



## **Métodos de Modelação Estocástica**

Modelação e Desempenho de Redes e Serviços

Prof. Amaro de Sousa (asou@ua.pt)

DETI-UA, 2021/2022

# Experiência aleatória

- Numa experiência aleatória, o espaço de resultados,  $S$ , é o conjunto de todos os resultados possíveis da experiência
- Qualquer subconjunto  $E$  do espaço de resultados  $S$  designa-se por evento ou acontecimento
- Dados dois acontecimentos  $E$  e  $F$ , podem-se definir outros acontecimentos:

A união dos acontecimentos,  $E \cup F$

A intersecção dos acontecimentos,  $EF$

- Quando  $EF = \emptyset$  ( $\emptyset$  é o conjunto vazio) os acontecimentos dizem-se mutuamente exclusivos
- O complemento de  $E$ ,  $E^c$ , é o conjunto de elementos de  $S$  que não pertencem a  $E$

# Probabilidades definidas sobre acontecimentos

- Para cada acontecimento  $E$  de  $S$ , admite-se a existência de um número  $P(E)$  designado por probabilidade de  $E$ , se satisfaz as seguintes condições:

$$(1) 0 \leq P(E) \leq 1$$

$$(2) P(S) = 1$$

- (3) Para qualquer conjunto de acontecimentos mutuamente exclusivos  $E_1, E_2, E_3, \dots$

$$P\left(\bigcup_i E_i\right) = \sum_i P(E_i)$$

- Corolários:

$$P(E) + P(E^c) = 1$$

$$P(E \cup F) = P(E) + P(F) - P(EF)$$

# Probabilidades condicionadas

- Dados dois acontecimentos  $E$  e  $F$ , a probabilidade condicionada de  $E$  ocorrer dado que  $F$  ocorreu designa-se por  $P(E|F)$  e é definida por

$$P(E|F) = P(EF)/P(F)$$

- Dois acontecimentos  $E$  e  $F$  dizem-se acontecimentos independentes se

$$P(EF) = P(E)P(F)$$

- Se  $E$  e  $F$  são independentes, então:

$$P(E|F) = P(E) \quad \text{e} \quad P(F|E) = P(F)$$

ou seja, se o conhecimento que um acontecimento ocorreu não afetar a probabilidade do outro ocorrer.

- Sejam  $F_1, F_2, \dots, F_n$  acontecimentos mutuamente exclusivos tais que a sua união forma o espaço de resultados  $S$ . Então,

$$P(E) = \sum_{i=1}^n P(EF_i) = \sum_{i=1}^n P(E|F_i)P(F_i)$$

# Regra de Bayes

Sejam  $F_1, F_2, \dots, F_n$  acontecimentos mutuamente exclusivos tais que a sua união forma o espaço de resultados  $S$ .

Tendo ocorrido o acontecimento  $E$ , a probabilidade de  $F_j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) ter ocorrido é dada por:

$$P(F_j | E) = \frac{P(EF_j)}{P(E)} = \frac{P(E | F_j)P(F_j)}{P(E)} = \frac{P(E | F_j)P(F_j)}{\sum_{i=1}^n P(E | F_i)P(F_i)}$$

## Probabilidades condicionadas – Exemplo 1

Num teste de escolha múltipla, um estudante sabe a resposta certa com probabilidade  $p$  e adivinha a resposta com probabilidade  $1 - p$ . Ao adivinhar a resposta, o estudante acerta com probabilidade  $1/m$ , sendo  $m$  o número de alternativas de escolha múltipla.

Determine a probabilidade de um estudante (i) responder corretamente à pergunta e (ii) saber a resposta dado que a respondeu corretamente.

Acontecimentos:  $E$  – o aluno responde corretamente

$F_1$  – o aluno sabe a resposta

$F_2$  – o aluno não sabe a resposta

$$(i) P(E) = P(E|F_1)P(F_1) + P(E|F_2)P(F_2)$$

$$= 1 \times p + 1/m \times (1 - p) =$$

$$= p + (1 - p)/m$$

$$(ii) P(F_1|E) = P(E|F_1)P(F_1) / P(E)$$

$$= 1 \times p / [p + (1 - p)/m] =$$

$$= p m / [1 + (m - 1) p]$$

Se  $p = 50\%$  e  $m = 4$ , então (i)  $P(E) = 62.5\%$  e (ii)  $P(F_1|E) = 80\%$

## Probabilidades condicionadas – Exemplo 2

Numa ligação sem fios (wireless) entre dois equipamentos, a probabilidade dos pacotes de dados serem recebidos com erros é de 0.1% em condições normais ou de 10% quando há interferências. A probabilidade de haver interferência é de 2%. Os equipamentos têm a capacidade de verificar na receção se os pacotes de dados foram recebidos com erros ou não.

Determine: (i) a probabilidade de um pacote ser recebido com erros e (ii) se um pacote for recebido com erros, qual a probabilidade da ligação estar com interferência.

Acontecimentos:  $E$  – o pacote é recebido com erros

$F_1$  – a ligação está em condições normais

$F_2$  – a ligação está com interferência

$$(i) P(E) = P(E|F_1)P(F_1) + P(E|F_2)P(F_2)$$

$$= 0.001 \times (1 - 0.02) + 0.1 \times 0.02$$

$$= 0.00298 = 0.298\%$$

$$(ii) P(F_2|E) = P(E|F_2)P(F_2) / P(E)$$

$$= 0.1 \times 0.02 / 0.00298$$

$$= 0.671 = 67.1\%$$

# Variáveis aleatórias

- Uma variável aleatória  $X$  é uma função que atribui um número real a cada ponto do espaço de resultados  $S$  de uma experiência aleatória.
- A função distribuição (ou função de distribuição cumulativa) da v.a.  $X$  é:

$$F(x) = P(X \leq x) \quad , \quad -\infty < x < +\infty$$

- Propriedades da função distribuição:

$$(1) \quad 0 \leq F(x) \leq 1 \quad \text{para todo o } x$$

$$(2) \quad \text{se } x_1 \leq x_2 \text{ então } F(x_1) \leq F(x_2) \quad (\text{função não decrescente})$$

$$(3) \quad \lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0 \quad \text{e} \quad \lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$$

$$(4) \quad P(a < X \leq b) = F(b) - F(a) \quad , \quad \text{para } a < b$$



# Variáveis aleatórias discretas

- Uma variável aleatória  $X$  diz-se discreta se puder tomar, quando muito, um número contável de valores  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots$
- Define-se função probabilidade (ou função massa de probabilidade) da v.a discreta  $X$  por

$$f(x_i) = P(X = x_i) \quad \text{para todos os valores de } i = 1, 2, 3, \dots$$

- Obrigatoriamente, tem de acontecer que:  $\sum_{i=1}^{\infty} f(x_i) = 1$
- A função distribuição da v.a discreta  $X$  é:

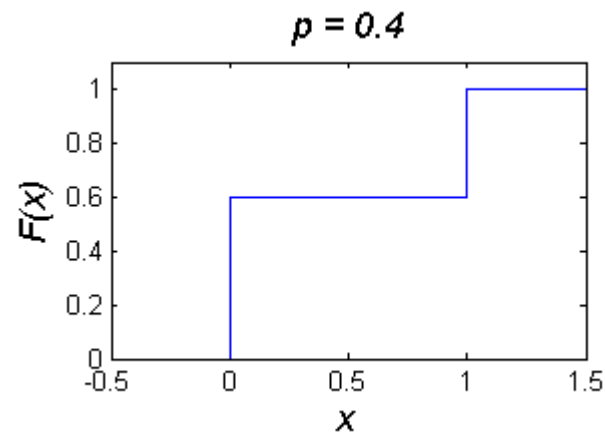
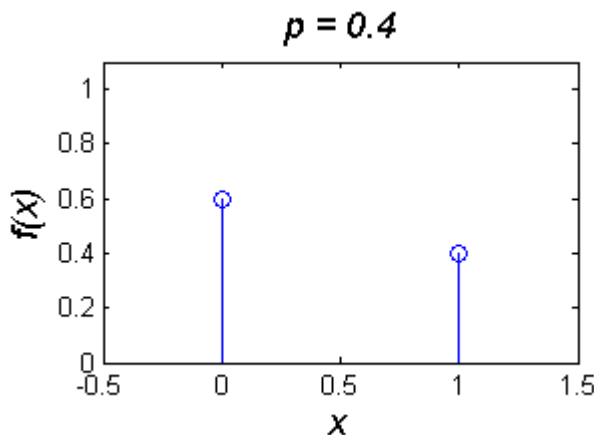
$$F(x) = \sum_{x_i \leq x} f(x_i) \quad , \quad -\infty < x < +\infty$$

# Variáveis aleatórias discretas

Variável aleatória de Bernoulli: experiência que pode resultar em sucesso com probabilidade  $p$  ou insucesso com probabilidade  $1 - p$ .

Se  $X = 1$  representar um sucesso e  $X = 0$  um insucesso, a função probabilidade é:

$$f(i) = p^i (1 - p)^{1-i}, i = 0, 1$$



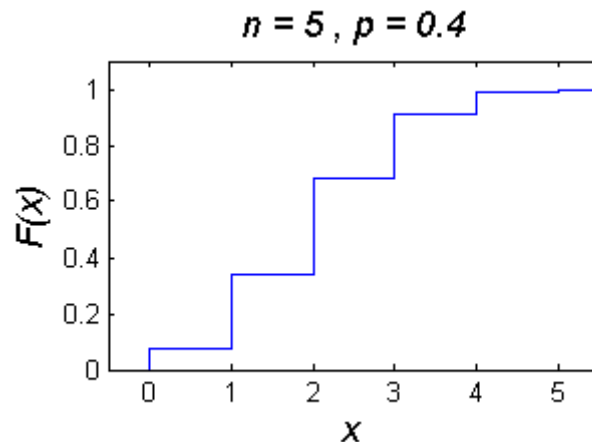
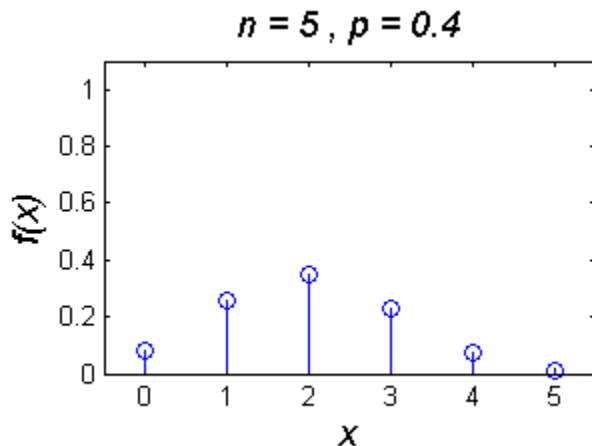
# Variáveis aleatórias discretas

Variável aleatória binomial: conjunto de  $n$  experiências de Bernoulli independentes, cada uma das quais resulta num sucesso com probabilidade  $p$  ou num insucesso com probabilidade  $1 - p$ .

