Análise de desempenho do protocolo CSMA/CD

Dulte José de Barros ★

RESUMO

O presente artigo visa analisar o desempenho do protocolo CSMA/CD, utilizado na camada de controle de acesso ao meio (MAC) de uma rede. Tal análise é efetuada sobre o tempo médio de espera e o tempo de recuperação de colisão. Adicionalmente, faz-se uma discussão dos resultados numéricos obtidos.

ABSTRACT

This paper describes the analysis of CSMA/CD protocol, used in medium access control (MAC) layer of a network. The analysis provides the average packet delay and the collision recovery time. Moreover, numerical results are discussed.

(★) **Dulte José de Barros,** formou-se em Técnico em Eletrônica e Engenheira Industrial Elétrica, modalidade Eletrônica e Telecomunicações pelo CEFET-PR, respectivamente em 1983 e 1989. Trabalhou no Laboratório Central da Telecomunicações do Paraná S.A - TELEPAR, como Técnico em Laboratório e Engenheiro entre 1985 e 1990. Atualmente, freqüenta o Curso de Mestrado em Informática Industrial, modalidade Telemática, no CEFET-PR.

1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o interesse demonstrado pelos usuários de computadores por sistemas que possam se comunicar uns com os outros, vem crescendo substancialmente. Simplicidade, flexibilidade e confiabilidade são os requisitos básicos em tais ambientes. Estes são caracterizados por um grande e, freqüentemente, variável número de dispositivos requerendo interconexão. Tais ambientes, comumente chamados de redes, com simples topologias e interfaces de conexão baratas, propiciam a flexibilidade necessária para acomodar a variabilidade do ambiente, ao mesmo tempo que atingem a confiabilidade desejada.

Todas as estações partilham um canal comum, o qual é multiacessado. Entre os vários tipos de esquemas de acesso aleatório conhecidos, o Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora (CSMA) tem demonstrado ser muito eficiente para ambientes com tempos de propagação relativamente curtos.

Em essência, o CSMA reduz o nível de interferência causado pela sobreposição de pacotes de informação em canais de multiacesso aleatório, ao permitir que os dispositivos detectem a presença de sinal no meio, devido a outras transmissões de usuários, e inibam suas transmissões quando o canal estiver ocupado. Pacotes que são inibidos ou sofrem colisões são, então, reescalonados para serem retransmitidos posteriormente.

Uma rede local comercial, conhecida como Ethernet, utiliza o protocolo CSMA em um cabo coaxial, do qual são derivadas interfaces passivas de comunicação. Com isto consegue-se, em caso de falhas de quaisquer dispositivos, que estes não interfiram na comunicação efetuada entre os demais. Além disso, dadas as características físicas de transmissão dos cabos coaxiais, em adição à capacidade de detecção de portadora, é possível para os transceptores Ethernet detectar a interferência entre os vários transmissores (incluindo o seu próprio) e abortar sua transmissão em andamento. Isto produz uma variante do CSMA, conhecida como Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora e Detecção de Colisão (CSMA/CD).

Neste artigo, baseado no trabalho efetuado por [TOB 80], explica-se o modelamento matemático de um protocolo CSMA/CD, a partir da Teoria dos Processos Estocásticos, Teoria das Filas, Cadeias de Markov e Lei de Little [PAP 65, GIO 86]. No item 2, descreve-se o princípio de operação do protocolo CSMA/CD não persistente. No item 3, é feita uma análise temporal, em que se determina o tempo médio de transmissão de um pacote em função da taxa de ocupação da rede (vazão). Os resultados numéricos obtidos são discutidos no item 4.

2. O PROTOCOLO CSMA/CD

A análise efetuada a seguir restringe-se a uma subclasse do protocolo CSMA/CD, conhecida como protocolo CSMA/CD não persistente. Neste, um dispositivo com um pacote pronto para transmissão escutará o meio e procederá conforme descrito a seguir:

— Se o meio estiver livre, imediatamente será iniciada a transmissão de um pacote.

