

Simulación y Análisis de protocolos de Acceso Múltiple en un sistema de Comunicaciones Móviles

Ricardo Lima, Santiago Lovera, Julián A. Durigutti¹, Ivana Paola Cruz² y Juan Alcorta

¹*Dto. de Electricidad y Electrónica, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
jadurigutti@ing.unrc.edu.ar*

²*Dto. de Electricidad y Electrónica, Universidad Nacional de Río Cuarto, Argentina.
icruz@ing.unrc.edu.ar*

Resumen— Este trabajo presenta las características del análisis y simulación de los protocolos de Acceso mediante herramientas estadísticas. Determinando la eficiencia de los mismos en un entorno de duplexión por división de frecuencia (FDD). La evaluación se realizó sobre el protocolo Aloha Ranurado (S-ALOHA), considerado como el más utilizado, entre los protocolos de acceso, el protocolo Ranurado de Acceso Múltiple con señal de inhabilitación (S-ISMA). También se realizó el estudio del protocolo Acceso Múltiple con señal de inhabilitación y reserva (R-ISMA).

Se procedió al análisis estadístico utilizando el modelo de Poisson para hacer las posteriores conclusiones, dejando abierto para un segundo estudio el modelo de Markov. A partir de las mismas se observan las diferentes ventajas y mejorías ofrecidas por los distintos protocolos, en función de la demanda de información. Estos resultados teóricos fueron contrastados con simulaciones, realizadas con el software MATLAB 7. Con el estudio realizado se espera ofrecer una herramienta para mejorar la elección del protocolo de acceso a utilizar en los distintos tipos de servicios o demandas de tráfico, existentes en la interfaz inalámbrica de las comunicaciones móviles.

Palabras Clave— Protocolos de Acceso al Medio, Simulación, S-ALOHA, S-ISMA, R-ISMA, Análisis Estadístico, Proceso de Poisson.

Workshop— No se considera encuadrar en ninguno de los cinco Workshop descriptos. Pero si en los temas propuestos 07: Comunicaciones y Redes y 14: Optimización y Simulación.

I Introducción

La necesidad de los protocolos de acceso múltiple se presenta siempre que un recurso sea compartido por muchos usuarios, es decir, que el mismo tiene como objetivo controlar el acceso de un conjunto de usuarios a una serie de recursos compartidos. Esencialmente definen un conjunto de reglas de funcionamiento para determinar *cómo* los usuarios deben lograr el acceso a dichos recursos. Existe un gran número de protocolos de acceso múltiple definidos y, fundamentalmente, todos ellos juegan con el grado de aleatoriedad de accesos, de modo que pueden ir de los puramente aleatorios como el protocolo S-ALOHA hasta otras estrategias que controlan totalmente el acceso, reduciendo de esta forma al máximo la aleatoriedad.

En un sistema de comunicación inalámbrico, a menudo es deseable que el suscriptor simultáneamente envíe y reciba información de la estación base, donde este efecto es llamado Duplexado. El Duplexado puede realizarse mediante técnicas en el dominio del tiempo o de las frecuencias. El duplexado por división de frecuencia (FDD) provee dos bandas bien definidas de frecuencias para cada usuario. La banda forward provee el tráfico de la estación base al móvil, y la banda reverse provee el tráfico del móvil a la estación base.

El duplexado por división de tiempo (TDD) usa tiempos en lugar de la frecuencia para proveer ambos enlaces, cada canal dúplex tiene un slot de tiempo forward y uno para reverse para facilitar la comunicación bidireccional.

Dada las propiedades del medio inalámbrico, el diseño de diferentes protocolos de acceso múltiples presenta más complicaciones que para redes alámbricas. La característica crucial de la transmisión inalámbrica es la cobertura espacial. Sólo los equipos receptores dentro del rango de transmisión de una estación pueden recibir sus paquetes.

Los protocolos de acceso múltiples son evaluados según diversos criterios. El retraso, el rendimiento, la preferencia, el soporte para multimedia, y la estabilidad son métricas ampliamente usadas para comparar protocolos de acceso múltiples. La robustez ante el desvanecimiento y el consumo de potencia de la batería son métricas adicionales usadas para comparar los protocolos de acceso múltiple en sistema inalámbrico.

II Protocolos MAC en Medios Inalámbrico

Los protocolos de MAC en medios inalámbrico se clasifican según los tipos de arquitectura como distribuidos y centralizados, y según el modo de operación como protocolos de acceso aleatorio, protocolos de acceso garantizado, y protocolos de acceso híbridos.

