

# Algoritmos de Encaminhamento Dinâmico e Atribuição do Comprimento de Onda em Redes WDM

---

**Teresa Gomes<sup>1,3</sup> Carlos Simões<sup>2,3</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Engenharia Electrotécnica e de  
Computadores, FCTUC – Universidade de Coimbra

<sup>2</sup>Escola Superior de Tecnologia de Viseu  
Instituto Politécnico de Viseu

<sup>3</sup>INESC Coimbra - Instituto de Engenharia de Sistemas e  
Computadores

■ [teresa@deec.uc.pt](mailto:teresa@deec.uc.pt), [csimoes@ipv.pt](mailto:csimoes@ipv.pt)



# Plano

---

- Introdução

- O problema do Encaminhamento e Atribuição do comprimento de onda em redes ópticas (RWA – *Routing and Wavelength Assignment*)
- Encaminhamento
- Atribuição do comprimento de onda ( $\lambda$ )

- Encaminhamento resiliente

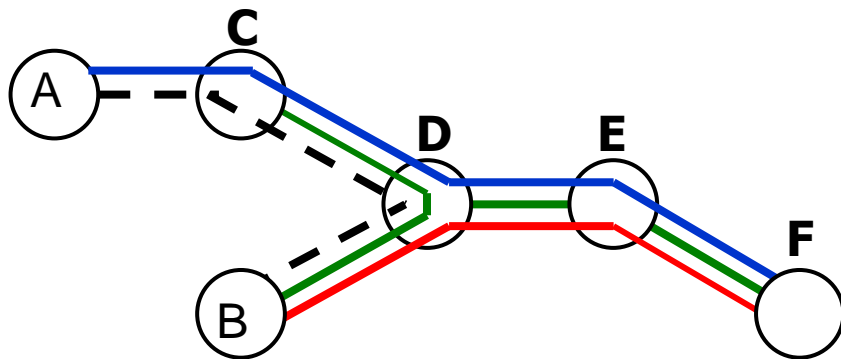
- TSA, *BasicLink Method*, *Bypass Method*, *Graph transformation technique*, KSP, JPS, ITSA.

- Conclusões

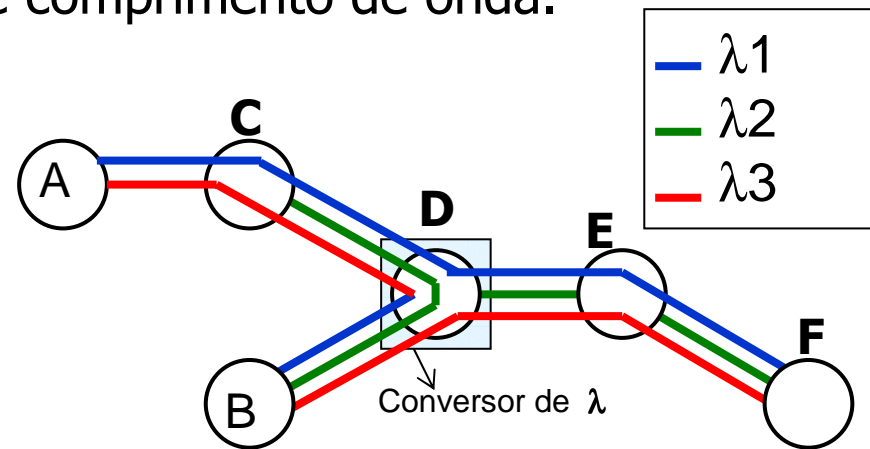
# Introdução

## O Problema RWA

- A rede óptica
  - Rede orientada à ligação
  - Caminhos ópticos
  - O problema do RWA
    - Sem conversores de comprimento de onda: a restrição da continuidade do comprimento de onda.
    - Com conversores de comprimento de onda.



Ligação A-B bloqueada



Ligação A-B bem sucedida



# Introdução

## O Problema RWA

---

- Existem duas variantes do problema RWA:
  - **Estático** – é previamente conhecido o conjunto global das ligações que se deseja estabelecer.
    - *static lightpath establishment (SLE)*.
  - **Dinâmico** – os pedidos de ligação chegam segundo um processo estocástico e os caminhos ópticos são libertados ao fim de algum tempo:
    - *dynamic lightpath establishment (DLE)*.

# Introdução

## O Problema RWA

- SLE pode ser formulado como um problema de programação linear inteira-mista – *mixed-integer linear program* - (MILP), o qual é NP-completo. Por exemplo (minimizar o nº de  $\lambda$ s usados):

$\lambda_{sdw} = 0,1$  : nº de ligações de  $s$  para  $d$  no comprimento de onda  $w$

$F_{ij}^{sdw} = 0,1$  : nº de ligações de  $s$  para  $d$  no arco  $ij$  no comprimento de onda  $w$

$\Lambda_{sd}$  : nº de ligações requeridas de  $s$  para  $d$

Minimizar :  $F_{\max}$  , tal que

$$F_{\max} \geq \sum_{s,d,w} F_{ij}^{sdw}, \forall ij$$

$$\sum_i F_{ij}^{sdw} - \sum_k F_{jk}^{sdw} = \begin{cases} -\lambda_{sdw} & \text{se } s = j \\ \lambda_{sdw} & \text{se } d = j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$\sum_w \lambda_{sdw} = \Lambda_{sd} ; \quad F_{ij}^{sdw} = 0,1 ; \quad \sum_{s,d} F_{ij}^{sdw} \leq 1$$

Dado um  $W$ ,  
resolve-se o problema ILP.  
Se não tem solução,  
toma-se  $W=W+1$ .  
E tenta-se novamente...



