



# **Controlo de Fluxos em Redes com Comutação de Pacotes**

Desempenho e Dimensionamento de Redes

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

DETI-UA, 2017/2018

# Controlo de fluxo - introdução

O tráfego efetivo reflete a quantidade de serviço suportada por uma rede com comutação de pacotes.

O atraso médio reflete a qualidade de serviço proporcionada por uma rede com comutação de pacotes.

Controlo de fluxo: mecanismo de realimentação que estabelece um compromisso entre o tráfego efetivo e o atraso médio por forma a manter o atraso médio dentro de limites aceitáveis:

- Quando o tráfego oferecido é reduzido, é aceite na sua totalidade pelo algoritmo de controlo de fluxo e, neste caso,

$$\text{tráfego efetivo} = \text{tráfego oferecido}$$

- Quando o tráfego oferecido é excessivo, o algoritmo de controlo de fluxo rejeita parte dele e, neste caso,

$$\text{tráfego efetivo} = \text{tráfego oferecido} - \text{tráfego rejeitado}$$

- À medida que o algoritmo de encaminhamento diminui o atraso médio, o controlo de fluxo aceita a entrada de mais tráfego na rede.

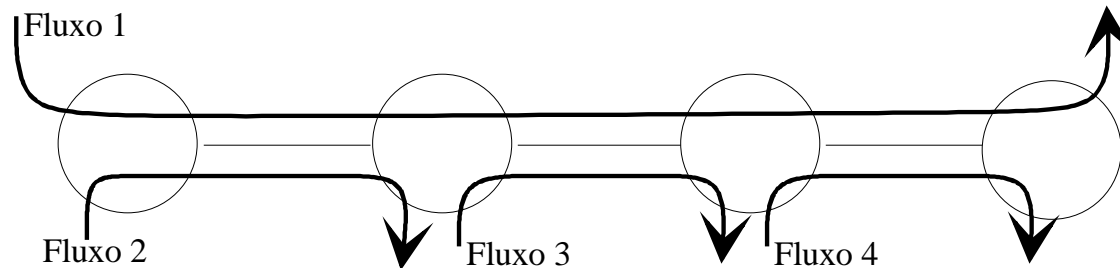
# Controlo de fluxo - introdução

Os algoritmos de controlo de fluxo devem idealmente observar os seguintes requisitos:

- Estabelecer um bom compromisso entre:
  - a quantidade de serviço (o tráfego efetivo, sujeito eventualmente à garantia de uma taxa de transmissão mínima) e
  - a qualidade de serviço (medida, por exemplo, a partir do atraso médio e da taxa de pacotes perdidos)
- Garantir um tratamento equitativo dos diferentes fluxos de pacotes, ao fornecer a qualidade de serviço requerida.

# Gestão de recursos: equidade vs. utilização

Considere-se o exemplo da figura assumindo que a capacidade de cada ligação é 100.



Maximização do tráfego efetivo (máxima utilização):

Fluxo 1 = 0, Fluxos 2,3,4 = 100

Tráfego efetivo total =  $0+100+100+100 = 300$

Mesma taxa de transmissão a todos os fluxos (máxima equidade):

Fluxos 1,2,3,4 = 50

Tráfego efetivo total =  $50+50+50+50 = 200$

Partilha equitativa dos recursos:

Fluxo 1 = 25, Fluxos 2,3,4 = 75

Tráfego efetivo total =  $25+75+75+75 = 250$

# Controlo de fluxo através de janelas (I)

- Considere um fluxo de dados de um emissor A para um recetor B.
- Por cada unidade de dados recebida, o recetor B notifica o emissor A através do envio para A de uma permissão:
  - Uma permissão pode ser transmitida num pacote de controlo dedicado ou pode ser encavalitada (*piggybacked*) num pacote de dados enviado no sentido contrário.
- Quando recebe uma permissão, o emissor A fica autorizado a enviar mais uma unidade de dados para o recetor B.
- Um esquema de controlo de fluxos através de janelas pode ser combinado com um protocolo ARQ de controlo de erros
  - neste caso, as permissões servem também de *acknowledgments*

## Controlo de fluxo através de janelas (II)

- Um fluxo entre o emissor A e o recetor B diz-se controlada através de janelas se existir um limite máximo para o número de unidades de dados que, tendo sido transmitidas por A, não foram ainda notificadas como tendo sido recebidas por B.
- O limite máximo é designado por tamanho da janela, ou simplesmente, *janela*.
- O emissor e o recetor podem ser dois nós da rede, um terminal e o nó de entrada da rede ou os dois terminais que estão nos extremos do fluxo.
- As unidades de dados podem ser mensagens, pacotes ou bytes.

