



Universidade de São Paulo - USP
Escola de Engenharia de São Carlos - EESC
Departamento de Engenharia Elétrica

Fotodetetores e Receptores Ópticos

SEL 366 Comunicações Ópticas

Prof. Dr. Ben-Hur Viana Borges

Agenda

- Introdução
 - Definições
 - Fundamentos físicos
 - Tipos de fotodetetores
 - MSM-Metal-Semicondutor-Metal
 - p/n
 - APD
 - Ruídos na detecção
 - Análise de um receptor óptico
 - Referências bibliográficas
- 

Introdução

Fotodetetor:

- **Finalidade:** Converter um sinal óptico em sinal elétrico;
- **Propriedades ópticas e elétricas:** determinadas pela estrutura de bandas de energia do material e pela ocupação destas bandas por elétrons.
- **Requisitos:**
 - Alta sensibilidade
 - Resposta rápida
 - Baixo ruído
 - Baixo custo
 - Alta confiabilidade
- Estes requisitos são mais adequadamente alcançados com fotodetetores baseados em semicondutores;
- Ao contrário de lasers, semicondutores com bandgap indireto podem ser utilizados;
- Materiais comumente utilizados: Si, Ge, GaAs, InP.

Detetores

Todos os fotodetetores podem ser caracterizados pelas figuras de mérito da eficiência quântica, responsividade e sensibilidade.

A **eficiência quântica (η)** determina quão eficientemente o dispositivo converte fótons em elétrons na banda de condução. Para um dispositivo ideal, sem ganho óptico, a eficiência quântica se aproxima do valor unitário.

Por outro lado, do ponto de vista experimental, o parâmetro mais importante é a **Responsividade (\mathcal{R})**, que representa o quanto de *fotocorrente (I)* é gerada pela *potência óptica total (P)* que incide na área de detecção.

A **Sensibilidade** do fotodetector é descrita em termos da mínima potência incidente necessária para que aconteça uma relação sinal ruído aceitável. Isto é, a partir de um determinado valor de potência óptica, pode-se distinguir adequadamente o sinal detetado do ruído do detetor. Vale mencionar que este ruído é essencialmente chamada “*corrente de escuro*”, ou seja, a corrente produzida pelo fotodetector mesmo na ausência de iluminação.

Definições

A eficiência quântica é definida como a probabilidade de um fóton incidente gerar um par elétron-lacuna que contribua para a geração de fotocorrente. Assim,

$$\eta = \gamma(1 - R)\left(1 - e^{-\alpha(\nu)d}\right)$$

onde:

γ é a porcentagem dos portadores de carga que contribuem para a corrente

R é o coeficiente de reflexão

$\alpha(\nu)$ é o coeficiente de absorção

d é a distância propagada pelo fóton até ser absorvido

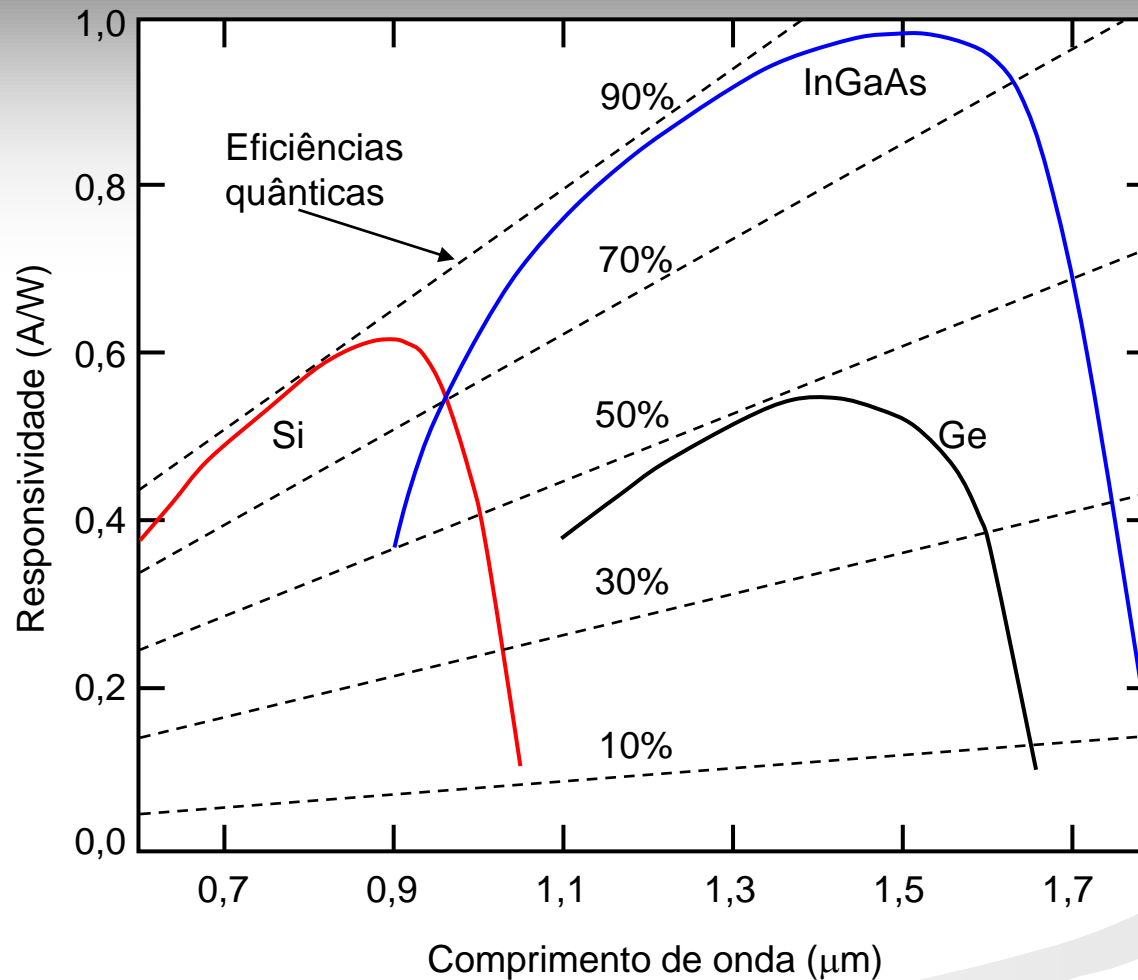
Outro parâmetro importante é a Responsividade, definida como a razão entre a fotocorrente gerada e a potência eletromagnética incidente. Assim,

$$\mathfrak{R} = \frac{\eta q}{h\nu}$$

A fotocorrente primária, produzida pela absorção de potência óptica, pode então ser escrita em termos da Responsividade, ou seja