Se  $X$  representar o número de sucessos em  $n$  experiências, a função probabilidade é:

$$f(i) = \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i}, i = 0, 1, 2, \dots, n$$

onde  $\binom{n}{i} = \frac{n!}{i!(n-i)!}$

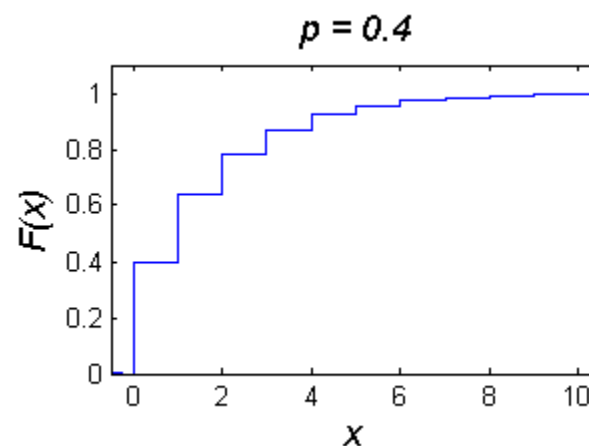
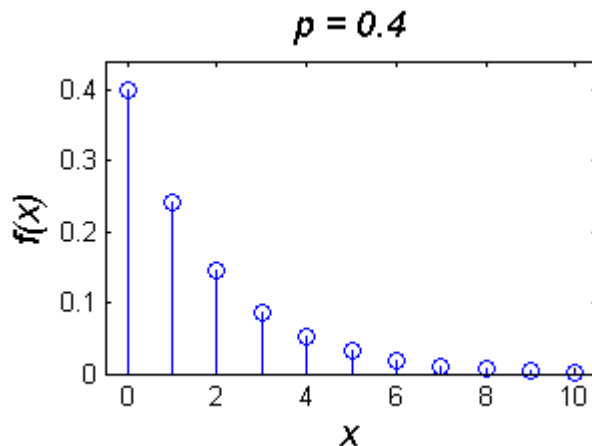


# Variáveis aleatórias discretas

Variável aleatória geométrica: são realizadas experiências de Bernoulli independentes com parâmetro  $p$  (probabilidade de sucesso) até que ocorra um sucesso.

Se  $X$  representar o número de insucessos antes do sucesso, a função probabilidade é

$$f(i) = (1 - p)^i p, \quad i = 0, 1, 2, \dots$$



Se  $X$  representar o número de experiências até ao sucesso, a função probabilidade é

$$f(i) = (1 - p)^{i-1} p, \quad i = 1, 2, \dots$$

## Variáveis aleatórias discretas – Exemplo 3

Numa dada ligação de dados, a probabilidade de erro de bit (BER – *Bit Error Rate*) é  $10^{-5}$  e os erros em diferentes bits são estatisticamente independentes.

Determine: (i) a probabilidade de um pacote de dados de 100 Bytes ser recebido sem erros e (ii) a probabilidade de um pacote de dados de 1000 Bytes ser recebido com 2 ou mais erros.

O número de erros num pacote é uma variável aleatória binomial em que a probabilidade de sucesso é o BER e o número de experiências de Bernoulli é o número de bits do pacote:

$$(i) \quad f(0) = \binom{n}{0} p^0 (1-p)^{n-0} = \binom{100 \times 8}{0} \times (1-10^{-5})^{100 \times 8} = 0.992 = 99.2\%$$

$$(ii) \quad 1 - f(0) - f(1) = 1 - \binom{n}{0} p^0 (1-p)^{n-0} - \binom{n}{1} p^1 (1-p)^{n-1} \\ = 1 - (1-10^{-5})^{8000} - 8000 \times 10^{-5} (1-10^{-5})^{7999} = 3.034 \times 10^{-3} = 0.3\%$$

# Variáveis aleatórias contínuas

- Uma variável aleatória  $X$  diz-se contínua se existir uma função não negativa  $f(x)$  tal que para qualquer conjunto de números reais  $B$ :

$$P(X \in B) = \int_B f(x) dx \qquad \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1$$

$f(x)$  é a função densidade de probabilidade da v.a contínua  $X$

- Resulta então que:  $P\{a \leq X \leq b\} = \int_a^b f(x) dx$

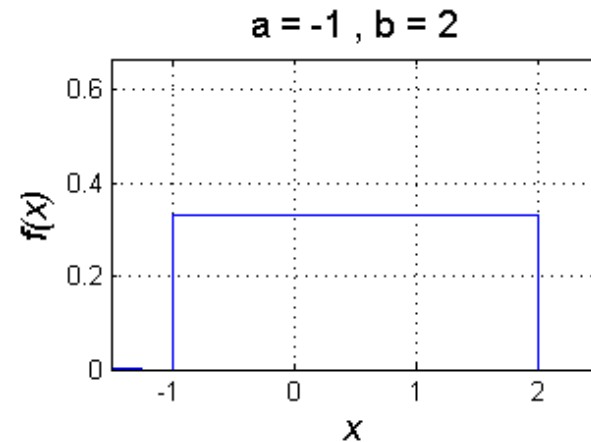
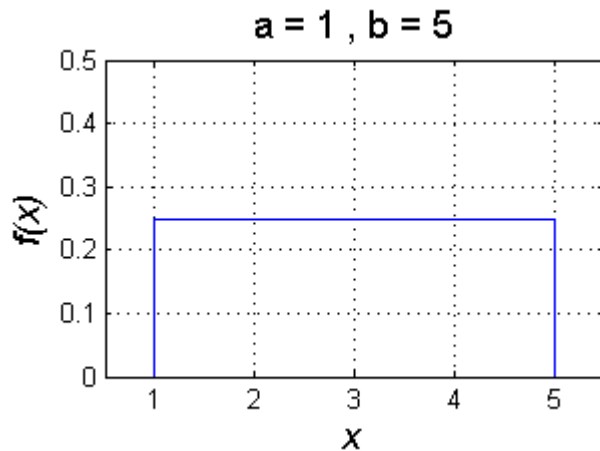
- A função distribuição da v.a contínua  $X$  é:

$$F(x) = P(X \in [-\infty, x]) = \int_{-\infty}^x f(y) dy$$

# Exemplos de variáveis aleatórias contínuas

Variável aleatória com Distribuição Uniforme: uma v.a. diz-se uniformemente distribuída no intervalo  $[a,b]$  se a função densidade de probabilidade for dada por

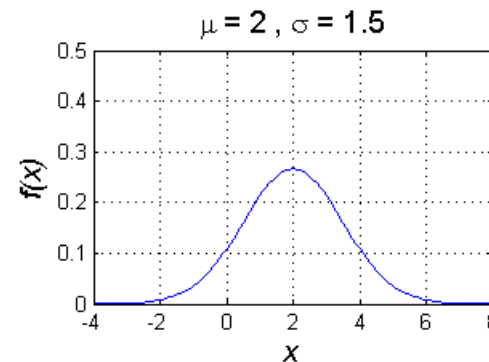
$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & , a < x < b \\ 0 & , \text{cc} \end{cases}$$



# Exemplos de variáveis aleatórias contínuas

Variável aleatória com Distribuição Gaussiana (ou Normal): Uma v.a.  $X$  tem uma distribuição Gaussiana com média  $\mu$  e desvio padrão  $\sigma$  se a função densidade é dada por:

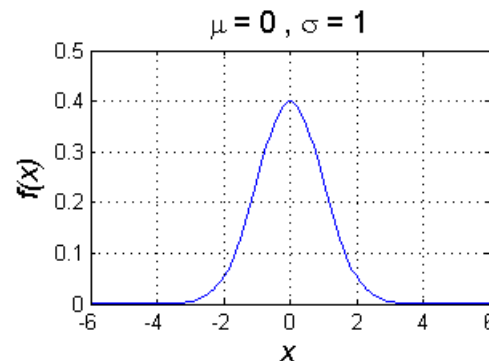
$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$



Designa-se por distribuição Gaussiana (ou Normal) padrão à distribuição Gaussiana com média 0 e desvio padrão 1.

Neste caso:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-x^2/2}$$





# Média de uma variável aleatória

- Média ou valor esperado de uma v.a.  $X$ :

$$E[X] = \begin{cases} \sum_{j=1}^{\infty} x_j f_X(x_j) & \text{se } X \text{ discreta} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} x f_X(x) dx & \text{se } X \text{ continua} \end{cases}$$

- Propriedades importantes:

$$E[cX] = cE[X]$$

$$E\left[\sum_{i=1}^n c_i X_i\right] = \sum_{i=1}^n c_i E[X_i]$$

- Média da v.a.  $Y = g(X)$ :

$$E[g(X)] = \begin{cases} \sum_{j=1}^{\infty} g(x_j) f_X(x_j) & \text{se } X \text{ discreta} \\ \int_{-\infty}^{+\infty} g(x) f_X(x) dx & \text{se } X \text{ continua} \end{cases}$$

# Variância de uma variável aleatória

- Variância de uma v.a.  $X$ :

$$\text{Var}[X] = E\left[\left(X - E[X]\right)^2\right] = E[X^2] - E[X]^2$$

- Propriedades importantes:

$$\text{Var}[X] \geq 0$$

$$\text{Var}[cX] = c^2 \text{Var}[X]$$

$$\text{Var}\left[\sum_{i=1}^n X_i\right] = \sum_{i=1}^n \text{Var}[X_i] \quad \text{se } X_i \text{ forem independentes}$$

## Exemplo 4

Uma ligação de dados de 10 Mbps suporta um fluxo de pacotes cujo tamanho é 100 Bytes com probabilidade 10%, 500 Bytes com probabilidade 50% e 1500 Bytes com probabilidade 40%. Considere a variável aleatória  $X$  representativa do tempo de transmissão dos pacotes.

Determine: (i) o tempo médio (i.e.,  $E[X]$ ) de transmissão dos pacotes (ii) o segundo momento (i.e.,  $E[X^2]$ ) do tempo de transmissão dos pacotes e (iii) a variância (i.e.,  $Var[X]$ ) do tempo de transmissão dos pacotes.

$$(i) \quad E[X] = \sum_{j=1}^{\infty} x_j f_X(x_j) = \frac{100 \times 8}{10^7} \times 0.1 + \frac{500 \times 8}{10^7} \times 0.5 + \frac{1500 \times 8}{10^7} \times 0.4$$
$$= 0.688 \times 10^{-3} \text{ seg} = 0.688 \text{ mseg}$$

$$(ii) \quad E[X^2] = \sum_{j=1}^{\infty} (x_j)^2 f_X(x_j) = \left( \frac{100 \times 8}{10^7} \right)^2 \times 0.1 + \left( \frac{500 \times 8}{10^7} \right)^2 \times 0.5 + \left( \frac{1500 \times 8}{10^7} \right)^2 \times 0.4$$
$$= 6.5664 \times 10^{-7} \text{ seg}^2$$

## Exemplo 4 - continuação

Uma ligação de dados de 10 Mbps suporta um fluxo de pacotes cujo tamanho é 100 Bytes com probabilidade 10%, 500 Bytes com probabilidade 50% e 1500 Bytes com probabilidade 40%. Considere a variável aleatória  $X$  representativa do tempo de transmissão dos pacotes.