# Introdução

## O Problema RWA

---

- Devido a ser um problema que requer solução em tempo real, o problema **DLE** é mais difícil de resolver que o SLE.
- **Estratégia** – O problema RWA pode ser dividido em dois sub-problemas,
  - (1) Encaminhamento e
  - (2) Atribuição do comprimento de ondaos quais são resolvidos separadamente.



# Introdução

# Encaminhamento

---

- Encaminhamento Estático:
  - Encaminhamento fixo
  - Encaminhamento alternativo
    - Tabela de caminhos alternativos (disjuntos nos arcos)
- Encaminhamento Dinâmico
  - Os caminhos são escolhidos com base no estado da rede
  - Uma escolha adequada do custo dos nós (com conversores) pode reduzir a necessidade de fazer conversões de comprimento de onda

# Introdução

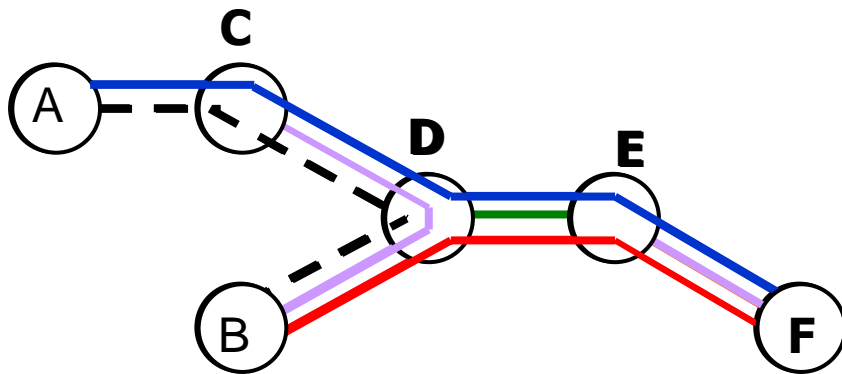
## Atribuição de $\lambda$

- Estabelecimento de caminhos ópticos estáticos (SLE)
  - Objectivos: **Minimização do número de  $\lambda$ s usados** satisfazendo a restrição da continuidade do comprimento de onda
    - Coloração de grafos: problema **NP-Completo**
    - Existem no entanto algoritmos sequenciais bastante eficientes
- Heurísticas para o Estabelecimento de caminhos ópticos dinâmicos (DLE)
  - O objectivo mais comum é a **minimização da probabilidade de bloqueio**.



# Introdução

## Atribuição de $\lambda$



Caminhos topológicos

A,C,D,E,F;

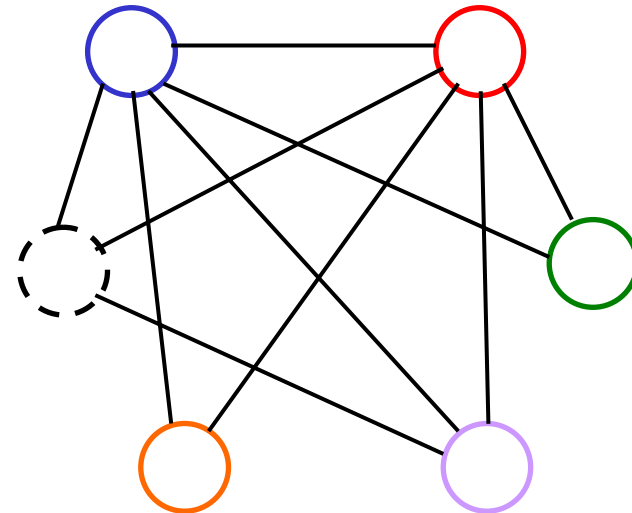
A,C,D,B

C,D,B;

B,D,E,F;

D,E;