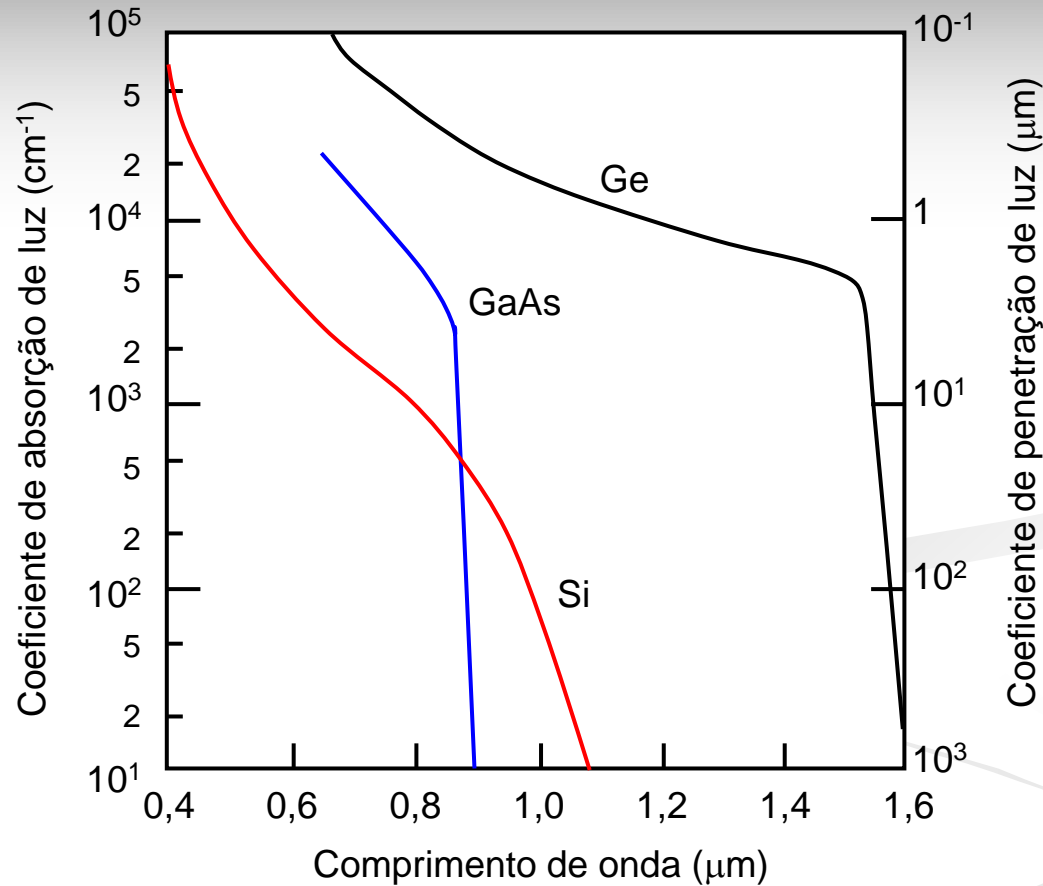
$$I_p = \mathfrak{R}P_0$$

Responsividades de alguns fotodiodos



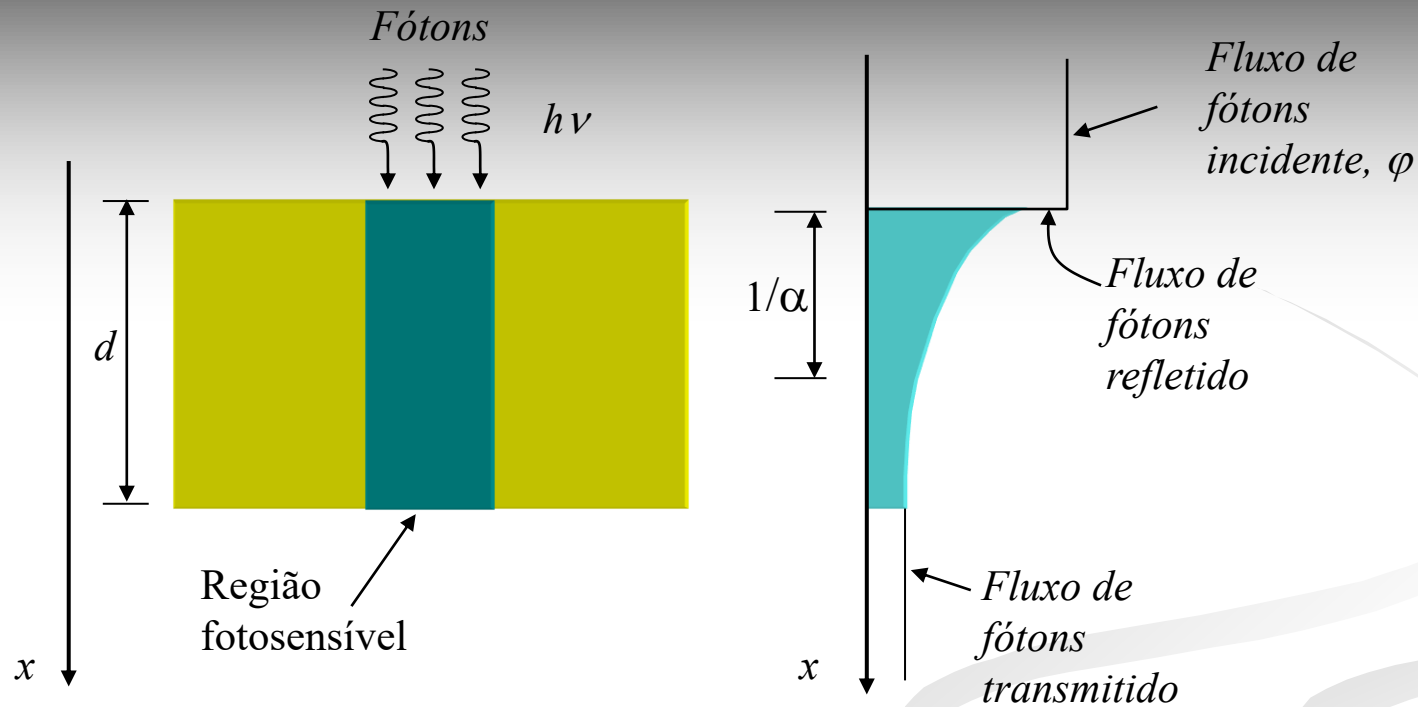
Comparação da responsividade e eficiência quântica em função do comprimento de onda para vários fotodiodos *pin*.

Coeficiente de absorção versus comprimento de onda



Coeficiente de absorção óptica em função do comprimento de onda para Si, Ge e GaAs.

Processo de absorção de um campo e.m.



Propagação de um campo e.m. através de um meio absorvente.

- Em semicondutores (onde o índice de refração é tipicamente 3,5) o coeficiente de reflexão na interface ar/semicondutor é $R \approx 0,3$ (ou 30% de reflexão);
- O Coeficiente de transmissão é dado por $T=1-R$.
- $\alpha(\nu)$ é o coeficiente de absorção que depende fortemente da frequência. A distância propagada dentro de um meio é dada por $d=1/\alpha(\nu)$ antes de ser absorvido.

Processo de absorção de um campo e.m.

Representando matematicamente em termos da intensidade I , temos:

$$\frac{dI}{dx} = -\alpha(\nu)I$$

De onde obtemos:

$$I(x - x_0) = I(x_0)e^{-\alpha(\nu)(x-x_0)}$$

Processos de absorção:

- 1) Transições **interbanda**. Quando um fóton interage com um elétron de valência, promovendo-o para um estado não-ocupado na banda de condução;
- 2) Transições **intra-banda**. Ocorrem quando um elétron de valência é excitado para um estado não-ocupado na banda de valência, ou um elétron na banda de condução é excitado para um estado não-ocupado na banda de condução.

Transições inter- e intra-banda

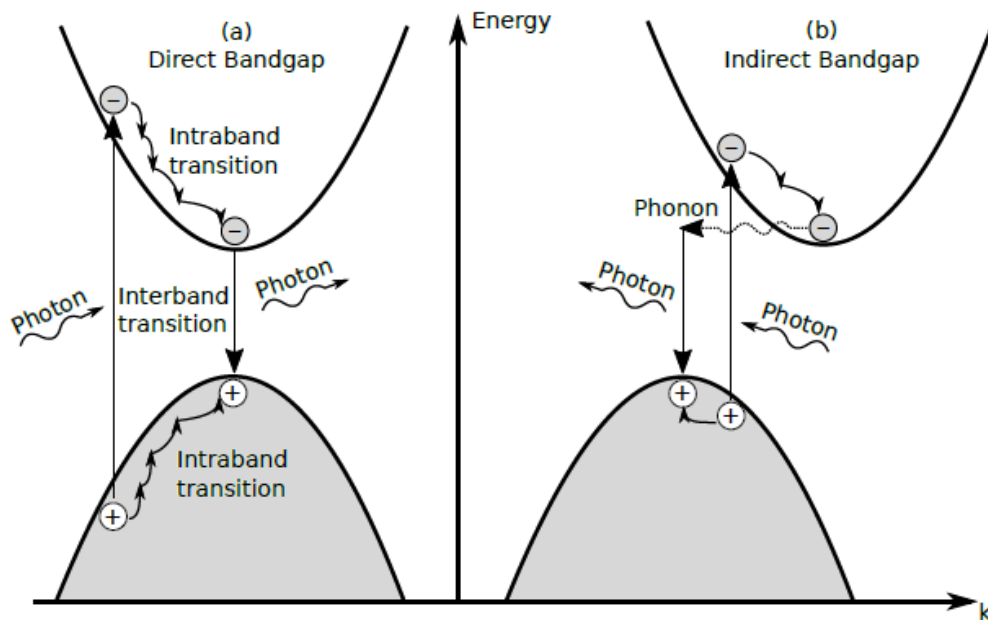


Figure 2.2: Diagram of the typical photoexcited charge-carrier evolution in a (a) direct and (b) indirect band-gap material plotted vs energy and wave-vector, k . An incident photon is absorbed by an electron in the valence band of the material, thereby creating an electron-hole pair and promoting the electron to the conduction band via an interband transition. The electron and hole proceed to relax to the bottom of the conduction band and top of the valence band, respectively, via a series of intraband transitions, typically enabled by electron-phonon scattering. Finally the electron-hole pair recombine across the band-gap under emission of a photon with an energy corresponding to the band-gap. In case of the indirect band-gap material, the electron must additionally receive a change in wave-vector, typically via an electron-phonon scattering event.