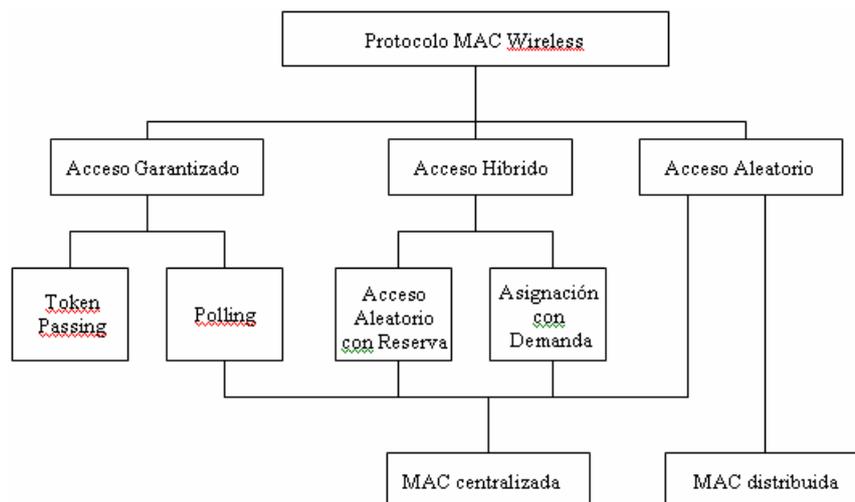


Figure 1 Clasificación de los protocolos MAC en medios inalámbricos

Dentro de los protocolos MAC Distribuidos con acceso aleatorio se encuentra el Aloha, este se desglosa en dos versiones: ALOHA puro (ALOHA) y ALOHA ranurado (S-ALOHA). En el ALOHA puro, las estaciones transmiten sus paquetes en cualquier tiempo que desean. Dado que el canal es un canal de radiodifusión, si la estación oye solo su propia transmisión, da por supuesto que ningún conflicto ocurrió y el paquete es considerado un paquete que ha sido transmitido exitosamente. Por otra parte, si la estación oye algo aparte de lo que ha transmitido, da por supuesto que su paquete se ha traslapado con uno o más paquetes de otras estaciones y por lo tanto debe retransmitir.

Como protocolos MAC Centralizados y de acceso aleatorio, se encuentra el protocolo S-ISMA. Este protocolo intenta reducir la aleatoriedad en el acceso por medio de una señalización desde la estación base, a través del enlace descendente, comunicando si un determinado canal del enlace ascendente se encuentra ocupado o no. En este caso, existe una estructura de trama que fuerza a

todos los paquetes a ser recibidos por la base en unos instantes temporales determinados, al inicio de cada ranura, por lo que únicamente podrá producirse colisión en dichos instantes.

En el caso de los protocolos MAC Centralizados con acceso híbrido, se encuentra el protocolo R-ISMA. R-ISMA usa paquetes de reserva, los cuales son paquetes cortos que permiten a un terminal disponer del enlace en forma exclusiva durante un período de tiempo para enviar sus paquetes de datos.

III Análisis de Poisson de los Protocolos

Para analizar cualquier fenómeno físico, es necesario poder estar representando su comportamiento mediante alguna ecuación la cual nos permita predecir el comportamiento del mismo en función de distintos parámetros.

En el caso de los protocolos MAC, también pueden ser caracterizados por ecuaciones las cuales definan su comportamiento en función a ciertos parámetros. En este caso los parámetros que interviene dentro de dichas ecuaciones, son parámetros aleatorios con lo cual se deberán utilizar herramientas estadísticas para poder representarlos. La herramienta que utilizaremos será la de Poisson.

Análisis de S-ALOHA

Entre los protocolos de acceso aleatorio, S-ALOHA es el más básico y también es el componente de varios protocolos importantes. Además, el análisis de funcionamiento de S-ALOHA es bastante fácil comparado con los de otros protocolos de acceso aleatorio. A continuación, describimos el análisis de Poisson en el uso de S-ALOHA.

El análisis del protocolo S-Aloha se realiza a través del estudio de la eficiencia (throughput). Para ello nos situaremos en la siguiente descripción del sistema:

La fuente de tráfico esta compuesta por un conjunto de usuarios móviles que emiten paquetes de tamaño constante hacia la estación base. Los paquetes pueden sufrir los efectos de las perturbaciones del medio radioeléctrico (ruido, interferencia). Asimismo, pueden producirse en el receptor colisiones totales o parciales entre paquetes. Una vez transmitido un paquete, el usuario espera cierto tiempo, transcurrido el cual, si no obtiene un acuse de recibo, considera que el paquete no fue recibido correctamente, por lo tanto debe transmitirlo de nuevo. La retransmisión no debe ser inmediata, porque si dos o mas usuarios procedieran de idéntica forma, volverían a producirse colisiones y se entraría en una situación de inestabilidad en la que no podrían transmitirse con éxito los paquetes. Para evitarla, cada usuario retarda la retransmisión de su paquete un tiempo aleatorio elegido de acuerdo con cierta regla. Por consiguiente, el tráfico ofrecido estará constituido por paquetes nuevos y paquetes retransmitidos.

En la figura 2 se ilustra el modelo de sistema de transmisión de paquetes y acceso aleatorio que utilizaremos en el análisis del protocolo S-ALOHA.

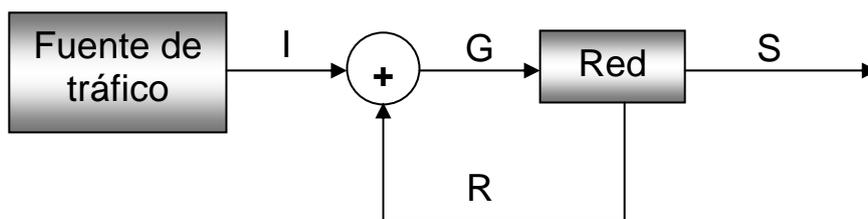


Figura 2 Modelo del Sistema

El sistema está constituido por una fuente de tráfico (conjunto de móviles emisores de paquetes) y un elemento abstracto, denominado red que representa el medio radioeléctrico y la estación base.