E,F

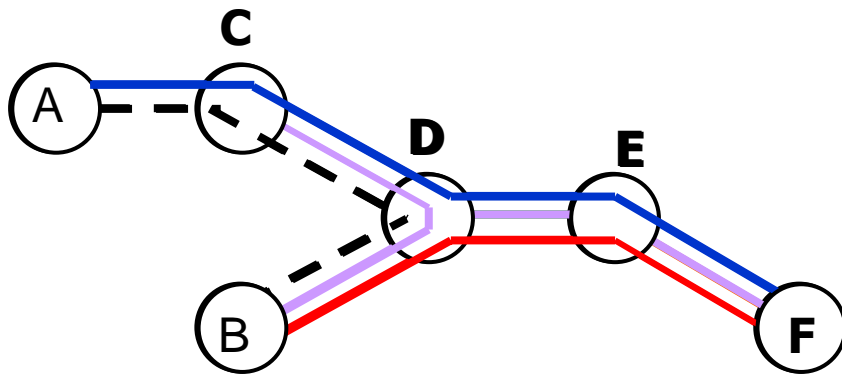


Grafo Auxiliar

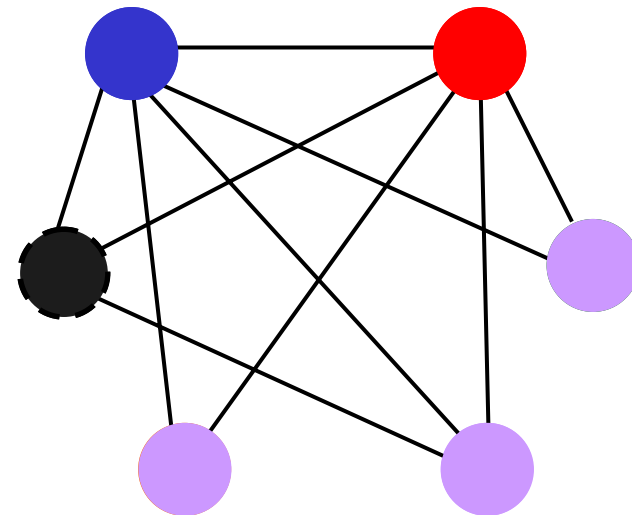
# Introdução

# Atribuição de $\lambda$

**Min  $\lambda$ s: 4** (nº cromático do grafo)



Caminhos ópticos

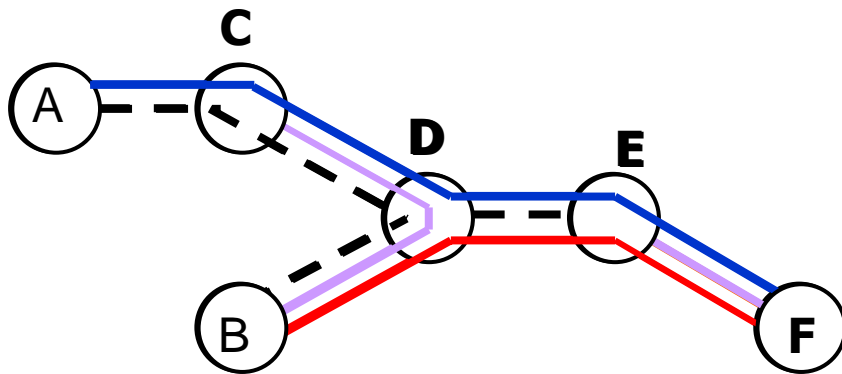


Grafo Auxiliar

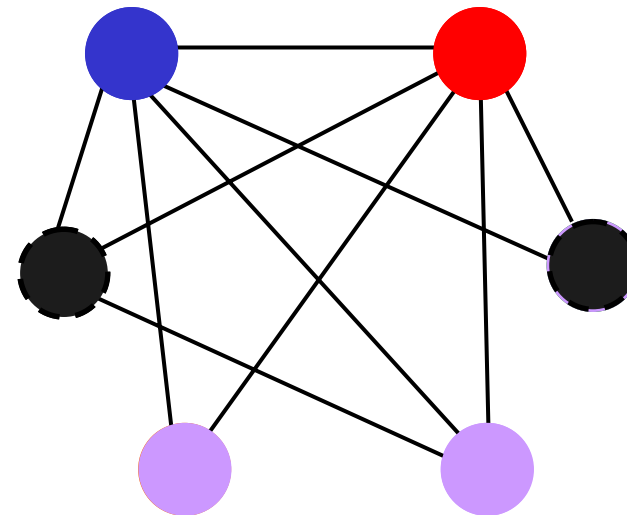
# Introdução

# Atribuição de $\lambda$

**Min  $\lambda$ s: 4** (nº cromático do grafo)



Caminhos ópticos



Grafo Auxiliar

# Introdução

## Atribuição de $\lambda$

- Heurísticas para a atribuição de  $\lambda$ , DLE:
  - R (Random)
  - FF (First Fit)
  - LU (Least Used)  $\triangle z$
  - MU (Most Used, pack)
  - MP (Min-Product)
  - LL (Least-Loaded)
  - $M\Sigma$  (Max-Sum)
  - RCL (Relative Capacity Loss)
  - Rsv (Wavelength Reservation)
  - . . .

# Introdução

## Atribuição de $\lambda$

- Algumas Heurísticas para a atribuição de  $\lambda$ , DLE (redes multi-fibra):

- MP (Min-Product):

$$\text{Calcula } \prod_{l \in \pi(p)} D_{lw}$$

para cada  $w$  ( $1 \leq w \leq W$ )

Seja  $X$  o conjunto dos  $\lambda$  que minimizam o valor anterior. MP escolhe o  $\lambda$  de menor ordem

- LL (Least Loaded):

$$\max_{w \in S_p} \min_{l \in \pi(p)} (M_l - D_{lw})$$

$L$  : n° de arcos

$M_l$  : n° de fibras no arco  $l$

$W$  : n° de  $\lambda$ s por fibra

$\pi(p)$  : conjunto de arcos do caminho  $p$

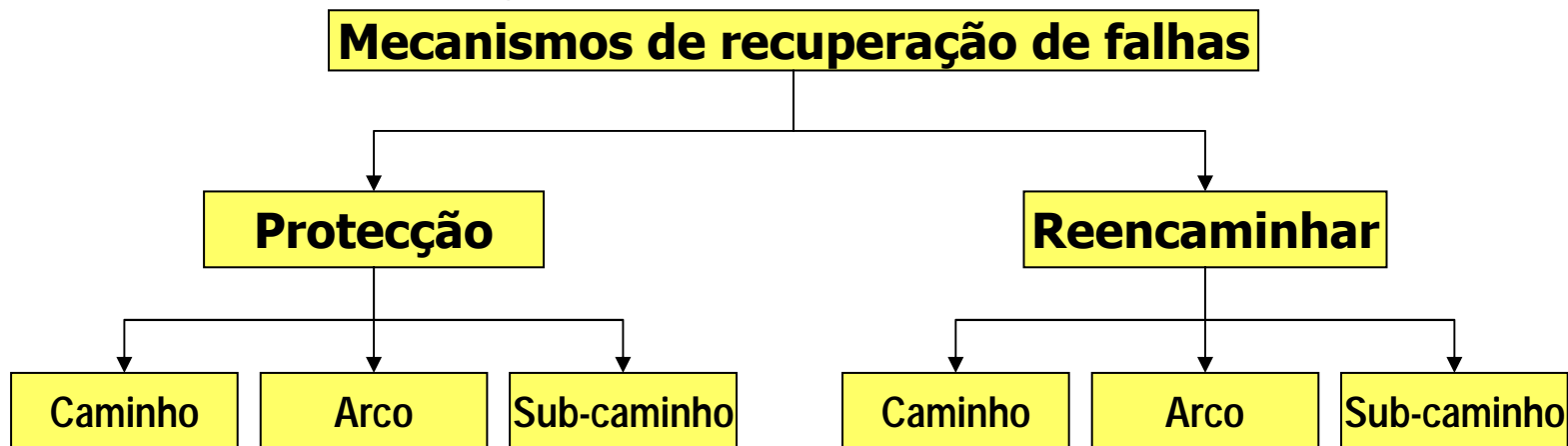
$S_p$  : Conjunto de  $\lambda$ s disponíveis em  $p$