## Controlo de fluxo através de janelas (III)

- No controlo de fluxos através de janelas, a taxa de transmissão do emissor é reduzida à medida que as permissões demoram mais tempo a regressar.
- Assim, se o percurso utilizado pelo fluxo estiver congestionado as permissões sofrem grandes atrasos o que obriga o emissor a reduzir a sua taxa de transmissão.
- Além disso, o recetor pode atrasar intencionalmente o envio de permissões para reduzir a taxa de transmissão do fluxo com o objetivo de, por exemplo, evitar a sobrecarga do seu *buffer* de receção.

De seguida, considera-se a estratégia de ***janelas extremo-a-extremo*** (*end-to-end*):

- para cada fluxo de pacotes, o controlo de fluxos é implementado entre o seu emissor e o seu recetor
- estratégia usada pelo TCP nas redes TCP/IP

## Janelas extremo-a-extremo

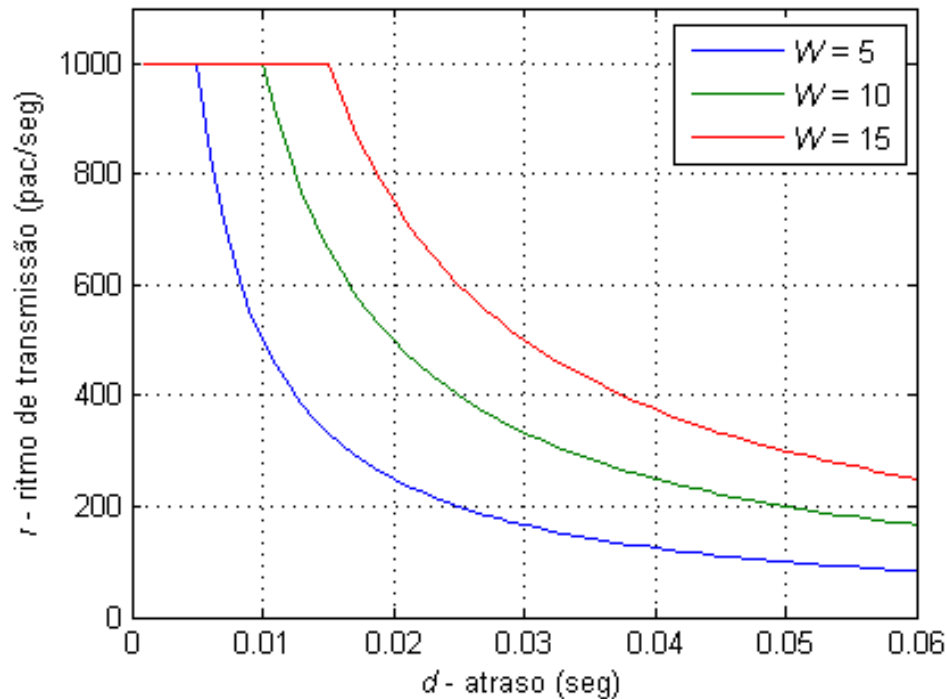
- Em geral, o tamanho da janela é  $\alpha W$  ( $\alpha$  e  $W$  são números positivos). Cada vez que um grupo de  $\alpha$  unidades de dados é recebido no nó destino é gerada uma permissão autorizando o envio de um novo grupo de  $\alpha$  unidades de dados. De seguida, considera-se que  $\alpha = 1$  e que cada unidade de dados é um pacote.
- Considere-se o atraso de ida-e-volta dado por  $d$  e o tempo de transmissão médio de cada pacote dado por  $X$ :
  - ✓ Se  $d \leq WX$ , a transmissão de  $W$  pacotes demora mais que o atraso de ida-e-volta; assim, o emissor pode transmitir à velocidade máxima de  $1/X$  pacotes/segundo.
  - ✓ Se  $d > WX$ , o controlo de fluxos está ativo pois o atraso de ida-e-volta é tão elevado que  $W$  pacotes são transmitidos antes da receção da permissão relativa ao primeiro dos pacotes.