Determine: (i) o tempo médio (i.e.,  $E[X]$ ) de transmissão dos pacotes (ii) o segundo momento (i.e.,  $E[X^2]$ ) do tempo de transmissão dos pacotes e (iii) a variância (i.e.,  $Var[X]$ ) do tempo de transmissão dos pacotes.

(iii) **1ª alternativa:**  $Var[X] = E\left[\left(X - E[X]\right)^2\right]$

$$Var[X] = \left(\frac{100 \times 8}{10^7} - E[X]\right)^2 \times 0.1 + \left(\frac{500 \times 8}{10^7} - E[X]\right)^2 \times 0.5 + \left(\frac{1500 \times 8}{10^7} - E[X]\right)^2 \times 0.4$$
$$= 1.833 \times 10^{-7} \text{ seg}^2$$

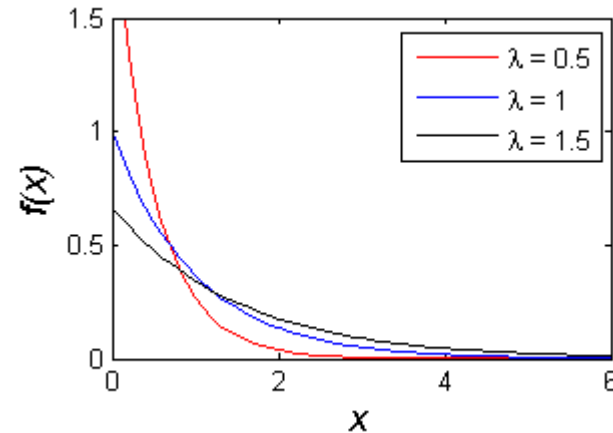
**2ª alternativa:**  $Var[X] = E[X^2] - E[X]^2$

$$Var[X] = 6.5664 \times 10^{-7} - (0.688 \times 10^{-3})^2 = 1.833 \times 10^{-7} \text{ seg}^2$$

# Distribuição exponencial

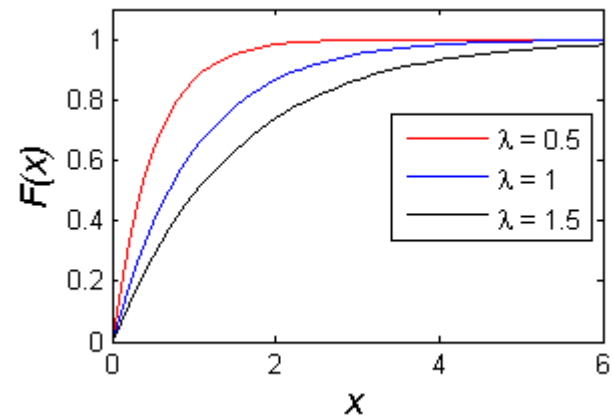
- Uma v. a.  $X$  tem uma distribuição exponencial com parâmetro  $\lambda$ ,  $\lambda > 0$ , se a sua função densidade de probabilidade for:

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$



- A função de distribuição é dada por:

$$F(x) = \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}$$



# Distribuição exponencial

- A média e a variância de uma distribuição exponencial são:

$$E[X] = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Var}[X] = \left(\frac{1}{\lambda}\right)^2$$

- A distribuição exponencial não tem memória, isto é,

$$P\{X > s + t \mid X > t\} = P\{X > s\}$$

- Se  $X_1$  e  $X_2$  são v. a. independentes e exponencialmente distribuídas com médias  $1/\lambda_1$  e  $1/\lambda_2$  respetivamente, então

$$P\{X_1 < X_2\} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2}$$

## Distribuição exponencial – Exemplo 5

Uma ligação de dados de 10 Mbps suporta um fluxo de pacotes cujo tamanho é exponencialmente distribuído com média de 1000 Bytes. Considere a variável aleatória  $X$  representativa do tempo de transmissão dos pacotes.

Determine: (i) o tempo médio (i.e.,  $E[X]$ ) de transmissão dos pacotes (ii) a variância (i.e.,  $Var[X]$ ) do tempo de transmissão dos pacotes e (iii) o segundo momento (i.e.,  $E[X^2]$ ) do tempo de transmissão dos pacotes.

$$(i) \quad E[X] = \frac{1000 \times 8}{10^7} = 8 \times 10^{-4} = 0.8 \text{ mseg}$$

$$E[X] = \frac{1}{\mu} \quad \Leftrightarrow \quad \mu = \frac{1}{E[X]} = \frac{1}{8 \times 10^{-4}} = 1250 \text{ pacotes/s}$$

Capacidade da ligação

$$(ii) \quad Var[X] = \left( \frac{1}{\mu} \right)^2 = (8 \times 10^{-4})^2 = 6.4 \times 10^{-7} \text{ seg}^2$$

$$(iii) \quad Var[X] = E[X^2] - E[X]^2 \quad \Leftrightarrow \quad E[X^2] = Var[X] + E[X]^2$$

$$E[X^2] = 6.4 \times 10^{-7} + (8 \times 10^{-4})^2 = 1.28 \times 10^{-6} \text{ seg}^2$$

# Processos estocásticos

- Um processo estocástico  $\{X(t), t \in T\}$  é um conjunto de variáveis aleatórias: para cada  $t \in T$ ,  $X(t)$  é uma variável aleatória.
- O índice  $t$  é frequentemente interpretado como tempo. Nesta interpretação,  $X(t)$  é o estado do processo no instante  $t$ .
- O conjunto  $T$  é o conjunto de índices do processo.
  - (1) se  $T$  é um conjunto contável, designa-se o processo estocástico como sendo em tempo discreto
  - (2) se  $T$  é um intervalo da reta real, designa-se o processo estocástico como sendo em tempo contínuo
- O espaço de estados é o conjunto de todos os valores que as variáveis aleatórias  $X(t)$  podem tomar.

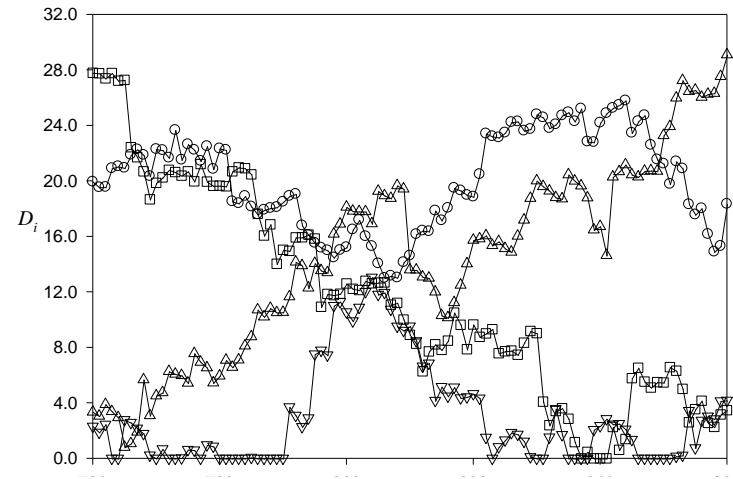


# Exemplos de processos estocásticos

Considere um sistema com uma fila de espera e um servidor. A este sistema chegam clientes para serem servidos.

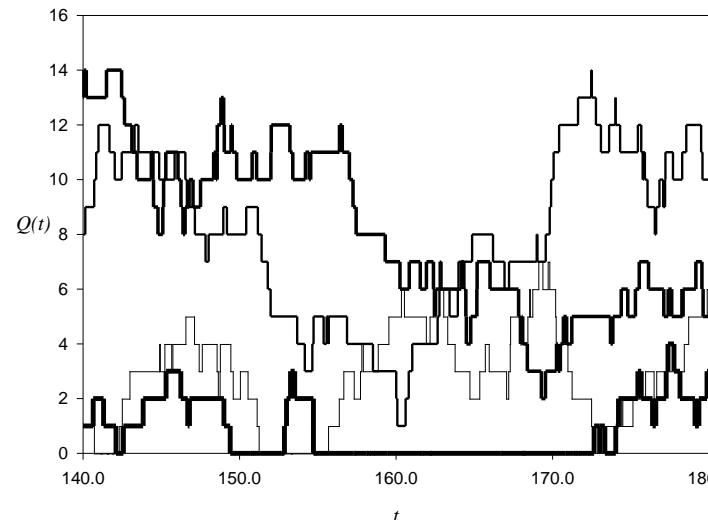
## Atrasos sofridos por cada cliente na fila de espera

- (1) é um processo estocástico em tempo discreto (1º cliente, 2º cliente, etc.)
- (2) o estado é uma variável contínua (o tempo de espera é um valor real)



## O número de clientes em espera

- (1) é um processo estocástico em tempo contínuo
- (2) o estado é uma variável discreta (0 clientes, 1 cliente, 2 clientes, etc.)



# Processo de contagem

- Um processo estocástico  $\{N(t), t \geq 0\}$  diz-se um processo de contagem se  $N(t)$  representar o número total de eventos que ocorreram até ao instante  $t$ .
- Um processo de contagem satisfaz as seguintes condições:
  - (1)  $N(t) \geq 0$ .
  - (2)  $N(t)$  toma valores inteiros apenas.
  - (3) Se  $s < t$ , então  $N(s) \leq N(t)$ .
  - (4) Se  $s < t$ , então  $N(t) - N(s)$  é igual ao número de eventos ocorridos no intervalo de tempo  $[s, t]$ .
- Um processo de contagem tem incrementos independentes se o número de eventos em intervalos de tempo disjuntos for independente.
- Um processo de contagem tem incrementos estacionários se a distribuição do número de eventos que ocorre em qualquer intervalo de tempo depender apenas do comprimento do intervalo de tempo.

# Processo de Poisson

- Um processo de contagem diz-se um processo de Poisson com taxa  $\lambda$ ,  $\lambda > 0$ , se:
  - (1)  $N(0) = 0$ ;
  - (2) o processo tem incrementos independentes;
  - (3) o número de eventos num intervalo de duração  $t$  tem uma distribuição de Poisson com média  $\lambda t$ . Isto é, para todo  $s$ ,  $t \geq 0$

$$P\{N(s+t) - N(s) = n\} = e^{-\lambda t} \frac{(\lambda t)^n}{n!}$$

- Um processo de Poisson tem incrementos estacionários e média

$$E[N(t)] = \lambda t$$

razão pela qual  $\lambda$  é designada a taxa (i.e., o número médio de eventos por unidade de tempo) do processo de Poisson.

# Propriedades de um processo de Poisson

- **Propriedade 1:** Num processo de Poisson com taxa  $\lambda$  considere-se:
  - $T_1$  o instante do primeiro evento
  - $T_n$ ,  $n > 1$ , o intervalo de tempo entre o  $(n-1)$ -ésimo evento e o  $n$ -ésimo evento
- Então,  $T_n$ ,  $n = 1, 2, \dots$ , são variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas com distribuição exponencial de média  $1/\lambda$ .
- **Propriedade 2:** Num processo de Poisson  $\{N(t), t \geq 0\}$  com taxa  $\lambda$  considere-se que cada evento é classificado de forma independente em:
  - evento do tipo 1 com probabilidade  $p$
  - evento do tipo 2 com probabilidade  $1 - p$
- Assim,  $\{N_1(t), t \geq 0\}$  e  $\{N_2(t), t \geq 0\}$  são o número de eventos de cada tipo que ocorreram no intervalo  $[0, t]$ .
- Então,  $N_1(t)$  e  $N_2(t)$  são ambos processos de Poisson independentes com taxas  $\lambda p$  e  $\lambda(1-p)$ .