Intraband: It corresponds to the excitation of an electron to another state in the same band. Indeed such transition is only possible via phonon interaction.

Interband: Occur between these two bands separated by an energy gap E_g .

MSM - Metal Semicondutor Metal

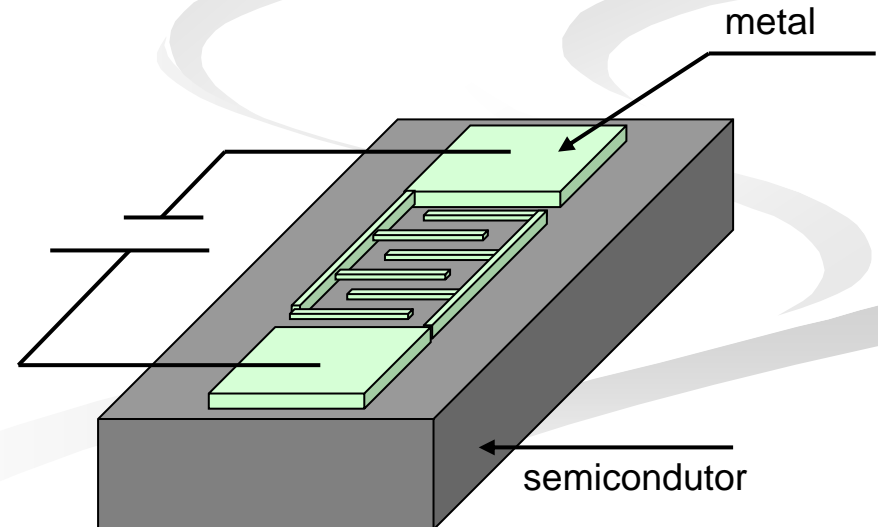
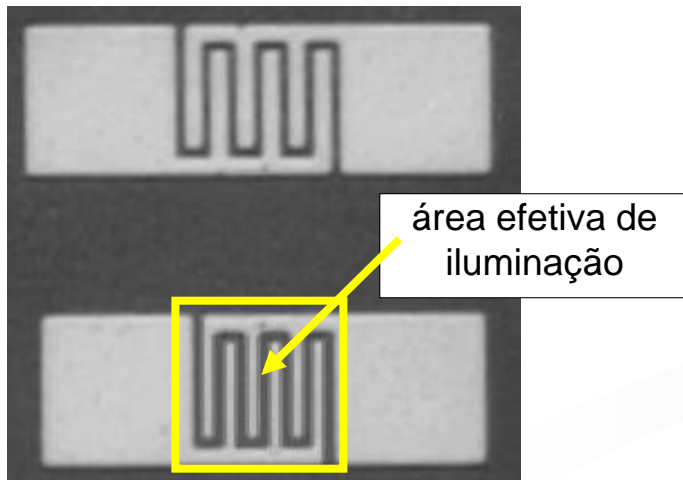
Fotodetector MSM-Metal-Semicondutor-Metal

MSM é um dispositivo planar que consiste de dois contatos metálicos do tipo Schottky na forma de **dedos interdigitais** como mostra a figura abaixo.

Permite o **aumento da área efetiva de absorção** sem que haja considerável aumento da capacitância intrínseca e da distância a ser percorrida pelos portadores gerados, possibilitando o aumento na velocidade de resposta do dispositivo.

As maiores vantagens do MSM em relação aos outros fotodetectors são:

- simplicidade de fabricação;
- baixo ruído, baixa capacitância;
- compatibilidade com circuitos integrados.



Formar dois diodos Schottky próximos um do outro na mesma superfície do semiconductor dopado (o contato Schottky é baseado na diferença entre a função trabalho do semiconductor e a do metal);

Polarizar a estrutura resultante com uma tensão DC;

Um dos diodos torna-se reversamente polarizado, formando uma região de depleção que tenderá a varrer todos os foto portadores;

O outro diodo torna-se diretamente polarizado permitindo que a foto-corrente flua para circuito externo como se tivesse formado um contato ôhmico;

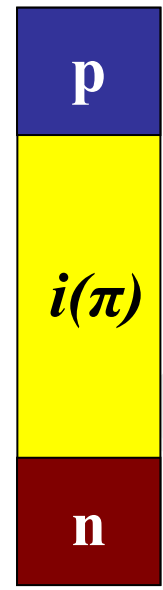
É desejável manter a distância entre os eletrodos metálicos a menor possível, o que leva à escolha de um arranjo interdigital para os mesmos

MSMs apresentam vários atrativos, tais como:

- Apenas um tipo de dopagem é requerida;
- Apenas um tipo de semiconductor é requerido;
- Fabricação da estrutura interdigital é compatível com processos de circuitos integrados, o que permite a obtenção de processos de resolução linha muito fina ($1\mu\text{m}$ de largura), necessários para dispositivos com elevado grau de interdigitação;
- Dispositivo pode também apresentar capacitância muito baixa.

Fotodetectores

pin:



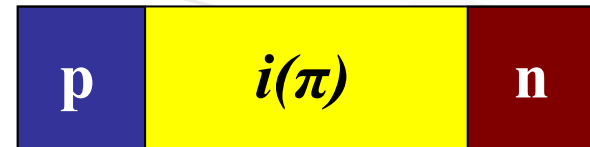
Fotodetector *pin*

- Apresenta uma camada espessa de material intrínseco (camada *i*) sandwichada entre as camadas *p* e *n* entre dois contatos ôhmicos (uma junção entre dois (semi)condutores que obedecem à lei de Ohm, isto é, sua corrente é proporcional à tensão aplicada).
- O material intrínseco garante o alargamento da região de alto campo elétrico (região de depleção) por boa parte de sua extensão.
- Como existem muito poucos portadores de carga na camada *i*, a região de carga espacial atinge toda a região entre as camadas *p* e *n*. Quando portadores fluem através do material, alguns se recombinam e desaparecem.
- A distância média que os portadores percorrem é definida como comprimento de difusão, e o tempo que estes portadores levam para se recombinar é denominado **tempo de vida dos portadores**.

Assim, temos que:

$$L_n = \sqrt{D_n \tau_n}$$

$$L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$$



onde:

D_n e D_p são os coeficientes de difusão para elétrons e lacunas, dados em (cm²/s)

τ_n e τ_p são os tempos de vida para elétrons e lacunas.

Fotodetector *pin*

Vantagens desta configuração:

- A largura da região de carga espacial torna-se consideravelmente maior;
- O aumento desta largura reduz a capacitância da junção;
- Por causa deste aumento na largura, a razão entre a corrente gerada na região de carga espacial para a corrente gerada nas regiões de difusão também é aumentada, melhorando a resposta do diodo.