Então, o ritmo de transmissão é dado por: 
$$r = \min \left\{ \frac{1}{X}, \frac{W}{d} \right\}$$



## Janelas extremo-a-extremo

- Exemplo:  $X = 1$  mseg. e janela  $W = 5, 10$  e  $15$  pacotes.



$$r = \min \left\{ \frac{1}{X}, \frac{W}{d} \right\}$$

- ✓ Para valores  $d \leq WX$ , o emissor transmite à velocidade máxima  $r = 1/10^{-3} = 1000$  (em pacotes/segundo)
- ✓ Para valores  $d > WX$ , o controlo de fluxos está ativo e o emissor transmite à velocidade máxima  $r = W/d$  (em pacotes/segundo)

# Dimensionamento do tamanho das janelas

Existe um compromisso entre tráfego efetivo e atraso:

- por um lado as janelas devem ser pequenas para limitar o número de pacotes na rede, evitando assim grandes atrasos e congestão;
- por outro, as janelas devem ser grandes para permitir transmissão à velocidade máxima e tráfego efetivo máximo em condições de tráfego oferecido moderado e leve.

De qualquer modo, é sempre desejável que cada fluxo possa transmitir à velocidade máxima, quando não existe nenhum outro fluxo ativo.

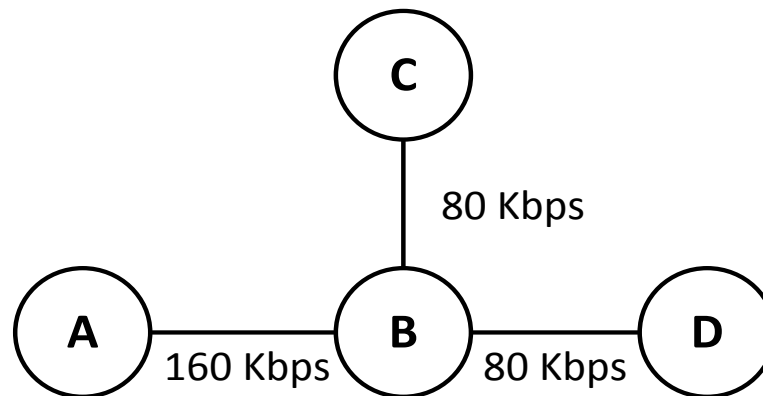
Esta condição impõe um limite inferior ao tamanho das janelas. Se  $d \leq WX$  então o fluxo pode transmitir à velocidade máxima pelo que o tamanho da janela (em número de pacotes) deverá ser dado por

$$W = \left\lceil \frac{d}{X} \right\rceil$$

onde  $\lceil x \rceil$  representa o menor inteiro não inferior a  $x$  e  $d$  deverá ser o menor atraso de ida-e-volta proporcionado pela rede.

## Exemplo 1

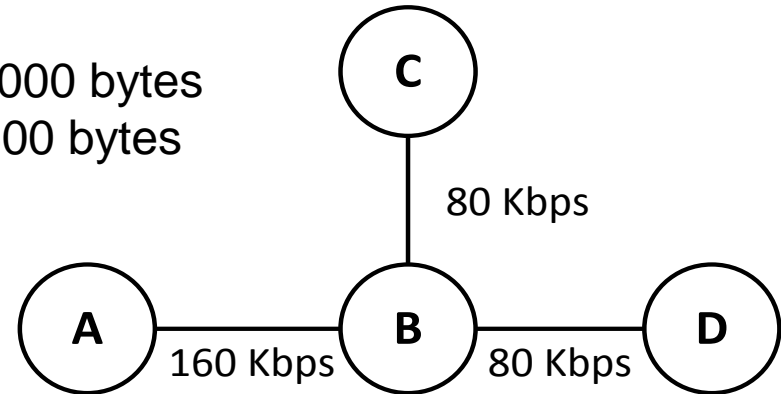
Considere a rede com comutação de pacotes da figura. O atraso de propagação de cada ligação é 100 mseg em cada sentido. A rede suporta dois fluxos:  $A \rightarrow D$  com pacotes de tamanho médio 1000 bytes e  $C \rightarrow D$  com pacotes de tamanho médio 500 bytes. A ambos os fluxos é aplicado um mecanismo de controle de fluxos baseado no método das janelas extremo-a-extremo e em ambos os casos, as permissões têm um tamanho fixo de 20 Bytes. Determine o tamanho mínimo (em número de pacotes) das janelas de emissão garantindo que cada fluxo pode emitir ao ritmo máximo quando o outro não está a emitir pacotes.