# Propriedades de um processo de Poisson

- **Propriedade 3:** Sejam  $\{N_1(t), t \geq 0\}$  e  $\{N_2(t), t \geq 0\}$  processos de Poisson independentes com taxas  $\lambda_1$  e  $\lambda_2$ ,
- Então, o processo  $N(t) = N_1(t) + N_2(t)$  é também um processo de Poisson com taxa  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2$ .
- **Propriedade 4:** Sabendo-se que num processo de Poisson ocorreram exatamente  $n$  eventos até ao instante  $t$ ,
- Então, os instantes de ocorrência dos eventos são distribuídos independentemente e uniformemente no intervalo  $[0, t]$ . Por esta razão diz-se que num processo de Poisson as chegadas são aleatórias.

# Cadeias de Markov em tempo contínuo

- Considere-se um processo estocástico em tempo contínuo  $\{X(t), t \geq 0\}$  com o espaço de estados definido pelo conjunto dos números inteiros não negativos.
- $X(t)$  é uma cadeia de Markov se para todo o  $s, t \geq 0$  e inteiros não-negativos  $i, j, x(u), 0 \leq u < s$ :

$$P\{X(s+t) = j \mid X(s) = i, X(u) = x(u), 0 \leq u < s\} = P\{X(s+t) = j \mid X(s) = i\}$$

- Significa que a distribuição futura  $X(s+t)$  condicionada ao presente  $X(s)$  e ao passado  $X(u), 0 \leq u < s$ , depende apenas do presente e é independente do passado (propriedade Markoviana).
- Se  $P\{X(s+t) = j \mid X(s) = i\}$  for independente de  $s$  então diz-se que a cadeia de Markov em tempo contínuo tem probabilidades de transição estacionárias ou homogéneas:

$$P\{X(s+t) = j \mid X(s) = i\} = P\{X(t) = j \mid X(0) = i\}$$

# Cadeias de Markov em tempo contínuo

- Uma cadeia de Markov em tempo contínuo tem como propriedades:
  - (1) Quando o processo entra no estado  $i$ , o tempo de permanência nesse estado, antes de efetuar uma transição para um estado diferente, é exponencialmente distribuído (designamos a média por  $1/q_i$ );
  - (2) Quando o processo deixa o estado  $i$ , entra de seguida no estado  $j$  com uma probabilidade  $P_{ij}$  que satisfaz as seguintes condições

$$P_{ii} = 0 \quad 0 \leq P_{ij} \leq 1 \quad , j \neq i \quad \sum_j P_{ij} = 1$$

NOTA: A propriedade (1) é equivalente a dizer que quando o processo está no estado  $i$ , ele transita para outro estado qualquer a uma taxa  $q_i$ .

- Numa cadeia de Markov em tempo contínuo, o tempo de permanência num estado e o próximo estado visitado são variáveis aleatórias independentes.

# Taxas de transição instantâneas

- Para qualquer par de estados  $i$  e  $j$  seja:

$$q_{ij} = q_i P_{ij}$$

$q_i$  - a taxa à qual o processo faz uma transição quando está no estado  $i$

$P_{ij}$  - a probabilidade que a transição seja para o estado  $j$  quando está no estado  $i$

$q_{ij}$  - a taxa à qual o processo faz uma transição para o estado  $j$  quando está no estado  $i$

- As  $q_{ij}$  designam-se por taxas de transição instantâneas. Estas são as grandezas habitualmente representadas nos diagramas de transição de estados.

- Como 
$$q_i = \sum_j q_i P_{ij} = \sum_j q_{ij} \qquad P_{ij} = \frac{q_{ij}}{q_i} = \frac{q_{ij}}{\sum_j q_{ij}}$$

resulta que a especificação das taxas de transição instantâneas determina a cadeia de Markov em tempo contínuo.



## Exemplo 6

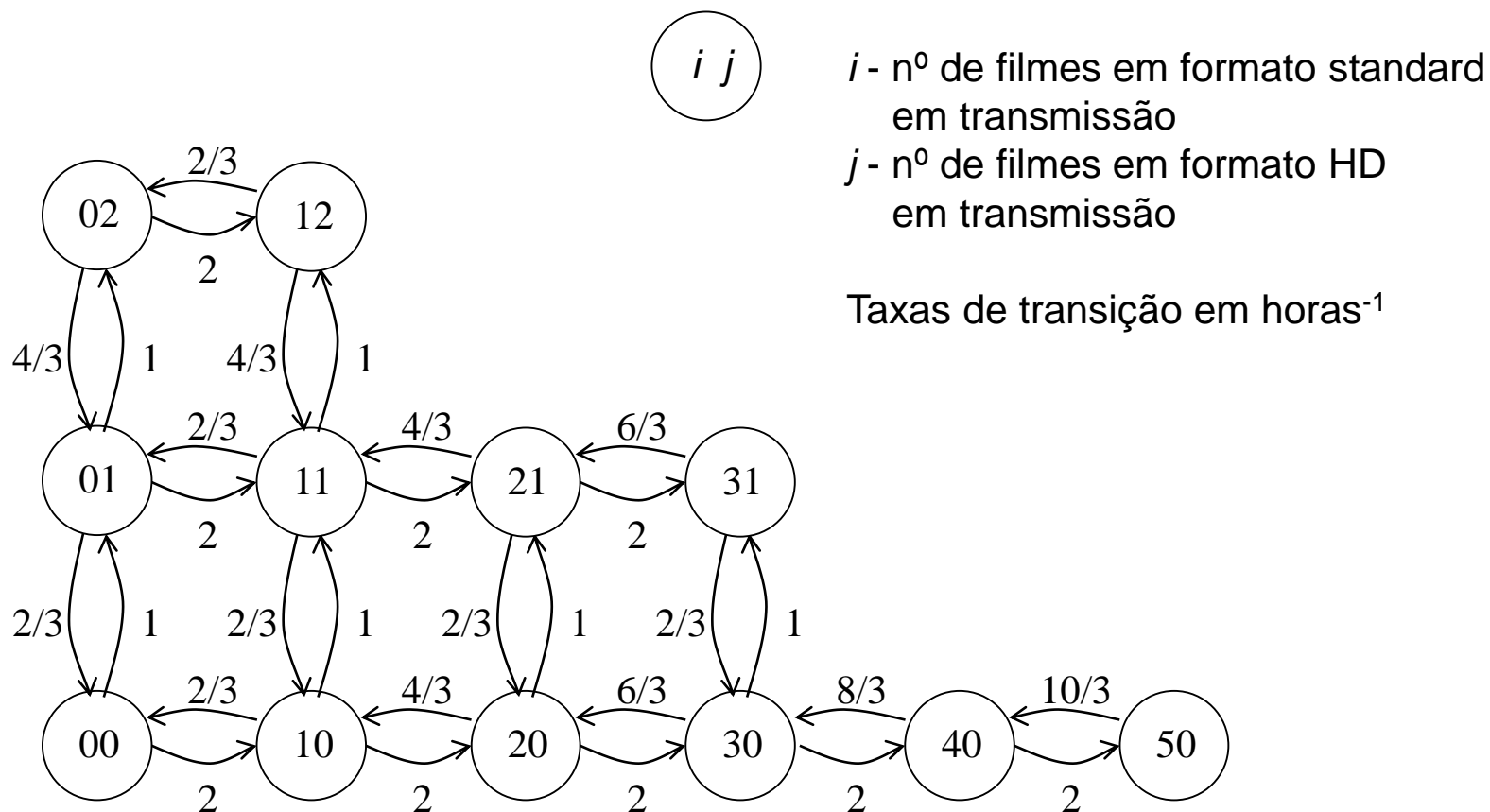
Considere um servidor de *video-streaming* que providencia filmes em formato standard (2.0 Mbps) ou HD (4.0 Mbps) e com uma interface de rede de 10 Mbps.

No período de maior tráfego, a taxa de pedidos de filmes é de 2 filmes/hora em formato standard e 1 filme/hora em formato HD.

Ambos os tipos de filmes têm uma duração exponencialmente distribuída de média 90 minutos. Quando um filme é pedido, ele começa a ser transmitido desde que haja capacidade disponível na interface de rede ou é recusado caso contrário.

Considere o estado do sistema dado pelo número de filmes de cada tipo em transmissão. Qual o diagrama de transição de estados do sistema?

# Diagrama de transição de estados do Exemplo 6



# Probabilidades limite

- Seja  $P_{ij}(t) = P\{X(s+t) = j \mid X(s) = i\}$

a probabilidade de um processo presentemente no estado  $i$  estar no estado  $j$  após um intervalo de tempo  $t$ .

- A probabilidade de uma cadeia de Markov em tempo contínuo estar no estado  $j$  no instante  $t$  converge para um valor limite independente do estado inicial:

$$\pi_j \equiv \lim_{t \rightarrow \infty} P_{ij}(t)$$

- Condição suficiente para a existência de probabilidades limite:
  - (1) a cadeia é irredutível, isto é, começando no estado  $i$  existe uma probabilidade positiva de alguma vez se estar no estado  $j$ , para todo o par de estados  $i, j$
  - (2) a cadeia de Markov é recorrente positiva, isto é, começando em qualquer estado o tempo médio para voltar a esse estado é finito

## Cálculo das probabilidades limite

- As probabilidades limite podem calcular-se resolvendo as equações:

$$q_j \pi_j = \sum_{k \neq j} q_{kj} \pi_k, \quad \text{para todos os estados } j$$

$$\sum_j \pi_j = 1$$

- Estas equações são designadas por equações de balanço:

taxa à qual o sistema transita do estado  $j$

=

taxa à qual o sistema transita para o estado  $j$

- A probabilidade  $\pi_j$  pode ser interpretada como a proporção de tempo em que o processo está no estado  $j$ .
- As probabilidades  $\pi_j$  são designadas por probabilidades estacionárias: se o estado inicial for dado pela distribuição  $\{\pi_j\}$ , então a probabilidade de se estar no estado  $j$  no instante  $t$  é  $\pi_j$ , para todo o  $t$ .