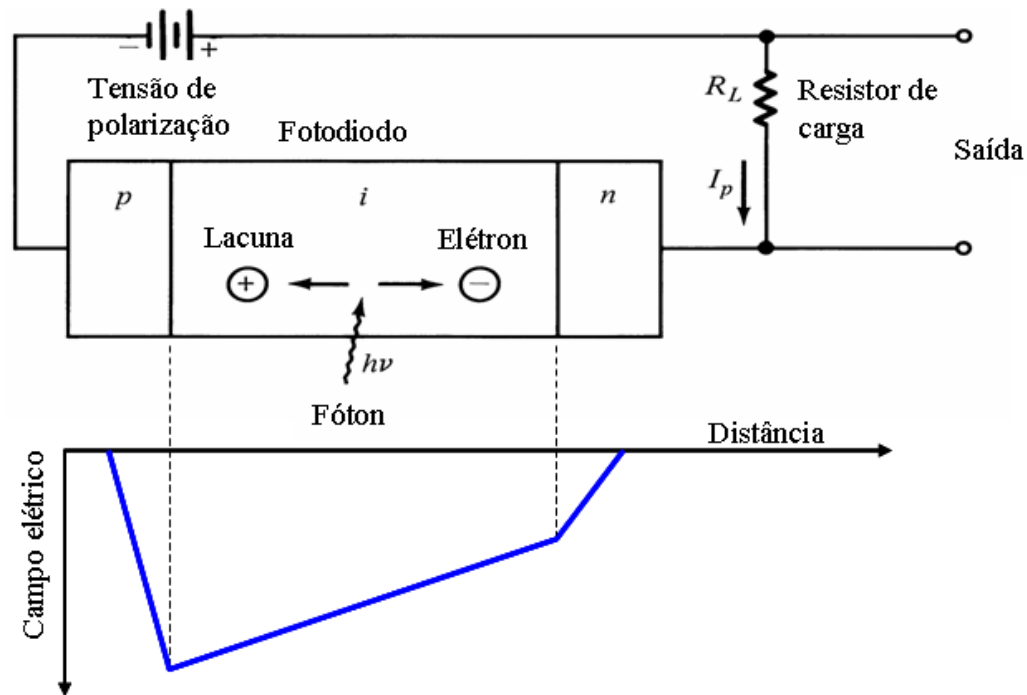


Diagrama de bandas de energia para um *pin*

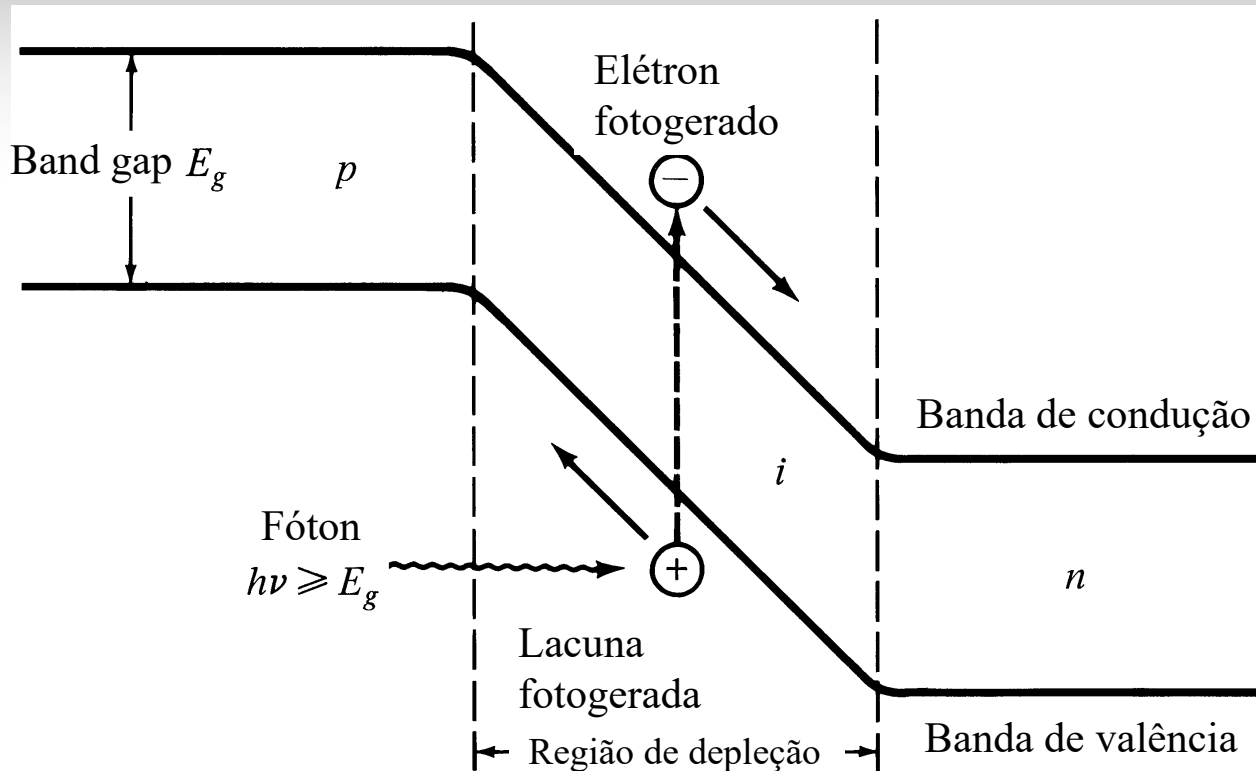
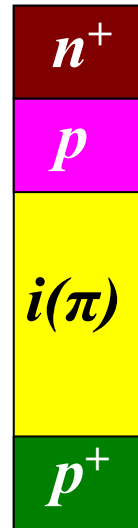


Diagrama de bandas de energia para um fotodetector *pin*. Fótons com energia \geq energia de *bandgap* podem gerar pares elétron-lacunas livres.

APD - Fotodetetor de Avalanche



Descrição das camadas:

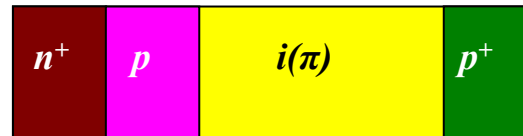
- Camada epitaxial *tipo-p* altamente resistiva, $i(\pi)$, sobre um substrato p^+ ;
- Camada *tipo-p* obtida por meio de difusão ou implantação iônica diretamente sobre a camada $i(\pi)$;
- Construção de uma camada n^+ sobre a camada *tipo-p*.

Fotodetector de avalanche - APD

É essencialmente um fotodiodo PIN no qual a tensão reversa aplicada é tão alta que o dispositivo opera no limiar de ruptura.

Elétrons e lacunas podem ionizar por impacto átomos do semiconductor e criar pares elétron-lacunas adicionais. Este processo introduz ganho interno e a fotocorrente se torna:

$$I_p = M \mathcal{R} P_0$$

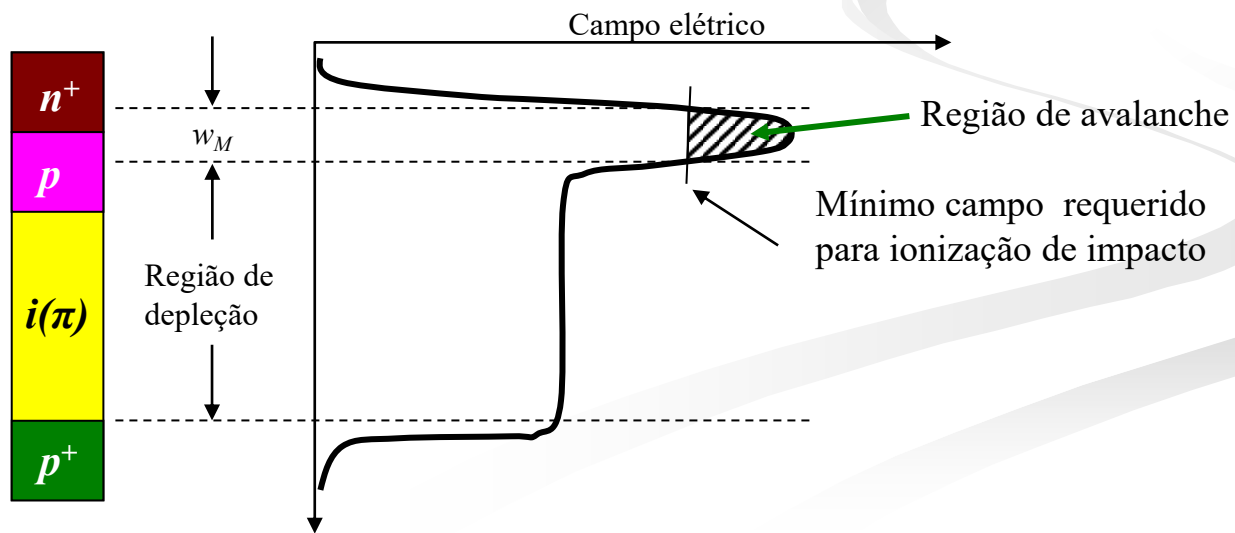


- O dispositivo é intrinsecamente ruidoso devido à natureza estatística do processo de geração de portadores. Isso implica que a corrente total fluindo no circuito externo sofre flutuações (ruído) em torno do valor médio. Ganho M é um valor médio.
- O valor médio quadrático destas flutuações (ruído de disparo – “shot noise”), para um medidor de largura de banda B , é proporcional ao valor médio da corrente total.
- No fotodetector APD, enquanto a potência do sinal é multiplicada pelo fator M^2 , a potência do ruído é multiplicada por $M^2 x > M^2$. Portanto, o ruído cresce mais que o sinal por um fator x , chamado fator de excesso de ruído.