— Se o meio estiver ocupado ou se uma colisão for detectada durante uma transmissão, será efetuado o reescalonamento do pacote para posterior retransmissão. Então, o dispositivo repetirá o algoritmo.

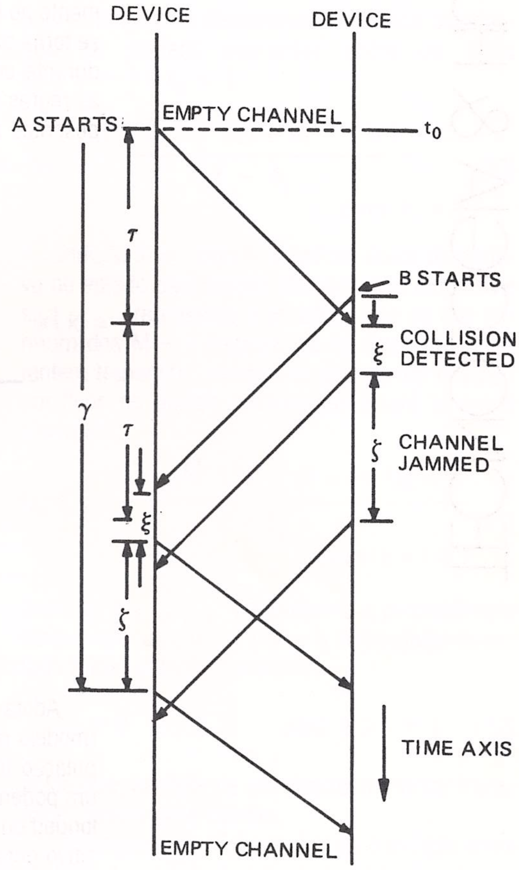

FIG. 2.1 — Detecção de colisão e tempo de recuperação.

Conforme observado na figura 2.1, devido ao fato de uma transmissão ser iniciada com o meio livre, esta alcançará todos os dispositivos após, no máximo, um tempo τ, que é definido como o maior valor do tempo de propagação entre todos os pares de usuários.

Uma colisão ocorrerá somente se outra transmissão for iniciada antes da transmissão atual ser detectada, quando se tem, então, no máximo, um tempo τ adicional antes que esta interferência alcance todos os dispositivos.

ζ denota o tempo necessário para um dispositivo detectar uma colisão, uma vez que o último dispositivo seja alcançado. ζ depende da implementação e pode ser tão pequeno quanto 1 bit, como é o caso da rede Ethernet. Além disso, a rede Ethernet possui um procedimento de reforço de colisão chamado jam, o qual assegura que todos os dispositivos conectados à rede detectem uma colisão.

ζ denota o período de tempo usado para o reforço de colisão (jam). Na ocorrência de uma colisão, o tempo, até que todos os dispositivos parem de transmitir, γ, será dado por:

$$\gamma = 2\tau + \xi + \zeta \quad (1)$$

3. ANÁLISE TEMPORAL

Assume-se que o eixo dos tempos é dividido em slots, em que cada slot é o intervalo de tempo igual a τ. A fim de simplificar a análise, considera-se todos os dispositivos sincronizados e forçados a iniciar a transmissão de um pacote somente no início de um slot. Quando um dispositivo se torna pronto em algum slot, ele escutará o meio durante um slot e, então, operará de acordo com as regras do protocolo CSMA/CD não persistente, descritas anteriormente.

Uma análise do esquema de acesso aleatório mostra no eixo dos tempos uma seqüência alternada de períodos de transmissão (com sucesso ou com colisão) e períodos livres. Um período de transmissão seguido por um período livre é chamado de ciclo, conforme mostra a figura 3.1. I denota o período livre, em slots, e T denota o tempo de transmissão de um pacote, em slots. Um período de transmissão com sucesso, constituído do tempo de transmissão mais um slot de propagação, tem comprimento T + 1. Analogamente, caso uma colisão ocorra, o comprimento de um período de transmissão será $\gamma + 1$.

