

UNIVERSIDAD POLITECNICA DE CATALUÑA
ESCUELA TECNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES
DE BARCELONA

TESIS DOCTORAL

EVALUACION DE LOS PROTOCOLOS DE
ACCESO AL MEDIO CSMA/CD (ACCESO
MULTIPLE CON ESCUCHA DE CANAL Y
DETECCION DE COLISION) Y PASO DE
TESTIGO, EN REDES LOCALES CON
TOPOLOGIA BUS

LUZ BALADO SUAREZ

Barcelona, Enero 1987

4.3 APROXIMACIONES A LA DISTRIBUCION DEL TIEMPO DE CICLO

El tratamiento de modelos de estación con servicio no exhaustivo, en general, implica mayor complejidad matemática que los modelos con servicio exhaustivo. En el caso de almacenamiento infinito, los resultados, salvo el caso de dos colas M/G/1 (Eis,79) sin tiempo de conmutación, se obtienen mediante el planteamiento de la hipótesis de independencia por la cual los procesos estocásticos en las colas se consideran independientes (Kue,79).

Mediante esta hipótesis se llega a resultados (HaO,72) que determinan la distribución del tiempo de ciclo, en forma de transformadas, para colas G/G/1 con almacenamiento infinito y condiciones estacionarias.

Este resultado fue ampliado posteriormente por Kuehn (Kue,79) incluyendo la dependencia introducida por la ocupación o desocupación de la cola en estudio.

En este apartado se analiza, en forma similar al estudio de Yuen (YBN,72) para tráfico ligero y estaciones sin almacenamiento, la media y variancia del tiempo de ciclo, concretando el análisis a colas M/G/1 y red equilibrada.

Este estudio permite obtener cotas superior e inferior del primer y segundo momentos del tiempo de ciclo que amplían los resultados de Yuen en el caso de estación sin almacenamiento; y analizar la incidencia de la hipótesis de independencia en el caso de estación con almacenamiento infinito.

Se inicia el apartado con el estudio de los momentos del tiempo de ciclo en función de la probabilidad de ocupación de las colas. El estudio de esta probabilidad conduce a los resultados para los dos modelos de estación que se

presentan en los apartados 4.3.2 para estación sin almacenamiento y 4.3.3 para estación con almacenamiento infinito.

4.3.1 Primer y segundo momentos del tiempo de ciclo

En este apartado nos ocupamos de analizar el primer y segundo momentos de la variable aleatoria tc_i (tiempo de ciclo) que definimos de la siguiente manera:

tc_i variable aleatoria determinada por el tiempo que transcurre entre dos llegadas de servicio consecutivas a la estación "i", en régimen estacionario.

\overline{tc}_i primer momento de tc_i

\overline{tc}_i^2 segundo momento de tc_i

Teniendo en cuenta que el servicio es no exhaustivo y para una red con N estaciones podremos plantear el valor de tc_i en la siguiente forma:

$$tc_i = a_1 h_1 + a_2 h_2 + \dots + a_j h_j + \dots + a_N h_N + U_1 + U_2 + \dots + U_j + \dots + U_N \quad (C4.3)$$

Donde el término h_j es una variable aleatoria que determina el tiempo de utilización de servicio de la estación j; este tiempo vendrá determinado por la distribución de longitudes de trama, ya que el servicio de tipo no exhaustivo libera una trama por servicio; y a_j es una variable aleatoria discreta cuyo valor es uno si la cola j está ocupada y cero si está vacía, siguiendo la denominación de Yuen (YBN,72). Por tanto la variable a_j es

una variable aleatoria de Bernoulli (Roh,76) y sus momentos primero y segundo cumplen las relaciones:

$$\overline{a_j} = P(a_j=1) \quad (C4.4)$$

$$\overline{a_j^2} = P(a_j=1) = \overline{a_j}$$

Es decir, que el primer momento es la probabilidad de que el servicio encuentre la cola j ocupada; valor que coincide además con el segundo momento.

A continuación podemos calcular el primer momento de tc_i , considerando que el primer momento de una suma de variables aleatorias es igual a la suma de los primeros momentos de estas variables:

$$\overline{tc_i} = E\left(\sum_{j=1}^N a_j h_j\right) + E\left(\sum_{j=1}^N U_j\right) \quad (C4.5)$$

Centraremos el estudio en el caso de colas tipo M/G/1, longitud de trama constante y red equilibrada en tráfico y estructura física.

Por estructura física equilibrada entendemos aquella red en la que las distancias entre estaciones son idénticas. Esto permite considerar el tiempo de transferencia de testigo U_j de la ecuación C4.2, obtenido en el apartado 4.2.1, independiente de j de valor U . Bajo esta hipótesis, el tiempo perdido en paso de testigo en un ciclo de servicio se puede expresar en la forma:

$$\sum_{j=1}^N E(U_j) = N.U \quad (C4.6)$$

Para analizar el caso de longitud de trama constante, definiremos una nueva variable aleatoria discreta ts_j de valor cero si la estación j no tiene tramas para transmitir y valor H_j , constante y distinto de cero si la estación tiene alguna trama almacenada.

El primer y segundo momentos de esta nueva variable pueden expresarse, en función de a_j , en la forma:

$$\overline{ts_j} = H_j \overline{a_j} \quad (C4.7)$$

$$\overline{ts_j^2} = H_j^2 \overline{a_j^2}$$

Con estas consideraciones el primer momento de la variable longitud de ciclo queda, en función de la variable ts_j , como sigue:

$$\overline{tc_i} = \sum_{j=1}^N E(ts_j) + \sum_{j=1}^N E(U_j) \quad (C4.8)$$

Finalmente, la condición de tráfico equilibrado nos conduce al resultado de Yuen (YBN,72) para el tiempo medio de ciclo, en la forma:

$$\overline{tc} = NH\overline{a} + NU \quad (C4.9)$$

A continuación abordamos el análisis del segundo momento. Para ello empezamos considerando la constancia de los términos U_j en la expresión C4.3, ello nos permite expresar la variancia de tc_i en la forma:

$$\sigma_{tc_i}^2 = \sigma^2(ts_1 + ts_2 + \dots + ts_j + \dots + ts_N) \quad (C4.10)$$

Ya que el tiempo de transmisión de una estación es de esperar que se vea afectado por las transmisiones de las restantes estaciones, la variancia de la suma de ts_j deberá expresarse teniendo en cuenta la covariancia en la forma:

$$\sigma_{tc_i}^2 = \sum_{j=1}^N \sigma_{ts_j}^2 + 2 \sum_{l \neq m} \text{cov}(ts_l, ts_m) \quad l, m = 1, 2, \dots, N \quad (C4.11)$$

Para abordar el problema de la evaluación de la covariancia partiremos de la definición de la misma como media del producto menos el producto de medias:

$$\text{cov}(ts_l, ts_m) = E(ts_l, ts_m) - E(ts_l) E(ts_m) \quad (C4.12)$$

que, utilizando de nuevo la condición de longitud de trama constante e independiente de j nos conduce a:

$$\text{cov}(ts_l, ts_m) = H^2 E(a_l \cdot a_m) - H^2 \overline{a_l} \overline{a_m} \quad (C4.13)$$

El problema queda ahora reducido a la evaluación del valor medio del producto $a_l \cdot a_m$, que resolvemos teniendo en cuenta que tanto a_l como a_m son variables aleatorias de Bernoulli, su producto por tanto también será una variable aleatoria de Bernoulli que valdrá uno únicamente cuando ambas valgan uno.

Dado que a_l y a_m son dos variables aleatorias dependientes, expresaremos esta probabilidad en función de la probabilidad condicional.

$$P(a_l=1/a_m=1) = \frac{P(a_l \cdot a_m=1)}{P(a_m=1)} \quad (C4.14)$$

Bajo la hipótesis de tráfico equilibrado esta probabilidad condicional será independiente de los valores de l y m escogidos, para $l \neq m$, que denominaremos \bar{a} , lo cual permite expresar la variancia de t_c , en condiciones de tráfico equilibrado en la forma:

$$\sigma_{t_c}^2 = N\sigma_{t_s}^2 + N(N-1)H^2 (\bar{a} \bar{a}' - \bar{a}^2) \quad (C4.15)$$

para finalmente llegar a la expresión del segundo momento buscado:

$$\overline{t_c^2} = \sigma_{t_c}^2 + \bar{t_c}^2 = NH^2(\bar{a} - \bar{a}^2) + \bar{t_c}^2 + N(N-1)H^2(\bar{a} \bar{a}' - \bar{a}^2) \quad (C4.16)$$

Las expresiones C4.9 y C4.16 nos permiten evaluar la media y el segundo momento de la longitud del ciclo siempre y cuando podamos hacer una evaluación adecuada de \bar{a} y \bar{a}' . Evaluación que abordamos a continuación por separado para los dos modelos de estación, sin almacenamiento y con almacenamiento infinito.

4.3.2 Servicio no exhaustivo sin almacenamiento

En este apartado se obtienen las probabilidades \bar{a} y \bar{a}' para el caso de estación sin almacenamiento ampliando los resultados de tráfico ligero de Yuen mediante la acotación de \bar{a} y \bar{a}' . Estas acotaciones permiten a su vez acotar la media y la variancia del tiempo de ciclo, que se analizan en este apartado, y finalmente conducen a la obtención del retardo medio de trama que se realiza en el apartado 4.4.

Iniciamos el estudio por la evaluación de \bar{a} . Recordamos que \bar{a} es la probabilidad de que la estación esté ocupada en el momento de llegada del testigo. Para poder evaluarlo

deberemos hacer alguna hipótesis sobre el proceso de llegada de tramas a las colas. Consideraremos, tal y como planteábamos en el apartado 4.2, que tenemos llegadas Poisson, para cada estación, de tasa λ tramas/s, de igual valor para todas las estaciones debido a la condición de tráfico equilibrado. Por tanto quedará determinada por la probabilidad de una o más llegadas durante el período correspondiente al ciclo anterior a la llegada de servicio:

$$\begin{aligned}\bar{a}(t) &= (\text{Probabilidad de alguna llegada en } [0, t]) = \\ &= (1 - \text{Probabilidad de ninguna llegada en } [0, t]) = \\ &= 1 - \exp(-\lambda t)\end{aligned}\quad (\text{C4.17})$$

Si llamamos $t_c(t)$ a la densidad de probabilidad de t_c , podremos obtener \bar{a} integrando el producto de $a(t)$ por $t_c(t)$ desde cero a infinito, obteniendo la expresión:

$$\bar{a} = \int_0^{\infty} \bar{a}(t) t_c(t) dt = \int_0^{\infty} (1 - e^{-\lambda t}) t_c(t) dt = 1 - T_c^*(\lambda) \quad (\text{C4.18})$$

donde $T_c^*(\lambda)$ es la transformada de Laplace del tiempo de ciclo, evaluada en s igual a λ . Evidentemente $T_c^*(\lambda)$ es desconocida, lo cual nos lleva a realizar hipótesis simplificativas en la obtención de \bar{a} .

Buscaremos acotaciones de \bar{a} . Para ello utilizaremos el desarrollo en serie de la exponencial para acotar $(1 - \exp(-\lambda t))$ entre λt y $\lambda t - \frac{\lambda^2 t^2}{2}$, lo cual nos conduce a las siguientes acotaciones superior e inferior de \bar{a} :

$$\int_0^{\infty} (\lambda t - \frac{\lambda^2 t^2}{2}) t_c(t) dt \leq \bar{a} \leq \int_0^{\infty} \lambda t t_c(t) dt \quad (\text{C4.19})$$

y por tanto:

$$\lambda \bar{t}_c - \frac{\lambda^2 \overline{t_c^2}}{2} \leq \bar{a} \leq \lambda \bar{t}_c \quad (\text{C4.20})$$

Estas acotaciones nos permitirán en su momento acotar el primer y segundo momentos de tc .

De forma análoga a continuación abordamos la evaluación de \bar{a} .

La evaluación de \bar{a} puede realizarse teniendo en cuenta la siguiente relación:

$$a'(t) = (\text{Probabilidad de alguna llegada en } [0, t] / \text{Ciclo con una transmisión segura})$$

Si definimos $tc'(t)$ como la función de densidad de probabilidad de la variable aleatoria tc' , definida como el tiempo de ciclo con transmisión segura de la estación m , podremos expresar el valor de \bar{a} integrando el producto de $\bar{a}'(t)$ por la densidad de probabilidad $tc'(t)$:

$$\bar{a}' = \int_0^{\infty} (1 - e^{-\lambda t}) tc'(t) dt \quad (C4.21)$$

Debido al desconocimiento de $tc'(t)$ nos ocuparemos de acotar superiormente este término utilizando el desarrollo en serie de la exponencial, de forma similar al planteado en la ecuación C4.19:

$$\bar{a}' \leq \lambda \overline{tc'} \quad (C4.22)$$

Donde el valor medio de tc' puede obtenerse de la expresión inicial del tiempo de ciclo, considerando que existe transmisión segura de la estación m y por tanto a vale uno:

$$\begin{aligned} \overline{tc'_i} &= a_1 h_1 + a_2 h_2 + \dots + h_m + \dots + a_N h_N + \\ &+ U_1 + U_2 + \dots + U_m + \dots + U_N \end{aligned} \quad (C4.23)$$

El valor medio de esta expresión en el caso de tráfico equilibrado, longitud de trama constante e independiente de j y tiempo de paso de testigo también independiente de j es, de forma análoga al desarrollo de \overline{tc} :

$$\overline{tc'} = H + (N-1)H\lambda\overline{tc'} + NU \quad (C4.24)$$

con lo cual obtenemos una acotación superior de $\overline{a'}$, a partir de la ecuación C4.28, en la forma:

$$\overline{a'} \leq \lambda \frac{H+NU}{1-(N-1)\lambda H} \quad (C4.25)$$

cota a la que denominaremos f .

Habiendo determinado las acotaciones de \overline{a} y $\overline{a'}$, continuamos con el cálculo de las acotaciones de los momentos del tiempo de acceso, que planteamos en la forma:

$$g \leq \overline{tc} \leq b \quad (C4.26)$$

$$\overline{tc'} \leq f \quad (C4.27)$$

donde "b" es la cota superior y "g" la cota inferior del primer momento de tc y "f" es la cota superior de $\overline{tc'}$. De igual forma podemos plantear acotaciones de tc^2 :

$$d \leq \overline{tc^2} \leq e \quad (C4.28)$$

donde "e" es la cota superior y "d" la cota inferior del segundo momento.

Dadas las acotaciones de \overline{a} y $\overline{a'}$ obtenidas en las ecuaciones C4.19 y C4.25, y debido al crecimiento monótono de la media de tc y tc' en función de \overline{a} y $\overline{a'}$ respectivamente, podremos

obtener los valores de g , b y f mediante las siguientes ecuaciones:

$$g = NH \left(\lambda g - \frac{\lambda^2 e}{2} \right) \quad (C4.29)$$

$$b = N\lambda H b + NU \quad (C4.30)$$

$$f = H + (N-1)H\lambda b + NU \quad (C4.31)$$

es decir:

$$g = \frac{NU - N\lambda^2 H e/2}{1 - N\lambda H} \quad (C4.32)$$

$$b = \frac{NU}{1 - N\lambda H} \quad (C4.33)$$

$$f = \frac{H + NU}{1 - N\lambda H} \quad (C4.34)$$

Respecto a la obtención de d y e , siguiendo los resultados de la ecuación C4.16, podemos plantear la siguiente relación respecto a la cota superior del segundo momento de tc :

$$\overline{tc^2} \geq NH^2(\bar{a} - \bar{a}^2) + \overline{tc^2} \quad (C4.35)$$

Dado que el término de la derecha de la ecuación es una función monótonamente creciente con \bar{a} en el intervalo de validez de \bar{a} , es decir entre cero y uno, (demostración que se realiza en el Apéndice A4), se cumple la siguiente desigualdad:

$$\overline{tc^2} \geq NH^2 \left(\left(\lambda g - \frac{\lambda^2 e}{2} \right) - \left(\lambda g - \frac{\lambda^2 e}{2} \right)^2 \right) + g^2 = d \quad (C4.36)$$

quedando de esta forma determinada la cota inferior de $\overline{tc^2}$ a la que hemos denominado d.

Respecto a la cota superior, al igual que en el caso anterior, la monotonía creciente con \bar{a} del término:

$$NH^2(\bar{a} - \bar{a}^2) + \overline{tc^2} \quad (C4.37)$$

nos permite plantear una nueva relación de desigualdad en la forma:

$$\overline{tc^2} \leq NH^2(\lambda b - \lambda^2 b^2) + b^2 + N(N-1)H^2(\bar{a} \bar{a}' - \bar{a}^2) \quad (C4.38)$$

que finalmente nos conduce a la obtención de la cota superior e, utilizando una cota superior para el término $(\bar{a} \bar{a}' - \bar{a}^2)$, cota obtenida empleando las cotas superiores de \bar{a} y \bar{a}' en el producto de ambas y la cota inferior de \bar{a} en el término \bar{a}^2 , es decir:

$$(\bar{a} \bar{a}' - \bar{a}^2) \leq (\lambda b \lambda q - g^2) \quad (C4.39)$$

y por tanto e cumple la expresión:

$$e = NH^2(\lambda b - \lambda^2 b^2) + b^2 + N(N-1)H^2(\lambda^2 b q - g^2) \quad (C4.40)$$

La resolución del sistema formado por las ecuaciones C4.32, C4.33, C4.34, C4.36 y C4.40 conduce a la obtención de las cotas a, b, d y e y por tanto a las acotaciones de \overline{tc} y $\overline{tc^2}$ buscadas.

