónicos utilizando modulación AM-BLU es el siguiente:

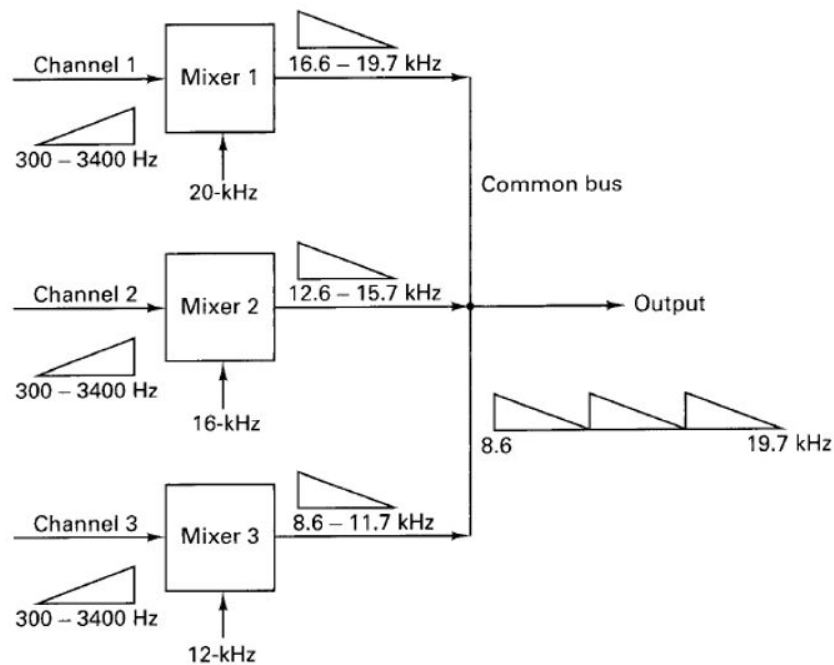


Figura :

FDMA en sistemas satelitales:

Es importante entender que en este caso se menciona el acceso al canal mediante multiplexación por división de frecuencia. Es decir, que los diferentes paquetes de información que pueden estar en el dominio de la frecuencia o el tiempo, y que permiten identificar a un usuario o grupo de ellos, acceden al canal en una banda de frecuencia específica. Debe quedar claro que el acceso mediante división de frecuencia es distinto al multiplexado por división de frecuencia. En el multiplexado se identifican a los usuarios dentro de un grupo mediante el uso de la frecuencia o el tiempo y en el acceso se especifica cómo se puede utilizar el canal.

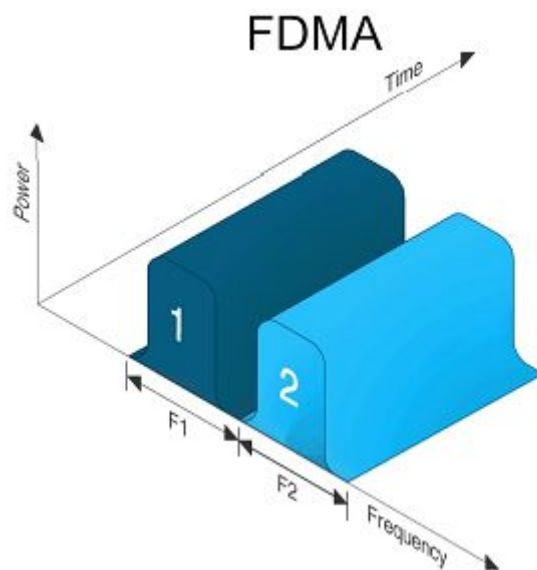


Figura :

Esto presta a confusiones porque es posible hablar de multiplexado en el tiempo y acceso en la frecuencia o multiplexado en la frecuencia y acceso en el tiempo. En definitiva un concepto nos dice cómo organizar los usuarios en grupos (multiplexado) y el acceso cómo mandar la información de dichos grupos en el canal compartiendo el uso con un montón de grupos más.

El caso más sencillo que plantea Sklar es un sistema satelital organizado en 12 transponders (Transmisor/Receptor) de 36 MHz cada uno que operan en FDM/FM/FDMA:

→ *FDM*: Cada señal telefónica tiene un ancho de banda de 4KHz (incluyendo una banda de guarda) que es multiplexada por división de frecuencia con 11 señales más.

→ *FM*: Cada señal compuesta (paquete de 12 comunicaciones telefónicas, formando un grupo de usuarios) se modula en un carrier utilizando técnica de modulación angular FM y transmite al satélite en una banda de frecuencias específica.

→ *FDMA*: Cada transpondedor de 36 Mhz de ancho de banda es asignado a diferentes grupos de usuarios.

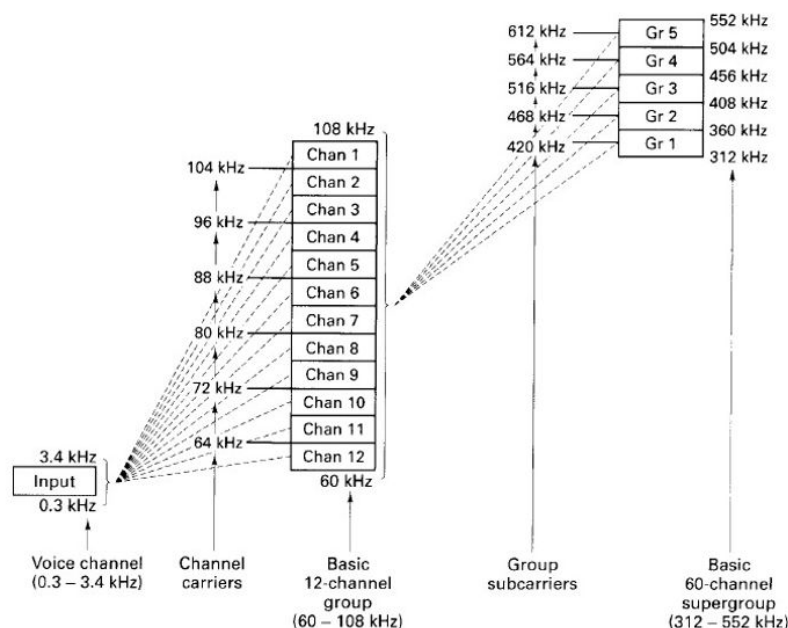
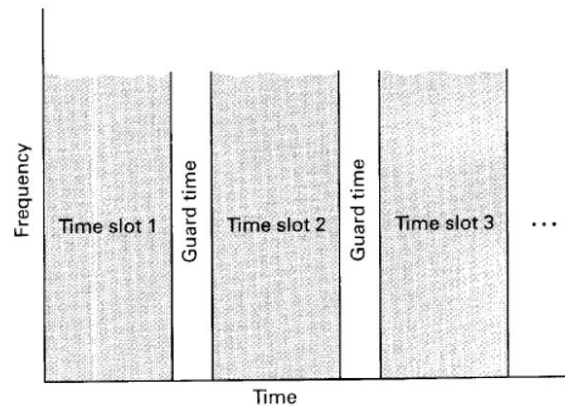


Figura :

Es importante notar que al utilizar FDMA no es necesario un sincronismo que si es necesario si se utiliza TDMA.

### Multiplexado por división de tiempo

Consiste en la asignación a cada usuario de ranuras temporales periódicas dentro de una estructura denominada trama, para utilizar el canal de comunicación. Esto permite que en pequeños intervalos de tiempo, cada usuario pueda hacer uso de la capacidad máxima del canal, es decir, utilizar todo el ancho de banda disponible para transmitir su información.



De esta forma, la información de cada usuario se transmite mediante rafagas que se hacen presente de forma regular o periódicamente durante cada tiempo de la trama. Es importante destacar el sincronismo que es necesario en este tipo de sistema. Las transmisiones de las diferentes estaciones base deben estar coordinadas de manera tal que en el receptor se reciba cada dato en el tiempo designado. Esto implica que todos los paquetes están temporalmente ordenados de acuerdo a la trama asignada.

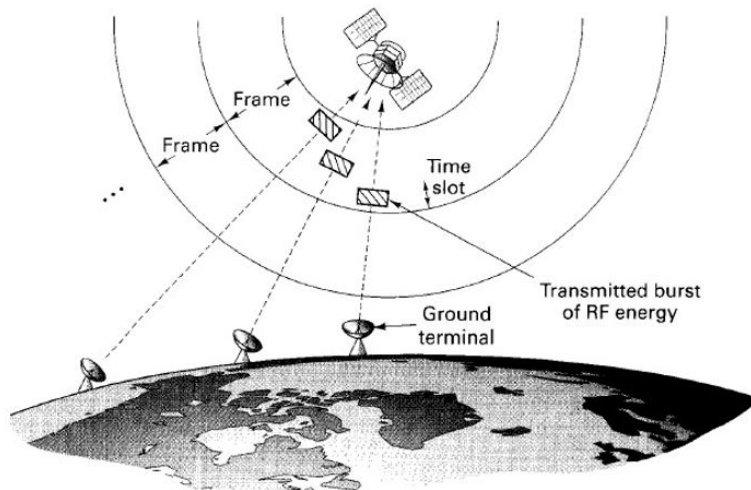


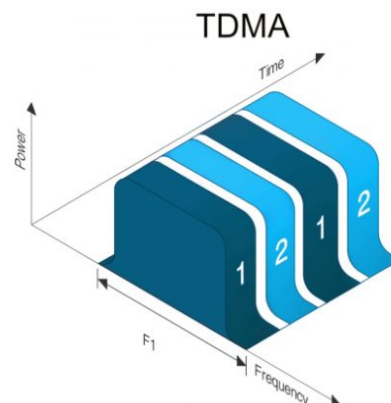
Figure 11.8 Typical TDMA configuration.

### TDMA de asignación Fija:

Es muy común observar que la multiplexación TDM tenga un método de acceso asociado al mismo concepto pero para lograr acceder al canal de comunicación



definido como TDMA. Mediante esta técnica, un “Time Slot” es asignado a un grupo de usuarios, es decir, que en dicho intervalo de tiempo cabe una trama TDM (grupo de usuarios). Mediante varios “Time Slot” (varios grupos de usuario) se constituye una trama temporal de mayor jerarquía que permite a muchísimos usuarios acceder al uso del canal. A esta forma de agrupar usuarios y permitirles comunicarse se la define como TDM/TDMA. Sin embargo, el método de acceso TDMA no queda solo sujeto a la multiplexación TDM, también podrían generarse grupos de usuarios multiplexados en frecuencia (FDM) y hacerlos acceder mediante TDMA. Sin embargo, cuando se mezclan de esta forma las técnicas de multiplexado con las técnicas de acceso hay que ser bastante claro qué tiempos y frecuencias maneja el sistema para no generar confusión.



Una forma bastante sencilla de visualizar el funcionamiento básico de un sistema TDM/TDMA consisten en un multiplexor del lado del transmisor y un demultiplexor del lado del receptor como se presenta en la siguiente figura.

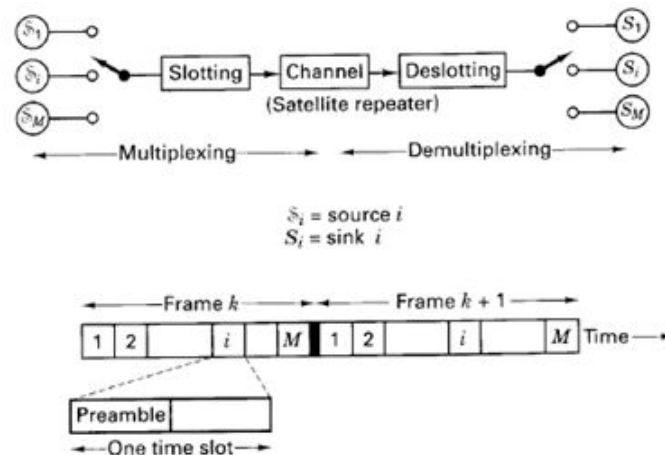


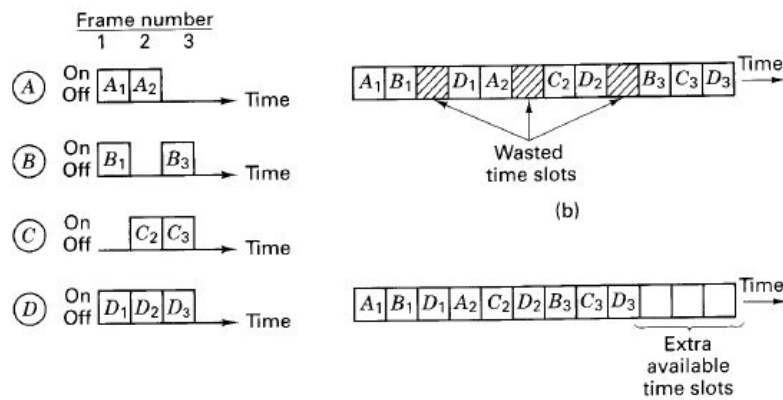
Figure 11.9 Fixed-assignment TDM.

El multiplexor ubica temporalmente la información de cada usuario en el canal de comunicaciones y el demultiplexor entrega dicha información a la fuente receptora que corresponda. Ambos procesos deben estar totalmente sincronizados para que a medida que transcurre el tiempo, de una fuente a otra se transfiera la información

completa sin ningún tipo de error. Cuando uno lee por primera vez este tipo de análisis, plantea ¿El multiplexor tiene todo el tiempo del mundo para acomodar la información en las diferentes ranuras temporales? La respuesta es **NO**. El multiplexor debe colocar la información de cada usuario antes de que se genere un nuevo dato. De esta forma, si se conoce cual es la frecuencia con la cual se generan datos de las diferentes fuentes “Rs” (Se considera la fuente más lenta o de menor tasa para definir el tiempo de trama), siendo el tiempo de símbolo más grande, el tiempo de trama.

Dentro del mensaje que genera cada fuente de información, se encuentra una parte de preámbulo y una parte de datos, en donde la parte del preámbulo contiene datos de sincronización, direccionamiento y control de errores. Esto permite al demultiplexor coordinar los movimientos en los mismos tiempos que el multiplexor para entregar la información. Para que sea más simple de visualizar, habría que pensar en algo parecido a un switch de una red LAN. ¿Por qué esta aclaración? porque la multiplexación en el transmisor si puede pensarse como una llave que conmuta secuencialmente de forma rápida y periódica entre todas las entradas pero la demultiplexación no necesariamente es así. Si lo fuera, significaría que siempre la fuente transmisora “A”, hablaría con “A” y no habría ningún tipo de chance de que pueda hablar con B, C o D. Sin embargo, el demultiplexor al leer la cabecera de los datos presentes en el preámbulo, sabe rápidamente donde conmutar para que en dicho intervalo de tiempo, “A” se pueda comunicar con cualquiera de las posibles fuentes receptoras.

Nunca se ha cuestionado qué ocurre si en determinado instante de tiempo una fuente de información no tiene datos para transmitir. A nivel sistema ¿Qué ocurre? Resulta que al tener asignación fija de ranuras temporales a cada usuario, el multiplexor trabaja de forma secuencial y periódica, entonces existen intervalos de tiempo donde no hay datos presentes en el canal, lo cual genera un desaprovechamiento del recurso compartido. Esto plantea que la asignación fija en TDMA sirve precisamente cuando el tráfico es alto (todos los time slot son ocupados) y todas las fuentes son predecibles (Se sabe que de time slot a time slot la probabilidad de que la fuente quiera transmitir es 1). Si el tráfico es esporádico se pierde eficiencia. Es por esta razón que cuando las necesidades de las fuentes son impredecible puede construirse un plan de asignación más eficiente que implique la asignación dinámica de las ranuras temporales o time slot en lugar de una asignación fija. Estos son conocidos como sistemas de conmutación de paquetes, multiplexores estadísticos o concentradores.



Se ha venido mencionando la posibilidad de una implementación mixta de frecuencia/tiempo o viceversa. Teniendo presente que en la multiplexación de frecuencia se hace la división del ancho de banda total ( $W$ ), a menores bandas ( $M$ ) con un ancho de  $W/M$ . Para el caso del tiempo, el eje temporal se divide en franjas horarias ( $T$ ), las cuales se subdividen en franjas más pequeñas ( $N$ ) que tienen una duración ( $T/N$ ). Teniendo en cuenta esta forma de dividir la frecuencia y tiempo es que cada usuario, en una frecuencia asignada, tendrá su momento de transmisión asignado en cada aparición periódica de la ranura que se le ha asignado, como se ve a continuación:

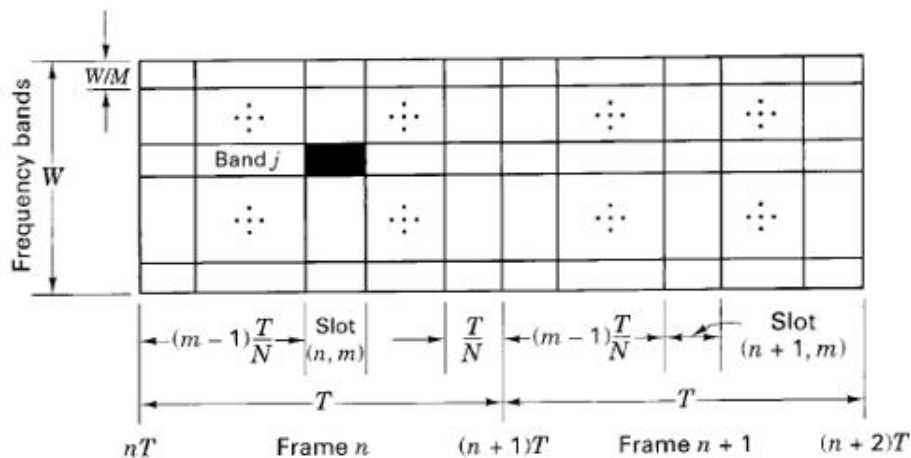


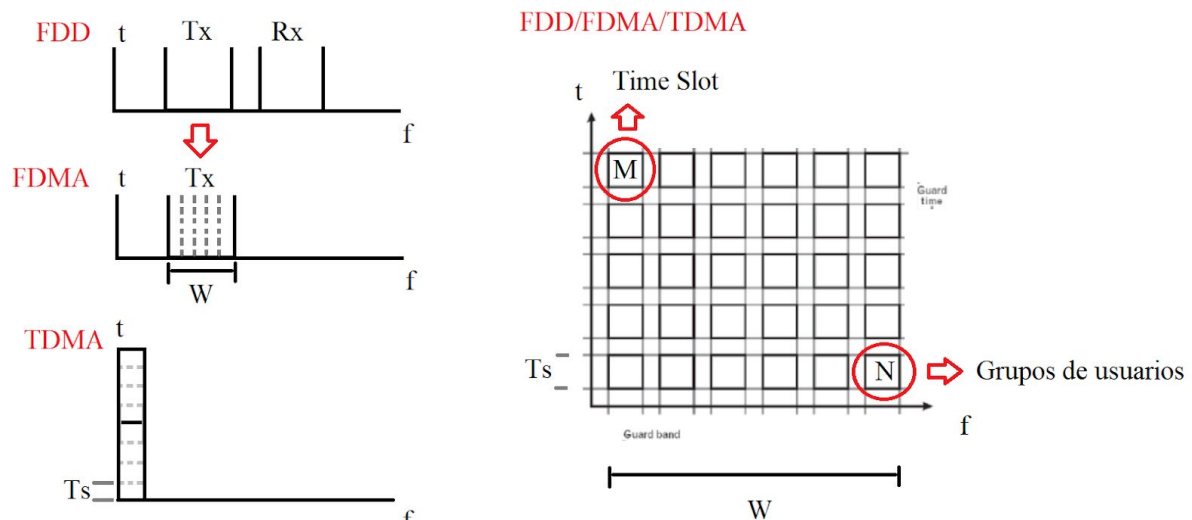
Figure 11.11 Communications resource: time/frequency channelization.

Esta acotación en el uso de la frecuencia y tiempo repercute en que si para un ancho de banda  $W$  el canal tiene una capacidad de  $R$  bits/seg y considerando que el usuario cuenta con una fracción de  $W/M$  ancho de banda, su tasa de bits se verá disminuida a  $R/M$  bits/seg.

Algunos ejemplos interesantes de analizar comprenden aquellos sistemas definidos como FDD/FDMA/TDMA y TDD/FDMA/TDMA. Para los dos sistemas, el primer paso es definir la duplexión, es decir, generar una diferencia en frecuencia (FDD) o en tiempo (TDD) del recurso disponible para especificar la transmisión y recepción. En el caso de tratarse de FDD, a la transmisión se le asigna para todo el tiempo un determinado ancho de banda ubicado en las bajas frecuencias y para la recepción

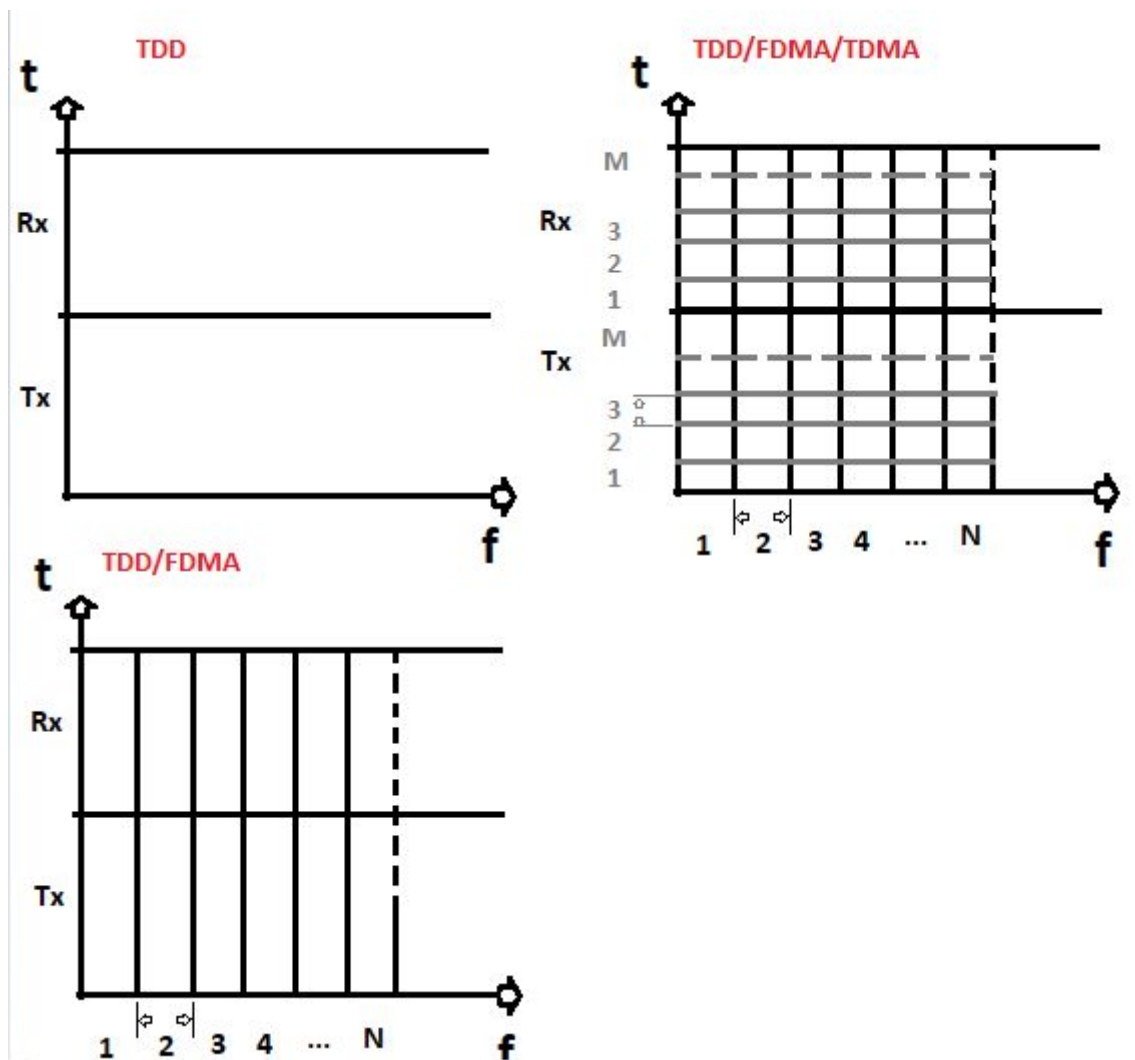
durante todo el tiempo se define el mismo ancho de banda pero ubicado en las altas frecuencias. Esto se implementa con la finalidad de optimizar el uso de las baterías de los móviles al realizar transmisiones a las estaciones base. Al utilizar la transmisión en un rango de frecuencias menor, se sufre menor cantidad de atenuación producto de la propagación por espacio libre a medida que aumenta la distancia, entonces para obtener la misma SNR en el receptor o estación base el móvil puede prescindir de potencia transmitida y optimizar el uso de la batería.