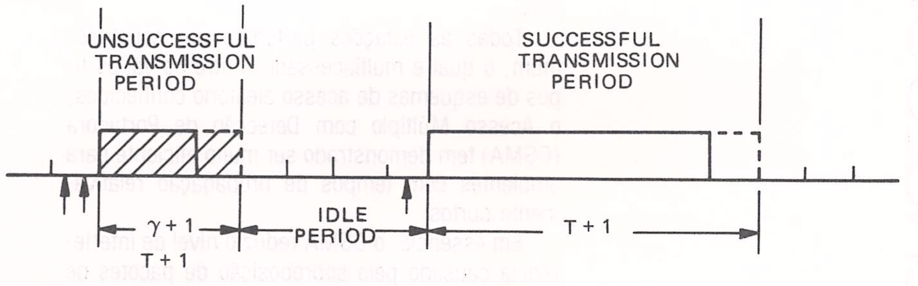

FIG. 3.1 — Períodos de transmissão e disponível em um sistema CSMA/CD não persistente. (As setas verticais representam usuários tornando-se prontos para a transmissão).

Adota-se o modelo de realimentação linear (modelo não exaustivo), que consiste de uma população finita de M dispositivos (usuários), cada um podendo estar em um dos dois estados: backlogged ou thinking. No estado thinking, um dispositivo gera e transmite (dado que o meio esteja livre), com probabilidade σ, um novo pacote em cada slot. Um dispositivo estará no estado backlogged, se seu pacote sofreu uma colisão ou foi bloqueado devido ao meio estar ocupado. Neste estado, não haverá a geração de novos pacotes no dispositivo em questão, visto que o tamanho de sua fila é considerado unitário. Ele permanecerá assim até completar a transmissão com sucesso de seu pacote, quando então passará para o estado thinking. O tempo de reescalonamento de um pacote no estado backlogged é assumido por estar geometricamente distribuído com uma média $(1/\upsilon)$ slots. Isto significa que um usuário no estado backlogged testará o meio em cada slot com uma probabilidade υ.

No presente estudo, assume-se que M, σ e υ são constantes em relação ao tempo. Considera-se τ (o tamanho do slot) como a unidade de tempo. Denota-se por S a vazão média em regime estacionário, definida como a fração de tempo na qual o meio estará ocupado por transmissões válidas. Denota-se por C a capacidade do meio, definida como a máxima vazão conseguida no canal. Finalmente, D é o tempo médio de espera, definido como o período desde o instante da geração do pacote até o instante no qual ele é recebido com sucesso no dispositivo receptor.

Considere-se os ciclos definidos pelos primeiros slots de cada período livre (identificados como t_e e $t_e + I + T + 1$ na figura 3.2). Estes representam um processo regenerativo, visto que em qualquer início de ciclo o processo estatisticamente assume um estado já assumido anteriormente.

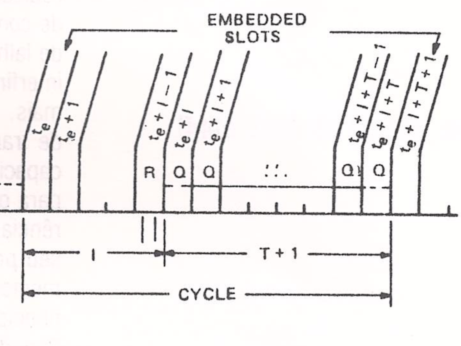

FIG. 3.2 — Formato de um ciclo no modelo adotado.

Seja uma variável aleatória N^{t_e} representando o número de dispositivos no estado backlogged no início de cada ciclo. Como em um determinado instante, cada estação pode possuir um ou nenhum pacote, o valor de N^{t_e} varia entre 0 e M. Portanto, tem-se M + 1 estados possíveis. A seqüência de estados apresentados por N^{t_e} é uma cadeia de Markov. Além disso, esta cadeia é homogênea, visto que a probabilidade de transição da variável N^{t_e}, no instante t_e, para o estado $N^{t_e + 1}$, no instante t_{e+1}, independe do instante de tempo t_e considerado.