Las hipótesis en las que se basará el estudio del modelo de tráfico, son las siguientes:

1. Fuente Poissoniana con un número muy elevado de generadores de tráfico y una tasa de llegada de λ paquetes de tamaño constante por segundo.
2. El tiempo medio entre paquetes consecutivos emitidos por un mismo móvil es mucho mayor que el tiempo necesario para la transmisión de un paquete con éxito, es decir, no se forman colas de paquetes en los móviles.
3. Cada paquete tiene un tiempo de transmisión $\tau = Nb/Vb$ (tamaño del paquete (bits)/velocidad de transmisión (bits/s)). En todo lo que sigue, se tomará τ como tiempo de referencia y se normalizarán todos los tiempos respecto de τ .
4. Los parámetros de tráfico del sistema, serán:
 - a. **I**: Tráfico ofrecido por la fuente, normalizado ($I = \lambda * \tau$).
 - b. **G**: Tráfico ofrecido a la red, normalizado (suma de los nuevos paquetes transmitidos y los retransmitidos en el canal, llamado carga ofrecida)
 - c. **R**: Tráfico de retransmisiones de paquetes (número de paquetes retransmitidos en el tiempo de referencia).
 - d. **S**: Tráfico ofrecido por el sistema (número de paquetes por intervalo de tiempo que son correctamente transmitidos, es menor que **G**), denominado también caudal ó throughput.
5. Los paquetes no resultan afectados por las perturbaciones (ruido o interferencia) del canal de radio. La única causa de pérdida de paquetes es la producción de colisiones.

Si tuviéramos un conjunto de paquetes perfectamente transmitidos (canal ideal) sin superposición, no ocurrirían colisiones y la capacidad del canal S_{\max} sería igual a $1/\tau$ paquetes por segundo.

$$S_{\max} = \frac{1}{\tau} \quad (1)$$

En canales reales los paquetes arriban aleatoriamente y colisionan. Por lo tanto la capacidad, **S**, es menor que la tasa de arribos, **G**. Podemos asumir que todos los paquetes arriban independientemente unos de otros y siguen una distribución de poisson. Esto produce una función de densidad de probabilidad de los tiempos entre arribos que tiene una distribución exponencial. Esto puede ser observado en la hipótesis 2, ya mencionada.

$$P_{ok} = ((t_{n+1} - t_n) < t) = G \cdot e^{-Gt} \quad (2)$$

La unidad estándar de flujo de tráfico es el Erlang. Aquí, podemos definir al Erlang pensando en segmentar el tiempo del canal en slots de T segundos cada uno; entonces un flujo de tráfico de un

paquete por T segundos tiene un valor de un Erlang. Por la definición del rendimiento no puede exceder 1 Erlang sin colisiones, y así esperamos que el rendimiento (throughput) este limitado a $0 < S < 1$. Notamos más lejos que si la carga de tráfico ofrecida es muy baja, habrá muy pocas nuevas transmisiones, de modo que nosotros esperaremos que $S \approx G$ para cargas de tráfico bajas. En muy altas cargas de tráfico, esperamos un número grande de colisiones y nuevas transmisiones consiguientes, de modo que tenderemos $S \ll G$, y decreceremos a 0.

La probabilidad que λ paquetes sean generados durante un intervalo de tiempo dado obedece una distribución de Poisson con una media de G paquetes por intervalo de tiempo; esto es,

$$\Pr(\lambda) = \frac{G^\lambda e^{-G}}{\lambda!} \quad (3)$$

Describiremos el *rendimiento*, S, como una función del *tráfico ofrecido al canal*, G, para el análisis del S-ALOHA.

Como consecuencia que el tiempo medio entre paquetes consecutivos emitidos por un mismo móvil es mucho mayor que el tiempo necesario para la transmisión de un paquete con éxito, es decir, no se forman colas de paquetes en los móviles:

$$I = S \quad (4)$$

y, análogamente, dado que $I = \lambda * \tau$:

$$G = S + R \quad (5)$$

El número de paquetes retransmitidos es igual al producto de G por la probabilidad de que un paquete sufra colisión, que en virtud de las hipótesis del modelo es igual a la probabilidad que no exista colisión menos 1:

$$\Pr(\lambda) = \frac{G^\lambda e^{-G}}{\lambda!} \quad (6)$$

$$\Pr(0) = e^{-G} \quad (7)$$

$$p_{colision} = 1 - e^{-G} \quad (8)$$

Entonces, R queda:

$$R = G \cdot p_{colision} \quad (9)$$

De las ecuaciones 5 a 9 se obtiene la eficiencia S:

$$S = G \cdot e^{-G} \quad (10)$$

Análisis de S-ISMA

El protocolo S-ISMA utiliza una estructura de trama que fuerza a todos los paquetes a ser recibidos por la base en unos instantes temporales determinados al inicio de cada ranura, por lo que únicamente podrá producirse colisión en dichos instantes. Análogamente, si se asume que el canal de bajada también está ranurado, la señal de inhibición del canal de subida únicamente será efectiva a partir de la primera ranura posterior al inicio de la transmisión, por lo que existe un retardo de una ranura para esta señal con respecto del inicio de la transmisión del paquete, representado por el valor d , tal y como se muestra en la siguiente figura:

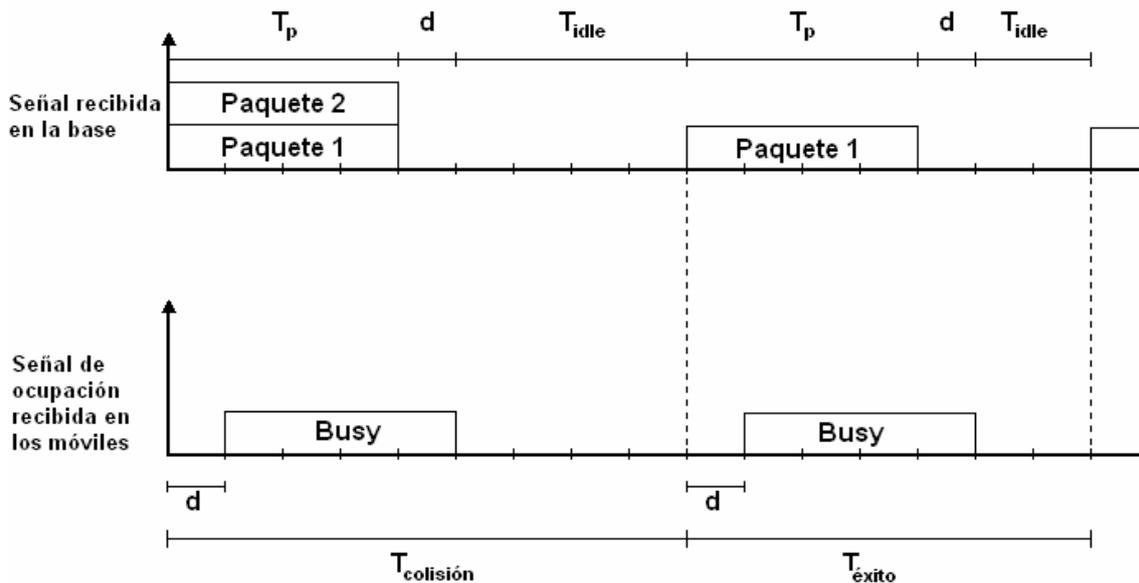


Figura 3 Diagrama de tiempo del funcionamiento de S-ISMA.

Con el objetivo de evaluar este protocolo en términos de throughput, considérense los siguientes tiempos, mostrados en la figura:

T_p : Duración temporal de un paquete transmitido.

d : es el ancho de la ranura temporal.

T_{idle} : Tiempo desde que deja de estar activa la señal de ocupación del canal ascendente (BUSY) hasta que otro terminal envía un nuevo paquete.

Se define el *tiempo de ciclo* como el intervalo entre la aparición de dos paquetes consecutivos que no colisionan entre sí.

En la figura se observa que el tiempo de ciclo puede tomar dos valores:

- Tiempo de ciclo de colisión $T_{colisión}$
- Tiempo de ciclo exitoso $T_{éxito}$

De donde el valor medio del tiempo de ciclo puede obtenerse como:

$$E[T_{ciclo}] = E[T_{colisión}] \cdot P_{colisión} + E[T_{éxito}] \cdot P_{éxito} \quad (11)$$

Como puede apreciarse en el diagrama temporal, los tiempos de ciclo en caso de colisión y en caso de éxito son los mismos, por lo que el tiempo de ciclo está determinado por:

Tiempo de ciclo:

$$T_{ciclo} = d + T_p + T_{idle} \quad (12)$$

Y el tiempo medio de ciclo será:

$$E[T_{ciclo}] = d + T_p + E[T_{idle}] \quad (13)$$

Para el cálculo del tiempo medio de T_{idle} basta con recurrir a la estadística de llegadas, teniendo presente que todos los paquetes que lleguen dentro de una ranura con el canal no ocupado supondrán transmisiones al inicio de la siguiente ranura. De este modo, partiendo del instante de tiempo en que finaliza la señalización del período BUSY, el tiempo T_{idle} tomará su valor mínimo d , esto es, una ranura, si no se produce ninguna llegada en la primera ranura desde el final del período BUSY y una o más en la segunda, tomará el valor $2d$ si no se producen llegadas en las dos primeras ranuras y una o más en la tercera, y así sucesivamente, lo que conduce a la definición de la siguiente sucesión:

$$\begin{aligned} E[T_{idle}] &= d \cdot P_a(0, d)(1 - P_a(0, d)) + 2d \cdot P_a(0, 2d)(1 - P_a(0, d)) + \dots \\ E[T_{idle}] &= d \cdot e^{-G \cdot d} (1 - e^{-G \cdot d}) + 2d \cdot e^{-G \cdot 2d} (1 - e^{-G \cdot d}) + \dots \\ E[T_{idle}] &= \sum_{k=0}^{\infty} k \cdot d \cdot e^{-G \cdot k \cdot d} (1 - e^{-G \cdot d}) = \frac{d \cdot e^{-G \cdot d}}{1 - e^{-G \cdot d}} \end{aligned} \quad (15)$$

Sustituyendo esto último en la ecuación del tiempo medio de ciclo, se llega a la siguiente expresión:

$$E[T_{ciclo}] = d + T_p + \frac{d \cdot e^{-G \cdot d}}{1 - e^{-G \cdot d}} = \frac{d + T_p (1 - e^{-G \cdot d})}{1 - e^{-G \cdot d}} \quad (16)$$

Para el cálculo del throughput en el caso ranurado, la probabilidad de éxito de una transmisión está dada por la probabilidad de que exista una única llegada condicionada al hecho de que se haya producido alguna llegada, pues el tiempo de ciclo se define siempre en relación a la llegada de algún paquete.