$D$  : matriz ( $L \times W$ )

$D_{lw}$  : n° de fibras usadas no arco  $l$  e no  $\lambda = w$

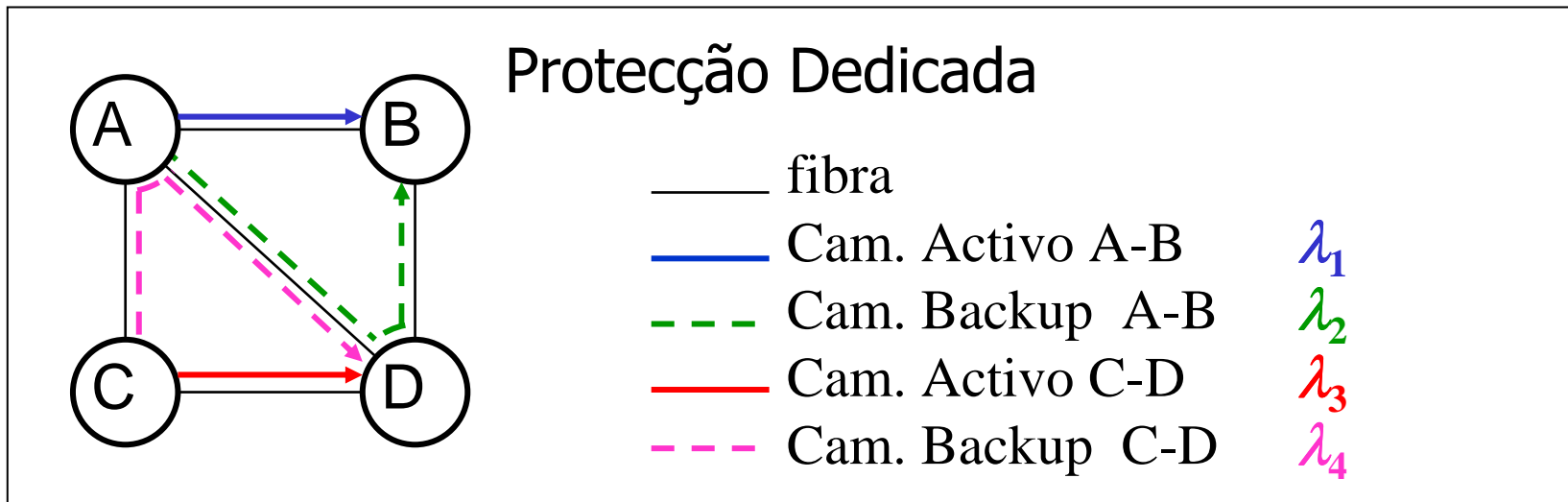
# Encaminhamento Resiliente

- Vantagens dos mecanismos de recuperação na camada óptica:
  - Recuperação rápida de fluxos de tráfego
  - Protecção de protocolos de camadas elevadas que não possuem mecanismos de recuperação
- Classificação dos mecanismos de recuperação:



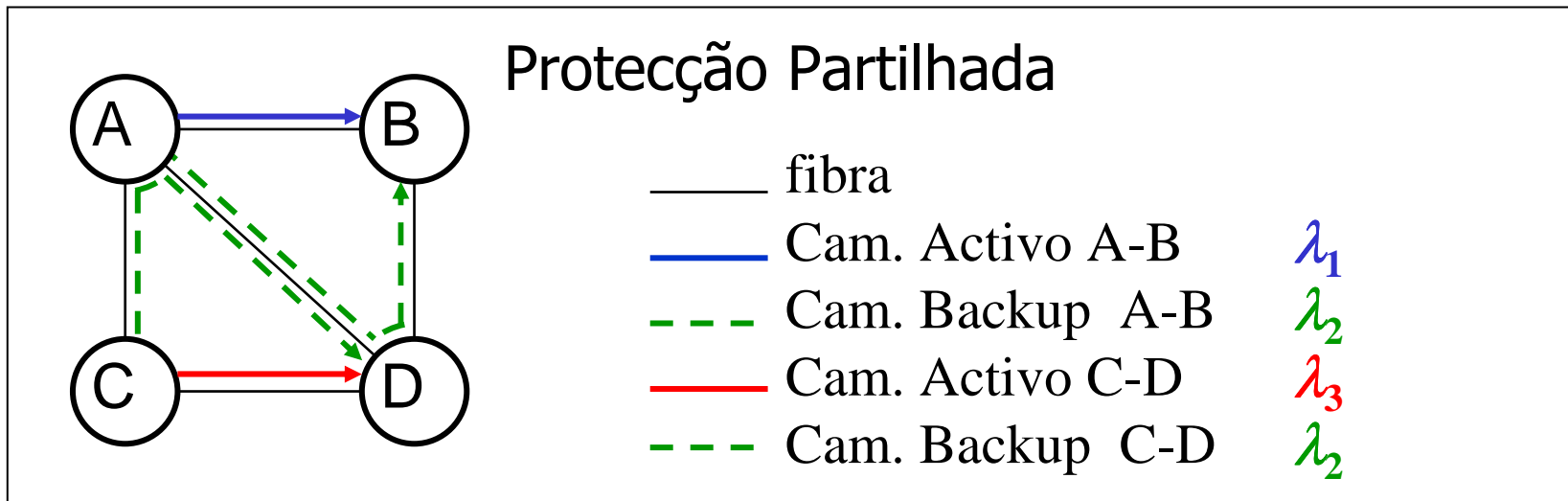
# Encaminhamento Resiliente

## ■ Protecção Dedicada versus Partilhada



# Encaminhamento Resiliente

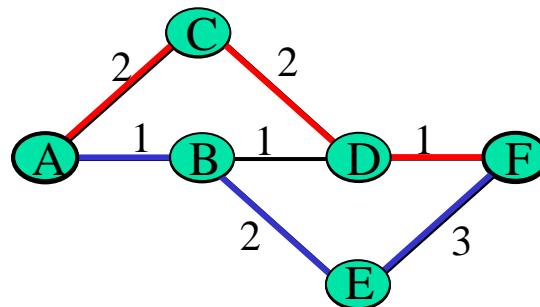
## ■ Protecção Dedicada versus Partilhada





# Encaminhamento Resiliente

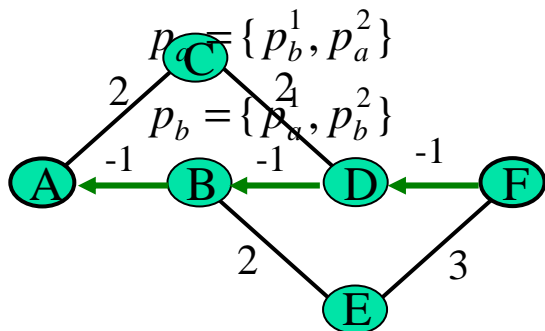
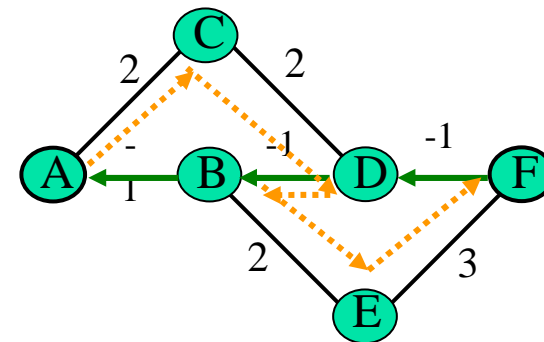
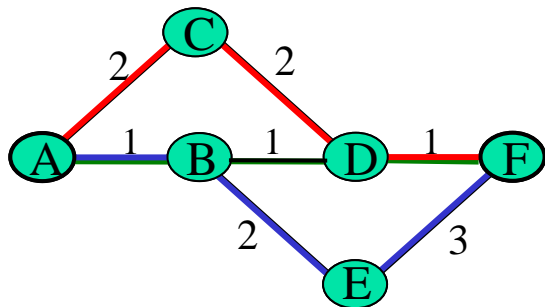
- Protecção de caminho Dedicada
- *Two Step Approach* (TSA)
  - Dificuldade: ***Trap topology problem***



- Par de caminhos disjuntos mais curtos
  - (Suurballe & Tarjan, 84), problema "Min-Sum"
  - (Bhandari, 1998), problema "Min-Sum"

# Encaminhamento Resiliente

- Par de caminhos disjuntos mais curtos
  - (Bhandari, 1998), problema "Min-Sum"



$$p_a = \{(A, B), (B, D), (D, F)\}$$

$$p_b = \{(A, C), (C, D), (D, B), (B, E), (E, F)\}$$

$$s = \{(B, D)\}$$

$$p_a = \{p_a^1, s, p_a^2\}$$

$$p_b = \{p_b^1, s, p_b^2\}$$

$$s = \{(B, D)\}$$



# Encaminhamento Resiliente

- Protecção de caminho
  - Considera-se que o custo do caminho activo (AP) é superior ao custo do caminho de protecção (BP):
$$\min(\alpha C(AP) + C(BP))$$
    - Resulta no problema Min-Sum com custos duais ordenados (MSOD) – NP-Completo
    - O algoritmo de Suurballe & Tarjan não é aplicável
  - A Protecção Partilhada resulta em MSOD, com a dificuldade adicional do custo do caminho de protecção depender da escolha do caminho activo:
$$C(AP) + C'(BP)$$
.



# Encaminhamento Resiliente

- Complexidade dos problemas subjacentes

Problema	Protecção Dedicada	Protecção Partilhada
Min-Min	NP-Completo [1]	NP-Completo [1]
Min-Sum	Polinomial [2]	NP-Completo [1]
Min-Max	NP-Completo [3] [4]	NP-Completo [3] [4]

[1] Dahai Xu, et al., "On Finding Disjoint Paths in Single and Dual Link Cost Networks," INFOCOM'04, March 2004.