A continuación se presentan gráficamente estas acotaciones, bajo distintos parámetros de la red, en función del tráfico de entrada lo cual nos permitirá apreciar la convergencia de las cotas obtenidas.

Las Figuras 4.3 y 4.4 presentan estas acotaciones para una red trabajando con 1, 2, 10, 100 y 200 estaciones, longitud de trama de lms y tiempo de transferencia de testigo de .01ms.

En la Figura 4.3 puede observarse que para λ igual a cero el valor del tiempo medio de ciclo coincide con el tiempo de paso de testigo por las N estaciones, al igual que en la Figura 4.4 y debido a la constancia de U planteada, el segundo momento se inicia con un valor igual al cuadrado del valor medio.

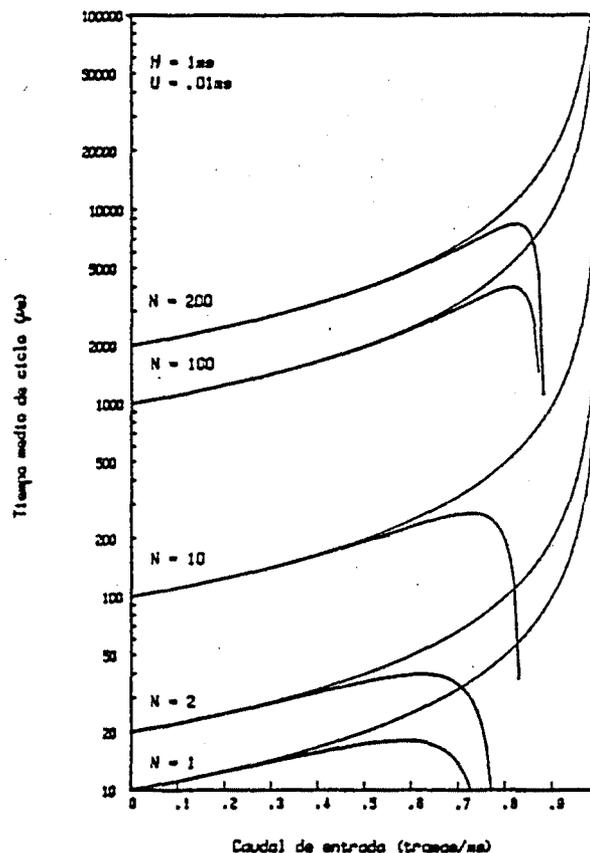


Figura 4.3 Acotaciones del tiempo medio de ciclo en una red sin almacenamiento en función del número de estaciones de la red.

Se observa en ambas figuras que la cota inferior presenta un máximo. A partir de este máximo los resultados se vuelven

escasamente significativos, siendo la presencia de este máximo debida al crecimiento exponencial de la cota superior de tc^2 , e, que interviene en el cálculo de esta cota inferior.

La convergencia de las cotas para tráfico de entrada tendiendo a cero y el mantenimiento de esta convergencia para tráficos relativamente elevados permite concluir que los resultados de tráfico ligero de Yuen, coincidentes con la cota superior, pueden extenderse sin errores significativos a caudales cercanos al 50% del tráfico máximo que puede transportar la red; tráfico máximo que se obtine de la relación $N \cdot \lambda_{max} / (H+U) = 1$.

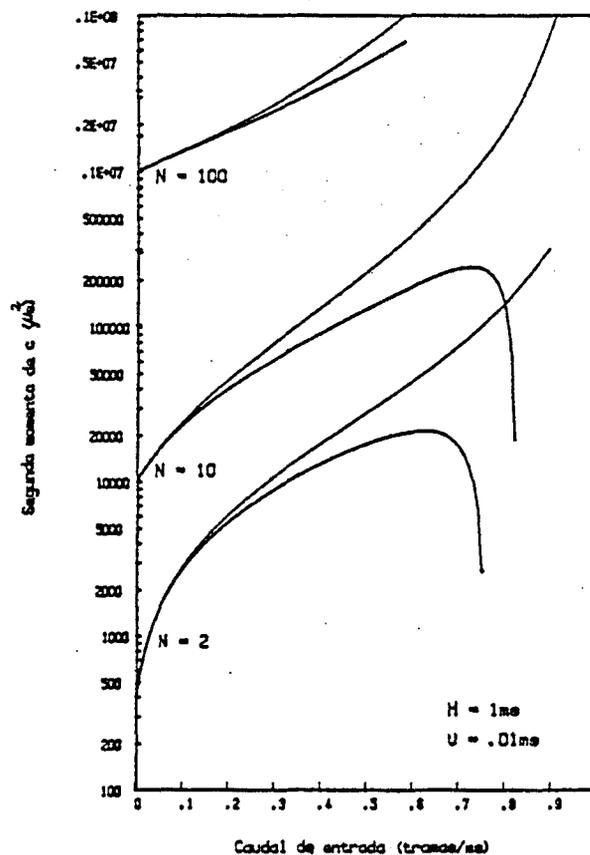


Figura 4.4 Acotaciones del segundo momento del tiempo de ciclo en una red sin almacenamiento en función del número de estaciones de la red.

En la Figura 4.4 donde se presentan los segundos momentos, la separación de la cota inferior y superior desde valores pequeños de λ , refleja la incidencia de la covariancia en el estudio del segundo momento, incidencia que no tienen en cuenta los modelos que utilizan la hipótesis de independencia.

Esta separación afectará significativamente al tiempo que tarda en llegar el testigo a una estación, como veremos en el apartado 4.4, y, por tanto, al retardo medio de transmisión de las tramas.

Antes de abordar el análisis del retardo en el apartado que sigue realizamos el estudio de los momentos primero y segundo del tiempo de ciclo para el modelo de estación con almacenamiento infinito.

4.3.3 Servicio no exhaustivo y almacenamiento infinito

La inexistencia de almacenamiento en las estaciones provoca pérdidas de trama debido al bloqueo de la estación cuando no ha transmitido la trama que ocupa su única unidad de transmisión.

Esta pérdida puede evitarse, bien bloqueando la generación mientras no se ha transmitido la trama anterior, en lo que se denomina control de entradas, bien utilizando unidades de almacenamiento; situación que modelamos en este apartado.

El planteamiento del tiempo de ciclo y la obtención del primer y segundo momentos es idéntico al utilizado en el apartado 4.3.1, ya que la capacidad de almacenamiento de la estación no afecta al desarrollo, salvo en la probabilidad de ocupación de la cola, por tanto se siguen cumpliendo las

relaciones C4.9 y C4.16 que determinan el primer y segundo momentos del tiempo de ciclo respectivamente.

A partir de este punto y basándonos en la condición de estabilidad de la cola podemos ahora plantear en este caso el valor de \bar{a} y \bar{a}' ; para ello partiremos del planteamiento de la condición de estabilidad de la cola en estado estacionario (Kue,79), es decir:

número de llegadas medio=número de salidas medio

Dado que la media del número de salidas es igual a la probabilidad de encontrar algún elemento en la cola y esta probabilidad es precisamente \bar{a} podemos decir:

$$\bar{a} = \lambda \bar{t}_c \quad (C4.41)$$

De igual forma respecto al valor de \bar{a}' :

$$\bar{a}' = \lambda \bar{t}_c' \quad (C4.42)$$

El valor del tiempo medio de ciclo, obtenido a partir de las ecuaciones C4.9 y C4.41 coincide con el resultado clásico (HaO,79):

$$\bar{t}_c = \frac{NU}{1-N\lambda H} \quad (C4.43)$$

Vemos pues que lo que en el caso anterior no era más que una hipótesis aproximada, en el caso de almacenamiento infinito, es un tratamiento riguroso de la evaluación del valor medio del tiempo de ciclo.

La diferencia entre ambos radica en el hecho de que la cola sin almacenamiento es estable por definición ya que rechaza

aquellas tramas que en el caso de cola infinita conducirían a la inestabilidad de la cola.

El tiempo de ciclo queda reducido, tal y como se refleja en la aproximación realizada, debido a la falta de contribución de las tramas rechazadas.

Concluimos pues que el análisis de servicio no exhaustivo con el modelo de estación con almacenamiento infinito conduce a una cota superior del modelo de estación sin almacenamiento.

Respecto al segundo momento las relaciones C4.16 y C4.41 conducen a la expresión del segundo momento del tiempo de ciclo.

$$\overline{tc^2} = NH^2(\lambda \overline{tc} - \lambda^2 \overline{tc^2}) + \overline{tc}^2 + N(N-1)H^2(\lambda^2 \overline{tc} \overline{tc'} - \lambda^2 \overline{tc^2})$$

(C4.44)

A continuación analizamos este resultado presentando en la Figura 4.5 la variancia del tiempo de ciclo comparada con los resultados previos con hipótesis de independencia de Kuehn (Kue,79) y Hashida-Ohara (HaO,72) para distintos valores del parámetro N, número de estaciones de la red, longitud de trama de lms y retardo de transferencia de testigo de 0.5ms.

En ella puede observarse el incremento de variancia que supone la evaluación del segundo momento teniendo en cuenta la covariancia. En el caso de una red con dos estaciones los resultados son coincidentes con los de Kuehn, tal y como puede observarse en la Figura 4.6, donde se presentan los resultados para N igual a 2 y distintos valores de tiempo de paso de testigo entre estaciones.

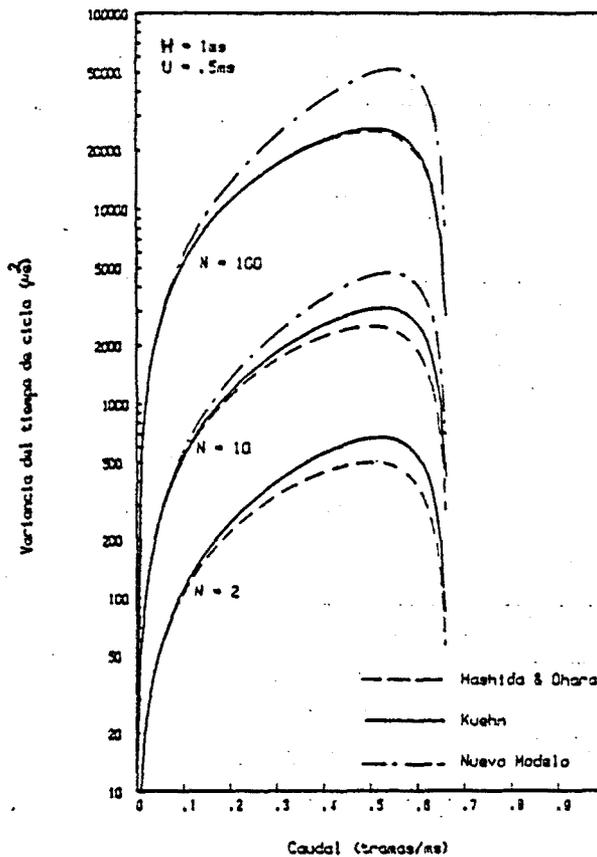


Figura 4.5 Variancia del tiempo de ciclo en el caso de almacenamiento infinito, en función del número de estaciones de la red.

Al variar el número de estaciones, sin embargo, el modelo de Kuehn reduce la diferencia con el inicial de Hashida y Ohara. En el presente modelo, el efecto de la covariancia parece tener mayor importancia a medida que aumenta el número de estaciones de la red. Este resultado refleja la incidencia de la hipótesis de independendia en la evaluación de estos sistemas.

Kuehn en su estudio presenta resultados de simulación para el caso de dos estaciones, lo cual permite en este punto confirmar los resultados del modelo para N igual a dos, dejando como tema de futuros trabajos la realización de modelos de simulación donde se implementen unidades de

almacenamiento en las estaciones. Estos modelos permitirán confirmar los resultados obtenidos para cualquier valor de N.

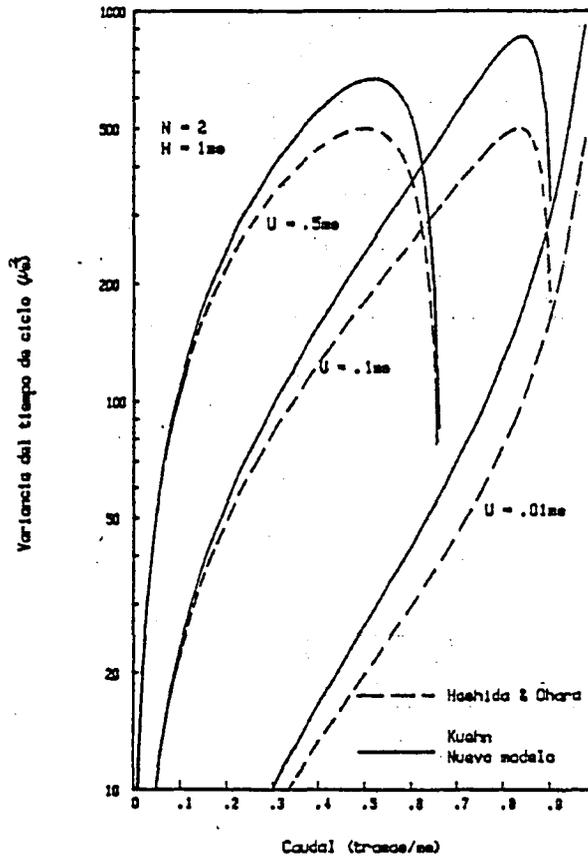


Figura 4.6 Variancia del tiempo de ciclo en el caso de almacenamiento infinito en función del tiempo de paso de testigo para una red con dos estaciones.

El estudio del tiempo de ciclo realizado hasta este punto nos permite abordar la evaluación del retardo medio de trama en función del tráfico de entrada de la red para los dos modelos de estación propuestos. Este análisis se realiza en el apartado 4.4 empezando por el caso de estación sin almacenamiento y finalizando con la evaluación del tiempo de espera en cola en el caso de almacenamiento infinito.

4.4 EVALUACION DEL RETARDO

El estudio realizado del tiempo de ciclo determina el tiempo de servicio de las colas M/G/1 del modelo propuesto en el apartado 4.2.2.

El retardo de trama depende del tiempo de servicio a través del resultado de Little (Lit,61), y del tiempo de vida residual (Fel,71), que permiten obtener respectivamente el tiempo de espera en cola y el de espera de testigo, para una trama que se encuentre en cabecera de cola.

El estudio del retardo se subdivide en dos apartados; uno en el que se analiza este último retardo basado en el modelo de estación sin almacenamiento; y un segundo apartado en el que se analiza el tiempo de espera en cola para el modelo de estación con almacenamiento infinito.

4.4.1 Retardo desde cabecera de cola

En este apartado se analiza el retardo para una trama en el caso de estación sin almacenamiento a partir de las acotaciones del primer y segundo momentos del tiempo de ciclo obtenidas en el apartado 4.3.2.

El valor medio del retardo de trama estará, en el caso de almacenamiento único, formado por la suma del valor medio de longitud de la trama más el tiempo de propagación de la señal por la red, tiempo al que deberemos sumar el retardo que sufre la trama desde que llega hasta que se produce la llegada del testigo.

Nuestro problema, por tanto, se limita a la obtención de la media del tiempo transcurrido desde el instante de llegada de trama a una estación y el instante de llegada del testigo a la misma. Tiempo al que denominaremos tiempo de acceso "ta".

Para ello partimos de la hipótesis de que el punto de llegada de trama a una estación se escoge aleatoriamente en el intervalo determinado por dos llegadas consecutivas de testigo a la estación objeto de estudio (Kle,75); lo cual permite resolver nuestro problema aplicando el concepto de "vida residual" , o "tiempo de espera residual" (Fel,71), utilizado en teoría de procesos regenerativos, a nuestro tiempo de acceso.

Ello nos permite obtener la transformada de Laplace de la función de densidad de probabilidad de ta, $T_a^*(s)$, suponiendo conocida la transformada de Laplace de la función de densidad de probabilidad de tc, $T_c^*(s)$, en la forma:

$$T_a^*(s) = \frac{1 - T_c^*(s)}{s\bar{t}_c} \quad (C4.45)$$

Con ello podemos obtener los momentos del tiempo de acceso en la forma:

$$\overline{t_a^n} = \frac{\overline{t_c^{n+1}}}{(n+1)\bar{t}_c} \quad (C4.46)$$

y más concretamente evaluar el valor medio de ta:

$$\bar{t}_a = \frac{\overline{t_c^2}}{2\bar{t}_c} \quad (C4.47)$$

en función del primer y segundo momentos de tc, o bien:

$$\bar{t}_a = \frac{\bar{t}_c}{2} + \frac{\sigma_{t_c}^2}{2\bar{t}_c} \quad (C4.48)$$

en función de la media y variancia de t_c .

