

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Departamento de Engenharia Electrotécnica e de Computadores

Rua dos Bragas, 4099 Porto Codex, PORTUGAL
Telef. 351-2-317105/107/412/457 · Telex 27323 FEUP P · Telefax 351-2-319280

Parecer
Estágio Prodep de
Pedro José da Cruz Leonardo

O Pedro Leonardo realizou um Trabalho intitulado "Sistemas de Transmissão Baseados em Fibras Ópticas" com dedicação e profundidade, tendo aliás o trabalho realizado coberto algum trabalho experimental na realização de emissores e receptores ópticos que, por manifesta falta de tempo, não incluiu no relatório.

Sou, por isso, do parecer que é merecedor de que o seu estágio seja avaliado favoravelmente.

Porto e FEUP, 26 de Julho de 1993

Artur Pimenta Alves
Prof. Associado



**Parecer
Estágio Prodep de
Pedro José da Cruz Leonardo**

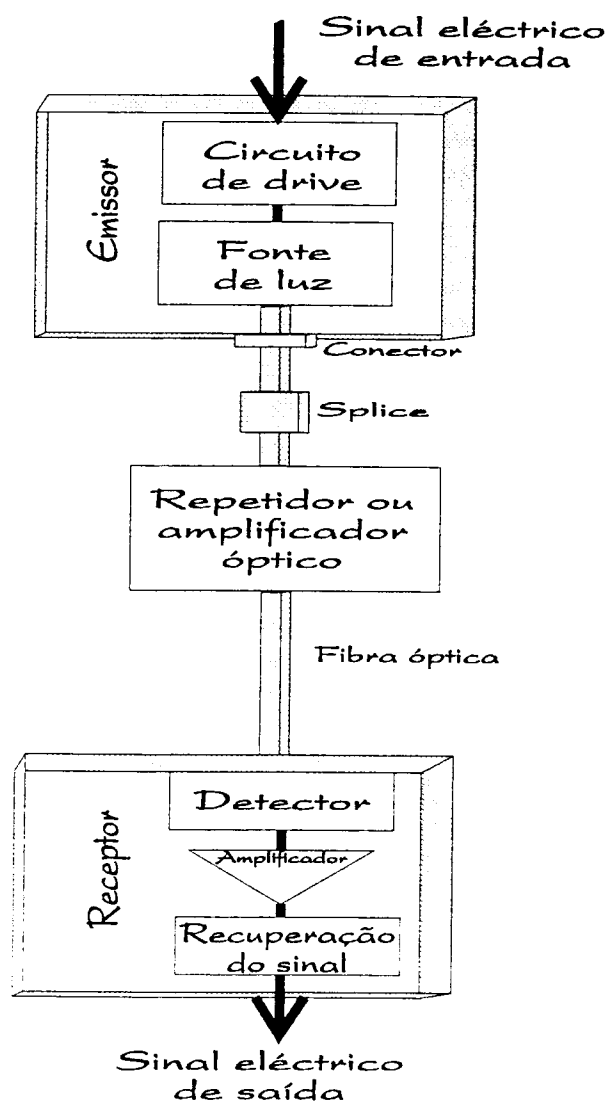
O Pedro Leonardo realizou um trabalho intitulado "Sistemas de Transmissão Baseados em Fibras Ópticas", o qual revela profundidade e dedicação. De referir que o relatório não inclui, por manifesta falta de tempo, resultados de algum trabalho experimental desenvolvido na realização de transmissores e receptores ópticos.

Sou, por isso, de parecer que é merecedor de que o seu estágio seja avaliado favoravelmente.

Porto e INESC, 27 de Julho de 1993

**Abel Jorge Antunes da Costa
Investigador INESC**

SISTEMA DE TRANSMISSÃO BASEADO EM FIBRAS ÓPTICAS



Ao abrigo dos estágios do PRODEP

Realizado por: PEDRO JOSÉ DA CRUZ LEONARDO

and the following is a list of the most important results obtained in the study of the problem of the existence of solutions of the system of equations (1) for the case of a linear system of equations.

It is well known that the system of equations (1) has a unique solution if and only if the determinant of the matrix of coefficients is non-zero.

THEOREM 1. Let the matrix of coefficients of the system of equations (1) be non-singular. Then the system has a unique solution.

Universidade do Porto
Faculdade de Engenharia
Biblioteca 4
Nº
CDU 621.3(077.3)/LEEC 1992/LEOP
Data 10/10/2009

ÍNDICE

1 INTRODUÇÃO	
1.1 As fibras ópticas como componentes de um sistema de transmissão	1
2 CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS	4
2.1 Tipos de materiais usados nas fibras ópticas	5
2.2 Degradação do sinal na fibra óptica	6
2.3 Janelas de transmissão	7
3 TRANSMISSORES	8
3.1 Díodo emissor de luz (LED)	9
3.1.1 Circuito de <i>drive</i> para transmissões digitais	13
3.1.2 Circuito de <i>drive</i> para transmissões analógicas	16
3.2 Diodos laser	16
3.2.1 Circuito de <i>drive</i>	19
3.3 Características do circuito de transmissão óptica	21
3.3.1 Potência	21
3.3.2 Linearidade	23
3.3.3 Comportamento térmico	24
3.3.4 Tempo de resposta	24
3.3.5 Largura espectral	25
3.3.6 Característica de não extinção total com um 0	25
4 RECEPTORES	27
4.1 Detector	28
4.1.2 Tipos de detectores	29
4.1.2 Características de absorção	29
4.1.3 Ganho	30
4.2 Pré-amplificador	32
4.3 Controlo automático de ganho	34
4.4 Equalização	35
4.5 Circuito completo	36
4.6 Recuperação de sincronismo	37
5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJECTO DUM SISTEMA ÓPTICO	38
5.1 Técnicas para fazer um melhor aproveitamento dum sistema de transmissão	38
5.1.1 Multiplexagem	38
5.1.2 Repetidores	39
5.1.3 Amplificadores ópticos	41
6 BLOCOS DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS	49

1 INTRODUÇÃO

Desde sempre, um dos principais interesses dos seres humanos tem sido o de construir sistemas de comunicação que permitam transmitir mensagens entre pontos distantes. Os elementos fundamentais de um sistema de comunicação são os que se pode ver na figura seguinte.



Figura 1.1 Elementos fundamentais de um canal de transmissão.

A mensagem é gerada no primeiro elemento do sistema, o qual a entrega ao transmissor. O transmissor tem como finalidade transformar a mensagem num sinal que seja compatível com as características de transferência do canal. O canal é o meio usado para levar a mensagem do transmissor ao receptor. Assume várias formas de acordo com a distância, tipo de mensagem e do tipo de tecnologia usada. Pode ser uma linha de transmissão guiada como uma guia de onda, ou pode ser um canal atmosférico ou espacial não guiado. O sinal irá ser atenuado e distorcido à medida que atravessa o canal. Por exemplo, um sinal eléctrico perde potência por dissipação de calor e sofre interferências eléctricas e magnéticas do exterior, e um sinal óptico sofre de dispersão e absorção na propagação na atmosfera. A função do receptor é retirar o sinal do canal, amplificá-lo (se necessário) e restaurar a mensagem que foi transmitida antes da entregar ao destino.

1.1 As fibras ópticas como componentes de um sistema de transmissão

Muitas formas de sistemas de comunicação apareceram ao longo dos anos. As principais motivações por detrás de cada inovação foram a melhoria da fidelidade, o aumento da taxa de transmissão, e a capacidade de se atingirem maiores distâncias. A partir de 1960, a possibilidade de se obterem sistemas de comunicação na zona das frequências ópticas tornou-se uma realidade com o advento do laser, que tornou disponível uma fonte óptica coerente. Uma vez que as frequências ópticas são da ordem de $5 \cdot 10^{14}$ Hz, o laser tem uma capacidade de informação teórica muito superior a qualquer outro sistema de telecomunicações.

A utilização da atmosfera como canal óptico de transmissão tem grandes limitações devido à chuva, nevoeiro, neve e poeiras, o que torna a sua instalação pouco atractiva. O aparecimento das fibras ópticas veio resolver o problema. Inicialmente com elevadas perdas (1000 dB/Km), que pareciam afastar a possibilidade de as tornar utilizáveis, mas posteriormente, com as investigações de Kao e Hockman e Werts a demonstrarem que as elevadas perdas eram devidas às impurezas no material que constituía a fibra, a sua utilização tornou-se viável. A partir de 1970, apareceram fibras com atenuações da ordem dos 20 dB/Km, o que era comparável às perdas dos sistemas baseados em condutores de cobre. Deste modo, a tecnologia das comunicações ópticas tornou-se uma realidade. Actualmente, existem fibras com atenuações de 0.16 dB/Km, valor próximo do limite teórico de 0.14 dB/Km, trabalhando com comprimentos de onda de 1550 nm.

As vantagens dos sistemas baseados em fibras ópticas relativamente aos baseados em sistemas tradicionais de cobre são diversas:

- Imunidade a interferências; o sinal óptico não é afectado por interferências electromagnéticas de qualquer tipo.
- Pequenas perdas de transmissão e grande largura de banda; a capacidade das fibras ópticas é muito superior à dos cabos de cobre, o que permite transmitir mais dados e a maiores distâncias sem o uso de repetidores. A redução de equipamentos reduz o custo do sistema e a sua complexidade.
- Abundância de matérias primas; o principal componente da fibra é a sílica, que é barato e abundante uma vez que é um dos elementos da areia. Os custos das fibras ópticas são devidos essencialmente ao processo de fabrico requerido para se obterem vidros muito puros.
- Pequeno tamanho e peso; estes aspectos oferecem uma enorme vantagem das fibras relativamente aos cabos de cobre, especialmente em cidades em que o espaço disponível para instalar linhas de telecomunicações é escasso. Em aviões, satélites, navios e aplicações militares, estas são vantagens de peso das fibras ópticas.
- Isolamento eléctrico; uma vez que as fibras ópticas são de vidro, que é um isolador eléctrico, quase não existe *cross-talk* entre as fibras e os problemas de interface com equipamentos são simplificados. Este também é um aspecto favorável quando se trabalha em ambientes onde o arco eléctrico é capaz de provocar uma catástrofe.

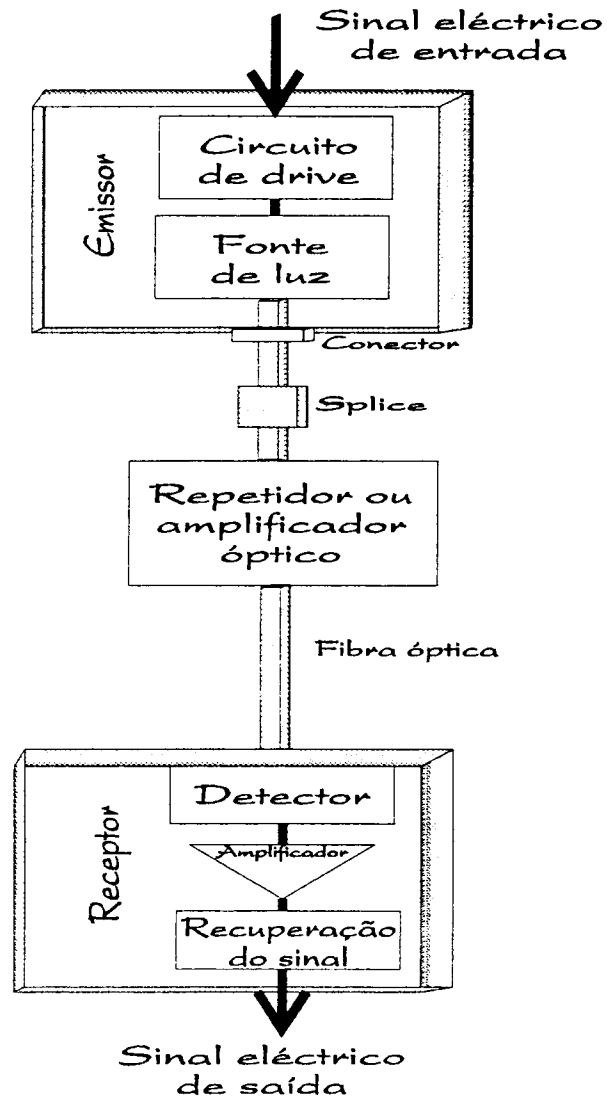


Figura 1.2 Blocos de um sistema óptico de transmissão

A figura anterior mostra os componentes básicos de um sistema de transmissão.

2 CARACTERÍSTICAS DAS FIBRAS

Uma fibra óptica não é mais do que um dielétrico que opera em frequências na zona das frequências ópticas. A forma da fibra é normalmente cilíndrica. O objectivo é manter a energia electromagnética sob a forma de luz dentro da sua superfície. As propriedades de transmissão de uma guia de onda óptica são condicionadas pelas suas características estruturais, que são determinantes para a degradação do sinal óptico ao longo da fibra.

A configuração de uma fibra óptica é a que se pode observar na figura 2.1.

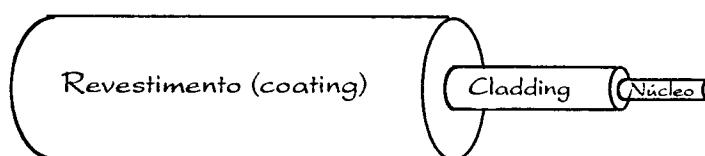


Figura 2.1 Constituintes duma fibra óptica

Uma fibra é composta por três componentes, formados a partir de elementos com características diferentes. O núcleo é o cilindro central e é dentro dele que se irá efectuar a transmissão da luz. Por esse motivo é o componente mais crítico da fibra. Em volta do núcleo encontra-se o *cladding*. A sua função mais importante é evitar que a luz saia do núcleo, o que se traduziria por uma perda de potência. Serve também para fortalecer mecanicamente a fibra, para proteger o núcleo de poeiras ou outro tipo de contaminantes que possam estar em contacto com a fibra, e diminuiu as perdas de espalhamento provocadas por descontinuidades no núcleo da fibra. Finalmente, o terceiro componente da fibra é um elemento que não necessita de ter características muito especiais, uma vez que o seu objectivo é fornecer uma resistência mecânica superior e isola a fibra de irregularidades ou distorções da superfície adjacente. As perturbações na superfície da fibra poderiam provocar grandes perdas e podem ser devidas a micro-rupturas no momento da incorporação das fibras em cabos.

Existem basicamente três tipos de fibras. Distinguem-se essencialmente pelas características do núcleo. Uma fibra com o núcleo de dimensão reduzida comparada com o comprimento de onda do sinal óptico que vai ser transmitido através da fibra, será uma fibra monomodo. O diâmetro do núcleo mais habitual está compreendido entre 8 e 12 μ m. Este valor de diâmetro corresponde a um comprimento de onda do sinal óptico 8 a 10

vezes menor, caso contrário teríamos mais do que um modo em propagação. Um modo corresponde uma onda electromagnética.

A luz é composta pela soma de ondas electromagnéticas de comprimentos de onda variável. A vantagem de ter um dialéctico onde apenas se propaga um modo é a eliminação da dispersão intermodal existente nas fibras multimodo. Esta dispersão é devida aos atrasos variáveis que cada modo sofre durante a propagação na fibra, o que se traduz por um alargamento dos impulsos à medida que nos afastamos do ponto de transmissão. Este é um dos aspectos que contribui para limitar o desempenho da fibra em termos da relação (largura de banda)×(distância).

Nos restantes dois tipos de fibras permitem a propagação é de múltiplos modos. O núcleo varia entre 50 e 200µm para as fibras *step-index* e 50 a 100µm para a fibras *graded index*. Para além da diferença do número de modos em propagação, estas fibras têm um núcleo de diâmetro bastante superior ao das fibras monomodo. Este facto trás vantagens em termos de acoplamento da luz à fibra. Uma vez que o núcleo não tem que ser de diâmetro muito reduzido, a fabricação destas fibras é simplificado, o que torna o seu preço inferior. No entanto, as fibras *graded index* são construídas com cuidados muito particulares. O índice de refração varia de modo gradual ao longo do núcleo para evitar a dispersão intermodal. A variação do índice vai obrigar a que a velocidade de propagação da luz aumente à medida que nos afastamos do centro do núcleo. Deste modo, todos os raios de luz chegarão no mesmo instante a qualquer ponto da fibra. A largura de banda de um sistema que use fibras *graded index* é bastante superior à das fibras multimodo do tipo *step index*. As fibras monomodo têm ainda uma largura de banda superior. O preço das fibras *graded index* é semelhante ao das fibras monomodo.

Outro aspecto importante é o tipo de fonte a utilizar como emissor. Para as fibras monomodo é necessário ter uma fonte coerente (laser) porque leds produzem muitos de modos. Por outro lado, é difícil fazer o acoplamento de um led a uma fibra monomodo devido às suas dimensões relativas. As fibras multimodo têm a vantagem de permitir o uso leds para a transmissão, o que reduz significativamente os custos do transmissor.

2.1 Tipo de material usado em fibras ópticas

Na escolha do tipo de material deve ter em atenção que deve ser possível construir fibras flexíveis com elevados comprimentos; o material deve ser transparente para determinados comprimentos de onda para que a luz se propague sem problemas; deve ser fácil obter dois materiais com índices de refração semelhantes, um para o núcleo e outro para o *cladding*.

