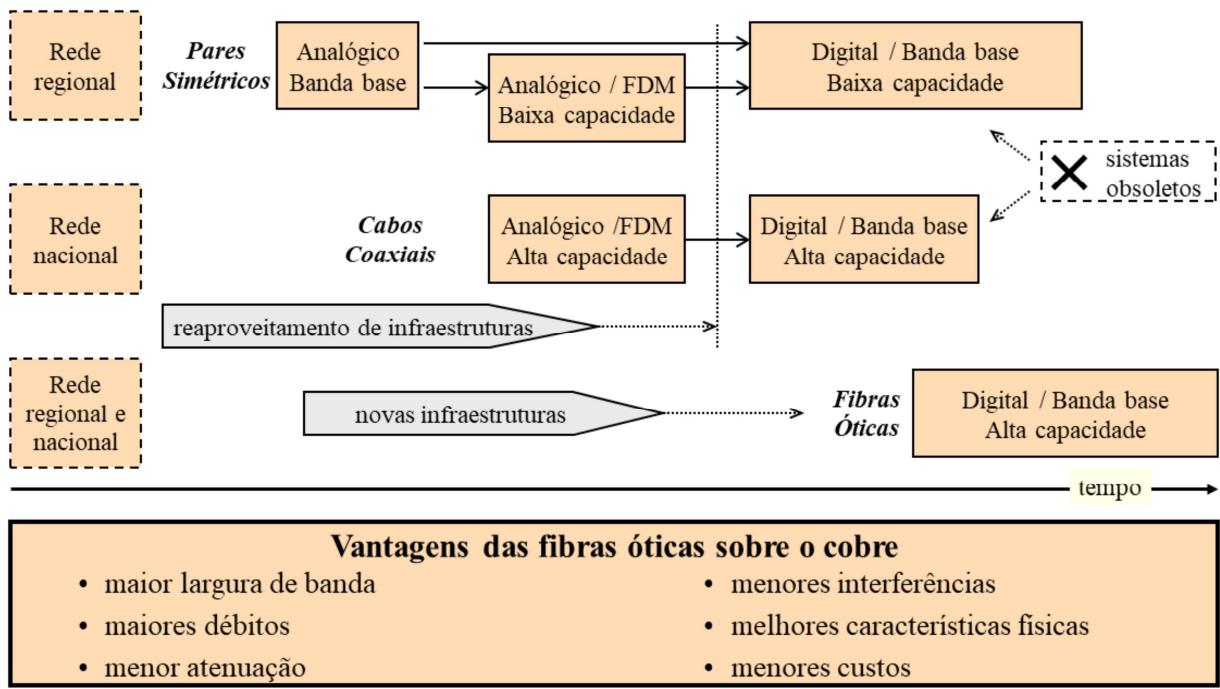

Sistemas de Transmissão

- **Sistemas de longa distância**
 - **Sistemas por fibra ótica**
 - 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 ótica



Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

A introdução de sistemas de transmissão digital sobre linhas de cobre resultou diretamente do reaproveitamento das infraestruturas criadas para a transmissão analógica, quer nos sistemas de cabo de pares simétricos torcidos (banda base ou FDM), quer nos sistemas de cabo coaxial (FDM).

Os sistemas digitais sobre cabo de fibras ótica surgiram mais tarde e vieram a impor-se relativamente aos seus equivalentes em cobre em grande parte das aplicações, pelas enormes vantagens associadas:

- dispõem de maiores larguras de banda, admitindo elevadas capacidades;
- têm possibilidade de aumentar o débito à medida das necessidades;
- têm menor atenuação, permitindo maiores distâncias entre repetidores, ou seja, para uma dada distância, requerem um menor número de repetidores;
- são imunes a interferências electromagnéticas, nomeadamente de outros canais, de sistemas de energia e de efeitos atmosféricos;
- os cabos são mais leves, mais pequenos e mais flexíveis;
- acabaram por vir a ter menores custos.