A partir de las acotaciones g , b , d y e , obtenidas en el apartado 4.3.2, podremos acotar \bar{t}_a en la forma:

$$\frac{d}{2b} \leq \bar{t}_a \leq \frac{e}{2g} \quad (C4.49)$$

Dado que el tiempo de acceso es en este caso la única variable del retardo dependiente del tráfico de entrada, nos interesa analizar estos resultados de forma gráfica.

Estos resultados se contrastan con los resultados del modelo de simulación, obtenidos con un intervalo de confianza del 90%.

Respecto a los resultados de simulación, son válidas las consideraciones realizadas en el apartado 3.4, con la consideración adicional de la existencia en el programa de simulación de un mecanismo de adelanto de paso de testigo. Este mecanismo se ha realizado con la intención de reducir en lo posible el tiempo dedicado a la simulación en circunstancias de tráfico ligero. Para ello se ha reducido el proceso circular del testigo, por las estaciones no ocupadas, gracias al conocimiento por parte del gestor de la simulación de la siguiente estación poseedora de trama para transmitir.

Las Figuras 4.7 a 4.11 reflejan los valores de estas cotas obtenidas con los siguientes valores: longitud de trama de lms, longitud de transferencia de testigo de .0lms y en una red con 1, 5, 10, 20 y 99 estaciones respectivamente.

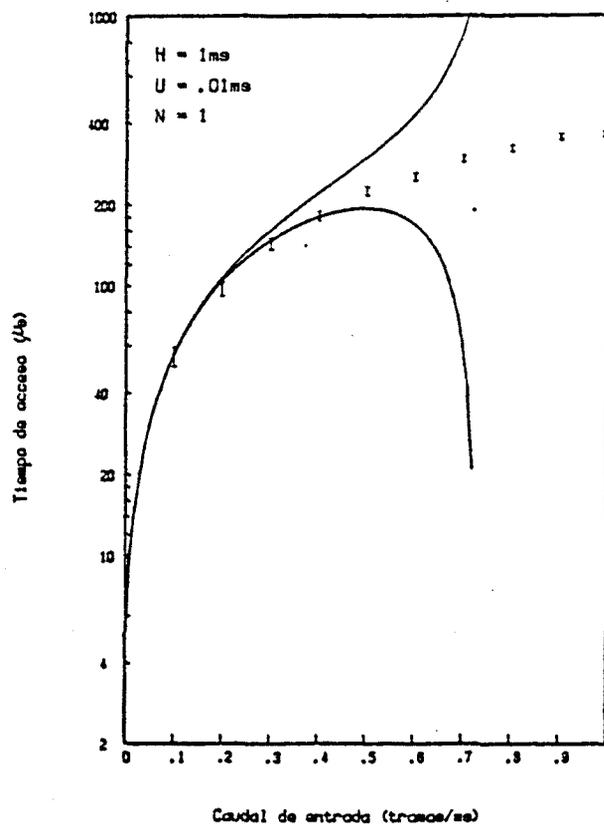


Figura 4.7 Acotaciones del tiempo de acceso en una red sin almacenamiento y una estación.

Puede observarse que las cotas son convergentes para λ cero, e iguales a la mitad del ciclo medio, consistente en este caso, como ya comentamos anteriormente, en el tiempo de paso de testigo por las N estaciones, en el caso de inexistencia de tramas en las estaciones.

La cota inferior se deteriora para un cierto valor de λ , debido a la no dependencia monótona de \bar{a} con λ , en el caso de optar por la cota inferior de \bar{a} , tal y como habíamos observado en el caso de las acotaciones de \bar{t}_c y t_c^2 . En este caso, además este decrecimiento provoca un crecimiento excesivo de la cota superior debido a la interdependencia en la acotación de \bar{t}_a .

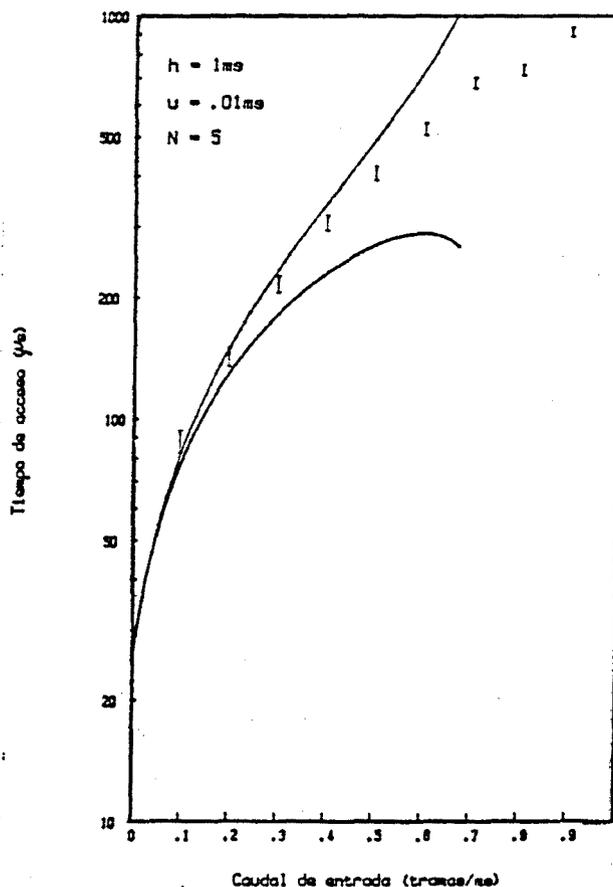


Figura 4.8 Acotaciones del tiempo de acceso en una red sin almacenamiento y cinco estaciones.

Los resultados de simulación se han mostrado coincidentes con los teóricos, con una cierta tendencia hacia la cota superior, hasta el punto en que esta se deteriora. Ello conduce a pensar en la necesidad de tener presente la influencia de la covariancia en el funcionamiento de la red y la incidencia que supone asumir la hipótesis de independencia.

Finalmente se presentan las acotaciones del retardo medio de trama normalizada a longitud de trama en función del tráfico de entrada. Como comentamos al inicio de estos resultados el caso de estación sin almacenamiento refleja el retardo medio de trama desde cabecera de cola y por ello podemos obtener el retardo " \bar{r} " a partir del tiempo de acceso

como la suma de medias de retardos, en la forma:

$$\bar{r} = l_t + \tau + \tau \bar{a} \tag{C4.50}$$

siendo tau el tiempo medio de propagación de la trama hasta la estación destino.

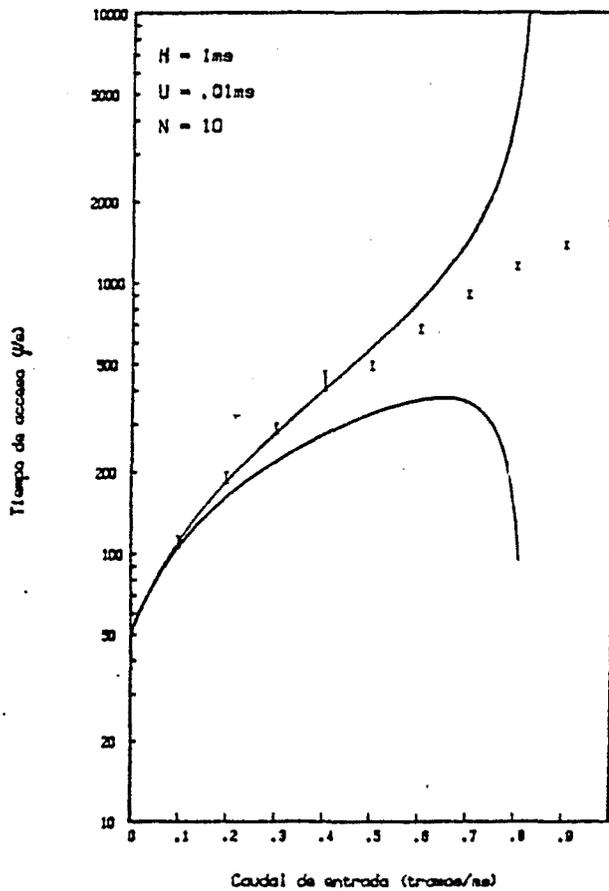


Figura 4.9 Acotaciones del tiempo de acceso en una red sin almacenamiento y diez estaciones.

Las acotaciones del tiempo medio de acceso, y teniendo en cuenta que debido al servicio no exhaustivo H es equivalente a la longitud de trama l_t , nos conducen a las cotas de \bar{r} siguientes:

$$l_t + \tau + \frac{d}{2b} \leq \bar{r} \leq l_t + \tau + \frac{e}{2g} \tag{C4.51}$$

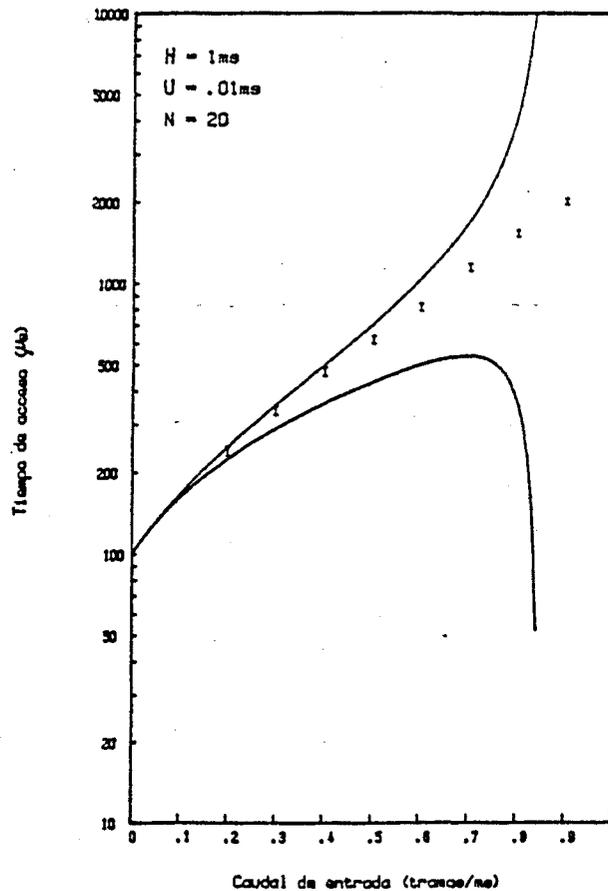


Figura 4.10 Acotaciones del tiempo de acceso en una red sin almacenamiento y veinte estaciones.

Para observar la incidencia del tiempo de acceso en el retardo en el caso de estaciones sin almacenamiento, presentamos en las Figuras 4.12 y 4.13 las características Caudal de entrada - Retardo, normalizadas a longitud de trama, a igualdad de tiempo de paso de testigo, para distintos valores de N , utilizando en el primer caso la cota inferior y en el segundo la cota superior.

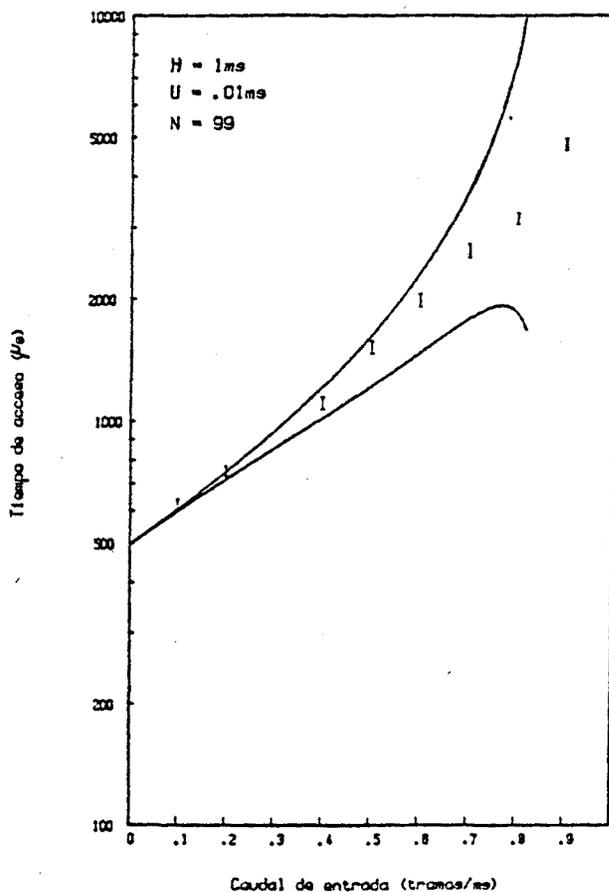


Figura 4.11 Acotaciones del tiempo de acceso en una red sin almacenamiento y cien estaciones.

En ellas puede observarse que en el caso de 100 estaciones el retardo con tráfico ligero, introducido por el mecanismo de rotación de testigo, es equivalente en media, y para los parámetros de la figura 4.12 y 4.13, a la transmisión de seis tramas.

Concluyendo, el modelo propuesto en el caso de estación sin almacenamiento nos ha permitido obtener acotaciones del retardo medio de trama a partir del estudio de la distribución del tiempo de ciclo en el que se amplían los resultados de tráfico ligero de Yuen.

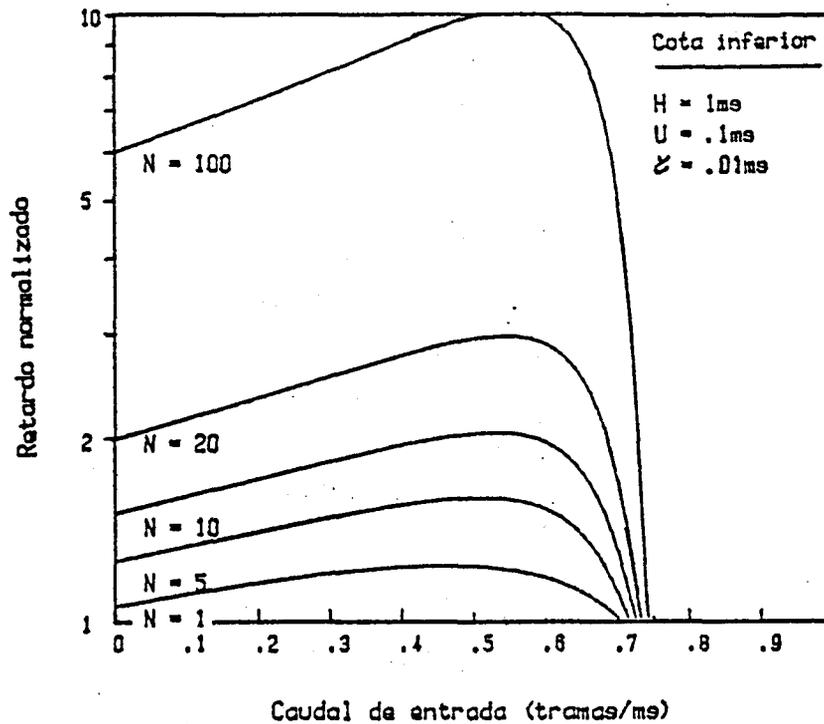


Figura 4.12 Características caudal retardo para una red sin almacenamiento en función del número de estaciones. Cota inferior.

Estos resultados permiten observar, en el caso del primer momento, una buena convergencia de las cotas desde tráfico ligero hasta tráficos en torno al 50% del tráfico máximo que puede soportar la red.

En el caso del segundo momento, la divergencia para tráficos cercanos a cero de las cotas permite afirmar que la adopción de la hipótesis de independencia puede conducir a errores significativos en la evaluación del retardo.

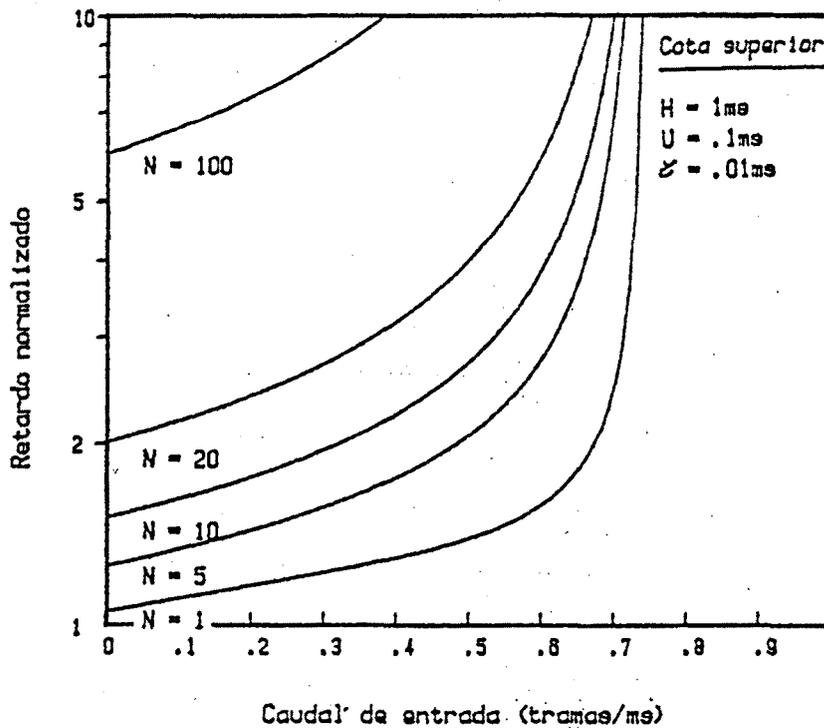


Figura 4.13 Características caudal retardo para una red sin almacenamiento en función del número de estaciones. Cota superior.

