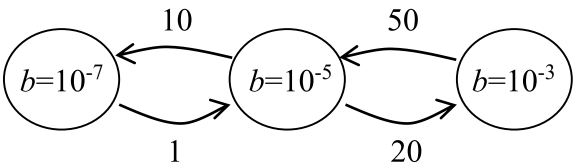
Universidade de Aveiro
Mestrado em Engenharia de Computadores e Telemática
Exame de Modelação e Desempenho de Redes e Serviços – 16 de fevereiro de 2022

Duração: 2 horas. Sem consulta. ***Justifique cuidadosamente todas as respostas***.

RESOLUÇÃO

1. Considere uma ligação sem fios entre um emissor e um recetor em que a probabilidade de erro de bit *b* é modelada pela cadeia de Markov seguinte:



Esta ligação suporta um fluxo de pacotes cujo comprimento é 500 Bytes com probabilidade de 25% e 1500 Bytes com probabilidade de 75%. Determine:

a) a probabilidade da ligação estar no estado $b = 10^{-5}$ quando um pacote de 500 Bytes chega ao recetor sem erros, (*1.5 valores*)

b) a percentagem de pacotes transmitidos que chegam ao recetor sem erros. (*1.5 valores*)

a)

$$P(10^{-7}) = \frac{1}{1+\frac{1}{10}+\frac{1}{10}\times\frac{20}{50}} \qquad P(E|10^{-7}) = (1-10^{-7})^{8\times 500}$$

$$P(10^{-5}) = \frac{\frac{1}{10}}{1+\frac{1}{10}+\frac{1}{10}\times\frac{20}{50}} \qquad P(E|10^{-5}) = (1-10^{-5})^{8\times 500}$$

$$P(10^{-3}) = \frac{\frac{1}{10}\times\frac{20}{50}}{1+\frac{1}{10}+\frac{1}{10}\times\frac{20}{50}} \qquad P(E|10^{-3}) = (1-10^{-3})^{8\times 500}$$

$$P(10^{-5}|E) = \frac{P(E|10^{-5})P(10^{-5})}{P(E|10^{-7})P(10^{-7}) + P(E|10^{-5})P(10^{-5}) + P(E|10^{-3})P(10^{-3})}$$

$$P(10^{-5}|E) = 0.0876 = 8.76\%$$

b)

$$P_{500} = P(10^{-7})\times(1-10^{-7})^{8\times 500} + P(10^{-5})\times(1-10^{-5})^{8\times 500} + \\ + P(10^{-3})\times(1-10^{-3})^{8\times 500}$$

$$P_{1500} = P(10^{-7})\times(1-10^{-7})^{8\times 1500} + P(10^{-5})\times(1-10^{-5})^{8\times 1500} + \\ + P(10^{-3})\times(1-10^{-3})^{8\times 1500}$$

$$P = 0.25\times P_{500} + 0.75\times P_{1500} = 0.9559 = 95.59\%$$

2. Considere uma ligação de capacidade *C* com uma fila de espera pequena a suportar com igual prioridade dois fluxos de pacotes. Cada fluxo têm um débito binário médio *d* (tal que $d + d < C$) e em ambos os fluxos, as chegadas de pacotes são um processo de Poisson. O tamanho médio dos pacotes do fluxo 1 é metade do tamanho médio dos pacotes do fluxo 2. Indique justificadamente que fluxo tem melhor qualidade de serviço (ou se os dois fluxos têm a mesma qualidade de serviço) relativamente:

   a) à percentagem de perda de pacotes, (*1.0 valores*)

   b) ao atraso médio por pacote, (*1.0 valores*)

   c) ao débito binário (*throughput*) que os fluxos obtêm da ligação. (*1.0 valores*)

3. Considere a rede com comutação de pacotes da figura em que todas as ligações têm uma fila de espera de capacidade infinita. A rede suporta 2 fluxos de pacotes: fluxo 1 de 5 Mbps de A para C com pacotes de tamanho constante de 200 Bytes e fluxo 2 de 10 Mbps de B para D com pacotes de tamanho constante de 1000 Bytes. Em cada fluxo, as chegadas de pacotes são um processo de Poisson. A rede suporta o fluxo 2 com maior prioridade que o fluxo 1. Determine o atraso médio por pacote do fluxo 1. (*2.0 valores*)

$\lambda_1 = \frac{5000000}{8\times200} = 3125$ pps $\qquad \lambda_2 = \frac{10000000}{8\times1000} = 1250$ pps

Ligação AB suporta apenas o fluxo 1 (M/G/1 sem prioridades):