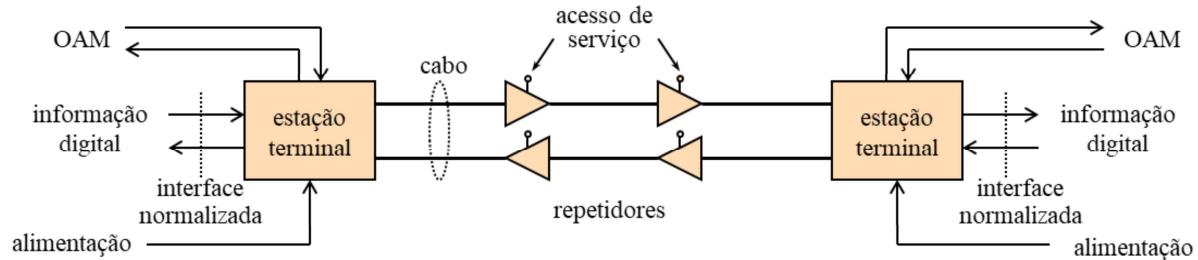
Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra ótica

Estrutura de um sistema de transmissão digital de linha

- **estações terminais**: em cada extremo da ligação
- meios de transmissão guiados
 - fibras óticas
 - 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

Uma cadeia de transmissão digital de linha é constituída pelas estações terminais, pelo cabo, e, se necessário, por repetidores intermédios.

Inicialmente, estes sistemas eram suportados exclusivamente em meios de cobre, mas, nas últimas décadas, os sistemas em cobre foram substituídos por sistemas por fibra ótica.

As estações terminais:

- efectuam a emissão / receção dos sinais de informação digital, recorrendo a um código de linha adequado (transmissão em banda base) ou a uma portadora;
- fornecem a alimentação de potência aos repetidores através do cabo;
- suportam funções de operação e manutenção (OAM), tais como telesinalização (monitorização de desempenho, alarmes e outros sinais de supervisão de estados), telemedida (de parâmetros essenciais), telecomandos e vias de serviço para comunicações com pessoal de manutenção.

O cabo:

- contém o suporte de transmissão (múltiplas fibras óticas) e revestimentos adequados;
- é introduzido em condutas enterradas ou suspenso.

Os repetidores:

- amplificam, igualizam e regeneram o sinal em certos pontos do percurso.

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra ótica

Características gerais

- sinais óticos: na **banda do infra-vermelho**  luz ON-OFF: uma forma de ASK
- meio de transmissão
 - material de suporte da transmissão: sílica
 - fibras agrupadas em cabos
- componentes optoelectrónicos
 - transmissor: conversão eléctrica-óptica (LED / Laser)
 - recetor: conversão óptica-eléctrica (díodos fotossensíveis)
- baixa atenuação
- enorme capacidade



Construção de uma fibra ótica

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

A utilização de **fibras óticas** na transmissão digital requer a utilização de um conjunto de tecnologias incorporadas num sistema de transmissão digital:

- as fibras óticas fabricadas em **sílica** e constituídas por um **núcleo** e uma **bainha** envolvidos por um **revestimento primário**, por sua vez agrupadas em cabos com protecções adequadas ao tipo de aplicação;
- no transmissor os **sinais eléctricos** são convertidos em **sinais óticos** na banda do infra-vermelho, recorrendo-se a díodos LED ou lasers;
- no recetor o sinal ótico é convertido em eléctrico em dispositivos sensíveis à luz (díodos especiais fotossensíveis).

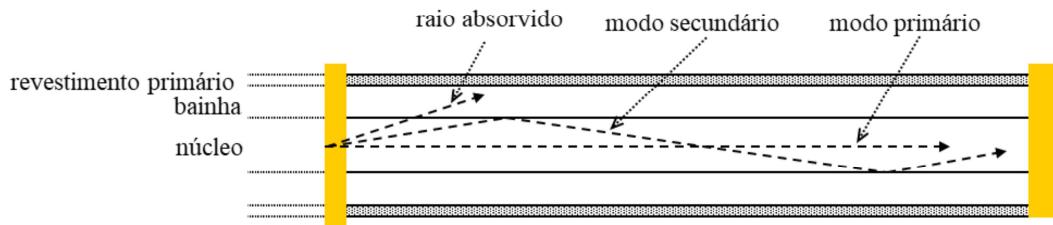
Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra ótica

Propagação nas fibras óticas

- 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 ótica
 - dispersão → espalhamento temporal dos impulsos

objetivos tecnológicos
reduzir a atenuação
reduzir a dispersão



Modos de propagação numa fibra

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

A onda ótica propaga-se ao longo do núcleo por reflexões na fronteira núcleo-bainha, com índices de refração diferentes, podendo ocorrer um ou vários modos de propagação, de acordo com as características da fibra.