En el apartado que sigue se completa el estudio para el caso de almacenamiento infinito. Se obtienen las características Caudal-Retardo en estado estacionario, considerando la dependencia estadística entre estaciones tenida en cuenta en el apartado 4.3.1.

4.4.2 Tiempo de espera en cola

En el apartado anterior analizamos el retardo de las tramas que se encuentran en cabecera de cola a partir de un modelo

sin almacenamiento.

En este apartado observamos como queda afectado el retardo por la presencia de cola en la estación a la que llega el servicio.

El retardo estará formado en este caso al igual que en el anterior por la longitud de la trama más el retardo de propagación por la red, al que habremos de sumar el tiempo de espera en cola, tiempo al que denominamos w .

$$\bar{r} = l_t + r + \bar{w} \quad (C4.52)$$

El tiempo de espera estará formado por el retardo desde la llegada de la trama hasta la llegada del servicio, más el tiempo que tardan en transmitirse las tramas encoladas anteriormente a la trama objeto de estudio.

El primer retardo corresponde, al igual que en el apartado anterior, al tiempo de vida residual en un ciclo de media \bar{tc} y segundo momento $\overline{tc^2}$, valiendo por tanto:

$$\bar{t}_a = \frac{\overline{tc^2}}{2\bar{tc}} \quad (C4.53)$$

El segundo retardo puede evaluarse en media multiplicando el tiempo de ciclo medio por el número medio de tramas en la cola en el momento de llegada de la trama objeto de estudio.

Este número medio, \bar{q} , puede obtenerse aplicando el resultado de Little a una cola con tasa de entrada λ :

$$\bar{q} = \lambda \bar{w} \quad (C4.54)$$

tenemos por tanto:

$$w = \frac{\overline{tc^2}}{2\bar{tc}} + \lambda \bar{w} \bar{tc} \quad (C4.55)$$

siendo el tiempo de espera:

$$\bar{w} = \frac{\overline{tc^2}}{2\overline{tc}} \frac{1}{1-\lambda\overline{tc}} \quad (C4.56)$$

Para $\lambda = 0$ este tiempo de espera coincide con el tiempo de acceso considerado en el modelo de almacenamiento único, mientras que para $\lambda = 1/\overline{tc}$ el tiempo de espera se hace infinito ya que no se cumple la condición de estabilidad de la cola.

Las Figuras 4.14 y 4.15 reflejan el comportamiento del tiempo de acceso y el retardo normalizado en función del número de estaciones, en comparación con los resultados de Hashida y Ohara (HaO,72) que utilizan la hipótesis de independencia en su modelo y los de Kuehn (Kue,79), que también utiliza hipótesis de independencia, considerando, en cambio, dos tipos diferenciados de ciclo.

Las características, tanto en tiempo de acceso como retardo, reflejan las consideraciones planteadas en el análisis de la variancia del tiempo de ciclo. Es decir, los resultados son coincidentes para dos estaciones con el modelo de Kuehn y la discrepancia aumenta al aumentar el número de estaciones.

El hecho de que el resultado de Kuehn (Kue,79) se acerque al de Hashida (HaO,72) al aumentar N se justifica por el hecho de que Kuehn analiza la dependencia de estos tiempos con la ocupación o no de la estación en estudio, esta dependencia pierde importancia si el número de estaciones es grande.

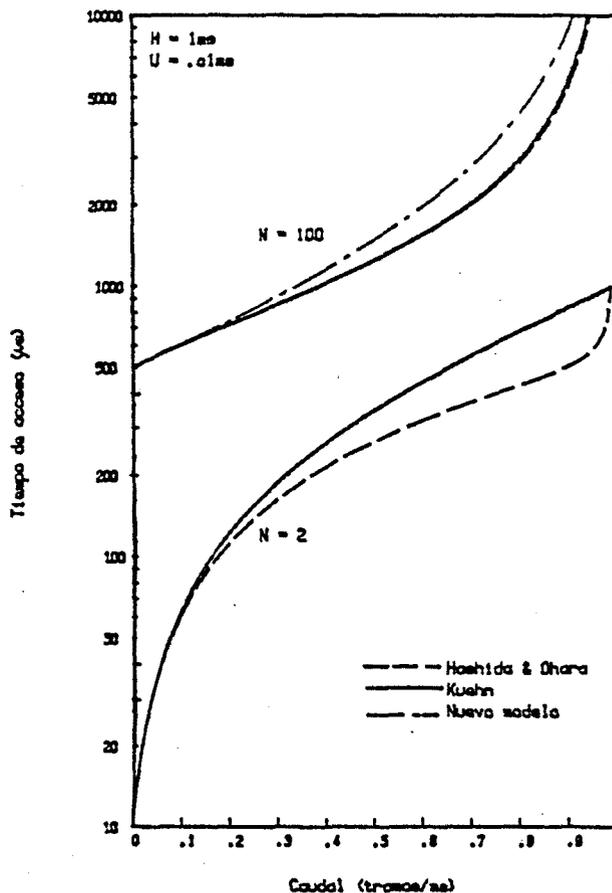


Figura 4.14 Características caudal-tiempo de acceso para una red con almacenamiento infinito en función del número de estaciones.

En el modelo propuesto, en cambio, debido al efecto de correlación positiva entre estaciones los tiempos de acceso tienen proporcionalidad directa con N .

Para finalizar el análisis de estos modelos, nos ha parecido interesante mostrar conjuntamente, en la Figura 4.16, los resultados obtenidos para los dos modelos de estación.

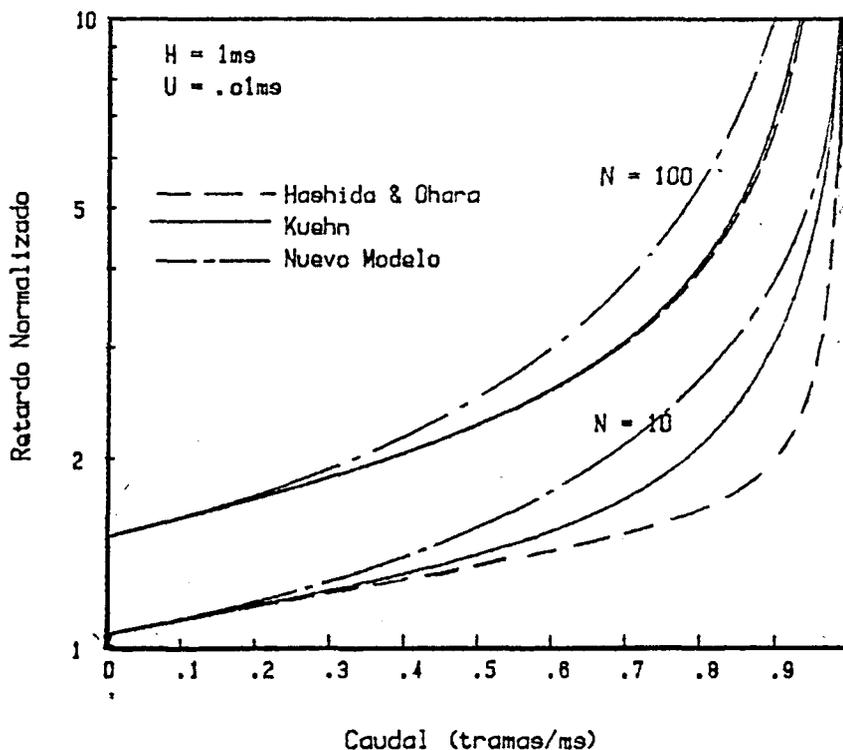


Figura 4.15 Características caudal-retardo para una red con almacenamiento infinito en función del número de estaciones.

La comparación de estas características, a nivel de tiempos de acceso, muestran que la cota superior obtenida para el modelo de estación sin almacenamiento se encuentra por encima de la curva correspondiente al modelo propuesto para estación con almacenamiento infinito.

Ambas serían coincidentes si se pudiera considerar dependencia monótona creciente de t_a con la probabilidad de ocupación de las estaciones. En este caso el resultado de red con almacenamiento infinito se presentaría como una mejor cota superior del modelo sin almacenamiento.

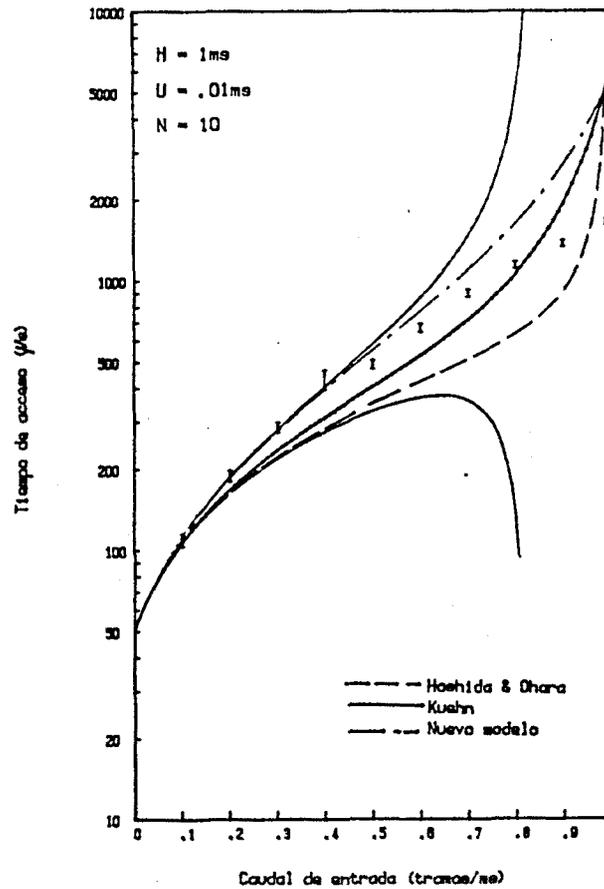


Figura 4.16 Características tiempo de acceso-caudal de entrada conjuntas para el modelo de estación sin almacenamiento y almacenamiento infinito.

Los resultados de simulación se muestran coherentes con esta hipótesis, aunque no se ha podido obtener matemáticamente la confirmación de la misma, quedando este tema abierto para futuros trabajos.

Finalmente en el apartado que sigue, en el que finaliza este capítulo, se resumen las aportaciones y conclusiones obtenidas a lo largo del mismo.

4.1 CONCLUSIONES

En este capítulo se han propuesto dos modelos para la evaluación del protocolo de acceso múltiple, sobre bus, basado en el mecanismo de paso de testigo correspondientes a dos modelos distintos de estación.

En primer lugar un modelo de estación sin capacidad de almacenamiento, del que se han obtenido acotaciones para la variancia y el tiempo medio de ciclo, prescindiendo de la hipótesis de independencia y para una red equilibrada, con tráfico de entrada Poisson.

Los resultados del tiempo de acceso obtenidos mediante un modelo de simulación han concordado con las cotas teóricas con incidencia hacia la cota superior. Dado que la utilización de la hipótesis de independencia en el modelo conduce a la cota inferior, ello hace concluir la necesidad de tener en cuenta la dependencia en el análisis de este tipo de redes. Con este modelo se amplían los resultados de Yuen de tráfico ligero concluyendo que debido a la buena convergencia de las cotas, en el tiempo medio de ciclo, el modelo presenta errores reducidos hasta tráficos del orden del 50% del tráfico máximo que puede transportar la red. Respecto al segundo momento las cotas divergen para tráficos bajos lo cual puede conducir a errores considerables con la utilización del modelo anterior.

Asimismo se ha planteado la posibilidad de obtener una cota superior del tiempo de acceso inferior a la propuesta. Esta cota se obtendría bajo la hipótesis de monotonía creciente de t_a con la probabilidad de ocupación de las estaciones, hipótesis coherente con los resultados de simulación y cuya demostración se considera de interés en trabajos futuros.

En el segundo modelo se plantea la condición de estación con almacenamiento infinito y servicio no exhaustivo, siguiendo el modelo de Kuehn de colas cíclicas y servidor único. En este caso, sin embargo se ha planteado la variancia prescindiendo de la hipótesis de independencia. Ello permite, al igual que en el modelo anterior, obtener las características Caudal-Retardo de la red bajo las condiciones de tráfico balanceado y longitud de trama constante.

Los resultados se han comparado con los previos de Hashida y Ohara y el propio Kuehn. Esta comparación permite constatar que el nuevo modelo conduce a retardos mayores que los dos anteriores, incrementándose esta discrepancia con el número de estaciones de la red.

Se deja para futuros trabajos el planteamiento de un modelo de simulación con almacenamiento que permita la confirmación de estos resultados, así como la necesidad de obtener resultados experimentales que validen ambos trabajos.

Finalmente, la modelación del mecanismo de paso de testigo mediante un modelo con servicio no exhaustivo se considera de gran interés por modelar el parámetro contemplado en la Norma IEEE 802.4 denominado "high priority token hold timer" y que determina el tiempo máximo de transmisión disponible para una estación, por ciclo de servicio, en el nivel superior de prioridad.

Por último es interesante hacer constar que la acotación de retardos a nivel MAC puede conseguirse únicamente en el caso de estación sin almacenamiento, es decir, con control de entradas, ya que la no exhaustividad del servicio no lo garantiza para un sistema con almacenamiento cuando se supera el límite de estabilidad de la cola, aunque el tiempo de acceso esté acotado.

CAPITULO 5

CONCLUSIONES

En este capítulo se recogen las aportaciones y conclusiones presentadas a lo largo de esta memoria, planteando al final de la exposición de las mismas las líneas de investigación que quedan abiertas para futuros trabajos.

Con el desarrollo de la presente tesis se han realizado aportaciones dentro del campo de evaluación de Redes de Comunicación de Area Local para dos tipos de protocolo de acceso en Redes de acceso múltiple; acceso aleatorio y acceso con control distribuido mediante el mecanismo de paso de testigo.

En el campo de acceso aleatorio se ha realizado un análisis del concepto de persistencia asociado a los protocolos de acceso aleatorio tipo CSMA/CD.

Para ello se han propuesto modelos analíticos con resultados explícitos para las variantes no-persistente y p-persistente con p adaptativa, ampliando el modelo de Lam para l-persistencia (Lam,80).

Posteriormente se ha extendido el campo de validez de los modelos analíticos para accesos sin detección de colisión y accesos no-ranurados.

Se ha comprobado la validez de estos modelos mediante contrastación con modelos de simulación; resultados experimentales (obtenidos por Shoch y Hupp (SoH,80) sobre una red Ethernet) y finalmente comparación con resultados de otros investigadores (ToH,79).

En el caso de las variantes no-persistente y l-persistente ha habido acuerdo entre ambos modelos, mientras que en el caso p-persistente en condiciones de tráfico ligero se han apreciado menores retardos en el modelo de simulación. Esta discrepancia es debida al comportamiento del algoritmo de control de retransmisiones del modelo de simulación y ha

sido justificada convenientemente en el apartado 3.4.2

En cuanto a la validación mediante resultados experimentales, se ha realizado a partir del modelo de simulación trabajando en condiciones de saturación y para el algoritmo de control "Truncated binary exponential backoff" utilizado en la red Ethernet y por tanto en la obtención de los resultados experimentales del trabajo de Shoch y Hupp.

Los resultados presentan buena concordancia para un número reducido de estaciones. Sin embargo, conviene hacer constar que la monitorización del programa de simulación bajo las condiciones de tráfico del modelo experimental ha permitido observar un fenómeno de captura parcial del canal, fenómeno similar al descrito en (SoH,82). Con este tráfico de entrada las estaciones generan tramas de forma continua, lo cual conduce a la red a trabajar en condiciones transitorias aumentando progresivamente los retardos de retransmisión. Cuando estos son elevados la red transporta un tráfico prácticamente del 100% pero de una estación exclusivamente. El funcionamiento de la red en este caso depende de las condiciones extremas del algoritmo de backoff, es decir la vuelta a retardo cero al cabo de un número excesivo de colisiones.

Finalmente la validación se ha complementado con estudios comparativos con los modelos de población finita de Tobagi y Hunt para el caso de no-persistencia y Lam en el caso de l-persistencia. En ambos se ha presentado un acuerdo aceptable. En el caso del modelo de Lam los resultados reflejan menores retardos con tráfico ligero que se atribuyen a la sobreestimación de la probabilidad de colisión debido a la consideración que se realiza en el modelo de Lam de una ventana de colisión doble de la real.

comprobada la validez de los modelos, se ha realizado un estudio comparativo en función de la persistencia en el caso de acceso con detección de colisión, este estudio permite presentar las siguientes conclusiones:

De forma general, la variante no-persistente conduce a mejores prestaciones (retardos reducidos con tráfico ligero y caudales máximos mayores), que los dos restantes protocolos.