$E[S] = \frac{8\times200}{10000000} \qquad E[S^2] = \left(\frac{8\times200}{10000000}\right)^2$

$W_{1,AB} = \frac{\lambda E[S^2]}{2(1-\lambda E[S])} + E[S] = 0.00024$ segundos

Ligação BC suporta os fluxos 1 e 2 em que o fluxo 1 tem menos prioridade (M/G/1 com prioridades):

$E[S_1] = \frac{8\times200}{20000000} \qquad E[S_1^2] = \left(\frac{8\times200}{20000000}\right)^2$

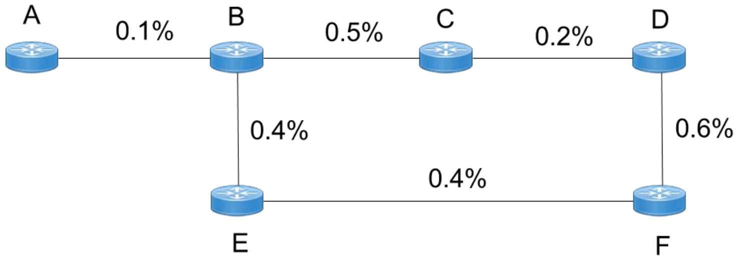
$E[S_2] = \frac{8\times1000}{20000000} \qquad E[S_2^2] = \left(\frac{8\times1000}{20000000}\right)^2$

$W_{1,BC} = \frac{\lambda_1 E[S_1^2]+\lambda_2 E[S_2^2]}{2(1-\lambda_2 E[S_2])(1-\lambda_2 E[S_2]-\lambda_1 E[S_1])} + E[S_1] = 0.00096$ segundos

Atraso médio total do fluxo 1:

$W_1 = W_{1,AB} + W_{1,BC} = 0.0012 = 1.2$ milissegundos

4. Considere a rede com comutação de pacotes da figura a suportar diferentes fluxos de pacotes entre todos os routers cuja percentagem de perda de pacotes em cada sentido de cada ligação é a especificada na figura. Assuma que um dos fluxos tem origem no nó A e destino no nó F e que este fluxo está a ser encaminhado em igual percentagem pelos dois percursos possíveis. Determine a taxa de perda de pacotes que este fluxo sofre na rede. (*2.0 valores*)



Percurso A-B-C-D-F:

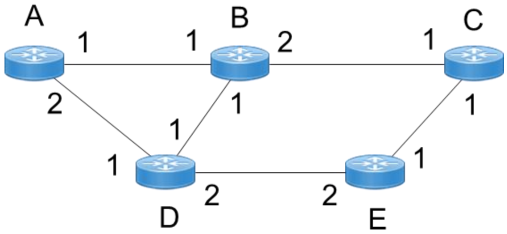
$$P_{ABCDF} = 0.001 + (1-0.001)\times 0.005 + (1-0.001)\times(1-0.005)\times 0.002 + \\ + (1-0.001)\times(1-0.005)\times(1-0.002)\times 0.006 = 0.013935$$

Percurso A-B-E-F:

$$P_{ABEF} = 0.001 + (1-0.001)\times 0.004 + (1-0.001)\times(1-0.004)\times 0.004 = 0.008976$$

$$\text{TPP} = 0.5\times P_{ABCDF} + 0.5\times P_{ABEF} = 0.0115 = 1.15\%$$

5. Considere a rede da figura em que os routers estão configurados com o protocolo OSPF usando ECMP (*Equal Cost Multi-Path*). A figura indica os custos OSPF de cada porta dos routers. Todas as ligações são de 100 Mbps em cada sentido e têm filas de espera muito grandes. Num determinado período de tempo, a rede suporta apenas um único fluxo de pacotes do router A para o router E. A chegada de pacotes deste fluxo é um processo de Poisson com taxa de 25000 pps. O tamanho dos pacotes é exponencialmente distribuído com média de 500 Bytes.



a) Determine justificadamente que débito binário médio (*throughput*), em Mbps, o fluxo ocupa em cada sentido de cada ligação. (*1.5 valores*)

b) Qual o atraso médio que os pacotes deste fluxo sofrem na rede. (*1.5 valores*)

Débito binário médio do fluxo = 25000×(8×500) = 10^8 bps = 100 Mbps

a) Router A recebe 100 Mbps e envia 50 Mbps para o router B e 50 Mbps para o router C (ambos dão um percurso de custo mínimo de 4 do router A para o router E).