## Exemplo 6 (continuação)

Equações de balanço:

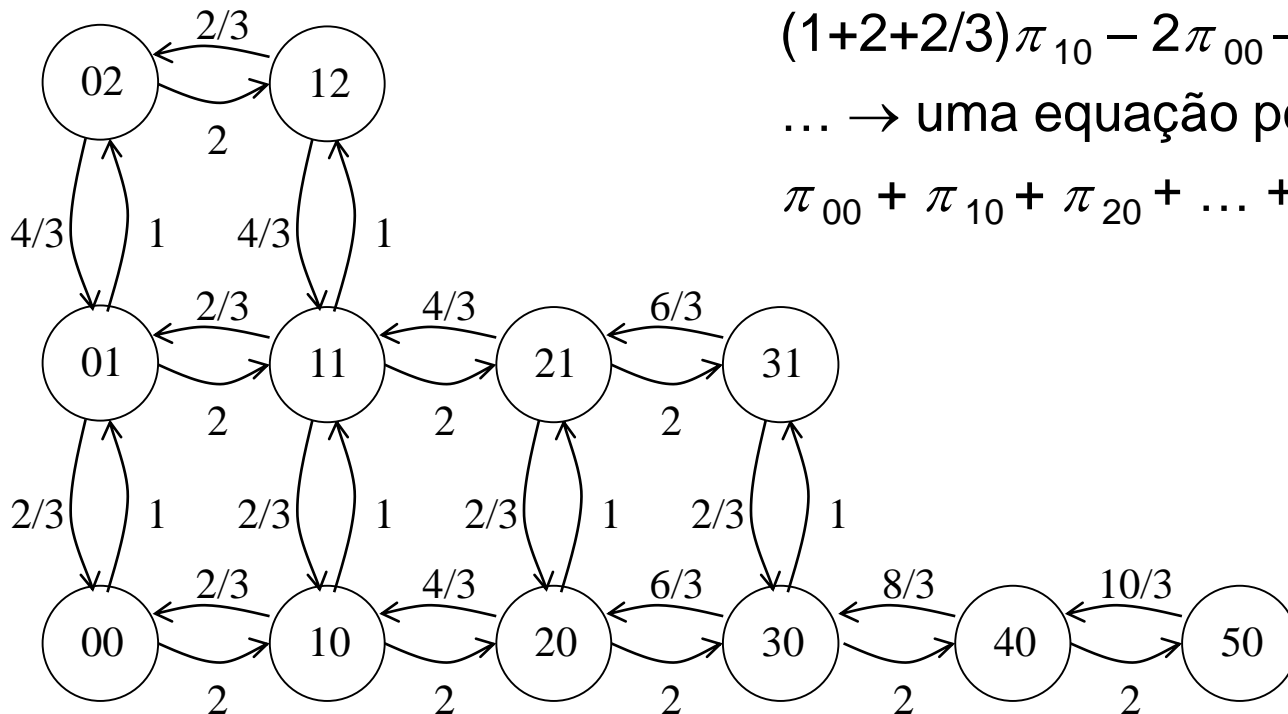
$$q_j \pi_j = \sum_{k \neq j} q_{kj} \pi_k \quad \sum_j \pi_j = 1$$

$$(1+2)\pi_{00} - 2/3\pi_{10} - 2/3\pi_{01} = 0$$

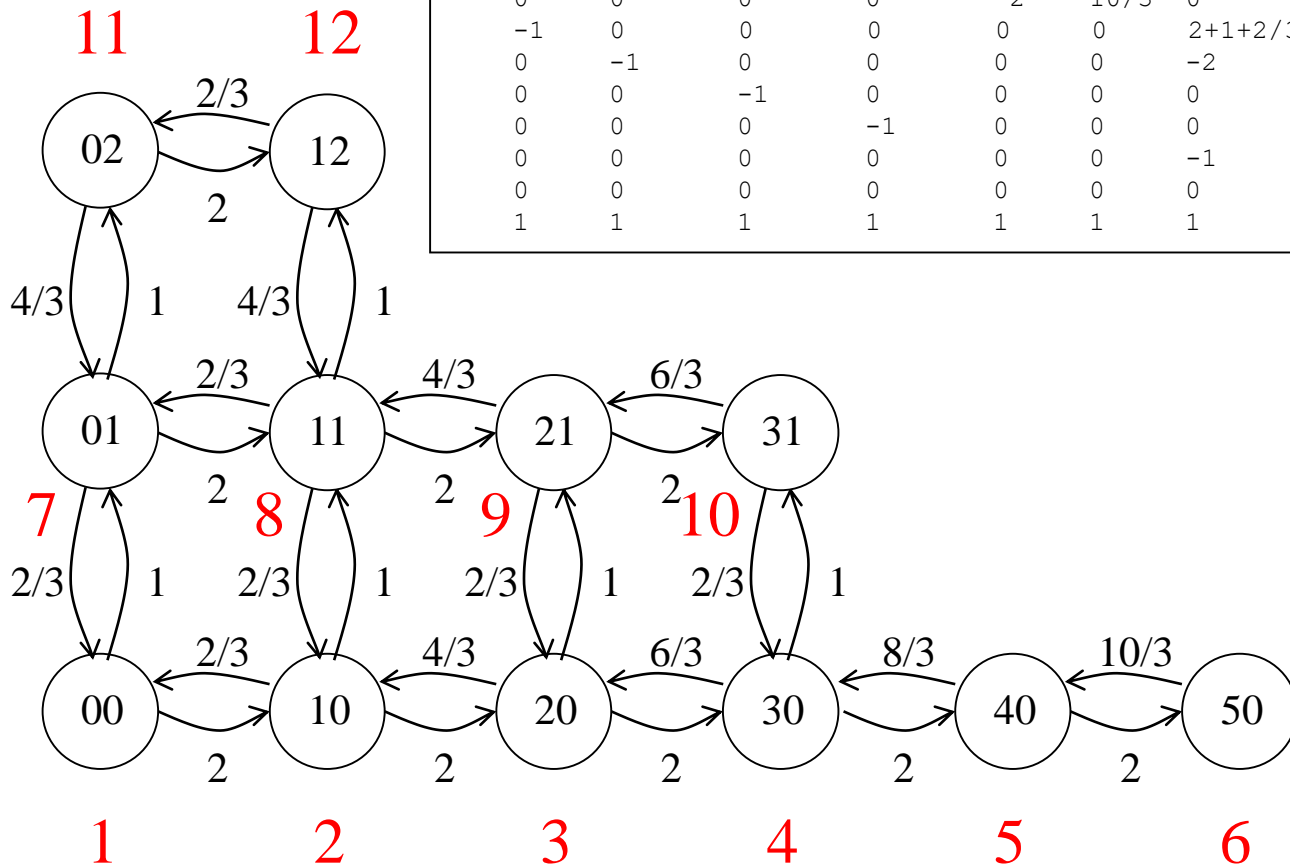
$$(1+2+2/3)\pi_{10} - 2\pi_{00} - 4/3\pi_{20} - 2/3\pi_{11} = 0$$

... → uma equação por cada estado

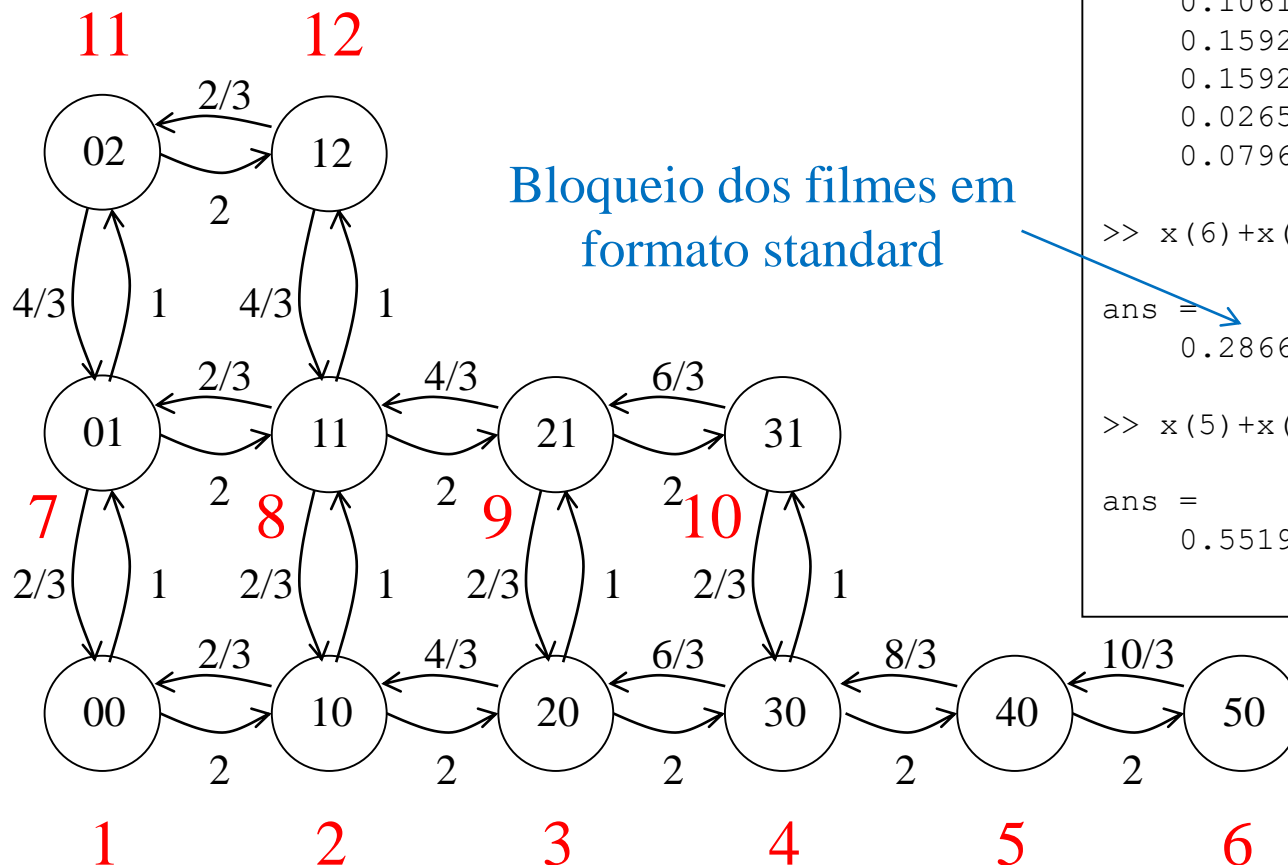
$$\pi_{00} + \pi_{10} + \pi_{20} + \dots + \pi_{02} + \pi_{12} = 1$$



## Exemplo 6 – resolução no MATLAB

[illegible]
$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

## Exemplo 6 – resolução no MATLAB



Bloqueio dos filmes em  
formato standard

```
>> x=A\B
```

```
x =  
0.0236  
0.0708  
0.1061  
0.1061  
0.0796  
0.0478  
0.0354  
0.1061  
0.1592  
0.1592  
0.0265  
0.0796
```

```
>> x(6)+x(10)+x(12)
```

```
ans =  
0.2866
```

```
>> x(5)+x(6)+x(9)+x(10)+x(11)+x(12)
```

```
ans =  
0.5519
```

Bloqueio dos filmes em  
formato HD

## Definições do teorema de Little

- Admita-se que se observa um sistema desde o instante  $t = 0$ . Seja:

$L(t)$  - o número de clientes no sistema no instante  $t$ ,

$N(t)$  - o número de clientes que chegaram no intervalo  $[0, t]$ ,

$W_i$  - o tempo despendido no sistema pelo  $i$ -ésimo cliente.