Así, la probabilidad de éxito queda determinada por:

$$P_{\acute{e}xito} = P[1 \text{ llegada} | \text{hay llegadas}] = \frac{P[1 \text{ llegada}]}{P[\text{hay llegadas}]} = \frac{P_a(1, d)}{1 - P_a(0, d)} = \frac{G \cdot d \cdot e^{-G \cdot d}}{1 - e^{-G \cdot d}} \quad (17)$$

Por lo que el throughput puede obtenerse como:

$$S_{SLOTTED} = \frac{T_p \cdot P_{\acute{e}xito}}{T_{ciclo}} = \frac{T_p \cdot G \cdot d \cdot e^{-G \cdot d}}{d + T_p (1 - e^{-G \cdot d})} \quad (18)$$

Análisis de R-ISMA

Puede verse en los diagramas temporales correspondientes a S-ISMA, que al ocurrir una colisión un paquete completo es perdido, disminuyendo la eficiencia del sistema.

R-ISMA evita tales colisiones usando paquetes de reserva, los cuales son paquetes cortos que permiten a un terminal disponer del enlace en forma exclusiva durante un período de tiempo para enviar sus paquetes de datos.

En R-ISMA, un terminal con datos para transmitir debe enviar primero un paquete de reserva, siempre que el canal de subida se encuentre desocupado. Si la señal BUSY está presente en el canal de bajada, el terminal esperará a la finalización de ésta, y luego enviará el paquete de reserva.

Si el paquete de reserva enviado no colisiona con ningún otro, 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 quita la señal BUSY del canal de bajada, indicando que el canal de subida está nuevamente disponible para realizar pedidos de reserva.

En caso de que dos o más pedidos de reserva sean realizados en el mismo time slot y colisionen, la estación base indicará esta situación al no activar la señal de ocupación en el canal de bajada.

Al no recibir la señal BUSY en el time slot siguiente, los móviles no enviarán sus mensajes y esperarán un tiempo aleatorio, luego del cual intentarán la reserva del canal nuevamente.

A continuación se muestra el esquema temporal de R-ISMA:

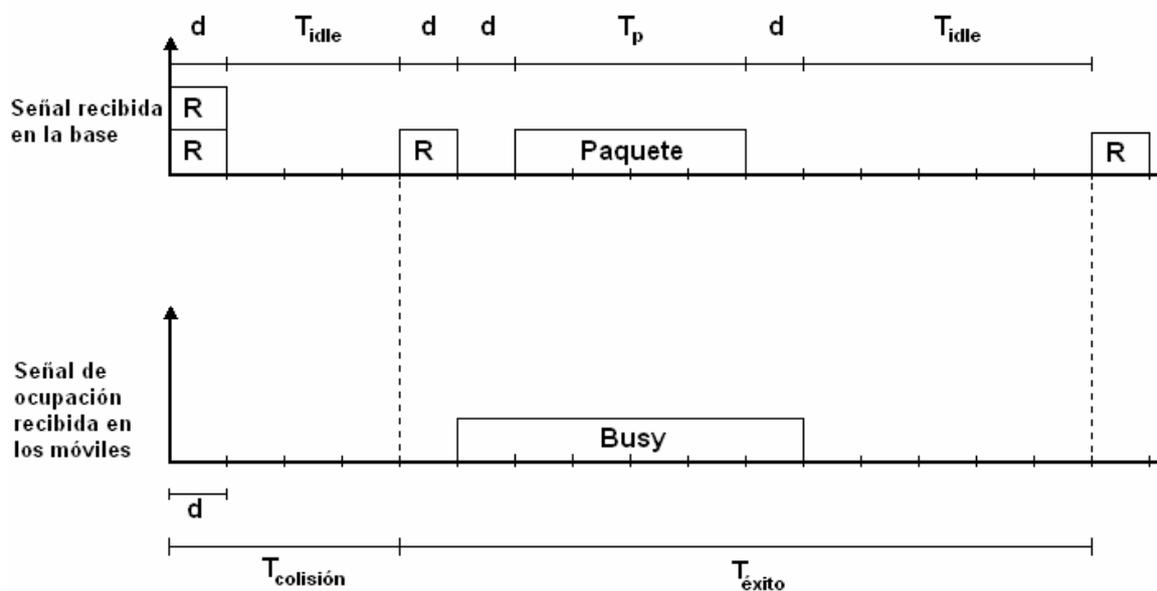


Figura 4 Diagrama de tiempo del funcionamiento de R-ISMA.