La variante l-persistente mejora ligeramente los retardos para tráfico ligero, pero empeora significativamente con tráfico intenso. Ello es debido a la seguridad de colisión posterior a una transmisión con éxito que aumenta la duración de los períodos de contienda.

La variante p-persistente determina siempre retardos mayores en condiciones de tráfico ligero y su comportamiento es intermedio en condiciones de tráfico intenso.

Respecto al acuerdo entre resultados para modelos analíticos y de simulación se ha llegado a las siguientes conclusiones:

La hipótesis de independencia planteada en los modelos teóricos, entre duración del período de contienda y número de contendientes no se cumple en los resultados de simulación obtenidos mediante el algoritmo de control adaptativo utilizado. Recordamos que este algoritmo trabaja con tasas de retransmisión inversamente proporcionales al número de contendientes. Se observa una dependencia positiva que afecta fundamentalmente a la variante p-persistente en condiciones de tráfico ligero, siendo de interés para futuros trabajos, la modelación de esta dependencia.

Respecto al comportamiento comparativo de los accesos ranurados y no ranurados se ha concluido que las características aproximadas que se han propuesto, a partir de las obtenidas para sistemas ranurados, presentan un acuerdo notable con las simulaciones realizadas para este tipo de accesos.

Los accesos ranurados presentan mayores caudales máximos, mientras que los no ranurados reducen los retardos en condiciones de tráfico ligero.

En el estudio del mecanismo de paso de testigo se han aportado modelos de este mecanismo de acceso sobre topología bus, para dos tipos de estación, con servicio exhaustivo y sin la restricción impuesta por la hipótesis de independencia.

En primer lugar se presenta un modelo de estación sin capacidad de almacenamiento, del que se han obtenido acotaciones para la variancia y el tiempo medio de ciclo, prescindiendo de la hipótesis de independencia y para una red equilibrada, con tráfico de entrada Poisson.

Los resultados del tiempo de acceso obtenidos mediante un modelo de simulación han concordado con las cotas teóricas con tendencia hacia la cota superior. Dado que la utilización de la hipótesis de independencia en el modelo conduce a la cota inferior, ello hace concluir la necesidad de tener en cuenta la dependencia en el análisis de este tipo de redes.

Con este modelo se amplían los resultados de Yuen de tráfico ligero, concluyendo, que debido a la buena convergencia de las cotas en el tiempo medio de ciclo, el modelo presenta errores reducidos hasta tráficos del orden del 50% del tráfico máximo que puede transportar la red. Respecto al segundo momento las cotas divergen para

tráficos bajos lo cual puede conducir a errores considerables con la utilización del modelo anterior.

Asimismo se ha planteado la posibilidad de obtener una cota superior del tiempo de acceso inferior a la propuesta. Esta cota se obtendría bajo la hipótesis de monotonía creciente del tiempo de acceso con la probabilidad de ocupación de las estaciones, hipótesis coherente con los resultados de simulación y cuya demostración se considera de interés en trabajos futuros.

En el segundo modelo se plantea la condición de estación con almacenamiento infinito y servicio no exhaustivo, siguiendo el planteamiento de Kuehn para colas cíclicas y servidor único. En este caso, sin embargo se ha obtenido la variancia del tiempo de ciclo prescindiendo de la hipótesis de independencia. Ello permite, al igual que en el modelo anterior, obtener las características Caudal-Retardo de la red bajo las condiciones de tráfico balanceado y longitud de trama constante.

La modelación del mecanismo de paso de testigo mediante un modelo con servicio no exhaustivo se considera de gran interés porque modela el parámetro contemplado en la Norma IEEE 802.3 denominado "high priority token hold timer" y que determina el tiempo máximo de transmisión disponible para una estación, por ciclo de servicio, en el nivel superior de prioridad.

Los resultados se han comparado con los previos de Hashida y Ohara y el propio Kuehn. Esta comparación permite constatar que el nuevo modelo conduce a retardos mayores que los dos anteriores, incrementándose esta discrepancia con el número de estaciones de la red.

Se deja para futuros trabajos el planteamiento de un modelo de simulación con almacenamiento que permita la

confirmación de estos resultados, así como la necesidad de obtener resultados experimentales que validen ambos trabajos.

Por último es interesante hacer constar que la acotación de retardos a nivel MAC puede conseguirse únicamente en el caso de estación sin almacenamiento, es decir, con control de entradas, ya que la no exhaustividad del servicio no lo garantiza para un sistema con almacenamiento cuando se supera el límite de estabilidad de la cola, aunque el tiempo de acceso esté acotado.

Antes de plantear las líneas de futura investigación, que ya se han ido apuntando a lo largo de esta Memoria, se exponen conclusiones de tipo general respecto a la modelación de redes de Area Local.

La primera es la necesidad de herramientas que caractericen de forma adecuada las redes, no solo a nivel MAC, sino con inclusión de todos los niveles de la normativa OSI.

Dentro de estas herramientas, la importancia del nivel MAC radica en el hecho de que caracteriza un tipo determinado de red, debido a la imposibilidad de adoptar una estandarización única a este Nivel.

Queremos hacer constar, sin embargo, la necesidad de huir de la tentación de llegar a criterios de exclusión de determinado tipo de redes en base a características extremas de retardos del mecanismo de acceso.

La acotabilidad de retardo a nivel MAC del mecanismo de paso de testigo es solo cierta sin la existencia de almacenamiento en la estación en este nivel.

Aún así es indiscutible la existencia de colas en los niveles superiores lo cual disminuye considerablemente la

importancia de esta acotación en el nivel inferior.

Consideramos, pues, más interesante una herramienta que en una primera aproximación caracterice el comportamiento de la red en condiciones estables, es decir, con tráfico ligero y medio, complementada por un segundo nivel, de mayor costo, que permita modelar entornos de tráfico no tratables mediante los modelos analíticos y condiciones de estabilidad.

Esta tesis pretende ser un primer paso en la generación de una herramienta de este tipo.

Finalmente se apuntan las líneas de futura investigación en el campo de este trabajo de tesis:

- Estudio de algoritmos de control de retransmisión adaptativos desde la perspectiva de obtención de parámetros que los hagan acoplables a la modelación de los tiempos de contienda establecida en los modelos propuestos.
- Modificación de los modelos propuestos con la inclusión de una cierta dependencia entre los tiempos de contienda y el número de contendientes.
- Estudio analítico de la posibilidad de fenómeno de captura parcial para redes sometidas a tráfico intenso con controles que tiendan a tasas de retransmisión bajas.
- Modelación del comportamiento del acceso mediante paso de testigo con posibilidad de variación adaptativa del tiempo máximo de retención de testigo.
- Modelación del comportamiento del acceso mediante paso de testigo bajo la consideración de pérdida de eficacia debida al tiempo dedicado por la estación a gestión de los mecanismos de seguridad frente a pérdidas y duplicidades de

testigo.

- Realización de estudios experimentales sobre red real que incluyan características de retardo para ambos protocolos.

APENDICES

APENDICE 1

APENDICE A1

OBTENCION DEL PRIMER MOMENTO DE LA VARIABLE q (NUMERO DE ESTACIONES DISPUESTAS)

A1.1 PROTOCOLO P - PERSISTENTE

Partimos de la transformada z de la distribución límite del número de estaciones dispuestas, obtenida en el apartado 6.4 del capítulo 3 :

$$Q(z) = V(z)U'(z)q_0 \frac{\left(\frac{P(z)-p_0}{1-p_0} - 1\right)}{z - V(z)U'(z)} \quad (A1.1)$$

Para obtener el valor medio, calcularemos el valor de la derivada de $Q(z)$ en z igual a 1.

$$\bar{q} = \frac{d}{dz} Q(z) \Big|_{z=1} \quad (A1.2)$$

Para simplificar el proceso de cálculo nos referimos a :

$$Q(z) = \frac{A \cdot B}{C} \quad (A1.3)$$

donde :

$$A = V(z) \quad (A1.4)$$

$$B = \frac{P(z) - p_0}{1 - p_0} - 1 \quad (A1.5)$$

$$C = z - V(z)U'(z) \quad (A1.6)$$

Quedando por tanto la derivada en la forma :

$$\frac{d}{dz} Q(z) \Big|_{z=1} = \frac{C \frac{d}{dz} (AB) - (AB) \frac{dC}{dz}}{C^2} \Big|_{z=1} \quad (A1.7)$$

Dado que ;

$$A|_{z=1} = V(1) = 1 \quad (A1.8)$$

$$B|_{z=1} = \frac{P(1)-p_0}{1-p_0} - 1 = 0 \quad (A1.9)$$

$$C|_{z=1} = 1-V(1)U'(1) = 0 \quad (A1.10)$$

tanto B como C en z igual a 1 valen cero. Ello nos plantea una indeterminación del tipo 0/0, que resolvemos mediante la regla de l'Hopital.

Llamaremos :

$$(\text{num}) = C \frac{d}{dz} (AB) - (AB) \frac{dC}{dz} \quad (A1.11)$$

$$(\text{den}) = C^2 \quad (A1.12)$$

$$\frac{d}{dz} (\text{den}) \Big|_{z=1} = 2C \frac{dC}{dz} \Big|_{z=1} = 0 \quad (A1.13)$$

$$\frac{d}{dz} (\text{num}) \Big|_{z=1} = C \frac{d}{dz} \left(A \frac{d}{dz} B + B \frac{d}{dz} A \right) + \frac{d}{dz} C \left(A \frac{d}{dz} B + B \frac{d}{dz} A \right) - \frac{d}{dz} C \left(A \frac{d}{dz} B + B \frac{d}{dz} A \right) - (AB) \frac{d^2}{dz^2} C \Big|_{z=1} = 0 \quad (A1.14)$$

Se presenta de nuevo la misma indeterminación, que resolveremos mediante el cálculo de las segundas derivadas del numerador y denominador de la expresión :

$$\frac{d^2}{dz^2} (\text{den}) \Big|_{z=1} = 2 \left(C \frac{d^2}{dz^2} C + \frac{d}{dz} C + \frac{d}{dz} C \right) \Big|_{z=1} = 2 \left(\frac{d}{dz} C \right)^2 \Big|_{z=1} \quad (A1.15)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dz^2} (\text{num}) \Big|_{z=1} &= \frac{d}{dz} C \left(2 \frac{d}{dz} A \frac{d}{dz} B + A \frac{d^2}{dz^2} B + B \frac{d^2}{dz^2} A \right) + C \frac{d}{dz} \left(2 \frac{d}{dz} A \frac{d}{dz} B + A \frac{d^2}{dz^2} B + B \frac{d^2}{dz^2} A \right) - (AB) \frac{d^3}{dz^3} C - \frac{d^2}{dz^2} C \left(A \frac{d}{dz} B + B \frac{d}{dz} A \right) \Big|_{z=1} = \\ &= \frac{d}{dz} C \left(2 \frac{d}{dz} A \frac{d}{dz} B + \frac{d^2}{dz^2} B \right) - \frac{d}{dz} B \frac{d^2}{dz^2} C \Big|_{z=1} \end{aligned} \quad (A1.16)$$

Obtenemos a continuación las derivadas primeras y segundas de A, B y C en z igual a 1 :

$$\frac{d}{dz} A /_{z=1} = v \langle 1 \rangle \quad (\text{A1.17})$$

$$\frac{d^2}{dz^2} A /_{z=1} = v \langle 1 \rangle \quad (\text{A1.18})$$

$$\frac{d}{dz} B /_{z=1} = \frac{q_0}{1-p_0} P \langle 1 \rangle \quad (\text{A1.19})$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dz^2} B /_{z=1} &= \frac{q_0}{1-p_0} (U' \langle z \rangle (P \langle z \rangle - 1) + U' \langle z \rangle P \langle z \rangle + U' \langle z \rangle P \langle z \rangle + U' \langle z \rangle P \langle z \rangle) /_{z=1} = \\ &= \frac{q_0}{1-p_0} (2U' \langle 1 \rangle P \langle 1 \rangle + P \langle 1 \rangle) \end{aligned} \quad (\text{A1.20})$$

$$\frac{d}{dz} C /_{z=1} = 1 - U' \langle 1 \rangle v \langle 1 \rangle - U' \langle 1 \rangle v \langle 1 \rangle = 1 - U' \langle 1 \rangle - v \langle 1 \rangle \quad (\text{A1.21})$$

$$\frac{d^2}{dz^2} C /_{z=1} = -U' \langle 1 \rangle v \langle 1 \rangle - 2U' \langle 1 \rangle v \langle 1 \rangle - U' \langle 1 \rangle v \langle 1 \rangle = -U' \langle 1 \rangle - v \langle 1 \rangle - 2U' \langle 1 \rangle v \langle 1 \rangle \quad (\text{A1.22})$$

Lo cual nos permite obtener el valor de \bar{q} sustituyendo las ecuaciones (A1.17)(A1.18)(A1.19)(A1.20)(A1.21)y(A1.22) en :

$$\bar{q} = \frac{\frac{d^2}{dz^2} (\text{num})}{\frac{d^2}{dz^2} (\text{den}) /_{z=1}} \quad (\text{A1.23})$$

$$\bar{q} = \frac{\frac{d}{dz} A \frac{d}{dz} B}{\frac{d}{dz} C} + \frac{\frac{d^2}{dz^2} B}{2 \frac{d}{dz} C} - \frac{\frac{d}{dz} B \frac{d^2}{dz^2} C}{2 (\frac{d}{dz} C)^2} \quad (\text{A1.24})$$

$$= \frac{v \langle 1 \rangle P \langle 1 \rangle \frac{q_0}{1-p_0}}{1 - U' \langle 1 \rangle - v \langle 1 \rangle} + \frac{\frac{q_0}{1-p_0} (2U' \langle 1 \rangle P \langle 1 \rangle + P \langle 1 \rangle)}{2(1 - U' \langle 1 \rangle - v \langle 1 \rangle)} - \frac{\frac{q_0}{1-p_0} P \langle 1 \rangle (-U' \langle 1 \rangle - v \langle 1 \rangle - 2U' \langle 1 \rangle v \langle 1 \rangle)}{2(1 - U' \langle 1 \rangle - v \langle 1 \rangle)^2}$$

Sustituyendo q_0 por su valor, obtenido en el Apéndice A2 :

$$\bar{q} = v_{(1)}^{(1)} + \frac{1}{2} \frac{2U'_{(1)} P_{(1)}^{(1)} + P_{(1)}^{(2)}}{P_{(1)}^{(1)}} + \frac{U'_{(1)} \{v_{(1)}^{(2)} + v_{(1)}^{(2)} + 2U'_{(1)} v_{(1)}^{(1)}\}}{2(1 - U'_{(1)} - v_{(1)}^{(1)})} = v_{(1)}^{(1)} + U'_{(1)} + \frac{1}{2} \frac{P_{(1)}^{(2)}}{P_{(1)}^{(1)}} + \frac{U'_{(1)} \{v_{(1)}^{(2)} + v_{(1)}^{(2)} + 2U'_{(1)} v_{(1)}^{(1)}\}}{2(1 - U'_{(1)} - v_{(1)}^{(1)})} \quad (A1.25)$$

A1.2 PROTOCOLO NO - PERSISTENTE

Partimos de la transformada z de la distribución límite del número de estaciones dispuestas, obtenida en el apartado 7.4 del capítulo 3.

$$Q(z) = V(z) \frac{\frac{q_0}{1-p_0} (p_1 z(1-U''(z)) + U''(z)(P(z)-p_0) - (1-p_0)U'(z))}{z - U'(z) V(z)} \quad (A1.26)$$

Siguiendo en este punto los mismos pasos del protocolo anterior :

$$A = V(z) \quad (A1.27)$$

$$B = \frac{q_0}{1-p_0} (p_1 z(1-U''(z)) + U''(z)(P(z)-p_0) - U'(z)(1-p_0)) \quad (A1.28)$$

$$C = z - U'(z) V(z) \quad (A1.29)$$

Dado que :

$$B \Big|_{z=1} = \frac{q_0}{1-p_0} (p_1(1-U''(1)) + U''(1)(P(1)-p_0) - U'(1)(1-p_0)) = 0 \quad (A1.30)$$

la obtención del valor medio, presenta los mismos problemas de indeterminación del caso anterior, lo cual nos obliga a obtener el valor en la forma :

$$\bar{q} = \frac{\frac{d^2}{dz^2} (\text{num})}{\frac{d^2}{dz^2} (\text{den})} \Big|_{z=1} \quad (A1.31)$$

igual que en el caso anterior y valiendonos de las ecuaciones (A1.15)(A1.16) función de A,B,y C.