A maior parte das fibras é de vidro de sílica (SiO_2). O tipo de vidro escolhido para o núcleo é determinante para a distância que se consegue atingir sem ser necessário fazer a amplificação do sinal ou a sua regeneração. Para além dos vidros podem ainda usar-se plásticos em aplicações em ambientes muito desfavoráveis e para pequenas distâncias. As fibras de núcleo em plástico têm perdas muito superiores mas têm um preço inferior e oferecem uma resistência mecânica superior. A robustez e durabilidade do plástico permite que este tipo de fibras sejam usadas sem cuidados especiais. O núcleo de uma fibra de plástico pode ter um diâmetro muito superior ao das fibras de vidro (110 a 1400 μm), permitindo a utilização de emissores muito mais baratos. Normalmente, as fibras de plástico são apenas usadas em ligações de baixo custo e para distâncias até 100 metros.

2.2 Degradação do sinal na fibra óptica

A atenuação do sinal óptico à medida que se propaga ao longo da fibra é um aspecto muito importante na projecção de um sistema de comunicações baseado em fibras ópticas.

A atenuação do sinal é definida como sendo a relação entre a potência de saída P_o , para uma fibra de comprimento L , e a potência de entrada P_i . Esta relação de potência é função do comprimento de onda como se pode ver na figura 2.2.

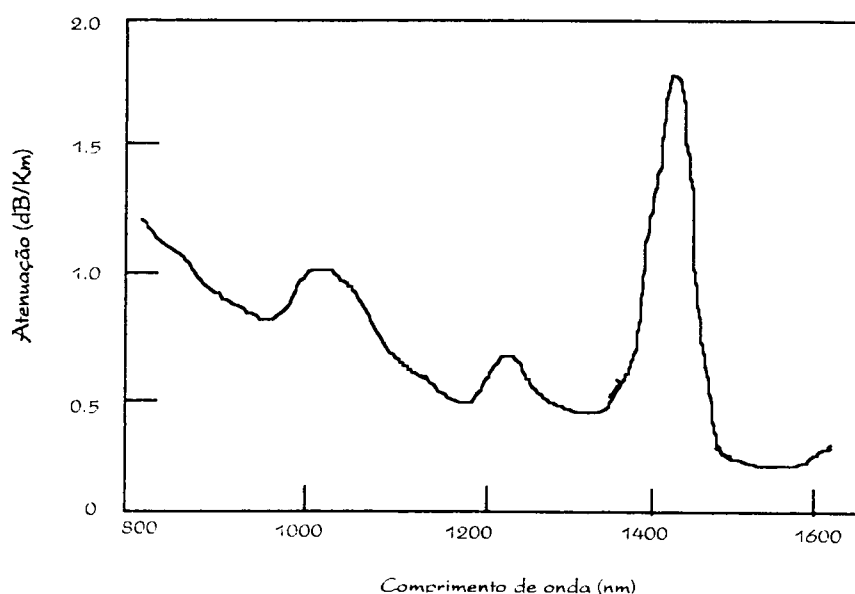


Figura 2.2 Atenuação versus comprimento de onda para uma fibra com grandes impurezas

A atenuação em dB/Km (α) é normalmente usada para caracterizar uma fibra.

$$\alpha = \frac{10}{L} \log\left(\frac{P_i}{P_o}\right)$$

A atenuação (α) depende de muitos factores, nomeadamente da absorção de luz pela fibra, perdas por espalhamento, perdas por pequenas rupturas, perdas por micro e macro dobragem, etc. Estas perdas são minimizadas de modo a não comprometer a *performance* do sistema.

2.3 Janelas de transmissão

Existem três bandas de frequência usadas para a comunicação. Estas bandas são designadas por janelas de transmissão. Cada janela tem as suas características próprias, e a o tipo fibra usada em cada uma delas é diferente. A primeira janela situa-se entre os 800 e os 900 nm. Há alguns anos atrás era muito utilizada, mas actualmente usa-se pouco porque a atenuação nesta janela é muito elevada comparada com a atenuação das outras janelas, atingindo-se por isso distâncias menores. A janela dos 1300 nm é muito utilizada actualmente porque a atenuação é baixa e o custo não é muito elevado. A terceira janela é a que apresenta melhores características em termos de atenuação e distorção do sinal, mas as fibras que operam nesta janela são ainda mais caras que as que operam na segunda janela, mas num futuro próximo dominarão os sistemas de comunicação a grandes distâncias.

3 TRANSMISSORES

A fonte óptica é muitas vezes considerada como sendo o elemento activo num sistema de comunicações com fibras ópticas. A sua principal função é converter energia eléctrica na forma de uma corrente em energia óptica (luz) de um modo eficiente que permita que a saída de luz seja devidamente lançada na fibra óptica.

Existe uma grande variedade de candidatos a fonte de luz para um sistema de comunicações ópticas, mas apenas alguns verificam as condições pretendidas. Os requisitos necessários são os seguintes:

- Um tamanho e configuração compatível com o formato e dimensões da fibra. Idealmente, a saída de luz de uma fonte deve ser altamente direccional.
- A fonte tem que seguir de um modo preciso as variações do sinal eléctrico para minimizar a distorção e o ruído. Idealmente a fonte deve ser linear.
- Deve emitir luz com comprimentos de onda para os quais a fibra apresenta perdas reduzidas e baixa dispersão e onde os detectores são eficientes.
- Preferencialmente capaz de ser modulada de um modo simples, isto é, directamente para uma gama estendida de frequências desde o audio até para lá dos gigahertz.
- Deve acoplar potência óptica suficiente para compensar a atenuação na fibra, para além das perdas nos conectores, e ainda sobrar potência capaz de conduzir o detector.
- Deve ter uma reduzida largura espectral no sentido de minimizar a dispersão na fibra.
- Tem que manter a potência de saída estável, não sendo afectada por condições ambientais como as variações de temperatura.
- É essencial que a fonte seja barata e altamente fiável para não comprometer o custo do sistema, tornando-o competitivo com os sistemas tradicionais.

As principais fontes de luz que são utilizadas em comunicações ópticas são os díodos laser e os díodos emissores de luz (LED). Os lasers são adequados para sistemas de transmissão baseados em fibras porque exibem potências de saída elevadas para uma grande gama de aplicações, a potência óptica de saída pode ser directamente modulada variando a corrente de entrada do dispositivo, têm uma eficiência elevada e as suas dimensões são compatíveis com as dimensões das fibras.

A região de emissão, tanto para os lasers como para os LEDs, consiste numa junção pn construída com materiais semicondutores. Quando esta junção é directamente polarizada, electrões e lacunas são injectados nas regiões p e n respectivamente. Estes portadores podem recombinar-se radiactivamente, em que um fóton de energia $h\nu$ é emitido, ou não radiactivamente, onde a energia libertada pela recombinação é dissipada sob a forma de calor.

A maior diferença entre um LED e um laser é que a saída óptica de um LED é incoerente, enquanto que a luz emitida por um laser é coerente. Numa fonte coerente a energia óptica é produzida numa cavidade óptica ressonante. A energia libertada dessa cavidade tem coerência temporal e espacial, o que significa que é muito monocromática e que o feixe de saída é muito direccionado. Num LED incoerente não existe cavidade óptica para fazer a selectividade de frequência. Estes dispositivos têm uma radiação de saída com uma grande largura espectral, uma vez que a energia sob a forma de fótons é emitida varia entre a gama de energias de recombinação dos electrões com as lacunas, que normalmente está compreendida entre 1 e $2K_B T$ (K_B é a constante de Boltzmann e T é a temperatura absoluta da junção pn). Para além destes aspectos, a energia incoerente é emitida para um hemisfério de acordo com uma distribuição do tipo coseno e portanto tem uma divergência de feixe grande.

A luz coerente produzida por um díodo laser pode ser acoplada a qualquer tipo de fibra, quer multimodo quer monomodo. De um modo geral, os LEDs podem apenas ser utilizados conjuntamente com fibras multimodo com potências suficientemente elevadas para serem úteis. Contudo, em algumas aplicações são usados LEDs especialmente fabricados com fibras monomodo para transmissão de dados a taxas de 1.2Gbits/s sobre vários quilómetros.

3.1 Díodos emissores de luz (LEDS)

Num LED, a luz é obtida a partir da emissão espontânea de radiação na região infravermelha ou visível do espectro luminoso a partir duma junção pn polarizada directamente. A banda de condução normalmente vazia é ocupada por electrões injectados pela corrente de condução directa através da junção. A luz é gerada quando estes electrões se recombinam com as lacunas na banda de valência, emitindo um fóton. A luz emitida desta forma não é estimulada mas sim espontânea, ao contrário dos lasers em que a emissão é estimulada pela adição duma cavidade óptica e facetas que funcionam como espelhos provocando a realimentação de fótons.

Deste modo, os LEDs podem funcionar com densidades de corrente inferiores aos lasers, mas os fótons emitidos têm fases aleatórias o que torna a fonte luminosa incoerente. Para além deste facto, a energia dos fótons emitidos é apenas ligeiramente igual à diferença de energia entre a banda de valência e a banda de condução do material semiconductor, o que dá uma largura espectral muito maior (possivelmente por um factor de 100) do que para um laser. A banda do feixe emitido por um LED é da ordem de 30 a 40 nm (a energia varia entre 1 e $3,5KT$, onde K é a constante de Boltzmann e T é a temperatura ambiente) para dispositivos baseados em GaAs, à temperatura ambiente. Assim, o LED opera com muitos modos dentro da sua estrutura e é por isso muitas vezes usado como uma fonte multimodo.

Em sistemas de comunicações em que a taxa de transmissão requerida seja aproximadamente menor do que 100 a 200 Mbits/s, juntamente com potências de acoplamento na ordem de algumas dezenas de microwatt, os LEDs são a melhor escolha.

Actualmente, os LEDs têm algumas desvantagens comparativamente aos lasers, nomeadamente:

- Normalmente a potência óptica acoplada à fibra é baixa (da ordem dos microwatts).
- Usualmente oferecem uma largura de banda onde se pode modular a saída óptica muito baixa.
- Sofrem de distorção harmónica.

Para serem úteis em aplicações de transmissão com fibras ópticas têm que possuir uma saída radiactiva elevada, um tempo de emissão reduzido e uma elevada eficiência quântica.

Para além das desvantagens enunciadas que apresentam o LED como uma hipótese de escolha pouco atractiva, o dispositivo apresenta um conjunto de vantagens distintas que lhe deram um lugar proeminente nos sistemas de comunicações com fibras ópticas:

- *Fabricação simplificada*; devido à simplicidade relativa dos LEDs.
- *Custo*; o processo de fabrico simplificado dos LEDs levam a um custo inferior, posição que provavelmente sempre manterá.
- *Fiabilidade*; os LEDs não sofrem de degradações catastróficas e são muito menos sensíveis a degradações graduais do que os lasers. São também insensíveis a ruído modal.
- *Normalmente menor dependência da temperatura*; a potência de saída não é grandemente afectada por variações de temperatura. Para além deste aspecto, o

LED não é um dispositivo com corrente de *threshold* para entrar em funcionamento.

- *Circuito de drive simplificado*; uma vez que não necessita de circuitos de compensação de temperatura e a corrente de condução é inferior. Para além disso, os lasers são sensíveis a variações da tensão de alimentação, requerendo-se uma fonte de arranque lento.

- *Linearidade*; idealmente o LED tem uma saída óptica linear em relação à corrente de polarização. Este aspecto é mais vantajoso quando o sinal óptico vai ser modulado em amplitude.

- *Durabilidade*; ao contrário dos lasers, a sua expectativa de vida é elevada.

Existem cinco tipos principais de estruturas de LEDs que se encontram em uso em comunicações ópticas. Destes cinco, apenas dois têm sido usados extensivamente, no entanto os restantes têm vindo a ser estudados com interesse. Estes últimos são os LEDs de emissão à superfície (*surface emitter*), LEDs de emissão em orlas (*edge emitter*) e LEDs de superluminescência. Os dois mais usados são os planares (*planar emitter*) e os do tipo *dome emitter*.

A potência de saída de um LED relativamente à corrente é mostrada na figura 3.1.

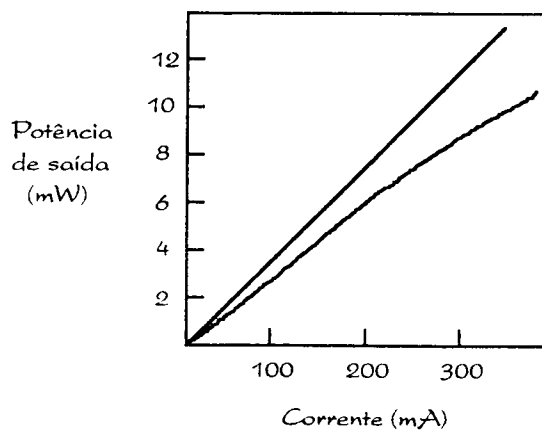


Figura 3.1 Potência óptica de saída em função a corrente de *drive* de um LED AlGaAs do tipo *surface emitter* com 50 μ m de diâmetro de contacto

Como se pode ver na figura anterior, o LED é um dispositivo muito linear o que o torna atractivo para comunicações ópticas analógicas. Contudo, os LEDs apresentam algumas linearidades dependendo do tipo de configuração usada, sendo muitas vezes necessário usar um circuito para linearizar a sua potência de saída. Na figura anterior é visível a resposta ideal em comparação com a resposta real do LED.

Os LEDs também são sensíveis a variações de temperatura, mas muito menos do que um laser porque não têm corrente de *threshold*. A figura 3.2 mostra a dependência dos LEDs do tipo SLED (*surface LED*), ELED (*edge LED*) e SLD (*superluminescent LED*).

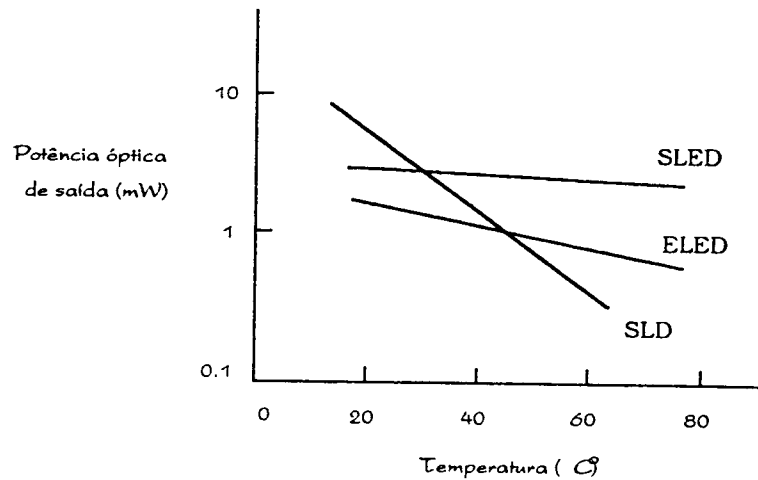


Figura 3.2 Variação da potência óptica de saída com a temperatura para LEDs que operam na segunda janela 1300 nm

Tal como para os lasers, a eficiência quântica do LED decai exponencialmente com o aumento de temperatura, como se pode ver na figura anterior.

O banda do espectro de saída de um LED a funcionar à temperatura ambiente na zona dos 800 a 900 nm varia habitualmente entre 25 e 40 nm. A banda do espectro de saída também aumenta com a dopagem da junção *pn*, mas o pico de potência é reduzido. A figura 3.3 mostra o espectro de saída para dois níveis de dopagem.

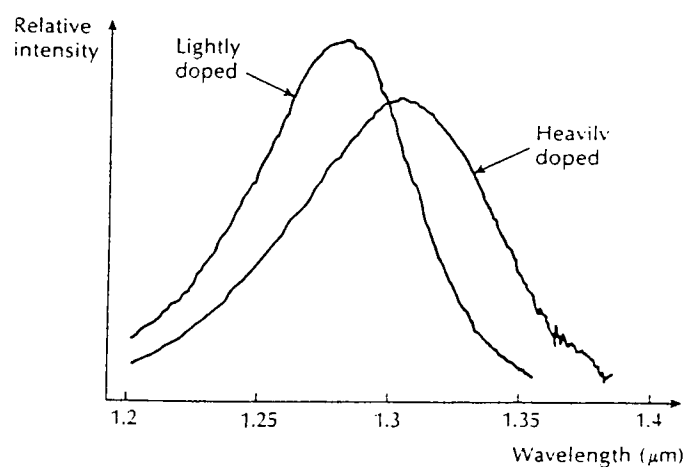


Figura 3.3 Espectro de saída de um LED de AlGaAs do tipo *surface emitter* para dois níveis de dopagem

Para cada tipo de LED, a largura espectral do feixe luminoso de saída é diferente. Na figura 3.4 pode-se observar esta variação para um LED InGaAsP do tipo SLED e ELED. Pode verificar-se que o espectro dos LEDs do tipo ELED é menor do que o dos SLEDs. Um LED superluminescente apresenta um espectro ainda mais estreito.