A dispersão constitui o principal problema: consiste no espalhamento temporal dos impulsos resultante de diferentes velocidades de propagação das componentes que formam o sinal ótico.

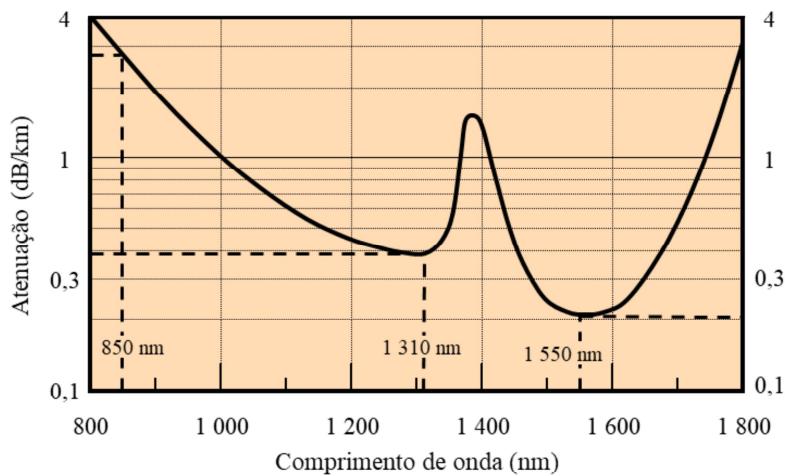
A redução da atenuação e o controlo da dispersão são os objetivos fundamentais que têm orientado o desenvolvimento de vários tipos de fibras óticas que estudaremos em seguida.

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra ótica

Atenuação

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



Atenuação em fibras ópticas em função do comprimento de onda

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

A figura mostra que a atenuação numa fibra óptica varia com o comprimento de onda de luz, numa gama entre cerca de 3 dB/km e 0,2 dB/km, para os valores utilizados em sistemas correntes de 850, 1 300 e 1 550 nm (assinalados a tracejado).

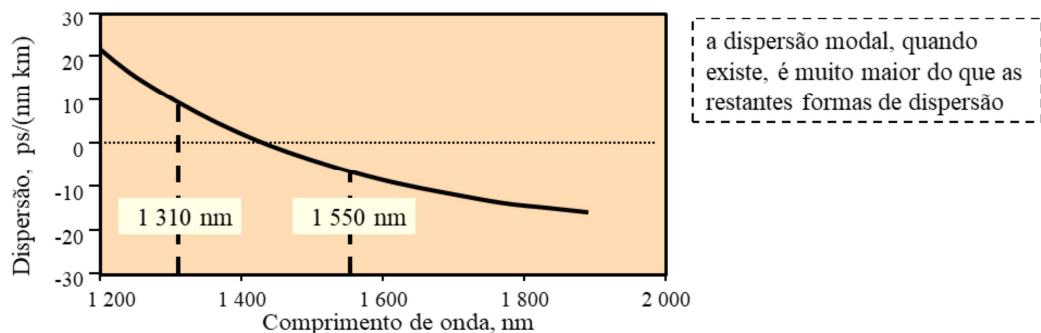
O pico de atenuação corresponde à absorção do ião OH- da água.

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra ótica

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



Dispersão cromática em fibras ópticas em função do comprimento de onda

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Uma forma de dispersão, designada de modal, ocorre quando o sinal ótico é composto por vários modos de propagação, os quais não têm a mesma velocidade de propagação, devido às diferenças de trajeto.

Outra forma de dispersão, mas muito menos acentuada do que a anterior, resulta de, em geral, a velocidade de propagação variar com o comprimento de onda. Como as fontes de luz têm um espetro que, embora estreito, não é monocromático, vai ocorrer dispersão cromática, mesmo com um único modo de propagação. Esta forma de dispersão é o equivalente fotónico da distorção de fase.

A figura mostra que a dispersão cromática tem um valor mínimo entre 1 400 e 1 500 nm.