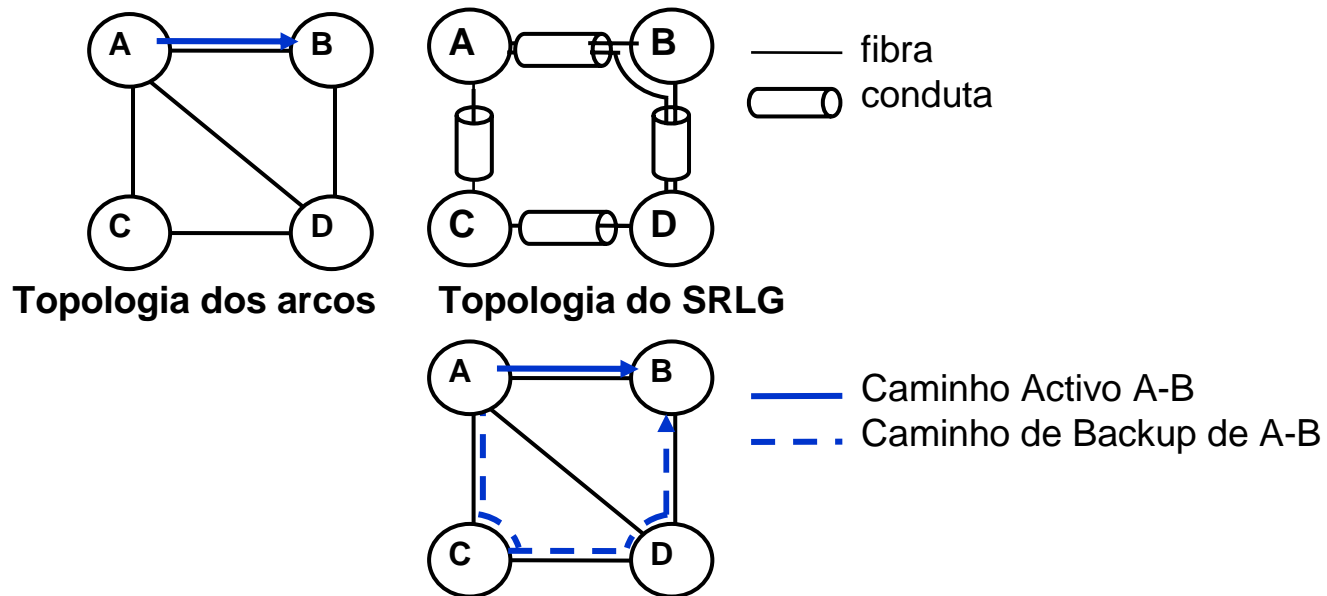
[2] J. W. Surballe, et al., "A Quick Method for Finding Shortest Pairs of Disjoint Paths," Networks, 14:325–336, 1984.

[3] Arunabha Sen, et al., "Survivability of Lightwave Networks - Path Lengths in WDM Protection Scheme," Journal of High Speed Networks, 10(4):303-315, 2001.

[4] Li, et al., "The Complexity of Finding Two Disjoint Paths with Min-Max Objective Function," Discrete Applied Mathematics, 26(1):105–115, Jan. 1990.

# Encaminhamento Resiliente

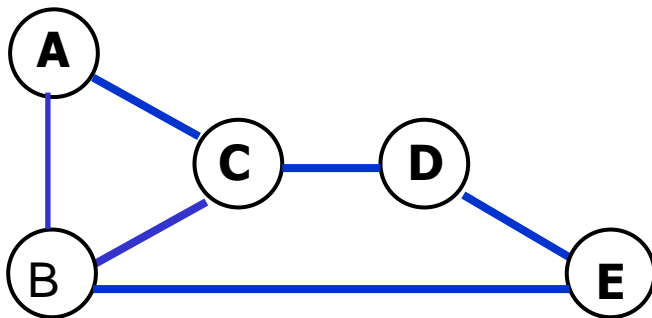
- *Shared Risk Link Group (SRLG)*



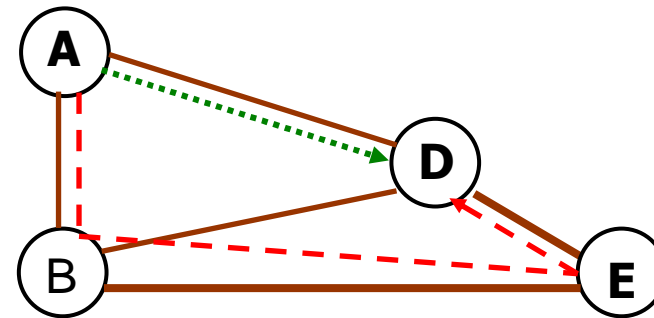
- **Encontrar** um par de caminhos disjuntos no SRLG: **NP-Completo**
- Assim, qualquer problema de **otimização** ...
- Encaminhamento com a **restrição da continuidade do  $\lambda$**  é NP-Completo!

# Encaminhamento Resiliente SRGL – um exemplo

Troços de Fibra(s) —



Arco na rede óptica —  
Caminho activo .....→  
Caminho de protecção - - - ->



Cada troço de fibra define um grupo de risco  $f_{AB}, f_{AC}, f_{BC}, f_{BE}, f_{CD}, f_{DE}$   
Os arcos **AD** e **BD** pertencem ambos ao grupo de risco  $f_{CD}$   
Logo o caminho (A,D) não pode ser protegido por (A,B,D)!

# Encaminhamento Resiliente

## *BasicLink Method* [Li02]

- Arco básico (*Basic Link*):
  - Um arco que atravessa apenas um troço de fibra (*fiber span*).
  - Um arco que atravessa múltiplos troços de fibra, mas é o único arco nesses troços.
- Construa uma topologia de rede apenas com arcos básicos.
- Encontre um par de caminhos disjuntos nos arcos (*Suurballe*).
- Escolha o mais curto para AP. O segundo caminho é disjunto no SRLG e pode ser o BP.

# Encaminhamento Resiliente

## *Basic Link Method cont.*

- Pode existir um outro BP, eventualmente mais curto, que pode ser obtido da seguinte forma:
  - Elimine os arcos do AP no grafo original e
  - Procure nesse grafo o caminho mais curto  
→ utilize-o como BP.
- **Problemas**
  - Usa apenas arcos básicos na escolha do AP.
  - Pode falhar (tal como o TSA) mesmo na presença de dois caminhos disjuntos no SRLG.