Las primeras y segundas derivadas de estos términos para A y C son las ecuaciones (A1.17)(A1.18)(A1.21)y(A1.22), mientras que en el caso de B son las siguientes :

$$\frac{d}{dz} B \Big|_{z=1} = \frac{q_0}{1-p_0} (U''\langle 1 \rangle (1-p_0-p_1) - U'\langle 1 \rangle (1-p_0) + P\langle 1 \rangle) \quad (A1.32)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} B \Big|_{z=1} = \frac{q_0}{1-p_0} (U''\langle 2 \rangle (1-p_0-p_1) + 2U''\langle 1 \rangle (P\langle 1 \rangle - p_1) - U'\langle 2 \rangle (1-p_0) + P\langle 2 \rangle) \quad (A1.33)$$

Lo cual nos conduce a un valor de \bar{q} igual a :

$$\begin{aligned} \bar{q} = & \frac{v\langle 1 \rangle \frac{q_0}{1-p_0} (U''\langle 1 \rangle (1-p_0-p_1) - U'\langle 1 \rangle (1-p_0) + P\langle 1 \rangle)}{1-U\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle} + \\ & + \frac{\frac{1}{2} \frac{q_0}{1-p_0} (U''\langle 2 \rangle (1-p_0-p_1) + 2U''\langle 1 \rangle (P\langle 1 \rangle - p_1) - U'\langle 2 \rangle (1-p_0) + P\langle 2 \rangle)}{1-U\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle}}{2} - \\ & - \frac{\frac{q_0}{1-p_0} (U''\langle 1 \rangle (1-p_0-p_1) - U'\langle 1 \rangle (1-p_0) + P\langle 1 \rangle) (-U'\langle 2 \rangle - v\langle 2 \rangle - 2U'\langle 1 \rangle v\langle 1 \rangle)}{2(1-U\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle)^2}} \end{aligned} \quad (A1.34)$$

Sustituyendo el valor de q_0 obtenido en el Apéndice A2 :

$$\bar{q} = v\langle 1 \rangle + \frac{1}{2} \frac{U'\langle 2 \rangle + v\langle 2 \rangle + 2U'\langle 1 \rangle v\langle 1 \rangle}{1-U\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle} + \frac{1}{2} \frac{U''\langle 2 \rangle (1-p_0-p_1) + 2U''\langle 1 \rangle (P\langle 1 \rangle - p_1) - U'\langle 2 \rangle (1-p_0) + P\langle 2 \rangle}{U''\langle 1 \rangle (1-p_0-p_1) - U'\langle 1 \rangle (1-p_0) + P\langle 1 \rangle} \quad (A1.35)$$

A1.3 PROTOCOLO 1 - PERSISTENTE

Partimos de la transformada z de la distribución límite del número de estaciones dispuestas obtenida en el apartado 8.4 del capítulo 3

$$\varrho(z) = v(z) \frac{\frac{q_0}{1-p_0} (p_1 z(1-U''(z)) + U''(z)(P(z)-1) + q_1 z(1-U''(z)))}{z-U''(z) v(z)}} \quad (A1.36)$$

Siguiendo en este punto los mismos pasos de los protocolos anteriores :

$$A = V(z) \quad (A1.37)$$

$$B = \frac{q_0}{1-p_0} (p_1 z(1-U''(z)) + U''(z)(P(z)-1)) + q_1 z(1-U''(z)) \quad (A1.38)$$

$$C = z - U''(z) V(z) \quad (A1.39)$$

Dado que :

$$\mathfrak{B}/_{z=1} = \frac{q_0}{1-p_0} (p_1(1-U''(1)) + U''(1)(P(1)-1)) + q_1(1-U''(1)) = 0 \quad (A1.40)$$

se nos plantean los mismos problemas de indeterminación de los casos anteriores, obteniendo \bar{q} en la forma :

$$\bar{q} = \frac{\frac{d^2}{dz^2} (\text{num})}{\frac{d^2}{dz^2} (\text{den})} \Big|_{z=1} \quad (A1.41)$$

Para ello utilizaremos las ecuaciones (A1.15) y (A1.16) función de A, B y C donde el primer y segundo momentos de A son las ecuaciones (A1.17)(A1.18), el primer y segundo momentos de C son las ecuaciones (A1.21)(A1.22) sustituyendo U' por U''; y el primer y segundo momentos de B se exponen a continuación :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} \mathfrak{B} /_{z=1} &= \\ &= q_1 \left((1-U''(z)) - zU''(z) \right) + \frac{q_0}{1-p_0} \left(p_1 (1-U''(z)) - zU''(z) \right) + U''(z) (P(z)-1) + U''(z) P(z) \Big|_{z=1} = \quad (A1.42) \\ &= -q_1 U''(1) + \frac{q_0}{1-p_0} (-p_1 U''(1) + P(1)) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2}{dz^2} \mathfrak{B} /_{z=1} &= \\ &= q_1 (-2P(z) - zU''(z)) + \frac{q_0}{1-p_0} (p_1 (-2U''(z) - zU''(z)) + U''(z)(P(z)-1) + 2U''(z)P(z) + P(z)U''(z)) \Big|_{z=1} = \\ &= q_1 (-2U''(1) - U''(1)) + \frac{q_0}{1-p_0} (p_1 (-2U''(1) - U''(1)) + 2U''(1)P(1) + P(1)) \quad (A1.43) \end{aligned}$$

Lo cual nos conduce a un valor de \bar{q} igual a :

$$\bar{q} = \frac{2v\langle 1 \rangle (-q_1 U''\langle 1 \rangle + \frac{q_0}{1-p_0} (-p_1 U''\langle 1 \rangle + P\langle 1 \rangle)) + q_1 (-2U''\langle 1 \rangle - U''\langle 2 \rangle)}{2(1-U''\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle)} +$$

$$+ \frac{\frac{q_0}{1-p_0} (p_1 (-2U''\langle 1 \rangle - U''\langle 2 \rangle) + 2U''\langle 1 \rangle P\langle 1 \rangle + P\langle 2 \rangle)}{2(1-U''\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle)} -$$

$$- \frac{(-q_1 U''\langle 1 \rangle + \frac{q_0}{1-p_0} (-p_1 U''\langle 1 \rangle + P\langle 1 \rangle)) (-U''\langle 2 \rangle - v\langle 2 \rangle - 2U''\langle 1 \rangle v\langle 1 \rangle)}{2(1-U''\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle)^2} \quad (A1.44)$$

Puede simplificarse esta expresión si tenemos en cuenta la relación que existe entre las constantes q_0 y q_1 obtenidas en el Apéndice A2, (A2.20) combinada con (A2.19) :

$$1 - U''\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle = -q_1 U''\langle 1 \rangle + \frac{q_0}{1-p_0} (-p_1 U''\langle 1 \rangle + P\langle 1 \rangle) \quad (A1.45)$$

Con lo que finalmente :

$$\bar{q} = v\langle 1 \rangle + \frac{U''\langle 2 \rangle + v\langle 2 \rangle + 2U''\langle 1 \rangle v\langle 1 \rangle}{2(1-U''\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle)} + \frac{(q_1 + q_0 \frac{p_1}{1-p_0}) (-2U''\langle 1 \rangle - U''\langle 2 \rangle)}{2(1-U''\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle)} + \frac{\frac{q_0}{1-p_0} (2U''\langle 1 \rangle P\langle 1 \rangle + P\langle 2 \rangle)}{2(1-U''\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle)} \quad (A1.46)$$

Teniendo en cuenta los valores de q_0 y q_1 obtenidos en el Apéndice A2, (A2.22)(A2.23) los dos últimos sumandos de la expresión de \bar{q} quedan finalmente :

$$\frac{q_0}{v\langle 0 \rangle} \frac{(-2U''\langle 1 \rangle - U''\langle 2 \rangle)}{2(1-U''\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle)} + \frac{q_0}{1-p_0} \frac{(2U''\langle 1 \rangle P\langle 1 \rangle + P\langle 2 \rangle)}{2(1-U''\langle 1 \rangle - v\langle 1 \rangle)} = \frac{-2U''\langle 1 \rangle - U''\langle 2 \rangle}{\frac{P\langle 1 \rangle v\langle 0 \rangle}{1-p_0} - U''\langle 1 \rangle} + \frac{2U''\langle 1 \rangle P\langle 1 \rangle + P\langle 2 \rangle}{P\langle 1 \rangle - \frac{U''\langle 1 \rangle (1-p_0)}{v\langle 0 \rangle}} \quad (A1.47)$$

Obteniendo como expresión final de \bar{q} :

$$\bar{q} = v_{(1)}^{(1)} + \frac{U_{(1)}^{(2)} + v_{(1)}^{(2)} + 2U_{(1)}^{(1)}v_{(1)}^{(1)}}{2(1 - U_{(1)}^{(1)} - v_{(1)}^{(1)})} + \frac{2U_{(1)}^{(1)}P_{(1)}^{(1)} + P_{(1)}^{(2)}}{P_{(1)}^{(1)} - \frac{U_{(1)}^{(1)}(1 - P_0)}{v_0}} + \frac{-2U_{(1)}^{(1)} - U_{(1)}^{(2)}}{\frac{P_{(1)}^{(1)}v_0}{1 - P_0} - U_{(1)}^{(1)}} \quad (\text{A1.48})$$

APENDICE 2

APENDICE A2

OBTENCION DE LA PROBABILIDAD DE NINGUNA Y UNA ESTACION
DISPUESTAS (q_0 , q_1)

A2.1 PROTOCOLO P - PERSISTENTE

En este caso es suficiente la obtención de q_0 . Partimos de la expresión de la transformada z de la distribución límite del número de estaciones dispuestas, obtenida en el apartado 6:4 del capítulo 3.

A partir de la definición de transformada z de una función de distribución arbitraria :

$$Q(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P(q=k) z^k \quad (A2.1)$$

utilizaremos la relación :

$$Q(z) \Big|_{z=1} = 1 \quad (A2.2)$$

que presenta una indeterminación del tipo 0/0 que resolvemos por la regla de l'Hopital, empleando para ello las ecuaciones (A1.13)(A1.14) del Apéndice A1.

$$\lim_{z \rightarrow 1} Q(z) = \frac{\frac{d}{dz}(\text{num})}{\frac{d}{dz}(\text{den})} \Big|_{z=1} = \quad (A2.3)$$

$$= \frac{\frac{q_0}{1-p_0} \left(V\left\{\frac{1}{z}\right\} (U'(z)(P(z)-1)) + V(z) (U'\left\{\frac{1}{z}\right\} (P(z)-1) + U'(z) P\left\{\frac{1}{z}\right\}) \right)}{z - U'\left\{\frac{1}{z}\right\} V(z) - U'(z) V\left\{\frac{1}{z}\right\}} \Big|_{z=1} = \frac{\frac{q_0}{1-p_0} P\left\{\frac{1}{1}\right\}}{1 - U'\left\{\frac{1}{1}\right\} - V\left\{\frac{1}{1}\right\}} = 1$$

Quedando q_0 en la forma :

$$q_0 = \frac{1 - U' \left\{ \frac{1}{1} \right\} - v \left\{ \frac{1}{1} \right\}}{\frac{P \left\{ \frac{1}{1} \right\}}{1 - p_0}} \quad (\text{A2.4})$$

A2.2 PROTOCOLO NO - PERSISTENTE

La obtención de q_0 en este caso, al igual que en el anterior, parte de $Q(z)$, obtenida en el capítulo 3.

Utilizando la relación (A2.2) :

$$\lim_{z \rightarrow 1} Q(z) = \frac{\frac{d(\text{num})}{dz} / z=1}{\frac{d(\text{den})}{dz} / z=1} = \frac{\frac{q_0}{1-p_0} U'' \left\{ \frac{1}{1} \right\} (1-p_0-p_1) - U' \left\{ \frac{1}{1} \right\} (1-p_0) + P \left\{ \frac{1}{1} \right\}}{1 - U' \left\{ \frac{1}{1} \right\} - v \left\{ \frac{1}{1} \right\}} = 1 \quad (\text{A2.5})$$

Quedando q_0 en la forma :

$$q_0 = \frac{(1-p_0)(1 - U' \left\{ \frac{1}{1} \right\} - v \left\{ \frac{1}{1} \right\})}{U'' \left\{ \frac{1}{1} \right\} (1-p_0-p_1) + U' \left\{ \frac{1}{1} \right\} (1-p_0) + P \left\{ \frac{1}{1} \right\}} \quad (\text{A2.6})$$

A2.3 PROTOCOLO 1 - PERSISTENTE

Partiendo de la expresión de la transformada z de la distribución límite del número de estaciones dispuestas obtenemos el valor de las constantes q_0 y q_1 de la siguiente forma.

A partir de la definición de transformada z de una función de distribución arbitraria :

$$Q(z) = \sum_{k=0}^{\infty} P(q=k) z^k \quad (\text{A2.7})$$

$$Q(z) \Big|_{z=1} = \sum_{k=0}^{\infty} P(q=k) = 1 \quad (\text{A2.8})$$

$$\frac{d}{dz} Q(z) \Big|_{z=0} = P(q=1) = q_1 \quad (\text{A2.9})$$

Obtendremos dos expresiones en q_1 y q_0 , que nos permiten obtener las constantes.

$$\lim_{z \rightarrow 1} \frac{Q(z)}{c} = \frac{\frac{d}{dz}(AB)}{\frac{d}{dz}c} \Bigg|_{z=1} = \frac{-q_1 U''(1) + \frac{q_0}{1-p_0} (-p_1 U''(1) + P(1))}{1-U''(1) - V(1)} = 1 \quad (A2.10)$$

Utilizando la amplificación en los terminos A,B,C de las ecuaciones (A1.37)(A1.38)(A1.39) del Apéndice A1; podremos abordar la resolución de la relación(A2.9).

$$\frac{d}{dz} Q(z) \Bigg|_{z=0} = \frac{c \frac{d}{dz}(AB) - (AB) \frac{d}{dz}c}{c^2} \Bigg|_{z=0} = \frac{CA \frac{d}{dz}B + CB \frac{d}{dz}A - AB \frac{d}{dz}C}{c^2} \Bigg|_{z=0} \quad (A2.11)$$

Donde :

$$A \Bigg|_{z=0} = V(0) \quad (A2.12)$$

$$B \Bigg|_{z=0} = \frac{q_0}{1-p_0} (U''(0)(p_0 - 1)) = -q_0 U''(0) \quad (A2.13)$$

$$C \Bigg|_{z=0} = -U''(0) V(0) \quad (A2.14)$$

$$\frac{d}{dz} A \Bigg|_{z=0} = V(0) \quad (A2.15)$$

$$\frac{d}{dz} B \Bigg|_{z=0} = q_1(1-U''(0)) + \frac{q_0}{1-p_0} (p_1(1-U''(0)) - U''(0)(1-p_0) + U''(0)p_1) \quad (A2.16)$$

$$\frac{d}{dz} C \Bigg|_{z=0} = 1-U''(0) V(0) - U''(0) V(0) \quad (A2.17)$$

Que sustituyendo en (A2.11) :

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} Q(z) \Bigg|_{z=0} &= \frac{V(0) (q_1 (1-U''(0)) + \frac{q_0}{1-p_0} (p_1 (1-U''(0)) - U''(0)(1-p_0) + U''(0)p_1))}{-U''(0) V(0)} + \\ &+ \frac{V(0) q_0 U''(0)}{U''(0) V(0)} + \frac{V(0) q_0 U''(0) (1-U''(0) V(0) - U''(0) V(0))}{(U''(0) V(0))^2} - \\ &- q_1 \left(\frac{1}{U''(0)} - 1 \right) - \frac{q_0}{1-p_0} \left(p_1 \left(\frac{1}{U''(0)} - 1 \right) - \frac{U''(0)}{U''(0)} (1-p_0) + p_1 \right) + \\ &+ q_0 \frac{V(0)}{V(0)} + \frac{q_0}{U''(0) V(0)} (1-U''(0) V(0) - U''(0) V(0)) = q_1 \end{aligned} \quad (A2.18)$$

Que concluye en la relación :

$$q_1 = \left(\frac{1}{v(o)} - \frac{p_1}{1-p_o} \right) q_o \quad (\text{A2.19})$$

Finalmente de las expresiones (A1.10), (A2.19) podemos obtener el valor de q_1 y q_o .

$$- \left(\frac{1}{v(o)} - \frac{p_1}{1-p_o} \right) q_o U''\{1\} + \frac{q_o}{1-p_o} (-p_1 U''\{1\} + P\{1\}) = 1 - U''\{1\} - v\{1\} \quad (\text{A2.20})$$

$$q_o \left(- \frac{U''\{1\}}{v(o)} + \frac{P\{1\}}{1-p_o} \right) = 1 - U''\{1\} - v\{1\} \quad (\text{A2.21})$$

$$q_o = \frac{1 - U''\{1\} - v\{1\}}{\frac{P\{1\}}{1-p_o} - \frac{U''\{1\}}{v(o)}} \quad (\text{A2.22})$$

$$q_1 = \left(\frac{1}{v(o)} - \frac{p_1}{1-p_o} \right) q_o \quad (\text{A2.23})$$

APENDICE 3

APENDICE A3

RESUMEN DE PAQUETES DE SIMULACION

La utilización de herramientas de simulación está motivada por dos restricciones importantes en los modelos analíticos.

En primer lugar, la necesidad de realizar hipótesis de trabajo muy duras que permitan el planteamiento matemático del problema, aleja el modelo de la realidad lo suficiente como para que sus resultados deban verse bajo este prisma simplista o bien sean confirmados por experimentación o simulaciones.