Una vez definida la duplexión, se procede a la formación de grupos de usuarios, en este caso se aplica FDMA, es decir, acceso múltiple por división de frecuencia. Cada grupo de usuarios tendrá un rango de frecuencias específico asignado tanto para transmisión como para recepción, es decir, un ancho de banda particular para todo el grupo en la transmisión y en la recepción pero ¿Cómo acceden los usuarios? ¿Acceden todo el tiempo a ese recurso pero con pequeños anchos de banda (FDMA nuevamente) o en tiempos limitados usando todo ese espectro asignado (TDMA)? Allí se establece el último método de acceso que es TDMA. En esta técnica, cada usuario del grupo tiene un time slot asociado dentro de una trama de dimensión "M" porque son M la cantidad de usuarios del grupo. De esta forma pueden acceder a la totalidad del ancho de banda del grupo pero por un tiempo limitado.



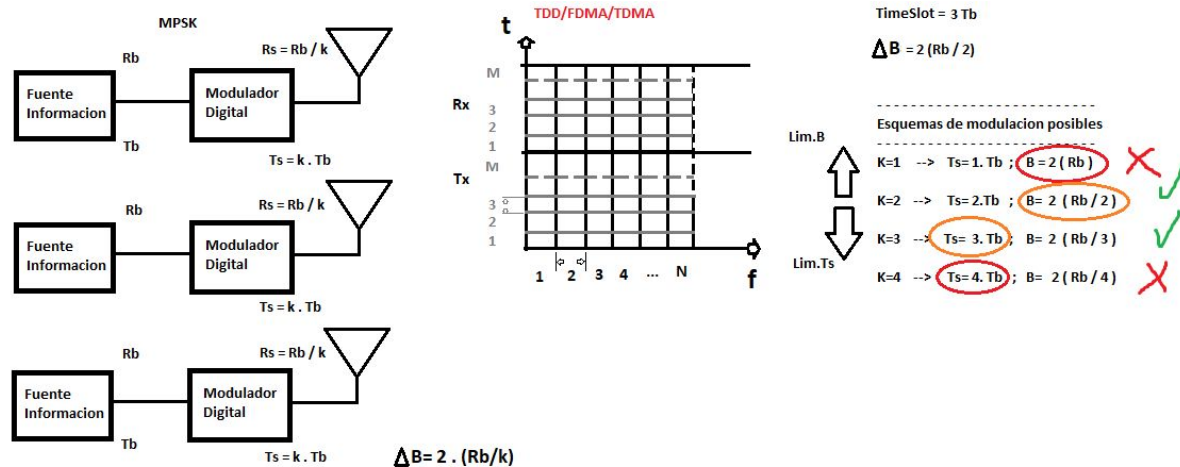
En el caso de TDD/FDMA/TDMA la duplexión es distinta, ya que implica una división temporal tanto para transmitir como para recibir información. Resulta lógico pensar que en esta secuencia periódica de tiempos primero se hace presente la transmisión y luego la recepción. Habiendo aclarado esto, en dichas secuencias temporales se aplican los métodos de acceso FDMA en primer lugar para la creación de grupos y TDMA para la asignación a usuarios. ¿Necesitamos crear un conjunto de grupos de usuarios multiplexados en frecuencia para transmitir y en otro ancho de banda distinto el mismo conjunto de grupos para recibir? NO. Porque se aclaró en el duplexado que la transmisión y recepción se da en diferentes tiempos, no

frecuencias, así que todo el ancho de banda disponible del canal se divide en “N” grupos de usuarios para transmitir y esas mismas frecuencias son utilizadas en otro intervalo de tiempo para recibir información. Luego, uno debería preguntarse cómo siempre, cómo acceden los usuarios a dicho ancho de banda asignado en un tiempo para transmitir y en otro tiempo para recibir. ¿Acceden mediante pequeños anchos de banda para cada usuario dentro del grupo (FDMA) en todo el tiempo que dura la transmisión o acceden en pequeños intervalos de tiempo durante el lapso de tiempo que dura la transmisión con todo el ancho de banda del grupo (TDMA)? En este caso se utiliza TDMA por lo tanto los usuarios acceden a todo el ancho de banda del grupo en un tiempo determinado.



Más allá del método de acceso, en estos casos ¿hay alguna manera particular de construir el transmisor para cada usuario? La respuesta es que SI. El modelado del método de acceso permite establecer parámetros mínimos y máximos que deben respetar todos los esquemas de transmisión dentro del sistema. En cada “Time Slot”, se debe hacer presente al menos un símbolo, por lo tanto este parámetro establece el límite superior para “Ts”. De esta forma, dada una tasa de información

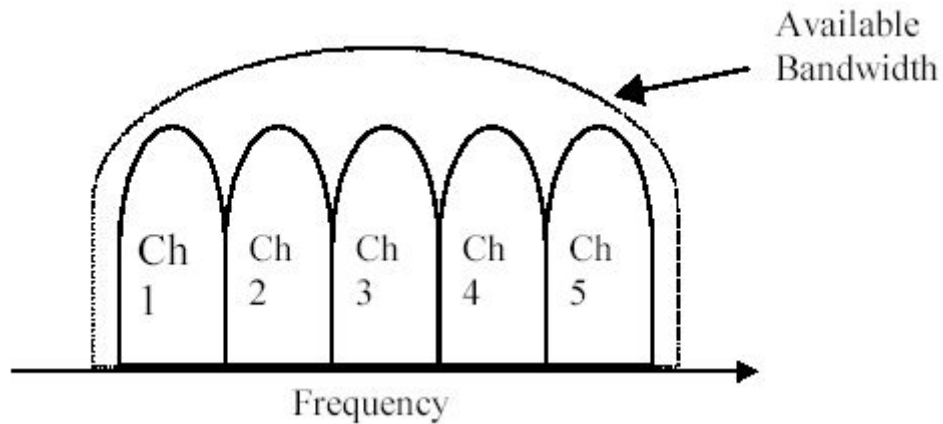
“Rb” común a todas las fuentes, para esquemas de modulación M-PSK se establece cual es el valor máximo posible de “k” del transmisor para efectuar la modulación digital “Ts=k.Tb”. También es importante remarcar que las limitaciones de ancho de banda establecen el límite inferior para el valor de “k” ya que  $\Delta B = 2R_s$  ó  $\Delta B = 2 \frac{R_b}{k}$  con pulso formador de onda rectangular.



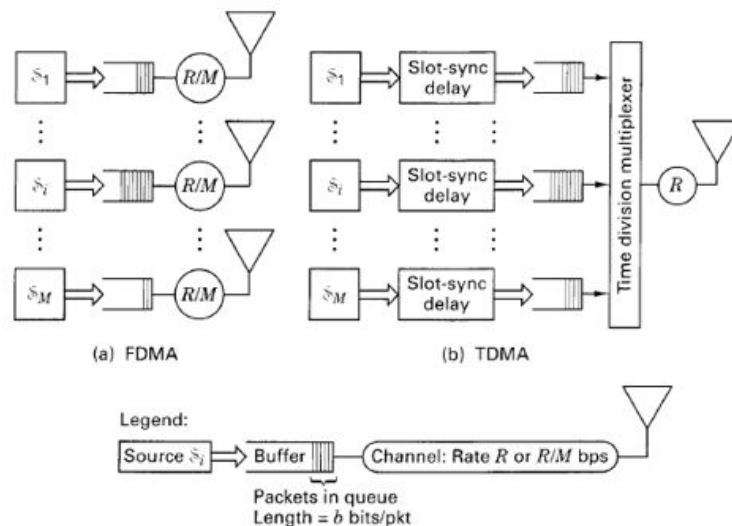
En el caso de implementar M-FSK, el tamaño de la ranura de tiempo o time slot limita de forma similar al modelado de los sistemas transmisores como en M-PSK, es decir, establece el tiempo de símbolo máximo que puede soportar el método de acceso. Sin embargo no es el único parámetro para definir el tiempo de símbolo, ya que como sabemos, en M-FSK a medida que aumenta “k” en el transmisor, se incrementa el ancho de banda como  $\Delta B = (M - 1)R_s + 2 \frac{R_s}{2}$  para un pulso formador de onda rectangular. De esta manera tenemos dos limitaciones para definir el máximo tiempo de símbolo para cada usuario. ¿Qué ocurre si el tiempo de símbolo es menor? Si el tiempo de símbolo es más pequeño, significa que disminuye “k” para el modulador digital, por lo tanto durante un time slot deberían hacerse presente más de un símbolo y el ancho de banda es menor. Esto demuestra que el modelado total de un sistema que implementa métodos de acceso requiere que sus subsistemas (Usuarios) cumplan con ciertas características de acuerdo al sistema de modulación implementado por cada uno.

### Comparación entre FDMA y TDMA

Lo primero que se debe considerar es que el canal tiene una capacidad R bits/seg para transferencia. Teniendo en cuenta que FDMA realiza una división del ancho de banda disponible total entre M usuarios, asignando fracciones W/M, la tasa de información “Rb” en cada banda es de R/M (bits/seg) siendo menor que la capacidad máxima.



Para el caso de TDMA se cuenta con la capacidad máxima del canal  $R$  pero lo que varía es la disponibilidad del canal cada un cierto tiempo para la utilización del canal en su time slot correspondiente, por lo que toda la información que se desee transmitir debe de poder transmitirse en ese tiempo asignado.



Con respecto a las tasas, en el caso de división por frecuencia, si se considera que la información a transmitir por cada uno de los  $M$  usuarios se agrupa en paquetes de  $b$  bits y que estos paquetes tardan en transmitirse  $T$  segundos. Se llega a:

$$\frac{1}{T} [\text{paq/seg}] = (R_{\text{FD}} / M) [\text{bits/seg}] / b [\text{bits/paq}]$$

$$R_{\text{FD}} = M \cdot b / T$$

En el caso de división por tiempo, cada usuario accede a la máxima capacidad del canal  $R$  en su time slot asignado, por lo que los paquetes de  $b$  bits se transmiten en  $T/M$  segundos

$$R_{\text{TD}} = b / (T/M)$$

Con estas expresiones es que se llega a que ambos sistemas requieren la misma tasa de datos.

$$R_{TD} = R_{FD} = R = M \cdot b / T \text{ [bits/seg]}$$

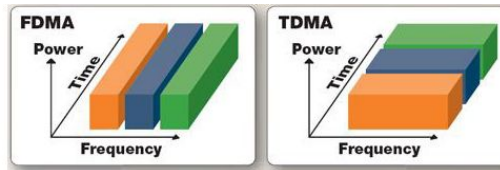
Un resumen del análisis planteado para FDMA y TDMA se puede observar en la siguiente imagen.

\* Cada usuario en FDMA Transmite a una Tasa:  
 $R_c / M \text{ [bits / seg]}$

\* Tiempo utilizado por cada usuario para transmitir es:  
No hay restricciones de tiempo.

\* Tamaño de paquete:  
 $b \text{ [bits/paquete]}$

¿Cuántos paquetes transmite por segundo?



\* Cada usuario en TDMA Transmite a una Tasa:  
 $R_c \text{ [bits / seg]}$

\* El tiempo utilizado por cada usuario para transmitir es:  
 $1 / M \text{ [seg / TimeSlot]}$

\* Tamaño de paquete:  
 $b \text{ [bits / paquete]}$

¿Cuántos paquetes transmite por segundo?

$$\frac{R_c / M \text{ [bits / seg]}}{b \text{ [bits / paquete]}} = \frac{R_c / M}{b} \text{ [paq / seg]}$$

$$\frac{R_c \text{ [bits / seg]}}{b \text{ [bits / paquete]}} = \frac{R_c}{b} \text{ [paq / seg]}$$

$$\frac{R_c}{b} \text{ [paq / seg]} \cdot \frac{1}{M} \text{ [seg / Tslot]}$$

$$\frac{R_c / M}{b} \text{ [paq / seg]} = \frac{1}{T} \text{ [paq / seg]} \Rightarrow T \text{ [seg / paq]} \Leftarrow \frac{1}{T} \text{ [paq / seg]} = \frac{R_c}{b \cdot M} \text{ [Paq / Tslot]}$$

Otra forma de ilustrar el funcionamiento de ambos sistema en función de la tasa de transferencia es como se muestra en la siguiente imagen.

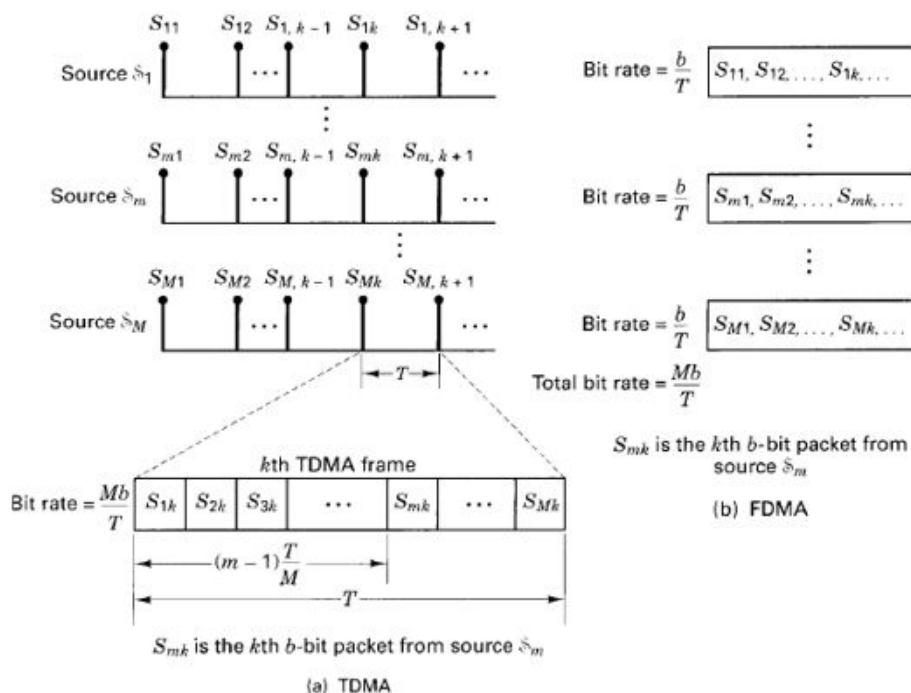


Figure 11.13 (a) TDMA and (b) FDMA channelization.



Entonces uno podría plantearse.. ya que las tasas de transferencia para ambos métodos de acceso son iguales, ¿resulta indistinta la utilización de uno u otro? ¿Para que existen dos métodos de acceso si en definitiva permiten la misma transferencia de información por unidad de tiempo? ¿Qué ventaja aporta uno respecto a otro?. Este tipo de preguntas no pueden responderse si el análisis solo se limita a la tasa de transferencia de información. Debe incorporarse una nueva variable definida como “Retardo de mensajes” que permita distinguir ventajas y desventajas entre TDMA y FDMA. Pero ¿cómo? Resulta que para los métodos de acceso el retardo de un mensaje no solo está dado por la cantidad de paquetes y la tasa de transferencia, sino que se agrega el tiempo necesario que debe esperar cada usuario para acceder al medio, es decir, lograr la utilización del canal de comunicaciones.

### Retardo de mensajes en FDMA y TDMA

Tomando como métrica de calidad de funcionamiento el retardo medio de los paquetes, se puede analizar el delay que existe para ambos métodos de acceso. Para ello se considera que la utilización del canal está al 100% o sea a  $R[\text{bits/seg}]$  para FDMA y en el caso de TDMA que la ocupación de los time slot es total y que en ambos no se consideran bandas o tiempos de guarda.

Como en el caso TDMA los paquetes no se envían instantáneamente (solo en timeslot correspondiente), el tiempo de demora se considera como una suma de dos componentes, una asociada a la espera ( $w$ ) y otra a la transmisión ( $\tau$ ), quedando:

$$D = w +$$

Con respecto a los retardos de transmisión, como ya se vio anteriormente, en FDMA la demora de transmisión por paquete enviado es “ $T$ ” segundos pero para el caso TDMA se debe de enviar en un tiempo menor, el cual es “ $T/M$ ” segundos.

$$\tau_{FD} = T \quad \tau_{TD} = T/M = b/R$$

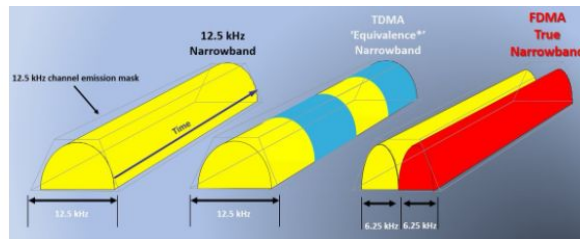
Con respecto a los retardos por espera, en el caso de FDMA como la transmisión de los mensajes no deben de esperar para ser transmitidos queda  $w_{FD} = 0$ . En TDMA no se cumple la misma condición, ya que el tiempo para transmisión se reparte entre  $M$  time slots. Por lo que el tiempo de espera variará según el momento en el que se haya generado el paquete a transmitir y a cuanto tiempo se encuentre de su momento asignado para realizarlo.

### TDMA

$$D = w + \tau$$

$$w = ?$$

$$\tau = T/M \text{ [seg/paq]}$$



Retardo de transmision

$$D = w + \tau$$

### FDMA

$$D = w + \tau$$

$$w = 0$$

$$\tau = T \text{ [seg/paq]}$$



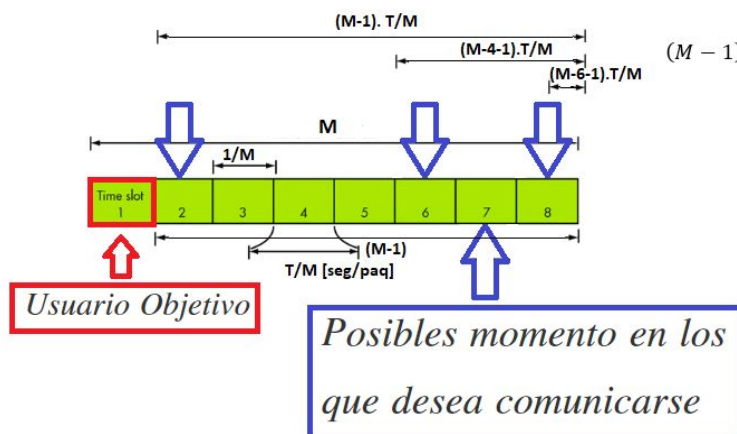
espera para acceder al recurso



tiempo de transmision

Para analizar “w” en TDMA, es decir, el tiempo de espera para acceder al recurso, se debe plantear la siguiente situación:

Tramas Temporales con M usuarios



Todos los posibles retardos

$$(M-1) \cdot \frac{T}{M} + (M-1-1) \cdot \frac{T}{M} + (M-2-1) \cdot \frac{T}{M} + \dots + (M-(M-1)-1) \cdot \frac{T}{M}$$

Se realiza un promedio con todos los valores posibles

$$w = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (m-1) \cdot \frac{T}{M}$$

En donde el tiempo máximo puede obtenerse como:

$$w_{TD} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M (m-1) \frac{T}{M} = \frac{T}{M^2} \sum_{n=0}^{M-1} n = \frac{T}{M^2} \frac{(M-1)(M)}{2} \quad (11.12)$$

$$= \frac{T}{2} \left(1 - \frac{1}{M}\right)$$

Es necesario aclarar que para llegar a dicha expresión fue necesario considerar el desarrollo de una serie aritmética, donde se busca obtener el valor resultante entre “0” y “M-1”. Para ello se evaluó la serie en 0 arrojando el resultado  $W_{TD}=0$  y en “M-1” arrojando el resultado  $W_{TD}=M-1$ , luego se aplicó la siguiente expresión :

$$S_k = \frac{k \cdot (a_0 + a_{M-1})}{2}$$

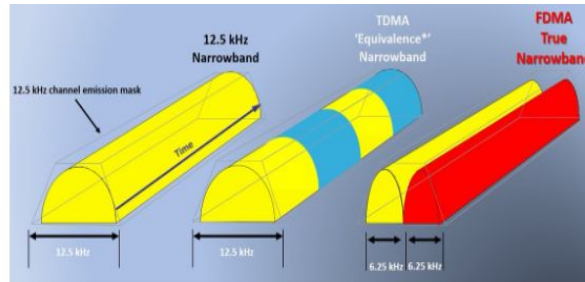
donde k es la cantidad de elementos en la serie comprendidos entre  $a_0$  y  $a_{M-1}$ .  
Una vez que se tienen los tiempos de espera y transmisión para cada método de acceso, se los puede vincular para comparar sus tiempos medios de retardo.

TDMA

$$D = w + \tau$$

$$w = \frac{T}{2} \left(1 - \frac{1}{M}\right)$$

$$\tau = T/M \text{ [seg/paq]}$$



FDMA

$$D = w + \tau$$

$$w = 0$$

$$\tau = T \text{ [seg/paq]}$$

$$D_{FD} = T$$

$$D_{TD} = \frac{T}{M} + \frac{T}{2} \left(1 - \frac{1}{M}\right)$$

$$2 \cdot D_{TD} = 2 \cdot \left[ \frac{T}{2} \left(1 - \frac{1}{M}\right) + \frac{T}{M} \right]$$

$$2 \cdot D_{TD} = T + \frac{2 \cdot T}{M} - \frac{T}{M}$$

$$2 \cdot D_{TD} = T + \frac{T}{M}$$

$$D_{TD} = \frac{T}{2} + \frac{T}{2 \cdot M}$$

$$D_{TD} = \left( T - \frac{T}{2} \right) + \frac{T}{2 \cdot M}$$

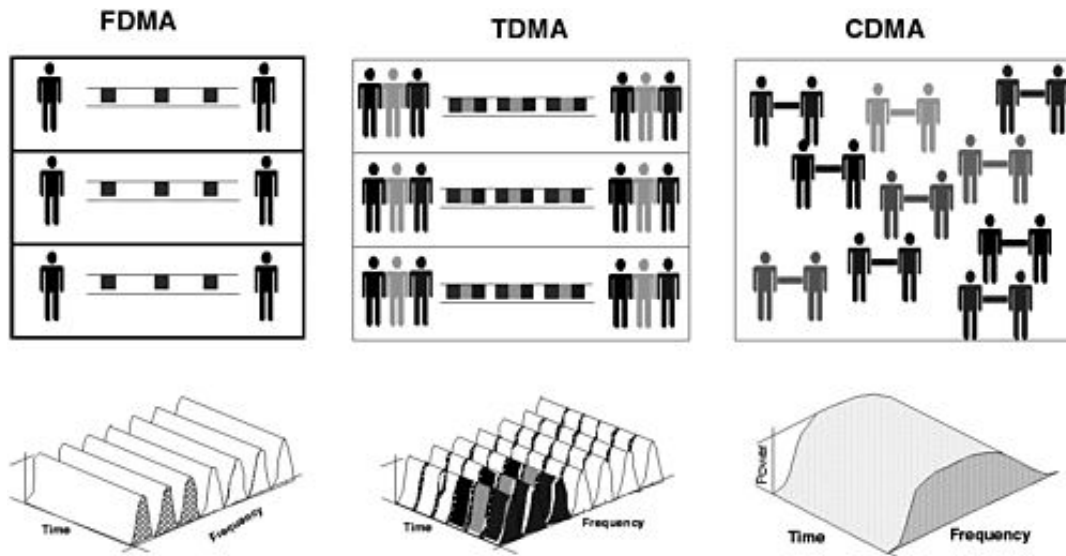
$$D_{TD} = T - \frac{T}{2M} (M-1)$$

$$D_{TD} = D_{FD} - \frac{b}{2R} (M-1)$$

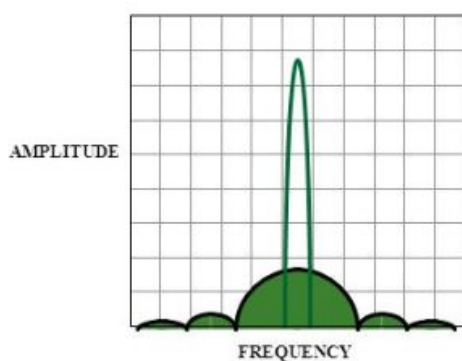
Se llega a que el retardo medio de los paquetes para sistemas funcionando a su capacidad máxima, TDMA siempre tiene un retraso menor en sus mensajes con respecto a FDMA.