No entanto, para evitar o pico local de atenuação a 1 400 nm, os comprimentos de onda de 1 300 nm e 1 550 nm acabaram por ser escolhidos para sistemas de alto débito, com um pequeno aumento da dispersão cromática, embora existam atualmente técnicas de construção de fibras ópticas que permitem deslocar o mínimo de dispersão para a 3^a janela (1550 nm).

A terceira forma de dispersão é designada de modo de polarização (PMD - Polarization Mode Dispersion), devida ao facto de as componentes ortogonais da polarização da onda não se propagarem à mesma velocidade. Esta situação resulta, por sua vez, do facto de o núcleo da fibra não ter simetria perfeitamente circular, quer em termos de geometria, quer em termos de constituição do próprio material.

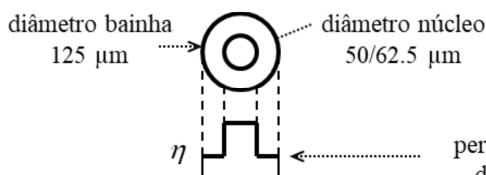
Finalmente, destaca-se o facto de que a dispersão aumenta proporcionalmente com o comprimento da ligação e com o débito de transmissão. Como o efeito da dispersão depende da relação entre o período de bit e a diferença de atrasos das componentes ópticas do sinal. Por exemplo, duplicando o comprimento, a diferença de atrasos entre as diversas componentes duplica igualmente; duplicando a frequência, o período de bit reduz-se a metade, e o efeito é o mesmo que a duplicação de frequência.

Sistemas de longa distância

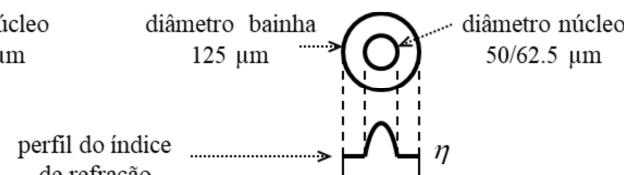
Sistemas em fibra ótica

Sistemas em fibras multimodo

Características		
diâmetros típicos	núcleo – 50/62.5 μm bainha – 125 μm	
comprimento de onda	850 nm (1 ^a janela) 1 310 nm (2 ^a 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

Foi introduzida uma primeira geração de sistemas baseados em fibras multimodo com atenuações relativamente elevadas, que entretanto vieram a baixar para valores da ordem de 1 a 3 dB/km.

A dispersão modal existe em todas as fibras multimodo, ocorrendo sobretudo nas fibras com índice de refração do núcleo constante (designadas *step index*, isto é, há um salto do índice de refração do núcleo para a bainha).

Consegue-se muito menor dispersão nas fibras com índice de refração progressivo (*graded index*) uma vez que a velocidade de propagação é maior quando o índice de refração é menor, compensando-se assim as diferentes velocidades dos vários modos de propagação. A desvantagem deste tipo de fibra é a dificuldade de construção e, portanto, o custo.

Os LEDs utilizados neste tipo de sistemas são relativamente simples, baratos e fiáveis, mas produzem uma fonte de luz pouco direccional e de potência limitada. Posteriormente, vieram a ser introduzidos lasers de baixo custo adaptados a este tipo de fibra.

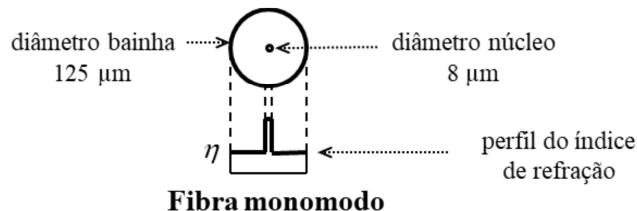
Os sistemas baseados em fibras óticas multimodo continuam a ser usados, mas apenas em redes privadas de curto alcance, e não mais na rede de transmissão, devido à elevada dispersão.

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra ótica

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 conexão e terminação precisa	recepção – diodos PIN / foto-díodos de avalanche (APD)
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

A partir do início da década de 80 começa a desenvolver-se uma 2ª geração de sistemas, baseados em fibras monomodo, com um comprimento de onda de 1 300 nm e baixa dispersão, apenas cromática - há apenas um modo de propagação no núcleo, por ter muito menores dimensões.

Mais tarde, na década de 90, surge a 3ª geração a 1 550 nm, explorando atenuações ainda mais baixas.

Podem ser usados LEDs nos sistemas de menor capacidade/alcance; nos sistemas de maior desempenho é necessário utilizar lasers, mais complexos e menos fiáveis, mas permitindo sinais espetralmente puros, maiores potências e maiores larguras de banda.

Na receção usam-se diodos PIN ou foto-díodos de avalanche (APD), estes conduzindo a maiores sensibilidades por terem ganho interno e menor ruído, mas requerendo electrónica associada mais complexa.

Os sistemas em fibra monomodo podem ser limitados pela potência se o factor dominante para a probabilidade de erro for a relação sinal-ruído no receptor. Pelo contrário, serão limitados pela dispersão se a principal causa de erro for o espalhamento temporal de impulsos de curta duração (débitos elevados), que dificulta a regeneração.

As fibras monomodo são mais fáceis de fabricar e portanto mais baratas do que as multimodo (sobretudo *graded index*). Por isso e pelas garantias de salvaguarda de evolução, têm vindo a ser adoptadas em exclusivo pelos operadores de redes.

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra ótica

Áreas de evolução tecnológica

- novos tipos de fibra com atenuação e dispersão reduzidas
- lasers de elevada pureza espectral
- detecção coerente e igualização electrónica
- amplificação ótica 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 recetor

fibras monomodo standard – 2^a 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 – 3^a janela 100 Gbit/s \times km
 fibras monomodo de baixa dispersão > 1 Tbit/s \times km

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Como vimos, nos sistemas baseados em fibra ótica a potência e a dispersão modal e cromática limitam a distância e débito a que a informação pode ser transmitida (sem repetidores).

Em termos de potência, estas limitações são determinadas por:

- potência emitida de sinal ótico;
- atenuação na fibra;
- sensibilidade do recetor.

O efeito da dispersão numa dada fibra depende diretamente da distância e do débito binário. O limite operacional criado pela dispersão pode exprimir-se através do produto débito \times distância:

- as fibras multimodo são fortemente limitadas pela dispersão modal elevada pelo que os produtos débito \times distância são relativamente baixos 10 Mbit/s \times km nas fibras *step index* e 2 Gbit/s \times km nas fibras *graded index*.
- as fibras monomodo têm dispersão baixa (cromática), pelo que são possíveis produtos débito \times distância elevados, até valores da ordem de 250 Gbit/s \times km.

Em termos práticos, para sistemas em fibra ótica monomodo abaixo de cerca de 0,5 Gbit/s, a distância entre repetidores é limitada pela atenuação e não pela dispersão.

Em termos de tendências de desenvolvimento tecnológico, continuamos a percorrer um longo caminho, tendo em conta a largura de banda teórica de 50 THz disponível numa fibra ótica. Algumas áreas que têm vindo a ser consideradas em desenvolvimentos mais recentes incluem:

- novos tipos de fibra: novos materiais conducentes a menores atenuações e dispersão reduzida;
- lasers de elevada pureza espectral: reduz-se a dispersão cromática;
- detecção coerente: melhora significativamente a sensibilidade de recetor;
- amplificação ótica: evita a conversão do sinal ótico para eléctrico nos repetidores;
- multiplexagem de comprimento de onda: permite a utilização de portadoras de luz independentes, com espaçamentos da ordem de 1 nm (FDM ótico).

Sistemas de longa distância

Sistemas em fibra ótica

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



sistemas obsoletos

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

Sistemas de Telecomunicações

Sistemas de Transmissão

Nos sistemas em fibra ótica, utilizam-se códigos de uma polaridade adaptados a dois estados de luz (*on-off*).

As primeiras aplicações na rede de transporte usaram fibras multimodo. sendo actualmente usadas apenas fibras monomodo. Contudo, as fibras multimodo *graded index* continuam a ter aplicações importantes em redes locais, suportando até 10 Gbit/s em distâncias de 300m.

Os sistemas SDH foram instalados em grande escala até 2005. Mais recentemente, a maioria dos operadores tem optado pela instalação de novos sistemas baseados inteiramente na adoção do protocolo Ethernet sobre a camada física de transporte, usando diversas tecnologias, como por exemplo, *Generic Framing Procedure*, abordada numa das aulas anteriores.

Referências

The Fiber Optic Association, <https://www.thefoa.org> [Accessed: 12th March 2021]

Sistemas de Telecomunicações