# Encaminhamento Resiliente

## *Bypass Method* [Li02]

A ideia base é a construção de uma sub-rede, mono-camada, sobre a rede óptica original, e seguidamente encontrar dois caminhos disjuntos nos arcos nessa sub-rede:

- Calcule o caminho mais curto  $p$  de  $s$  para  $d$ :

$$p = (s=a_1, a_2, \dots, a_k=d)$$

- Se não consegue encontrar um segundo caminho, disjunto com  $p$ , construa um grafo dirigido auxiliar,  $H$ , com  $k$  nós, (etiquetados  $1, \dots, k$ ).
- Elimine todos os arcos ao longo de  $p$  no grafo original e todos os arcos que pertencem aos mesmos SRLGs.

[Li02] Guangzhi Li, *et al.*, "Fiber Span Failure Protection in Mesh Optical Networks," *Optical Networks Magazine*, 3(3):21-31, 2002.

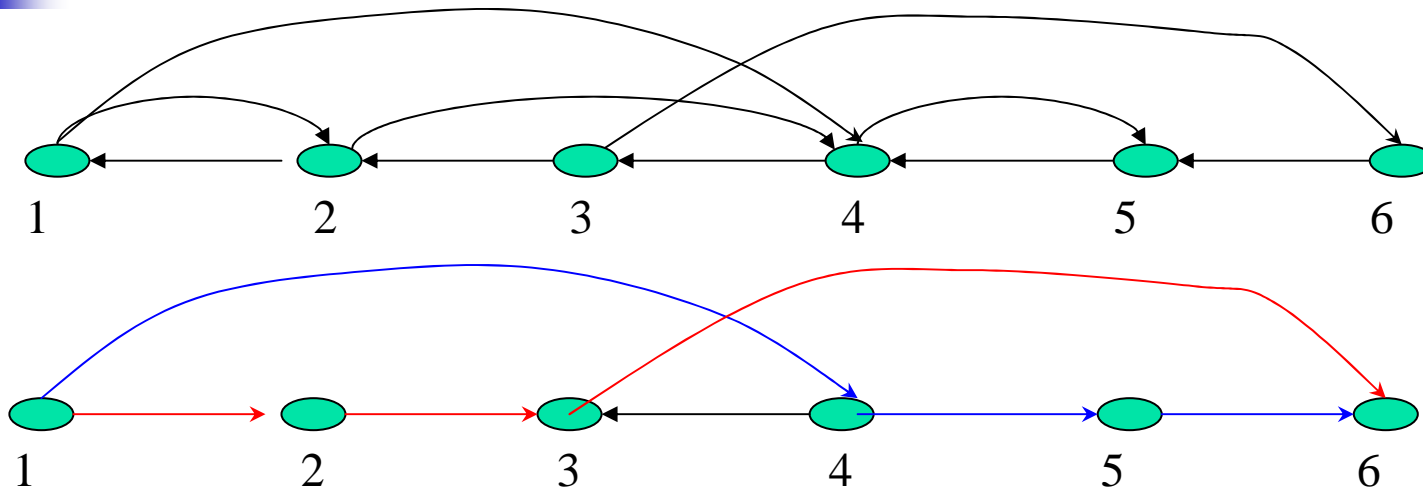
# Encaminhamento Resiliente

## *Bypass Method* cont.

- Se existe um caminho de  $a_i$  para  $a_j$  então adicione um arco directo de  $i$  para  $j$  em  $H$
- Adicione arcos inversos de  $i$  para  $i-1$  ( $i=2, \dots, k$ )
- Execute o algoritmo de *Dijkstra* em  $H$ .
- Se encontrar um caminho em  $H$  de 1 para  $k$  então é possível encontrar dois caminhos disjuntos nos arcos em  $H$ , sem levar em conta a direcção dos arcos.

# Encaminhamento Resiliente

## *Bypass Method* cont.



- Superior ao *Basic Link Method* – permite que ambos os caminhos usem arcos não básicos.

### **Problemas**

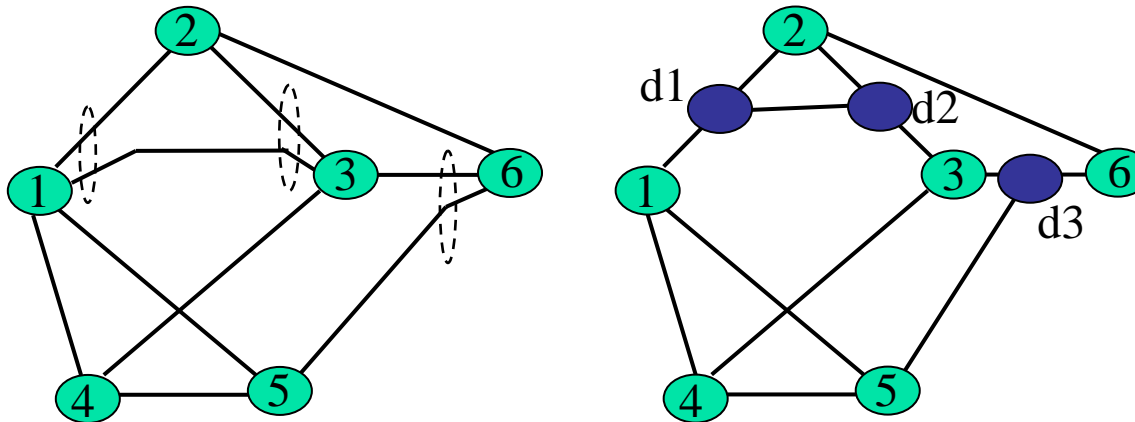
- Os dois caminhos poderão não ser disjuntos no SRLG (os arcos 1-4 e 3-6 poderão pertencer ao mesmo SRLG).