En segundo lugar, aún cuando el planteamiento del problema pueda realizarse, no siempre existen resultados analíticos accesibles, teniendo que utilizar métodos de resolución de tipo recursivo cuyo coste en tiempo es similar al empleado en una posible simulación.

Por tanto, una simulación puede tener dos objetivos fundamentales. Tratar problemas intratables analíticamente por su complejidad y/o validar modelos analíticos.

Sin embargo los modelos de simulación tienen también su propia problemática de validación.

Por una parte la mejor validación consiste en la comparación de resultados con los obtenidos en experimentos realizados sobre sistemas reales. Sin embargo, habitualmente este método no es asequible debido a la imposibilidad de realizar este tipo de experimentos.

Es el desconocimiento del comportamiento del sistema real y la necesidad de inferir comportamientos bajo condiciones no existentes lo que hace necesaria la modelación del sistema, por tanto no es de esperar que habitualmente se tenga el sistema disponible para experimentar.

Las validaciones de simulaciones de un sistema deben por tanto apoyarse en otros conceptos.

Un método importante consiste en apoyar la validación en la comparación con resultados de modelos analíticos que puedan simularse mediante el mismo proceso empleado en la simulación que se quiere validar.

Un cambio en las condiciones o parámetros del modelo pueden ser suficientes para que éste tenga resultados analíticos pudiendo de esta forma validar el modelo de simulación.

Otro procedimiento consiste en eliminar la aleatoriedad de las variables de entrada o comportamiento del sistema, lo cual puede conducir a que en estas condiciones deterministas sea posible obtener resultados de comparación.

Otro método empleado habitualmente en la validación de modelos de simulación en tiempo continuo es el del análisis de la sensibilidad del modelo.

Para este análisis el modelo se ve como un sistema de entradas-salidas. La técnica básica consiste en variar una entrada mediante un cambio incremental y observar el cambio incremental en la variable de salida. La idea es analizar la sensibilidad en busca de regiones en los parámetros de entrada en los que la sensibilidad tiene cambios drásticos. Sin embargo este método no ha sido formalizado para el caso de simulaciones discretas.

Por otra parte, no solo debe de ser validado en una simulación el procedimiento o funcionamiento del modelo, sino también los resultados obtenidos de la simulación.

Estos resultados son obtenidos de un número determinado de muestras.

Un estudio correcto requiere que este número de muestras sea elevado si se desea hacer un análisis clásico para estimar parámetros como la media con un determinado intervalo de confianza. Esto implica un número elevado de horas de computador por lo que habitualmente se obtienen resultados basados en un única muestra, resultando dudosa entonces su interpretación.

Un método para obtener estadísticas con baja correlación es obtener estas entre puntos regenerativos del sistema modelado. Si el sistema es regenerativo pasará por cada estado de nuevo y es de suponer que su comportamiento a partir de este punto no dependa de la historia pasada del sistema.

Esto garantizaría la obtención de muestras independientes.

Las simulaciones de procesos en general tienen un conjunto de características (inicialización de variables, control

de ejecución encadenada de sucesos, generación de sucesos) que se encuentran procesadas en forma similar aunque los procesos a simular tengan características muy diferentes.

El proceso de simulación puede facilitarse por tanto mediante el uso de librerías o lenguajes específicos de ayuda a la simulación.

Los lenguajes de simulación son lenguajes de programación de alto nivel específicos y requieren por tanto un compilador especial.

Las librerías de simulación comprenden un conjunto de rutinas escritas en algún lenguaje de alto nivel. Rutinas a las que se deberá añadir la parte específica de la simulación a realizar.

La compilación, por tanto, no requiere ningún compilador especial y en general se pretende obtener en la medida de lo posible una independencia total de la máquina en que deba correr el programa.

En cualquiera de los dos sistemas la evolución de la simulación puede llevarse a cabo de dos maneras fundamentales:

- a) Evolución por inventario de sucesos.
- b) Evolución por interacción de procesos.

En el caso a) la simulación se contempla como una lista encadenada de sucesos en el tiempo. La ocurrencia de un suceso desencadena una serie de procesos, cambios de estado y encolado de nuevos sucesos. El programa evoluciona en

forma de saltos temporales entre suceso y suceso.

En el caso b) existe la característica de procesado de sucesos del caso anterior, pero la simulación evoluciona mediante el inicio y finalización de procesos. La realización de estos procesos dependerá de una segunda lista de sucesos condicionales cada uno de los cuales debe cumplirse para la finalización del proceso. Es decir, en lugar de modelar cambios en el estado del sistema describe el progreso de entidades (transacciones) a través del sistema a modelar.

A continuación se describen las características principales de algunos paquetes de simulación.

GPSS

- .(General Purpose Simulation System)

- .Versión inicial de IBM Corporation 1961 sobre IBM/360

- .Versiones actuales

- GPSS / 360

- GPSS V (compatible con el anterior)

- .Evolución por interacción de procesos

- .Compilador

SIMSCRIPT

- .Versión inicial Rand Corporation 1960s
- .Versiones actuales
 - SIMSCRIPT I (Rand Corporation)
 - SIMSCRIPT II (Rand Corporation)
 - SIMSCRIPT II.5 (Consolidated Analysis Center)
- .Evolución por inventario de sucesos
- .Compilador

GASP

- .Versión inicial U.S. Steel
- .Versiones actuales
 - GASP II (Arizona State University)
 - GASP IV (Pristsker _ Associates Inc.)
- .Evolución por inventario de sucesos
- .Lenguaje FORTRAN ANSI

APENDICE 4

APENDICE A4

DEMOSTRACION DE LA MONOTONIA CRECIENTE DE F(a)

En el presente Apéndice se demuestra que la función $F(a)$ definida en el capítulo 4 como:

$$F(\bar{a}) = NH^2(\bar{a} - \bar{a}^2) + (NH\bar{a} + NU)^2 \quad (A4.1)$$

es una función monótonamente creciente con a . Esta demostración es precisa para acotar $F(a)$ a partir de las acotaciones de a presentadas en la ecuación C4.25

La función $F(a)$ será monótonamente creciente con a si su derivada respecto a a es positiva en el intervalo de validez de a , es decir, entre cero y uno, por tanto:

$$\frac{dF(\bar{a})}{d\bar{a}} > 0 \quad 0 \leq \bar{a} \leq 1 \quad (A4.2)$$

Esta derivada tiene la forma:

$$\begin{aligned} \frac{dF(\bar{a})}{d\bar{a}} &= NH^2(1-2\bar{a}) + 2(NH\bar{a} + NU)NH = \\ &= NH^2 + 2N^2HU + 2N\bar{a} (NH^2 - H^2) \end{aligned} \quad (A4.3)$$

Dado que H y U son mayores o iguales que cero y N es un entero mayor que cero:

$$NH^2 \gg H^2 \implies \frac{dF(\bar{a})}{d\bar{a}} > 0 \quad \text{q.q.d.} \quad \begin{array}{l} N \text{ entero} \geq 1 \\ H \geq 0 \\ 0 \leq \bar{a} \leq 1 \end{array} \quad (\text{A4.4})$$

y por tanto la derivada será siempre mayor o igual que cero, lo cual demuestra que $F(a)$ es monotonamente creciente con a . Por tanto serán válidas las acotaciones realizadas en el capítulo cuatro para el segundo momento del tiempo de ciclo.

Las Figuras A4.1 y A4.2 reflejan este crecimiento monótono para distintos valores de N y U respectivamente.

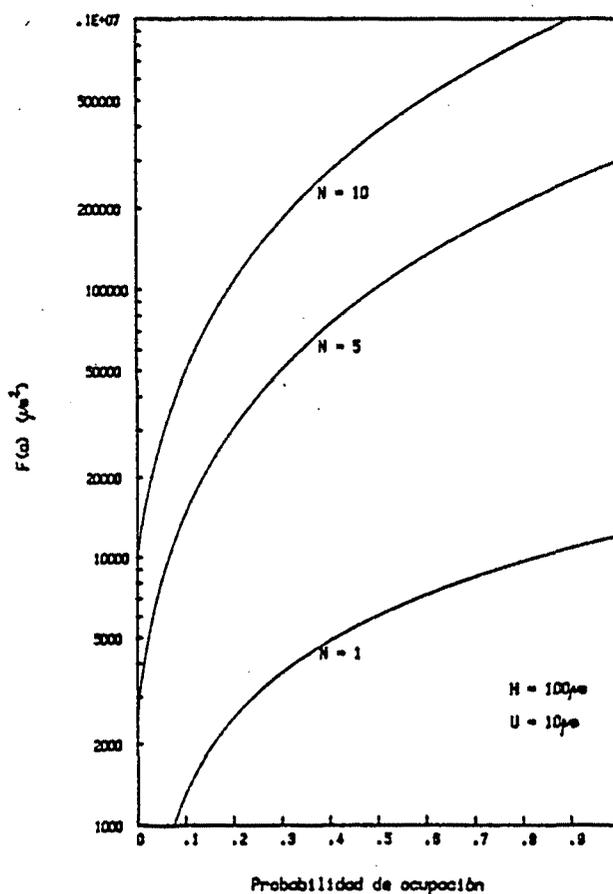


Figura A4.1 Crecimiento monótono de $F(a)$ para distintos valores de N .

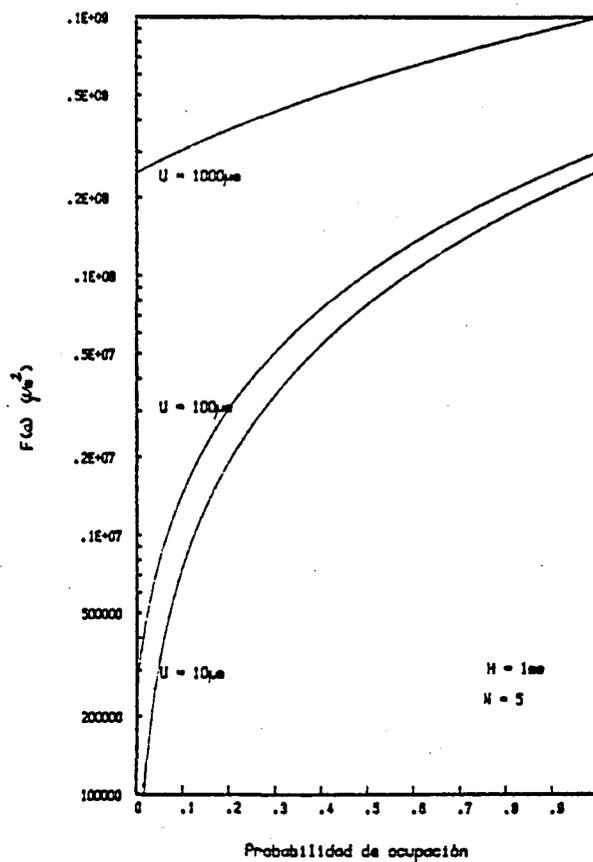


Figura A4.2 Crecimiento monótono de $F(a)$ para distintos valores de U .

APENDICE 5

APENDICE A5

OBTENCION DE \bar{q} PARA EL PROTOCOLO 1-PERSISTENTE

En este apéndice se obtiene el valor de \bar{q} para el protocolo CSMA/CD que plantea la uno persistencia, según el modelo de Lam (Lam,80) que permite realizar el estudio de persistencia del apartado 3.3.6 de la tesis.

Empezaremos primeramente por especificar el comportamiento de este protocolo.

El comportamiento de una estación dispuesta depende del estado en que se encuentra el bus de comunicación, ocupado o libre. Las acciones en función del estado son las siguientes:

a) Si el bus está libre, transmite,

b) Si el bus está ocupado, espera hasta que se de la condición de bus libre y actúa según el caso a).

En caso de que la transmisión finalice en colisión, la estación retransmite en la siguiente ranura con probabilidad p o retarda una ranura la retransmisión con probabilidad $(1-p)$.

Una vez especificado el comportamiento del protocolo, a continuación se obtiene la transformada z de la distribución límite de la variable de estado q , número de estaciones dispuestas. El primer momento de esta variable nos permitirá la obtención de las características caudal-retardo, tema que se aborda conjuntamente para las tres variantes en el apartado que sigue 3.3.6.

Partimos, para obtener $Q(z)$, de la ecuación que rige el comportamiento de la cadena Markov "imbedded" que hemos planteado en el apartado 3.3.2:

$$q_{n+1} = q_n + i_{n+1}(q_n) + v_{n+1} + u_{n+1}(q_n) - 1 \quad (\text{A5.1})$$

Si utilizamos ambos lados de la ecuación como exponente de z y aplicamos el operador esperanza matemática obtendremos:

$$E(z^{q_{n+1}}) = E(z^{q_n + i_{n+1}(q_n) + v_{n+1} + u_{n+1}(q_n) - 1}) \quad (\text{A5.2})$$

El término situado a la izquierda de la igualdad es $Q_{n+1}(z)$ y en la derecha podemos, gracias a la independencia de v_{n+1} con el resto de variables, separar las medias:

$$Q_{n+1}(z) = E(z^{q_n + i_{n+1}(q_n) + u_{n+1}(q_n)}) E(z^{v_{n+1}})^{-1} \quad (\text{A5.3})$$

Deberemos resolver ahora el término:

$$A = E(z^{q_n + i_{n+1}(q_n) + u_{n+1}(q_n)}) \quad (\text{A5.4})$$

Para lo cual se precisa, al igual que en las variantes anteriores, especificar las relaciones de dependencia entre las variables $i_{n+1}(q_n)$ y $u_{n+1}(q_n)$ que exponemos a continuación y se resumen en la Tabla A5.1.

Veamos que pasa en un sistema vacío, la existencia de período de ocio admite la llegada de k estaciones simultáneas, es decir, en la última ranura del período de ocio. Si k es igual a uno, el siguiente período será de éxito.

En resumen se comporta de forma idéntica al protocolo no-persistente analizado en el apartado 3.3.4.

$q_n = 0$	$u_{n+1}(0) = 0$ con probabilidad $p_1 / (1-p_0)$
	$i_{n+1}(0) = 1$ " " "
	$u_{n+1}(0) = u_{n+1}''$ con probabilidad $p_k / (1-p_0)$; $k \geq 2$
	$i_{n+1}(0) = k$ " " " "
$q_n = 1$	$u_{n+1}(1) = 0$
	$i_{n+1}(1) = 0$
$q_n \geq 2$	$u_{n+1}(\geq 2) = u_{n+1}''$
	$i_{n+1}(\geq 2) = 0$

Tabla A5.1 Relaciones de dependencia de las variables u_{n+1} e i_{n+1} para el protocolo 1-persistente

Veamos ahora la situación para q_n mayor que cero, esto es, ocupado por al menos una estación. Vemos que aquí pueden darse dos circunstancias diferentes: o bien q_n es igual a uno en cuyo caso el siguiente período es de transmisión con éxito y no hay contienda ni período de ocio, o bien, q_n es mayor que uno y existe contienda con colisión segura no existiendo tampoco período de ocio; siendo por tanto el número de llegadas en este período del tipo u_{n+1}'' ya que el período de contienda es con colisión segura, es decir, del tipo c'' .

La independencia entre u_{n+1} y q_n a partir de $q_n = 2$ nos permitirá escribir:

$$\begin{aligned}
 A &= P(q_n=0)E(z^{u_{n+1}(0)+i_{n+1}(0)}) + \\
 &+ P(q_n=1)E(z^{1+u_{n+1}(1)+i_{n+1}(1)}) + \\
 &+ \sum_{k=2}^{\infty} P(q_n=k)E(z^{k+u_{n+1}(k)+i_{n+1}(k)})
 \end{aligned}
 \tag{A5.5}$$

Utilizando las relaciones de dependencia podremos escribir:

$$\begin{aligned}
 A &= q_{n0}E(z^{u_{n+1}(0)+i_{n+1}(0)}) + q_{n1}z + \\
 &+ E(z^{u_{n+1}''}) \sum_{k=2}^{\infty} P(q_n=k)z^k
 \end{aligned}
 \tag{A5.6}$$

$$A = q_{n0}E(z^{u_{n+1}(0)+i_{n+1}(0)}) + q_{n1}z + u_{n+1}''(z)(Q_n(z) - q_{n0} - q_{n1}z)$$

Donde q_{n0} y q_{n1} son respectivamente, $q_{n0} = \Pr(q_n = 0)$ y $q_{n1} = \Pr(q_n = 1)$, y puede obtenerse su valor límite a partir de $Q(z)$ mediante la resolución de las siguientes dos

ecuaciones, $(Q(z)/z=1)=1$ y $(d/dz(Q(z)))/z=0)=q_0$. La resolución de las mismas se presenta en el Anexo 2 a partir del resultado $Q(z)$ con el que concluiremos en este apartado.