Multiplexación por división de código

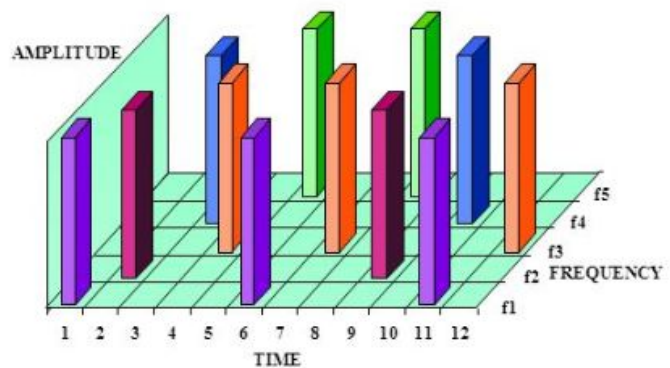
“Code Division Multiple Access” (CDMA) es un método de acceso utilizado para sistemas de comunicación digital y en particular para los sistemas inalámbricos que está basado en el uso de la técnica de modulación de espectro ensanchado. Este método de acceso permite que los usuarios utilicen el canal todo el tiempo y en todas las frecuencias disponibles garantizando que no existirá interferencias elevadas entre cada usuario.



Existen dos técnicas básicas para implementar un método de acceso CDMA. “Direct Sequence spread spectrum (DSSS)” y “Frequency hopping spread spectrum (FHSS)”



Direct Sequence Spread Spectrum



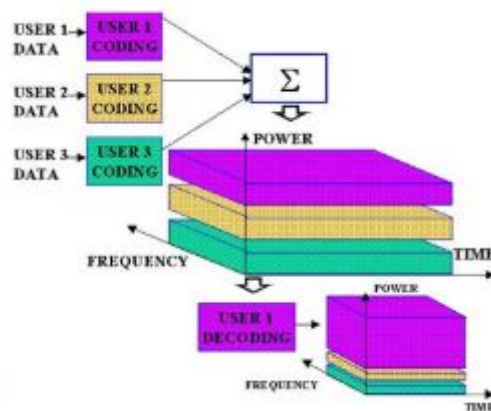
Frequency Hopping Spread Spectrum

Ambas técnicas en su funcionamiento plantean la utilización de un ancho de banda mucho más grande que el ancho de banda requerido para cualquier técnica de modulación digital convencional. En el caso de Direct Sequence, como se puede observar en la imagen anterior, la expansión del espectro es evidente pero en frequency hopping la señal de información no se expande en la frecuencia, sino que mediante saltos muy espaciados y pseudoaleatorios a lo largo del tiempo en el dominio de la frecuencia genera el efecto para cualquier otro usuario o interferente de la ocupación de un ancho de banda mucho mucho mayor que el de la información.

Para el caso de Direct Sequence (DSSS) cada usuario de un sistema CDMA emplea un código de transmisión distinto (y único) para modular su señal. La selección del código a emplear para la modulación es vital para el buen desempeño de los

sistemas CDMA, porque de él depende la selección de la señal de interés, que se hace por correlación cruzada de la señal captada con el código del usuario de interés, así como el rechazo del resto de señales y de las interferencias multi-path (producidas por los distintos rebotes de señal).

El mejor caso se presenta cuando existe una buena separación entre la señal del usuario deseado (la señal de interés) y las del resto; si la señal captada es la buscada, el resultado de la correlación será muy alto, y el sistema podrá extraer la señal. En cambio, si la señal recibida no es la de interés, como el código empleado por cada usuario es distinto, la correlación debería ser muy pequeña, idealmente tendiendo a cero (y por tanto eliminando el resto de señales). Y además, si la correlación se produce con cualquier retardo temporal distinto de cero, la correlación también debería tender a cero. A esto se le denomina autocorrelación y se emplea para rechazar las interferencias multi-path.



La otra técnica posible de aplicar en un sistema CDMA es Frequency Hopping (FHSS) en donde este tipo de multiplexación se puede pensar como una combinación híbrida entre FDMA y TDMA ya que consiste en la asignación de usuarios en distintas frecuencias para distintos tiempos, esto quiere decir que un grupo de usuarios que se encuentra transmitiendo en una banda de frecuencias para el time slot actual, en el próximo time slot puede encontrarse transmitiendo en otra banda de frecuencias. Esto se obtiene mediante la utilización de una lista conformada con códigos PN ortogonales entre los distintos grupos de usuarios, el cual tiene la tarea de ir realizando las distintas asignaciones de frecuencia. Este tipo de multiplexación trae una ventaja en cuanto a sincronización con respecto a TDMA, ya que no es necesaria entre todos los grupos de usuarios, sino que solo debe haber sincronismo de código entre transmisor y receptor dentro de un grupo. Es decir, que cada grupo de usuarios tiene que tener la lista de códigos PN sincronizados para poder seguir los diferentes saltos en frecuencia en función del tiempo.

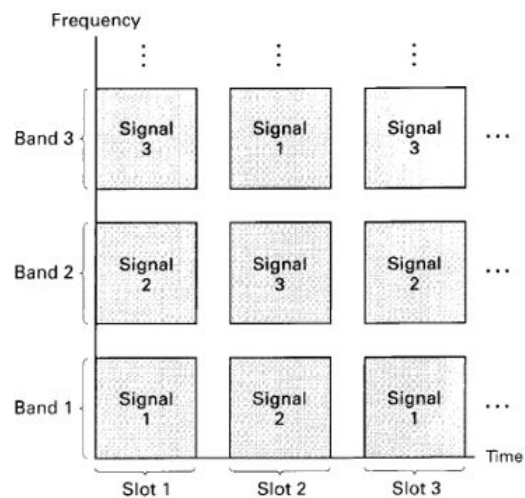
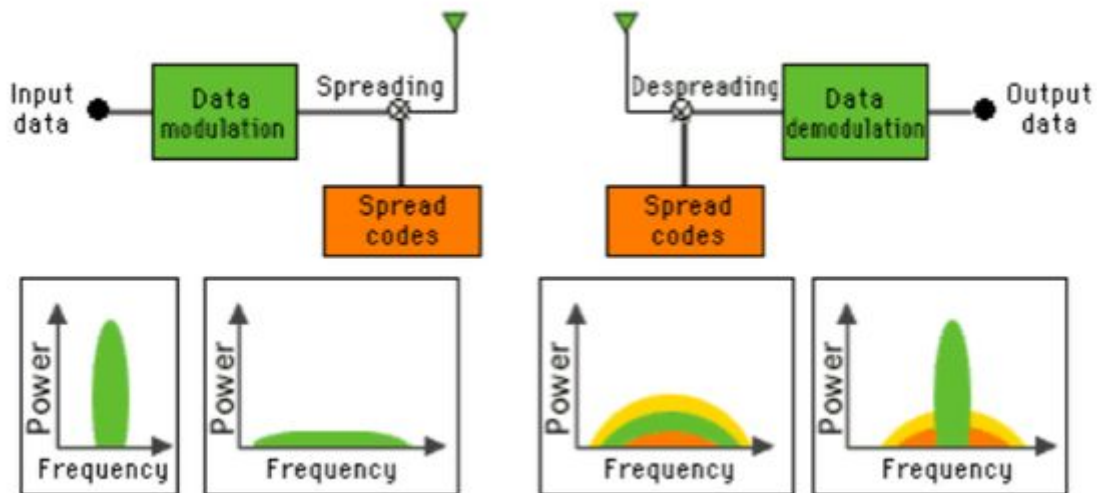


Figure 11.14 Code-division multiplexing.

¿En qué consiste este modo de sincronismo simplificado?

Como se mencionó, se utiliza un código PN preestablecido tanto en el transmisor como receptor y si se considera el caso de salto de frecuencia, por cada clock (time slot) realiza una asignación o salto entre las posibles frecuencias asignables.

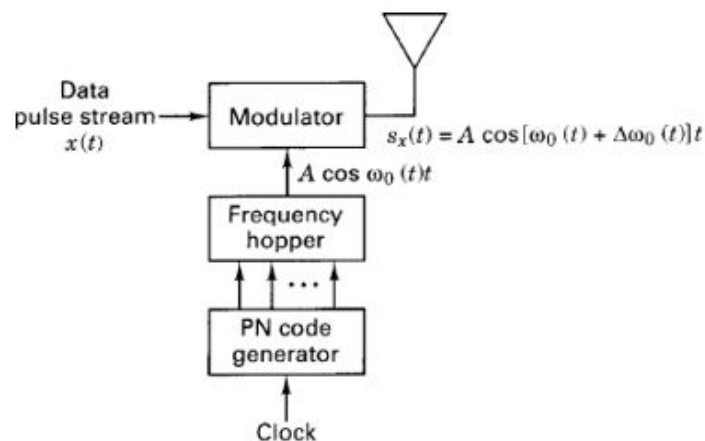


Figure 11.15 CDMA frequency hopping modulation process.



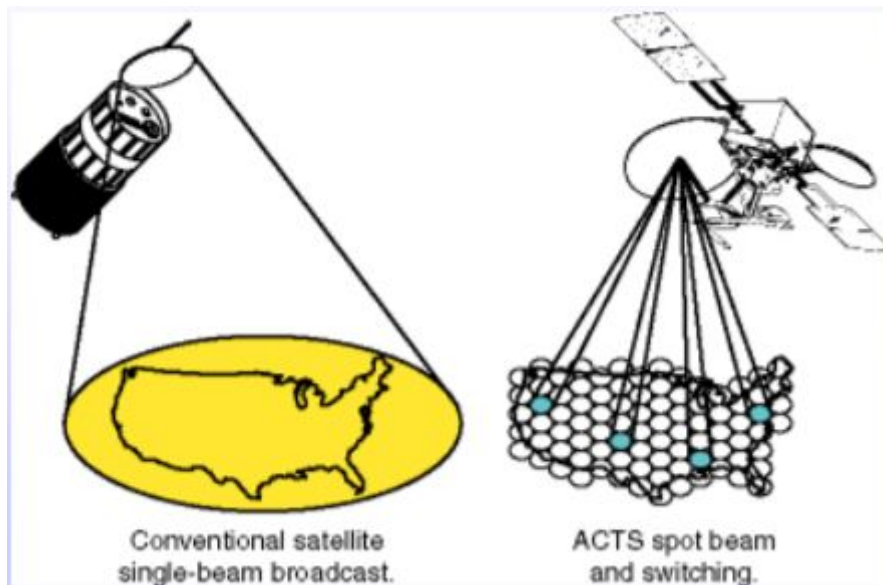
Uno puede pensar instantáneamente, ¿Qué diferencia hay entre un sistema MFSK convencional y un FH? Sucede que en el sistema convencional, un símbolo de datos modula una onda portadora que está fijada en frecuencia pero para el caso FH, el símbolo de datos modula una onda portadora que salta a través del ancho de banda total del recurso de canal o comunicaciones. Se puede considerar a la modulación FH como el proceso que involucra dos partes, por un lado, la modulación de los mensajes digitales para generar waveforms que contienen cambios en la frecuencia una de otra y por otro lado, la modulación de salto de frecuencia que se implementa en conjunto con la modulación MFSK, en donde un mezclador junto con un sintetizador de frecuencia producen un tono de transmisión basado en el código PN y los datos.

La CDMA con respecto a los métodos de acceso ya tratados, trae con si algunas ventajas como lo es la *Privacidad*, dificultando que las comunicaciones sean interceptadas ya que los códigos PN para poder realizar la modulación y demodulación son conocidos únicamente por los usuarios autorizados. Con respecto al *desvanecimiento de los canales*, CDMA trae la ventaja de que para FH como el usuario va cambiando constantemente su frecuencia, si en el canal se diera el caso que para un rango de frecuencias se atenúan, este usuario experimenta esa degradación solo para el instante que le ha tocado ese rango de frecuencias pero para el resto de los tiempos no sufrirá atenuaciones o distorsiones, esta modalidad genera una gran diferencia con FDMA, en donde el usuario permanece siempre en el mismo rango de frecuencia y por lo tanto está siempre presente con él la atenuación/distorsión de manera constante. Este salto en las frecuencias para el usuario, es útil para *prevenir interferencias*, ya que por cada transmisión el ancho de banda asignado o necesario es idéntico a MFSK pero a lo largo del tiempo el sistema irá asignando distintas frecuencias haciendo que la banda de frecuencias sea mucho mayor que el ancho de banda de datos para transmisión. Por último y como aspecto más importante de CDMA, es que no se necesita una *coordinación temporal* precisa entre los diversos transmisores simultáneos, como sí sucede en TDMA. Esto se debe a la ortogonalidad entre las transmisiones de los usuarios con sus diferentes códigos.

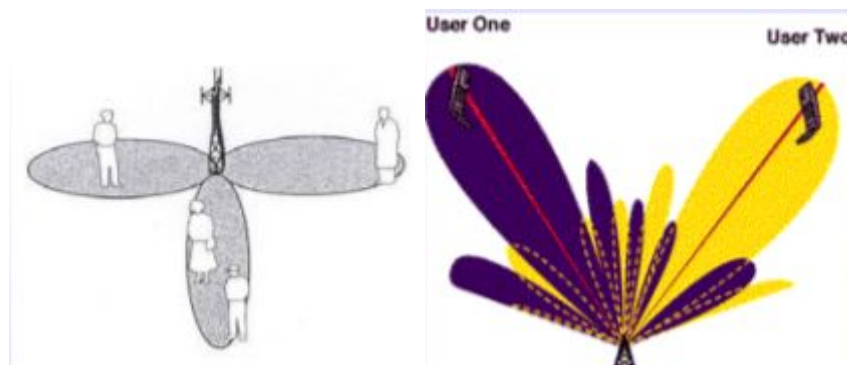
### Acceso Multiple por division de espacio y Acceso multiple por division de polaridad

La técnica de acceso múltiple por división de espacio o comúnmente conocida como (SDMA) consiste en la utilización de dos o más antenas donde los lóbulos principales asociados al diagrama de radiación se encuentran separados espacialmente. ¿Qué significa esto? Que donde una estación receptora es capaz de captar la señal transmitida por una de las antenas de la estación transmisora no es capaz de captar la otra señal de la otra antena. Los diagramas de radiación están separados espacialmente. Esto permite que puedan ser reutilizados todos los recursos del sistema (Tiempo, Frecuencia) dentro de una misma ubicación espacial.

La siguiente imagen, ilustra la pisada de dos satélites diferentes. Por un lado, el satélite de la izquierda (Coinor) al tener un único haz principal tiene la posibilidad de distribuir el recurso limitado (tiempo y frecuencia entre todos los usuarios de Estados Unidos) mientras que el satélite de la derecha es capaz de distribuir múltiples veces (Zona azul) la totalidad del recurso en una cantidad menor de usuarios que se encuentran en cada área. Si comparamos los anchos de banda que pueden ser asignados en un caso y en el otro, encontraremos que en la región amarilla como todo el recurso tiene que ser compartido entre millones de usuarios, a cada uno se le asigna un pequeño ancho de banda pero en las regiones azules todo el recurso es dividido unas miles de veces solamente y vuelve a estar disponible en su totalidad para el resto de regiones azules.



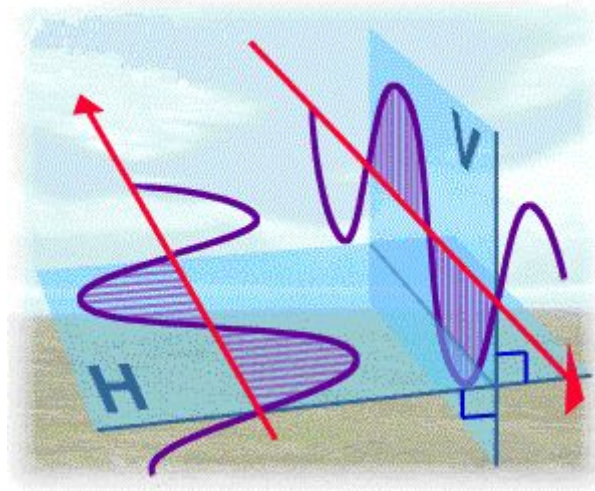
No hay que ir tan lejos para entender el concepto. En lugar de satélites, podría pensarse en una estación base de telefonía móvil que posee múltiples haces apuntando a distintas regiones en el espacio denominadas celdas donde los móviles en cada una de ellas gozan de la totalidad del recurso.



Además, existe otra técnica de acceso múltiple denominada Acceso múltiple por división de polaridad (PDMA). Esta técnica plantea la utilización de dos tipos de antenas (Vertical y Horizontal) para dar cobertura a la misma región geográfica evitando todo tipo de interferencias entre ellas. La ventaja de esta técnica es que si



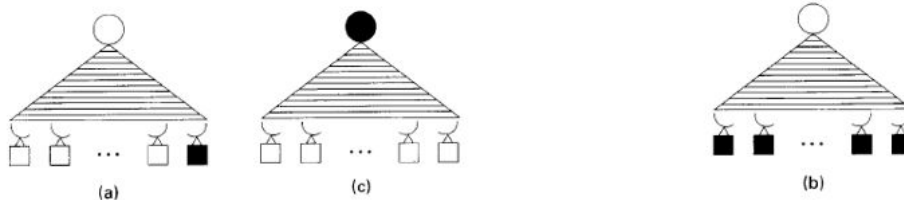
se la combina con un diseño de antena multihaz sobre que el recurso está disponible en su totalidad para cada región o zona que abarca los haces de la antena, se duplica dicha disponibilidad porque las antenas con polarización ortogonal no tienen interferencia. La desventaja es que los receptores deben tener las mismas antenas que la estación transmisora y respetar la polaridad para evitar interferencias.



### Protocolos de control de acceso al medio (MAC - Media Access Control)

Los protocolos MAC son el conjunto de mecanismos y protocolos de comunicaciones a través de los cuales los usuarios se ponen de acuerdo para compartir un medio de transmisión común. Estos protocolos no pueden funcionar solos, necesitan aplicar diversos algoritmos de acceso múltiples denominados MAA que pueden estar en un solo dispositivo o varios de los que forman el sistema, constituyendo una arquitectura de MAA centralizado o distribuido.

### Controladores MAA

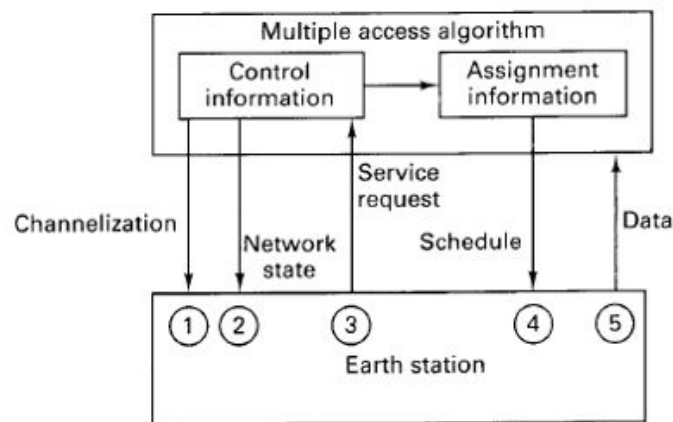


### Centralizados

### Distribuidos

Para hacer uso del sistema de comunicaciones, mediante la asignación del o los controladores MAA, se debe cumplir un protocolo de 5 pasos entre las estaciones transmisoras y el controlador. El primer paso consiste en la *canalización* el cual consiste en la asignación de los canales (duplexado para cada servicio) de los cuales dispondrá la estación para transmitir y recibir información. Se podría pensar como los carriles de una autopista, en donde los camiones deben de circular por el

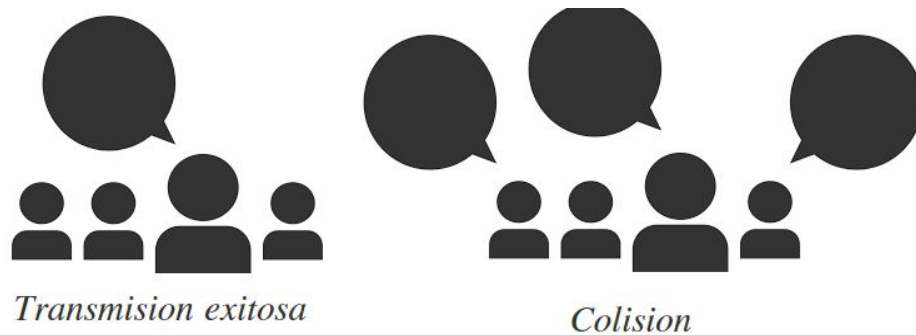
lado derecho y los autos por el izquierdo, sin importar si hay o no vehículos presentes. El segundo paso es el *Estado de la red*, se encarga de avisar a las estaciones si alguno de los canales asignados que se encuentran disponible para ser utilizado y el lugar del recurso (tiempo, frecuencias ó posiciones del código) donde se pueden realizar solicitudes de servicio. Dado el caso que el recurso esté disponible y las estaciones tienen información para transmitir, sucede la *Solicitud de servicio*, en donde la estación notifica al controlador en los tiempos o frecuencias ya antes informadas por el MAA que hará uso del servicio. Al recibir la solicitud del servicio, el controlador envía el programa a la estación de cuál será su tiempo o frecuencia para enviar los datos por el canal, se podría asimilar a un ACK por parte del controlador respecto a la solicitud de servicio de la estación. Como último paso, la estación transmite sus datos de acuerdo a todas las condiciones previamente establecidas.



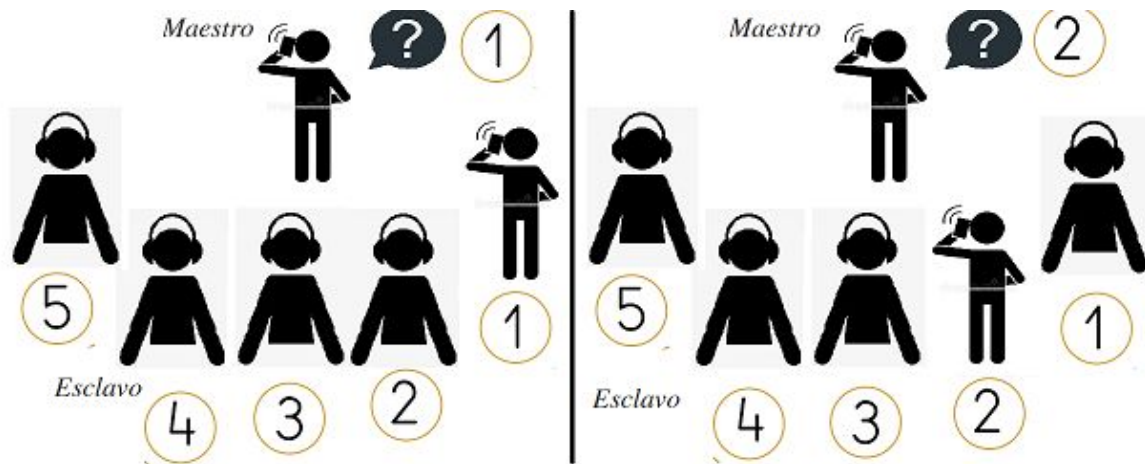
**Figure 11.18** Multiple access information flow.

En particular, la materia de métodos de acceso se centra en el análisis de protocolos de acceso múltiple en medios inalámbricos, definiendo protocolos MAC centralizados o distribuidos y de acuerdo a la manera en la cual operan se pueden definir protocolos de acceso aleatorio, acceso garantizado y acceso híbrido.