# Encaminhamento Resiliente

[Datta04]

## *Graph Transformation Technique*

- Acrescenta nós auxiliares (um por SRLG), remove os arcos que pertencem a algum SRLG, e acrescenta novos arcos...



- Aplica o algoritmo *Edge Disjoint Shortest pair* (Bhandari) a  $H$ .
- Os dois caminhos resultantes em  $H$  são dois caminhos disjuntos no SRLG.

[Datta04] Pallab Datta *et al.*, "Diverse Routing for Shared Risk Resource Groups (SRRG) Failures in WDM Optical Networks," First International Conference on Broadband Networks, BROADNETS'04, 2004.

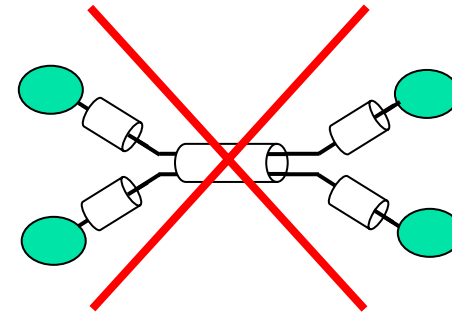
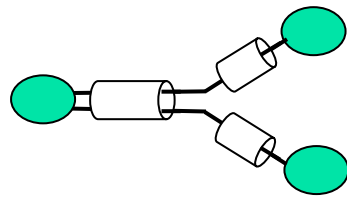
# Encaminhamento Resiliente

## *Graph Transformation Technique*

### ■ Limitações

Apenas pode ser usado se:

- Cada SRLG é menor do que o grau do nó no qual esse grupo é incidente.
- Um arco for partilhado no máximo por dois SRLGs.





# Encaminhamento Resiliente

## KSP - *K Shortest Paths*

---

É uma extensão natural do TSA (Two Step Approach).

- Calcula  $K$  caminhos mais curtos como APs candidatos.
- Avalia cada um deles por ordem não decrescente do seu custo, até obter um caminho disjunto no SRLG (ou até esgotar o conjunto de caminhos candidatos).

### Problemas:

- Se o candidato corrente a AP falha o teste, o caminho candidato seguinte é seleccionado com base apenas no seu custo, sem levar em conta quais os arcos nesse AP que provocaram armadilha (*trap*).
- Muitos candidatos a AP precisam de ser testados.
- O par de caminhos obtidos não é óptimo.

# Encaminhamento Resiliente

## JPS-*Joint Path Selection* [Xin02]

- Calcula  $k$  caminhos mais curtos, os caminhos candidatos a APs ( $AP_i, i=1, \dots, k$ , with cost  $CAP_i$ ).
- Para cada  $AP_i$  calcula o caminho mais curto disjunto no SRLG,  $BP_i$  (com custo  $CBP_i$ ).
- Encontra  $h$  tal que  $CAP_h + CBP_h = \min(CAP_i + CBP_i), 1 \leq i \leq k$ .
- Selecciona  $AP_h$  para caminho activo e  $BP_h$  como caminho de protecção.

### Função de Custo dos Arcos:

- Função de custo nos arcos é integrada e aditiva, n<sup>o</sup> de saltos e  $\lambda$ 's disponíveis:

$$\text{custo do arco } c_l = p_1 \times f(\lambda_l^u, \lambda_l^T) + p_2 \times 1$$

$\lambda_l^u$  – número de  $\lambda$ 's usados no arco  $l$

$\lambda_l^T$  – número total de  $\lambda$ 's no arco  $l$

$p_1, p_2$  – pesos

"1" – representa o custo do número de saltos

# Encaminhamento Resiliente

## JPS-*Joint Path Selection* cont.

Função do custo do caminho

- Custo do caminho activo:  $CAP_i = \sum_{l \in AP_i} c_l$

- Custo do caminho de protecção:

- Protecção Dedicada:  $CBP_i = \sum_{l \in BP_i} c_l$

- Protecção Partilhada:  $CBP_i = \sum_{l \in BP_i} g(c_l, l)$

$$g(c_l, l) = \begin{cases} \alpha \times c_l, & \text{se } l \text{ é um arco partilhado} \\ c_l, & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$\alpha$  – peso de controlo da partilha





# Encaminhamento Resiliente

## *ITSA-Iterative Two-Step Approach*

[Ho03]

Melhora o TSA.

Repete o TSA iterativamente, tomando para AP cada um dos  $k$ -caminho mais curtos obtidos.

- Na primeira iteração, o caminho mais curto é o AP candidato.
- Repete até satisfazer condição de paragem:
  - Calcula a capacidade de reserva (partilhável ou não) dos arcos, a qual depende de AP.
  - Calcula BP, com base na capacidade de reserva (arcos).
  - Actualiza o melhor par.
  - Calcula o próximo AP candidato (cam. mais curto seg.)



# Encaminhamento Resiliente

## *ITSA-Iterative Two-Step Approach*

- A condição de paragem utiliza dois critérios:
  - Encontrou o caminho óptimo
  - Atingiu um número pré-definido de iterações
- **Teste de Optimalidade**
  - Se o custo do caminho candidato a AP é superior ao custo do melhor par de caminhos corrente...

### **Vantagem:**

- Garante a obtenção do melhor par (AP,BP) dado o estado corrente do estado dos arcos, se for utilizado tempo suficiente.

### **Desvantagem:**

- O número de APs que precisa de ser explorado cresce exponencialmente com a dimensão da rede.



# Conclusões

---

- O problema de RWA em redes **resilientes** é um problema difícil
- Têm sido propostas muitas heurísticas
- **Propor novas aproximações que explorem:**
  - Probabilidade de bloqueio
  - Equidade
  - Impacto de aceitação de uma ligação em pedidos futuros