- Média temporal do número de clientes observados até ao instante  $t$

$$L_t = \frac{1}{t} \int_0^t L(\tau) d\tau \qquad L = \lim_{t \rightarrow \infty} L_t$$

- Média temporal da taxa de chegada no intervalo  $[0, t]$ :

$$\lambda_t = N(t)/t \qquad \lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda_t$$

- Média temporal do atraso dos clientes até ao instante  $t$

$$W_t = \frac{\sum_{i=0}^{N(t)} W_i}{N(t)} \qquad W = \lim_{t \rightarrow \infty} W_t$$



# Teorema de Little

- O teorema de Little enuncia que

$$L = \lambda W$$

- O teorema de Little traduz a ideia intuitiva de que, para a mesma taxa de chegada de clientes, sistemas mais congestionados ( $L$  elevado) impõem maiores atrasos ( $W$  elevado).
- Num dia de chuva, o mesmo tráfego (mesmo  $\lambda$ ) é mais lento do que normalmente ( $W$  maior) e, conseqüentemente, as ruas estão mais congestionadas ( $L$  maior).
- Um restaurante de refeições rápidas ( $W$  menor) precisa de uma sala menor ( $L$  menor) que um restaurante normal, para a mesma taxa de chegada de clientes (mesmo  $\lambda$ ).

# Propriedade PASTA (*Poisson Arrivals always See Time Averages*)

- Considere um sistema em que os clientes chegam um de cada vez e são servidos um de cada vez.
- Seja  $L(t)$  o número de clientes no sistema no instante  $t$  e defina-se  $P_n$ ,  $n \geq 0$ , como

$$P_n = \lim_{t \rightarrow \infty} P\{L(t) = n\}$$

$P_n$  é a probabilidade em estado estacionário de existirem exatamente  $n$  clientes no sistema (ou a proporção de tempo em que o sistema contém exatamente  $n$  clientes).

- Considere  $a_n$  a proporção de clientes que ao chegar encontram  $n$  clientes no sistema.

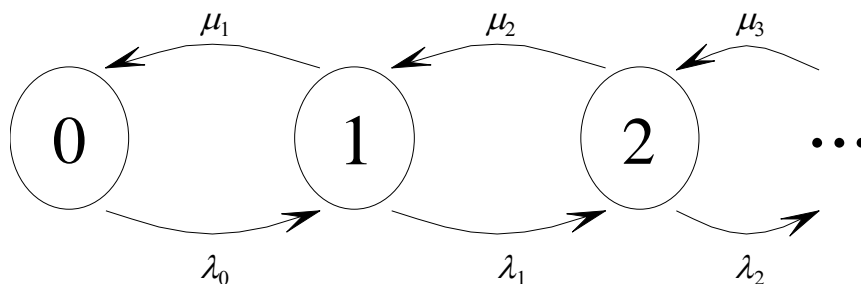
- **Propriedade PASTA:**

As chegadas de Poisson em que o tempo de serviço é estatisticamente independente dos instantes de chegada, vêm sempre médias temporais:

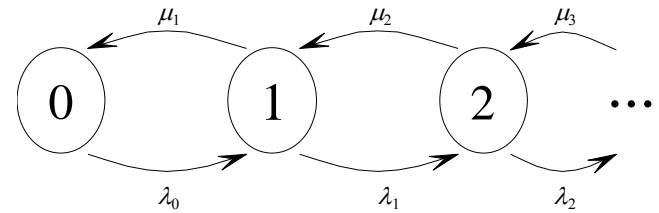
$$a_n = P_n$$

# Processos de nascimento e morte

- Considere um sistema cujo estado representa o número de clientes no sistema.
- Sempre que o sistema tem  $n$  clientes:
  - (1) chegam novos clientes ao sistema a uma taxa exponencial  $\lambda_n$
  - (2) partem clientes do sistema a uma taxa exponencial  $\mu_n$
- Este sistema é designado por processo de nascimento e morte.
- Os parâmetros  $\lambda_n$  ( $n = 0, 1, \dots$ ) e  $\mu_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) são designados por taxas de chegada (ou de nascimento) e taxas de partida (ou de morte), respetivamente.



# Equações de balanço de processos de nascimento e morte



<i>Estado</i>	<i>taxa de saída = taxa de entrada</i>
0	$\lambda_0 \pi_0 = \mu_1 \pi_1$
1	$(\lambda_1 + \mu_1) \pi_1 = \mu_2 \pi_2 + \lambda_0 \pi_0$
2	$(\lambda_2 + \mu_2) \pi_2 = \mu_3 \pi_3 + \lambda_1 \pi_1$
$n, n \geq 1$	$(\lambda_n + \mu_n) \pi_n = \mu_{n+1} \pi_{n+1} + \lambda_{n-1} \pi_{n-1}$

Ou, de forma equivalente (por manipulação das equações anteriores):

$$\lambda_n \pi_n = \mu_{n+1} \pi_{n+1}, \quad n \geq 0$$

## Probabilidades limite de processos de nascimento e morte

$$\pi_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{i-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_i}}$$

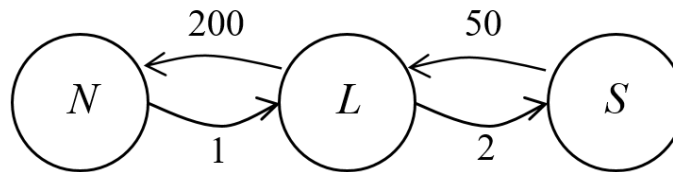
$$\pi_n = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_n \left( 1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{i-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_i} \right)} = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_n} \cdot \pi_0, \quad n \geq 1$$

Condição necessária para a existência de probabilidades limite:

$$\sum_{i=1}^{\infty} \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{i-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_i} < \infty$$

## Exemplo 7

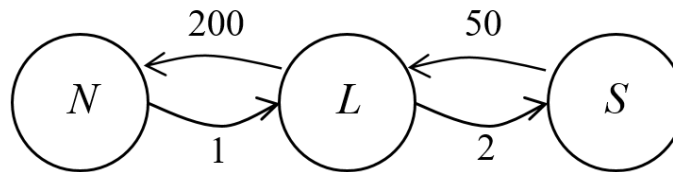
Considere que uma ligação sem fios para comunicação de pacotes pode estar num de 3 estados possíveis – Normal ( $N$ ), Interferência Ligeira ( $L$ ) ou Interferência Severa ( $S$ ) – de acordo com a cadeia de Markov seguinte (taxas em número de transições por hora):



- (a) Determine a probabilidade de cada um dos estados.
- (b) Determine o tempo de permanência médio de cada estado (em minutos).
- (c) Sabendo que a probabilidade de cada pacote ser recebido com erros é de 0.01% no estado  $N$ , 0.1% no estado  $L$  e 1% no estado  $S$ , qual a probabilidade da ligação estar no estado  $N$  quando um pacote é recebido com erros?

## Exemplo 7 – Resolução (a)

Considere que uma ligação sem fios para comunicação de pacotes pode estar num de 3 estados possíveis – Normal ( $N$ ), Interferência Ligeira ( $L$ ) ou Interferência Severa ( $S$ ) – de acordo com a cadeia de Markov seguinte (taxas em número de transições por hora):



(a) Determine a probabilidade de cada um dos estados.

$$P_N = \frac{1}{1 + \frac{1}{200} + \frac{1}{200} \times \frac{2}{50}} = 0.99483 = 99.483\%$$

$$P_L = \frac{\frac{1}{200}}{1 + \frac{1}{200} + \frac{1}{200} \times \frac{2}{50}} = 0.00497 = 0.497\%$$

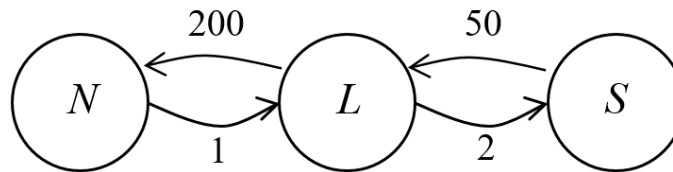
$$P_S = \frac{\frac{1}{200} \times \frac{2}{50}}{1 + \frac{1}{200} + \frac{1}{200} \times \frac{2}{50}} = 0.0002 = 0.02\%$$

$$\pi_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{i-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_i}}$$

$$\pi_n = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_n} \cdot \pi_0$$

## Exemplo 7 – Resolução (b)

Considere que uma ligação sem fios para comunicação de pacotes pode estar num de 3 estados possíveis – Normal ( $N$ ), Interferência Ligeira ( $L$ ) ou Interferência Severa ( $S$ ) – de acordo com a cadeia de Markov seguinte (taxas em número de transições por hora):



(b) Determine o tempo de permanência médio de cada estado (em minutos).

$$T_N = \frac{1}{1} = 1 \text{ hora} = 60 \text{ minutos}$$

$$T_L = \frac{1}{2 + 200} = 0.00495 \text{ horas} = 0.3 \text{ minutos}$$

$$T_S = \frac{1}{50} = 0.02 \text{ horas} = 1.2 \text{ minutos}$$

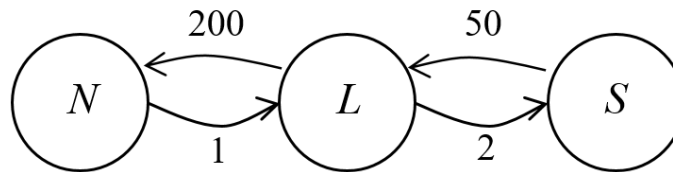
Tempo médio de permanência  $T = 1/q_i$

$$q_i = \sum_j q_i P_{ij} = \sum_j q_{ij}$$



## Exemplo 7 – Resolução (c)

Considere que uma ligação sem fios para comunicação de pacotes pode estar num de 3 estados possíveis – Normal ( $N$ ), Interferência Ligeira ( $L$ ) ou Interferência Severa ( $S$ ) – de acordo com a cadeia de Markov seguinte (taxas em número de transições por hora):

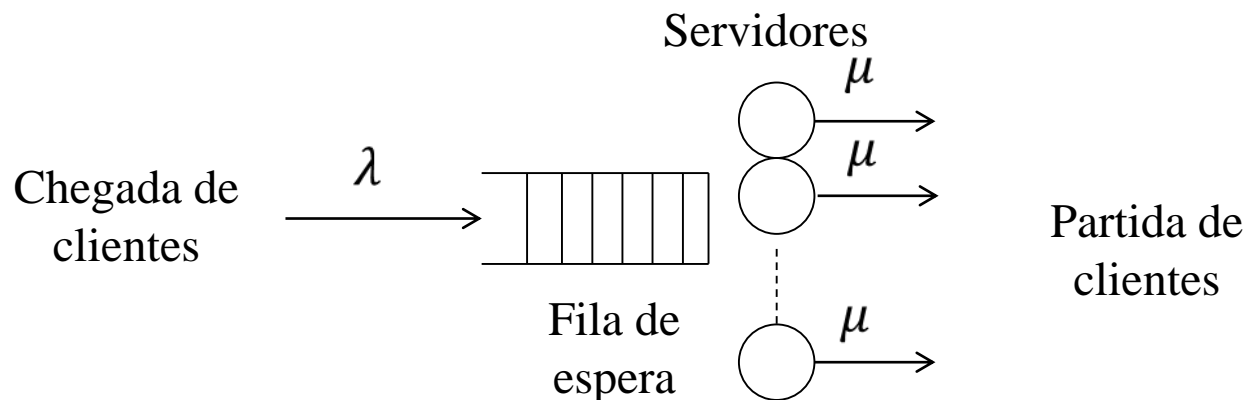


(c) Sabendo que a probabilidade de cada pacote ser recebido com erros é de 0.01% no estado  $N$ , 0.1% no estado  $L$  e 1% no estado  $S$ , qual a probabilidade da ligação estar no estado  $N$  quando um pacote é recebido com erros?