En particular, para los protocolos de acceso aleatorio, los nodos o usuarios compiten por el uso del canal de comunicaciones durante determinados lapsos de tiempo. Cuando uno solo de ellos hace el intento de transmisión, el paquete es entregado exitosamente. Cuando múltiples nodos hacen un intento de transmisión, sucede una colisión. Los nodos resuelven las colisiones de forma ordenada de acuerdo a las reglas establecidas por el protocolo de resolución de colisión (CRA) dentro del protocolo (MAA)



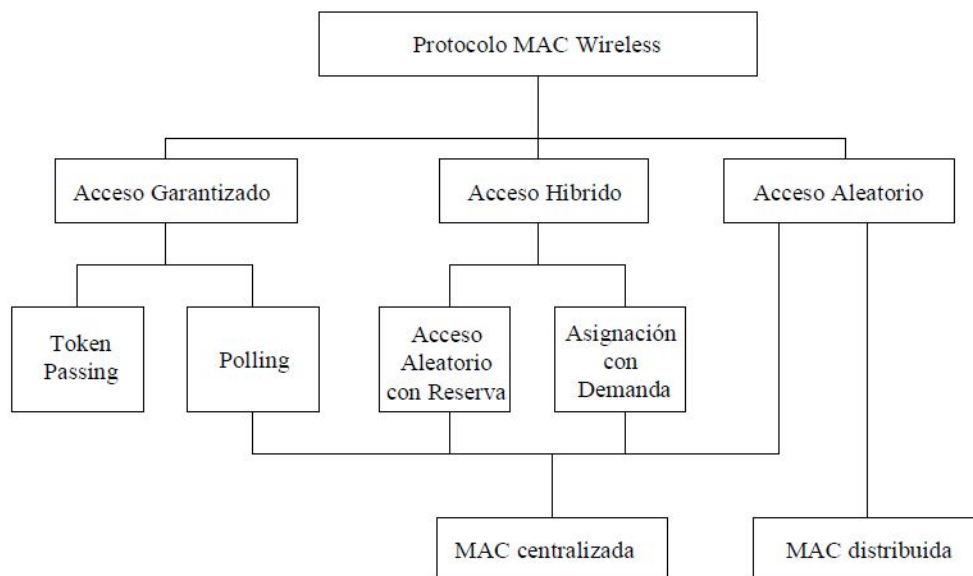
En un protocolo de acceso garantizado, cada usuario o nodo accede al medio de forma ordenada y cíclica una vez pactada previamente la forma. Hay dos maneras para implementar un protocolo de acceso garantizado. La primera utiliza una configuración del tipo maestro - esclavo, donde el maestro pregunta a cada usuario/nodo y el mismo solamente responde, es decir, envía datos como respuesta a las preguntas. A este protocolo se le suele definir como llamada selectiva (Polling).



La otra forma utiliza una configuración distribuida intercambiando señales de marca. En donde solo la estación con la señal de marca puede transmitir datos. Cada estación, luego, le pasa la señal de marca a la siguiente estación. A estos protocolos se les denomina protocolos de paso de señales (Token Passing).

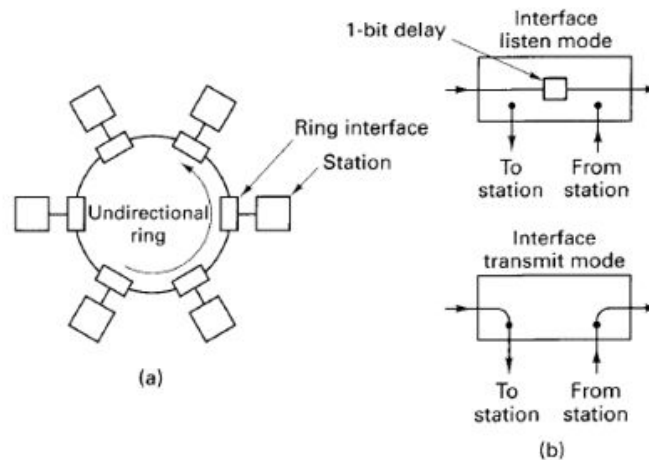
Por último, los protocolos de acceso híbrido se basan en mecanismos de petición de autorización. Cada nodo envía una solicitud a la estación base indicando cuanto tiempo es requerido o el ancho de banda necesario para enviar los datos que se encuentran actualmente en espera de ser enviados. La petición o solicitud utiliza un método de acceso aleatorio, es decir, las diferentes estaciones en los momentos en los cuales se genera la información no acceden de forma ordenada al medio, generando la posibilidad de tener algún tipo de colisión, sin embargo, estos paquetes no llevan información como tal propiamente dicha, sólo los datos mencionados anteriormente, por lo tanto se realizan retransmisiones de forma aleatoria. Cuando la estación base logra recibir alguna de las peticiones de forma exitosa ubica un slot de tiempo para la transmisión de datos real y le informa al nodo

el slot de tiempo asignado. Lo interesante de este tipo de protocolos es la asignación del ancho de banda para cada transmisión por time slot, la cual depende de la inteligencia de la estación base. Esto permite dividir a los protocolos de acceso múltiple híbridos en: Protocolo de acceso Aleatorio con Reserva (RRA) y Protocolo de Acceso mediante Asignación con demanda (DA), en donde para RRA ya se tienen reglas implícitas para la reserva del ancho de banda a utilizar mientras que en el caso de DA, el cual se considera un protocolo más inteligente. Se realiza una asignación de ancho de banda según los requisitos de calidad de servicio respecto a todas las peticiones de los distintos nodos. En conclusión, si bien los dos son dinámicos en la asignación, uno utiliza un conjunto de reglas fijas y preestablecidas para asignar y no le importa los requerimientos del nodo transmisor.

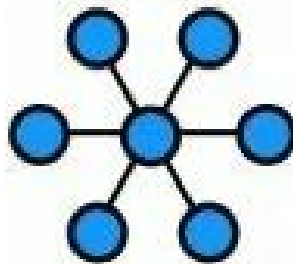


Comenzando con la descripción de los protocolos MAC de acceso garantizado y en particular los de la clase Token Passing es posible definir que dicho protocolo es utilizado en redes de anillo. Se conoce a una red de anillo como una arquitectura de red donde los dispositivos se encuentran interconectados punto a punto uno con otro y en donde la circulación de la información se produce en un único sentido. Esta última característica es fundamental para el desarrollo del protocolo MAC, ya que permite la circulación de una secuencia particular de bits conocida por todas las estaciones denominada "Token". Cada estación, en su comunicación dependerá de la presencia en su entrada de dicho Token, lo que refleja la disponibilidad de la red para dicho usuario. Si el mismo, quiere transmitir información, romperá el lazo construido o anillo, modificará la secuencia particular de bits para que el resto de estaciones no detecten un token disponible e insertará posteriormente los datos en el mismo sentido de circulación que el token. Cada estación que no contenga el

token y que se encuentre en escucha, recibirá los datos y para retransmitirlos esperará un tiempo de bit. Cuando los bits de información transmitidos recorrieron todas las estaciones y vuelve a origen, implica que se ha cumplido todo el ciclo del anillo, por lo tanto es información redundante que debe ser retirada de la red. Por eso, la propia estación que transmite e inserta información, es la que posteriormente retira la misma. Una vez que la estación insertó toda la información en la red y no va a transmitir ningún bit de información adicional, debe generar para el resto del anillo el propio token de disponibilidad.



El otro protocolo MAC de acceso garantizado que está presente en el esquema que se utilizó al principio se define como Polling. En este caso, las redes cambian en su arquitectura, ya no se utiliza una red del tipo anillo sino que se utiliza una topología del tipo estrella.



Para estas redes resulta lógico pensar en un método de acceso donde el controlador MAA se encuentre únicamente en un punto de la red, lugar donde se concentra la información. Comúnmente a dicho nodo suelen nombrarlo como maestro y al resto de dispositivos que se vinculan a él como esclavos. Si se contrasta esta situación con el protocolo detallado anteriormente, en donde cada usuario de la red hacia acceso cuando deseaba transmitir y había disponibilidad del canal. Para este caso sucede que si los usuarios desean transmitir, primero deben esperar una consulta del maestro y obtener permiso del mismo para poder hacer acceso al medio, por lo que puede suceder que si el maestro no consulta a todos los esclavos, pueden quedar usuarios de la red sin posibilidad de transmisión.

También puede suceder que si la cantidad de nodos esclavos crece exponencialmente (COVID), el maestro tarda mucho más en sondear todo el grupo de usuarios para saber quien quiere hablar. Debería ir uno por uno y le tomaría muchísimo tiempo, lo que se traduce en una frecuencia de transmisión para los usuarios muy muy baja. Además, si dentro de tal grupo, son pocos los nodos/usuarios que tienen deseo de transmitir, el maestro debe consultar a cada uno, ya que no puede identificar a priori cual de todas las estaciones quiere hablar y debe de encontrarla. Es por esta razón, que surge un método de búsqueda alternativo, denominado “Búsqueda por árbol”. A cada estación o nodo esclavo se lo identifica con un ID binario de una determinada cantidad de dígitos y el maestro genera un mensaje broadcast (para todos) consultando quién quiere transmitir. Las estaciones esclavas que tienen información pendiente de enviar, al interpretar la consulta, le hacen llegar al nodo maestro el primer bit del ID. El maestro emplea un método para seleccionar el primer bit de ID de la estación a la cual posteriormente le dará lugar a transmitir y se lo comunica nuevamente a las estaciones esclavas. Ellas al conocer la decisión del maestro, si notan que no se ha elegido su primer bit de ID se retiran de la competencia por el acceso al canal y el resto de estaciones quedan pendiente a la siguiente consulta del maestro, el cual les hará saber cual es el segundo bit del ID de los esclavos que quieren transmitir. Los que superaron la primera fase, al detectar la consulta, envían su segundo bit de ID y el maestro repite el procedimiento, hasta que determina todos los bit de ID de la estación ganadora. Entonces ¿Cuál es la ventaja de este método? Que para determinar cuál estación quiere transmitir realiza muchas menos consultas, es más, por cada consulta elimina la mitad de los posibles candidatos a transmitir.

Ejemplo: De un grupo de 16 quieren hablar 2 solamente. Si empleamos un método de búsqueda de polling convencional para que transmitan 2 estaciones se requiere 16 consultas. Pero aplicando una búsqueda por árbol se requieren solamente 4 consultas por estación ganadora y como son 2 las que van a transmitir, hay 8 consultas totales.

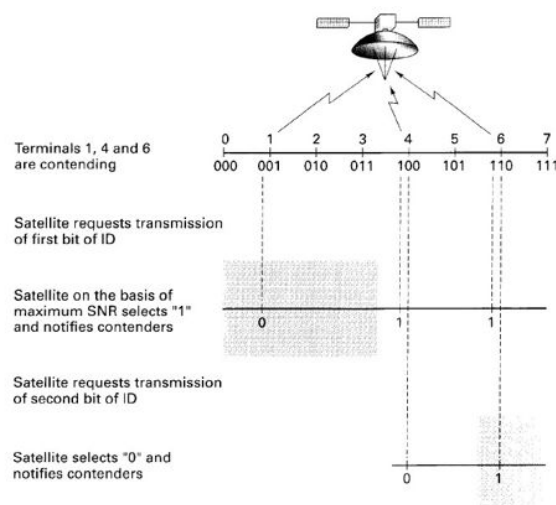


Figure 11.25 Tree search to resolve contention (eight terminal example).

### Acceso Aleatorio - ALOHA puro

Siguiendo con la lógica del cuadro donde se exponen los protocolos MAC, se encuentra la categoría de Acceso Aleatorio. Este tipo de protocolos tienen por lo general algoritmos MAA distribuidos, lo cual significa que todas las estaciones transmisoras se hacen cargo de las transmisiones que realizan, por lo que no necesitan solicitudes previas de acceso al canal, haciendo que en el momento que desean transmitir, acceden directamente al mismo. Esto trae una gran desventaja, ya que puede producirse interferencias entre dos o más usuarios ¿Qué significa? Que en el instante de tiempo que un usuario quiere hacer uso del canal, otros usuarios también, entonces los paquetes colisionan y llegan a destino rotos. Las estaciones receptoras de dichos paquetes rotos, se dan cuenta precisamente por un método de chequeo de redundancia cíclica y detectan errores, entonces devuelven NAK. Sin embargo, estos paquetes también pueden llegar a colisionar con otros paquetes transmitidos o ACK (confirmación de recepción) o con retransmisiones, en definitiva un descontrol. Por eso las estaciones transmisoras, si no reciben un ACK asociado a su paquete enviado, cuando se vence un timer aleatorio realizan retransmisiones, lo cual implica un buffereo previo de los paquetes transmitidos. ¿Por qué toda esta explicación? porque si bien la parte del MAA para la transmisión es sencillo y no hay mucha lógica en el acceso de los usuarios, es decir, se entiende como descontrolado porque es aleatorio a cada uno, cuando se producen colisiones si hay un determinado orden. Esto se debe a que cada estación transmisora, para el caso de las colisiones plantea un MAA un poco más complejo para definir en qué momentos se realizan las retransmisiones e intentar ordenar el flujo de información. A este protocolo se lo conoce con el nombre de ALOHA y si bien todo el funcionamiento básico fue explicado anteriormente, puede resumirse para cada estación transmisora sus modos de funcionamiento en 4 instancias:

- *Modo transmisión*: El usuario intentara hacer uso instantáneamente del canal al tener datos para transmitir, adicionando un preámbulo propio para detección de error
- *Modo de escucha*: Es el momento en donde él luego de una transmisión espera un ACK que de aviso de una buena transmisión o en caso contrario un NAK.
- *Modo de retransmisión*: Si se diera el caso de recibir un NAK el usuario reenviará el paquete al cumplirse el tiempo aleatorio de espera.
- *Modo Timeout*: Puede suceder que el usuario no reciba ningún aviso, ya sea ACK o NAK, es por esta razón que al realizar una transmisión activa un timer propio en donde dado el caso de que se llegue al valor esperado, se realiza una retransmisión.

Entonces, ¿Es un protocolo eficiente en el uso del recurso o no? Para dar respuesta a esta pregunta primero debe de realizarse un modelado del tráfico que se hace presente en la red, lo que permite conocer estadísticamente cuál es la probabilidad de éxito que posee cada estación transmisora. Esto implica un análisis asociado a la fuente de información, entonces conociendo cómo se comporta la generación de

información y sabiendo que cuando se generan nuevos datos los usuarios directamente transmiten, se puede lograr un análisis asociado a las colisiones, retransmisiones y transmisiones exitosas para así determinar la eficiencia de este protocolo MAC.

Al igual que en las centrales telefónicas, lo que se buscaba en este tipo de red, es entender cuando se generaban nuevos datos. Así que había que estar todo el tiempo observando una determinada fuente de información y anotar los momentos en los que se hacía presente un nuevo dato a transmitir. Lo interesante de este tipo de análisis no era precisamente la cantidad de paquetes que se generaban en promedio por segundo, minuto, hora o día, ya que si bien era una variable aleatoria no permitía determinar fielmente la capacidad de la red.

Al pensar dos segundos, si se dice que la cantidad de llamadas promedio en un día para una central telefónica son 8000 llamadas/día ¿se satura la red? ¿Colapsa la central? Que colapse la central implica que en un determinado instante de tiempo están todos los canales ocupados por llamadas cursadas y se intenta ingresar una nueva llamada. Esta última es rebotada, porque la central no tiene los medios suficientes en ese momento para atenderla. Es decir, que el problema no está en la cantidad, puede haber un montón de llamadas en un día, pero si son cortitas y espaciadas, la central no va a tener problemas. Entonces la cantidad promedio de llamadas por día puede ser una variable aleatoria capciosa para el modelado del tráfico de una red telefónica. Es más, si se dice que el 25 de diciembre la cantidad de llamadas por día es 1.000.000 no implica que la red esté saturada en todo momento, porque quizás el mayor volumen de tráfico se encuentre en las primeras horas de la madrugada. Entonces, no se debe modelar la capacidad de la red siguiendo dicha variable aleatoria (valor promedio de llamadas).

Todo esto es para decir que lo que realmente sirve en el modelado del tráfico de una central telefónica es:

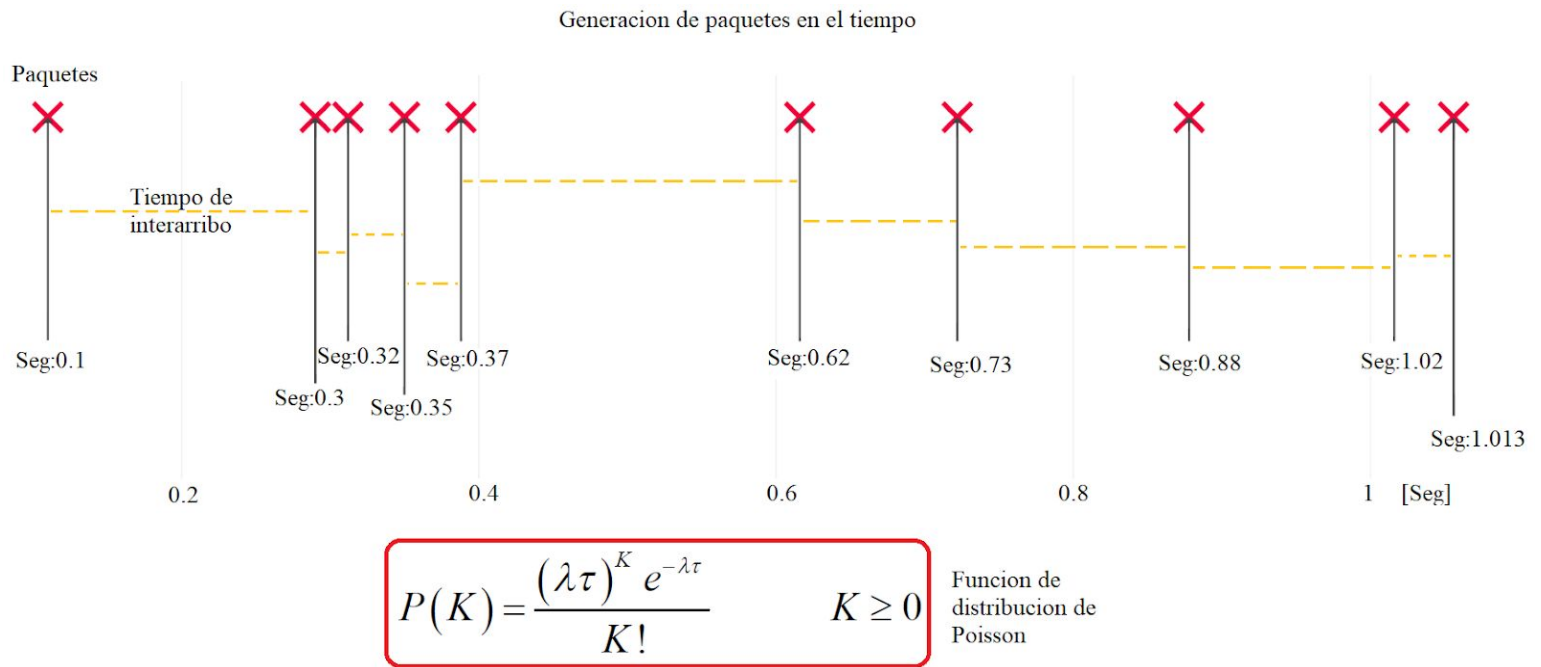
→ La variable aleatoria que representa el interrarribo de las llamadas.

→ La variable aleatoria que representa el tamaño de las llamadas cursadas.

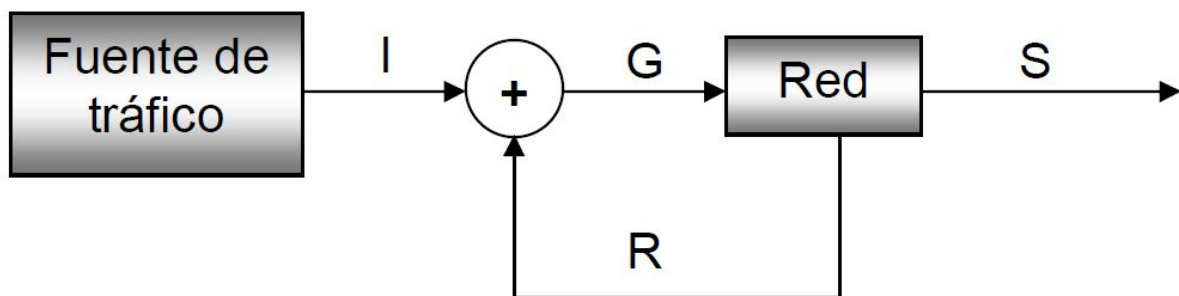
Estas dos variables son fundamentales para analizar la capacidad de la red y se las tiene en cuenta porque las redes de paquetes siguen los mismos comportamientos que las redes telefónicas.

Se ha demostrado que la variable aleatoria que representa el interarribo de las llamadas o paquetes sigue una distribución de Poisson y la variable aleatoria que representa el tamaño sigue una distribución exponencial. Ambas, para redes telefónicas constituye la unidad de medida ERLANG, pero en el caso de redes de paquetes como ALOHA se considera solo la variable aleatoria que representa el interarribo de paquetes y se establece fijo el tamaño de los mismos para simplificar el análisis y por lo tanto el protocolo de acceso.





Planteado el escenario de análisis, se puede considerar que tanto el tráfico ofrecido ó total (G), tráfico ofrecido por la fuente (I), tráfico cursado exitosamente (S) y tráfico retransmitido (R) siguen una distribución de poisson, donde cada una tiene una tasa de ocurrencia de eventos  $\lambda$  en función del tiempo, la cual permanece constante. Esto resulta como consecuencia del modelado de la fuente. Además, se considera que los equipos no forman colas de paquetes, ya que el tiempo medio entre paquetes consecutivos emitidos para una misma estación base es mucho mayor que el tiempo necesario para la transmisión de un paquete exitoso.



Dentro de los conceptos antes mencionados hay uno en particular que resulta de interés. El modelado de la fuente, porque en primer lugar permite pensar al tráfico total ofrecido (G) como suma de dos tráficos (Información (I) y Retransmisión (R)) de tal forma que  $G = I + R$  y en segundo lugar, como todas siguen una distribución de Poisson, se puede aplicar una propiedad importante de este tipo de procesos.