En el caso del protocolo R-ISMA, el tiempo de ciclo quedará determinado por el intervalo entre la aparición de dos paquetes de reserva consecutivos que no colisionen entre sí, de forma similar al caso del protocolo S-ISMA, que determina el tiempo de ciclo en función de la aparición de los paquetes de datos.

En la figura se observa que el tiempo de ciclo puede tomar dos valores:

Tiempo de ciclo de colisión:

$$T_{colisión} = d + T_{idle} \quad (19)$$

Tiempo de ciclo exitoso:

$$T_{éxito} = T_p + 3d + T_{idle} \quad (20)$$

Según lo definido para el caso de S-ISMA, el tiempo medio de ciclo es:

$$E[T_{ciclo}] = E[T_{colisión}] \cdot P_{colisión} + E[T_{éxito}] \cdot P_{éxito} \quad (21)$$

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

Dado que los paquetes de reserva en R-ISMA cumplen con la misma estadística de llegadas que los paquetes de datos en S-ISMA, el valor medio de T_{idle} será el mismo para ambos casos. De la deducción realizada para S-ISMA:

$$E[T_{idle}] = \frac{d \cdot e^{-G \cdot d}}{1 - e^{-G \cdot d}} \quad (22)$$

La probabilidad de que un paquete de reserva sea exitosamente transmitido está dada por la probabilidad de que exista una única llegada condicionada al hecho de que se haya producido alguna llegada, pues el tiempo de ciclo se define siempre en relación a la llegada de algún paquete de reserva.

Esta definición es análoga a la probabilidad de éxito para el protocolo S-ISMA, de donde:

$$P_{éxito} = P[1 \text{ llegada} | \text{hay llegadas}] = \frac{P[1 \text{ llegada}]}{P[\text{hay llegadas}]} = \frac{P_a(1, d)}{1 - P_a(0, d)} = \frac{G \cdot d \cdot e^{-G \cdot d}}{1 - e^{-G \cdot d}} \quad (23)$$

Distribuyendo los productos y eliminando términos en la ecuación del tiempo medio de ciclo se llega a:

$$E[T_{ciclo}] = 2d \cdot P_{éxito} + T_p \cdot P_{éxito} + d + E[T_{idle}] \quad (24)$$

Reemplazando $E[T_{idle}]$ y $P_{éxito}$ en la ecuación anterior:

$$E[T_{ciclo}] = (2d + T_p) \cdot \frac{G \cdot d \cdot e^{-G \cdot d}}{1 - e^{-G \cdot d}} + d + \frac{d \cdot e^{-G \cdot d}}{1 - e^{-G \cdot d}} = \frac{d + (2d + T_p) \cdot G \cdot d \cdot e^{-G \cdot d}}{1 - e^{-G \cdot d}} \quad (25)$$

Finalmente, el throughput vendrá dado por:

$$S_{R-ISMA} = \frac{T_p \cdot P_{éxito}}{E[T_{ciclo}]} = \frac{T_p \cdot \frac{G \cdot d \cdot e^{-G \cdot d}}{1 - e^{-G \cdot d}}}{\frac{d + (2d + T_p) \cdot G \cdot d \cdot e^{-G \cdot d}}{1 - e^{-G \cdot d}}} = \frac{T_p \cdot G \cdot e^{-G \cdot d}}{1 + (2d + T_p) \cdot G \cdot e^{-G \cdot d}} \quad (26)$$

IV Simulaciones

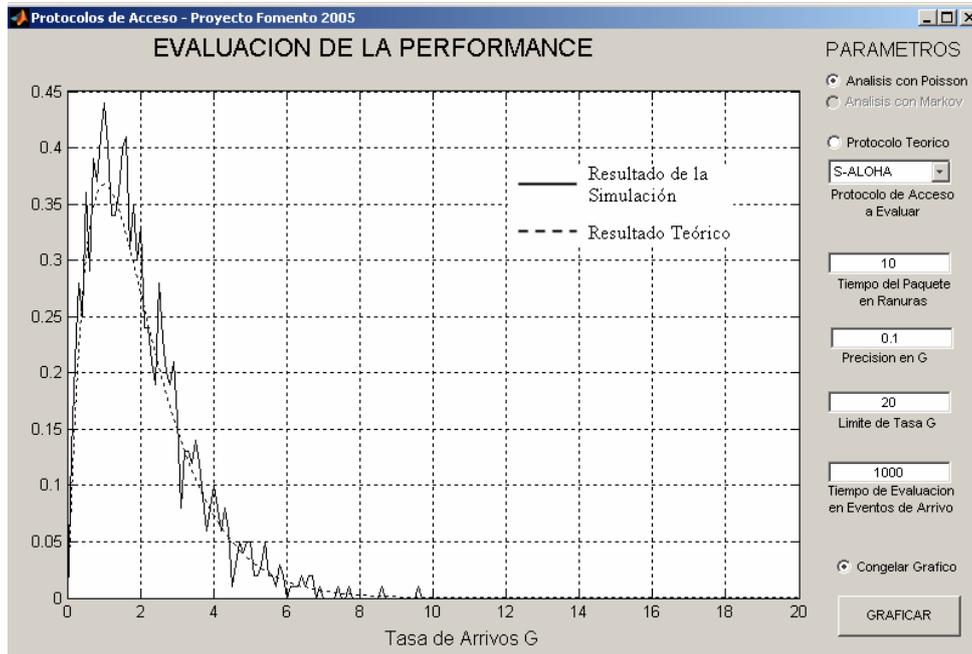


Figura 5 Diagrama del Throughput en función de G de S-Aloha.