## Exemplo 1 - resolução

A → D com pacotes de tamanho médio 1000 bytes

C → D com pacotes de tamanho médio 500 bytes



$$W \geq \left\lceil \frac{d}{X} \right\rceil$$

$$W_{AD} \geq \left\lceil \frac{\frac{8 \times 1000}{160000} + 0.1 + \frac{8 \times 1000}{80000} + 0.1 + \frac{8 \times 20}{80000} + 0.1 + \frac{8 \times 20}{160000} + 0.1}{\frac{8 \times 1000}{80000}} \right\rceil = \left\lceil \frac{0.553}{0.1} \right\rceil = 6 \text{ pacotes}$$

$$W_{CD} \geq \left\lceil \frac{\frac{8 \times 500}{80000} + 0.1 + \frac{8 \times 500}{80000} + 0.1 + \frac{8 \times 20}{80000} + 0.1 + \frac{8 \times 20}{80000} + 0.1}{\frac{8 \times 500}{80000}} \right\rceil = \left\lceil \frac{0.504}{0.05} \right\rceil = 11 \text{ pacotes}$$

## Limitações do controlo de fluxo baseado em janelas

1. Não permite assegurar uma taxa mínima de transmissão. Quantos mais fluxos forem submetidos na rede, menor é o tráfego efetivo que cada fluxo obtém.
2. Não fornece um controlo adequado do atraso. Considerem-se  $n$  fluxos com controlo de fluxos ativo através de janelas com tamanho fixo  $W_1, \dots, W_n$ . O número total de pacotes e permissões é  $\sum_{i=1}^n W_i$

e o número de pacotes é  $\sum_{i=1}^n \beta_i W_i$  onde  $\beta_i$  é um valor entre 0 e 1.

Pelo teorema de Little, o atraso médio por pacote é

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n \beta_i W_i}{\lambda}$$

onde  $\lambda$  é o tráfego efetivo de todos os fluxos. À medida que o número de fluxos aumenta, o tráfego efetivo tende para um valor constante (é limitado pela capacidade das ligações). Assim, o atraso médio por pacote aumenta aproximadamente de forma proporcional ao número de fluxos.

# Controlo de taxas de transmissão

- A função de controlo de fluxos pode atribuir a cada fluxo uma taxa de transmissão máxima compatível com as suas necessidades.
- Essa taxa pode, por exemplo, ser definida na fase de estabelecimento de um circuito virtual.
- De seguida, consideram-se dois métodos para controlar a taxa de transmissão:
  - por janelas
  - através de *leaky bucket* (usado pela arquitetura *Integrated Services* (IntServ) nas redes IP)

# Controlo de taxas de transmissão por janelas (I)

- Considere-se que foi atribuída uma taxa de transmissão de  $r$  pacotes por segundo a um determinado fluxo.
- Uma possibilidade para garantir esta taxa poderia ser aceitar, quando muito, um pacote em cada  $1/r$  segundos.
- No entanto, este esquema tende a introduzir grandes atrasos quando o tráfego é de rajada.
- Neste caso, é preferível admitir  $W$  pacotes em cada  $W/r$  segundos.

## Controlo de taxas de transmissão por janelas (II)

Se foi atribuído a um determinado fluxo: (i) uma taxa de transmissão de  $r$  pacotes/segundo e (ii) uma janela de  $W$  pacotes, então:

1. O emissor mantém um contador  $x$  que indica, em cada instante, o número de pacotes dessa janela que ainda pode ser transmitido ( $x$  é inicializado a  $W$ ).
2. Sempre que um pacote é transmitido, o contador  $x$  é decrementado e passados  $W/r$  segundos é novamente incrementado (exige um temporizador por cada pacote transmitido).
3. Os pacotes só são enviados para a rede se  $x > 0$  (o número máximo de temporizadores é  $W$ ).