La suma de variables de Poisson independientes resulta en una nueva variable que también es de Poisson. Más en general, una variable aleatoria de Poisson  $G \sim P(\lambda)$  puede considerarse como una suma de  $n$  variables de Poisson independientes de la forma:

$$X_1 + \dots + X_n \sim P(\lambda) \text{ y cada } X_i \sim P(\lambda/n)$$

Lo cual permite pensar la tasa de arribo de paquetes totales de la siguiente forma:

$$\lambda_G = \lambda_I + \lambda_R$$

Suponiendo que la longitud de los paquetes es de  $b$  (bits/paquete) se puede plantear otras expresiones definida como Tráfico. De manera que:

**I:** Tráfico ofrecido por la fuente del tipo poissoniana ( $I: \lambda_I * b$ )

**G:** Tráfico ofrecido a la red o carga ofrecida, compuesto por los nuevos paquetes transmitidos y los retransmitidos ( $G: \lambda_G * b$ )

**R:** Tráfico de retransmisiones de paquetes ( $R: \lambda_R * b$ )

**S:** Tráfico ofrecido por el sistema o throughput. Son el número de paquetes por intervalo de tiempo que son correctamente transmitidos ( $S: \lambda_S * b$ )

Sin embargo, dichas expresiones pueden ser normalizadas respecto a  $R$  (bits/seg) que resulta ser la capacidad del canal y además es la tasa que utilizarán las estaciones para inyectar sus paquetes en el mismo. De esta forma, se obtiene el tráfico normalizado que resulta ser adimensional. En el caso particular del tráfico total ( $G$ ) se obtiene:

$$G = \frac{\lambda_G \cdot b}{R}$$

Al analizar la última expresión, se encuentra que está presente una nueva variable denominada “ tiempo de transmisión”, definida como “  $\tau$  ” :

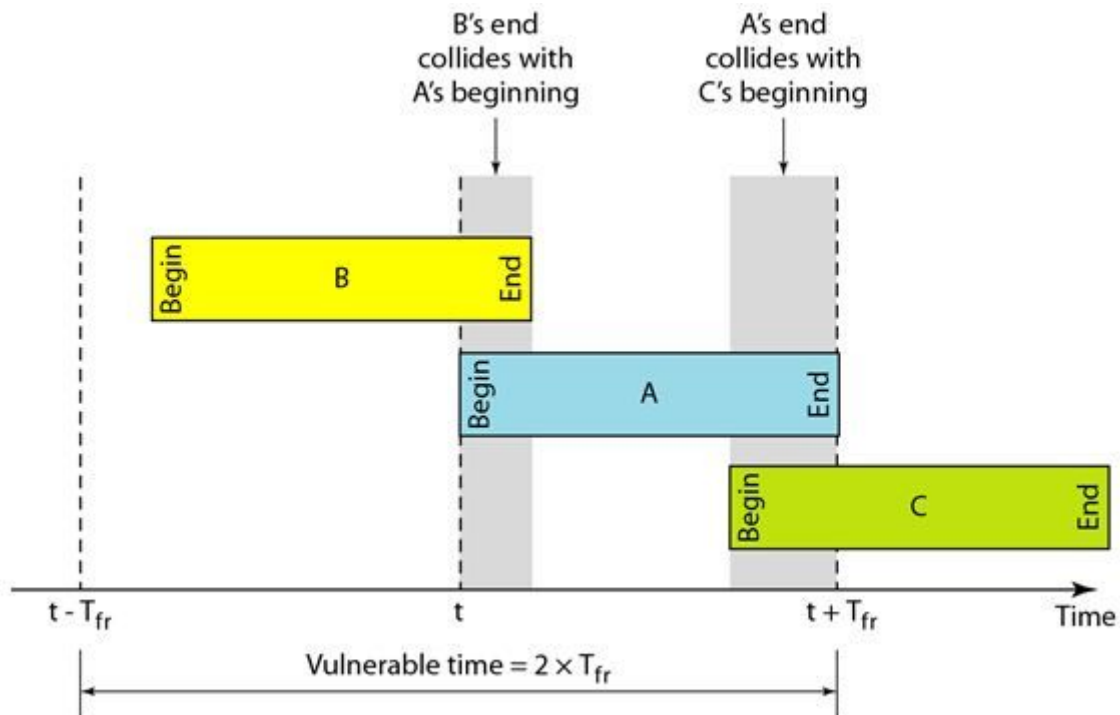
$$\frac{b[\text{bits/paq}]}{R [\text{bits/seg}]} = \tau [\text{seg/paq}]$$

Entonces el tráfico normalizado puede ser expresado en función de la tasa de ocurrencia de eventos por unidad de tiempo “ $\lambda$ ” y la tasa de transmisión de paquetes por unidad de tiempo “  $\tau$  ”.

$$G = \lambda_G \cdot \tau$$

Una vez definidas todas estas variables ¿Cuándo será exitosa una transmisión? Cada usuario podrá transmitir exitosamente un paquete cuando el canal está desocupado “  $\tau$  ” segundos antes de transmitir y “  $\tau$  ” segundos después de que el

usuario comience a transmitir. Esto permite mantener un intervalo de tiempo suficientemente largo “ $2\tau$ ” para evitar cualquier tipo de colisión.



Pero ¿qué tan probable es esta situación? Es decir, cuando una estación base quiere transmitir ¿Qué probabilidad hay que en un intervalo de tiempo comprendido por  $2\tau$  no haya ningún tipo de arribo? Para dar respuestas a dichas preguntas debe utilizarse los conceptos desarrollados por Poisson.

En el sistema ALOHA los usuarios no analizan si hay otros transmitiendo, entonces la probabilidad de que no haya colisiones está asociada a  $K=0$  para un intervalo de tiempo  $t=2\tau$  y una tasa de ocurrencia de eventos  $\lambda = \lambda_G$ .

$$P(K) = \frac{(\lambda\tau)^K e^{-\lambda\tau}}{K!} \quad K \geq 0$$

$$P_s = P(K = 0) = \frac{(2\tau\lambda_G)^0 e^{-2\tau\lambda_G}}{0!} = e^{-2\tau\lambda_G}$$

Esta probabilidad puede entenderse como probabilidad de éxito y también puede ser expresada como cocientes de las tasas de ocurrencias de las diferentes fuentes.

La probabilidad de éxito como concepto es el cociente entre la cantidad de casos favorables (transmisiones exitosas) y la cantidad de casos totales (transmisiones totales) pero en ALOHA hay que considerar el intervalo de tiempo en el cual se produjeron, resultando en cantidad de transmisiones exitosas dividido cantidad de transmisiones totales en una determinada unidad de tiempo.

$$P_s = \frac{\lambda_s}{\lambda_G}$$

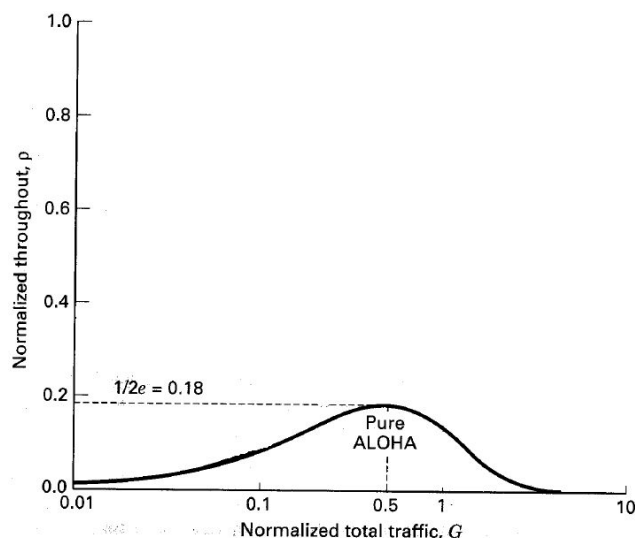
$$\lambda_s = P_s \lambda_G$$

$$\lambda_s = e^{-2\tau\lambda_G} \cdot \lambda_G$$

A partir de esta última ecuación es que se puede expresar la relación que existe entre ambos tráficos normalizados.

$$\rho = G * e^{-2G}$$

Al variar la carga de tráfico generada por los diferentes usuarios (I) se producen variaciones prácticamente inmediatas en el tráfico ofrecido (G) ya que puede aumentar la carga útil y/o aumentar las colisiones. Estos efectos sobre la red, en un principio producen incrementos prácticamente lineales del throughput mientras G sea pequeña, pero si se incrementa cada vez más, ocurrirán más colisiones, entonces el throughput tendrá incrementos muchos más lentos. Esta situación comienza a ser crítica y alcanza un valor máximo cuando el tráfico total normalizado es de 0.5. ¿Qué significa esto para el sistema? Que de acuerdo a la ecuación  $G = \lambda_G \cdot \tau$  se generan nuevos arribos al canal a una tasa  $\lambda_G = \frac{1}{2} * \frac{1}{\tau}$  [paquetes/seg]. El tráfico total es la mitad de la capacidad del canal ( $\tau$ ).



Con dicho valor, el throughput normalizado es 0.18, lo que significa que el flujo de información que cada usuario percibe en el canal tiene una tasa mucho menor, en particular 0,18.R.

Es más, si se desea que cada usuario experimente una tasa de transmisión de aproximadamente R se necesita un canal 5 veces más grande en capacidad, porque cada usuario experimenta un 0.18 de la capacidad, haciendo que de esta manera llegue a 0.9 del R original.

Matemáticamente hablando, la forma de encontrar los valores máximo de G y p es igualando la primer derivada de la ecuación del throughput a cero. Ya que a partir de valores de G mayores, el throughput comenzará a disminuir a causa de las colisiones entre paquetes.

$$\begin{aligned}\frac{dp}{dG} &= 0 = e^{-2G} + G * (-2) * e^{-2G} \\ 0 &= e^{-2G} - 2G * e^{-2G} \\ G &= \frac{e^{-2G}}{2 * e^{-2G}} = \frac{1}{2} \\ \rho &= \frac{1}{2} * e^{-2 \cdot \frac{1}{2}} = 0.18\end{aligned}$$

Como se ha detallado, este protocolo desaprovecha muchísimo las capacidades del canal, ya que obtiene como máximo un throughput del 18% del total que puede brindar el canal. Es por esta razón, que se han planteado otros tipos de métodos de acceso partiendo desde ALOHA puro pero con la finalidad de optimizar su rendimiento con respecto a las colisiones.

### Acceso Aleatorio - ALOHA ranurado

El protocolo de acceso múltiple ALOHA ranurado tiene como finalidad brindar un método más efectivo para aumentar el throughput del sistema y por lo tanto disminuir la cantidad de colisiones que se generaban en ALOHA puro. En él, se propone la implementación de un pulso de sincronismo periódico cada  $\tau$  segundos que le proporciona a cada una de las estaciones base el momento de acceso al medio. ¿El pulso de sincronismo afecta la capacidad del canal? NO, porque se asume que el ancho del pulso es demasiado pequeño para afectar el uso del canal pero no tanto para que las estaciones puedan detectarlo. En definitiva, con esta técnica, las colisiones se reducen a un intervalo de tiempo de  $\tau$  segundos a diferencia de ALOHA puro donde era el doble. Como las transmisiones sólo pueden efectuarse en las ranuras de tiempo marcadas por el pulso de sincronismo, todas las estaciones pueden colisionar solamente en las ranuras, garantizando que aquellos usuarios que pudieron acceder al medio tengan una transmisión exitosa. Por lo que en ALOHA ranurado, hablando mal y pronto, si entraste significa que pudiste transmitir exitosamente.

Para este sistema, la probabilidad de éxito de una estación transmisora es:

$$P_s = P(K=0) = \frac{(\lambda_G \tau)^0 e^{-\tau \lambda_G}}{0!}$$

$$P_s = e^{-\tau \lambda_G} \quad \text{ó} \quad P_s = e^{-G}$$

Asociando la probabilidad de éxito con el cociente de tasas y posteriormente normalizando, se puede obtener que:

$$\rho = G * e^{-G}$$

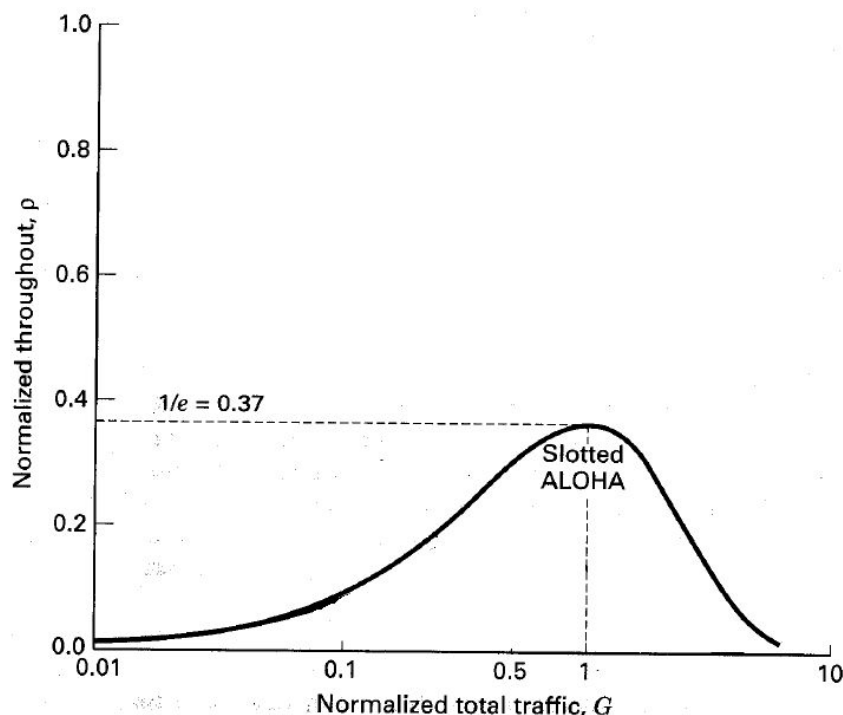
De igual manera que se obtuvieron los valores máximos de  $G$  y  $\rho$  para ALOHA puro se procede para ALOHA ranurado.

$$\frac{d\rho}{dG} = 0 = e^{-G} + G * (-1) * e^{-G}$$

$$0 = e^{-G} - G * e^{-G}$$

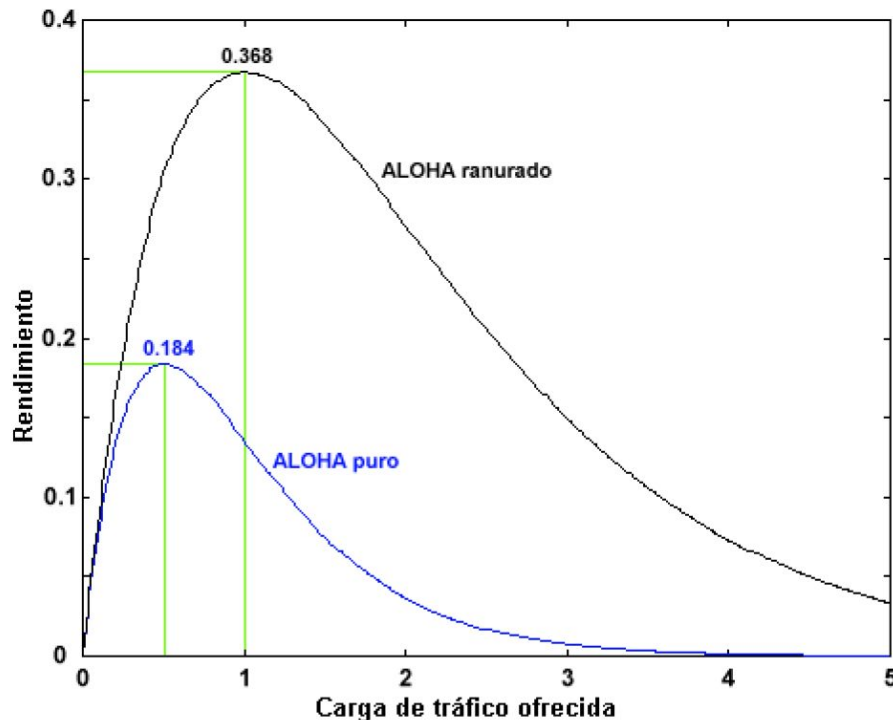
$$G = \frac{e^{-G}}{e^{-G}} = 1$$

$$\rho = 1 * e^{-1} = 0.37$$



Al comparar las gráficas de throughput versus tráfico total normalizado para ambos métodos de acceso, puede evidenciarse las mejoras en cuanto a rendimiento que introduce ALOHA ranurado respecto a ALOHA puro. Este último permite un 18% de

aprovechamiento del canal por parte de cada usuario, mientras que Aloha ranurado permite un aprovechamiento del 36% del canal por usuario.



De momento se ha visto cómo mediante la implementación de ranuras para el uso y envío de paquetes por el canal, por parte de los usuarios, se ha obtenido un aumento de aproximadamente el doble de rendimiento con igual aumento para la carga de tráfico ofrecida. Esta implementación limitó los posibles momentos de colisión a solamente las ranuras y es mediante esta manera de implementación que surge una 3er forma de ALOHA que implementa ranuras pero diferenciando los momentos para pedir enviar paquetes por el canal y para pedir hacer uso del canal, siendo esta última en donde se pueden encontrar las posibles colisiones, en caso de suceder.

### Acceso Híbrido - ALOHA reservado

Como se mencionó anteriormente, se tratara un último caso de ALOHA el cual utiliza una estructura de trama basado en ranuras donde es posible distinguir 2 situaciones distintas, una para solicitar el uso del canal y otra para enviar paquetes a través del mismo. Para el caso de las peticiones, se realiza una subdivisión mayor de las ranuras para permitir las reservas de varios usuarios dentro de un time slot. Estas reservas utilizan un protocolo de acceso aleatorio ALOHA ranurado con un tamaño de paquete muy pequeño. Si los requerimientos de servicio resultan ser efectivos para un usuario (su solicitud no colisionó con otra) el sistema tomará el pedido, asignará y reservará los time slot necesarios para la transmisión del usuario y finalmente se le informará mediante un paquete ACK. Con esta idea en mente es

que se definen los *modos reservados* y el *modo no reservable*, en donde sus características son:

Modo no reservable o estado inmóvil:

- El tiempo de trama (slot) es establecido y subdividido (subslots) en pequeños slot de reservación
- El usuario solo puede solicitar reserva de slot para uso del canal en estos subslots.
- Después de la solicitud de reserva el usuario debe de esperar un ACK de confirmación y la asignación de los slots en modo reservado para la transmisión.

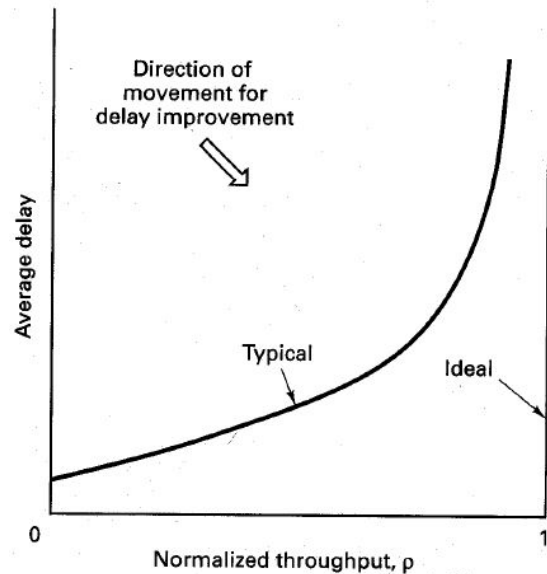
Modo reservado:

- El tiempo de trama es dividida en " $M+1$ " slots siempre que se produzca una reserva.
- Los primeros " $M$ " slots serán los que contienen los mensajes.
- El " $+1$ " es el slot que corresponde al Modo no reservable y es en donde se realizan las reservas y respuestas.
- Los usuarios solo envían mensajes en los " $M$ " slots asignados.

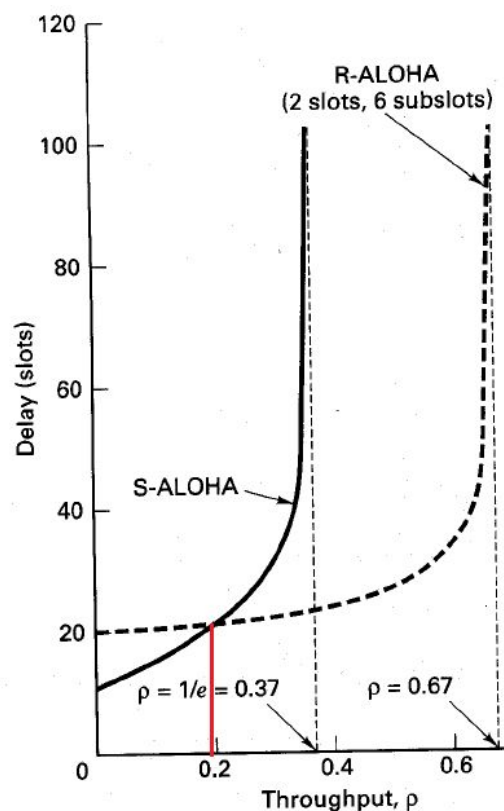
Con respecto a la performance no puede considerarse el mismo análisis que se hizo con ALOHA puro y con ALOHA ranurado, ya que este método de acceso pertenece a la clase "Acceso híbrido" (Acceso aleatorio con reserva). Esto implica que las únicas colisiones existentes están relacionadas con las reservas de las estaciones. Por lo tanto, lo interesante es el retardo promedio de transmisión, ya que dependerá de la capacidad de éxito de una estación para reservar un slot.

Para obtener las gráficas se analiza al retardo promedio o delay con respecto al throughput normalizado. Se esperaría, en lo ideal, que no exista delay mientras el throughput es menor a 1 pero esto en la realidad no sucede, siendo las gráficas comparativas:





Si se compara (R-ALOHA) frente a (S-ALOHA), ya que es una modificación de este último. Se podrá observar como Aloha con Reserva alcanza un mayor throughput, siendo cercano al 0.67 mientras que para el Aloha con Ranura solo se puede obtener como máximo un 0.37 de  $p$ . Dada la situación de que el tráfico sea bajo, sucederá en los inicios que Aloha con Ranura tiene un mayor throughput debido a que los usuarios para enviar paquetes solo deben de esperar a una ranura. Mientras que en Aloha con Reserva, siempre que se desee enviar se debe primero realizar la petición de envío y luego poder realizar el envío, generando un delay inicial mayor que en Aloha Ranurado.

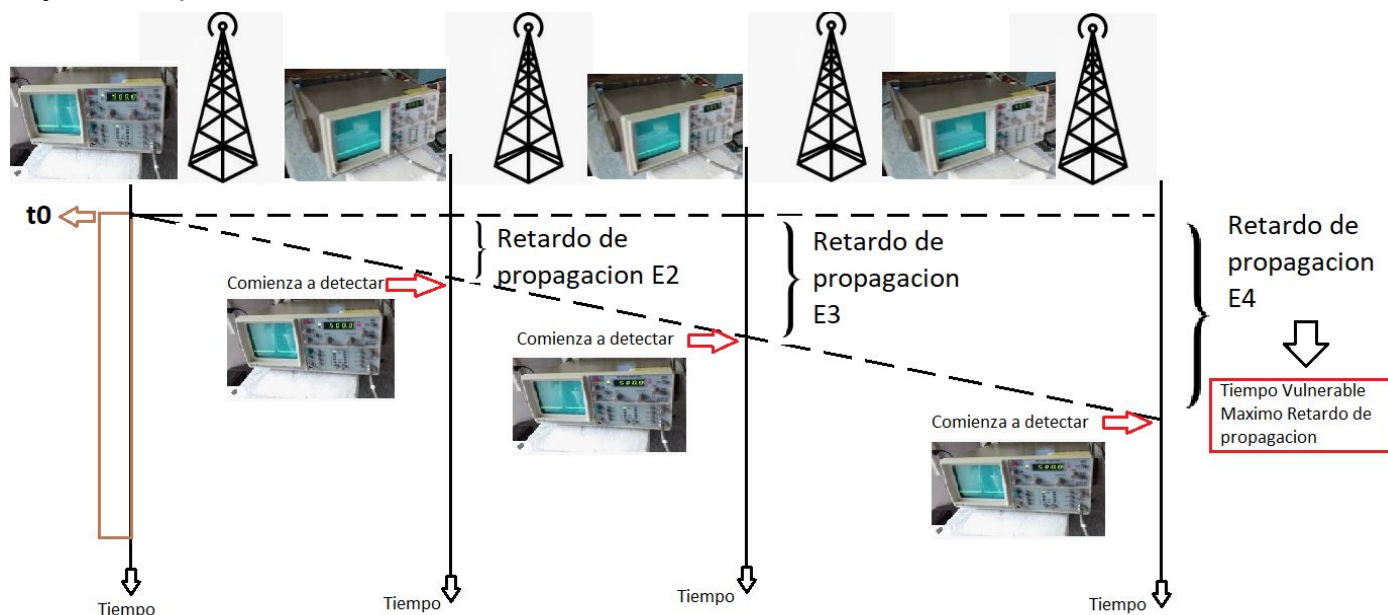


### Acceso Aleatorio - CSMA

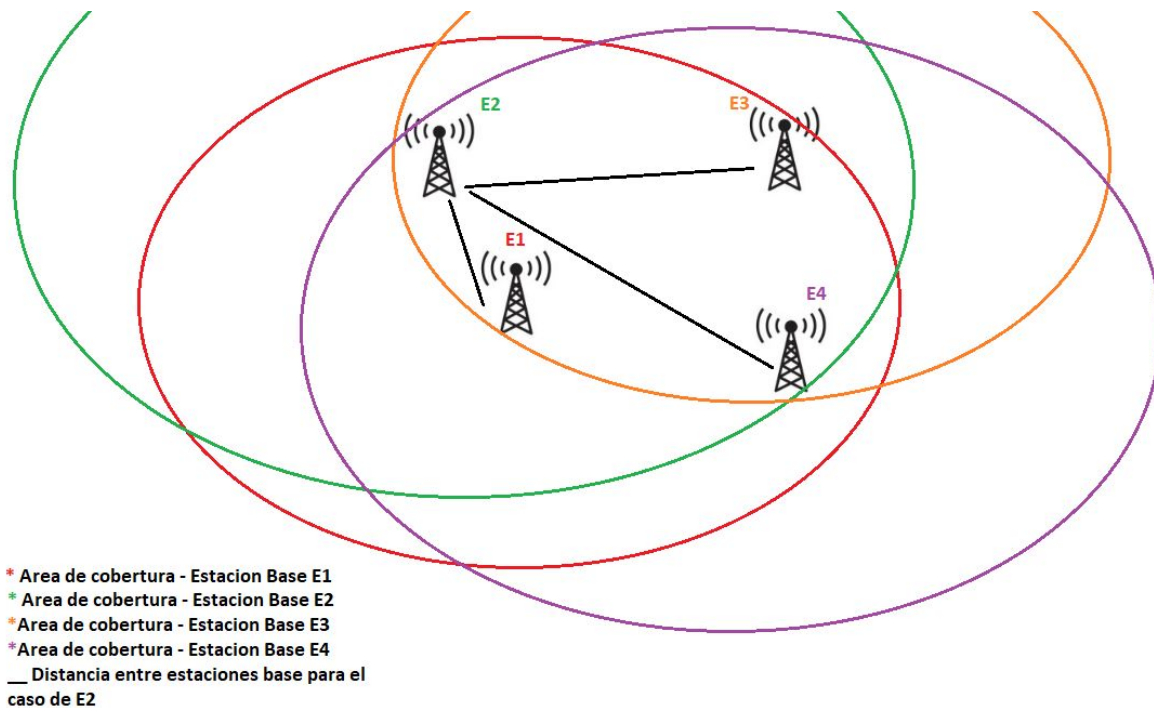
El protocolo de acceso aleatorio CSMA (*Carrier Sense Multiple Access*) permite a una estación realizar una escucha del canal para asegurarse de que el medio está libre antes de transmitir información. En el caso de que lo esté, realiza la transmisión, y, en caso contrario, espera un tiempo aleatorio definido como backoff para luego volver a sensar y repetir el procedimiento.