Pode-se, então, usar as propriedades resultantes da teoria dos processos regenerativos de Markov para se deduzir o desempenho do meio em regime estacionário. Deseja-se determinar a matriz de probabilidade de transição de N^{t_e} entre dois ciclos consecutivos, denotada por $\mathbb{P}$, definida a seguir:

$$\mathbb{P} = [\, P_{ik} \,] \qquad \text{para } 0 \leqslant i,k \leqslant M \quad (2)$$

onde:

$$P_{ik} = P\,\{N^{t_e + I + T + 1} = k \mid N^{t_e} = 1\} \quad (3)$$

a qual terá dimensão (M + 1) x (M + 1), sendo que no sistema poderão existir i dispositivos no estado backlogged e M — i no estado thinking. $\mathbb{P}$ será expressa como produtos e somas de várias outras matrizes de transição entre slots adjacentes, conforme detalhado a seguir.

Durante todo o período livre, exceto no slot $t_e + I - 1$, a matriz de probabilidade de transição de N^{t_e} será constante e dada pela matriz identidade Π, ou seja:

$$\Pi = P\,\{N^{t+1} = k \mid N^t = 1\} = \begin{cases} 1 & \text{se } i = k \\ 0 & \text{se } i \neq k \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{para } 0 \leqslant i,k \leqslant M$$

onde t e t + 1 pertencem a qualquer período livre, exceto o período $t_e + I - 1$. Isto significa afirmar que não existirá mudança no estado de qualquer dispositivo.

Denota-se por $\mathbb{R}$ a matriz de transição entre um período livre e um ocupado (slots $t_e + I - 1$ e $t_e + I$ da figura 3.2, respectivamente). Desde que o sucesso ou falha de um período ocupado (e, por conseguinte, seu tamanho) depende do número de dispositivos que se tornarão prontos durante o slot $t_e + I - 1$ para tentar uma transmissão, pode-se escrever $\mathbb{R}$ como sendo:

$$\mathbb{R} = S + \mathbb{F} \quad (5)$$

onde S é a matriz de transição entre os slots $t_e + I - 1$ e $t_e + I$ de apenas uma tentativa de transmissão (portanto, com sucesso):

$$S = [\, s_{ik} \,] \qquad \text{para } 0 \leqslant i,k \leqslant M \quad (6)$$

onde:

$$s_{ik} = P\,\{N^{t_e + I} = k \text{ e Tx com sucesso} \mid N^{t_e + I - 1} = 1\} \quad (7)$$

Define-se o parâmetro δ_i, como a probabilidade de que não haja nenhuma transmissão num slot t, com $N^t = i$ (número de dispositivos no estado backlogged igual a i) no início desse slot. δ_i será dado por:

$$\delta_i = (1 - \sigma)^{M - i}\,(1 - \upsilon)^i \quad (8)$$

onde o termo $(1 - \sigma)^{M - i}$ representa a probabilidade de que não haja nenhuma transmissão por parte dos M — i dispositivos no estado thinking e o termo $(1 - \upsilon)^i$ representa a probabilidade de que não haja nenhuma transmissão por parte dos i dispositivos no estado backlogged. Conseqüentemente, $(1 - \delta_i)$ representará a probabilidade de qualquer tentativa de transmissão no slot t (será o total das probabilidades desta transição).