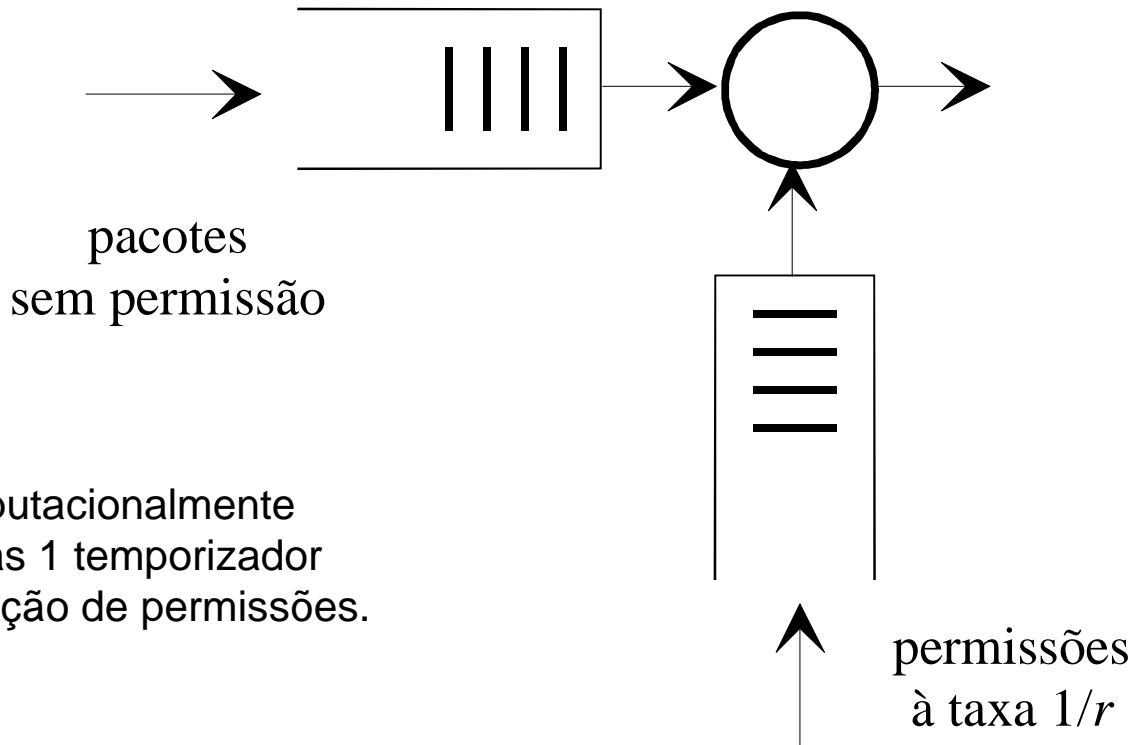
**Nota:** O método do controlo de fluxo por janelas extremo-a-extremo é semelhante a este com a diferença apenas de que o contador é incrementado quando são recebidas as permissões.