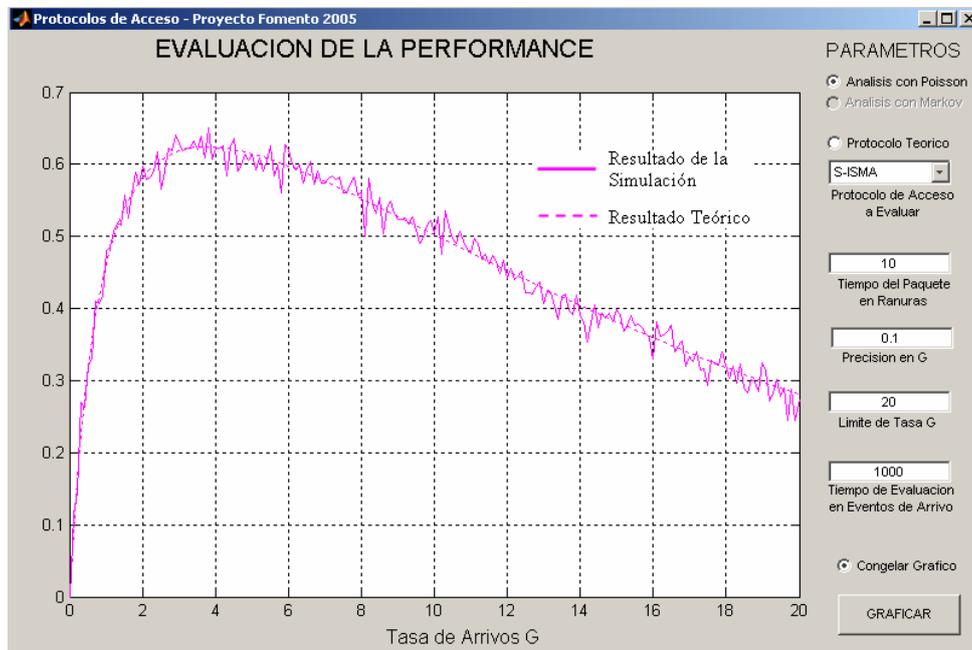


Figura 6 Diagrama del Throughput en función de G de S-ISMA.

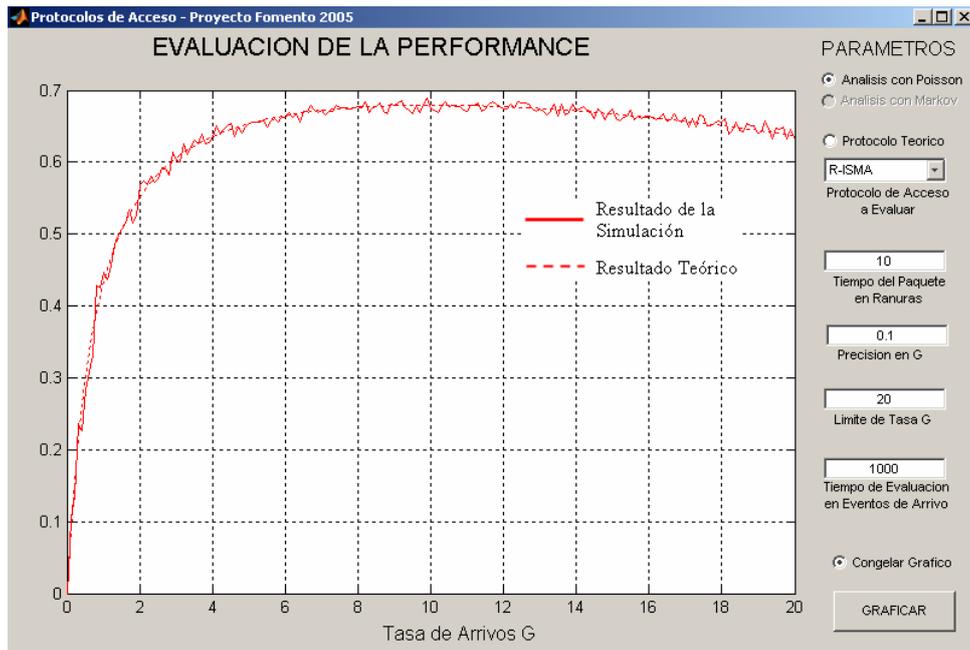


Figura 7 Diagrama del Throughput en función de G de R-ISMA.