Assim, os elementos da matriz S serão dados por:

$$s_{ik} = 0 \qquad \text{para } k < 1 \quad (9)$$

pois o número de dispositivos no estado backlogged só poderá aumentar entre os slots $t_e + I - 1$ e $t_e + I$.

$$s_{ik} = \frac{(1 - \sigma)^{M - i}\,(1 - \upsilon)^{i - 1}\,\upsilon\, i}{1 - \delta_i} \quad (10)$$

$$\text{para } k = i$$

A condição k = i significa que um único dispositivo no estado backlogged efetuará uma tentativa e $s_{ik}|_{k = i}$ representa a probabilidade de que nenhum dos M — i dispositivos no estado thinking tentem transmitir, sendo que apenas um dos dispositivos no estado backlogged estará tentando transmitir.

$$s_{ik} = \frac{\sigma\,(1 - \sigma)^{M - i - 1}\,(1 - \upsilon)^i\,(M - i)}{1 - \delta_i} \quad (11)$$

$$\text{para } k = i + 1$$

onde $s_{ik}|_{k = i + 1}$ representa a probabilidade de que apenas um dos (M — i) dispositivos no estado thinking tente transmitir.

$$s_{ik} = 0 \qquad \text{para } k > i + 1 \quad (12)$$

posto que, se mais de um dispositivo tentar transmitir, haverá uma colisão.

Analogamente, F é a matriz de transição entre os slots $t_e + I - 1$ e $t_e + I$, dado que houve uma colisão na tentativa de transmissão:

$$\mathbb{F} = [\, f_{ik} \,] \qquad \text{para } 0 \leqslant i,k \leqslant M \quad (13)$$

onde:

$$f_{ik} = P\,\{N^{t_e + I} = k \text{ e Tx com colisão} \mid N^{t_e + I - 1} = i\} \quad (14)$$

Os elementos f_{ik} são definidos como:

$$f_{ik} = 0 \qquad \text{para } k < i \quad (15)$$

$$f_{ik} = \frac{(1 - \sigma)^{M - 1}\,[1 - (1 - \upsilon)^i - i\upsilon\,(1 - \upsilon)^{i - 1}]}{1 - \delta_i} \quad (16)$$

$$\text{para } k = 1$$

$$f_{ik} = \frac{(M - 1)\,\sigma\,(1 - \sigma)^{M - i - 1}\,[1 - (1 - \upsilon)^i]}{1 - \delta_i} \quad (17)$$

$$\text{para } k = i + 1$$

$$f_{ik} = \frac{\left[\begin{matrix} M - 1 \\ k - 1 \end{matrix}\right](1 - \sigma)^{M - k}\,\sigma^{k - i}}{1 - \delta_i} \quad (18)$$

$$\text{para } k > i + 1$$

Seja Q a matriz de transição para todos os slots restantes do período ocupado. Para qualquer slot t neste período, Q simplesmente reflete a possível geração de pacotes pelos $M - N^t$ dispositivos no estado thinking. Isto significa afirmar que durante o período ocupado, todos os dispositivos, nos quais haja a chegada de um novo pacote, vão para o estado backlogged.

A matriz Q é definida como:

$$Q = [\, q_{ik} \,] \qquad \text{para } 0 \leqslant i,k \leqslant M \quad (19)$$

onde os elementos q_{ik} são dados por:

$$q_{ik} = 0 \qquad \text{para } k < i \quad (20)$$

pois o número de dispositivos no estado backlogged só poderá aumentar.

$$q_{ik} = \left[\begin{matrix} M-i \\ k-i \end{matrix} \right] (1-\sigma)^{M-k}\, \sigma^{k-i} \qquad \text{para } k \geqslant i \quad (21)$$

A condição $k \geqslant i$ corresponde à passagem de $k - i$ dispositivos ao estado backlogged, devido à chegada de novos pacotes.