Este protocolo de acceso tiene sentido en toda aquella topología de red donde todos los usuarios tengan la capacidad de escucharse el uno al otro y en donde el retardo de propagación sea pequeño. Esto permite disminuir la probabilidad de colisión y aumentar la utilidad del canal si los usuarios escuchan antes de transmitir para detectar la presencia de otros usuarios.

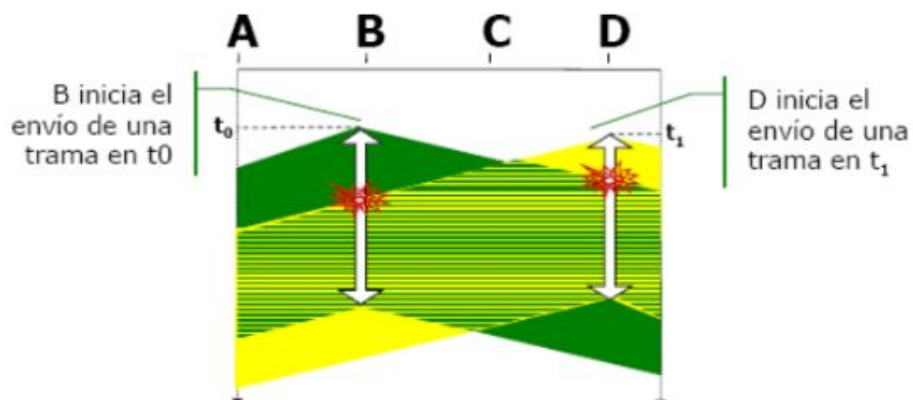
Si todos los usuarios escuchan en el canal antes de transmitir ¿Por qué hay colisiones? porque por un lado, puede darse el caso de que dos o más usuarios quieran realizar transmisiones en el mismo instante de tiempo al percibir el canal desocupado y por otro lado, también puede ocurrir por cuestiones asociadas al retardo de propagación. Pero...¿no era que se lo iba a considerar suficientemente pequeño? Si así es, si esta condición se cumple puede garantizarse que las colisiones serán mucho menores, pero en las redes inalámbricas los retardo de propagación tienen un peso importante en los tiempos del sistema y aumentan las probabilidades de que un nodo al querer transmitir no detecte las transmisiones iniciadas por otro nodo, esto ocurre porque los paquetes tardan mucho tiempo en viajar de un punto al otro al haber iniciado la transmisión.



La imagen anterior ilustra la siguiente situación. El sistema está conformado por cuatro estaciones bases que no están igualmente espaciadas una de la otra, pero son capaces de comunicarse entre todas.



Una de las estaciones le enviará a otra (sin importar cual sea el destino, ya que tienen la capacidad de comunicarse entre todas ellas) un paquete de duración  $T$  (color marrón). Idealmente, se esperaría que el retardo de propagación sea nulo o al menos muy pequeño, de tal forma, que todas las estaciones restantes a la que está transmitiendo logren detectar en sus analizadores de espectro energía presente en el canal y se enteren que está ocupado. Sin embargo, en un escenario real, el retardo de propagación será diferente de acuerdo a la distancia entre estaciones base, lo cual generará que las detecciones de la señal transmitida se den en diferentes momentos del tiempo. Si durante dichos intervalos, las estaciones quisieran hacer uso del canal, como no detectan todavía ningún tipo de energía, sacan la conclusión de que el canal no se está utilizando. Si esto ocurre, consideran viable la idea de transmitir generando colisiones. Para que esto no sea así, es necesario superar un tiempo crítico de propagación sin transmisiones adicionales. ¿Cuál es el tiempo crítico? es el intervalo de tiempo máximo necesario para que el paquete llegue de la estación transmisora a la receptora más lejana.

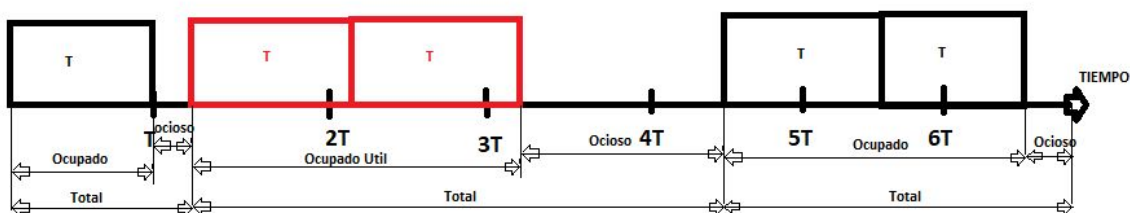


Entonces, ¿Mejora la performance con la utilización de un esquema de acceso múltiple del tipo CSMA? Para analizar dicho parámetro se consideran varios puntos:

- 1 → Una cantidad infinita de fuentes generadoras de información poissonianas que generan en conjunto un tráfico total ofrecido a la red según la tasa  $\lambda_G$  paquetes por segundo (incluyendo retransmisiones)
- 2 → Todos los paquetes tienen el mismo tamaño y su tiempo de transmisión se define como “T”.
- 3 → El retardo máximo de propagación se define como  $\tau$  y su valor normalizado como  $\tau/T$ .
- 4 → Se define al periodo de vulnerabilidad como aquel periodo de tiempo en el cual podrían producirse colisiones: Si una estación comienza a transmitir en  $t_0$ , podría producirse una colisión hasta  $t_0 + \tau$ , es decir, durante el retardo de propagación máximo una vez iniciada la transmisión. El intervalo de vulnerabilidad es  $[t_0, t_0 + \tau]$ .
- 5 → El tiempo puede ser dividido en ciclos, con periodos de “ocupado” y “desocupado”. Obviamente haciendo referencia al estado del canal. De esta forma se calcula el throughput como el cociente entre el tiempo útil (ocupado por el usuario que quiere transmitir) y el tiempo total de un ciclo como valor medio (ocupado + desocupado)

$$\rho = \frac{\text{Ocupado Util}}{\text{Ocupado} + \text{Desocupado}}$$

Las ocupaciones pueden ser útiles o no dependiendo si el usuario logra transmitir información en dicho intervalo de tiempo (región roja en la imagen).



Al analizar el desarrollo del protocolo a lo largo del tiempo es posible entender la ecuación anterior y asociar a cada variable un comportamiento aleatorio. En particular el tiempo desocupado o ocioso puede pensarse como el intervalo de tiempo desde la finalización de una transmisión hasta el comienzo de la siguiente. Desde un punto de vista probabilístico, este concepto está relacionado a cero arribos en un determinado intervalo de tiempo y luego debe hacerse presente al

menos un arribo permitiendo finalizar el periodo ocioso. Matemáticamente, el cálculo de la función de distribución de probabilidad es:

$$F_I(t) = Pr[I \leq t] = 1 - Pr\{I > t\} = e^{-\lambda_G t}$$

Esta variable aleatoria como se puede observar en la ecuación anterior, depende de una exponencial negativa y tiene un valor medio asociado a la tasa de ocurrencia de eventos  $\lambda_G$ .

$$I = \frac{1}{\lambda_G}$$

Otra variable importante de analizar es el tiempo útil ocupado. Esta variable aleatoria puede adquirir solamente dos valores posibles por lo que se considera una variable aleatoria discreta. Puede ser “T” cuando el usuario logra hacerse con el canal (transmisión exitosa) ó cero cuando fracasa. Entonces el valor medio para este tipo de variable es calculada teniendo en cuenta la media aritmética de los valores, es decir la suma de los valores por sus probabilidades (las probabilidades serían las frecuencias relativas).

$$\mu = E(X) = \sum_{i=1}^k x_i \cdot p_i.$$

Como solo existen dos valores posibles en cada experimento aleatorio, la media del tiempo útil ocupado se expresa como:

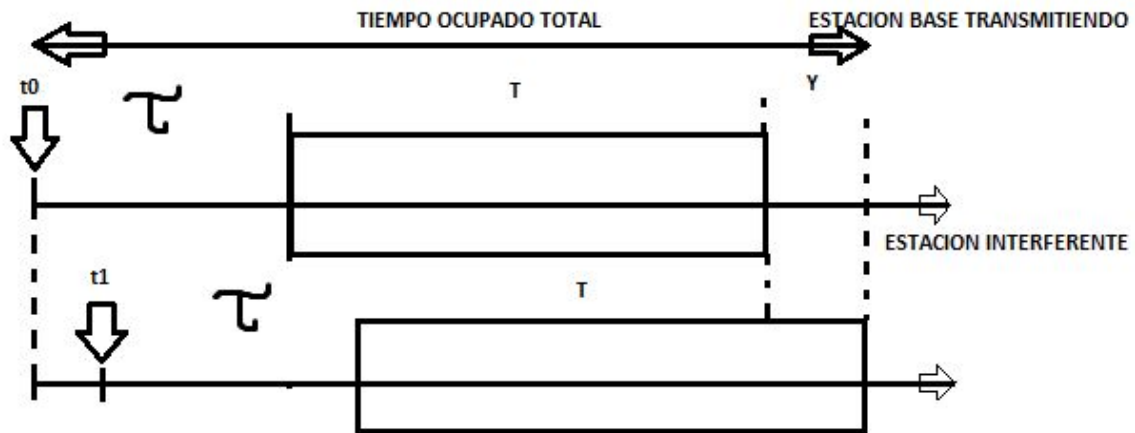
$$U = T * P_{\text{exito}} + 0 * (1 - P_{\text{exito}}) = T * P_{\text{exito}}$$

Donde la probabilidad de éxito se obtiene utilizando el desarrollo de poisson. Se necesitan cero arribos en un intervalo de tiempo  $[0, \tau]$  ó lo que es lo mismo decir  $[t_0, t_0 + \tau]$  teniendo en cuenta una frecuencia de ocurrencia de eventos de  $\lambda_G$ .

$$P_{\text{exito}} = e^{-\lambda_G \tau}$$

$$U = T * e^{-\lambda_G \tau}$$

Para estudiar la variable aleatoria del tiempo ocupado debe modelarse una variable aleatoria auxiliar definida como “Y”. ¿Por qué? Esta variable refleja el tiempo transcurrido desde  $t_0$  hasta la última trama transmitida con algún tipo de interferencia (Trama rota), por lo tanto  $Y < \tau$ . La siguiente imagen ilustra cómo aumenta el tiempo de ocupación del sistema producto de las colisiones.



$$B = T + Y$$

Teniendo en cuenta que  $Y$  implica el tiempo transcurrido entre  $t_0$  (primer usuario que quiso transmitir) y  $t_1$  ó  $t_2$  dependiendo la cantidad de arribos en el intervalo de tiempo, se busca determinar cuál es la probabilidad de que luego que se produce un arribo no deseado, en el restante tiempo hasta alcanzar no se produzca ningún otro arribo más. ¿Por qué todo esto? porque  $Y$  se considera la variable aleatoria que modela el tiempo en el cual arriba la última trama interferente. Si luego hay otra antes de concluir, no sería la última interferencia.

$$F_Y(t) = Pr[Y \leq t] = Pr\{0 \text{ llegadas en } -Y\} = e^{-\lambda_G * (-Y)}$$

Mediante la función de distribución de probabilidad se obtiene la siguiente expresión para el valor medio:

$$\bar{Y} = - \frac{1 - e^{-\lambda_G *}}{\lambda_G}$$

Entonces el tiempo de ocupación total es:

$$B = T + \bar{Y} = T + 2 - \frac{1 - e^{-\lambda_G *}}{\lambda_G}$$

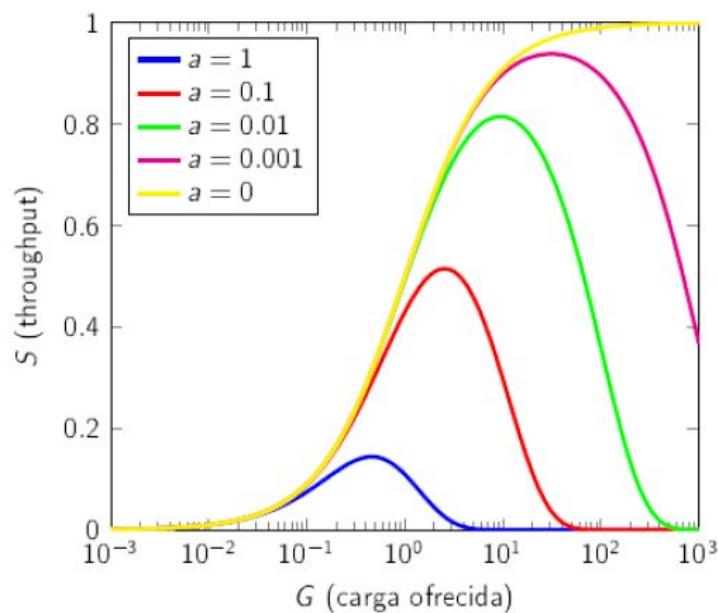
Se llega a la expresión del throughput :

$$S = \frac{U}{B+I} = \frac{\lambda_G * T * e^{-\lambda_G *}}{\lambda_G * T + \lambda_G * + e^{-\lambda_G *}}$$

Recordando la expresión del tráfico total normalizado y del retardo máximo de propagación normalizado al tiempo de transmisión se puede expresar el throughput como:

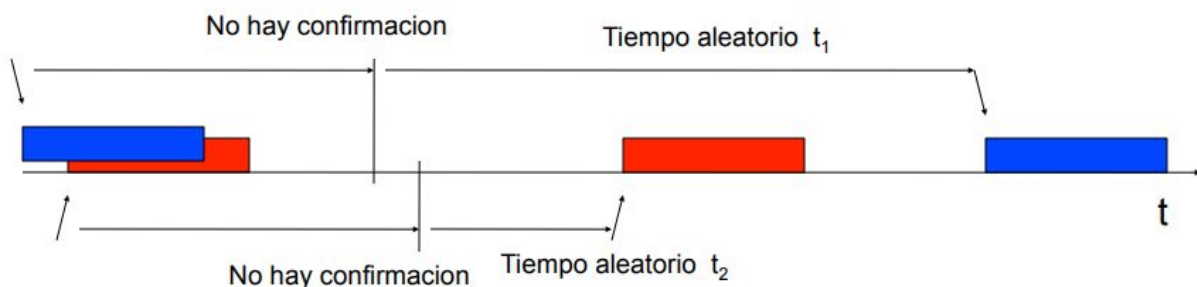
$$\left\{ G = \lambda_G * T; a = \frac{\lambda_G}{T} \right\}$$

$$S = \frac{G * e^{-a * G}}{G + 2aG + e^{-a * G}}$$



Notar que  $\lim_{a \rightarrow 0} S = \frac{G}{1+G}$

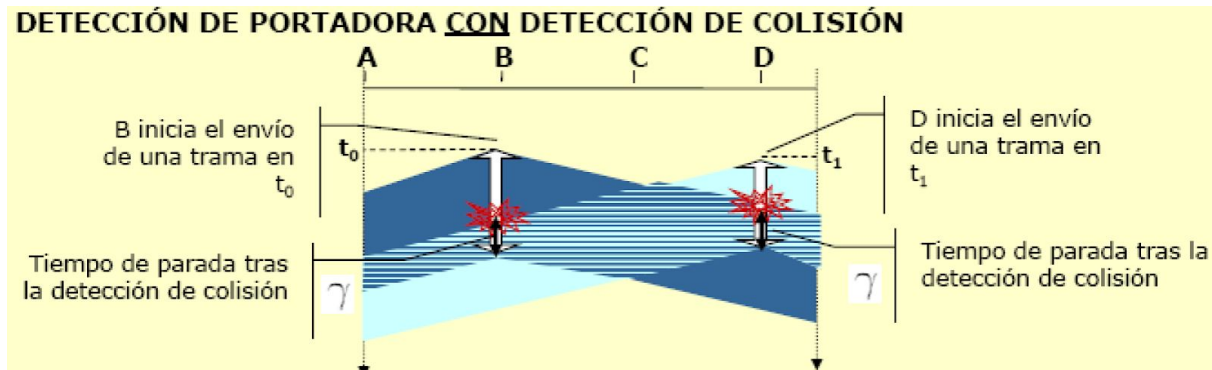
Como ya se ha explicado, CSMA tiene la ventaja por sobre ALOHA en que antes de realizar una transmisión verifica la ausencia de energía en el canal para realizar una transmisión pero se ha visto que existe un tiempo asociado al retardo máximo de transmisión en el cual pueden suceder colisiones, generando que haya transmisión en el canal pero de paquetes colisionados, liberando al canal una vez que estos terminan de transmitirse.



Es por esta razón que surge una variante denominada CSMA/CD que hace referencia a Collision Detection o Detección de Colisión, en donde los terminales, usan los mismos principios que CSMA pero adicionan una escucha mientras



realizan la transmisión, para que en el caso de una colisión por el retardo de transmisión, los terminales dejan de transmitir sus paquetes instantáneamente y liberan al canal en un tiempo  $\gamma$  que es el tiempo de parada de transmisión luego de haber detectado la colisión y en el que tardan en enterarse el resto de las estaciones.



La operación de CSMA/CD se suele comparar al comportamiento de un grupo de personas que conversan en una habitación y que lo hacen respetuosamente. Las estaciones que utilizan la red “hablan” sólo si no hay otra estación transmitiendo (“no se interrumpen” entre sí), y si accidentalmente lo hacen, aguardan un tiempo antes de volver a transmitir, de manera de dar oportunidad de “hablar” a las demás, sin monopolizar el medio.

En el protocolo CSMA/CD, cada estación está conectada a un medio compartido que tenga datos para transmitir, examina o “sensa” continuamente la señal eléctrica básica, o portadora, existente en el medio, esperando un momento en que el medio esté libre. Cuando este momento se produce, la estación emite su trama, escuchando al mismo tiempo continuamente para constatar que lo transmitido sea igual a lo que se recibe (lo cual indica que no ha habido acceso simultáneo de otra estación al medio). Si hubiera un acceso simultáneo, como el medio es compartido, ambas emisiones se corromperían una a otra (ocurriendo una colisión). En caso de colisión, las estaciones que la detectan emiten una señal que informa a todas las estaciones de la red que esta colisión ha ocurrido y que se producirá una recuperación de la colisión. La recuperación consiste en la retransmisión de la trama luego de un tiempo aleatorio.

Si volviera a ocurrir una colisión, el intervalo del cual se extrae el tiempo de demora para retransmitir se duplica. Esta regla se repite tantas veces como haya colisión, hasta un máximo comúnmente igual a 16 veces. Si luego de las 16 veces no se ha podido emitir exitosamente la trama debido a las colisiones, se interpreta que ha ocurrido un error de escritura en la red.

La regla para la elección del tiempo de retransmisión es adaptativa, es decir, permite que este tiempo sea breve para redes poco cargadas, y que se prolongue sólo para redes con mayor cantidad de estaciones.