**Desvantagem:** este método é computacionalmente pesado pois exige  $W$  temporizadores simultâneos



# Controlo de taxas de transmissão por *leaky bucket*

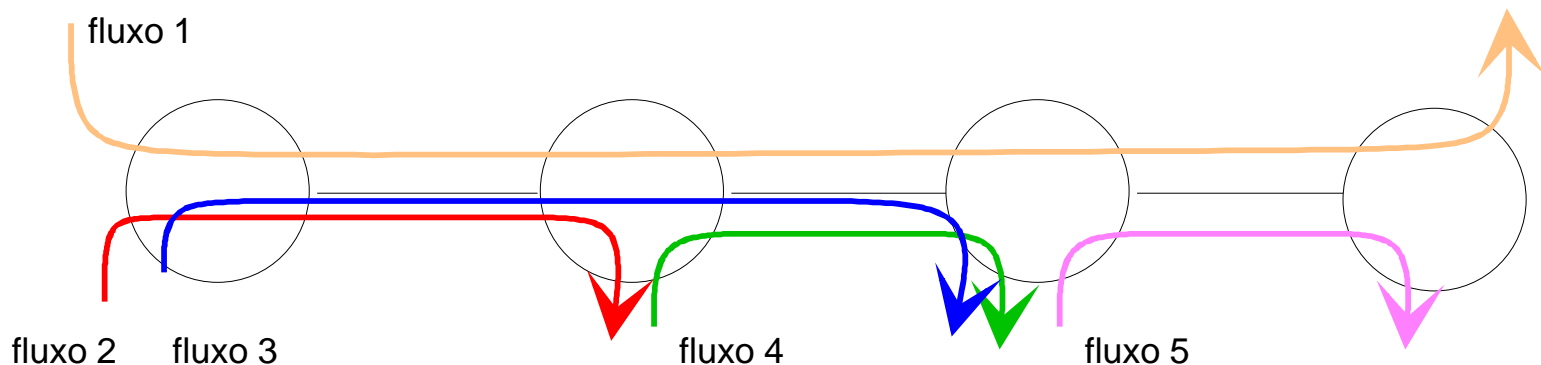
- Neste método, o contador é incrementado periodicamente em cada  $1/r$  segundos, até um máximo de  $W$  pacotes.
- O método pode ser visto da seguinte forma (modelo *leaky bucket*):
  - existe uma fila de espera de pacotes e uma fila de espera de permissões, com capacidade para  $W$  permissões;
  - é gerada uma nova permissão em cada  $1/r$  segundos;
  - os pacotes só são transmitidos quando existe uma permissão disponível na fila de espera respetiva.



**Vantagem:** este método é computacionalmente menos pesado pois exige apenas 1 temporizador para definir os instantes de geração de permissões.

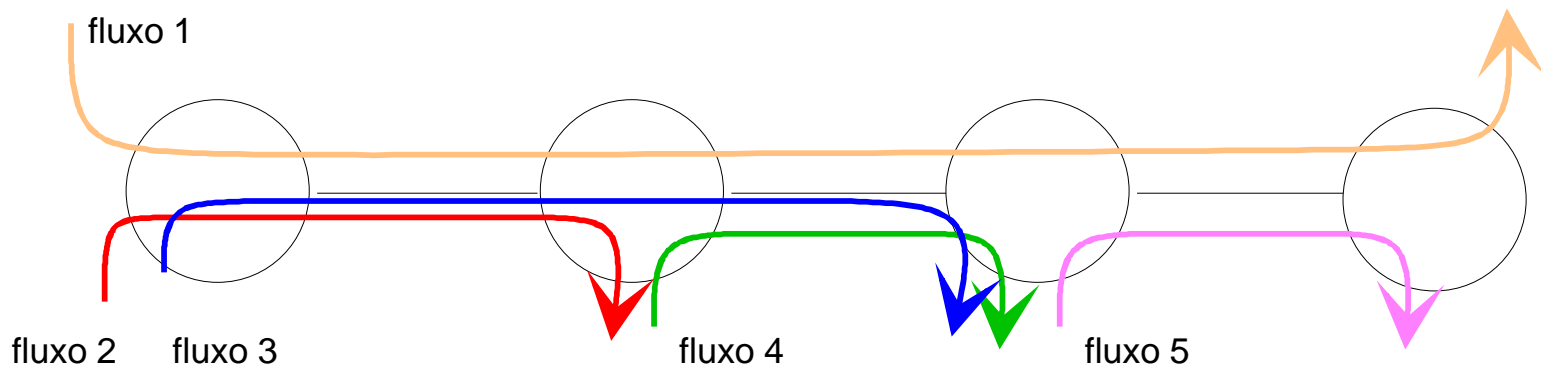
# Atribuição de taxas de transmissão

- Considere a rede da figura em que as ligações têm todas capacidade para 120 pacotes/s.
- Uma solução equilibrada (*fair*) seria atribuir a todos os fluxos uma taxa de  $1/3 \times 120 = 40$  pacotes/s.
- No entanto, não faz sentido restringir a taxa do fluxo 5 a 40 pacotes/s, pois este fluxo pode usar 80 pacotes/s sem prejudicar os fluxos 1, 2, 3 e 4.