$$\begin{aligned} P(N|E) &= \frac{P(E|N) \times P(N)}{P(E|N) \times P(N) + P(E|L) \times P(L) + P(E|S) \times P(S)} \\ &= \frac{0.01\% \times 0.99483}{0.01\% \times 0.99483 + 0.1\% \times 0.00497 + 1\% \times 0.00020} \\ &= 0.9346 = 93.46\% \end{aligned}$$

# Sistema de fila de espera

- Um sistema de fila de espera é caracterizado por:
  - um conjunto de  $c$  servidores, cada um com capacidade para servir clientes a uma taxa  $\mu$
  - uma fila de espera com uma determinada capacidade (em nº de clientes)
- A este sistema chegam clientes a uma taxa  $\lambda$
- Quando um cliente chega:
  - ele começa a ser servido por um servidor se houver algum disponível
  - ele é colocado da fila de espera se os servidores estiverem todos ocupados (ou é perdido se a fila de espera estiver cheia)
- Os clientes na fila de espera são atendidos segundo uma disciplina *First-In-First-Out*



# Sistema de fila de espera

- Um sistema de fila de espera é representado por:

$$A/B/c/d$$

$A$  – o processo de chegada de clientes:

$M$  – Markoviano,  $D$  – Determinístico,  $G$  – Genérico

$B$  – o processo de atendimento de clientes:

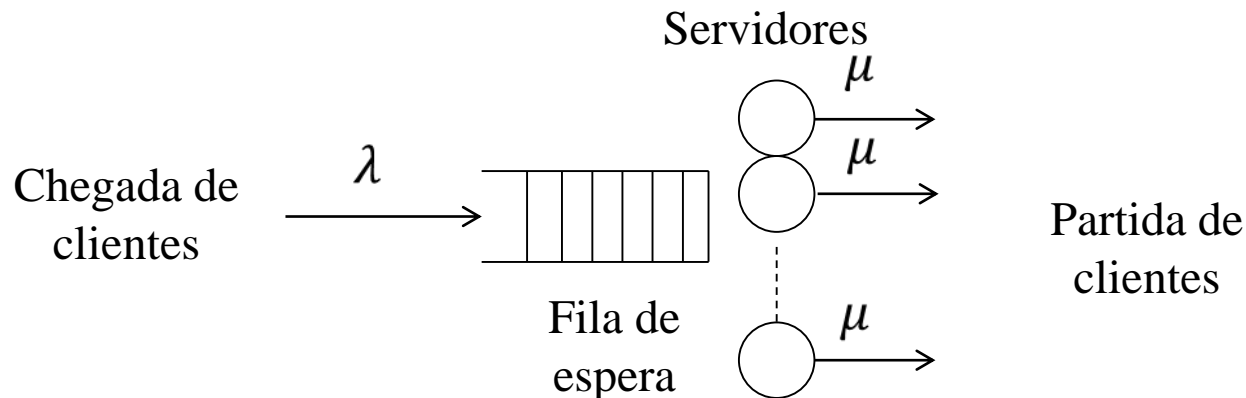
$M$  – Markoviano,  $D$  – Determinístico,  $G$  – Genérico

$c$  – o número de servidores

$d$  – capacidade do sistema em nº de clientes:

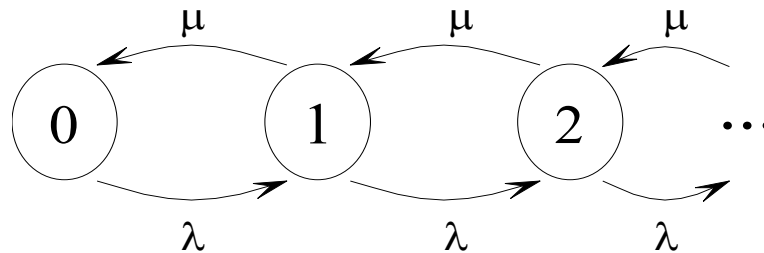
número de servidores + capacidade da fila de espera

- Quando  $d$  é omissa, a fila de espera tem tamanho infinito.



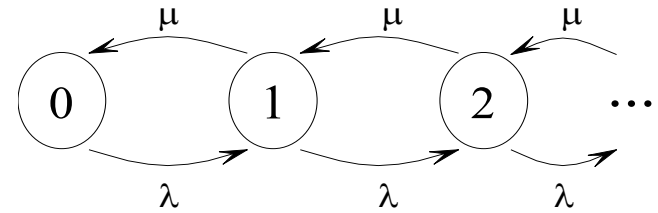
# Sistema $M/M/1$

- Processo de nascimento e morte em que:
  - (1) a chegada de clientes é um processo de Poisson com taxa  $\lambda$
  - (2) o tempo de atendimento de um servidor é exponencialmente distribuído com média  $1/\mu$
  - (3) o sistema tem 1 servidor
  - (4) o sistema acomoda um número infinito de clientes



- Uma ligação ponto-a-ponto com capacidade  $\mu$  pacotes/s e uma fila de espera muito grande onde chegam pacotes a uma taxa de Poisson  $\lambda$  pacotes/s com comprimento exponencialmente distribuído de média  $1/\mu$  é um sistema  $M/M/1$

## Sistema *M/M/1*



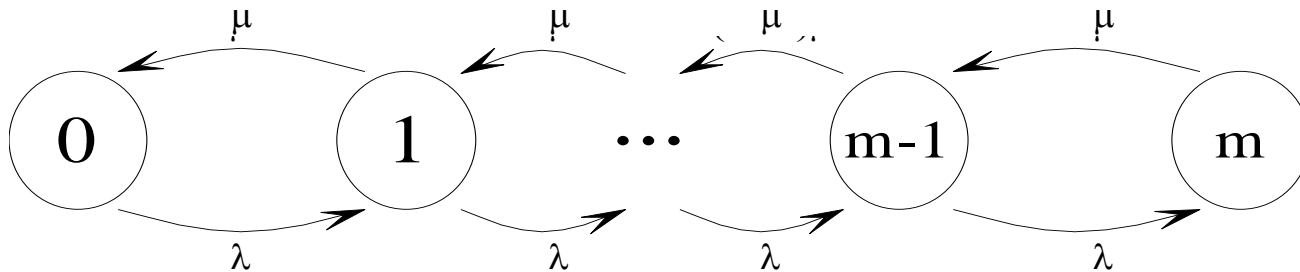
$$P_0 = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{i-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_i}} = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i}$$

$$P_n = \frac{\lambda_0 \lambda_1 \cdots \lambda_{n-1}}{\mu_1 \mu_2 \cdots \mu_n} \cdot P_0 = \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n \cdot P_0 = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n}{1 + \sum_{i=1}^{\infty} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^i}$$

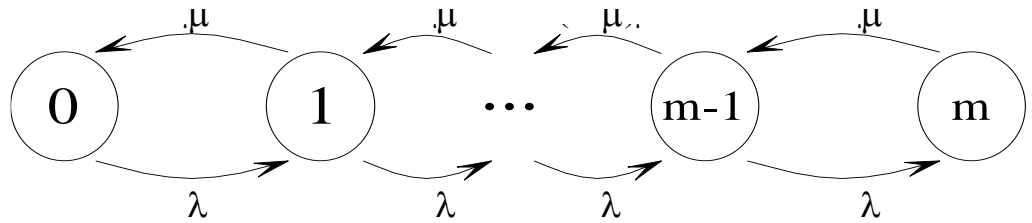
- Número médio de clientes no sistema:  $L = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$
- Atraso médio no sistema:  $W = \frac{L}{\lambda} = \frac{1}{\mu - \lambda}$
- Atraso médio na fila de espera:  $W_Q = W - \frac{1}{\mu} = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$
- Número médio de clientes na fila de espera:  $L_Q = \lambda W_Q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$

## Sistema $M/M/1/m$

- Processo de nascimento e morte em que:
  - (1) a chegada de clientes é um processo de Poisson com taxa  $\lambda$
  - (2) o tempo de atendimento de um servidor é exponencialmente distribuído com média  $1/\mu$
  - (3) o sistema tem 1 servidor
  - (4) o sistema acomoda no máximo  $m$  clientes (*i.e.*, a fila de espera tem capacidade para  $m - 1$  clientes)



## Sistema $M/M/1/m$



- Equações de balanço:

$$\lambda P_{n-1} = \mu P_n, \quad n = 1, 2, \dots, m$$

- Probabilidade de  $n$  clientes no sistema em estado estacionário:

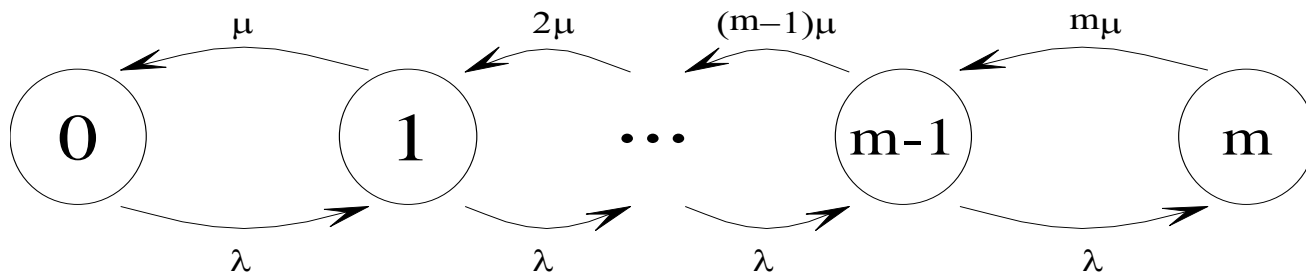
$$P_n = \frac{(\lambda/\mu)^n}{\sum_{i=0}^m (\lambda/\mu)^i} \quad n = 0, 1, \dots, m$$

- Pela propriedade PASTA, a probabilidade de uma chegada encontrar o sistema cheio (*i.e.*, o servidor ocupado e a fila de espera cheia):

$$P_m = \frac{(\lambda/\mu)^m}{\sum_{i=0}^m (\lambda/\mu)^i}$$

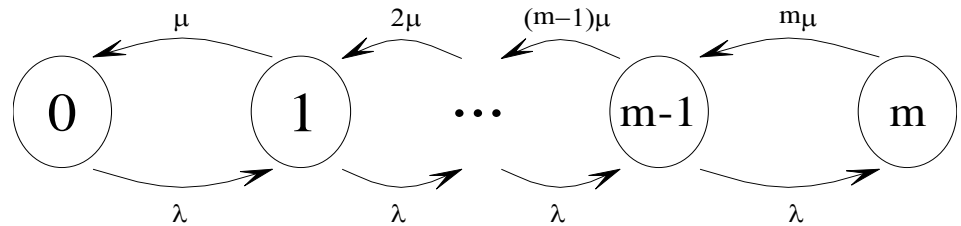
## Sistema $M/M/m/m$

- Processo de nascimento e morte em que:
  - (1) a chegada de clientes é um processo de Poisson com taxa  $\lambda$
  - (2) o tempo de atendimento de um servidor é exponencialmente distribuído com média  $1/\mu$
  - (3) o sistema tem  $m$  servidores
  - (4) o sistema acomoda no máximo  $m$  clientes (*i.e.*, não tem fila de espera)