Finalmente, caso uma transmissão seja bem sucedida, em seu término, o número de dispositivos no estado backlogged será decrementado de uma unidade. A matriz J, definida a seguir, reflete este fato:

$$J = [\, j_{ik} \,] \qquad \text{para } 0 \leqslant i,k \leqslant M \quad (22)$$

onde os elementos j_{ik} são dados por:

$$j_{ik} = 1 \qquad \text{para } k = i - 1 \quad (23)$$

$$j_{ik} = 0 \qquad \text{para } k \neq i - 1 \quad (24)$$

Se uma transmissão tiver sucesso, seu tamanho será T + 1 slots. Se houver colisão, será $\gamma + 1$. Portanto, a matriz de transição P pode ser expressa em função das matrizes dadas acima:

$$\mathbb{P} = \mathbb{I}^{I} \, [S\, Q^{T+1} J + \mathbb{F}\, Q^{\gamma+1}] \quad (25)$$

Seja Π a matriz de distribuição de probabilidade estacionária de N^{t_e}:

$$\Pi = \{\pi_0, \pi_1, \ldots, \pi_M\} \quad (26)$$

onde os vetores π_i $(0 \leqslant i \leqslant M)$ representam a probabilidade em regime permanente de existirem i usuários no estado backlogged em qualquer slot t. Pelo Teorema do Valor Final da teoria dos processos Markovianos [GIO 86], aplicado à matriz de transição P, obtém-se a solução recursiva:

$$\Pi = \Pi\, \mathbb{P} \quad (27)$$

a qual poderá ser resolvida em relação aos vetores π_i por meio da equação adicional:

$$\sum_{i=0}^{M} \pi_i = 1 \quad (28)$$

A partir dos vetores Π_i será possível determinar a vazão S do sistema. Desde que N^{t_e} é um processo regenerativo, a vazão média em regime é a relação entre o tempo médio no qual o meio está ocupado por transmissões com sucesso durante um ciclo e o tempo médio de um ciclo:

$$S = \frac{\sum_{i=0}^{M} \pi_i\, P_s(i)\, T}{\sum_{i=0}^{M} \pi_i \left[\frac{1}{1-\delta_i} + 1 + P_s(i)\, T + [1 - P_s(i)]\, \gamma \right]} \quad (29)$$

onde P(i) a probabilidade de uma transmissão com sucesso durante um ciclo com $N^{t_e} = i$, dada por:

$$P_s(i) = \frac{[(M-i)\,\sigma\,(1-\sigma)^{M-i-1}\,(1-\upsilon)^{i} + i\,\upsilon\,(1-\upsilon)^{i-1}\,(1-\sigma)^{M-i}]}{[1 - (1-\upsilon)^{i}\,(1-\sigma)^{M-i}]} \quad (30)$$

A partir da vazão S é possível determinar-se o tempo médio de espera D, calculando-se inicialmente o número médio de pacotes no sistema, denotado por $\overline{N}$:

$$\overline{N} = \frac{\sum_{i=0}^{M} \pi_i \left[\frac{1}{1-\delta_i} + A(i) \right]}{\sum_{i=0}^{M} \pi_i \left[\frac{1}{1-\delta_i} + 1 + P_s(i)\, T + [1 - P_s(i)]\, \gamma \right]} \quad (31)$$

onde A(i) é o somatório esperado de ocupações sobre todos os slots do período ocupado, com N^{t_e} i, dado por:

$$A(i) = \sum_{i=0}^{T} \sum_{j=i}^{M} j\, [S\, Q^{\iota}]_{ij} + \sum_{\iota=0}^{\tau} \sum_{j=i}^{M} j\, [\mathbb{F}\, Q^{\iota}]_{ij} = \sum_{j=i}^{M} j\, [S \sum_{\iota=0}^{T} Q^{\iota} + \mathbb{F} \sum_{\iota=0}^{\gamma} Q^{\iota}] \quad (32)$$

De acordo com a Lei de Little, o tempo médio de espera numa fila estocástica é a relação entre o número médio de pacotes no sistema $\overline{N}$ e a taxa média de chegada de pacotes λ. No caso da rede considerada, existem M filas e, portanto, o tempo médio de espera no sistema será dado por:

$$D = \frac{\overline{N}}{\lambda} \tag{33}$$

Em regime estacionário, onde existe igualdade entre a taxa de chegada e a taxa de transmissões com sucesso, a taxa média de chegada λ é calculada como a relação entre a vazão média e o tempo médio de transmissão de um pacote:

$$\lambda = \frac{S}{T\tau} \tag{34}$$

onde o produto $(T\tau)$ representa o tempo médio de transmissão de um pacote em unidades de tempo.