# Equidade do tipo *max-min*

- Surge assim o conceito de equidade do tipo max-min (*max-min fairness*).
- Segundo este princípio, maximizam-se os recursos atribuídos aos fluxos que podem usar menos recursos.
- Uma forma alternativa de formular este princípio:
  - Maximizam-se as taxas atribuídas a cada fluxo, respeitando a restrição segundo a qual um incremento na atribuição ao fluxo  $i$  não conduz a uma diminuição da taxa atribuída a qualquer outro fluxo cuja taxa seja menor ou igual que a de  $i$ .



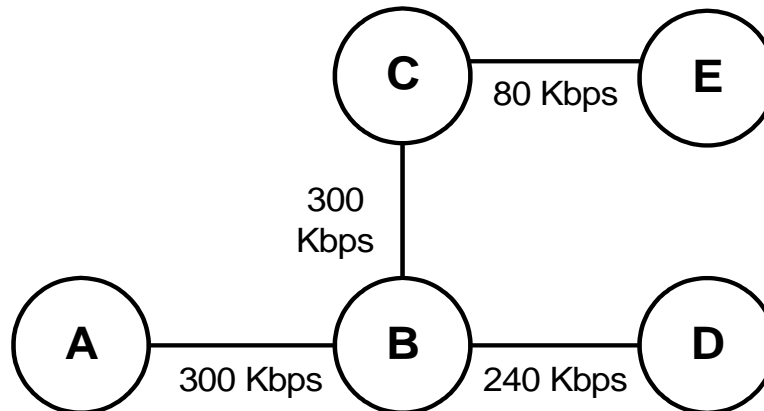
## Exemplo 2

Considere a rede com comutação de pacotes da figura.

A rede suporta 5 fluxos de pacotes: de A para B, de A para C, de A para D, de B para D e de B para E.

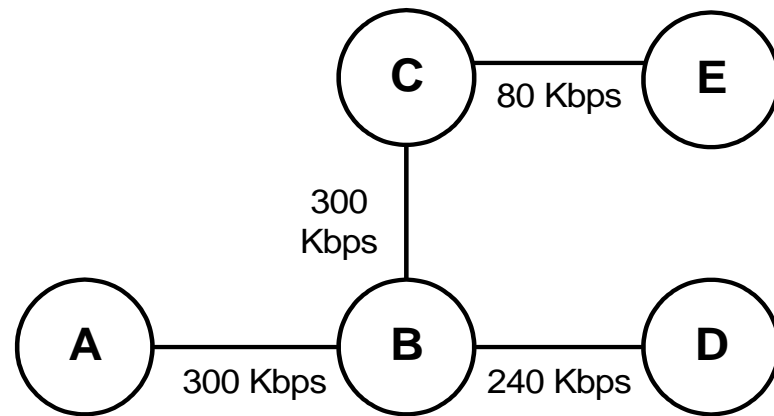
A rede permite controlar a taxa de transmissão máxima de cada fluxo através de um qualquer mecanismo adequado.

Calcular que taxas de transmissão máxima se devem atribuir a cada fluxo segundo o princípio de equidade do tipo *max-min*.



## Exemplo 2 - resolução

5 fluxos de pacotes:  
de A para B  
de A para C  
de A para D  
de B para D  
de B para E



1ª iteração:

- a ligação AB atribui  $300/3 = 100$  Kbps por fluxo
- a ligação BC atribui  $300/2 = 150$  Kbps por fluxo
- a ligação BD atribui  $240/2 = 120$  Kbps por fluxo
- a ligação CE atribui  $80/1 = 80$  Kbps por fluxo

O menor valor é o da ligação CE e é atribuído 80 Kbps ao fluxo B-E.

2ª iteração:

- a ligação AB atribui  $300/3 = 100$  Kbps por fluxo
- a ligação BC atribui  $(300-80)/1 = 220$  Kbps por fluxo
- a ligação BD atribui  $240/2 = 120$  Kbps por fluxo

O menor valor é o da ligação AB e é atribuído 100 Kbps aos fluxos A-B, A-C e A-D.

3ª iteração:

- a ligação BD atribui  $(240-100)/1 = 140$  Kbps por fluxo

É atribuído 140 Kbps ao fluxo B-D.