## Sistema $M/M/m/m$



- Equações de balanço:

$$\lambda P_{n-1} = n\mu P_n, \quad n = 1, 2, \dots, m$$

- Probabilidade de  $n$  clientes no sistema em estado estacionário:

$$P_n = \frac{(\lambda/\mu)^n / n!}{\sum_{i=0}^m (\lambda/\mu)^i / i!} \quad n = 0, 1, \dots, m$$

- Pela propriedade PASTA, a probabilidade de uma chegada encontrar o sistema cheio é (fórmula de Erlang B):

$$P_m = \frac{(\lambda/\mu)^m / m!}{\sum_{i=0}^m (\lambda/\mu)^i / i!}$$

## Sistema *M/G/1*

- Processo de nascimento e morte em que:
  - (1) a chegada de clientes é um processo de Poisson com taxa  $\lambda$
  - (2) o tempo de atendimento  $S$  do servidor tem uma distribuição genérica e independente das chegadas dos clientes
  - (3) o sistema tem 1 servidor
  - (4) o sistema acomoda um número infinito de clientes
- Sendo conhecidos  $E[S]$  e  $E[S^2]$  do tempo de atendimento  $S$ , a fórmula de Pollaczek - Khintchine enuncia que o atraso médio na fila de espera é dado por:

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

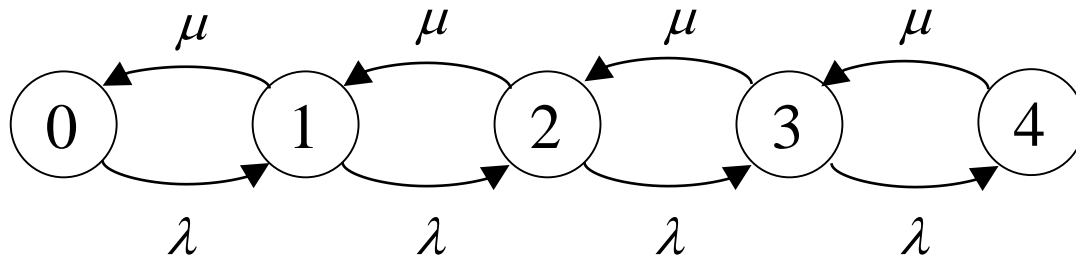
- O atraso médio no sistema é dado por:

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

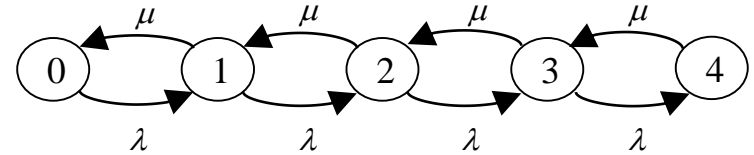
## Exemplo 8

Considere um sistema de transmissão de pacotes com uma fila de espera seguida de uma linha de transmissão de 64 Kbps. O tráfego oferecido é de Poisson com taxa de 15 pacotes/segundo. O comprimento dos pacotes é exponencialmente distribuído com média de 400 bytes. A fila de espera tem capacidade para 3 pacotes. Um pacote que chegue ao sistema é encaminhado pela linha de transmissão, se estiver livre, ou posto em fila de espera. Se a fila de espera se encontrar cheia, o pacote é perdido. Calcule:

- (a) A percentagem de pacotes perdidos.
- (b) A percentagem de pacotes que não sofre atraso na fila de espera.
- (c) A percentagem de utilização da linha de transmissão.



## Exemplo 8 – Resolução (a)



Considere um sistema de transmissão de pacotes com uma fila de espera seguida de uma linha de transmissão de 64 Kbps. O tráfego oferecido é de Poisson com taxa de 15 pacotes/segundo. O comprimento dos pacotes é exponencialmente distribuído com média de 400 bytes. A fila de espera tem capacidade para 3 pacotes. Um pacote que chegue ao sistema é encaminhado pela linha de transmissão, se estiver livre, ou posto em fila de espera. Se a fila de espera se encontrar cheia, o pacote é perdido. Calcule:

(a) A percentagem de pacotes perdidos.

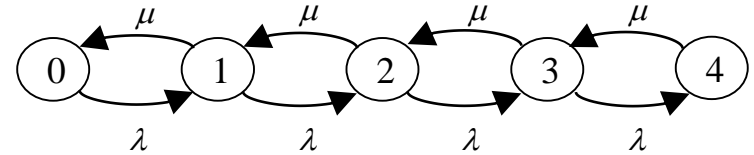
$$\mu = \frac{64000 \text{ bps}}{400 \times 8 \text{ bpp}} = 20 \text{ pps}$$

$$P_n = \frac{(\lambda/\mu)^n}{\sum_{i=0}^m (\lambda/\mu)^i} \quad n = 0, 1, \dots, m$$

$$P_4 = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^4}{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^0 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^1 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^3 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^4}$$

$$P_4 = \frac{\left(\frac{15}{20}\right)^4}{1 + \frac{15}{20} + \left(\frac{15}{20}\right)^2 + \left(\frac{15}{20}\right)^3 + \left(\frac{15}{20}\right)^4} = 0.104 = 10.4\%$$

## Exemplo 8 – Resolução (b)



Considere um sistema de transmissão de pacotes com uma fila de espera seguida de uma linha de transmissão de 64 Kbps. O tráfego oferecido é de Poisson com taxa de 15 pacotes/segundo. O comprimento dos pacotes é exponencialmente distribuído com média de 400 bytes. A fila de espera tem capacidade para 3 pacotes. Um pacote que chegue ao sistema é encaminhado pela linha de transmissão, se estiver livre, ou posto em fila de espera. Se a fila de espera se encontrar cheia, o pacote é perdido. Calcule:

(b) A percentagem de pacotes que não sofre atraso na fila de espera.

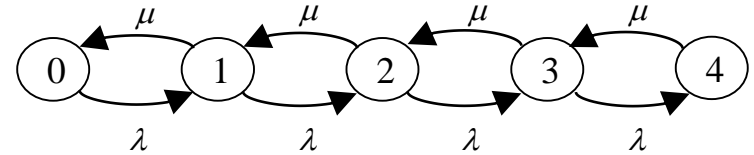
$$\mu = \frac{64000 \text{ bps}}{400 \times 8 \text{ bpp}} = 20 \text{ pps}$$

$$P_n = \frac{(\lambda/\mu)^n}{\sum_{i=0}^m (\lambda/\mu)^i} \quad n = 0, 1, \dots, m$$

$$P_0 = \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^0}{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^0 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^1 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^2 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^3 + \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^4}$$

$$P_0 = \frac{1}{1 + \frac{15}{20} + \left(\frac{15}{20}\right)^2 + \left(\frac{15}{20}\right)^3 + \left(\frac{15}{20}\right)^4} = 0.328 = 32.8\%$$

## Exemplo 8 – Resolução (c)



Considere um sistema de transmissão de pacotes com uma fila de espera seguida de uma linha de transmissão de 64 Kbps. O tráfego oferecido é de Poisson com taxa de 15 pacotes/segundo. O comprimento dos pacotes é exponencialmente distribuído com média de 400 bytes. A fila de espera tem capacidade para 3 pacotes. Um pacote que chegue ao sistema é encaminhado pela linha de transmissão, se estiver livre, ou posto em fila de espera. Se a fila de espera se encontrar cheia, o pacote é perdido. Calcule:

(c) A percentagem de utilização da linha de transmissão.

$$U = 0 \times P_0 + 1 \times P_1 + 1 \times P_2 + 1 \times P_3 + 1 \times P_4$$

$$U = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1 - P_0$$

$$U = 1 - 0.328 = 0.672 = 67.2\%$$

## Exemplo 9

Considere um sistema de transmissão ponto-a-ponto de 128 kbps que suporta dois fluxos de pacotes: no fluxo 1, os pacotes têm um tamanho constante de 128 Bytes e a chegada de pacotes é um processo de Poisson com taxa de 30 pacotes/segundo; no fluxo 2, os pacotes têm um tamanho constante de 512 Bytes e a chegada de pacotes é um processo de Poisson com taxa de 10 pacotes/segundo. Os fluxos são multiplexados estatisticamente numa fila de espera muito grande.

- (a) Indique justificando que tipo de fila de espera modela o desempenho deste sistema de transmissão.
- (b) Calcule o atraso médio no sistema dos pacotes de cada fluxo.

## Exercício 9 – Resolução (a)

Este sistema é modelado por uma fila de espera  $M/G/1$ :

- a soma de 2 processos de Poisson é um processo de Poisson e, assim, o processo de chegada de pacotes é um processo de Poisson (‘ $M$ ’ em  $M/G/1$ ) com taxa  $30 + 10 = 40$  pps;
- o tempo de transmissão dos pacotes é genérico (‘ $G$ ’ em  $M/G/1$ ) porque a distribuição dos tamanhos não segue uma distribuição comum: o tamanho é 128 Bytes com probabilidade  $30/(30+10) = 0.75 = 75\%$  ou 512 Bytes com probabilidade  $10/(30+10) = 0.25 = 25\%$ ;
- o número de servidores é um (‘1’ em  $M/G/1$ ) pois o canal de transmissão é usado para transmitir um pacote de cada vez;
- como o sistema tem uma fila de espera muito grande, a notação relativa à capacidade do sistema é omissa (considera-se que o sistema tem capacidade infinita).



## Exercício 9 – Resolução (b)

$$S_{128} = (128 \times 8)/128000 = 8 \times 10^{-3} \text{ seg} \quad S_{512} = (512 \times 8)/128000 = 32 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

$$\begin{aligned} E[S] &= 0.75 \times S_{128} + 0.25 \times S_{512} = \\ &= 0.75 \times 8 \times 10^{-3} + 0.25 \times 32 \times 10^{-3} = 14 \times 10^{-3} \text{ seg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} E[S^2] &= 0.75 \times (S_{128})^2 + 0.25 \times (S_{512})^2 = \\ &= 0.75 \times (8 \times 10^{-3})^2 + 0.25 \times (32 \times 10^{-3})^2 = 3.04 \times 10^{-4} \text{ seg}^2 \end{aligned}$$

$$W_Q = \frac{\lambda E[S^2]}{2(1 - \lambda E[S])} = \frac{40 \times 3.04 \times 10^{-4}}{2(1 - 40 \times 14 \times 10^{-3})} = 0.0143 = 14.3 \text{ mseg}$$

$$W_{128} = W_Q + S_{128} = 14.3 + 8 = 22.3 \text{ mseg}$$

$$W_{512} = W_Q + S_{512} = 14.3 + 32 = 46.3 \text{ mseg}$$