Router B recebe 50 Mbps (do router A) e envia 25 Mbps para o router C e 25 Mbps para o router D (ambos dão um percurso de custo mínimo de 3 do router B para o router E).

Router C recebe 25 Mbps (do router B) e envia 25 Mbps para o router E.

Router D recebe 75 Mbps (50 Mbps do router A e 25 Mbps do router B) e envia 75 Mbps para o router E.

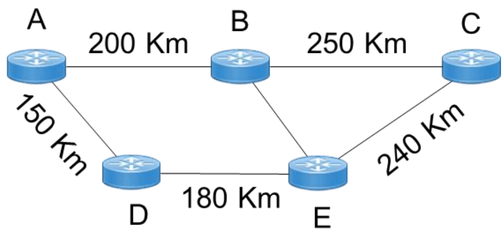
Débito binário em cada ligação: A→B: 50 Mbps A→D: 50 Mbps
B→C: 25 Mbps C→E: 25 Mbps
B→D: 25 Mbps D→E: 75 Mbps
Todos os outros sentidos: 0 Mbps

b) $L = L_{A \to B} + L_{A \to D} + L_{B \to C} + L_{C \to E} + L_{B \to D} + L_{D \to E}$

$$L = \frac{50}{100-50} + \frac{50}{100-50} + \frac{25}{100-25} + \frac{25}{100-25} + \frac{25}{100-25} + \frac{75}{100-75} = 6 \text{ pacotes}$$

$$W = \frac{L}{\lambda} = \frac{6}{25000} = 0.00024 = 0.24 \text{ milissegundos}$$

6. Considere a rede da figura que indica o comprimento das ligações de uma rede de routers. O tráfego com origem no router A e cujo destino é o C é protegido por um esquema 1:1 em que o percurso de serviço é A-B-C e o percurso de proteção é A-D-E-C. Cada router tem uma disponibilidade de 0.9999. Assuma que a disponibilidade das ligações se caracteriza por um *Cable Cut* de 200 Km e um tempo médio de reparação de 12 horas. Determine:



   a) a disponibilidade do par de percursos usado, (*2.0 valores*)
   b) a probabilidade de, num qualquer instante de tempo, o tráfego estar a ser encaminhado pelo percurso de serviço. (*1.0 valores*)

a) $a_A = a_B = a_C = a_D = a_E = 0.9999$

$$a_{AB} = \frac{\frac{200\times365\times24}{200}}{\frac{200\times365\times24}{200} + 12} = 0.99863 \qquad a_{BC} = \frac{\frac{200\times365\times24}{250}}{\frac{200\times365\times24}{250} + 12} = 0.99829$$

$$a_{AD} = \frac{\frac{200\times365\times24}{150}}{\frac{200\times365\times24}{150} + 12} = 0.99897 \qquad a_{DE} = \frac{\frac{200\times365\times24}{180}}{\frac{200\times365\times24}{180} + 12} = 0.99877$$

$$a_{EC} = \frac{\frac{200\times365\times24}{240}}{\frac{200\times365\times24}{240} + 12} = 0.99897$$

$$a_{AB,B,BC} = a_{AB} \times a_B \times a_{BC} = 0.99683$$

$$a_{AD,D,DE,E,EC} = a_{AD} \times a_D \times a_{DE} \times a_E \times a_{EC} = 0.99591$$

$$A = a_A \times \left(1 - \left[\left(1 - a_{AB,B,BC}\right) \times \left(1 - a_{AD,D,DE,E,EC}\right)\right]\right) \times a_C = 0.99979$$

b) $P = a_A \times a_{AB} \times a_B \times a_{BC} \times a_C = 0.99663 = 99.663\%$

7. Considere uma ligação de 10 Mbps que serve dois fluxos de pacotes (A e B) segundo o algoritmo *Deficit Round Robin* com um limiar de 1000 bytes para o fluxo A e de 2000 Bytes para o fluxo B.

– No fluxo A, chegam 3 pacotes nos instantes de tempo seguintes: pacote 1 de 1400 Bytes no instante 0 ms, pacote 2 de 800 Bytes no instante 2 ms e pacote 3 de 600 Bytes no instante 3 ms.
– No fluxo B, chegam 3 pacotes nos instantes de tempo seguintes: pacote 1 de 1500 Bytes no instante 0 ms, pacote 2 de 1000 Bytes no instante 1 ms e pacote 3 de 1200 Bytes no instante 4 ms.