Finalmente, efetuando a substituição de λ na equação (33), obtém-se:

$$D = \frac{\overline{N}\,T\,\tau}{S} \tag{35}$$

4. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS

O comportamento do CSMA/CD para um γ fixo indica que o percentual de ocupação do meio de transmissão com mensagens corretamente transmitidas (intensidade de tráfego ou vazão normalizada) é sensível à υ, e, portanto, ao tempo médio de espera.

A figura 4.1 mostra a curva de tempo médio de espera $D' = \overline{N}/S$, normalizado em relação ao tamanho das mensagens, em função da intensidade de tráfego, tendo υ como parâmetro, para $M = 50$, $T = 100$ e $\gamma = 2$.

Como fonte de consulta adicional, uma excelente análise comparativa entre um protocolo CSMA sem detecção de colisão e o CSMA/CD também é efetuada em [TOB 80].

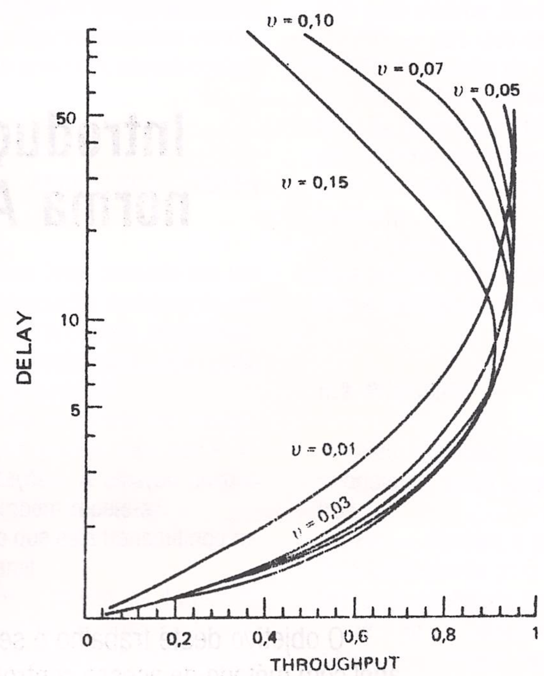

FIG. 4.1 — Tempo médio de espera versus vazão, normalizados no CSMA/CD, para um υ fixo. Como exemplo de cálculo, considere C = 10Mbit/s, L = 500m e vo = 200m/μs. Portanto, τ = 2.5μs, τ = 5 μs e T = 2500 bits. Isto significa que as ordenadas estão em unidades de 250 μs.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo, mostrou-se como utilizar a teoria dos processos estocásticos de Markov e a Lei de Little na modelagem de um protocolo de competição. Partindo de um modelamento matemático da realidade, foi analisado um sistema tão complexo quanto um protocolo CSMA/CD. A preocupação básica esteve restrita à análise temporal deste protocolo.

Com as equações obtidas, torna-se possível a implementação prática de um programa computacional que efetue o cálculo do desempenho de uma rede CSMA/CD, conhecendo-se seus principais parâmetros.

Como complemento do estudo teórico efetuado, sugere-se a leitura de [TOB 80], em que se analisa, em detalhes, o protocolo CSMA/CD tanto para pacotes de tamanho fixo quanto para pacotes de tamanho variável.

6. BIBLIOGRAFIA

[GIO 86] Giozza W.F. et al., Redes Locais de Computadores Protocolos de Alto Nível e Avaliação de Desempenho, São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

[PAP 65] Papoulis, A., Probability, Random Variables and Stochastic Processes. New York: McGraw-Hill, 1965.

[TOB 80] Tobagi F. e Hunt B., Performance Analysis of Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection, Computer Networks 4, 1980, pag. 245-259.