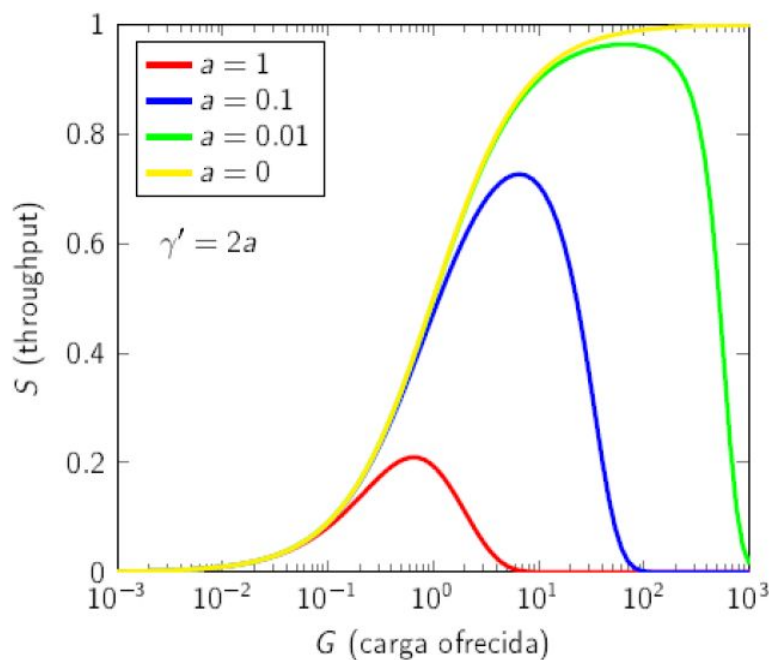


Por último el throughput para este método es:

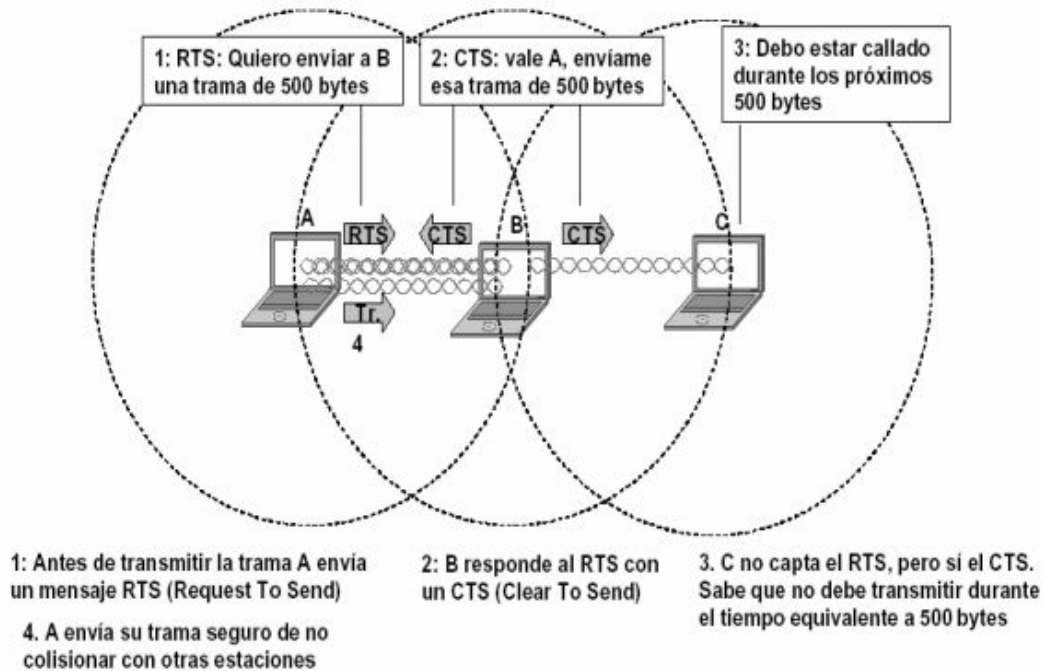
$$S = \frac{\lambda_G * T * e^{-\lambda_G}}{T * \lambda_G * e^{-\lambda_G} + [1 - e^{-\lambda_G} - (\lambda_G * e^{-\lambda_G})]}$$

$$\{ ' = /T \}$$

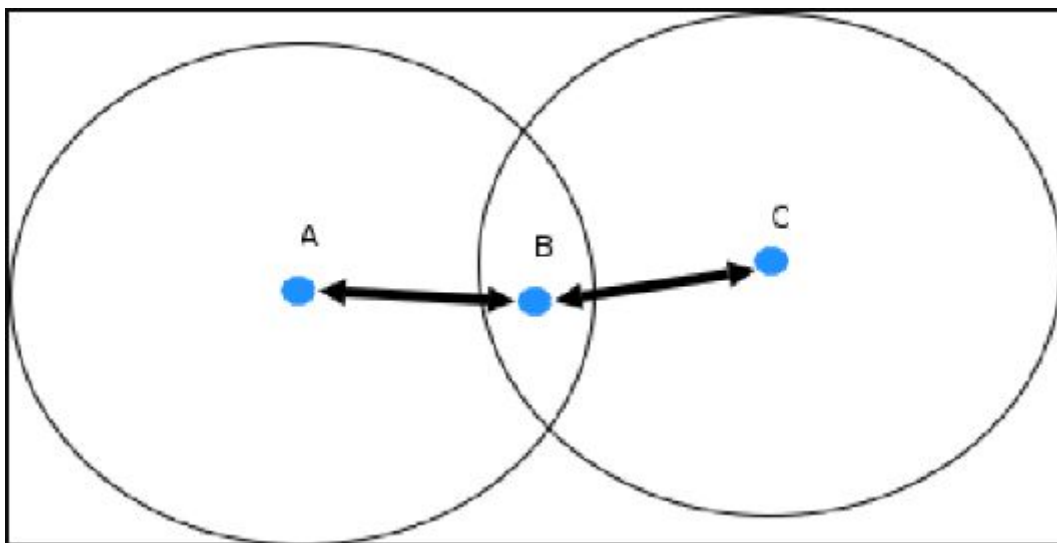
$$S = \frac{G * a * e^{-G * a}}{G * a * e^{-G * a} + [1 - e^{-G * a} - (G * a * e^{-G * a}) + a]}$$

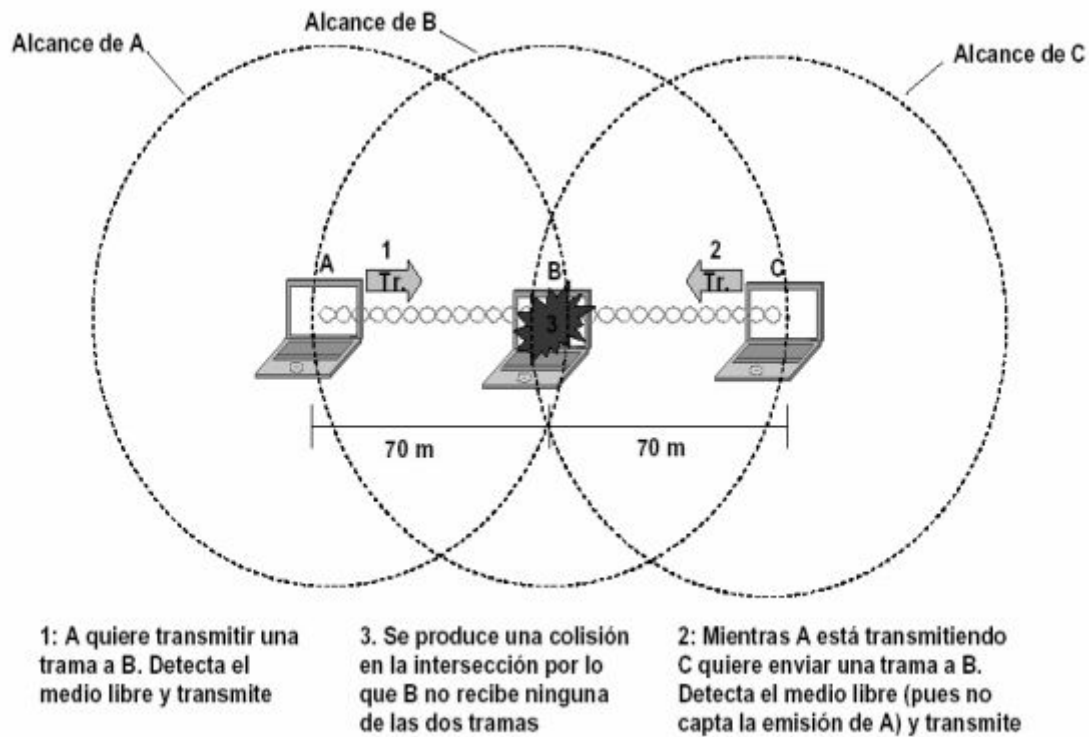


Existe otra variación del protocolo CSMA. Que en lugar de detectar colisiones busca directamente evitarlas. Dicho protocolo recibe el nombre de CSMA/CA. La idea que se esconde tras este protocolo se resume en la oración “very cautious when speaking” (muy precavido al hablar), es decir, se debe comprobar primero si el canal está libre antes de que el nodo piense en una posible transmisión, sin embargo, el envío de datos no empieza directamente ya que las estaciones cuando detectan que el canal está disponible establecen un tiempo aleatorio de espera para seguir verificando y confirmando la disponibilidad del mismo y si resuelto dicho intervalo nadie más se hizo presente en el canal, la estación envían un pequeño paquete al terminal de destino denominado RTS (Request to Send). La estación receptora si esta disponible, le confirma la recepción de dicho paquete mediante otro muy similar definido como CTS (Clear to Send).



Si este procedimiento tiene éxito significa que ya todas las estaciones aledañas a la estación transmisora y receptora saben que las mismas van a estar ocupada durante un determinado intervalo de tiempo y utilizando el canal, entonces dicho par de estaciones que realizaron una especie de handshake mediante el mecanismo RTS/CTS pueden transmitir los datos sin interferencias de terminales ocultos. Pero es la primera vez que se menciona a los terminales ocultos. ¿A que hace referencia? El problema del terminal oculto surge cuando empiezan a emplearse redes inalámbricas. Los nodos en una red inalámbrica tienen un alcance limitado, por lo que puede ocurrir que los miembros de una misma red no se perciban entre sí (en lenguaje técnico, escucharse) al estar ambos en diferentes áreas de alcance.



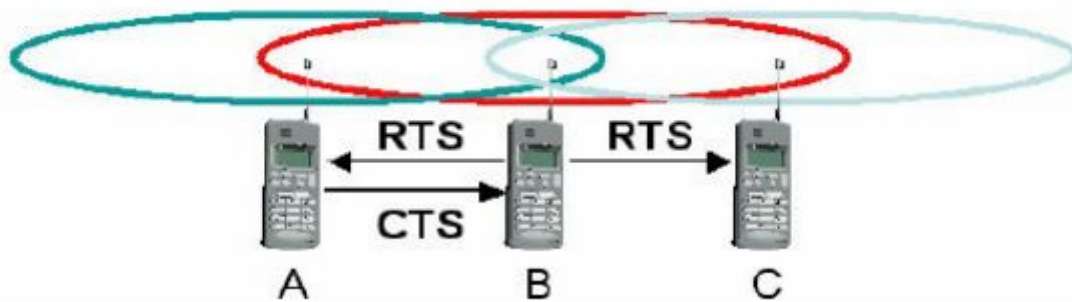


De hecho, es completamente factible que dos nodos que no se escuchan quieran llegar al mismo tiempo a otro situado entre ellos, de tal modo que se realicen transmisiones que corren el riesgo de superponerse en el nodo destinatario y, dado el caso, perderse todos los datos (es decir, colisionan). Además, como ninguno de los emisores son conscientes de que se ha producido una colisión, no vuelven a intentar el envío de los datos, pues asumen que han llegado correctamente. CSMA/CA no puede por sí solo eliminar el problema del nodo oculto, para lo que debe recurrir a un protocolo complementario: RTS/CTS (Request to Send y Clear to Send).

También existen lo que se denominan nodos expuestos. ¿Cuáles son? son aquellas estación que creen que el canal está ocupado, pero en realidad está libre porque el nodo al que oyen que está transmitiendo no le interferiría sobre el destino deseado. ¿Cómo es la situación? Una estación "C" cree que el canal está ocupado por otra estación "B" que está transmitiendo y es a la que está escuchando, pero que, en realidad, no le interferiría para nada porque dicha estación B, que transmite, se está comunicando con otro nodo A que está fuera del radio de cobertura de C. En este caso, la estación C tendría que esperar porque está detectando el canal ocupado. Sin embargo, la espera no sería necesaria debido a que A está fuera del radio de cobertura de C.



En la imagen siguiente, puede verse como mediante el empleo de las tramas RTS y CTS, el problema de los “nodos expuestos” quedaría resuelto.



Como se observa, el terminal B quiere transmitir al terminal A, mientras que C quiere transmitir a otro terminal. Ahora el terminal C no tendría que esperar, porque no puede recibir la trama CTS del terminal A. Es importante concluir y que se entienda que las interferencias o colisiones se dan en los terminales de destino, no importa si dos transmisiones se solapan en determinada área de cobertura, mientras dichas transmisiones no lleguen al mismo destino estaría todo bien.

Un protocolo que resuelve estos inconvenientes de una manera diferente se denomina ISMA.

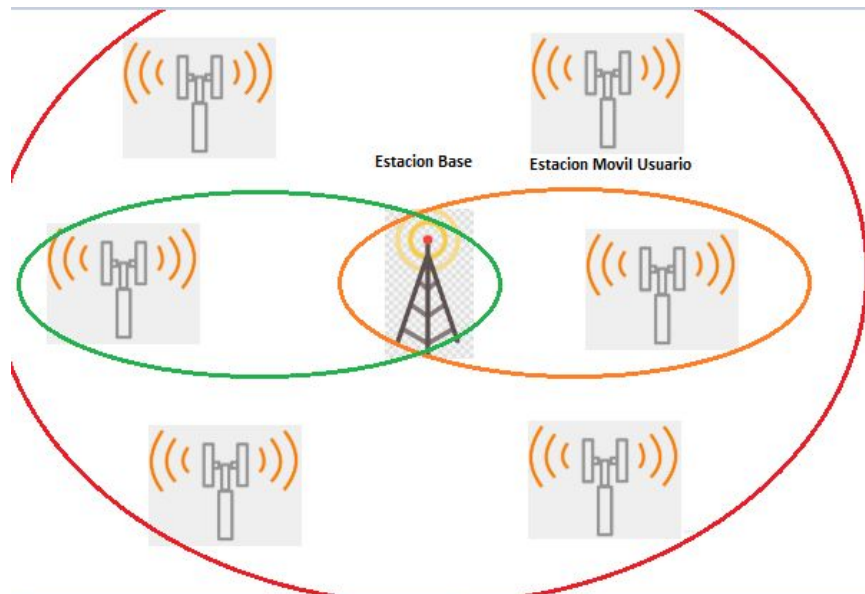
#### Acceso Híbrido - ISMA

El origen del protocolo ISMA - “Inhibit Sense Multiple Access” se encuentra en el denominado CSMA “Carrier Sense Multiple Access” mencionado y explicado en el apartado anterior. Este último planteaba que cada dispositivo debía escuchar el canal de comunicación para determinar si estaba libre u ocupado y posteriormente poder transmitir. El problema principal estaba en la presencia de terminales ocultos y terminales expuestos en redes inalámbricas por lo que resultaba prácticamente inútil. Por dicha razón se realizaban modificaciones (incorporar protocolos auxiliares) para adaptarlo lo mejor posible.

Esta necesidad de garantizar la menor cantidad de colisiones, lleva a que el tiempo de demora para la transmisión de un paquete sea muy grande y el throughput muy pequeño.

ISMA resuelve los inconvenientes de CSMA por medio de la implementación de una estación base que tiene alcance hacia todos los usuarios, en donde todas las

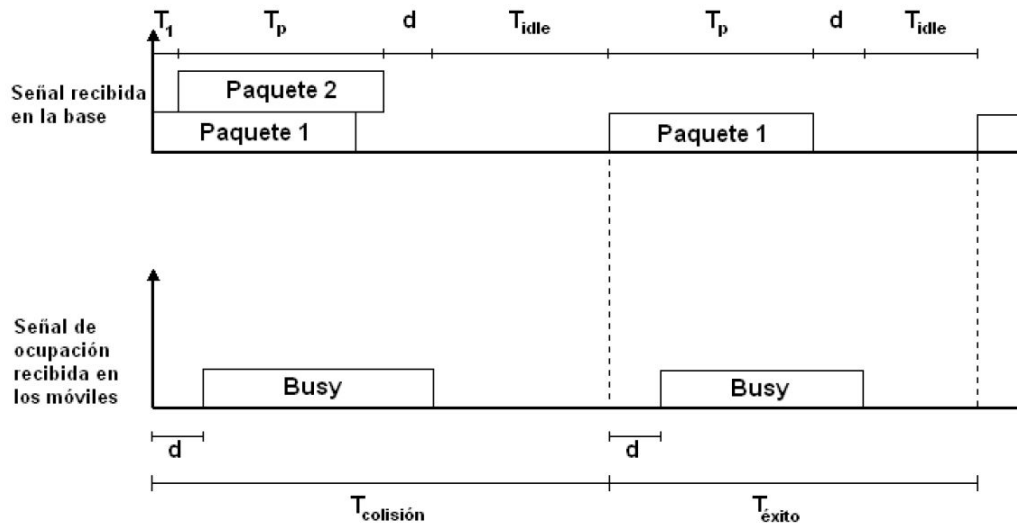
comunicaciones entre dos o más usuarios pasarán por la estación base. Ella controla el acceso aleatorio mediante una señalización en el enlace de bajada, comunicando si un determinado enlace ascendente se encuentra ocupado o no.



Como la tarea de la estación base es ser la comunicadora de la disponibilidad, o no, del canal para las transmisiones de los distintos usuarios o terminales, ocurre un inconveniente denominado tiempo de incertidumbre “d”, el cual se encuentra presente entre el momento que la estación base recibe un paquete de un usuario y hasta que todos los demás terminales quedan avisados por parte de la estación base de que el canal ha sido ocupado. Este tiempo de incertidumbre puede generar colisiones dada la situación de que un segundo terminal comience a transmitir en este tiempo.

En definitiva, “d” es el tiempo de propagación de la señal de ocupado, que viaja desde la estación base hasta los diferentes usuarios.

Teniendo en cuenta todos estos aspectos del protocolo, se plantea el siguiente ejemplo en donde 2 terminales hacen transmisiones en diferentes momentos reflejados en el arribo de paquetes en la estación base (gráfica superior), los tiempos que estos implican y el estado del canal (gráfica inferior):



Un usuario transmite un “paquete 1” que llega en tiempo cero a la estación base, como se ve en la gráfica superior, una vez que el paquete ha sido recibido por la estación esta da aviso de forma inmediata que el canal se encuentra ocupado o “Busy” pero este aviso no llega hasta todos los terminales hasta un tiempo “d” que está asociado con el intervalo de incertidumbre y que se debe al tiempo de propagación. Entre que el usuario 1 ha transmitido y la estación base dio aviso de que el canal estaba ocupado, el usuario 2 ha transmitido un paquete ya que el canal se encontraba disponible en ese momento. Como se puede ver, cada paquete tiene asociado una duración “Tp” que es en referencia a la duración temporal que tiene la transmisión de un paquete.

Enfocándonos en la estación base se puede ver un “ $T_{colisión}$ ” el cual se debe a que dos usuarios han realizado una transmisión por lo que el canal se encontrara ocupado pero cursando paquetes colisionados, una vez que los paquetes son cursados, se registra un nuevo tiempo que es “ $T_{idle}$ ” y hace referencia al tiempo desde que deja de estar activa la señal de ocupación del canal ascendente (BUSY) hasta que otro usuario envía un nuevo paquete. Recopilando todos estos datos, hasta el momento se tiene:

$$T_{colisión} = T_1 + T_p + d + T_{idle}$$

Una vez finalizado el  $T_{colisión}$ , debido a que ha arribado un nuevo paquete y como durante el tiempo de incertidumbre, ningún otro terminal ha querido transmitir, se cursara el paquete 1 con éxito, dando aviso desde la estación base y hacia todos los terminales que el canal no se encuentra disponible. El hecho de que no haya más de un paquete cursando en este tiempo, da pie a que se considere el “ $T_{éxito}$ ”, el cual se compone del tiempo de incertidumbre hasta que la estación base da aviso de que no se encuentra disponible, el tiempo del paquete y el tiempo  $T_{idle}$  hasta que un terminal quiera realizar una nueva transmisión.

$$T_{éxito} = T_p + d + T_{idle}$$

Es interesante destacar que desde un punto de vista probabilístico, puede considerarse al tiempo de ciclo del canal como una variable aleatoria discreta, ya que en cualquier caso cuando se analiza cuales son los fundamentos de que el canal está ocupado existen solo dos razones: Colisión entre paquetes o Éxito de los mismos. Queda en evidencia que para concretar un ciclo debe ocurrir alguno de los dos eventos. Pero ¿Cómo? si bien no cabe la definición de ciclo como comúnmente se la conoce (periodo regular de tiempo que se repite) existen periodos de tiempo que son variables entre ocurrencia de eventos. A ellos se los define como Tiempo de ciclo.

Este modelado del tiempo de ciclo como variable aleatoria discreta permite simplificar el análisis para obtener el valor medio.

$$\mu = E(X) = \sum_{i=1}^k x_i \cdot p_i.$$

$$E[T_{ciclo}] = E[T_{colision}] * P_{colision} + E[T_{exito}] * P_{exito}$$

$$E[T_{ciclo}] = (E[T_1] + Tp + d + E[T_{idle}]) * (1 - P_{exito}) + (Tp + d + E[T_{idle}]) * P_{exito}$$

$$E[T_{ciclo}] = (E[T_1] + Tp + d + E[T_{idle}]) - (E[T_1]) * P_{exito}$$

Si se considera que el tráfico de llegada a la estación base sigue las características de una distribución de poisson con una tasa de  $\lambda_G$  paquetes por unidad de tiempo, la probabilidad de tener k llamadas en un intervalo de duración “t” viene dada por la expresión:

$$Pa(k, t) = \frac{(\lambda_G * t)^k}{k!} * e^{-\lambda_G * t}$$

Esta expresión se utiliza para obtener el valor promedio del tiempo de interferencia conocido como “T1”. Este intervalo temporal considera el arribo del último paquete interferente dentro del intervalo de tiempo “d”. Para obtener su valor, debe considerarse como punto de partida el instante de tiempo que refleja el arribo del primer paquete (dato). Por lo tanto, si el último paquete arriba en un intervalo de tiempo  $t_1$  medido desde dicha referencia, será considerado de tal modo siempre y cuando en el intervalo de tiempo posterior comprendido entre “d- $t_1$ ” no haya arribos. La probabilidad de que dicho paquete realmente constituya la última interferencia puede calcularse como:

$$P_a(0, d - t_1) = e^{-\lambda_G * d} * e^{\lambda_G * t_1} \quad 0 \leq t_1 \leq d$$

Esta ecuación representa la “función de distribución de probabilidad acumulada”. Pero se necesita la “función de densidad de probabilidad” para luego obtener la media, entonces se procede **derivando la función de distribución acumulada**.

$$f(x) = \frac{d}{dx} F(x).$$

Intuitivamente, puede considerarse  $f(x)$  como la probabilidad de que  $X$  caiga en el intervalo infinitesimal  $[x, x + dx]$ .

$$fT_1(t_1) = \frac{dF T_1(t_1)}{dt_1} = e^{-\lambda_G * d} * \lambda_G * e^{\lambda_G * t_1} + e^{-\lambda_G * d} * \delta(t_1) \quad 0 \leq t_1 \leq d$$

Luego, con dicha expresión, debe obtenerse la media:

$$E(T_1) = \int_{-\infty}^{\infty} t_1 \cdot fT_1(t_1) dt_1$$

donde  $fT_1(t_1)$  es la función de densidad de probabilidad y  $t_1$  es la variable aleatoria

$$E[T_1] = \int_0^d e^{-\lambda_G * d} * \lambda_G * e^{\lambda_G * t_1} * t_1 * dt_1 + \int_0^d e^{-\lambda_G * d} * \delta(t_1) * t_1 * dt_1 = d - \frac{1}{\lambda_G} + \frac{1}{\lambda_G} e^{-\lambda_G * d}$$

Respecto al valor medio del tiempo comprendido entre que el canal está desocupado luego de atender algún tipo de transmisión hasta que vuelve a ser ocupado, denominado “Tidle”, es bastante más simple de analizar. ¿Por qué? Porque las llamadas tienen una distribución de poisson en sus tiempos de interarribo, lo cual implica una distribución exponencial con un valor medio de  $1/\lambda_G$  y la duración de “Tidle” depende del arribo de una nueva llamada, entonces también tendrá una distribución exponencial y con la misma media. De esta forma, el valor medio vendrá dado por:

$$E[Tidle] = \frac{1}{\lambda_G}$$

Prescindiendo, por un lado de los posibles desvanecimientos del canal y por otro lado de la existencia del denominado efecto de captura, por el que en una colisión se podría llegar a discriminar uno de los paquetes recibidos si llega con un nivel de potencia muy superior al del resto, un paquete será transmitido correctamente siempre que no exista ninguna otra llegada en el tiempo de incertidumbre  $d$ , con lo que la probabilidad de éxito vendrá dada por:

$$P_{\text{exito}} = P_a(0, d) = e^{-\lambda_G * d}$$

Habiendo definido la  $P_{\text{exito}}$ , junto con  $E[T_{\text{idle}}]$  y  $E[T_1]$ , se llega a:

$$E[T_{\text{ciclo}}] = (E[T_1] + Tp + d + E[Tidle]) - (E[T_1]) * P_{\text{exito}}$$

$$E[T_{\text{ciclo}}] = Tp + 2 * d + \frac{1}{\lambda_G} e^{-\lambda_G * d} - (d - \frac{1}{\lambda_G} + \frac{1}{\lambda_G} e^{-\lambda_G * d}) * e^{-\lambda_G * d}$$

$$E[T_{\text{ciclo}}] = Tp + 2 * d + \frac{1}{\lambda_G} e^{-\lambda_G * d} - d * e^{-\lambda_G * d} + \frac{1}{\lambda_G} * e^{-\lambda_G * d} - \frac{1}{\lambda_G} * e^{-2 * \lambda_G * d}$$



$$E[T_{ciclo}] = Tp + 2 * d - d * e^{-\lambda_G * d} + \frac{2}{\lambda_G} * e^{-\lambda_G * d} - \frac{1}{\lambda_G} * e^{-2 * \lambda_G * d}$$

Para obtener el throughput en ISMA sin ranuras, se considera el cociente del tiempo de transmisión de un paquete “T<sub>p</sub>” con la probabilidad P<sub>éxito</sub> que está asociada a la probabilidad de que esta transmisión sea correcta y el tiempo medio del ciclo recientemente obtenido. Con estas consideraciones es que se obtiene:

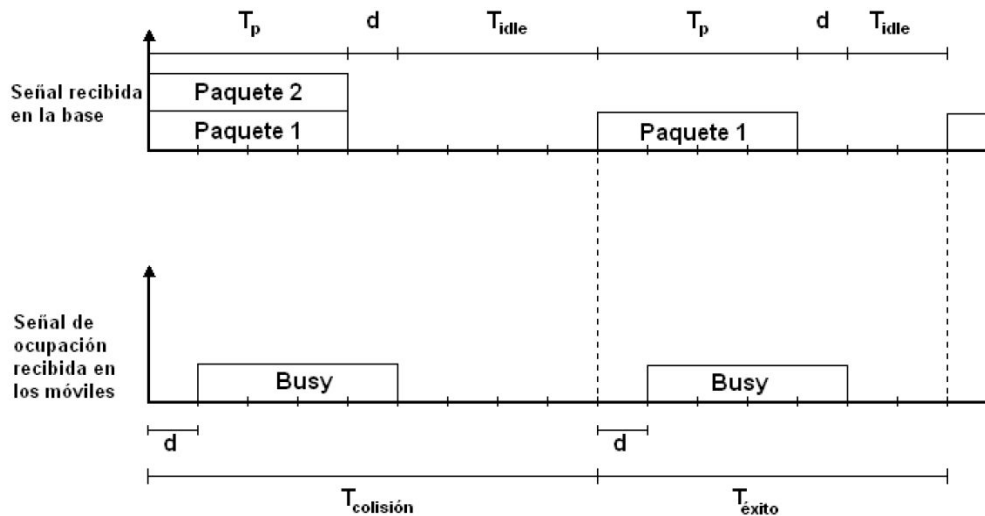
$$S_{No-Ranurado} = \frac{Tp * P_{éxito}}{E[T_{ciclo}]} = \frac{Tp * e^{-\lambda_G * d}}{Tp + 2 * d - d * e^{-\lambda_G * d} + \frac{2}{\lambda_G} * e^{-\lambda_G * d} - \frac{1}{\lambda_G} * e^{-2 * \lambda_G * d}}$$

#### Protocolo Slotted Inhibit Sense Multiple Access (S-ISMA)

El protocolo ISMA obtiene las mismas ventajas que el protocolo ALOHA al incorporar una estructura temporal subdividida en ranuras. Como se sabe, estas ranuras corresponden a un pulso periódico de sincronismo que le informa a las estaciones cuando es el momento indicado para efectuar la transmisión. En este caso, la estación base que tiene alcance hacia todos los usuarios emite en el enlace de bajada un pulso de sincronismo.