O ciclo segue a sequência A→B e o algoritmo decide no início de cada ciclo os pacotes a enviar e respetiva ordem. Determine justificadamente que pacotes e por que ordem são enviados em cada ciclo. (*2.0 valores*)

1º ciclo:	Início: 0 ms		
Pacotes:	B.1 (1500 B)	Créditos:	Fluxo A = 1000 Bytes
			Fluxo B = 2000 – 1500 = 500 Bytes
2º ciclo:	Início: $0 + 8\times1500/10000000 = 1.2\times10^{-3}$ = 1.2 milissegundos		
Pacotes:	A.1 (1400 B) → B.2 (1000 B)	Créditos:	Fluxo A = 2000 – 1400 = 600 Bytes
			Fluxo B = 2500 – 1000 = 1500 Bytes
3º ciclo:	Início: $1.2\times10^{-3} + 8\times(1400+1000)/10000000 = 3.12\times10^{-3}$ = 3.12 milissegundos		
Pacotes:	A.2 (800 B) → A.3 (600 B)	Créditos:	Fluxo A = 1600 – (800+600) = 200 Bytes
			Fluxo B = 0 Bytes
4º ciclo:	Início: $3.12\times10^{-3} + 8\times(800+600)/10000000 = 4.24\times10^{-3}$ = 4.24 ms		
Pacotes:	B.3 (1200 B)	Créditos:	Fluxo A = 0 Bytes
			Fluxo B = 2000 – 1200 = 800 Bytes

8. Considere um serviço de conteúdos disponibilizado na Internet. Descreva as vantagens em fornecer o serviço em *anycast* baseado em diferentes servidores, cada um hospedado num *Data Center* diferente e com os diferentes *Data Centers* ligados à Internet em diferentes países. (*2.0 valores*)

FORMULÁRIO

Teorema de Little: $L = \lambda W$ Atraso médio no sistema $M/M/1$: $W = \dfrac{1}{\mu - \lambda}$

Atraso médio na fila de espera do sistema $M/G/1$:

$$W_Q = \frac{\lambda E[S^2]}{2(1-\lambda E[S])}$$

Atraso médio na fila de espera do sistema $M/G/1$ com prioridades do tipo não-preemptivo:

$$W_{Qk} = \begin{cases} \dfrac{\sum_{i=1}^{n}(\lambda_i E[S_i^2])}{2(1-\rho_1)} & , \ k = 1 \\ \dfrac{\sum_{i=1}^{n}(\lambda_i E[S_i^2])}{2(1-\rho_1-\cdots-\rho_{k-1})(1-\rho_1-\cdots-\rho_k)} & , k > 1 \end{cases} \qquad \rho_k = \lambda_k E[S_k]$$

Fórmula de ErlangB: $P_m = \dfrac{(\lambda/\mu)^m / m!}{\sum_{n=0}^{m}(\lambda/\mu)^n / n!}$

Probabilidades limite dos estados (processo de nascimento e morte):

$$P_0 = \frac{1}{1+\sum\limits_{n=1}^{\infty}\dfrac{\lambda_0\lambda_1\cdots\lambda_{n-1}}{\mu_1\mu_2\cdots\mu_n}}, \ P_n = \frac{\lambda_0\lambda_1\cdots\lambda_{n-1}}{\mu_1\mu_2\cdots\mu_n\left(1+\sum\limits_{n=1}^{\infty}\dfrac{\lambda_0\lambda_1\cdots\lambda_{n-1}}{\mu_1\mu_2\cdots\mu_n}\right)}, \ n \geq 1$$

WFQ: $RN(\tau_i + t) = RN(\tau_i) + \dfrac{1}{\sum\limits_{j\ ativas}\phi_j} t$ $\qquad FN_{i,k} = \max\left(FN_{i,k-1}, RN\right) + \dfrac{L_k/C}{\phi_i}$

SCFQ: $FN_{i,k} = \max\left(FN_{i,k-1}, FN_s\right) + \dfrac{L_k}{\phi_i}$

WFQ com *Leaky Bucket*: $D_i = \dfrac{\sigma_i + (n-1)L_i}{r_i} + \sum\limits_{j=1}^{n}\dfrac{L_{\max}}{C_j} + \Gamma$

Disponibilidade (elementos em série): $A = a_1 \times a_2 \times \ldots \times a_n$

Disponibilidade (elementos em paralelo): $A = 1 - [(1-a_1) \times (1-a_2) \times \ldots \times (1-a_n)]$

Disponibilidade de uma ligação:

$$\frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \qquad MTBF = \frac{CC \times 365 \times 24}{\text{comprimento da ligação [Km]}}$$