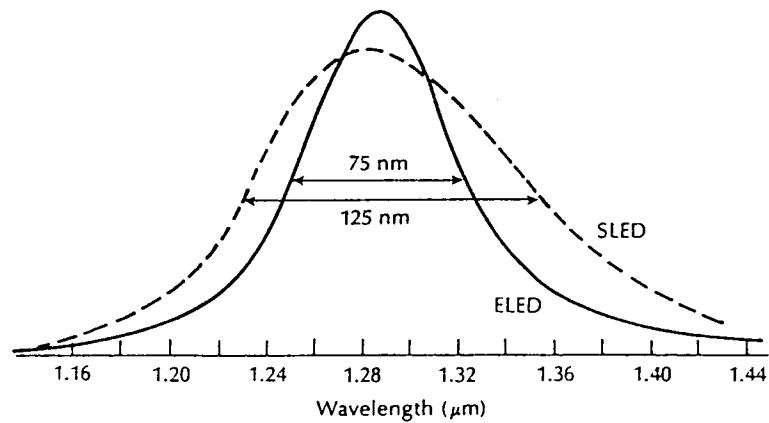


Figura 3.4 Espectro de saída dum SLED e dum ELED operando na zona da segunda janela (1300 nm)

As variações de temperatura também vão alterar o espectro de saída dos LEDs. A figura 3.5 mostra essas variações. Para se reduzir o efeito da temperatura pode ser necessário usar dissipadores de calor em alguns sistemas de comunicações.

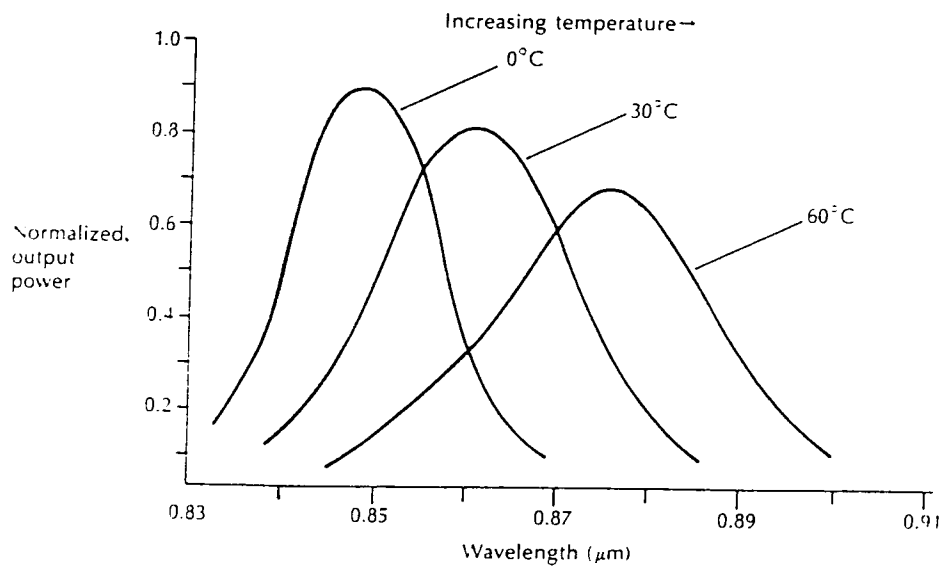


Figura 3.5 Variação do da largura espectral dum LED AlGaAs com a temperatura

3.1.1 Circuito de *drive* para transmissões digitais

A utilização de um LED para a transmissão digital binária requer que se ligue e desligue uma corrente na ordem das centenas de miliamperes. Isto tem que ser efectuado a alta velocidade em resposta a níveis de tensão lógicos à entrada do circuito de *drive*. Um circuito simples para conduzir o LED é esquematizado na figura 3.6.

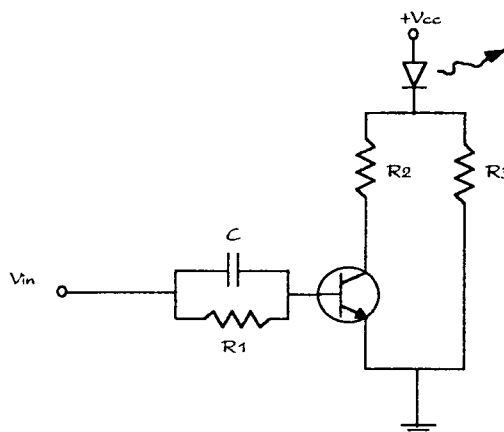


Figura 3.6 Circuito de *drive* de um LED

O circuito anterior usa um transistor bipolar operando em emissor comum. Este simples circuito fornece ganho de corrente, bem como tem uma pequena queda de tensão quando o transmissor está saturado. A limitação deste circuito está na velocidade de comutação, que é limitada pela carga espacial e pela capacidade de difusão, ou seja, a largura de banda é trocada por um ganho elevado de corrente.

Um requisito muitas vezes necessário em transmissões digitais é a interface entre o circuito de *drive* com uma família lógica comum, como é ilustrado na figura 3.7.

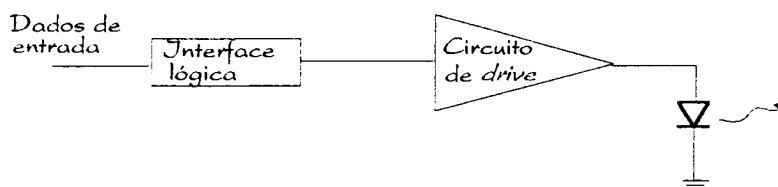


Figura 3.7 Diagrama de blocos da interface lógica para um sistema digital

A compatibilidade com os circuitos lógicos TTL pode ser obtida através do uso de circuitos digitais. A figura seguinte mostra dois circuitos de interface possíveis.

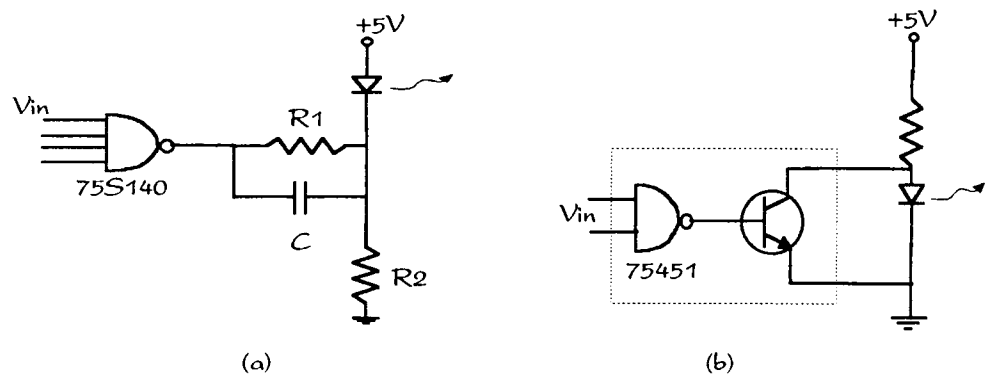


Figura 3.8 Circuito de *drive* com interface lógica para transmissões digitais

O elemento 74S140 é um *line drivers* da Texas Instruments que fornece uma corrente de 60 mA quando R_1 vale 50 Ω . Colocando dois elementos em paralelo obtém-se uma corrente de 120 mA. A utilização de um condensador (por ex. de 47 pF) dá tempos ópticos de subida de 5 ns.

O circuito (b) é designado de *shunt driver* em que se utiliza um circuito integrado standard TTL 75451, disponível comercialmente.

Outra alternativa possível é o circuito da figura 3.9. Neste caso o LED funciona como uma carga no colector do transistor, de modo que o circuito forneça ganho e portanto seja um circuito de *drive* para o dispositivo. O circuito parece-se com um amplificador linear, mas funciona fora da zona linear e opera no modo comutado.

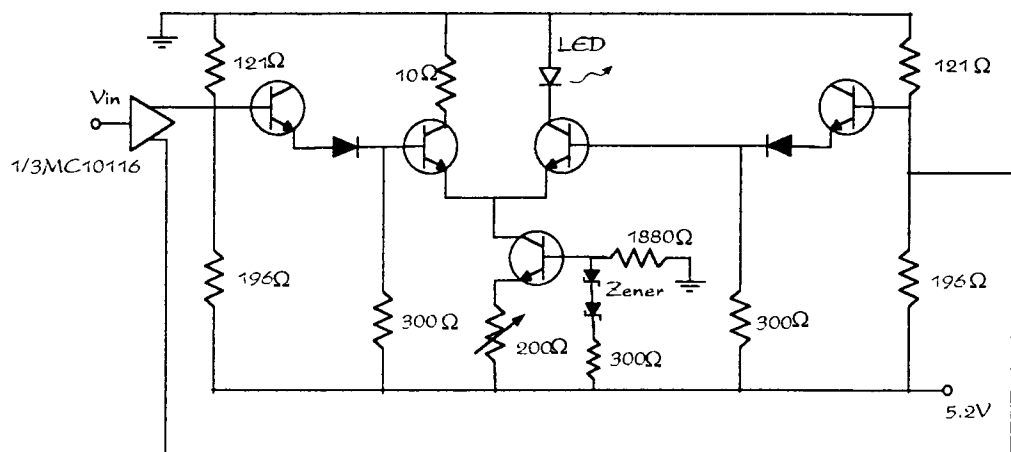


Figura 3.9 Circuito de *drive* com acoplamento emissor

Altas velocidades de funcionamento podem ser conseguidas devido à característica de não saturação que evita atrasos quando se desliga o circuito, causados por cargas armazenadas na base do transistor. A inexistência de saturação também minimiza os requisitos de *drive* da base do transistor, preservando o seu ganho de

corrente para pequenos sinais. Este circuito é compatível com dispositivos do tipo *emitter couple logic* disponíveis comercialmente.

O tempo de resposta deste circuito permite taxas de transmissão de 50 a 300 Mbit/s usando transistores rápidos.

3.1.2 Circuitos de *drive* para sistemas analógicos

Em transmissões analógicas, o circuito de *drive* deve provocar uma saída óptica do LED capaz de seguir em amplitude e fase uma tensão de entrada variável no tempo. Para que isto seja possível é necessário que a saída do LED seja linear. Como isto nem sempre é possível, o LED acaba por limitar a *performance* dos sistemas analógicos a não ser que se inclua uma compensação adequada no circuito de *drive*. Contudo, excepto quando se pretendem níveis de distorção muito baixos, pode-se usar um circuito de *drive* simples com transistores. Dois possíveis circuitos de alta velocidade são esquematizados na figura 3.10. Na figura (a) mostra um circuito de *driver* que consiste num amplificador de transcondutância com emissor comum que converte uma tensão na base do transistor numa corrente no colector. O circuito é polarizado na classe A com a corrente de colector a meio do valor de pico. Um circuito semelhante de transcondutância que utiliza um par de transistores Darlington de modo a reduzir a impedância da fonte é mostrado na figura 3.10 (b). Um circuito deste tipo pode ser usado para conduzir LEDs a frequências à volta de 70 MHz.

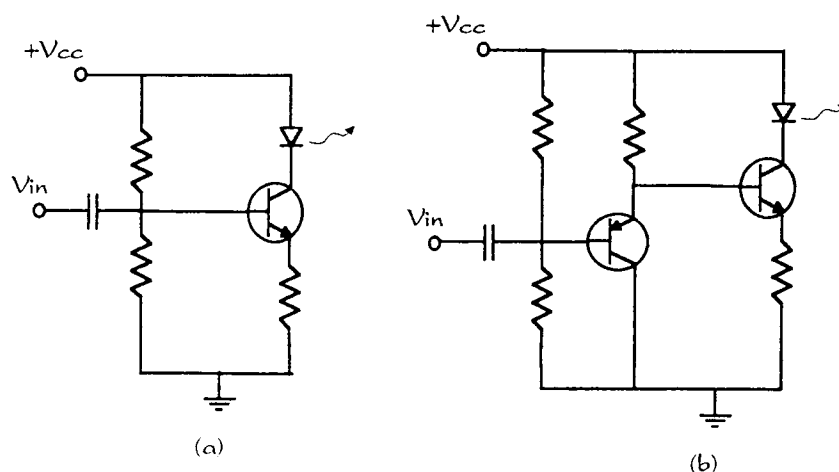


Figura 3.10 Circuitos de *drive* de transcondutância para transmissões analógicas: (a) configuração em emissor comum, (b) Par Darlington

3.2 Díodos laser

Os díodos laser têm dimensões e formatos muito variados. Para sistemas de comunicações usando fibras ópticas, os lasers utilizados são quase exclusivamente os díodos laser. No entanto, são muito parecidos com os restantes tipos de laser.

Para sistemas de comunicações que requerem uma largura de banda maior do que 200 MHz os díodos laser são preferidos relativamente aos LEDs. Os lasers têm tempos de resposta inferiores a 1 ns, largura de banda óptica de 2 nm ou inferior e em geral permitem acoplar potências ópticas úteis de vários miliwatts a fibras com núcleos reduzidos e com baixas aberturas numéricas.

A potência de saída dos díodos laser pode ser modulada usando um dos dois métodos mais habituais. Em sistemas digitais usa-se a modulação de impulsos e em sistemas analógicos utiliza-se modulação de amplitude. A limitação da taxa de modulação em díodos laser assenta nos parâmetros de associados à operação do laser, nomeadamente o tempo de vida dos fotões e dos portadores.

Potências ópticas de alguns mW são comuns na maioria dos díodos laser, para a primeira janela de transmissão, enquanto que para a segunda encontram-se valores da ordem das centenas de μW . Embora sejam valores de potência idênticos aos de um LED, a eficiência de acoplamento é uma ordem de grandeza superior devido à coerência espacial do feixe. Estes 10 a 20 dB traduzem-se numa melhor taxa de erros (BER) ou na possibilidade de se cobrir uma distância maior sem a necessidade de se regenerar ou amplificar o sinal.

Outro aspecto que condiciona o uso de díodos laser é a dependência da corrente de polarização com a temperatura. A corrente necessária para atingir a mesma potência de saída aumenta com a temperatura e depende de vários e complexos factores. Desta forma não existe uma equação que caracterize a variação da corrente de polarização com a temperatura. Pode no entanto usar-se a seguinte equação empírica.

$$I(T) = I_z e^{T/T_o}$$

Na equação I_z é uma constante e T_o é uma medida relativa de temperatura, sendo o seu valor normal de 120 a 165°C. A figura 3.11 mostra a variação da corrente de polarização do laser com a temperatura.

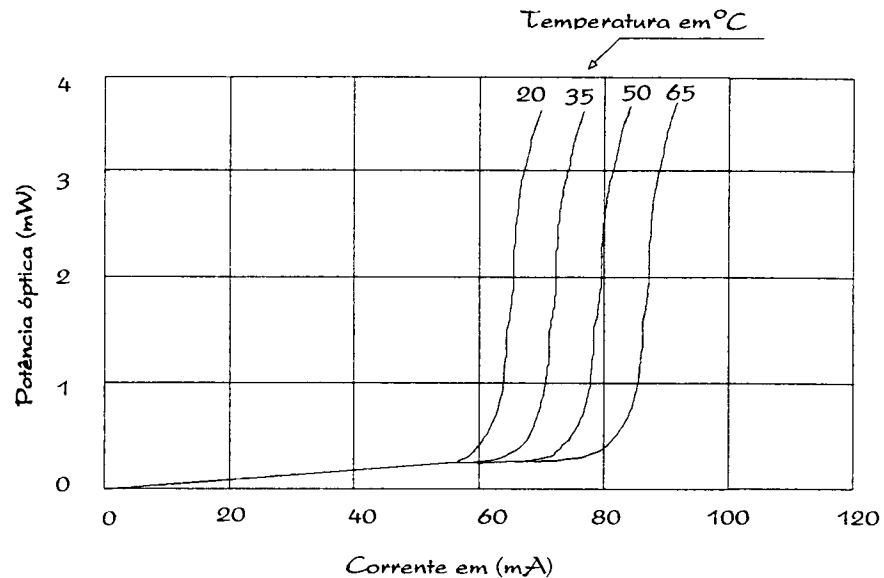


Figura 3.11 Variação da corrente de polarização do laser com a temperatura

Na figura 3.11 podemos observar a existência de duas zonas distintas de funcionamento para um diodo laser. Abaixo da corrente de limiar (*threshold*), este funciona como um LED e a emissão de luz é espontânea, enquanto que acima do limiar a emissão é estimulada (a luz emitida é coerente, com pequena largura espectral).

Para o diodo laser correspondente à figura 3.11 a corrente de *threshold* aumenta num factor de 1.4 entre 20 e 60°C. Para além da variação da corrente com a temperatura, o nível de *threshold* varia igualmente com a idade do diodo laser. Consequentemente, se for necessário manter o nível de potência óptica de emissão do laser com o aumento de temperatura e com o envelhecimento do laser é necessário ajustar a corrente de polarização. Existem vários métodos para se atingir automaticamente este objectivo: circuitos ópticos realimentados, transístores de correcção de temperatura e circuitos detectores de *threshold*.

A realimentação óptica pode ser efectuada usando um fotodetector para detectar as variações de potência óptica emitida. O fotodetector faz a comparação entre a potência óptica de saída e um valor de referência e ajusta a corrente de polarização automaticamente para manter um pico de luz constante à saída do laser.

A figura 3.12 mostra um circuito estabilizador com realimentação que pode ser usado num transmissor digital.

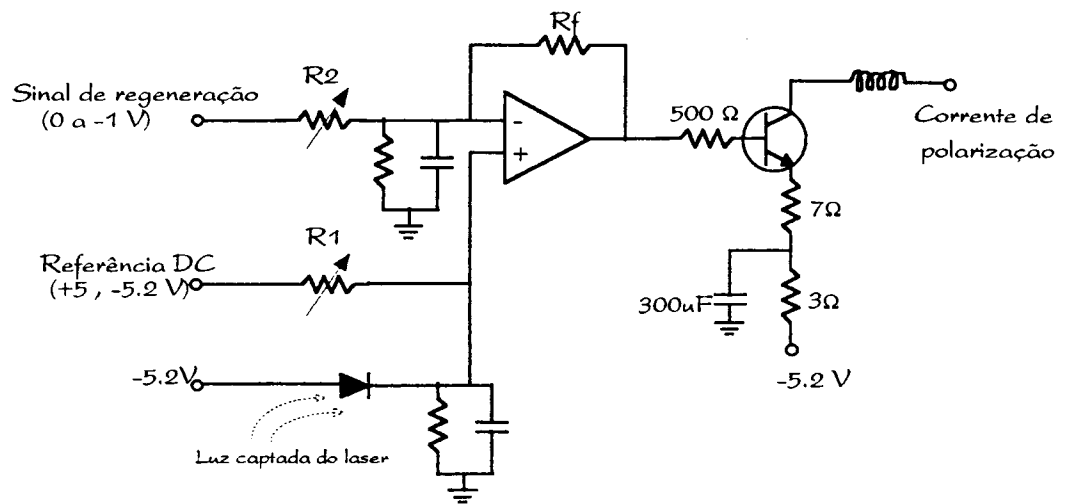


Figura 3.12 Circuito de polarização do laser com estabilização da potência de saída

No circuito anterior, o sinal eléctrico de entrada é comparado com o nível óptico de saída do diodo laser. Este processo evita que a corrente de polarização seja aumentada quando o sinal a transmitir é composto por uma sequência de zeros, ou durante um período em que não existe sinal de entrada. A referência DC através da resistência R1 determina a corrente de polarização durante uma grande sequência de zeros. Quando esta corrente de polarização é ligada ao circuito de *drive* do laser, o pico de potência de saída desejada é obtido. A resistência R2 serve de termo de comparação para a corrente do fotodetector para um *duty ratio* de 50% a 25 °C. As variações do nível de *threshold* com a temperatura, não são compensadas pela corrente de polarização de saída do circuito que é automaticamente ajustada para manter um valor equilibrado entre a referência de dados e a fotocorrente do diodo.

Outra hipótese de estabilizar a potência de saída do diodo laser é usar um circuito termo-eléctrico que arrefeça o laser e o mantenha a uma temperatura constante.

3.2.1 Circuitos de *driver* para um diodo laser

As configurações descritas para serem usadas com LEDs podem ser também usadas com lasers com pequenas alterações. O laser, como é um dispositivo com *threshold*, necessita de outros cuidados em termos de corrente de *drive*. Por exemplo, quando se usa em sistemas digitais é normalmente submetido a uma corrente de pré-polarização no estado de *off*. Deste modo, reduz-se o tempo de ligação e minimizam-se certas oscilações, permite um fácil controle sobre os efeitos de mudança de temperatura ambiente e de envelhecimento, reduz o aquecimento da junção causado pela corrente de *drive* digital uma vez que as correntes de *on* e *off* não são muito diferentes para muitos

lasers. Além disso, a pré-polarização abaixo do nível de *threshold* causa emissão espontânea de luz, o que não é muito grave em sistemas digitais porque a emissão estimulada no estado de *on* é geralmente maior por um factor, pelo menos, de 10.

Um circuito simples de condução de um laser é apresentado na figura 3.12. Este circuito é um *driver* do tipo *shunt* utilizando um transistor de efeito de campo (FET) para se obter um funcionamento rápido.

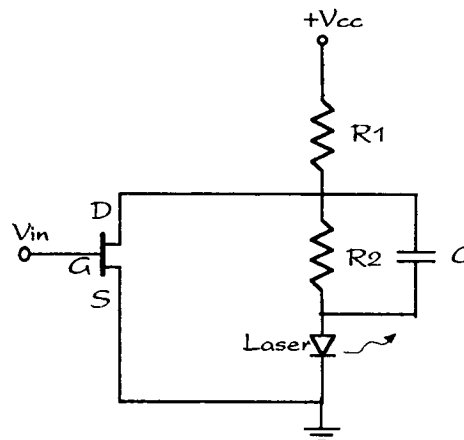


Figura 3.12 Circuito *driver* do tipo *shunt* para uma laser de injeção

O LED é polarizado para a sua região activa através da resistência R_2 e do condensador de compensação C . Para uma particular tensão de entrada V_{in} uma parte da corrente que passa por R_1 é desviada do laser através do FET, deixando a restante corrente passar pela resistência R_2 e fornecendo assim a corrente de estado *off* do dispositivo. Usando um MESFET estável, de gálio e arsénio, o circuito da figura 3.12 serve para modular lasers a taxas superiores a 1 Gbit/s.

Um método de controle alternativo para sistemas digitais que oferece um sistema preciso de *threshold* e uma dependência do dispositivo no atraso de ligação é mostrado na figura 3.13. Este circuito monitoriza o tempo de *switch on* de um impulso óptico no sentido de controlar a corrente de polarização do laser.

O atraso à ligação é medido para um nível correspondente a um zero abaixo do valor de *threshold*, e a realimentação é colocada para um nível constante para controlar o atraso. Deste modo, o circuito fornece um sinal de referência proporcional ao período de atraso. Este sinal é usado para controlar o nível de polarização. Esta técnica requer um diodo de monitorização muito rápido, bem como um amplificador de grande largura de banda, para permitir medir atrasos com pequenos períodos. É também essencial colocar o nível de zero abaixo do *threshold* porque o anel de realimentação apenas estabilizará para atrasos finitos.

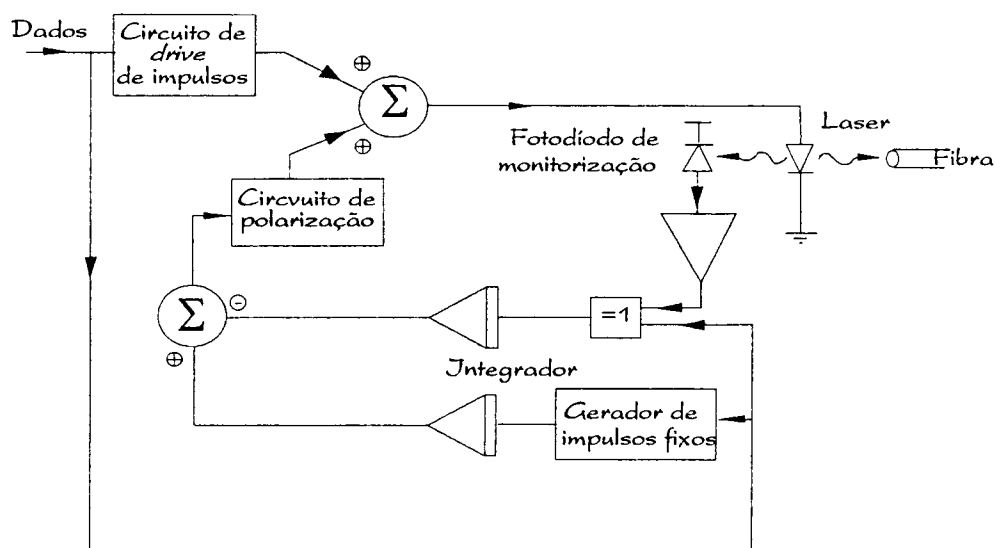


Figura 3.13 Circuito com controle de atraso à ligação de um laser por realimentação

3.3 Características do circuito do transmissor óptico

Como já referi, tanto os LEDs como os díodos laser podem servir como fonte para sistemas de comunicações ópticas. Apesar das similaridades entre ambos, existem grandes diferenças em termos de aplicação e de projecto de circuito. A seguir apresentam-se algumas das características que têm que ser tomadas em consideração no projecto de um transmissor.

3.3.1 Potência

A potência eléctrica requerida, de um modo geral, para conduzir um LED e um díodo laser é similar, com valores típicos de corrente entre 20 e 300 mA (alguns lasers podem ter níveis de *threshold* substancialmente mais elevados, da ordem de 1 a 2 A), e a queda de tensão através dos seus terminais varia entre 1,5 e 2,5V. Contudo a potência óptica de saída para ambos os terminais varia consideravelmente como se pode ver na figura 3.13.

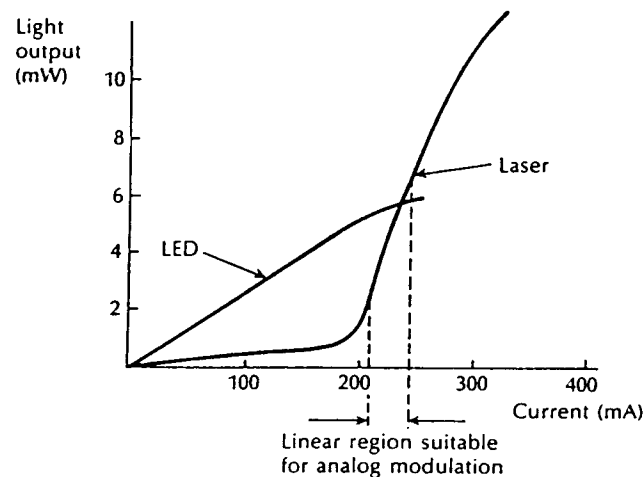


Figura 3.13 Potência de saída, de um LED e um laser típicos, como função da corrente d.c. de *drive*.

Muita da potência óptica de saída pode ser acoplada à fibra devido à distribuição isotrópica da reduzida largura espectral do feixe de saída e a radiação coerente é relativamente direccional. Para além disso, a coerência espacial dos lasers permite focar, a partir de lentes própria, a abertura numérica da fibra. Eficiências de acoplamento de 30% são facilmente obtidas colocando a fibra próxima do espelho do laser, e podem ser melhoradas através do uso apropriado de lentes. Deste modo, os laser podem lançar potências ópticas de 0,5 a vários miliwatts na fibra.

Os LEDs conseguem exibir níveis de potência óptica de saída semelhante aos lasers, mas a potência que se consegue acoplar à fibra é 10 a 20 dB inferior. Isto deve-se ao facto de que nos LEDs a emissão espontânea de radiação ocupa uma banda do espectro relativamente elevada e exibem um intensidade de distribuição Lambertiana o que se traduz por um acoplamento fraco com a fibra. Consequentemente apenas 1 a 10% (usando um ELED de boas características) da potência óptica emitida pelo LED pode ser lançada na fibra.

A figura 3.14 mostra a potência óptica média lançada por um laser e um LED numa fibra em função da taxa de informação digital (*bit rate*). Pode também observar-se os requisitos de potência do receptor para impulsos NRZ transmitidos com uma taxa de erros BER de 10^{-9} . Tipicamente, o laser lança 1 mW enquanto que o LED lança uma potência 10 vezes inferior na fibra. Também se pode observar que ambos os dispositivos lançam uma potência inferior para *bit rate* elevados. O LED é mais afectado do que o

laser com o aumento da taxa de dados. Pode ainda ver-se que a potência lançada pelo LED na fibra é 10 a 15 dB inferior à do laser.

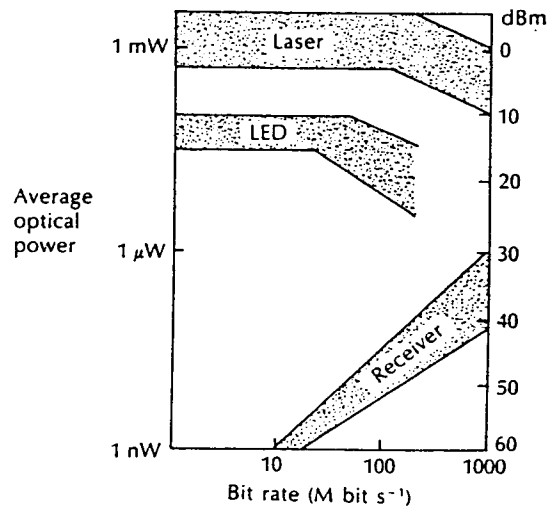


Figura 3.14 Potência óptica média da fonte e potência na recepção em função da taxa de dados *bit rate*

3.3.2 Linearidade

A linearidade da fonte óptica é um aspecto muito importante tanto para os lasers como para os LEDs. É especialmente pertinente em comunicações analógicas, onde as não linearidades da fonte podem provocar grandes distorções no sinal transmitido. À primeira vista, os LEDs parecem ser particularmente dotados para este tipo de comunicação, uma vez que a sua potência de saída é aproximadamente proporcional à corrente de *drive*. Contudo, alguns LEDs apresentam certas não linearidades na sua potência óptica de saída em função da corrente de condução devido ao efeito de aquecimento da junção, o que obrigará ao uso de um circuito que linearize a potência óptica de saída.

Outra solução é utilizar um laser a funcionar na zona superior ao nível de *threshold*, o que pode ser mais adequado do que o uso de alguns LEDs. Contudo, podem ocorrer grandes não linearidades nesta região, o que limita o uso de laser em comunicações analógicas sem a utilização de um circuito de compensação.

Alternativamente usam comunicações digitais que são muito pouco sensíveis a estas não linearidades.

3.3.3 Comportamento térmico

O comportamento térmico, tanto especialmente para os lasers pode limitar o seu uso em comunicações ópticas. Em dispositivos de AlGaAs, a corrente de *threshold* pode aumentar em 1% por cada grau centígrado de aumento da temperatura da junção. Deste modo, um pequeno aumento na temperatura pode provocar uma perda dramática na potência óptica de saída. Esta limitação não pode, normalmente, ser ultrapassada através do uso de um dissipador de calor, mas é necessário no desenho do transmissor de incluir um circuito realimentado para se ter uma potência óptica constante.

Os LEDs também sofrem com o aumento de temperatura, exibindo uma diminuição de potência óptica de aproximadamente 1% por cada 1 grau centígrado a mais. Esta característica não é normalmente importante devido à inexistência de um nível de *threshold*. Pode no entanto apresentar variações de alguns dB quando a temperatura passa de 0 a 70°C, devendo por isso ser tomado em consideração no projecto do transmissor.

3.3.4 Tempo de resposta

O tempo de resposta de cada um dos dois tipos de dispositivos é largamente dependente dos seus mecanismos de radiação. A emissão espontânea num LED é dependente no tempo efectivo de vida dos portadores minoritários. Para dispositivos altamente dopados (10^{18} a 10^{19} cm⁻³) de gálio e arsénio este tempo é normalmente de 1 a 10 ns. Contudo, o tempo de resposta duma fonte óptica é muitas vezes especificado em termos de 10 a 90% do tempo de subida, um parâmetro relacionado com a resposta em frequência do dispositivo. Para muitos dos LEDs disponíveis, o tempo de subida varia entre 2 e 50 ns e apresento larguras de banda a 3 dB entre 7 e 175 MHz. Por este motivo, os LEDs estão restringidos a operarem em aplicações com larguras de banda reduzida.

A emissão estimulada para um laser ocorre para tempos menores o que dá origem a tempos de subida na ordem de 0,1 a 1 ns, sendo a largura de banda a 3 dB superior a 1 GHz. Contudo, a *performance* dos laser está limitada ao atraso de *switch-on*. Para minimizar o tempo de subida é então necessário reduzir o tempo de ligação. Circuitos transmissores que efectuem a pré-polarização do laser imediatamente antes, ou

logo a seguir, ao nível de *threshold*, conjuntamente com circuitos de *drive* muito rápidos resolvem o problema.

3.3.5 Largura espectral

Devido à dispersão na fibra, o largura espectral da fonte óptica leva ao alargamento dos impulsos de transmissão, o que se traduz numa limitação da relação largura de banda vezes distância. A emissão incoerente dos LEDs produz normalmente larguras espectrais de 20 a 50 nm. Esta característica limita normalmente o produto largura de banda vezes distância para 100 a 160 MHz Km para comprimentos de onda de 800 e 900 nm respectivamente. Deste modo, a largura de banda global do sistema é limitada pelas restrições de dispersão do material e não pela fonte.

Este problema pode ser aliviado deslocando a transmissão para a segunda ou para a terceira janela em que a dispersão da fibra é significativamente menor. Na zona dos 1300 nm, é possível atingir valores de 1 GHz Km mesmo com LEDs.

Alternativamente, pode usar-se uma fonte com uma largura espectral inferior. O uso de lasers dá produtos largura de banda distância na ordem de 1 GHz Km para a zona dos 800 nm, e valores muito superiores para a segunda e para a terceira janela.

Deste modo, os requerimentos de um sistema a operar numa certa distância irão influenciar não só a escolha da fonte mas também o comprimento de onda a usar na transmissão.

3.3.6 Característica de não extinção total com um zero

Quando uma fonte óptica é intencionalmente colocada em pré-polarização durante um zero ou quando é simplesmente desligada, alguma potência óptica é transmitida durante o período que decorre durante o zero. Isto é particularmente importante quando se trabalha com lasers quando são polarizados abaixo do *threshold* e deste modo lançam radiação por emissão espontânea para a fibra. Quando existe potência óptica incidente no fotodetector durante um período correspondente a um zero diz-se que a fonte tem uma razão de não extinção com zero (ϵ). A razão de não extinção com zero é normalmente dada pela razão entre a energia emitida durante um bit 0 e a energia emitida durante um bit 1. Na situação ideal o valor de ϵ é zero, mas na realidade apresenta valores de 0,05 a 0,10, o que provoca um aumento do ruído no sistema de

transmissão. Na prática o seu valor varia entre 1 e 2 dB, dependendo ainda das características do detector.

Qualquer corrente do tipo (*dark current*) presente no fotodetector também melhorará a característica de extinção porque se adiciona aos períodos de 0 e 1. A maior penalidade ocorre, contudo, no caso de ruído quântico limitado na detecção.

4 RECEPTORES

O receptor dum sistema de transmissão é composto por vários blocos. A seguir à conversão linear do sinal óptico numa corrente eléctrica, o sinal é amplificado para se obter um nível apropriado. A figura 4.1 mostra os blocos de um receptor dum sistema óptico.

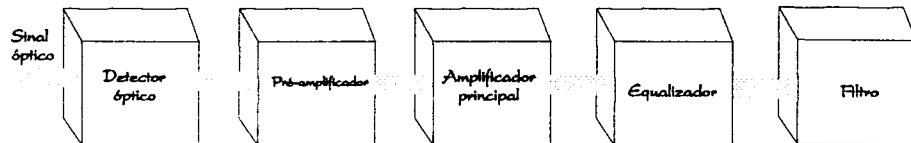


Figura 4.1 Blocos constituintes de um receptor óptico

A amplificação inicial é realizada no pré-amplificador, onde é essencial que os ruídos adicionais sejam minimizados no sentido de se evitar a corrupção do sinal recebido. A configuração e o desenho de do pré-amplificador são essenciais para se obter um receptor com boa qualidade. O amplificador principal fornece amplificação adicional de baixo ruído e oferece um sinal de nível mais elevado ao componentes seguintes do receptor.

De um modo geral, os receptores ópticos são dispositivos muito lineares e não introduzem distorção significativa no sinal, ao contrário de outros componentes do sistema de comunicações ópticas que podem exibir certas não linearidades. Por exemplo, o sinal óptico recebido pode ser afectado pode ser distorcido devido a mecanismos de dispersão na fibra óptica. Alternativamente, o sinal de entrada pode ser distorcido pelos amplificadores (especialmente no caso de se usar um pré-amplificador de alta impedância de entrada). Assim, é necessário fazer a equalização para se obter um sinal com formato apropriado antes do entregar ao filtro. Este equalizador pode ser colocado antes do amplificador ou pode ser agrupado no filtro ou no amplificador.

A função do último elemento do receptor, o filtro, é maximizar o sinal recebido em termos da relação sinal ruído, preservando as características essenciais do sinal. Em sistemas digitais, a principal função do filtro é a de reduzir a interferência intersimbólica, enquanto que em sistemas analógicos o filtro deve manter a resposta em amplitude e fase do sinal recebido dentro de certos limites. O filtro também é desenhado de forma a reduzir a banda de ruído bem como os ruídos dentro da banda de trabalho.

4.1 Detectores

O detector é um componente essencial de um sistema de comunicações ópticas, e é um dos elementos cruciais que determina a *performance* global do sistema. A sua função é converter o sinal óptico recebido da fibra e convertê-lo num sinal eléctrico, que é depois amplificado e filtrado antes do processamento posterior. Uma vez que o sinal óptico é atenuado na fibra, chega ao detector com um nível baixo. Uma melhoria nas características de recepção do detector permite atingir distâncias superiores sem a necessidade de se regenerar ou amplificar o sinal, atingindo-se assim maiores distância, o que se traduz por um capital investido menor bem como menores custos de manutenção.

Devido ao papel que o detector desempenha nas comunicações ópticas, deve satisfazer um conjunto de requerimentos em termos de compatibilidade e *performance*. Os critérios seguintes são os mais importantes e são semelhantes aos das fontes ópticas:

- *Alta sensibilidade dentro das frequências de trabalho.* Inicialmente, os sistemas de transmissão trabalhavam entre 800 e 900 nm. Mas a zona dos 1300 nm oferece grandes vantagens em termos de distorção e atenuação sendo por isso necessário encontrar dispositivos que tenham boas respostas nesta zona.
- *Alta fidelidade.* Para reproduzir a onda do sinal recebida com fidelidade. Para sistemas analógicos a resposta do detector deve ser linear para uma grande gama de frequências.
- *Resposta eléctrica elevada em relação ao sinal óptico.* O fotodetector deve produzir o máximo sinal eléctrico para uma dada potência óptica, isto é, a eficiência quântica deve ser elevada.
- *Tempo de resposta baixo para se obter uma largura de banda apropriada.* Os sistemas actuais funcionam a centenas de MHz mas num futuro próximo serão necessários sistemas que operem a GHz.
- *Introdução mínima de ruído pelo detector.* As correntes que provocam perdas e distorcem o sinal (*dark e leakage currents*) devem ser minimizadas. Para além disso, o mecanismo de ganho do detector e do circuito associado não deve introduzir ruído.
- *Estabilidade de performance.* Idealmente, as características de *performance* do detector não devem depender de mudanças no ambiente, mas na realidade as variações de temperatura alteram as características do detector, sendo por isso necessário introduzir um circuito para compensar estas variações.

- *Tamanho reduzido.* O tamanho do detector deve ser reduzido para permitir um acoplamento eficaz à fibra e para não constituir um volume muito grande relativamente aos restantes componentes electrónicos.
- *Tensão de polarização baixa.* Idealmente, a tensão e correntes de polarização devem ser o menor possível.
- *Alta fiabilidade.* O detector deve ser capaz de manter um regime de funcionamento estável durante muitos anos à temperatura ambiente.
- *Baixo custo.* As considerações económicas são muitas vezes de importância primordial em sistemas de comunicações. Para além disso, o detector não deve ter um peso muito grande, em termos de custos, comparativamente com os restantes componentes.

4.1.1 Tipos de detectores

Para detectar a radiação óptica na região *near-infrared* do espectro, tanto a fotoemissão de electrões interna como externa pode ser utilizada.

Dispositivos de fotoemissão externa como os tubos fotomultiplicadores e os fotodíodos de vácuo verificam alguns dos requisitos apresentados, mas são muito volumosos e necessitam de tensões de alimentação elevadas.

Os dispositivos de fotoemissão interna, especialmente os fotodíodos semicondutores, com ou sem ganho interno (avalanche) apresentam boas *performances* a um custo relativamente baixo. A fotoemissão interna pode ter lugar tanto em semicondutores intrínsecos como em extrínsecos. Para respostas rápidas são preferidos os semicondutores intrínsecos porque oferecem absorção eficiente de fotões, sendo por isso os normalmente usados em comunicações ópticas.

4.1.2 Características de absorção

A conversão óptica eléctrica é conseguida a partir da absorção de fotões pelo fotodiodo para assim se produzirem pares de condutores, ou seja a fotocorrente.

Os coeficientes de absorção dos materiais semicondutores são fortemente dependentes do comprimento de onda como se pode observar na figura 4.2.

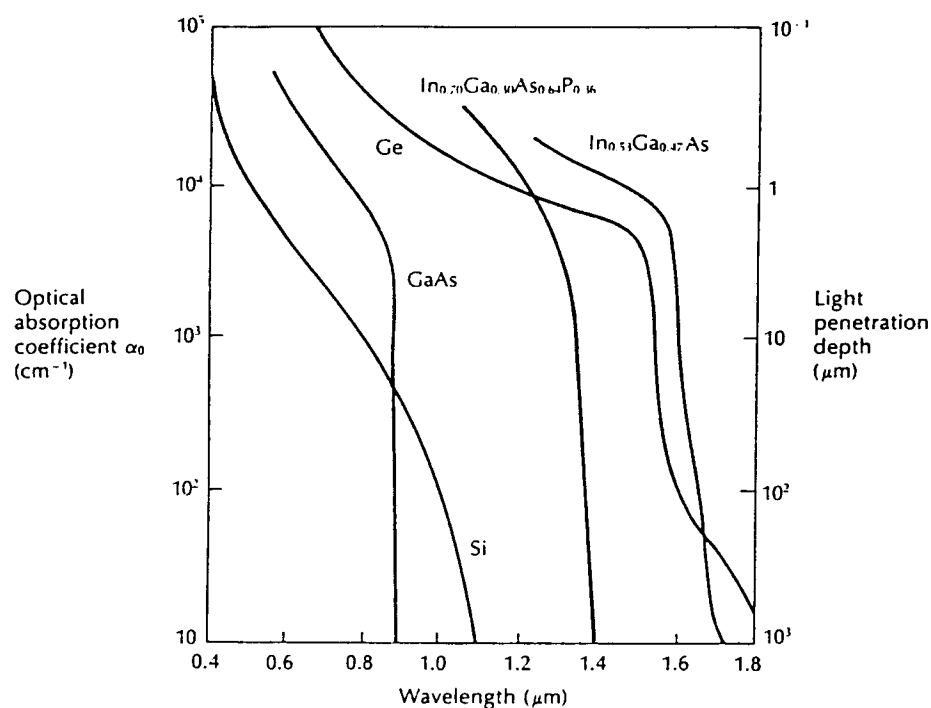


Figura 4.2 Curvas de absorção de alguns fotodíodos em função do comprimento de onda

Pode-se observar que existe uma variação na absorção entre os vários materiais e cada um deles é apropriado para um determinado comprimento de onda e conseqüentemente para diferentes aplicações. Isto deve-se a diferenças de energia entre a banda de condução e a banda de valência entre eles. Para além da variação com o comprimento de onda, a absorção dos diversos materiais varia também com a temperatura.

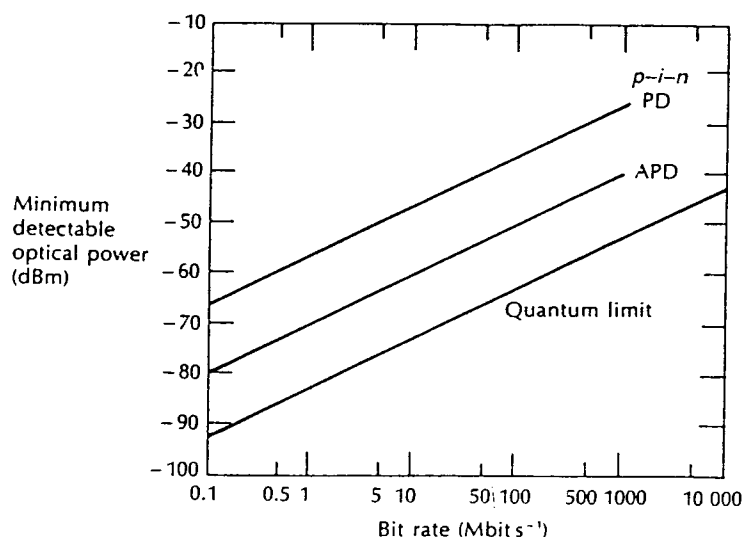
4.1.3 Ganho

Os detectores podem ter ganho interno ou não. Os fotodíodos semicondutores sem ganho interno geram apenas um par electrão lacuna por fotão absorvido. Os fotodíodos PIN são um exemplo de um detector sem ganho interno. Os fotodíodos de silício só têm boas *performances* na zona da primeira janela devido à sua responsividade. Para frequências superiores a 1000 nm os fotodíodos de germânio e de InGaAs são a alternativa.

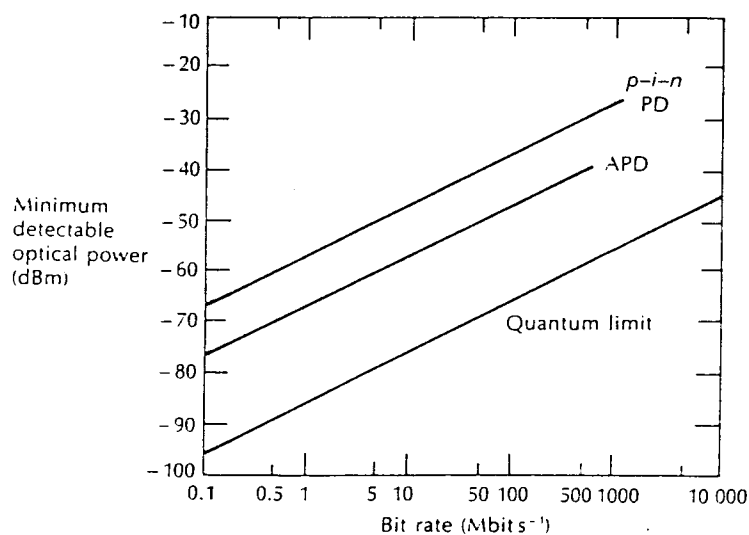
Quando se pretende obter ganho no próprio detector usa-se um fotodíodo de avalanche (APD). Ao contrário dos PIN, os fotodíodos APD necessitam duma tensão de polarização elevada (15 a 400 V).

A grande vantagem dos fotodíodos de avalanche é a que detectam níveis muito baixos de potência. Deste modo, oferecem uma sensibilidade de 5 a 15 dB superior aos PIN, bem como um gama dinâmica mais alargada.

A melhoria de sensibilidade dos fotodíodos APD relativamente aos PIN é dada na figura 4.3. Estas características mostram a potência óptica mínima detectável em função da *bit rate*, para manter uma taxa de erros (BER) na ordem de 10^{-9} . Pode-se observar que os fotodíodos APD se aproximam do limite quântico de 10 a 13 dB.



(a)



(b)

Figura 4.3 Sensibilidade dos receptores (PIN e APD) em função da taxa de dados: (a) detector de silício em 820 nm; (b) detectores InGaAs a funcionarem a 1550 nm

Os fotodíodos APD têm algumas desvantagens relativamente aos PIN:

- Dificuldades de fabricação devido à sua estrutura mais complexa e consequentemente maiores custos.
- A natureza aleatória do ganho que lhes dá um ruído adicional.
- A tensão de funcionamento elevada (50 a 400 V), que é dependente do comprimento de onda.
- A variação do ganho com a temperatura, o que implica a inclusão de um circuito compensador para estabilizar o ponto de funcionamento.

4.2 Pré-amplificador

A escolha da configuração do circuito para o pré-amplificador é largamente dependente da aplicação. Transístores bipolares e de efeito de campo (FETs) podem ser usados numa de três configurações. Estes circuitos são caracterizados pela impedância de entrada que pode ser baixa, alta ou transimpedância.

A configuração mais simples é a de baixa impedância de entrada. Usam-se normalmente transístores bipolares porque os FETs têm alta impedância de entrada. A figura seguinte mostra um pré-amplificador deste tipo.

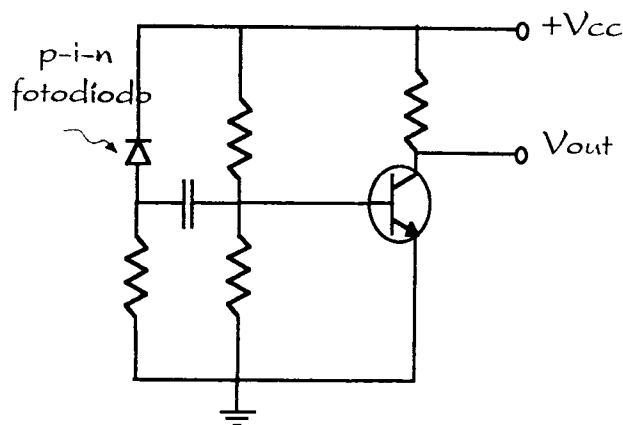


Figura 4.4 Um diodo PIN numa montagem emissor comum com alta impedância de entrada

Este circuito permite operar numa banda relativamente elevada sem a necessidade de equalização devido à baixa impedância de entrada do circuito. Contudo, isto é conseguido à custa do aumento do ruído térmico.

Quando se pretende um circuito que opere com baixo ruído usa-se normalmente uma configuração de alta impedância de entrada ou transcondutância. Estes circuitos oferecem alto ganho com baixo ruído, melhorando significativamente a sensibilidade do receptor.

Em circuitos de alta impedância de entrada normalmente usam-se FETs devido às suas características próprias. Os FETs oferecem não só alta impedância de entrada como também alto ganho.

A figura 4.5 mostra um circuito utilizado como pré-amplificador de alta impedância de entrada.

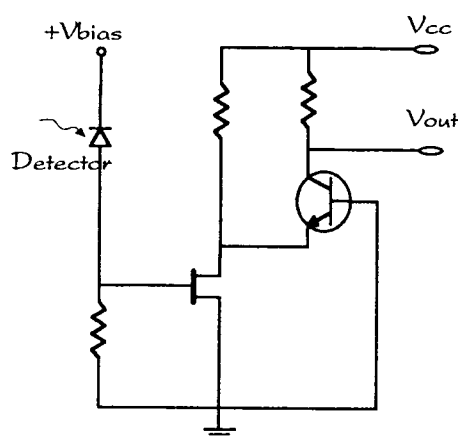


Figura 4.5 Pré-amplificador de alta impedância de entrada

O circuito anterior é um pré-amplificador de dois andares. O primeiro andar é constituído pelo FET, o que dá ao circuito uma impedância de entrada elevada. O segundo andar é formado a partir dum transístor bipolar numa montagem de base comum. A configuração resultante reduz a capacidade de Miller e constitui uma configuração em cascata.

Uma configuração como a anterior constitui um desenho com baixo ruído mas tem dois defeitos. Um é a falta de gama dinâmica devido à carga da capacidade de entrada pelas frequências mais baixas durante um período de tempo causando a saturação prematura do amplificador para sinais de entrada de nível elevado. O segundo defeito é a necessidade de se incluir um circuito de equalização para compensar a distorção introduzida no sinal.

Um circuito de transimpedância tem uma gama dinâmica maior e consegue ter respostas em termos de ruído comparáveis às do esquema de alta impedância de entrada. A figura 4.6 mostra um circuito deste tipo baseado em transístores bipolares.

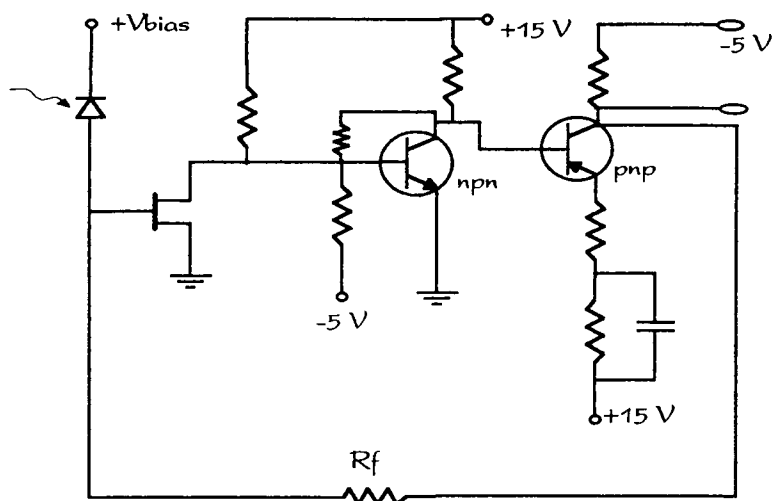


Figura 4.6 Pré-amplificador de transimpedância numa estrutura de cascata com um FET e transístores bipolares

Neste circuito as correntes de polarização para os transístores bipolares e a resistência de realimentação podem ser escolhidos para se obterem uma boa largura de banda mantendo o nível de ruído baixo.

4.3 Controlo automático de ganho (AGC)

O circuito do receptor tem que fornecer uma tensão de polarização inversa estável ao detector. Para um diodo PIN isto não é crítico e uma tensão entre 5 e 80 V fornecendo uma corrente extremamente baixa é suficiente. Um fotodiodo APD necessita de uma tensão de polarização muito mais elevada que define o factor multiplicativo que dá o ganho.

Um modo de fornecer ganho automático ao APD é simplesmente polarizá-lo com uma corrente d.c. constante, como se mostra na figura 4.7.

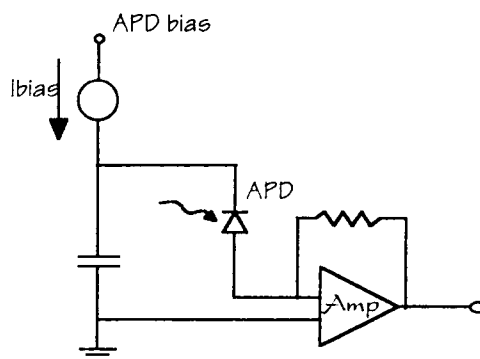


Figura 4.7 Controlo automático de ganho para um detector APD

A fonte de corrente constante é desacoplada pelo condensador para todas as frequências do sinal para se evitar qualquer modulação no ganho. Quando se conhece a potência óptica média, a corrente média para o APD é definida pela polarização que dá um factor multiplicativo constante (ganho) para todas as temperaturas. Qualquer variação no factor multiplicativo produzirá uma variação na carga do condensador, ajustando a corrente de polarização do APD de novo para o valor requerido para o ganho. Contudo, não se toma em atenção a *dark current* gerada pelo detector.

4.4 Equalização

Devido à distorção introduzida pelo amplificador, é necessário equalizar o sinal para se reduzir a interferência intersimbólica.

Uma solução possível é usar um equalizador transversal como o da figura seguinte.

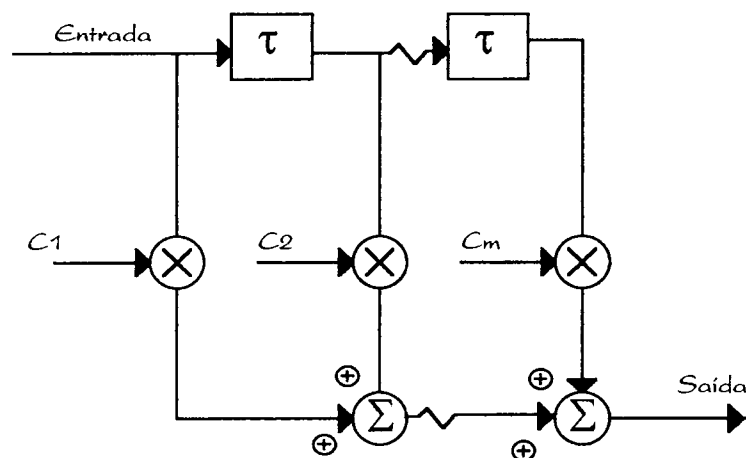


Figura 4.8 Equalizador transversal

O equalizador consiste numa linha de atraso em τ intervalos. A interferência intersimbólica (ISI) é reduzida filtrando o sinal de entrada e escolhendo valores de τ que minimizam o pico de ISI. Equalização adaptativa produzirá melhores resultados, mas o equalizador ficará bastante mais complicado.

4.5 Circuito completo

Na figura 4.9 é apresentado um esquema completo de um receptor.

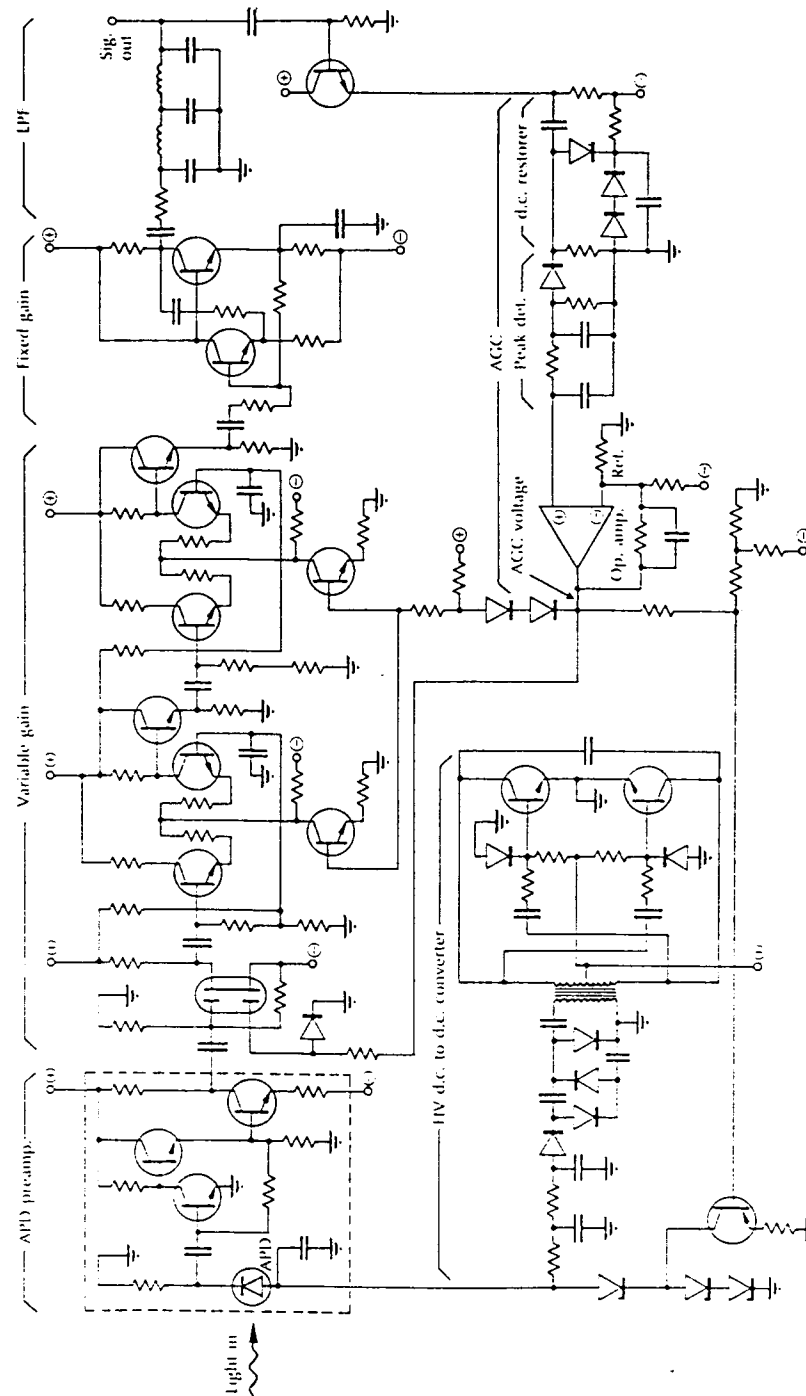


Figura 4.10 Um receptor para um sistema digital de comunicações ópticas

O APD é seguido por um pré-amplificador de transimpedância empregando transístores bipolares. A saída do pré é ligada ao amplificador principal constituído por um amplificador de ganho variável seguido de outro de ganho fixo. O primeiro andar do amplificador principal é constituído por um FET que dá um ganho variável de 20 dB de variação possível. O ganho para o APD é controlado por um conversor HV d.c. para d.c. simples que fornece a polarização para uma tensão baixa de entrada. Este circuito permite variações de ganho entre 26 e 47 dB para o APD e para o amplificador principal respectivamente. O circuito de polarização do APD é desenhado de forma a proteger o dispositivo contra um possível excesso de dissipação de potência para potências ópticas de entrada muito elevadas, bem como dissipação de potência em excesso quando não existe sinal óptico de entrada.

4.7 Recuperação de sincronismo

Em sistemas digitais é muitas vezes necessário recuperar o relógio para se poderem regenerar os dados que chegam através da ligação óptica adequadamente. A figura 4.11 ilustra o esquema de um circuito que realiza a recuperação do relógio.

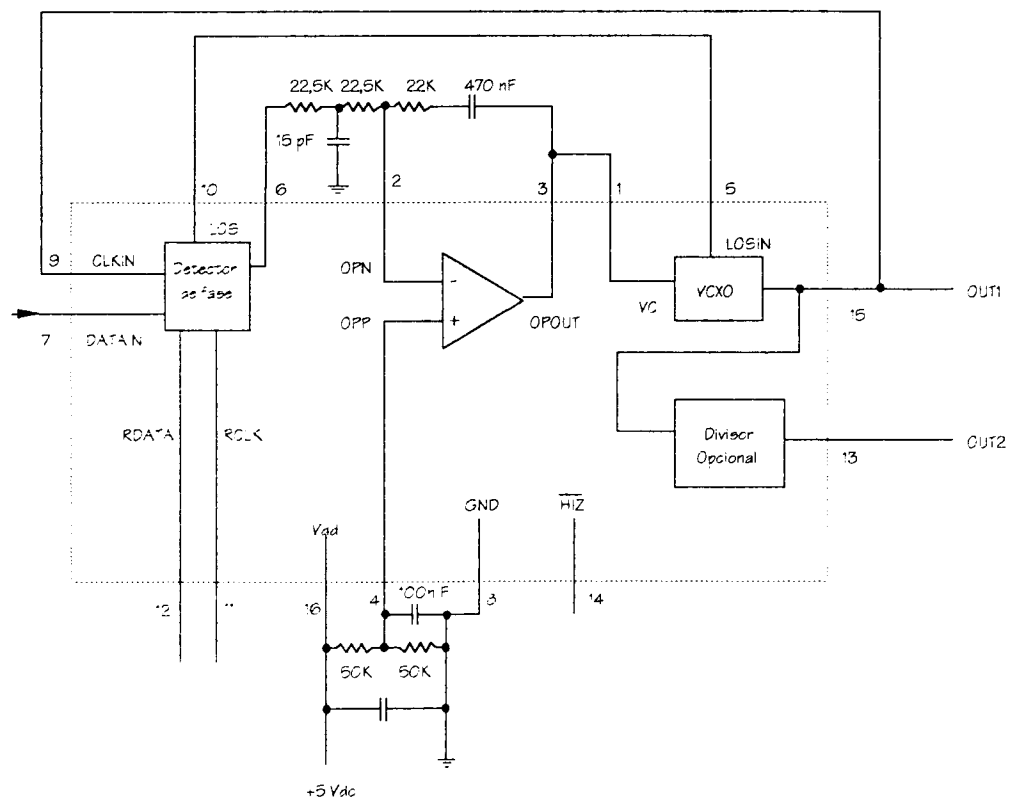


Figura 4.11 Esquema dum circuito recuperador de relógio

O circuito anterior corresponde ao esquema interno do circuito integrado TRU050 da AT&T. Os valores apresentados correspondem a uma largura de banda de 1 KHz numa aplicação a 44.736 MHz.

O circuito é estabilizado por um cristal. A PLL efectua a extracção do relógio do sinal de entrada e regenera-o. Os dados de entrada devem ser do tipo NRZ e terem um formato lógico TTL ou CMOS.

5 CONSIDERAÇÕES SOBRE O PROJECTO DE UM SISTEMA ÓPTICO

Muitos dos problemas associados ao projecto de um sistemas de comunicações ocorrem devido às propriedades únicas das fibras ópticas como meio de transmissão. De qualquer modo, em comum com os sistemas tradicionais de comunicação o critério dominante no desenho de um sistema óptico, seja a transmissão digital ou analógica, é a distância e a taxa de informação atingidas.

Nas fibras ópticas estes critérios estão directamente relacionados com as características principais das fibras, nomeadamente a atenuação e a dispersão. Estes são os factores, juntamente com os problemas associados ao equipamento terminal que limitam a distância máxima tolerada entre um transmissor e um receptor.

Quando o receptor ultrapassa a distância máxima é necessário inserir repetidores ou amplificadores ópticos em intervalos regulares para se atingirem distância maiores. Estes dispositivos, principalmente os repetidores, aumentam significativamente o custo de um sistema de comunicações ópticas. Por isso, o projecto deve ser cuidadosamente elaborado para minimizar estes componentes.

5.1 Técnicas para se fazer um melhor aproveitamento do sistema de transmissão

A escolha do tipo de transmissão, analógica ou digital, é um das decisões a ser tomada no projecto de um sistema de comunicações.

O tipo de fibra usado, multimodo ou monomodo, é preponderante na distância máxima atingida.

O tipo de fonte laser ou LED é também um dos factores a ter em conta. Os laser atingem distância bastante superiores aos LEDs. O tipo de detector determina a sensibilidade do receptor, tendo os fotodíodos de avalanche uma sensibilidade superior.

5.1.1 Multiplexagem

Uma das técnicas usadas para fazer um melhor aproveitamento do meio de transmissão é a multiplexagem.

No sentido de se maximizar a transferência de informação numa ligação óptica é habitual multiplexar vários sinais na mesma fibra. É possível multiplexar estes sinais multi canal no tempo ou nas frequências. Deste modo, esquemas de modulação de impulsos podem ser estendidos a operações multi canal pela divisão nos tempos (TDM). Os impulsos relativos a cada canal são interlaçados e transmitidos sequencialmente, melhorando deste modo a utilização da largura de banda de uma única fibra.

Alternativamente, um número de canais, em banda base, podem ser combinados pela divisão nas frequências (FDM). Em FDM a largura de banda do canal óptico é dividida em bandas de frequências não sobrepostas e cada sinal é atribuído a uma destas bandas. Cada sinal individual pode ser extraído do sinal combinado FDM através de filtragem eléctrica adequada no terminal receptor. Deste modo, a multiplexagem nas frequências é realizada electricamente antes de se transmitir o sinal óptico. Contudo, é possível utilizar várias fontes ópticas, cada uma operando a uma frequência diferente dentro da mesma fibra. Esta técnica é designada de multiplexagem do comprimento de onda (WDM). A separação e extracção dos vários canais é realizada com filtros ópticos, por exemplo filtros de interferência, filtros de prisma, filtros de difracção, etc.

Finalmente, a multiplexagem que não envolve a aplicação de vários sinais apenas numa fibra é conhecida com multiplexagem no espaço (SDM). Em SDM cada canal é transportado numa fibra diferente dentro de um cabo com várias fibras. O bom isolamento oferecido pelas fibras significa que o acoplamento cruzado entre fibras é quase inexistente. Todavia, esta técnica necessita de um aumento dos componentes ópticos (fibra, conectores, fontes, detectores) para um sistema particular e portanto raramente se utiliza.

5.1.2 Repetidores

Em sistemas que operam a grandes distâncias é muitas vezes necessário fazer a regeneração e amplificação do sinal óptico. O espaçamento entre repetidores é um dos principais aspectos que determina a *performance* global do sistema.

O sinal recebido num repetidor está bastante atenuado e sofreu dispersão. O primeiro passo é fazer a detecção e uma pré-amplificação, usando-se para o efeito um fotodíodo seguido de um pré-amplificador de baixo ruído. Ao sinal eléctrico é de seguida efectuada uma amplificação no amplificador principal antes de se fazer a reconstrução dos impulsos para se compensar a característica de transferência da fibra (e do amplificador) usando-se para o efeito um equalizador. Dependendo do tipo de fotodíodo

utilizado, pode-se fornecer controlo automático de ganho neste passo, para a corrente do fotodíodo e para a amplificador principal.

Em seguida é obtido o relógio do sinal amplificado e equalizado usando-se uma PLL. Este relógio permite efectuar as seguintes operações do repetidor de forma precisa dentro dos intervalos de bit do sinal original. A função do regenerador é reconstruir o trem de impulsos original, idealmente sem erros. A figura seguinte mostra os blocos de um regenerador.

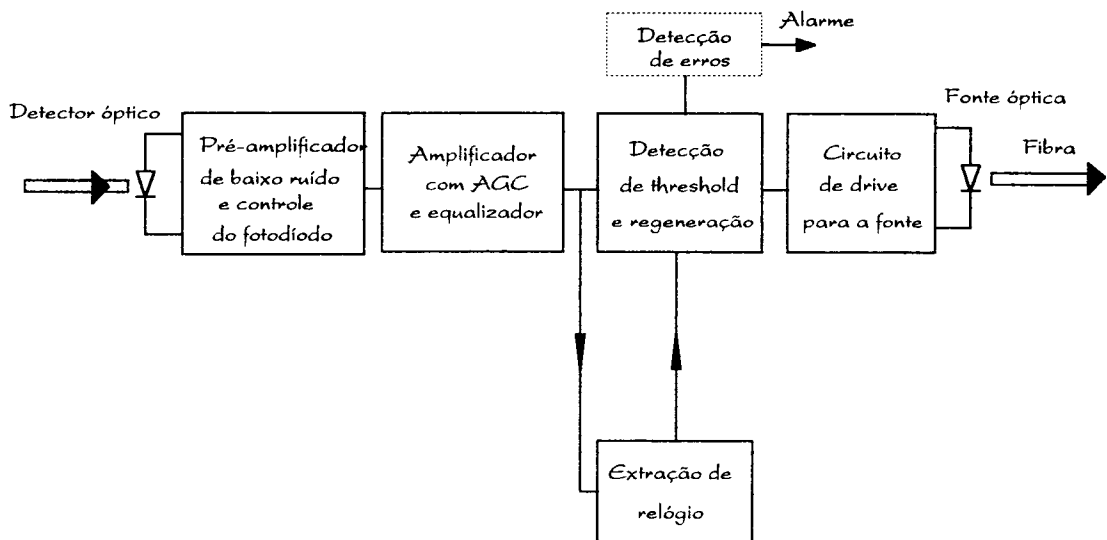


Figura 5.1 Blocos esquemáticos de um repetidor regenerativo típico para um sistema digital de transmissão

Podem ocorrer erros no processo de regeneração nas seguintes situações:

- A relação sinal ruído no momento da decisão sobre um determinado bit é insuficiente para se tomar uma decisão correcta, por exemplo o 0 pode ocorrer acima no nível de *threshold* e ser considerado um 1.
- Interferência intersimbólica provocada pela dispersão na fibra. Isto pode ser reduzido através da utilização de um equalizador que obrigue um 1 transmitido a passar por zero em todas as vizinhanças do instante de decisão.
- Há uma variação na taxa do relógio e degradações de fase (*jitter*) como distorção na passagem por zero e desalinhamentos no instante de decisão.

Na realidade, serão permitidos alguns erros, desde que não ultrapassem a BER pré definida.

No cálculo da distância entre repetidores deve ter-se em consideração vários factores:

- A potência óptica entregue à fibra baseada na *performance* da fonte.
- A potência requerida pelo receptor para garantir uma determinada taxa de erros BER.
- As perdas na fibra incluindo perdas no acoplamento do receptor e do transmissor à fibra, bem como o envelhecimento dos componentes.
- A resposta temporal do sistema incluindo os efeitos de dispersão de impulsos no canal.

5.1.3 Amplificadores ópticos

Amplificadores óptico (AOs), tal como o próprio nome indica operam somente no domínio óptico sem qualquer conversão de fótons para electrões. Deste modo, em vez de se usarem repetidores, que requerem conversores óptico-eléctricos e eléctro-ópticos bem como um circuito electrónico relativamente complexo, podem usar-se AOs.

Um amplificador óptico fornece uma solução muito mais simples, que pode ser usado para qualquer tipo de modulação e virtualmente para qualquer taxa de transmissão.

Para além disso, um AO pode ser bidireccional e se for suficientemente linear pode permitir a multiplexagem de diferentes sinais para diferentes comprimentos de onda.

Na realidade, com uma fibra monomodo de baixa dispersão, o factor que determina a distância máxima atingida é a atenuação da fibra. Estes sistemas não necessitam da regeneração total do sinal bastando fazer a amplificação óptica.

Para além desta vantagens, um amplificador óptico tem um preço muito inferior a um repetidor, sendo por isso uma alternativa cada vez mais em uso.

Os quatro tipos de amplificadores ópticos mais usados são: amplificadores de terras raras, amplificadores de laser semiconductor, amplificador de Raman e amplificador de Brillouin.

A *performance* de cada tipo de AO depende de vários factores. No entanto, a factor que é mais levado em conta é normalmente o ganho, que deve ser tão elevado quanto possível, sem comprometer a figura de ruído.

Um amplificador óptico será composto por uma fonte de bombagem (normalmente um laser) e um pedaço de fibra com características especiais.

A figura seguinte mostra um exemplo de um amplificador óptico a funcionar como repetidor.

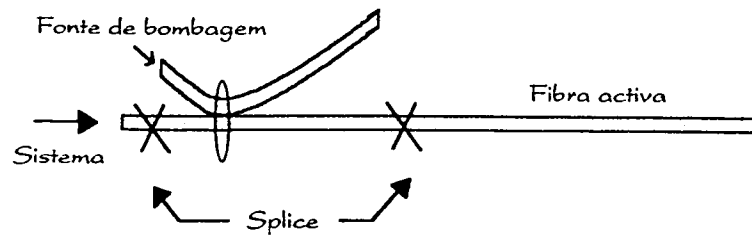


Figura 5.2 Amplificador óptico

O gráfico da figura 5.3 dá uma panorâmica geral sobre o ganho que se consegue obter dos 4 tipos de AOs normalmente usados.

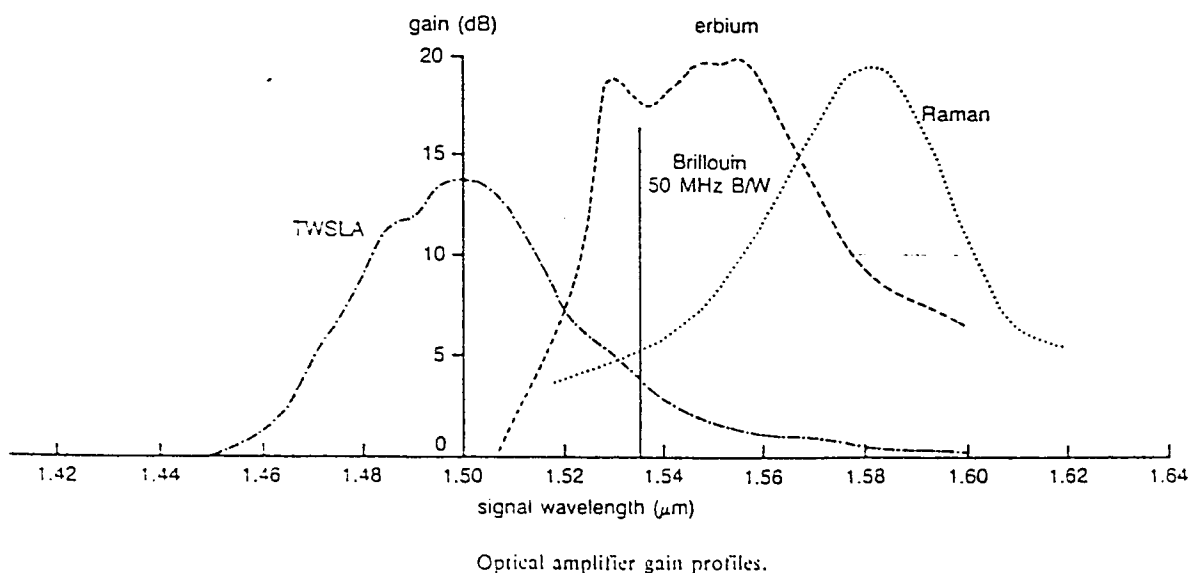


Figura 5.3 Curvas características dos vários tipos de AOs

Pode-se concluir que, em termos de ganho, os AOs de érbio são os que apresentam melhores resultados.

Um dos factores que condiciona fortemente o ganho é a potência do laser bombeador. O gráfico da figura 5.4 mostra a potência de bombeamento necessária para se obter um determinado ganho.

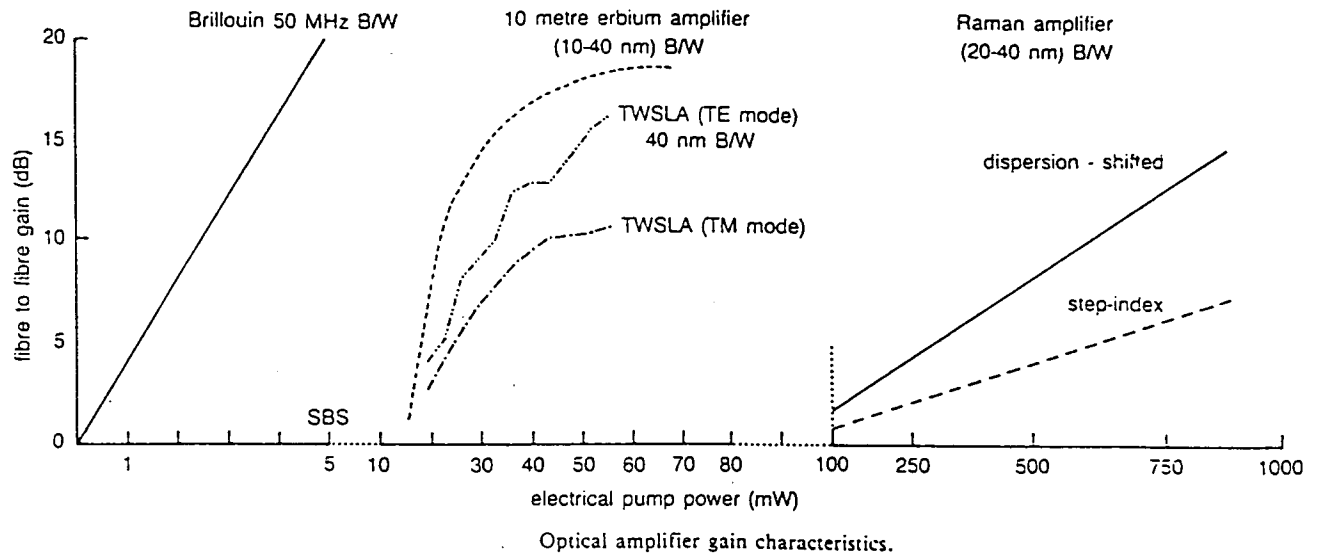


Figura 5.4 Níveis de potência de bombagem para cada tipo de AO

Como se pode observar, os AOs de fibra de Raman necessitam de uma potência muito superior à dos amplificadores de érbio. Este facto compromete, em muitas situações, a sua utilização.

No quadro seguinte estão sumariadas as características mais importantes de cada tipo de AO.

Table 6.1 Comparison of general amplifier characteristics in 1550 nm transmission window

Property	Laser	Erbium fibre	Raman fibre	Brillouin fibre
Unsaturated device gain	> 20 dB	> 40 dB	5-20 dB	20 dB
Optical pump power	N/A*	20-50 mW	100-200 mW	< 10 mW
Optical pump wavelength	N/A	807 nm, 980 nm	Stokes shift below signal λ	
Electrical bias current	50 mA	> 100 mA	> 500 mA	< 50 mA
Wavelength of operation	Any	1530-1560 nm	Any, but subject to pump λ	
Stokes shift	N/A	N/A	100 nm	0.1 nm
Bandwidth	20-50 nm	10-40 nm	20-40 nm	0.001 nm
Coupling loss	5-6 dB	< 1 dB	< 1 dB	< 1 dB
Polarisation sensitivity	< few dB	0 dB	0 dB	0 dB
Saturated output (-3 dB)	< few mW	few mW	Limited only by pump power	
Directions	Bi-directional	Bi-directional	Bi-directional	Unidirectional
Noise	Low	Low	Very low	Very low
Cross-talk	Severe in gain compression	Only below 100 kHz	Low	N/A
Intermodulation distortion	Yes	Only below 100 kHz	Low	N/A

* N/A not applicable

Quadro 5.1 Características mais importantes dos AOs

Outra característica importante é o factor de ruído. Neste aspecto, os amplificadores de érbio têm a vantagem de terem menor ruído e baixo *crosstalk*.

Em termos de largura de banda, não existem grandes diferenças entre os AOs, excepto para os de Brillouin, que têm uma largura de banda de apenas 0.001 nm (100 MHz) o que limita grandemente o seu campo de aplicação.

A banda de trabalho pode ser qualquer uma, excepto para os amplificadores de érbio, que estão restringidos à 3ª janela. Existem, no entanto, AOs de fibra dopada com terras raras para a 2ª janela, mas com uma eficiência bastante inferior à do érbio.

As perdas de inserção dos AOs no sistema de transmissão são baixas (<1 dB), excepto para o caso do amplificador de laser semiconductor, que têm perdas de 5 a 6 dB.

Ao contrário dos AOs de laser semiconductor, para os amplificadores de fibra a largura de banda e o comprimento de onda do seu ponto de funcionamento são determinados pela sua estrutura atómica e não por características geométricas que requerem grande precisão mecânica. Por este motivo, não são afectados pela idade nem pela temperatura. Para os lasers semicondutores a influência destes parâmetros é decisiva.

A *performance* dos AOs de érbio e dos lasers semicondutores pode ser fortemente afectada: se, para os primeiros, tivermos um *splice* fraco ou, para os segundos, fraca reflectividade de faceta, tal poderá conduzi-los a condições laser; devemos, portanto, controlar essas características para que se obtenha um sistema estável.

Como conclusão, pode-se dizer que, para a 3ª janela, um AO de érbio será, sem dúvida, a melhor opção a escolher, até porque o seu preço é bastante inferior.

A possibilidade de se obterem elevados ganhos, elevada saturação da potência de saída, grande largura de banda e baixa sensibilidade à polarização permitem que os AOs sejam usados numa gama muito variada de aplicações. Em particular, os amplificadores de fibra permitem elevados ganhos e baixo ruído na amplificação linear de sistemas de transmissão, enquanto que os amplificadores de laser semiconductor verão o seu campo de aplicações no campo do processamento óptico não linear.

A seguir apresentam-se algumas aplicações de amplificadores ópticos num sistema de comunicações ópticas.

- Amplificador linha

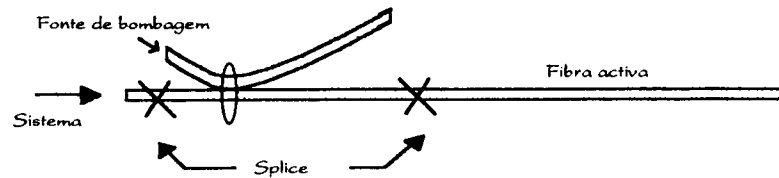


Figura 5.5 Amplificador linha

As fibras monomodo têm baixa dispersão, não sendo necessário fazer a regeneração completa do sinal para que a distância atingida seja grande.

A introdução de um (ou mais) AOs é suficiente para compensar a atenuação provocada pela fibra. Todos os tipos de AOs podem ser usados andares de ganho linear quer um sistemas de transmissão mono canal quer em WDM (*wavelength division multiplexing*). A distorção de intermodulação pode ser considerada como um problema em sistemas WDM com amplificadores laser semiconductor, mas não no caso de amplificadores de fibra. Tanto os amplificadores de fibra de érbio (dezenas de metros de comprimento) como os AOs laser semiconductor (<1 mm de comprimento) podem ser usados como amplificadores discretos. Todavia, o ganho numa fibra Raman requer muitos quilómetros de fibra o que o tornará mais apetecido no caso de se pretender ganho distribuído ao longo da própria fibra.

- Pré-amplificadores

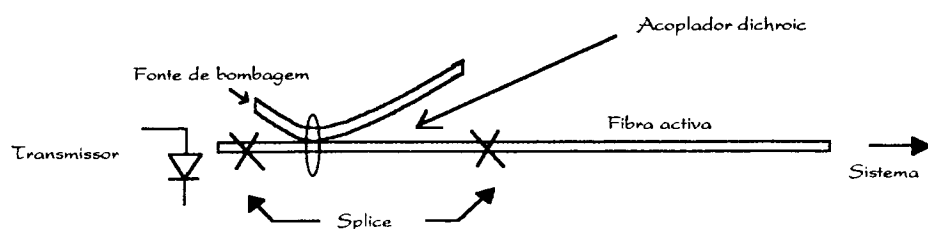


Figura 5.6 Pré-amplificador

Sempre que o sinal recebido é fraco, o uso de um AO antes da detecção é uma boa solução para reduzir a degradação da relação sinal ruído causada pelo ruído térmico nos circuitos electrónicos do receptor. Por outro lado, o uso de um AO tem a vantagem de aumentar o ganho e permitir uma maior largura de banda do que os outros tipos de dispositivos pré-recepção, como por exemplo os fotodíodos de avalanche e os detectores heterodinos. Devido ao facto de o ganho obtido a partir de amplificador de fibra de Raman nesta aplicação não serão usados. Os AOs de fibra de érbio e os lasers semicondutores são ambos usados como pré-amplificadores. O caso dos lasers semicondutores têm a desvantagem de que ressonâncias Fabry-Perot residuais poderem

provocar pequenas variações da sensibilidade do receptor para pequenas variações do comprimento de onda do sinal.

- Amplificadores de potência

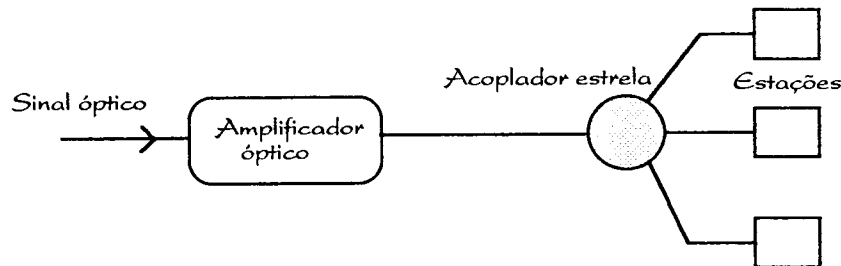


Figura 5.7 Amplificador de potência

Quando se pretende que o sinal óptico chegue a vários receptores, como no caso de uma LAN, as perdas por acoplamento e as perdas por divisão de potência podem ser compensadas usando um AO como *booster amplifier*.

Qualquer tipo de AO pode ser usado como amplificador de potência sendo no entanto a *performance* diferente para cada um.

Em todos os casos o limite de saturação é determinado pela corrente de alimentação do laser. A potência óptica do sinal bombeado requerido para conduzir um amplificador de fibra Raman é a mais elevada, o que conduz a uma potência saturada de saída mais elevada. Um ganho saturado induz crosstalk que será mais severo em WDM de elevada velocidade no caso dos AOs de potência em laser semiconductor.

- Interruptor óptico

O ganho de qualquer tipo de AO pode ser removido se desligarmos a alimentação do laser de bombagem. Apenas se obtém uma pequena extinção do sinal removendo a luz bombeada para um amplificador de fibra de Raman o que não permite a utilização destes tipos de amplificadores como interruptores ópticos. Sem a corrente de alimentação os amplificadores de laser semiconductor e os amplificadores de fibra dopada de érbio são fortemente absorventes o que torna interessante a sua aplicação como interruptores ópticos. Os amplificadores de laser semiconductor têm tempos de resposta da ordem de nano segundos (1 a 2 ns). Deste modo podem ser usados como interruptores de corte muito rápido. Consegue-se obter uma relação de 30 dB entre a situação de corte e o funcionamento normal. Os amplificadores de érbio têm um tempo de fluorescência de 14 ns o que pode ser considerado relativamente elevado implicando

que a inversão de população decaia lentamente sendo por isso apenas possível efectuar comutações relativamente lentas com este tipo de AOs.

- Aplicações não lineares

Os amplificadores de laser semiconductor podem ser usados em variadas aplicações não lineares, incluindo a regeneração de impulsos, abrindo a possibilidade de se efectuar a regeneração óptica completa.

Um amplificador de laser semiconductor pode ser polarizado para funcionar acima do limiar, isto é *lasing*, de modo a que a frequência e a fase de saída possam em certas condições apanhar (*lock*) a fase e frequência de um sinal monocromático fraco. Neste modo o dispositivo pode ser usado como pré-amplificador de sinais com modulação angular.

- Regeneração óptica

Os amplificadores ópticos permitem obter a regeneração de impulsos e simultaneamente ganho. Com uma escolha adequada das condições de funcionamento de um amplificador de laser semiconductor (SLA) podemos conseguir um comportamento não linear e bi-estável. Estes fenómenos podem servir para se fazer a remodelação (*reshape*) de impulsos ópticos com dispersão, obtendo-se novamente impulsos rectangulares.

Um amplificador de laser semiconductor do tipo FP (Fabry-Perot), é normalmente usado para se obter um dispositivo óptico bi-estável.

Para se obter uma função de transferência com histerese é necessário polarizar o laser FP abaixo do limiar (threshold), de modo a que o amplificador seja altamente ressonante. A figura seguinte mostra uma característica de histerese.

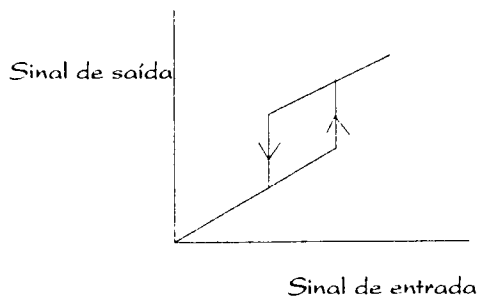


Figura 5.8 Característica de histerese

A dinâmica do dispositivo é a seguinte: à medida que a potência de entrada aumenta, o número de fótons na cavidade aumenta e o número de portadores diminui. O índice de refração é função da densidade do número de portadores e aumenta com a diminuição do número de portadores.

A mudança do índice de refração altera o comprimento óptico da cavidade deslocando a ressonância para comprimentos de onda mais elevados.

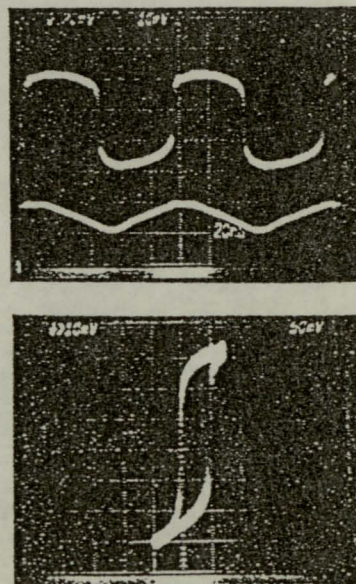
Se inicialmente o comprimento de onda do sinal se aproxima do lado de maior comprimento de onda da ressonância, então, à medida que a potência aumenta, a ressonância desloca-se para o comprimento de onda do sinal de entrada, aumentando o ganho do sinal e gerando fótons adicionais; este efeito por sua vez irá provocar uma aproximação do sinal pela ressonância.

Estes fenómenos estão presentes mesmo para uma potência muito baixa do sinal de entrada (-30 dBm), o que possibilita o seu uso em diversas aplicações.

As fotografias da figura 5.9 mostram os efeitos da bi-estabilidade usados para se obter a regeneração de um impulso rectangular.

A fotografia de cima mostra o sinal antes de passar pelo amplificador (onda triangular) e o sinal depois de passar no AO.

Para se obter a regeneração completa do sinal será ainda necessário usar métodos de recuperação de relógio bem como de *retiming*.



Pulse shaping and associated hysteresis loop using FP amplifier ($L = 200 \mu\text{m}$, $R = 0.3$) biased at 95 percent of threshold current.

Figura 5.10 Bi-estabilidade de um laser semiconductor Fabry Perot

6 BLOCOS DE UM SISTEMA DE COMUNICAÇÕES ÓPTICAS

Os sistemas digitais oferecem geralmente *performances* superiores aos sistemas analógicos, bem como são compatíveis com técnicas computacionais. Um sistema de transmissão digital baseado em fibras óptica é constituído por vários blocos.

O sinal antes de ser transmitido terá que ser codificado para se reduzir a probabilidade de erro. Dependendo do meio de transmissão, assim se procuram códigos de linha que eliminem a componente contínua, que permitem regenerar facilmente a informação de relógio necessária à recuperação do sinal, que tenham uma redundância elevada (de forma a garantir uma boa qualidade de transmissão) ou que apresentem a largura de banda o mais reduzida possível.

No caso particular de sistemas que utilizam fibras ópticas como meio de transmissão, alguns dos condicionamentos mencionados para os códigos de linha não se aplicam, dado que não há a necessidade de se eliminar a componente contínua, nem existem (em certos casos) grandes problemas em termos de largura de banda, surgindo por sua vez a necessidade de se manter constante a potência média de emissão.

Assim os códigos de linha dos sistemas ópticos são essencialmente códigos redundantes, onde a redundância é conseguida à custa do aumento do número de bits, ou seja, do tipo $nBmB$, onde n representa o número de bits de informação útil e m representa o número de bits usado para codificar essa informação antes de ser enviada para a linha (códigos de blocos).

São códigos que impõem como condição adicional a necessidade de sincronização para uma correcta descodificação. Os códigos de blocos apresentam ainda outra característica, que convém analisar, que é a de originarem ou poderem originar uma certa propagação de erros, cujo valor é não só função da dimensão dos blocos do código, mas também da regra da codificação.

O código mais simples é o 1B2B, normalmente usado em transmissões de baixo débito (2 a 8 Mbits/s), mas tem a desvantagem de conduzir a um aumento da taxa de transmissão. Para taxas mais elevadas usa-se normalmente um código do tipo 5B6B. Neste código procura-se codificar a informação de modo que o número de 1s seja igual (em média) ao de 0s, mantendo desta forma a potência óptica de transmissão constante.

Para além da codificação de linha é também necessário usar um *scrambler* para melhorar a eficiência do codificador 5B6B. Na recepção terá que ser efectuada a operação inversa para se recuperar o sinal original.

O sistema óptico de transmissão digital será assim composto pelos blocos apresentados na figura seguinte.

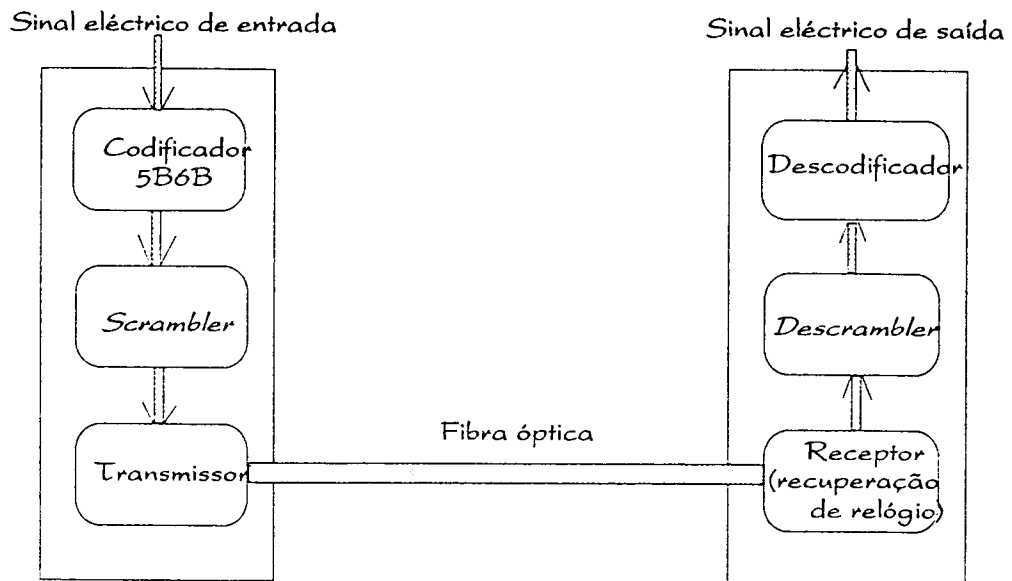


Figura 6.1 Diagrama de blocos dum sistema digital de transmissão óptico

Para a zona dos 800 nm pode-se usar o transmissor HFBR-14X2 da Hewlett Packard. Este transmissor opera em 820 nm usando como emissor um LED de GaAlAs, sendo considerado de baixo custo. Podem-se atingir taxas de 125 Mbd.

A figura 6.2 mostra o circuito de *drive* aconselhado para este emissor.

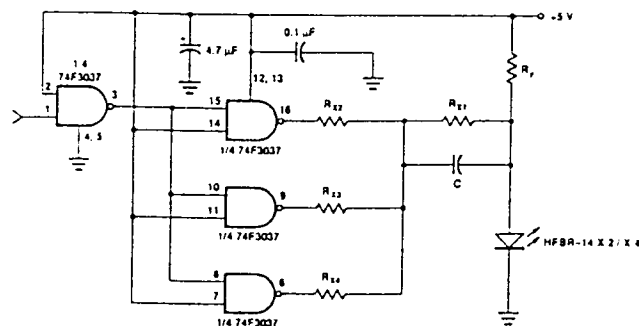


Figura 6.2 Circuito de *drive* para o transmissor

Para uma corrente de fonte de 100 mA, a tensão é dada no gráfico da figura seguinte.

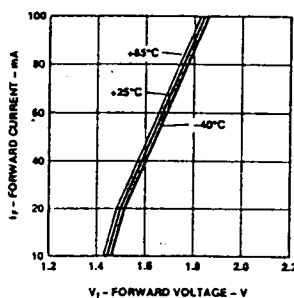


Figura 6.3 Gráfico da tensão em função da corrente do circuito de *drive* do LED

Do gráfico anterior retira-se a tensão de polarização de 1,84 V. A seguir apresentam-se os cálculos das resistências e condensadores do circuito de *drive* do LED.

$$R_f(\Omega) = \frac{(V_{cc} - V_f) + 3.97 (V_{cc} - V_f - 1.6 V)}{I_{N_{on}}(A)} \quad R_f = \frac{(5 - 1.84) + 3.97 (5 - 1.79 - 1.6)}{0.100}$$

$$R_{i1}(\Omega) = \frac{1}{2} \left(\frac{R_f}{3.97} \right) \quad R_f = \frac{3.16 + 6.39}{0.100} = 95.5 \Omega$$

$$R_{tq}(\Omega) = R_{i1} - 1 \quad R_{i1} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_f}{3.97} \right) = 12.0 \Omega$$

$$R_{s1} = R_{i1} = R_{t1} = 3 (R_{tq1}) \quad R_{tq} = 12.0 - 1 = 11.0 \Omega$$

$$C(pF) = \frac{2000(pS)}{R_{i1}(\Omega)} \quad R_{s1} = R_{i1} = R_{t1} = 3 (11.0) = 33.0 \Omega$$

$$C = \frac{2,000 \mu S}{12.0 \Omega} = 167 pF$$

Um bom receptor para este sistema a de transmissão, é o HFBR-24X6 da Hewlett Packard. Este receptor opera a taxas de 150 Mbd. As suas características são perfeitamente compatíveis com as características do transmissor. O detector é constituído por um fotodiodo PIN. Como pré-amplificador é usado uma configuração de transimpedância. Deste modo, o sinal óptico recebido é convertido para uma tensão analógica. A saída é um seguidor de emissor *bufferizado*. Oferece uma gama dinâmica de 23 dB (assumindo BER = 10^{-9}).

A figura seguinte mostra um diagrama esquemático simplificado dos componentes do receptor.

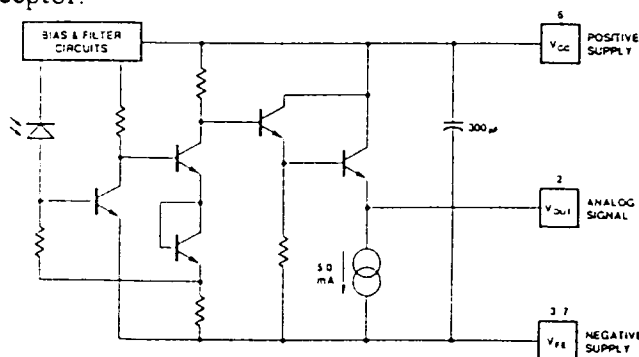


Figura 6.4 Diagrama simplificado do receptor

BIBLIOGRAFIA

Keiser, Gerd "Optical Fiber Communications", McGraw-Hill, 1991

O'Mahony, M.J. "Semiconductor laser optic amplifiers for use in future fiber systems", *IEEE Journal of Lightwave Technology*, Vol 6 no.4 April 1988

Senior, John M. "Optical Fiber Communications Principles and Practice", second edition, Prentice Hall 1992



FACULDADE DE ENGENHARIA
UNIVERSIDADE DO PORTO

BIBLIOTECA



0000101498