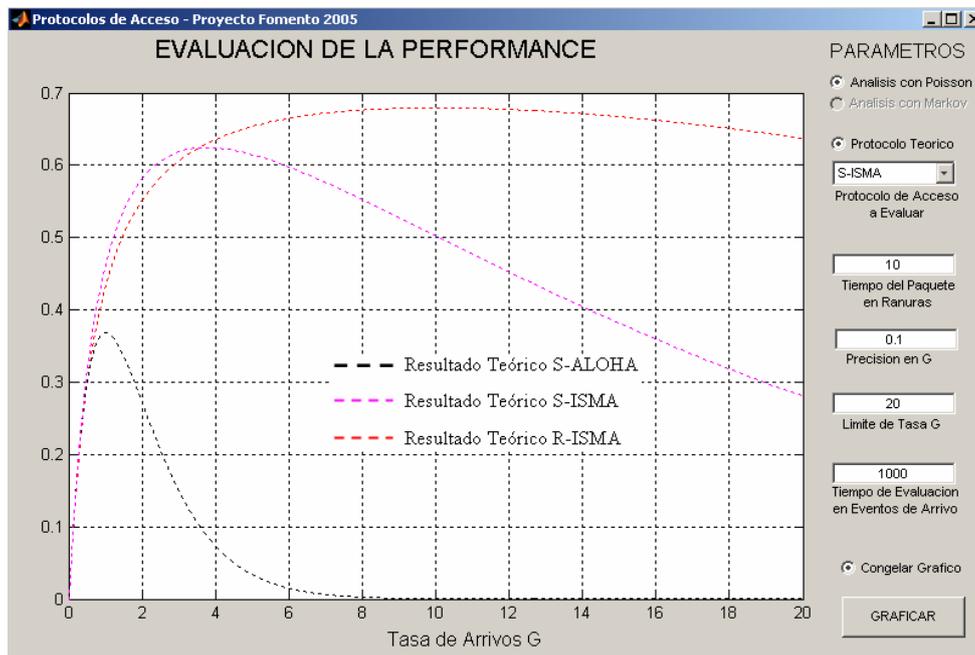


Figura 8 Comparación de la eficiencia de los diferentes protocolos

V Conclusiones

A continuación se analiza el rendimiento, en términos del throughput, para S-ALOHA, S-ISMA y R-ISMA, en función de la carga total del sistema, en paquetes por unidad de tiempo, tomando como unidad el tiempo d , definido anteriormente. Expresando el tamaño del paquete T_p como porcentaje del tamaño de d . Se asume para el análisis a realizar un valor de d igual a uno, por lo que T_p tomará valores entre uno a infinito. Esto es equivalente a tomar a T_p como unidad y variar a d

porcentualmente con respecto a T_p , de esta forma d podrá tomar valores entre cero y uno como fue expuesto en los análisis anteriores.

En las figuras 5 a la 7 se muestra el comportamiento de los protocolos nombrados, para un valor típico de T_p del 10%, pudiendo observarse que los resultados teóricos se corresponden con las simulaciones.

En la figura 8 puede observarse cómo el rendimiento obtenido por S-ISMA es muy superior al de S-ALOHA al aumentar la carga del sistema, por la ventaja de contar con una señalización centralizada que evite en gran parte la ocurrencia de colisiones. También se ve superado la eficiencia del sistema S-Aloha por el protocolo R-ISMA debido a que éste último es de características similares al S-ISMA.

Podemos observar que para cargas bajas, entre 0 y 4, el comportamiento del protocolo R-ISMA se ve superado por el S-ISMA. Esto se da porque el protocolo R-ISMA posee una redundancia tal que supera el tiempo utilizado por los paquetes colisionados en S-ISMA. Pero al aumentar la carga, mayor a 4, la redundancia de R-ISMA es menor que el tiempo utilizado por los paquetes colisionados en S-ISMA, causando que el sistema sea más eficiente y estable en R-ISMA que en S-ISMA.

Vemos que todos los protocolos alcanzan un valor máximo de throughput, luego del cual su rendimiento empieza a decaer, por el aumento de la cantidad de colisiones.

Se muestra una tabla con los valores máximos de throughput obtenidos para cada uno de los protocolos, junto al valor de G en el que se producen, para el caso mencionado ($T_p = 10\%$):

Tabla 1 El Throughput máximo para un dado G

Protocolo	Throughput máximo	G
S-ALOHA	0.36	1
S-ISMA	0.63	3
R-ISMA	0.69	9.5

Del anterior análisis se puede concluir que el tipo de protocolo a utilizar en una interfaz inalámbrica de un sistema de comunicación móvil dependerá de las características del tráfico ó del tipo de servicio a prestar por dicho sistema. Dado que el protocolo R-ISMA no supera en eficiencia al S-ISMA en todo el intervalo de variación de G .

VII Bibliografía

- [1] Gang Wu, Kaiji Mukumoto y Akira Fukuda. *Performance Evaluation of Reserved Idle Signal Multiple-Access Scheme for Wireless Communication Networks*. IEEE Transactions on vehicular technology, vol. 43, No 3, 1994.
- [2] Hassan KHALIL. *Stochastic Modelling for Wireless Communication Networks-Multiple Access Methods*. U.U.D.M. Project Report 2003
- [3] Jordi Pérez Romero. *Contribución al Estudio de Técnicas de Acceso Aleatorio y al Análisis de la Calidad de Servicio en Sistemas de Transmisión por Paquetes para Comunicaciones Móviles basadas en CDMA*. 2001.
- [4] Vijay K. Garg, Joseph E. Wilkes. *Wireless and Personal Communications Systems*. Prentice Hall, ISBN: 0-13-234626-5.
- [5] José María Hernando Rábanos. *Comunicaciones Móviles Segunda Edición*. Centro de Estudios Ramón Areces. ISBN: 84-8004-635-X.