Fotodiodo de avalanche - APD

O APD multiplica internamente a foto-corrente antes que ela entre no circuito do amplificador, aumentando a sensibilidade do receptor da seguinte forma:

- Os portadores foto-gerados devem atravessar a região onde um campo elétrico muito elevado está presente;
- Nesta região de campo elevado, elétrons ou lacunas foto-gerados ganham energia e ionizam elétrons não-livres na banda de valência após colisão com os mesmos;
- Este mecanismo de ionização é denominado **ionização de impacto**;
- Os novos portadores criados são também acelerados pelo campo elétrico, ganhando ainda mais energia causando novas ionizações por impacto. Este processo é conhecido como **efeito avalanche**.



Fotodiodo de avalanche - APD

Operação do fotodiodo APD:

1. Quando uma tensão reversa de baixa intensidade é aplicada, a maior parte da queda de tensão ocorre na junção pn^+ ;
2. A região de depleção alarga com o aumento da tensão de polarização até um valor de 5% a 10% abaixo do mínimo requerido para ruptura de avalanche;
3. A luz entra no dispositivo pela região p^+ e é absorvida na região π , que age como uma região de coleta de fotoportadores gerados;
4. Quando absorvido, o fóton cede sua energia criando pares $e-h$ que são então separados pelo campo elétrico na região π ;
5. Os elétrons derivam pela influência deste campo para a junção pn^+ onde existe um campo ainda mais elevado. É nesta região que a multiplicação de portadores ocorre.

Obs.: O número médio de pares $e-h$ criados por um portador por unidade de distância propagada é chamado de taxa de ionização.

Fotodiodo de avalanche - APD

Fator de multiplicação:

$$M = \frac{I_M}{I_p}$$

Onde: I_M é o valor médio da corrente de saída e I_p é a fotocorrente primária não multiplicada. A responsividade de um APD é dada por:

$$\mathfrak{R}_{APD} = \frac{\eta q}{h\nu} M = \mathfrak{R}_{pin} M$$

Exemplo: um dado APD tem eficiência quântica de 65% para $\lambda=900\text{nm}$. Suponha que $0,5\mu\text{W}$ de potência óptica produza uma foto-corrente multiplicada de $10\mu\text{A}$. Encontre M.

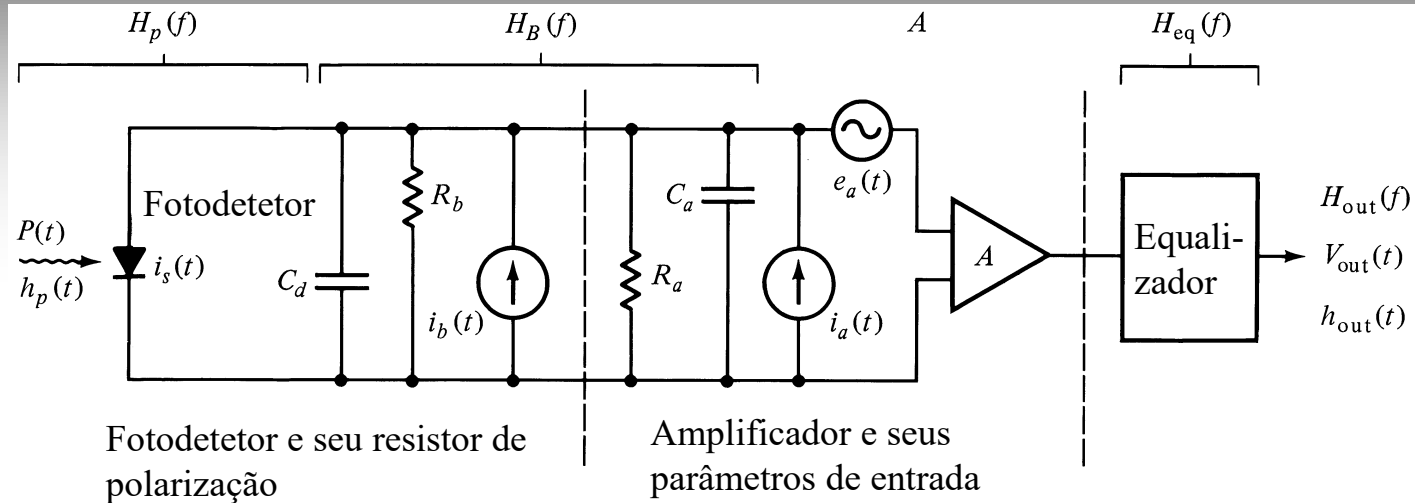
$$I_p = \mathfrak{R}P_0 = \frac{\eta q}{h\nu} P_0 = \frac{\eta q \lambda}{hc_0} P_0 = 0,235\mu\text{A}$$

$$M = \frac{I_M}{I_p} = 43$$

Assim, a foto-corrente primária é multiplicada por 43.

Ruídos em fotodetetores

Ruído em fotodeteores



Esquema de um receptor óptico

A detecção de sinais fracos requer que o fotodetector e seu circuito de amplificação sejam otimizados para uma razão Sinal/Ruído desejada. É a corrente de ruído que determina o nível mínimo de potência óptica que pode ser detectado.

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{potência do sinal devido à fotocorrente}}{\text{potência do ruído do fotodetector} + \text{potência do ruído do amplificador}}$$

A potência mínima detetável é definida como a potência óptica necessária para produzir uma relação $S/N=1$.

3.3.1 Quantum Limit for Photodetection

The **quantum limit is** defined for an ideal photodiode (no thermal noise, no dark current, no shot noise, and 100% of quantum efficiency) and can be used as the reference point to compare different receiver architectures. In the quantum limit case the Gaussian assumption is no longer valid, and Poisson statistics should be used instead. Assuming that N_p is the average number of photons in each 1 bit (the number of photons in a 0 bit is zero), the probability for the formation of m e-h pairs is given by *Poisson distribution*:

$$P_m = \exp(-N_p) N_p^m / m!. \quad (3.130)$$

Using our earlier definitions, $\Pr(1|0) = 0$ because no e-h pairs are formed when $N_p = 0$, while $\Pr(0|1) = P_0 = \exp(-N_p)$. Therefore, the BER for **quantum limit is** as follows:

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \exp(-N_p). \quad (3.131)$$

Ruído em fotodetetores

Condições para máxima relação S/N:

- 1) Fotodetector com alta eficiência quântica (implica na geração de potências ópticas mais elevadas);
- 2) Amplificadores com baixo ruído.

Fontes de ruído:

- Ruído quântico (ou de disparo):
- Corrente de escuro;
- Ruído térmico

Se um sinal modulado com potência $P(t)$ incide sobre o detetor, a foto-corrente primária (não-multiplicada) é:

$$i_{ph}(t) = \frac{\eta q}{h\nu} P(t)$$

Esta corrente consiste de uma corrente dc I_p (corrente média devido à potência do sinal), e uma corrente de sinal, $i_p(t)$.

$$\langle i_S^2 \rangle = \langle i_p^2(t) \rangle$$

para o *pin*

$$\langle i_S^2 \rangle = \langle i_p^2(t) \rangle M^2$$

para o *APD*

Para um sinal senoidal com índice de modulação m , a componente de sinal é dada por:

$$\langle i_p^2(t) \rangle = \frac{m^2}{2} I_p^2$$

Ruído em fotodetetores

1) Ruído quântico:
$$\langle i_Q^2 \rangle = 2qI_p BM^2 F(M)$$

onde:

$F(M)$ é a figura de ruído associada à natureza aleatória do processo de avalanche.

$F(M) \approx M^x$ ($0 \leq x \leq 1$).

Para o *pin*, M e $F(M)$ são iguais a 1.

B é a largura de banda do receptor.