En el enlace ascendente, este sistema posee una estructura de trama que fuerza a todos los paquetes a ser recibidos por la base en unos instantes temporales determinados, en el inicio de cada ranura, por lo que únicamente podrá producirse colisiones en dichos instantes y en el enlace descendente al estar también ranurado como se comentó anteriormente, la señal de inhibición del canal de subida tendrá lugar a partir de la primer ranura posterior al inicio de la transmisión del paquete, por lo tanto existe un retardo de una ranura para esta señal con respecto al inicio de la transmisión del paquete, que sería equiparable al valor “d” del sistema sin ranura.

Al analizar estos conceptos surge la pregunta, ¿Cuándo podrían colisionar dos usuarios? **El único momento de colisión es que los dos transmitan en la misma ranura.** Si un usuario deseara transmitir en la mitad de una ranura temporal no podría, debería esperar a la próxima ranura para verificar que en el canal de bajada no se haga presente la señal de BUSY.

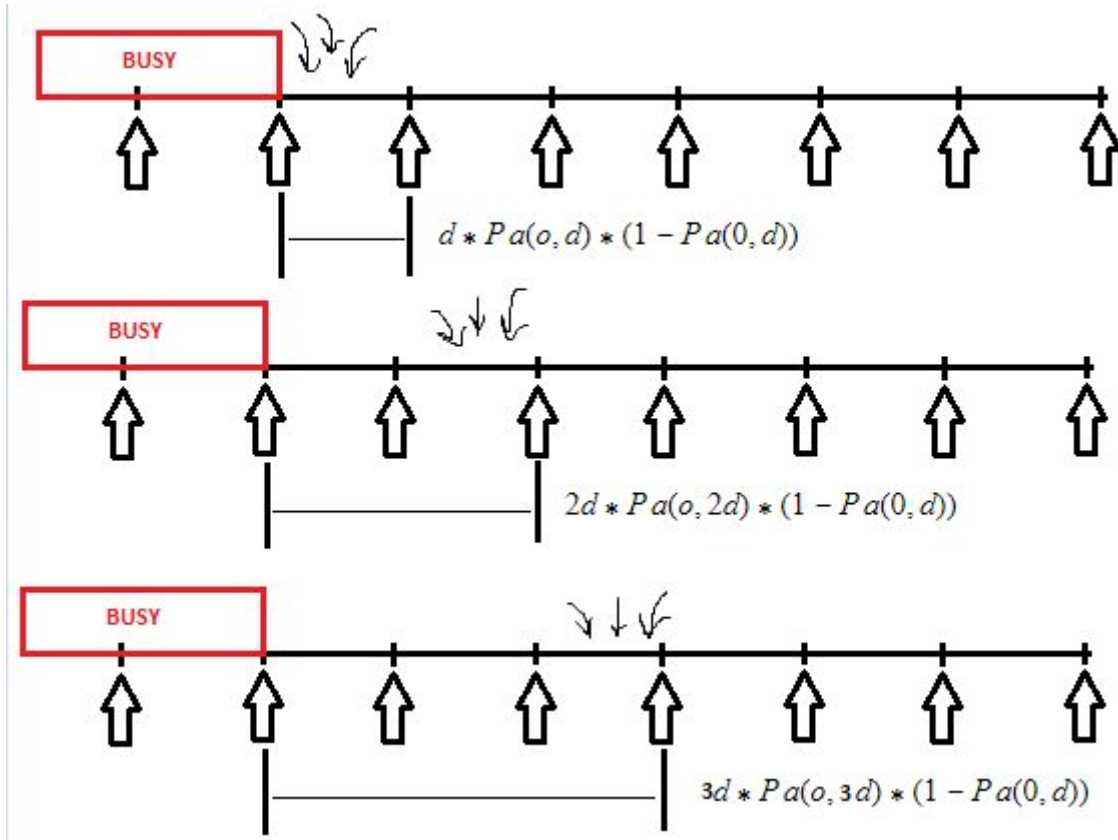


Para este protocolo sucede, a diferencia del ISMA no ranurado, que los tiempos de ciclo tanto para colisión como para éxito son iguales debido a que las colisiones duran solamente ranuras temporales, ya no existe el tiempo antes definido como "T1" ó mejor dicho, el instante de tiempo en el cual se hace presente el último paquete interferente es  $T1=0$ . Llegando a que el tiempo de ciclo y por lo tanto los tiempos medios, sean:

$$T_{ciclo} = d + T_p + T_{idle}$$

$$E[T_{ciclo}] = d + T_p + E[T_{idle}]$$

La tarea ahora es conseguir el valor medio de " $T_{idle}$ " en donde se debe de considerar en qué momento es que se origina y hasta dónde puede durar. Su inicio se da al finalizar el periodo de señalización BUSY por parte de la estación base y finaliza al arribar un nuevo paquete por parte de algún transmisor en alguna ranura posterior, siendo la duración mínima una ranura, o sea " $d$ ". Como se puede deducir, en el caso de no haber un arribo en " $d$ ", la próxima instancia implicaría una ventana temporal de  $2"d$ " y así se incrementa hasta encontrar el intervalo de tiempo expresado en múltiplos de " $d$ " donde se detecte al menos un paquete que arriba a la estación base. De esta manera queda definido el tiempo medio de  $T_{idle}$  como la probabilidad de que no haya arribos en " $x$ " $d$  tiempos por la probabilidad de que llegue un paquete expresado como " $(1-P_a(0-d))$ ". ¿Por qué? porque si ocurre algún arribó en el intervalo " $x-1$ " $d$  finalizara el tiempo  $T_{idle}$  posterior a la ranura " $x$ " $d$ .



$T_{idle}$  se toma como una variable aleatoria discreta, que si bien puede adquirir infinitos valores diferentes, son discretos y múltiplos de “d”. Por lo tanto para calcular el valor medio se utiliza la ecuación que ya hemos mencionado en apartados anteriores.

$$\mu = E(X) = \sum_{i=1}^k x_i \cdot p_i.$$

En este caso “k” debería ser infinito, entonces para encontrar el valor esperado primero se desarrolla la expresión:

$$E[Tidle] = d * Pa(o, d) * (1 - Pa(0, d)) + 2d * Pa(o, 2d) * (1 - Pa(0, d)) + ... =$$

Recordando:

$$P_{exito} = P_a(0, d) = e^{-\lambda_G * d}$$

$$E[Tidle] = d * e^{-\lambda_G * d} * (1 - e^{-\lambda_G * d}) + 2d * e^{-\lambda_G * 2d} * (1 - e^{-\lambda_G * d}) + ... =$$

Expresando  $E[T_{idle}]$  como una serie y resolviendo, se encuentra que:

$$E[Tidle] = \sum_{k=0}^{\infty} k * d * e^{-\lambda_G * k * d} * (1 - e^{-\lambda_G * d}) = \frac{d * e^{-\lambda_G * d}}{1 - e^{-\lambda_G * d}}$$

Con el valor medio de  $T_{idle}$  se puede sustituir en la ecuación del tiempo medio de ciclo, llegando a:

$$E[T_{ciclo}] = d + T_p + E[T_{idle}]$$

$$E[T_{ciclo}] = d + T_p + \frac{d * e^{-\lambda_G * d}}{1 - e^{-\lambda_G * d}} = \frac{d + T_p * (1 - e^{-\lambda_G * d})}{1 - e^{-\lambda_G * d}}$$

Con respecto al throughput para ISMA ranurado, se tiene que la probabilidad de éxito de una transmisión, es debido a que ha llegado un único paquete en una ranura temporal ya que el tiempo de ciclo queda definido siempre por la presencia de algún evento, llegó un único paquete ó llegaron múltiples en la ranura temporal del sistema. Interesa el caso de un único arribo, quedando:

$$P_{exito} = P[1 \text{ llegada} | \text{hay llegadas}]$$

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

Hay que tener cuidado con esta expresión, no hay eventos independientes. La probabilidad de 1 llegada está netamente relacionada con la probabilidad de que existan llegadas. Esto significa que la intersección de ambos eventos es distinta de cero y se calcula mediante distribución de poisson al igual que la probabilidad de la existencia de arribos en el intervalo de tiempo de interés

$$P_{exito} = P[1 \text{ llegada} | \text{hay llegadas}] = \frac{P[1 \text{ llegada}]}{P[\text{hay llegadas}]} = \frac{P_a(1,d)}{1 - P_a(0,d)} = \frac{\lambda_G * d * e^{-\lambda_G * d}}{1 - e^{-\lambda_G * d}}$$

$$S_{RANURADO} = \frac{T_p * P_{exito}}{T_{ciclo}} = \frac{T_p * \lambda_G * d * e^{-\lambda_G * d}}{d + T_p * (1 - e^{-\lambda_G * d})}$$

#### Protocolo Reserved Inhibit Sense Multiple Access (R-ISMA)

Es fácil de observar que en las dos versiones del protocolo ISMA, tanto ISMA como ISMA-S cuando hay colisiones se pierden los paquetes enteros por lo tanto surge una tercera versión del mismo definida como R-ISMA, destinada a evitar las colisiones y aumentar el throughput. Para ello se utilizan paquetes cortos de reserva que permiten a los diferentes terminales disponer de forma exclusiva el uso del canal durante determinado intervalo de tiempo para enviar sus paquetes de datos. Si bien los paquetes de reserva incrementan el overhead del protocolo, esta desventaja es poco significativa en comparación con las mejoras obtenidas en throughput cuando las terminales tienen mensajes largos para transmitir.

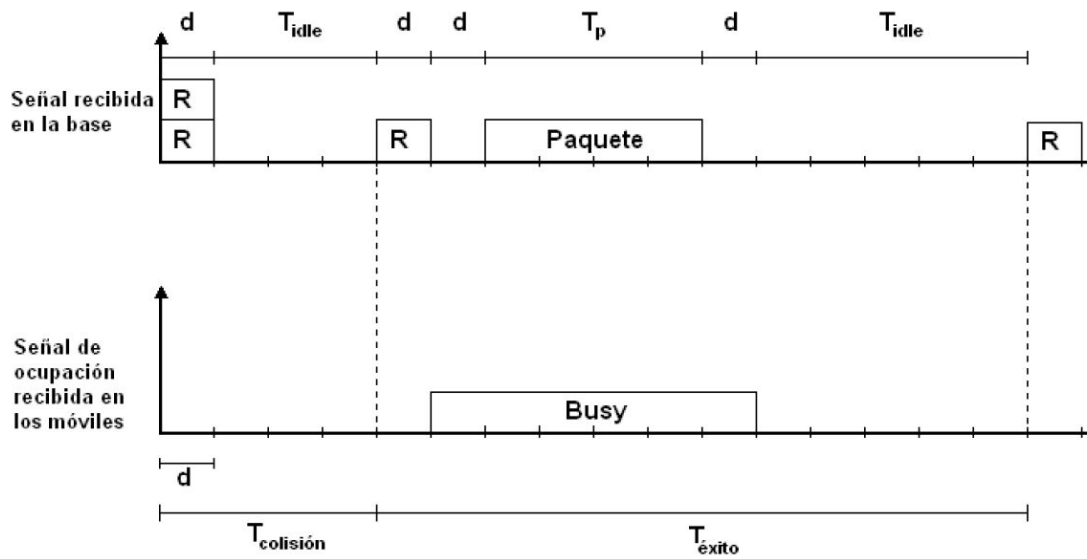
¿Cómo es el protocolo?

En R-ISMA, cada terminal con datos disponibles para transmitir debe enviar primero un paquete de reserva a la estación base en el caso de que detecte que en el enlace de bajada no está presente la señal BUSY. Si en la verificación del canal, el enlace de bajada acusa canal ocupado, la terminal esperara para enviar el paquete de reserva. Cuando se desocupa el canal, se realiza la petición. Si el paquete de reserva no colisiona con ningún otro paquete de reserva de otro usuario, la estación base indicará la reserva del canal colocando la señal BUSY en el canal de bajada. De esta forma, el terminal que envió el pedido de reserva en el time slot anterior a la aparición de la señal BUSY es informado sobre la disponibilidad del canal de subida y transmite su mensaje a partir del time slot siguiente.

Cuando el mensaje termina, la estación base en el próximo time slot quita la señal BUSY del canal de bajada, indicando que el canal de subida está nuevamente disponible para realizar pedidos de reserva.

En el caso de que dos o más reservas se realizan en el mismo time slot se produce una colisión. ¿Cómo responde la estación base? La verdad es que no hace nada, no activa la señal de BUSY en el enlace de bajada en el próximo time slot, por lo tanto con esta conducta da a entender a las estaciones transmisoras que no recibió las solicitudes de reserva. En esta situación, los móviles no enviaran sus datos, esperarán un tiempo aleatorio y volverán a requerir servicio.

En los ISMA anteriores no se especificó cómo se daban cuenta las estaciones móviles cuando sus paquetes colisionaban, ya que en todo caso aparece la señal de BUSY en el enlace de bajada ¿Que ocurre en esos casos? Es oportuno aclarar que en ISMA y S-ISMA si bien el enlace de bajada aparece como ocupado cuando se produce una colisión y los móviles ni se enteran, se terminan enterando porque no llega ningún ACK asociado a su paquete. Estos protocolos funcionan con acuse de recibo, entonces si dos paquetes colisionaron y aparece la señal de busy, no es condición suficiente para decir que el paquete se cursó correctamente en la estación base, es necesario el acuse de recibo.



Al igual que en el resto de protocolos, se busca obtener el throughput. Para ello es necesario obtener las expresiones del tiempo medio de ciclo y el tiempo medio útil del canal. Al ser el tiempo de ciclo una variable aleatoria discreta con dos resultados posibles, colisión de paquetes destinados a reserva o éxito en la reserva y transmisión puede plantearse que:

$$T_{colision} = d + T_{idle}$$

$$T_{exito} = T_p + 3d + T_{idle}$$

$$\mu = E(X) = \sum_{i=1}^k x_i \cdot p_i.$$

$$E[T_{ciclo}] = E[T_{colisión}] \cdot P_{colisión} + E[T_{éxito}] \cdot P_{éxito}$$

$$E[T_{ciclo}] = (d + E[T_{idle}]) \cdot (1 - P_{éxito}) + (T_p + 3d + E[T_{idle}]) \cdot P_{éxito}$$

$$E[T_{ciclo}] = 2d \cdot P_{éxito} + T_p \cdot P_{éxito} + d + E[T_{idle}]$$

Dado que los paquetes de reserva en R-ISMA cumplen con la misma estadística de llegadas que los paquetes de datos en ISMA ranurado, el valor medio de  $T_{idle}$ , sigue la misma lógica.

Obviando el análisis del valor medio de  $T_{idle}$ , se puede expresar directamente:

$$E[T_{idle}] = \frac{d \cdot e^{-\lambda_G \cdot d}}{1 - e^{-\lambda_G \cdot d}}$$

¿Cuál es la probabilidad de éxito para una estación transmisora? La probabilidad de éxito está netamente relacionada con la presencia de un único paquete de reserva en un time slot, entonces al igual que antes, la probabilidad de éxito se expresa como la probabilidad de que dado que hay llegadas en un timeslot se trate de una única solicitud de servicio.

$$P \text{ Éxito} = P[1 \text{ llegada} | \text{hay llegadas}]$$

$$P(A|B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)}$$

Hay que tener cuidado con esta expresión, ya que no hay eventos independientes. La probabilidad de 1 llegada está netamente relacionada con la probabilidad de que existan llegadas. Esto significa que la intersección de ambos eventos es distinta de cero y se calcula mediante distribución de poisson al igual que la probabilidad de la existencia de arribos en el intervalo de tiempo de interés.

$$P_{\text{exito}} = P[1 \text{ llegada} | \text{hay llegadas}] = \frac{P[1 \text{ llegada}]}{P[\text{hay llegadas}]} = \frac{Pa(1,d)}{1-Pa(0,d)} = \frac{\lambda_G * d * e^{-\lambda_G * d}}{1 - e^{-\lambda_G * d}}$$

Retomando la ecuación del tiempo medio de ciclo y reemplazando las expresiones que se obtuvieron, resulta :

$$E[T_{\text{ciclo}}] = 2d * P_{\text{éxito}} + Tp * P_{\text{éxito}} + d + E[T_{\text{idle}}]$$

$$E[T_{\text{ciclo}}] = (2d + Tp) * \frac{\lambda_G * d * e^{-\lambda_G * d}}{1 - e^{-\lambda_G * d}} + d + \frac{d * e^{-\lambda_G * d}}{1 - e^{-\lambda_G * d}}$$

$$E[T_{\text{ciclo}}] = \frac{d + (2d + Tp) * \lambda_G * d * e^{-\lambda_G * d}}{1 - e^{-\lambda_G * d}}$$

$$S_{R-ISMA} = \frac{Tp * P_{\text{exito}}}{E[T_{\text{ciclo}}]} = \frac{Tp * \frac{\lambda_G * d * e^{-\lambda_G * d}}{1 - e^{-\lambda_G * d}}}{\frac{d + (2d + Tp) * \lambda_G * d * e^{-\lambda_G * d}}{1 - e^{-\lambda_G * d}}} = \frac{Tp * \lambda_G * e^{-\lambda_G * d}}{1 + (2d + Tp) * \lambda_G * e^{-\lambda_G * d}}$$

Resumiendo, existen tres versiones del protocolo ISMA, cuyo objetivo principal es proporcionar un método de acceso eficiente en el uso del canal para topologías de red inalámbricas. La presencia de terminales ocultos y terminales expuestos junto con la presencia de canales con “fading” fueron una de las grandes causas para que se desarrollará el protocolo en cuestión.

¿Qué es el fading? fading o desvanecimiento es la variación en la atenuación que experimenta una señal y depende de múltiples variables. Se considera como un proceso estocástico cuyas variables son el tiempo, la posición geográfica y la frecuencia de operación del sistema. En los sistemas inalámbricos, el desvanecimiento puede deberse a la propagación multitrayecto, al clima (en particular a la lluvia) o a los obstáculos que afectan a la propagación de la onda, a veces denominado desvanecimiento lento o shadowing.

Cuestión, si bien ISMA en sus fundamentos presentaba muchas mejoras respecto a CSMA, no era capaz de brindar un throughput decente. Principalmente debido a retardos en propagación (variable crítica en redes inalámbricas), lo cual generaba que las estaciones no detectaran correctamente cuando el enlace de subida se estaba utilizando y se producían demasiadas colisiones por transmisiones simultáneas. Por esa razón se implementa ISMA-S para intentar dar un orden y mayor control al acceso del canal, disminuyendo las colisiones para finalmente intentar eliminarlas mediante una versión del tipo “reserva” del protocolo.

	ISMA No Ranurado	ISMA Ranurado (S-ISMA)	ISMA con Reserva (R-ISMA)
T colisión	$Tl + Tp + d + Tidle$	$d + Tp + T_{idle}$	$d + Tidle$
T éxito	$Tp + d + Tidle$	$d + Tp + T_{idle}$	$Tp + 3d + Tidle$
E[Tciclo]	$Tp + 2 * d - d * e^{-\lambda_G * d} + \frac{2}{\lambda_G} * e^{-\lambda_G * d} - \frac{1}{\lambda_G} * e^{-2 * \lambda_G * d}$	$\frac{d + Tp * (1 - e^{-\lambda_G * d})}{1 - e^{-\lambda_G * d}}$	$\frac{d + (2d + Tp) * \lambda_G * d * e^{-\lambda_G * d}}{1 - e^{-\lambda_G * d}}$
Through put	$\frac{Tp * e^{-\lambda_G * d}}{Tp + 2 * d - d * e^{-\lambda_G * d} + \frac{2}{\lambda_G} * e^{-\lambda_G * d} - \frac{1}{\lambda_G} * e^{-2 * \lambda_G * d}}$	$\frac{Tp * \lambda_G * d * e^{-\lambda_G * d}}{d + Tp * (1 - e^{-\lambda_G * d})}$	$\frac{Tp * \lambda_G * e^{-\lambda_G * d}}{1 + (2d + Tp) * \lambda_G * e^{-\lambda_G * d}}$

Para realizar un análisis gráfico entre los 3 protocolos ISMA y ALOHA-S se busca obtener la gráfica de throughput vs G, considerando como parámetro para el caso de ISMA la duración del intervalo de tiempo “d” (retardo de propagación de la estación base) expresado como porcentaje del tamaño de los paquetes de información  $T_p$ .

Se asume para el análisis a realizar un valor de  $T_p$  igual a uno, por lo que “d” tomará valores entre cero a uno.



Es por esta razón que se considerarán en función de “d”, 4 casos diferentes para ver el rendimiento de los diferentes protocolos y comparar si es que son mejores o no que el protocolo Aloha - S.

1- En un principio se considera el valor más chico de  $d=0$ , en donde se supone que si un terminal transmite, todos los usuarios quedan instantáneamente avisados de la indisponibilidad del canal para transmitir. Para este caso sucederá que los 3 ISMA alcancen un throughput igual a 1.

En el 2- y 3- se verá cómo al aumentar “d” comienzan a suceder colisiones, gracias a los retardos de propagación, generando disminución en el throughput para cada protocolo alcanzando como máximo valores menores a 1. Para estos casos en donde  $d>0$ , se podrá observar los distintos rendimientos para cada ISMA, obteniendo los mejores resultados para el caso de ISMA con reserva o R-ISMA.

$$d = 0.05$$

<i>Protocolo</i>	<i>Throughput máximo</i>	<i>G</i>
S-ALOHA	0.36	1
ISMA no ranurado	0.63	3.9
ISMA ranurado	0.72	5.6
R-ISMA	0.81	20

4- Para este caso se considera a  $d=1$ , en donde el aviso por parte de la base ya no corresponderá con lo que está sucediendo realmente en el canal debido a que el tiempo de incertidumbre se ha igualado al tiempo que tiene un paquete. Sucederá que cuando el canal se ocupe, la estación dará aviso al tiempo posterior, momento en donde ya se encontrara desocupado. Este alto valor de incertidumbre aumenta drásticamente las colisiones y genera que Aloha-S pase a tener el mejor rendimiento entre los 4 protocolos considerados.

Todos estos datos se pueden visualizar de la siguiente manera:

