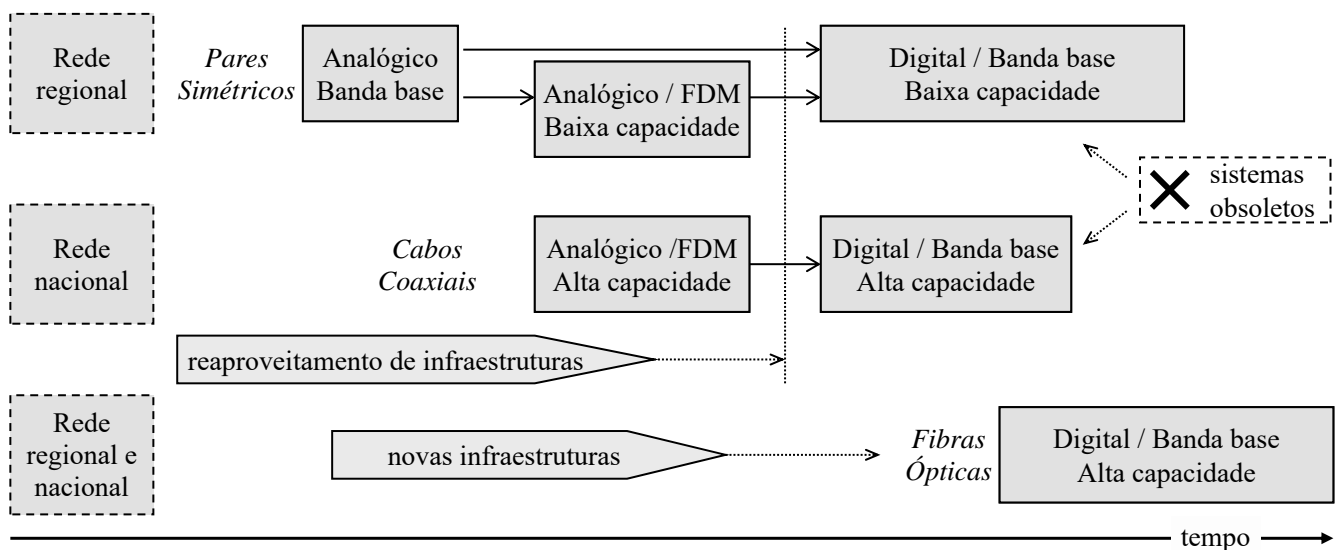


Sistemas de Transmissão

- **Sistemas de longa distância**
 - Sistemas por fibra óptica
 - Sistemas por feixe hertziano
 - Sistemas por satélite
- **Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM – Wavelength Division Multiplexing)**

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra óptica



Vantagens das fibras ópticas sobre o cobre

- maior largura de banda
- maiores débitos
- menor atenuação
- menores interferências
- melhores características físicas
- menores custos

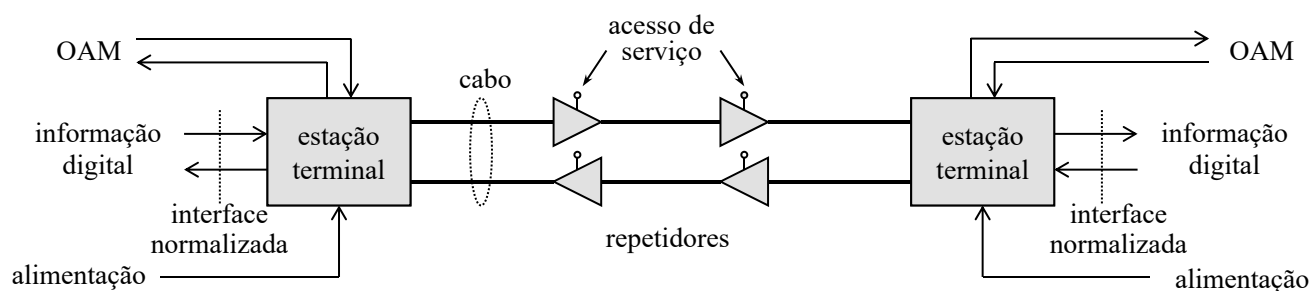
Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra óptica

Estrutura de um sistema de transmissão digital de linha

- estações terminais: em cada extremo da ligação
- meios de transmissão guiados
 - fibras ópticas
 - cabos em condutas enterradas ou suspensos
- repetidores intermédios: amplificam e regeneram o sinal

se necessário



Sistema básico de transmissão de linha

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

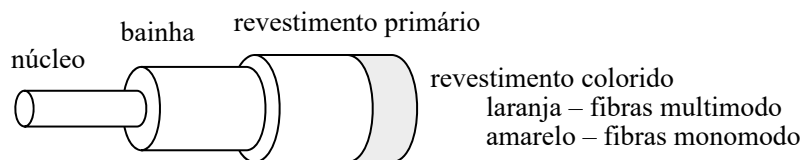
Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra óptica

Características gerais

- sinais ópticos: na banda do infra-vermelho
- meio de transmissão
 - material de suporte da transmissão: sílica
 - fibras agrupadas em cabos
- componentes opto-electrónicos
 - transmissor: conversão eléctrica-óptica (LED / Laser)
 - receptor: conversão óptica-eléctrica (díodos foto-sensíveis)
- baixa atenuação
- enorme capacidade

luz ON-OFF: uma forma de ASK



Construção de uma fibra óptica

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

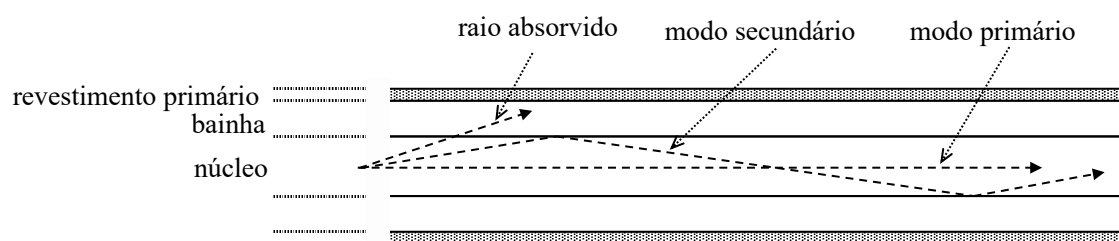
Sistemas em fibra óptica

Propagação nas fibras ópticas

- índice de refração núcleo - η_1 bainha - η_2 $\eta_1 > \eta_2$
- propagação guiada ao longo do núcleo
- possíveis um ou vários modos de propagação em simultâneo
- principais limitações

- atenuação → redução do nível de potência óptica
- dispersão → espalhamento temporal dos impulsos

objectivos tecnológicos
reduzir a atenuação
reduzir a dispersão



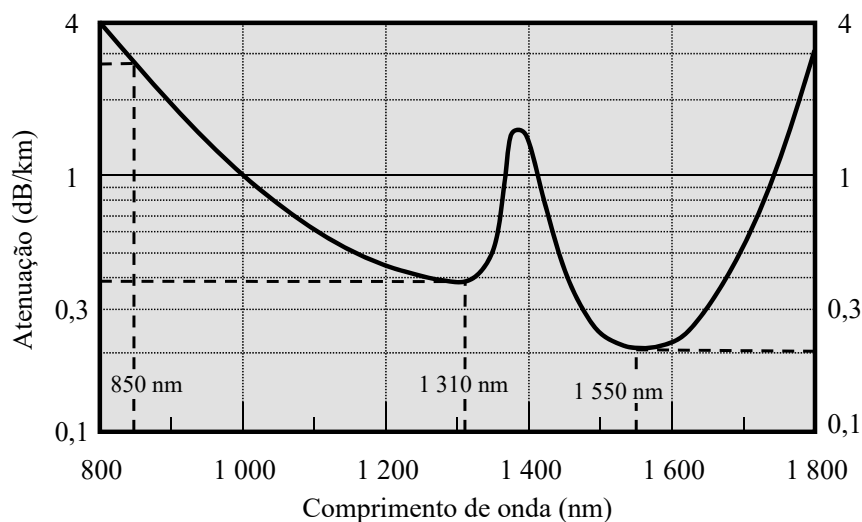
Modos de propagação numa fibra

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra óptica

Atenuação

- função do comprimento de onda
- utilizadas 3 janelas ópticas → 850, 1310 e 1550 nm



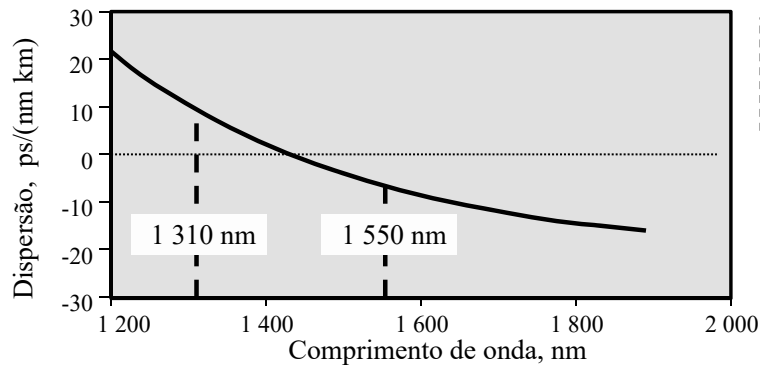
Atenuação em fibras ópticas em função do comprimento de onda

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra óptica

Dispersão

- resulta de diferentes velocidades de propagação dos componentes do sinal
- exprime-se através da derivada da função atraso de grupo vs. comprimento de onda
- três tipos de dispersão
 - modal → modos com diferentes velocidade de propagação
 - cromática → atraso de fase depende do comprimento de onda
 - modo de polarização → atraso de fase depende da polarização



a dispersão modal, quando existe, é muito maior do que as restantes formas de dispersão

Dispersão cromática em fibras ópticas em função do comprimento de onda

Sistemas de Telecomunicações

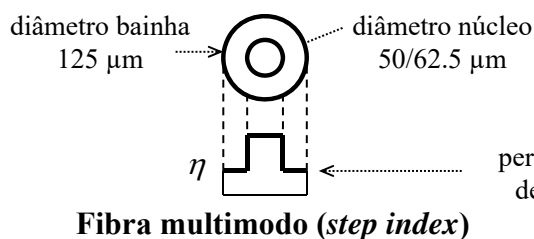
Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

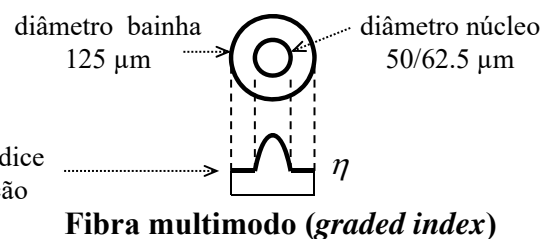
Sistemas em fibra óptica

Sistemas em fibras multimodo

Características	
diâmetros típicos	núcleo – 50/62.5 µm bainha - 125 µm
comprimento de onda	850 nm (1ª janela) 1 310 nm (2ª janela)
modos de propagação	vários
componentes	emissão – LEDs / lasers baixo custo recepção - díodos PIN conexão simples
atenuação	3 dB/km @850 nm 1 dB/km @1 310 nm
dispersão	fibras <i>step index</i> → dispersão modal elevada fibras <i>graded index</i> → dispersão modal moderada



Fibra multimodo (*step index*)



Fibra multimodo (*graded index*)

Sistemas de Telecomunicações

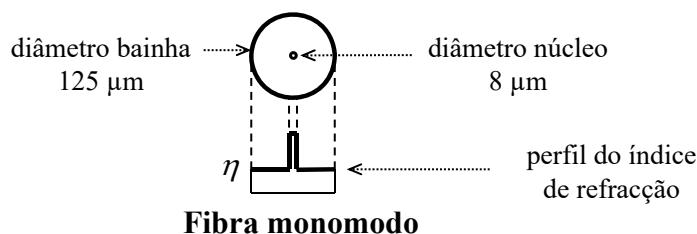
Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra óptica

Sistemas em fibras monomodo

Características		
diâmetros típicos	núcleo - 8 μm	bainha - 125 μm
comprimento de onda	1 310 nm (2ª janela)	1 550 nm (3ª janela)
modos de propagação	um único modo	
componentes	emissão - LEDs / lasers recepção - díodos PIN / foto-díodos de avalanche (APD) conexão e terminação precisa	
atenuação	0,2–0,4 dB/km @ 1 310 nm	0,15–0,3 dB/km @ 1 550 nm
dispersão	dispersão modal inexistente dispersão cromática muito reduzida – procura-se criar um nulo na região de operação dispersão de modo de polarização muito reduzida – não desprezável para elevados débitos	



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra óptica

Áreas de evolução tecnológica

- novos tipos de fibra com atenuação e dispersão reduzidas
- lasers de elevada pureza espectral
- detecção coerente e igualização electrónica
- amplificação óptica e dispositivos ópticos de compensação da dispersão
- multiplexagem de comprimento de onda

WDM - ver capítulo seguinte

Limitações

- impacto no débito e distância
- desempenho de um sistema exprime-se em débito \times distância

Potência

- potência emitida
- atenuação na fibra
- sensibilidade do receptor

fibras monomodo standard - 2ª janela

50 Gbit/s \times km

Dispersão modal

fibras multimodo *step index*

10 Mbit/s \times km

fibras multimodo *graded index*

2 Gbit/s \times km

Dispersão cromática

Dispersão de modo de polarização

fibras monomodo standard - 3ª janela

100 Gbit/s \times km

fibras monomodo de baixa dispersão

>1 Tbit/s \times km

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra óptica

✗ sistemas obsoletos

Gerações e exemplos de sistemas de fibra óptica na rede de transporte

Geração	Características	Janela	Exemplos de sistemas		
			Débito	Sistema	Espaçamento de regeneradores
1ª Geração	multimodo	1ª	34 Mbit/s 140 Mbit/s	PDH	< 10 km
2ª Geração	monomodo standard	2ª / 3ª	140 Mbit/s 565 Mbit/s	PDH	30 - 70 km
		3ª	155 Mbit/s 620 Mbit/s	SDH	
3ª Geração	monomodo de baixa dispersão	3ª	1 Gbit/s	GbE	80 - 140 km
			2,5 Gbit/s 10 Gbit/s	SDH	
4ª Geração	monomodo de baixa dispersão lasers puros amplificação óptica	3ª	1 Gbit/s 10 Gbit/s	GbE	300 - 5 000 km
			2,5 Gbit/s 40 Gbit/s	SDH	

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

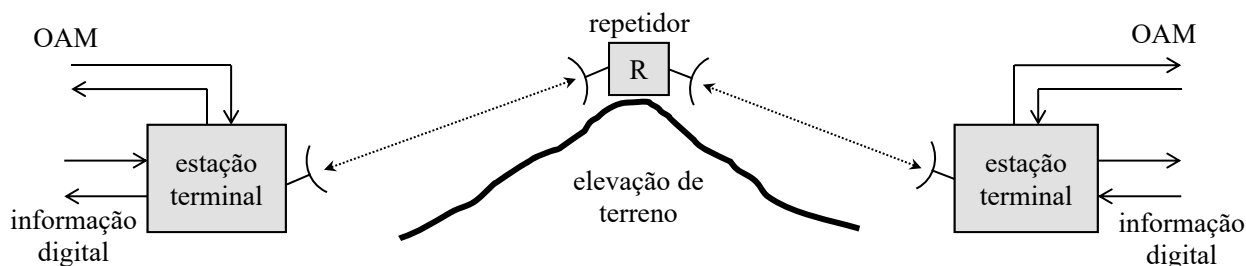
Sistemas por feixe hertziano

Características gerais

- estações terminais em cada extremo
 - modulação e emissão
 - recepção e desmodulação
- sistemas de antena: radiam/recebem o sinal com directividade
- meio não guiado: o espaço livre
- repetidores intermédios: amplificam e regeneram o sinal e contornam obstáculos
- frequências de portadora acima de 1 GHz

espectro electromagnético é limitado

- feixes hertzianos só deverão ser utilizados se não forem possíveis meios guiados



Sistema básico de transmissão digital por feixe hertziano

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

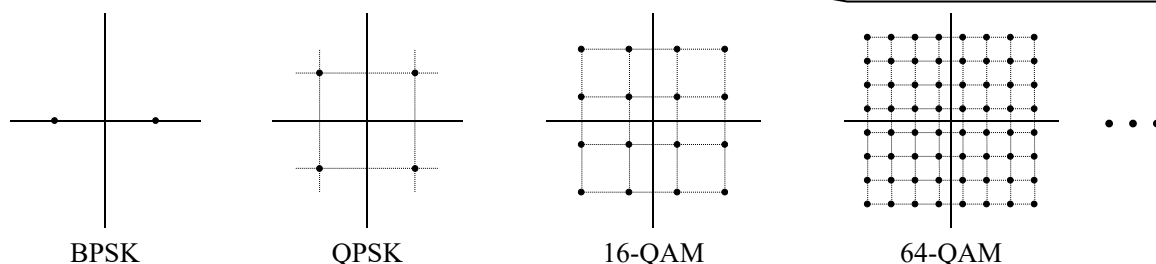
Sistemas de longa distância

Sistemas por feixe hertziano

Características gerais

– modulações de amplitude-fase tipo M-QAM

transmissão na banda de canal



Eficiência		Modulação M-QAM						
		M=2	M=4	M=16	M=64	M=128	M=256	M=512
Nominal	$\rho_{nom} = R_b / B_{nom} = (\log_2 M) / 2$ (1)	0,5	1	2	3	3,5	4	4,5
Máxima	$\rho_{max} = R_b / B_{min} = \log_2 M$ (2)	1	2	4	6	7	8	9

(1) - B_{nom} : largura de banda “nulo-a-nulo” (lobo principal do sinal rectangular não filtrado)

(2) - B_{min} : largura de banda de Nyquist (sinal seno cardinal sem interferência intersimbólica)

Modulações M-QAM e respectivas eficiências

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas por feixe hertziano

Sistemas ponto-a-ponto de baixa / média capacidade

– utilizados na rede local / regional

Modulação	Sistema e respectiva largura de banda (MHz)						Eficiência
	2 Mbit/s	2 x 2 Mbit/s	8 Mbit/s	2 x 8 Mbit/s	34 Mbit/s	2 x 34 Mbit/s	
BPSK	3,5	7	14	28	56		≈ 0,6
QPSK	1,75	3,5	7	14	28	56	≈ 1,2
16-QAM		1,75	3,5	7	14	28	≈ 2,4

Sistemas ponto-a-ponto de alta capacidade

– utilizados na rede regional / nacional

Modulação	Sistema	B (MHz)	Eficiência
16-QAM	140 Mbit/s	40	3,5
	155 Mbit/s	55	2,8
64-QAM	140 Mbit/s	30	4,7
		40	3,5
	155 Mbit/s		3,9

Modulação	Sistema	B (MHz)	Eficiência
128-QAM	140 Mbit/s	30	4,7
	155 Mbit/s		5,2
256-QAM	2 x 140 Mbit/s	40	7
512-QAM	2 x 155 Mbit/s	40	7,1

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas por feixe hertziano

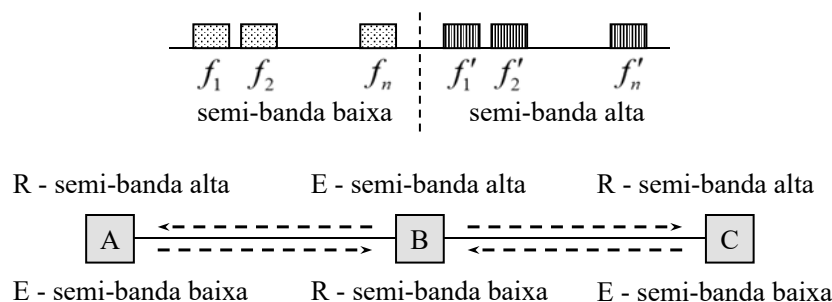
Bandas mais utilizadas

- 2 GHz, 4 GHz, 6 GHz, 11 GHz e 18 GHz

Plano de frequências - semi-bandas

- banda total é dividida em 2 semi-bandas com uma banda de guarda
- cada estação emite numa semi-banda e recebe na outra semi-banda
- os canais são separados entre si por uma banda de guarda
- cada antena suporta um máximo de 4 canais não adjacentes

reduz
interferências



Partição do espectro em semi-bandas

Sistemas de Telecomunicações

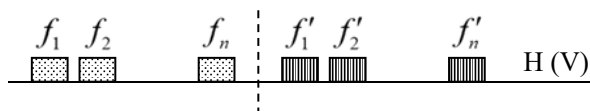
Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

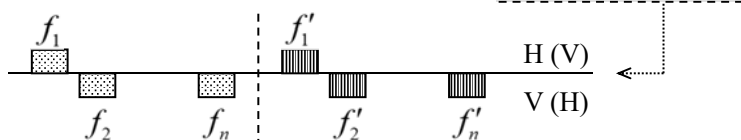
Sistemas por feixe hertziano

Plano de frequências - polarização dos canais

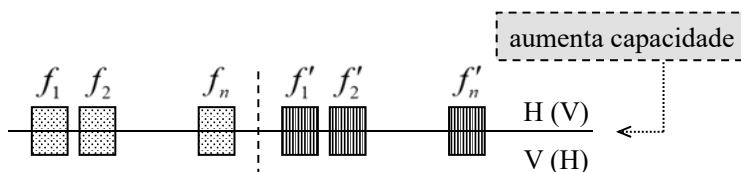
- plano simples
 - uma única polarização



- plano simplesmente alternado
 - canais adjacentes ortogonais



- plano sobreposto
 - canais sobrepostos ortogonais



Utilização de polarizações
ortogonais em feixes hertzianos

Sistemas de Telecomunicações

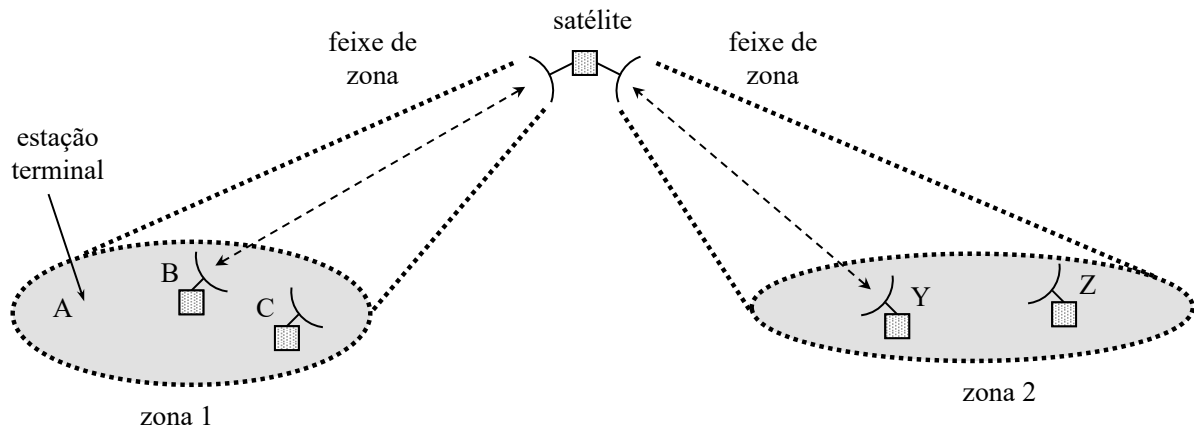
Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Princípios do sistema

- feixes hertzianos com um repetidor (transpositor) a bordo de um satélite no espaço
- a órbita do satélite é uma elipse (caso geral) em que a Terra está num dos focos
- aplicação relevante: órbita circular equatorial geoestacionária (altitude=36 000 km)
- permitem uma grande flexibilidade de acesso aos recursos de transmissão



Sistema básico de transmissão por satélite

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Modulações mais utilizadas

- BPSK, QPSK, MSK

as mais eficientes em termos de potência

Bandas mais utilizadas

- frequências ascendente e descendente afastadas
- frequência ascendente superior à descendente

reduzem-se as interferências

Bandas atribuídas a sistemas por satélite

Serviço	Banda	Frequências	Ligação ascendente	Ligação descendente
Fixo	C	6 / 4 GHz	5,925 - 6,425 GHz	3,700 - 4,200 GHz
	Ku	14 / 11 GHz	14,000 - 14,800 GHz	10,700 - 11,700 GHz
	Ka	30 / 20 GHz	27,500 - 31,000 GHz	18,100 - 21,200 GHz
Difusão	Ku	18 / 12 GHz	17,300 - 18,100 GHz	11,700 - 12,500 GHz
Móvel	L	1,6 GHz	Atribuições diversas	
	S	2,5 GHz		

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Tipos de órbitas

– GEO (*Geosynchronous Earth Orbit*): órbita circular equatorial geosíncrona

- período de revolução: 23 h 56 m 4,091 s
- altitude média: 35 786 km ($r_S - r_T = 42\,164 - 6\,378$)

– LEO (*Low Earth Orbit*): órbita circular de baixa altitude

- altitude típica: 500 - 1 500 km
- período de revolução 1h 30m - 2h

caso notável
órbita polar

– MEO (*Medium Earth Orbit*): órbita circular de altitude média

- altitude típica: 10 400 km
- período de revolução 6 horas

há outras órbitas
utilizadas

– HEO (*Highly Elliptical Orbit*): órbita fortemente elíptica

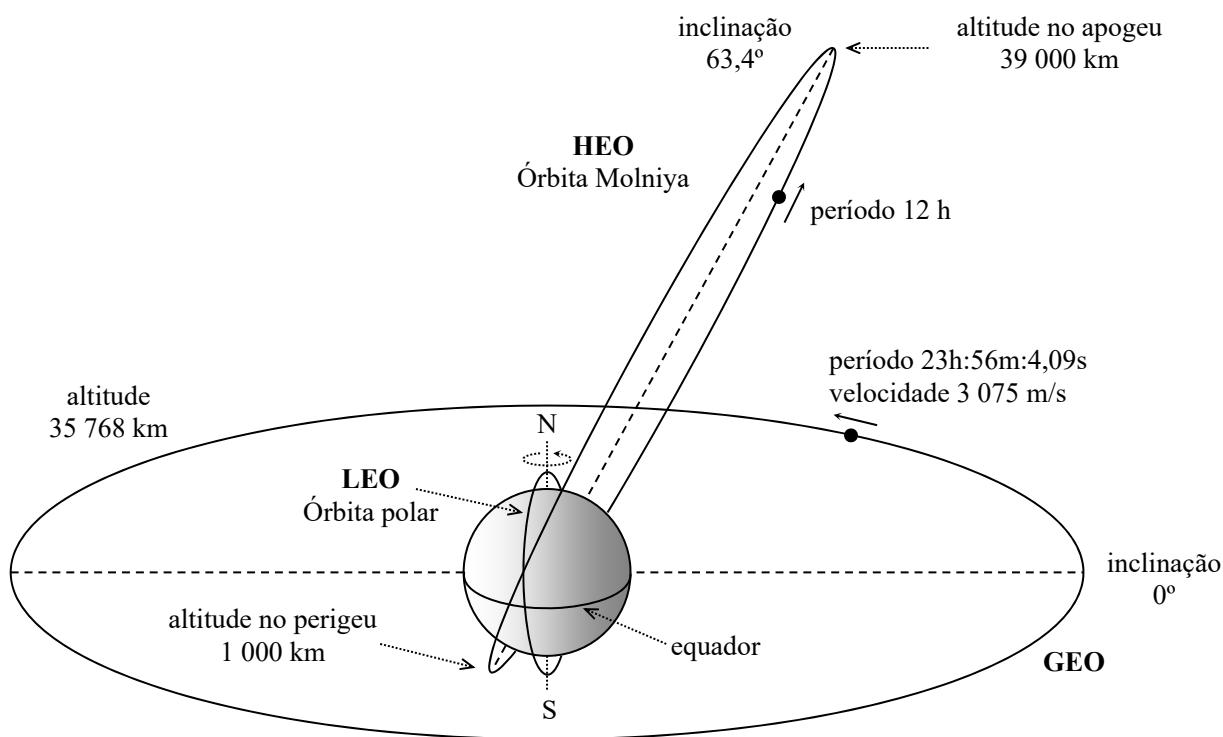
- órbita elíptica inclinada
- perigeu de baixa altitude

caso notável: órbita Molniya
perigeu: 1 000 km altitude apogeu: 39 000 km altitude
período: 12 horas inclinação: 63,4°

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância



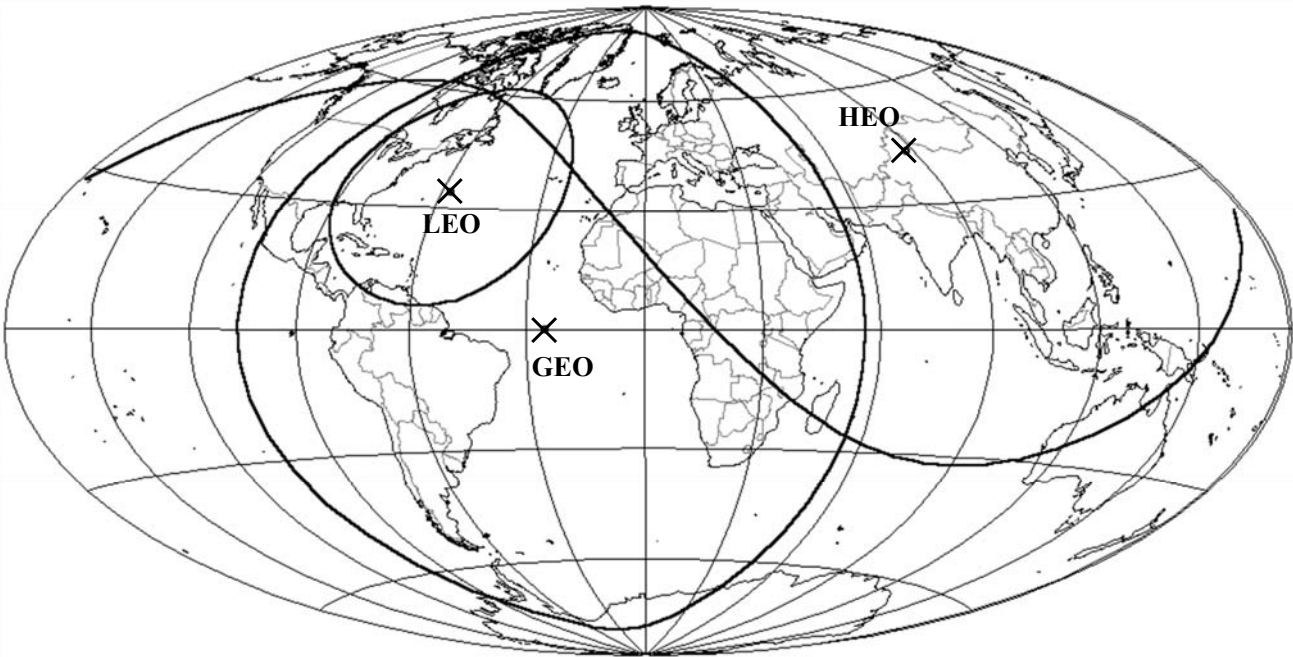
Principais órbitas de satélites

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

GEO - altitude 36 000 km
LEO - altitude 850 km
HEO - altitude 20 000 km



Cobertura terrestre de satélites com diversas órbitas

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Comparação entre os tipos de órbita mais importantes				
Características	Tipo de órbita			
	GEO	LEO (polar)	MEO	HEO (Molniya)
cobertura terrestre assegurada por cada satélite	1/2 - 1/3 da Terra pólos não cobertos	global ↑	global ↑	1/2 - 1/3 da Terra
tempo útil de passagem de cada satélite	ilimitado ↑	10 - 15 min	2 horas	8 horas ↑
necessidade de constelação para cobertura local permanente	não ↑	≥ 48 satélites (ex: 6 sat × 8 planos)	≥ 10 satélites (ex: 5 sat × 2 planos)	3 satélites
perdas em espaço livre (distância terra-satélite)	elevadas	reduzidas ↑	médias ↑	elevadas
atraso propagação (ida e retorno)	250 ms	5 - 7 ms (750 km) 10-25 ms (1 500 km) ↑	70 - 100 ms	150-300 ms
efeito Doppler (velocidade radial)	muito reduzido ↑	médio	médio	elevado
elevação do satélite no ponto de recepção	grande junto do equador ↑	variável com passagem do satélite	variável com passagem do satélite	grande em latitudes intermédias ↑
seguimento do satélite	geralmente não necessário ↑	indispensável, excepto com antenas de feixe largo	indispensável, excepto com antenas de feixe largo	necessário, mas pouco complexo ↑

Sistemas de Telecomunicações

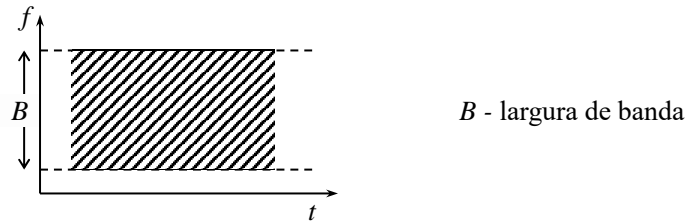
Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso simples

- uma única estação terrestre transmite através de um transpositor de um satélite
- a estação ocupa toda a banda disponível no transpositor



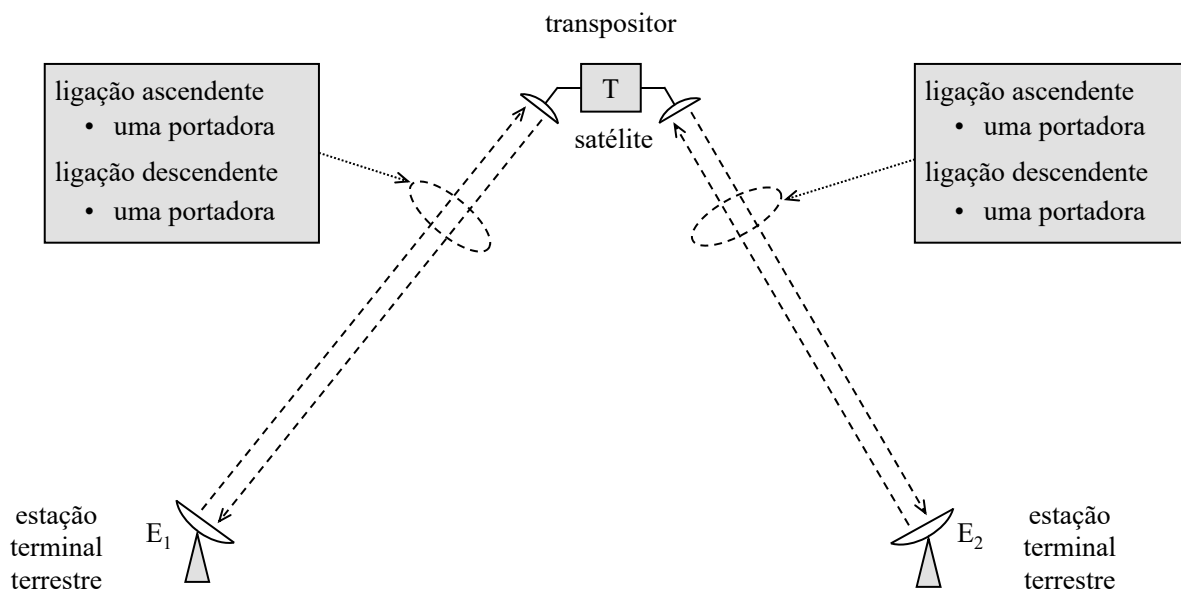
Ocupação do tempo e banda no acesso simples a recursos de um satélite

Acesso simples	Sinal transmitido	
	TDM	TV
Serviço	serviço fixo grande capacidade	contribuição programas distribuição programas
Forma de acesso	acesso fixo	acesso fixo

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso simples

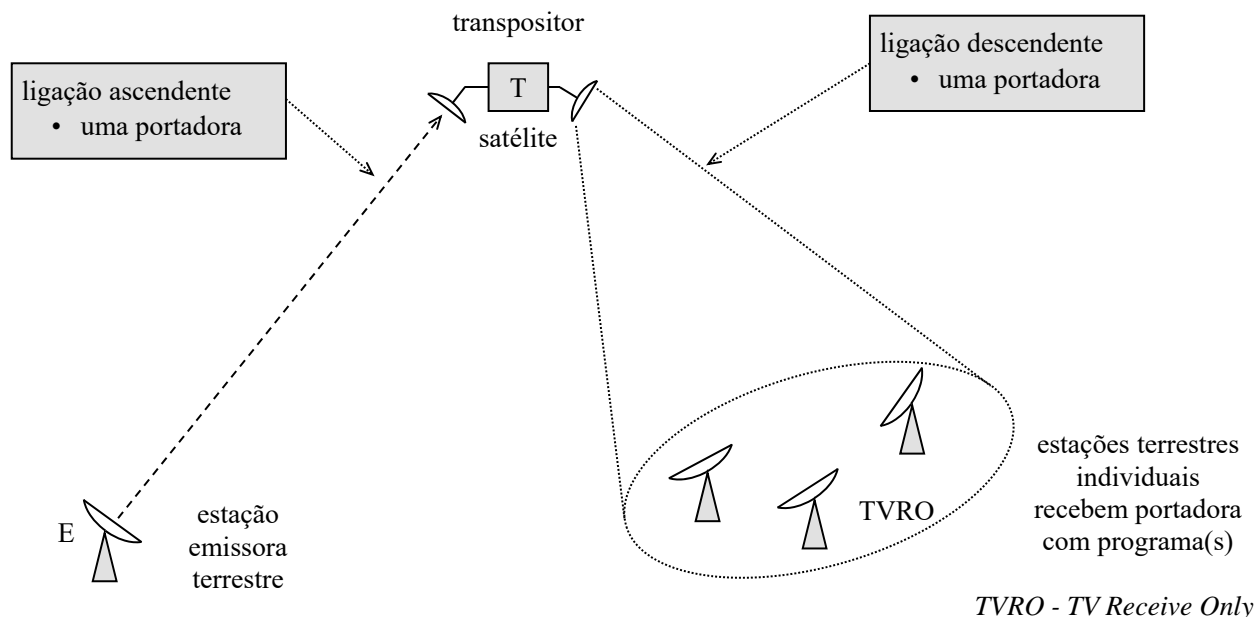


Configuração típica de uma ligação ponto-a-ponto bidireccional com acesso simples

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso simples



Configuração típica de distribuição de televisão

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

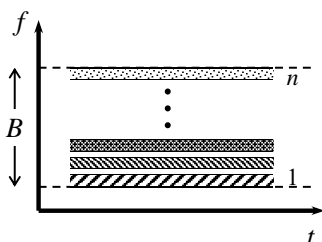
Sistemas por satélite

Acesso múltiplo

- várias estações terrestres transmitem através do mesmo transpositor de satélite

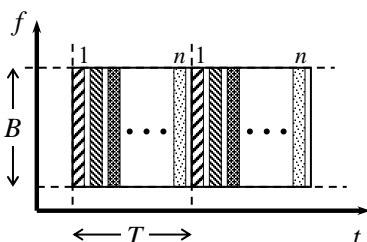
FDMA - Frequency Division Multiple Access

- estações acedem ao transpositor do satélite ao mesmo tempo
- cada estação transmite na sua própria banda de frequência



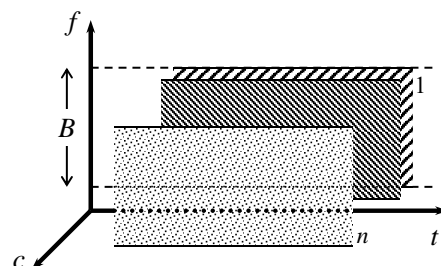
TDMA - Time Division Multiple Access

- estações transmitem uma de cada vez (sequencialmente)
- cada estação transmite no seu próprio intervalo de tempo



CDMA - Code Division Multiple Access

- estações transmitem ao mesmo tempo, em banda espalhada
- cada estação transmite com um código próprio



Acesso múltiplo a recursos de um satélite

(B - largura de banda do transpositor T - comprimento de trama)

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

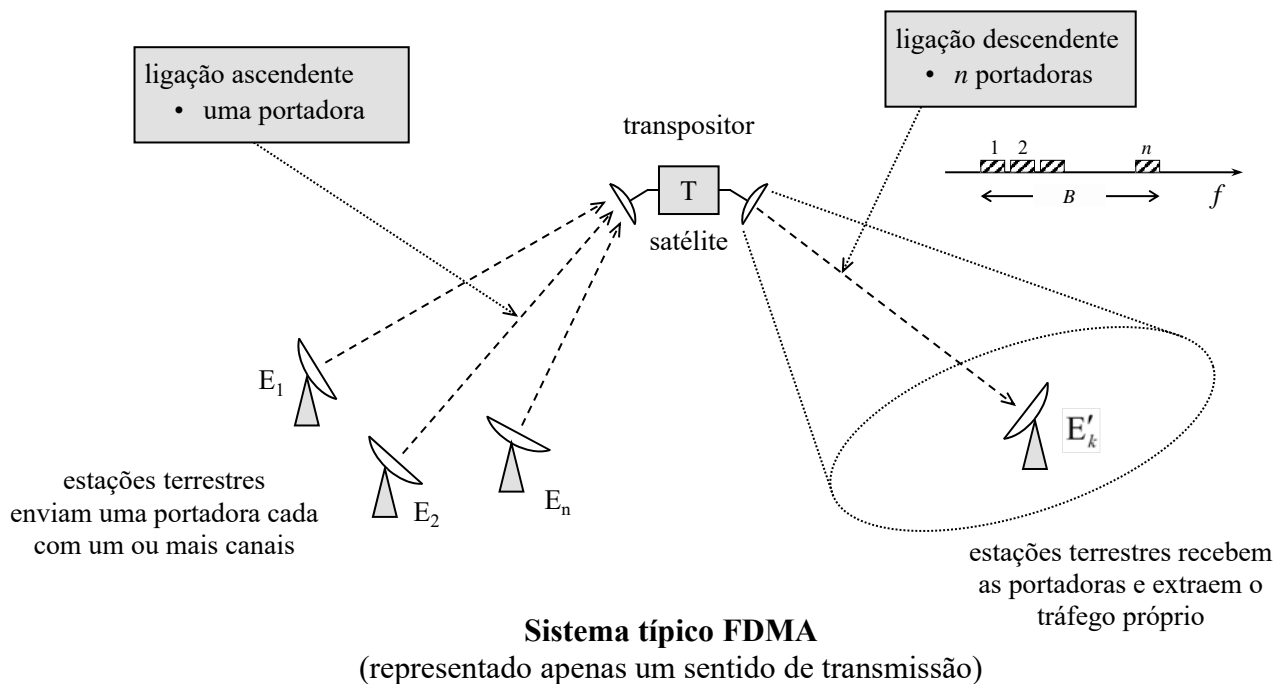
Acesso múltiplo

		Sinal transmitido			
		SCPC - <i>Single Channel per Carrier</i>		TDM	
FDMA	Serviço	SCPC / PSK / FDMA	serviço fixo pequena capacidade comunicações móveis redes empresariais (VSAT)	TDM / PSK / FDMA	serviço fixo média capacidade
	Forma de acesso		acesso fixo ou a pedido		acesso fixo
TDMA	Serviço	SCPC / PSK / TDMA	serviço fixo pequena capacidade comunicações móveis redes empresariais (VSAT)	TDM / PSK / TDMA	serviço fixo média / grande capacidade
	Forma de acesso		acesso fixo ou a pedido		acesso fixo ou a pedido
CDMA	Serviço	PSK / CDMA	serviço fixo pequena capacidade comunicações móveis redes empresariais (VSAT)		
	Forma de acesso		acesso fixo ou a pedido		

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

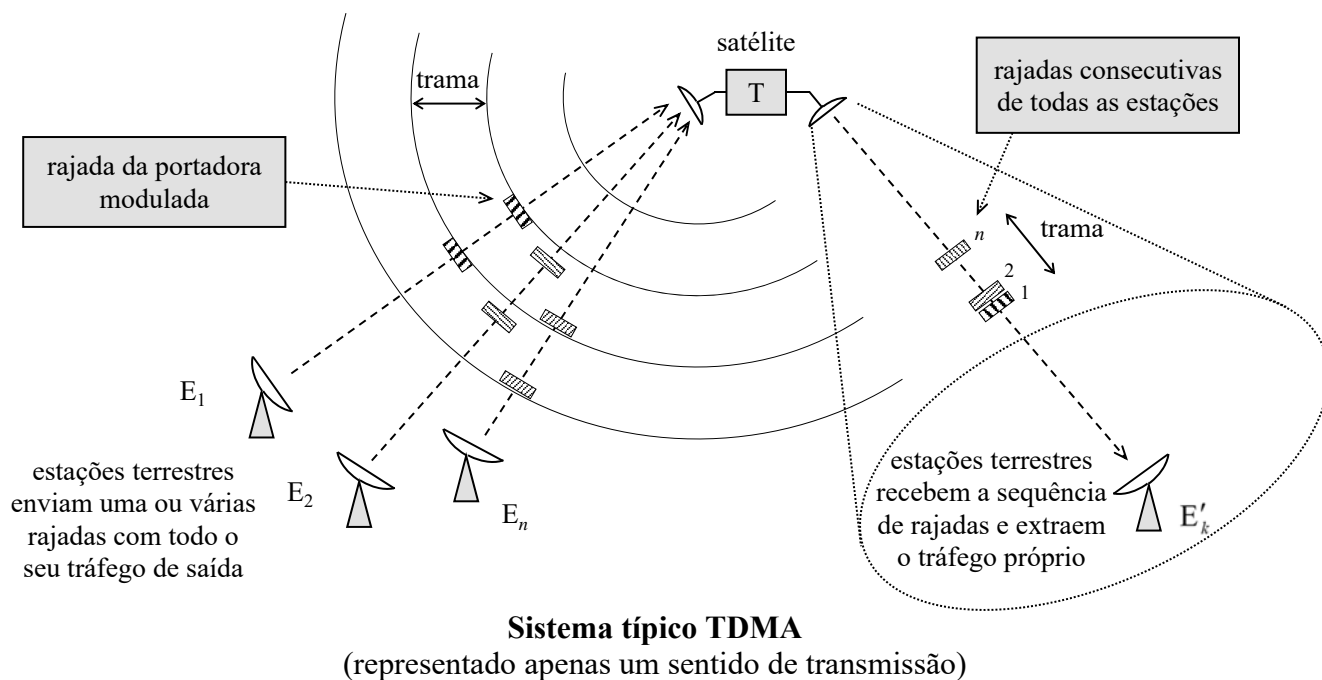
Acesso múltiplo FDMA



Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso múltiplo TDMA



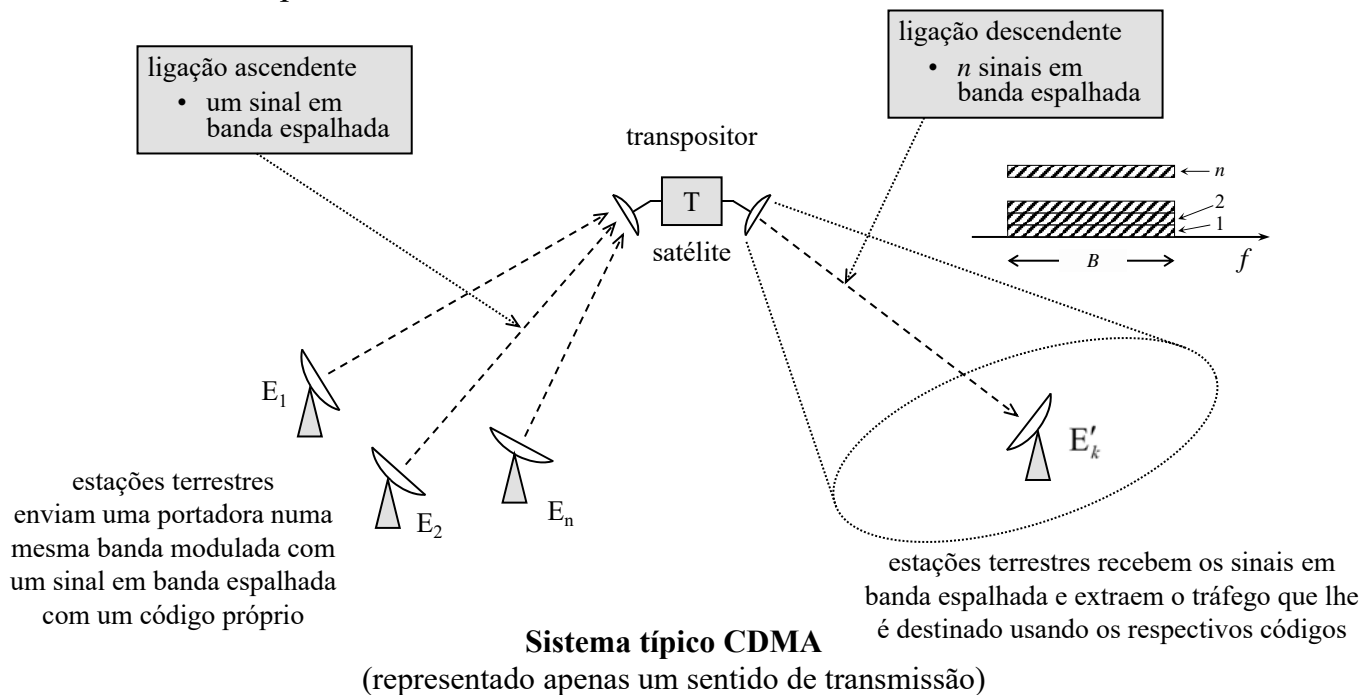
Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Sistemas de longa distância

Sistemas por satélite

Acesso múltiplo CDMA



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Princípios básicos

Elementos de rede

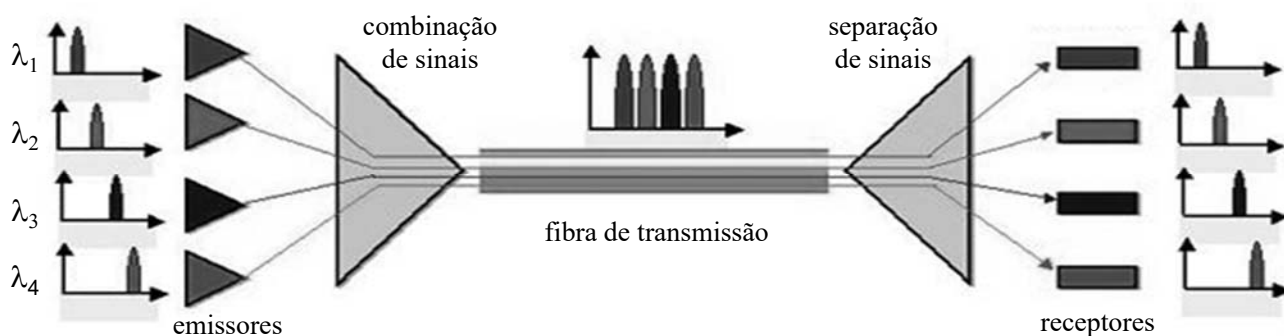
Topologias de rede

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Princípios básicos

Características gerais dos sistemas de multiplexagem de comprimento de onda

- emissores produzem luz com diferentes comprimentos de onda
- sinais ópticos são combinados e transmitidos numa fibra monomodo
- na recepção os sinais são separados (filtrados) e entregues a receptores



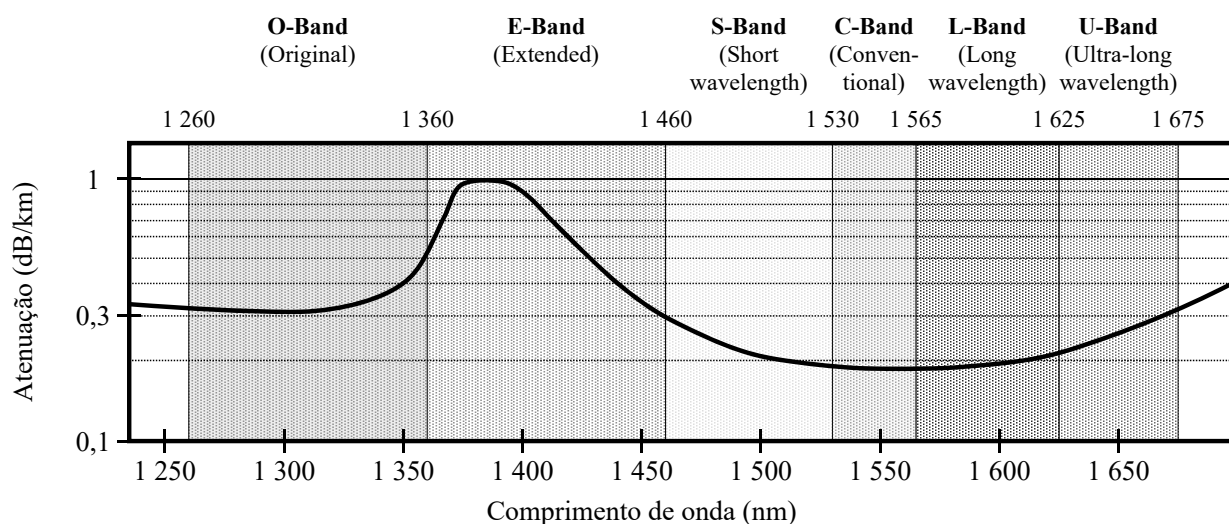
Multiplexagem de sinais ópticos na mesma fibra (exemplo com 4 comprimentos de onda)

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Princípios básicos

Bandas WDM

- UIT definiu 6 bandas contíguas que ajudam a especificar sistemas WDM
- estas bandas englobam as 2ª e 3ª janelas dos sistemas clássicos



Definição das bandas de comprimentos de onda em sistemas WDM

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Princípios básicos

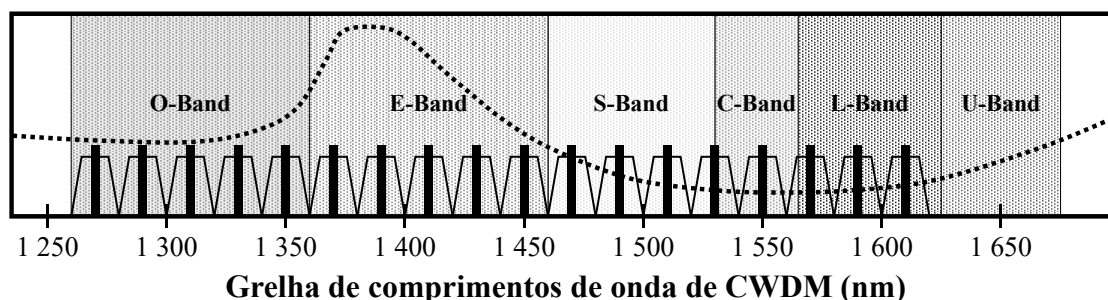
Primeiros sistemas de multiplexagem de comprimento de onda

- até cerca de 4 comprimentos de onda
- pré-normalização → dificultou oferta de lasers com comprimentos de onda standard

Multiplexagem esparsa de comprimento de onda (CWDM, Coarse WDM)

- espaçamento moderado de comprimentos de onda → 20 nm
- possível utilizar lasers sem controlo de estabilidade de comprimento de onda
- grelha de comprimentos de onda normalizada pela UIT

$$\lambda = 1270 + n \times 20 \text{ (nm)} \quad n = 0 \dots 17$$



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Princípios básicos

Multiplexagem densa de comprimento de onda (DWDM, *Dense WDM*)

- várias dezenas (futuramente centenas) de comprimentos de onda
- necessário utilizar mecanismos de controlo de estabilidade dos lasers
- grelhas de frequências normalizadas pela UIT
 - centradas a 193,1 THz (C-Band)
 - espaçamentos de 12,5 / 25 / 50 / 100 GHz e múltiplos de 100 GHz
- bandas prioritárias: S-Band, C-Band, L-Band

espaçamento de 12,5 GHz $\rightarrow f = 193,1 + n \times 0,0125$ (THz)

espaçamento de 25 GHz $\rightarrow f = 193,1 + n \times 0,025$ (THz)

espaçamento de 50 GHz $\rightarrow f = 193,1 + n \times 0,05$ (THz)

espaçamento de 100 GHz $\rightarrow f = 193,1 + n \times 0,1$ (THz)

n - inteiro positivo ou negativo, incluindo 0

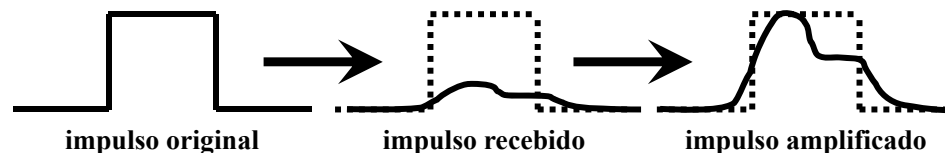
Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Elementos de rede

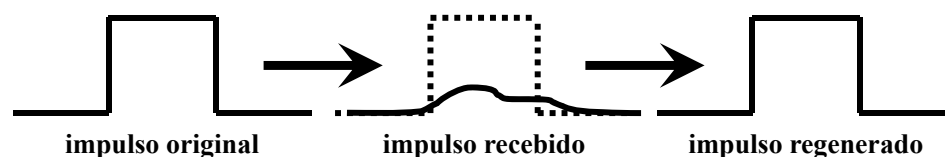
Repetidor

- puramente óptico \rightarrow já é possível regeneração 3R
- com conversão O-E-O \rightarrow mais complexo mas temporização mais precisa

Regenerador 1R
Reamplificação



Regeneração 3R
Reamplificação
Reformatação
RetempORIZAÇÃO

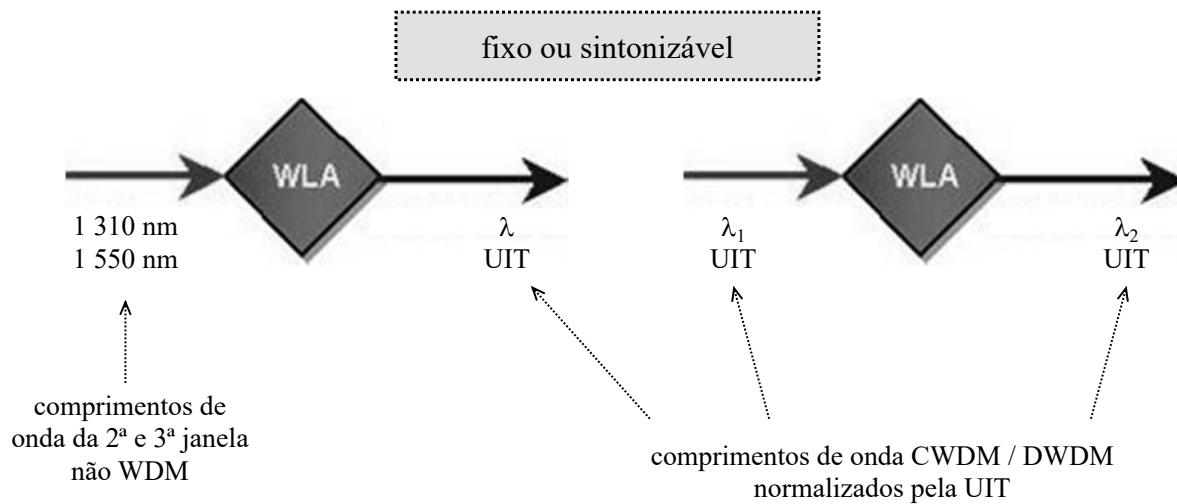


Formas de onda em repetidores ópticos e regeneradores

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Elementos de rede

Adaptador de Comprimento de Onda (WLA, *Wavelength Adaptor*)



Adaptadores de Comprimentos de Onda

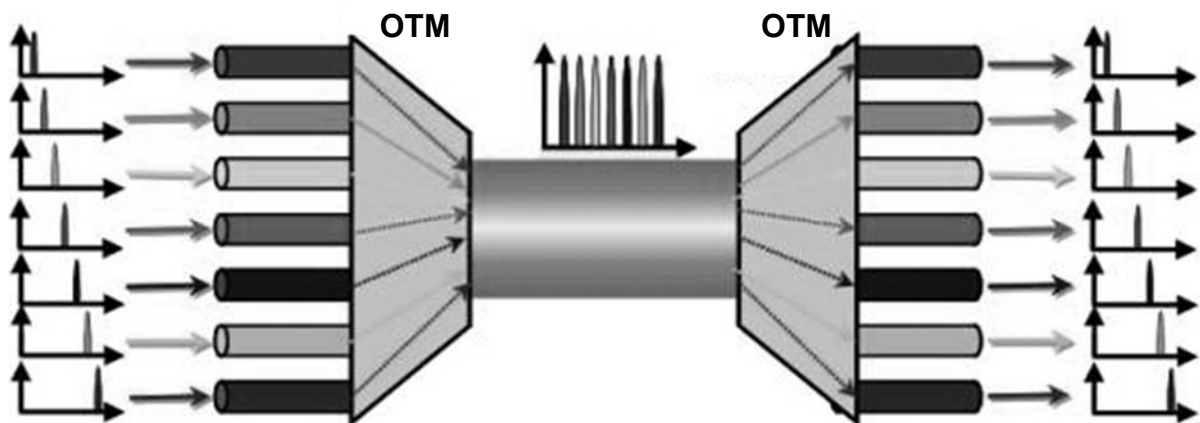
Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Elementos de rede

Multiplexador Óptico Terminal (OTM, *Optical Terminal Multiplexer*)



Multiplexador e demultiplexador WDM

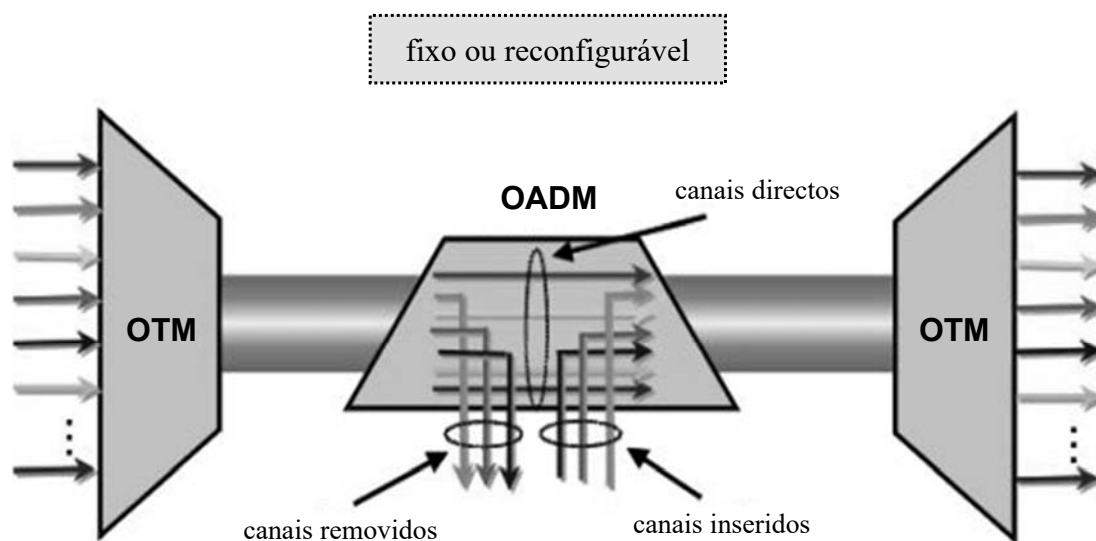
Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Elementos de rede

Multiplexador Óptico de Inserção / Remoção (OADM, *Optical Add-Drop Multiplexer*)



Multiplexador e Desmultiplexador Ópticos de Inserção / Remoção WDM

Sistemas de Telecomunicações

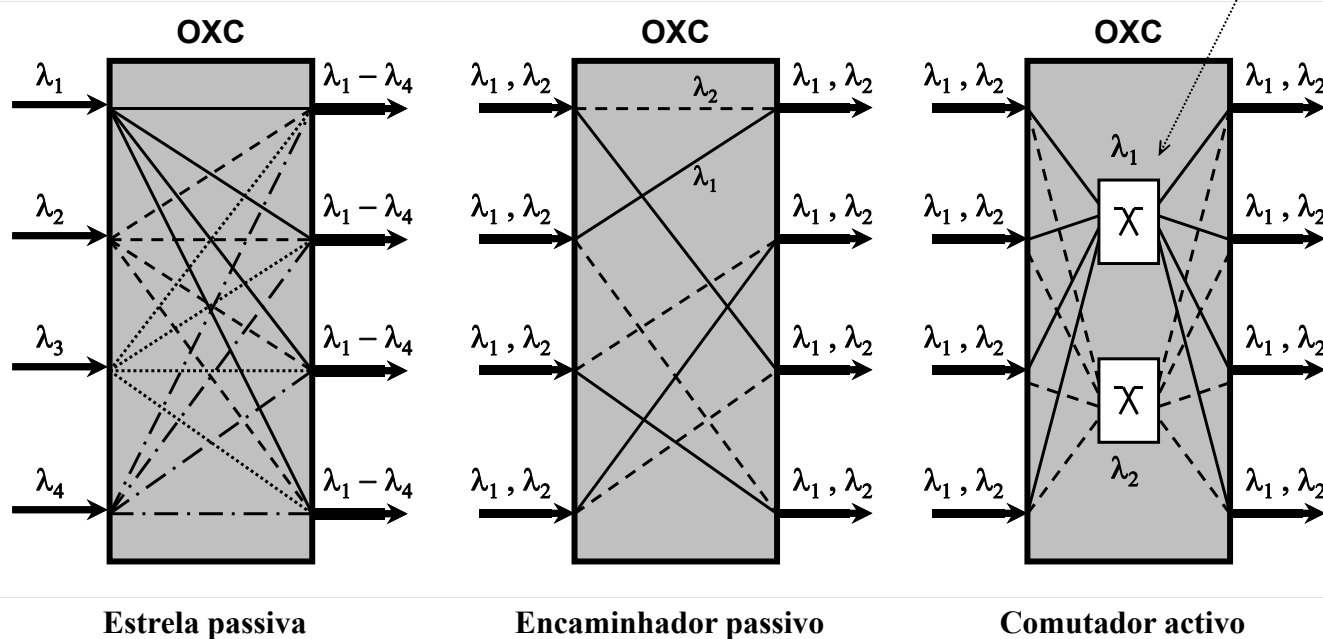
Sistemas de Transmissão

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Elementos de rede

Nós de Interligação Óptica (OXC, *Optical Cross-Connects*)

reconfigurável



Sistemas de Telecomunicações

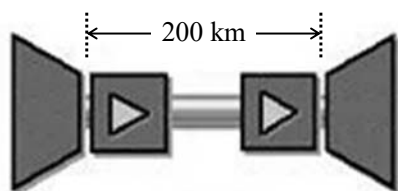
Sistemas de Transmissão

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

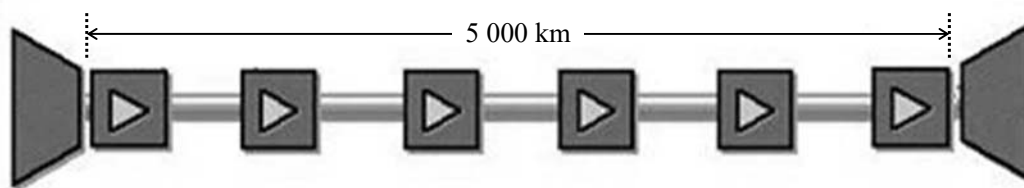
Topologias de rede

Ligação ponto-a-ponto

- saltos máximo sem amplificação limitados pela sensibilidade do receptor
- saltos máximos sem regeneração electrónica limitados pela dispersão temporal



Salto máximo
sem amplificação



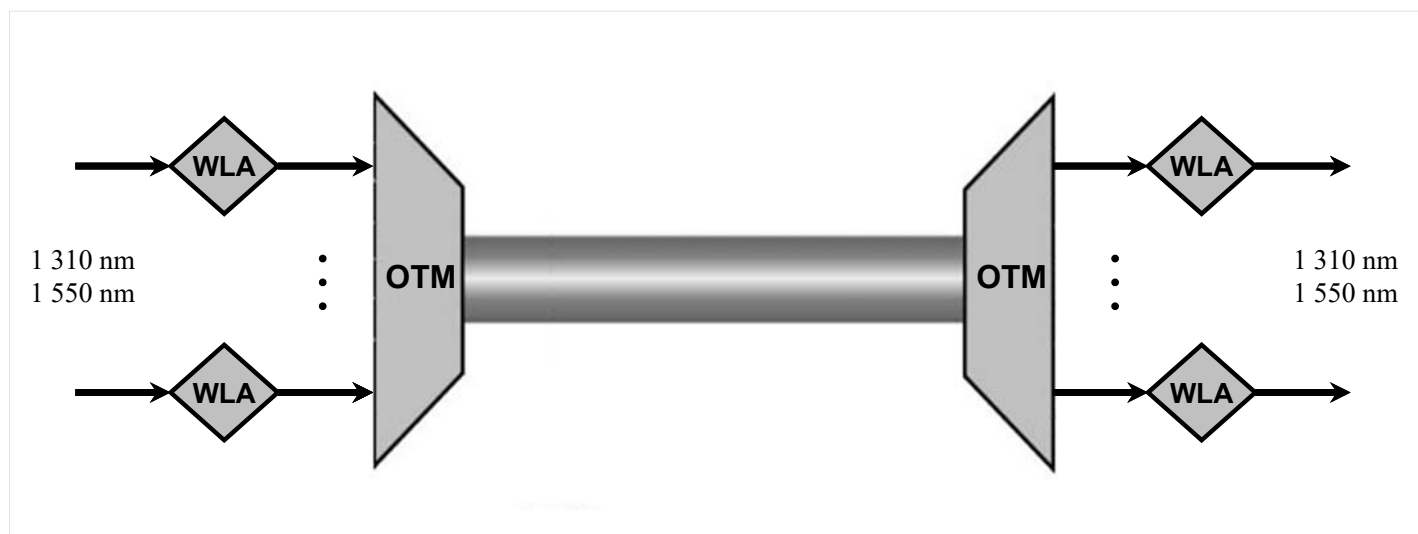
Salto máximo
com amplificação
sem regeneração
electrónica

Ligações ponto-a-ponto sem e com amplificação

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Topologias de rede

Transporte de sinais ópticos não WDM



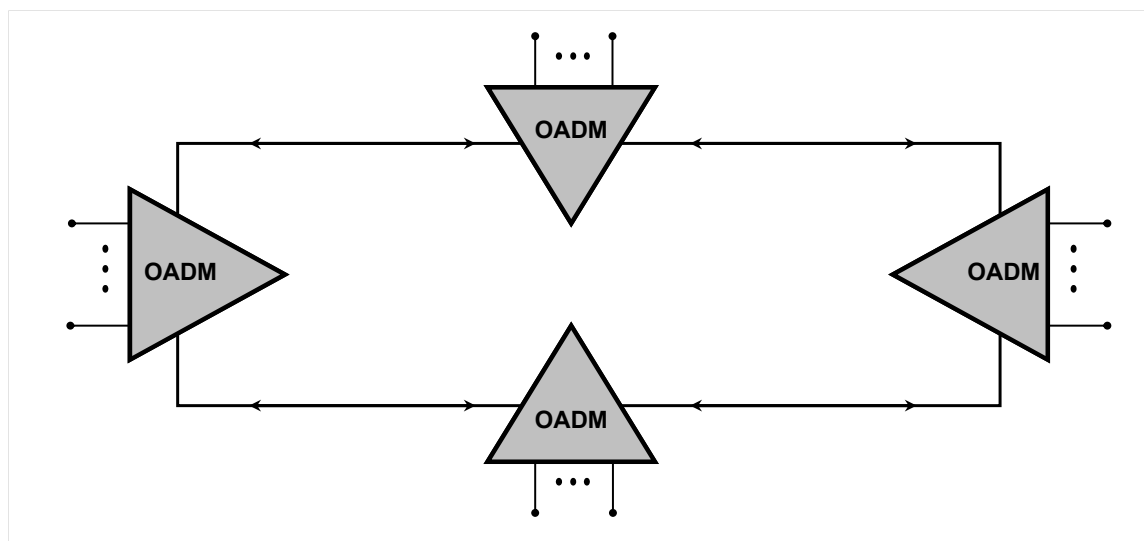
Ligações ópticas sobre WDM

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Topologias de rede

Anéis

- agregação / distribuição de tráfego de alta capacidade



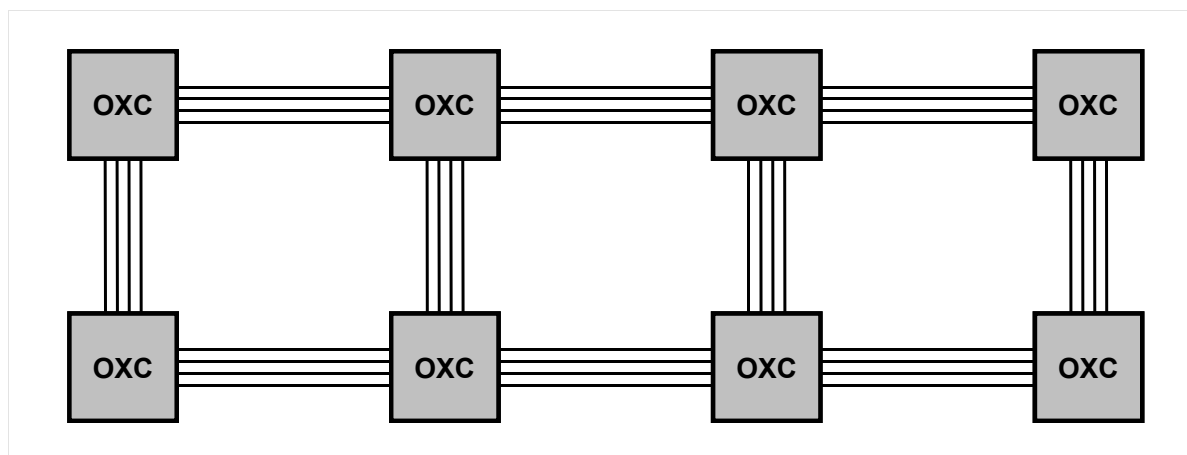
Anel WDM

Multiplexagem por divisão de comprimento de onda (WDM)

Topologias de rede

Malhas

- núcleo de muito alta capacidade da rede de transporte
- sistemas operacionais com dezenas de Tbit/s de capacidade



Malha WDM