2) Corrente de escuro:

Duas contribuições: corrente devido à estrutura do detetor e corrente de superfície

a) Corrente devido à estrutura:

$$\langle i_{DB}^2 \rangle = 2qI_D M^2 F(M) B$$

onde: I_D é a corrente de escuro primária (não-multiplicada) da estrutura do detetor.

b) Corrente de superfície (fuga):

$$\langle i_{DS}^2 \rangle = 2qI_L B$$

onde: I_L é a corrente de fuga primária. Esta corrente não é afetada pelo efeito de avalanche.

Ruído em fotodetetores

3) Ruído térmico (do amplificador conectado ao fotodetetor):

$$\langle i_T^2 \rangle = \frac{4k_B T}{R_L} B \quad \text{onde: } k_B \text{ é a constante de Boltzmann e } T \text{ é a temperatura absoluta.}$$

Como estas correntes não são correlacionadas, o ruído total pode ser escrito como:

$$\langle i_N^2 \rangle = \langle i_Q^2 \rangle + \langle i_{DB}^2 \rangle + \langle i_{DS}^2 \rangle + \langle i_T^2 \rangle$$

Assim, a relação S/N torna-se:

$$\frac{S}{N} = \frac{\langle i_p^2 \rangle M^2}{\langle i_N^2 \rangle} = \frac{\langle i_p^2 \rangle M^2}{2q(I_p + I_D)M^2 F(M)B + 2qI_L B + \frac{4k_B T}{R_L} B}$$

O Valor de M que maximiza a relação S/N pode ser obtido diferenciando-se a equação acima com respeito a M e igualando a equação resultante a zero. Assim,

$$M_{\text{ótimo}}^{x+2} = \frac{2qI_L + \frac{4k_B T}{R_L}}{xq(I_p + I_D)}$$

As correntes de ruído dominantes no *pin* são: a corrente de ruído térmico (i_T) e as dos elementos ativos do circuito amplificador. Para APDs, o ruído térmico não tem tanta importância, e os ruídos inerentes ao fotodetetor são normalmente dominantes.

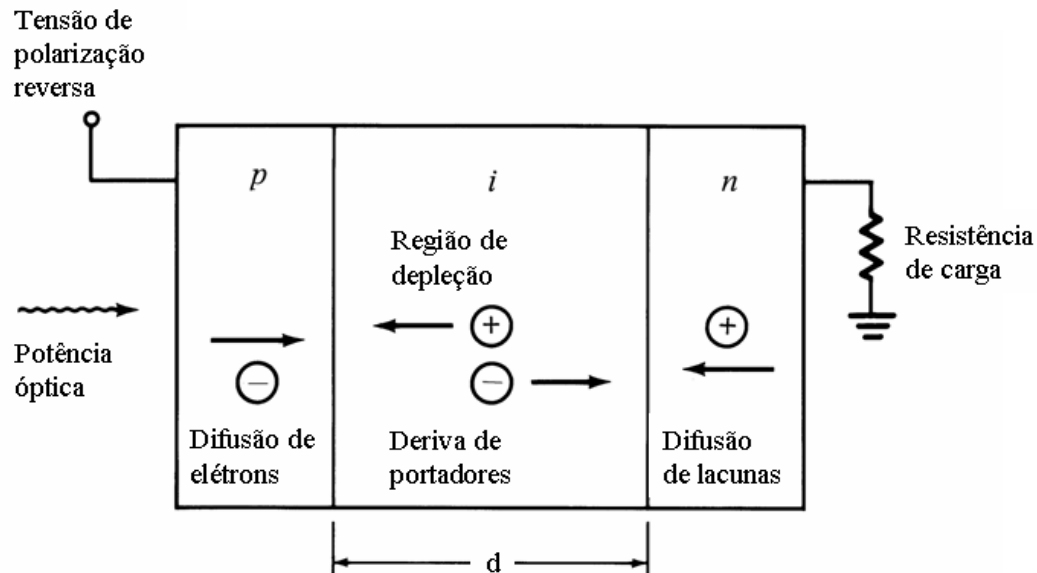
Tempo de resposta do detetor

Resposta temporal:

A luz entra no detetor através da camada p e produz pares e-h à medida que é absorvida pelo material. Os pares gerados dentro da camada de depleção (ou dentro de um comprimento de difusão) são separados pelo campo elétrico resultando em um fluxo de corrente.

Assim, a resposta temporal depende dos seguintes fatores:

- 1) Tempo de trânsito dos foto-portadores na região de depleção;
- 2) Tempo de difusão dos foto-portadores gerados fora da região de depleção;
- 3) Constante RC do fotodetetor e seu respectivo circuito.



Tempo de resposta do detetor

Os parâmetros do fotodetetor responsáveis por estes fatores são:

- Coeficiente de absorção (α_s);
- Largura da região de depleção (d);
- Capacitâncias da junção e do encapsulamento;
- Resistência de carga do fotodetetor;
- Resistência de entrada do amplificador;
- Resistência em série do fotodetetor (pode ser desprezada, apenas poucos Ohms).

O Tempo de trânsito dos foto-portadores na região de depleção é dado por:

$$t_d = \frac{d}{v_d} \quad v_d \text{ é a velocidade de deriva dos foto-portadores .}$$

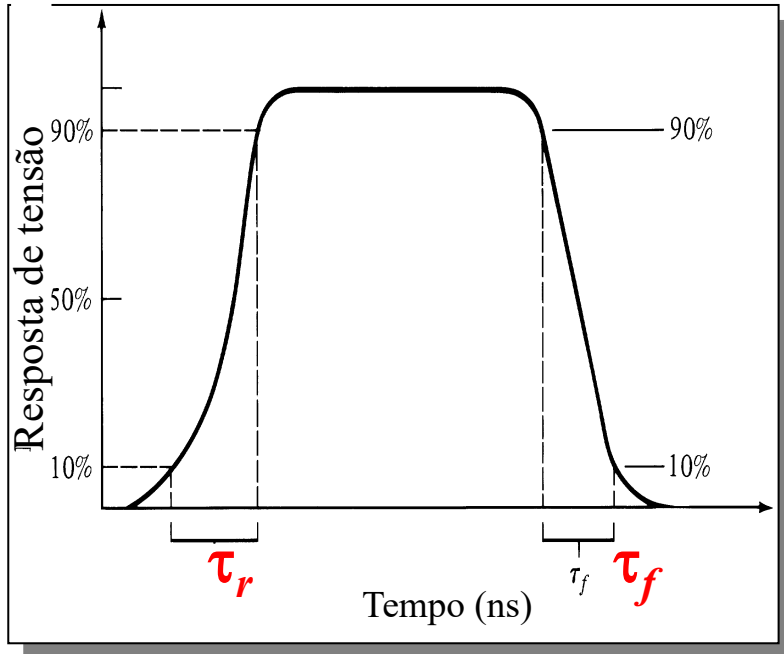
Para Si, $v_d = 8,4 \times 10^6$ cm/s para elétrons e $v_d = 4,4 \times 10^6$ cm/s para lacunas, supondo intensidade de campo de 2×10^4 V/m.

Tipicamente, o tempo de resposta é de 0,1ns para $d=10\mu\text{m}$.

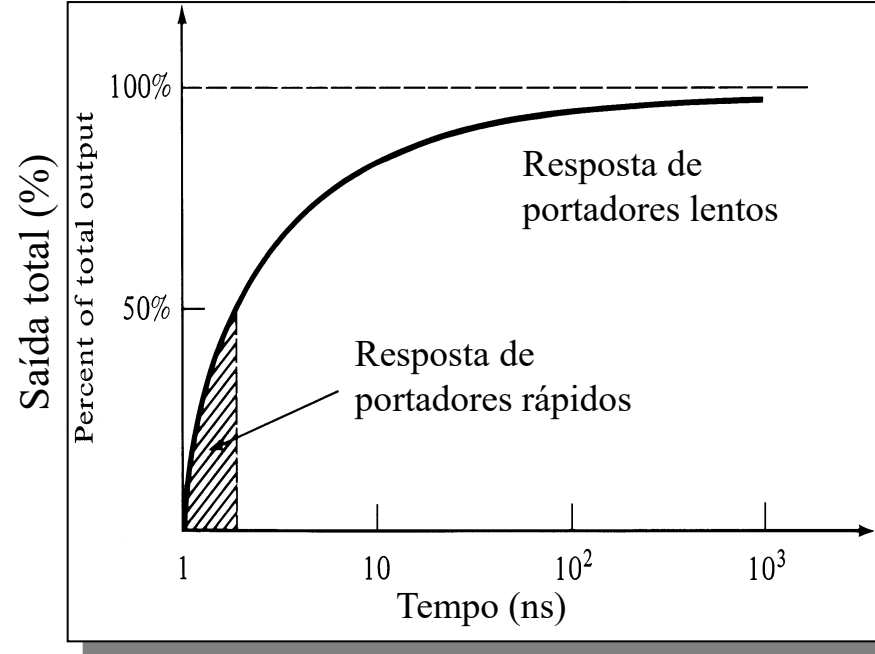
Para operação em alta velocidade, os portadores devem ser gerados na região de depleção (ou muito próximos a ela).