Queda por calcular el término:

$$A'' = E(z^{u_{n+1}(0) + i_{n+1}(0)}) \quad (A5.7)$$

que, suponiendo un proceso similar al anterior, podremos obtener como:

$$A'' = \frac{p_1}{1-p_0} z + \sum_{k=2}^{\infty} \frac{p_k}{1-p_0} E(z^{k+u_{n+1}}) = \frac{p_1}{1-p_0} z + \frac{E(z^{u''_{n+1}})}{1-p_0} \sum_{k=2}^{\infty} z^k p_k \quad (A5.8)$$

$$= \frac{1}{1-p_0} (p_1 z(1-u''_{n+1}(z)) + u''_{n+1}(z)(P(z)-p_0))$$

Finalmente, podemos ya determinar la expresión de $Q(z)$ haciendo el límite cuando n tiende a infinito en ambos lados de la ecuación A5.3.

$$Q(z) = \frac{V(z)}{z} (q_0 \frac{1}{1-p_0} (p_1 z(1-U''(z)) + U''(z)(P(z)-p_0) + q_1 z + U''(z)(Q(z)-q_0 - q_1 z)) \quad (A5.9)$$

Obtendremos ,a continuación, el primer momento de q mediante la derivada de su transformada z en $z=1$, que se resuelve en el Apéndice 1, reproduciendo aquí únicamente su resultado final.

$$\bar{q} = v_{(1)}^{(1)} \frac{U''_{(1)}^{(2)} + v_{(1)}^{(2)} + 2U''_{(1)}^{(1)} v_{(1)}^{(1)}}{2(1 - U''_{(1)}^{(1)} - v_{(1)}^{(1)})} + \quad (\text{A5.10})$$

$$\frac{2U''_{(1)}^{(1)} P_{(1)}^{(1)} + P_{(1)}^{(2)}}{P_{(1)}^{(1)} - \frac{U''_{(1)}^{(1)}(1-p_0)}{v(0)}} + \frac{-2U''_{(1)}^{(1)} - U''_{(1)}^{(2)}}{\frac{P_{(1)}^{(1)} v(0)}{1-p_0} - U''_{(1)}^{(1)}}$$

BIBLIOGRAFIA

- (Abr,73a) Abramson,N. "Packet switching with satellites" National Computer Conference, 1973, Vol 42, pp 695-702.
- (Abr,73b) Abramson,N. "The Aloha System" Computer Communication Networks Prentice Hall 1973, pp.501-517.
- (AnI,85a) ANSI/IEEE Standard Draft International Standard, Local Area Networks 802.2, Logical Link Control, IEEE 1985.
- (AnI,85b) ANSI/IEEE Standard Draft International Standard, Local Area Networks 802.3, Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, IEEE 1985.
- (AnI,85c) ANSI/IEEE Standard Draft International Standard, Local Area Networks 802.4, Token-Passing Bus Access Method, IEEE 1985.
- (BAK,75) Binder,R. Abramson,F. Okinaka,K.A. Wax,D. "ALOHA packet broadcasting-A retrospect" National Computer Conference, 1975, pp.203-215.
- (BDF,84) Balado,L. Duran,J. Figueras,J. "Multimicrocomputer System for the data adquisition and control of an experimental solar energy station" EUROMICRO'83, Ninth Symposium on Microprocessing and Microprogramming: Developments in Industry, Business and Education, Madrid, Septiembre 1983.
- (BeD,83) Behr,J.P. Dahmen,N. "Graphical Modelling with FORCASD" Philips Gmbh Forschungslaboratorium, Hamburg, 1983.
- (BFL,85) Balado,L. Figueras,L. Lupon E. "A CSMA/CD medium access protocol implementation for a low speed, low cost Local Area Network" Proceedings of the MELECON'85, Mediterranean Electrotechnical Conference, Vol II (Digital Signal Processing), Madrid, Octubre 1985, pp 559-562.
- (Bux,81) Bux,W. "Local-Area Networks: A performace comparison" Transactions on Communications, Vol 29, 10, October 1981, pp 1465-1473.

- (Bux,84) Bux,W. "Performance issues in Local-Area Networks" IBM Systems Journal, Vol 23, 4, 1984, pp 351-374.
- (Car,77) Carsten,R.T. "A simplified analysis of scan times in a asymmetrical Newhall loop with exhaustive service" IEEE Transactions on Communications , Vol 9, Sep 1977, pp 951-957.
- (CDH,83) Cobeljic,S. Daemen,J. Heyer,D. et al "Interim Report for COST 11 bis: Performance analysis of LANs" IITB, Mar 1983.
- (ChK,72) Chu,W.W. Konheim,A.G. "On the analysis and modeling of a class of computer communication systems" IEEE Transaction on Communications, Vol 20, Jun 1972, pp 645-660.
- (CoL,83) Coyle,E.J. Liu,B. "Finite Population CSMA/CD Networks" IEEE Transactions on Communications, COM-31, 11, 1983, pp 1247-1251.
- (CoL,85) Coyle,E.J. Liu,B. "A matrix representation of CSMA/CD Networks" IEEE Transactions on Communications, COM-33, 1, 1985, pp 53-64.
- (CoM,69) Cooper,R.B. Murray,G. "Queues served in cyclic order" Bell Systems Technical Journal, Vol 48, March 1969, pp 675-689.
- (Coo,70) "Queues served in cyclic order:Waiting times" Bell Systems Technical Journal, Vol 49, March 1970, pp 399-413.
- (Cot,79) Cotton,I.W. "Technologies for Local Area Computer Networks" Proceedings of the LACN Symposium, May 1979, pp.25-45.
- (Cox,55) Cox,D.R. "The analysis of non-Markovian Stochastic Processes by the inclusion of Supplementary Variables" Proc.Camb.Phil.Soc., Vol 51, 1955, pp 433-441.
- (CPR,78) Clark,D.D. Pogran,K.T. Reed,D. "An introduction to Local Area Networks" Proceedings of the IEEE, Vol 66, 11, November 1978, pp.1497-1516.

- (DIX,80) Digital Intel Xerox "The Ethernet - A Local Area Network - Data Link Layer and Physical Layer Specifications" September 1980, pp. 1-81.
- (DKS,84) Dahmen,N. Killat,U. Stecher,R. "Performance analysis of token bus and CSMA/CD protocols derived from forcasd simulation runs" Performance of Computer-Communications Systems, IFIP, 1984. Elsevier Science Publishers, pp 79-94.
- (Eis,79) Eisenberg,M. "Two queues with alternating service" SIAM J.Appl. Math., Vol 36, 2, April 1979, pp 287-303.
- (FaN,69) Farmer,W.D. Newhall,E.E. "An experimental distributed switching system to handle bursty computer traffic" Proceedings ACM Symposium on Problems in the Optimization of Data Communications. October 1969, pp 1-33.
- (Fel,57) Feller,W. "Probability Theory and its Applications" Vol 1 John Wiley and Sons 1957,68.
- (Fel,66) Feller,W. "Probability Theory and its Applications" Vol 2 John Wiley and Sons 1966,71.
- (Fer,77) Ferguson,M.J. "An approximate analysis of delay for fixed and variable length packets in an unslotted ALOHA channel" Transactions on Communications, July 1977, pp 644-654.
- (FRA,84) Figueras,J. Rubio,J.A. Alabau,A. "Introducción a las Redes Locales" Teleinformática y Redes de Computadores. Serie Mundo Electrónico, Marcombo, 1984, pp 273-289.
- (GeC,81) Gerald,J. Clancy,Jr. "A Status Report on the IEEE Project 802 Local Network Standard".
- (HaO,72) Hashida,O. Ohara,K. "Line accommodation capacity of a Communication control unit" Review of the Electronic Communications Laboratories, Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation, 20, 1972, pp 231-239.

- (Hey,82) Heyman,D.P. "An analysis of the Carrier-Sense Multiple Access protocol" The Bell System Technical Journal, Vol 61, 8, October 1982.
- (Iee,82) IEEE Project 802 Local Networks Traffic handling Characteristics. Committee Report, Working Draft, Jan 1982.
- (Iee,83) IEEE "Draft 802.1 Standard:Part A,Rev B, Overview _ Architecture" 1983.
- (Iee,85) IEEE "Draft 802.1 Standard: Glossary, Rev 2/15/85 " 1985.
- (ISO,79) ISO/TC97/SC16 "Reference Model of Open Systems Interconection" Doc N277, June 1979.
- (Kay,72) Kaye,A.R. "Analysis of a Distributed Control Loop for Data transmission" Symposium on Computer Communication Networks and Teletraffic, Polytechnic Institute of Brooklyn , April 1972, pp 47-58.
- (Ken,53) Kendall,D.G. "Stochastic Processes occurring in the theory of queues and their analysis by the Method of the imbedded Markov chain" Annals of Mathematical Statistics, 24, 1953, pp 338-354.
- (Khi,32) Khinchin,A.Y. "Mathematical Theory of Stationary Queues" Mat. Sbornik, 39, 1932, pp 73-84.
- (Kle,75) Kleinrock,L. "Queueing Systems" Volume 1 : Theory John Wiley _Sons, 1975.
- (Kle,76) Kleinrock,L. "Queueing Systems" Volume 2 : Computer Applications John Wiley _Sons, 1976.
- (KL,73) Kleinrock,L. Lam,S. "Packet-switching in a slotted satellite channel" National Computer Conference, 1973, pp.703-710.
- (KL,75) Kleinrock,L. Lam,S. "Packet Switching in a Multiaccess Broadcast Channel: Performance Evaluation" IEEE Transactions on Communications, Vol 23, 4, April 1975, pp. 410-423.

- (KlT,75) Kleinrock,L. Tobagi,F.A. "Packet Switching in Radio Channels: Part I-Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput-Delay Characteristics" IEEE Transactions in Communications, Vol 23, 12, December 1975, pp. 1400-1416.
- (KoM,74) Konheim,A.G. Meister,B. "Waiting Lines and Times in a System with Polling" Journal of the Asociation for Computing Machinery, ACM Journal, Vol 21, 3, July 1974, pp 470-490.
- (KSY,84) Kurose,J.F. Schwartz,M. Yemini,Y. "Multiple-Access Protocols and Time-Constrained Communication" ACM Computer Surveys, Vol 16, 1, March 1984, pp. 43-70.
- (Kue,79) Kuen,P.J. "Multiqueue Systems with nonexhaustive Cyclic Service" the Bell System Technical Journal, Vol 58, 3, March 1979, pp 671-698.
- (Lab,79) La Barre,C.E. "Analysis and Simulation results for CSMA contention protocols, Electronic System Division, Massachsetts, May, 1979.
- (Lam,79) Lam,S.S. "A study of the CSMA protocol in Local Networks" Proceedings 4th Berkeley Conference on distributed data managment and Computer Networks, August 1979, pp.141-154.
- (Lam,80) Lam,S.S. "A Carrier Sense Multiple Acces protocol for Local Networks" Computer Networks, 4, 1980, pp 21-32.
- (LIB,85) Lineback,J.R. Barney,C. "TI Antes up its chips for IBM token-ring Lan" Electronics, July 15, 1985, pp 16-17.
- (Lit,61) Little,J.D. "A proof oj the queueing formula $L = W$ " Operations Research, 9, 1961, pp 383-387.
- (LMP,77) Labetoulle,I. Manning,E.C. Peebles,R.W. "A homogeneous Computer Network: Analysis and Simulation" Computer Networks, Vol 1, May 1977, pp 225-240.

- (LoH,83) Lon-MuLiu Hudale G.B. "The SCA System for univariate-multivariate time series and general statistical analysis" Scientific Computing Associates, October 1983.
- (MAP,84) MAP "Manufacturing Automation Protocol-A Communication Network Protocol for Open Systems Interconnection" General Motors Corporation, 1984.
- (MeB,76) Metcalfe,R.M. Boggs,D.R. "Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks" Communications of the ACM, Vol 19, 7, July 1976, pp. 395-404.
- (MeC,83) Medictch,J.S. Chin-Tau,A.L. "Stability and Optimization of the CSMA and CSMA/CD channels" IEEE Transactions on Communicatiins, Vol 31, 6, June 1983, pp 763-774.
- (Met,73) Metcalfe,R.M. "Steady state analysis of a slotted and controlled ALOHA system with blocking" Proc. 6th Hawaii International Conference, Jan 1973.
- (Met,81) Metcalfe,R.M. "A Strategic overview of Local Computer Networks" Local Networks _Distributed Office Systems, London, May 1981, pp. 2-9.
- (MuE,84) Murray,D.N. Enslow,P.H. "Performance of a Local Area Network" IEEE Communications Magazine, 22, 11, NOV. 1984, pp 48-53.
- (Mye,82) Myers,W. "Toward a Local Network Standard" IEEE Micro, August 1982, pp.28-45.
- (Nai,76) Nair,S.S. "Alternating Priority Queues with non-zero switch rule" Comp. and Opns. Res., Vol 3, 1976, pp 337-346.
- (NiD,84) Niemegeers,I.G., Daemen J. "A comparative performance evaluation of priority service mechanisms proposed for real-time environments" Performance Analysis of Local Area Networks, IITB Report Al 23-9797, Part 3, May 1984.

- (NIV,84) Niemegeers,I.G. Vissers,C.A. "Twentenet:a LAN with message priorities, design and performace considerations" Proceedings ACM, SIGCOMM 84, Montreal, June 1984.
- (PhJ,83) Phinney,T.L. Jelatis,G.D. "Error Handling in the IEEE 802 Token- Passing Bus LAN" IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol 1, 5, November 1983, pp 784-789.
- (Rob,74) Robillard,P.N. "An analysis of a Loop Switching System with multiranck buffers based on the Markov Process" IEEE Transactions on Communications, Vol 22, Nov 1974, pp 1772-1778.
- (Roh,76) Rohatgi,V.K. "An introduction to probability theory and mathematical statistics" John Wiley Sons, 1976.
- (RuM,83) Rubin,I. De Moares,L.F.M. "Message Delay analysis for Polling and Token multiple-access schemes for Local Communication Networks" IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol 1, 5, November 1983, pp.935-947.
- (Ser,85) Servi,L.D. "Capacity estimation of cyclic queues" IEEE Transactions on Communications, COM-33, 3, Mar 1985, pp 279-282.
- (ShH,82) Sacham,N. Hunt,V.B. "Performance evaluation of the CSMA/CD (1-persistent) channel access protocol in common channel Local Networks" Local Computer Networks, IFIP 1982.
- (SoH,80) Shoch,J.F. Hupp,J.A. "Measured Performance of an Ethernet Local Network" Communications of the ACM, 23, 12, Dec. 1980.
- (Sta,84a) Stallings,W. "Local Network Performance" IEEE Communiations Magazine, Vol 22, 2, February 1984, pp. 27-36.
- (Sta,84b) Stallings,W. Local Networks, An Introduction, Collier MacMillan Canada, Inc. 1984.

- (TaK,84) Takagi,H. Kleinrock,L. "Diffusion process approximation for the queueing delay in contention packet broadcasting systems" Performance of computer-communication systems, Elsevier Science Publishers, North Holland, IFIP 1984, pp 111-124.
- (TaK,85a) Takagi,H. Kleinrock,L. "Throughput analysis for Persistent CSMA systems" IEEE Transactions on Communications, COM-33, 7, Jul 1985, pp 627-638.
- (TaK,85b) Takagi,H. Kleinrock,L. "Mean packet delay in a buffered two-user CSMA/CD system" IEEE Transactions on Communications, COM-33, 10, Oct. 1985, pp 1136-1139.
- (TGP,78) Tobagi,F.A. Gerla,M. Peebels,R.W. et al "Modeling and measurement techniques in packet communication networks" Proceedings of the IEEE, 66, 11, Nov 1978, pp 1423-1447.
- (Tob,82) Tobagi,F.A. "Carrier Sense Multiple Access with Message-Based Priority Functions" IEEE Transactions on Communications, Vol 30, 1, January 1982, pp. 185-200.
- (ToH,79) Tobagi,F.A. Hunt,V.B. "Performance Analysis of Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection" Proceedings of LANC Symposium, May 1979, pp. 217-245.
- (ToK,75) Tobagi,F.A. Kleinrock,L. "packet Switching in radio channels: Part II - The hidden terminal problem in carrier sense multiple-access and de busy-tone solution" IEEE Transactions on Communications, COM-23, 12, Dec 1975, pp 1417-1433.
- (ToK,76) Tobagi,F.A. Kleinrock,L. "Packet switching in radio channels: Part III - Polling and (dynamic) split-channel reservation multiple access" IEEE Transactions on Communications, COM-24, 8, Aug 1976, pp 832-845.

- (ToK,77) Tobagi,F.A. Kleinrock,L. "Packet Switching in Radio Channels: Part IV-Stability Considerations and Dynamic Control in Carrier Sense Multiple Access" IEEE Transactions on Communications, Vol 25, 10, October 1977, pp. 1103-1119.
- (Vod,82) Vo-Dai,T. "Throughput-Delay analysis of the non slotted and non persistent CSMA-CD protocol" Local Computer Networks, IFIP 1982.
- (YBN,72) Yuen,M.L.T. Black,B.H. Newhall,E.E. "Traffic flow in a distributed loop switching system" Symposium on Computer Communications Networks and teletraffic, Polytechnic Institute of Brooklyn, USA April 1972, pp 47-58.