Tempo de resposta do detetor

O efeito de um longo tempo de difusão: Para um detetor totalmente depletado, o tempo de subida (τ_r) e o tempo de descida (τ_f) são iguais. O mesmo não acontece para baixas tensões de polarização (depleção total não ocorre) e o tempo de coleta de fótons começa a se tornar um problema. Os pares e-h se difundem mais lentamente.



Resposta a um pulso óptico de um fotodiodo totalmente depletado de portadores.



Resposta típica de um fotodiodo não totalmente depletado de portadores.

Tempo de resposta do detector

Padrão de respostas de um fotodetector para um pulso de entrada retangular (a):

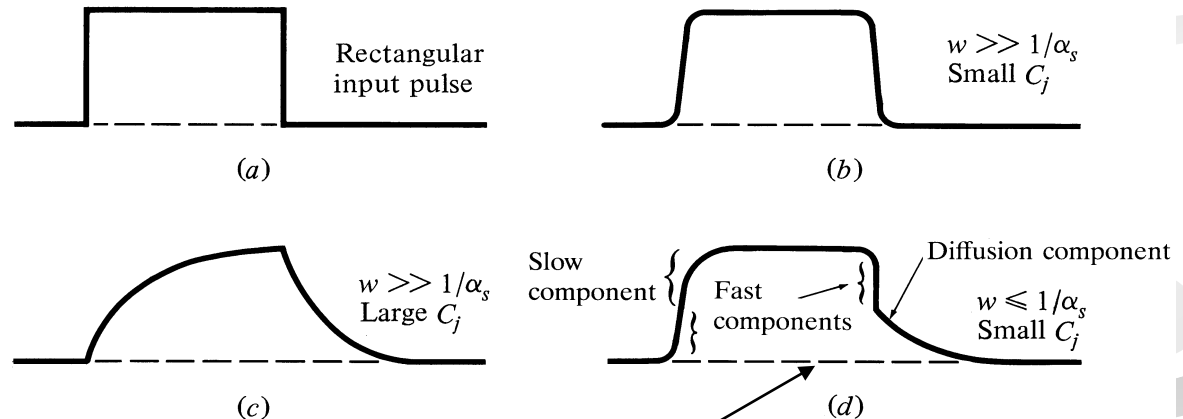
b) Fotodetector de baixa capacitância com $d \gg 1/\alpha_s$;

c) Fotodetector de capacitância mais elevada e com $d \gg 1/\alpha_s$. Limitado pela constante $R_L C_j$;

d) Fotodetector com largura da região de depleção muito estreita. Componentes rápidas devido aos fotoportadores gerados na região de depleção. Componentes lentas, devido à difusão de portadores criados dentro de um comprimento de difusão a partir da borda da região de depleção. Neste caso a capacitância de junção também aumenta.

$$C_j = \frac{\epsilon_s A}{d}$$

ϵ_s = permissividade
 A = área da camada de difusão



Componentes rápidas na subida: devidas aos portadores gerados na região de depleção. **Na descida** os portadores são coletados rapidamente.

Componentes lentas: devidas à difusão de portadores criados a uma distância L_n da borda da região de depleção.

Tempo de resposta do detetor

Supondo R_T como a combinação dos resistores de carga e do amplificador, e C_T como a soma das capacitâncias da junção, do encapsulamento e do amplificador, então o fotodetetor se comporta como um filtro RC com a seguinte resposta:

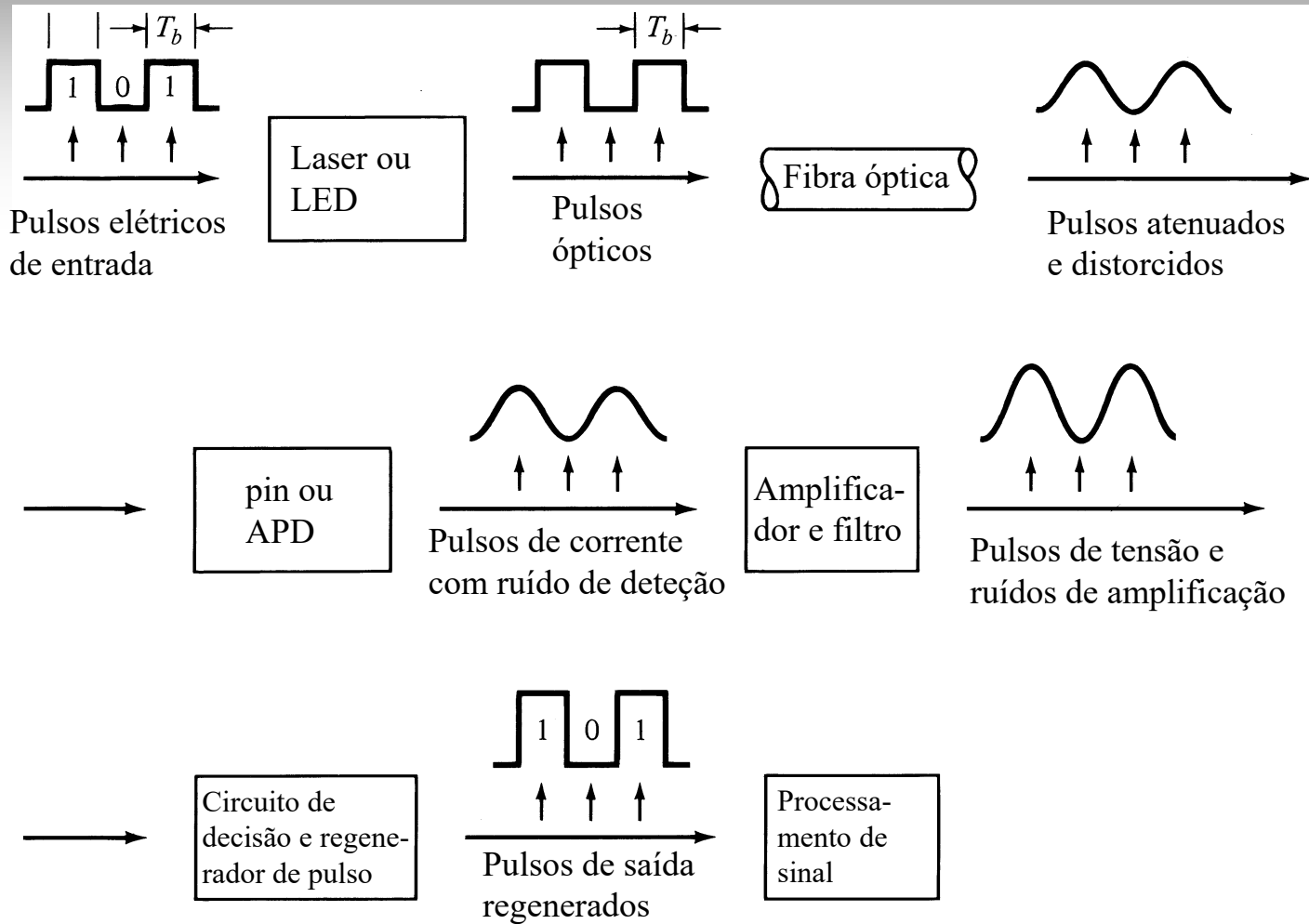
$$B = \frac{1}{2\pi R_T C_T}$$

$$R_T = R_S // R_L$$

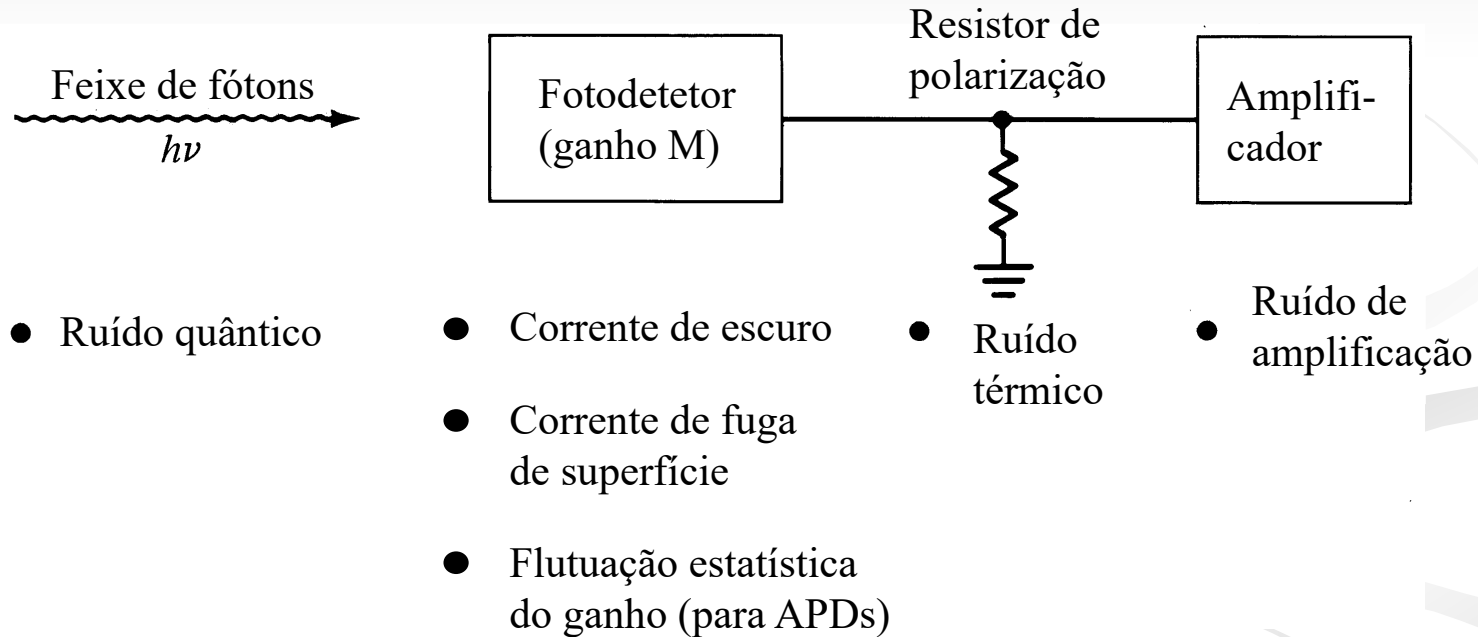
$$C_T = C_{\text{amplificador}} + C_{\text{junção}} + C_{\text{encapsulamento}}$$

Transmissão de Sinais Digitais

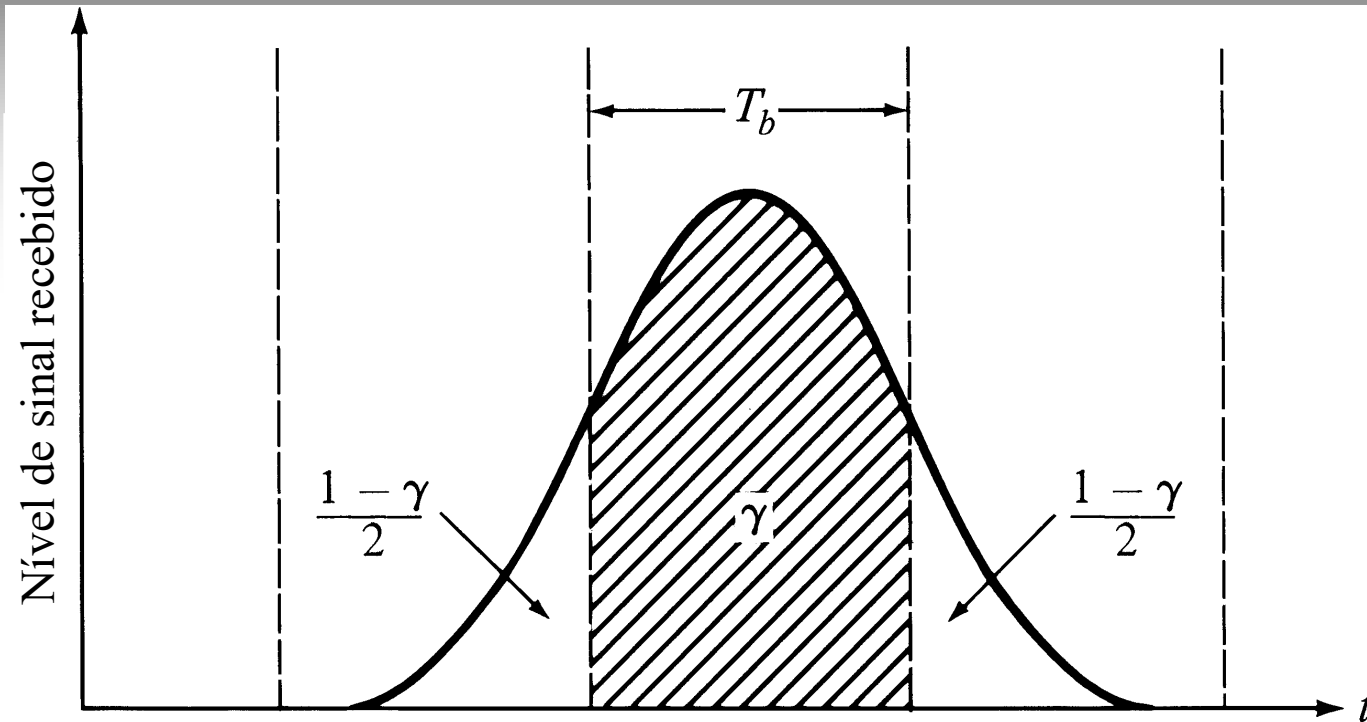
Fluxo de sinal através de um enlace óptico



Fontes de ruído e perturbações no sinal



Fontes de Erro: Espalhamento de pulso



Espalhamento de pulso produz interferência intersimbólica e uma consequente redução na taxa de transmissão para compensar este efeito.

(γ) : fração de energia que permanece na posição correta.

$(1-\gamma)$: porção que resulta no espalhamento do pulso.

Distribuição de probabilidades para lógica 0 and 1

Taxa de erro de bit: BER

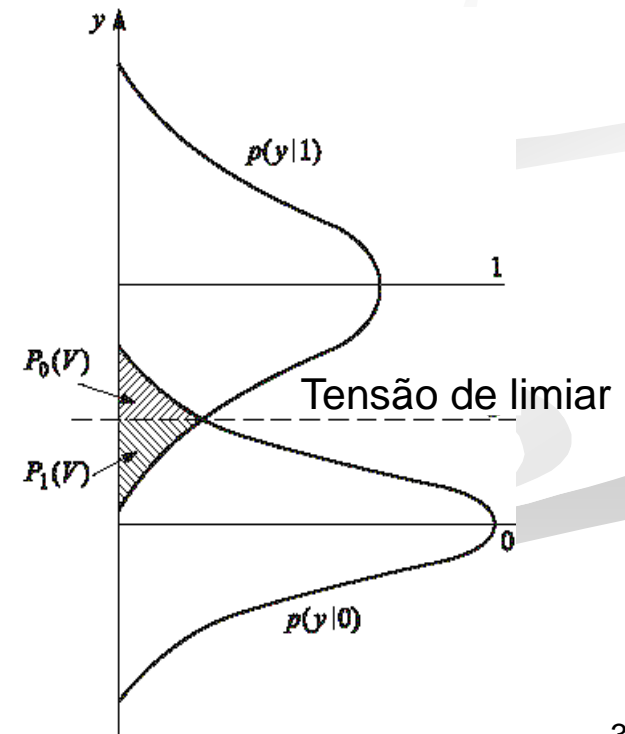
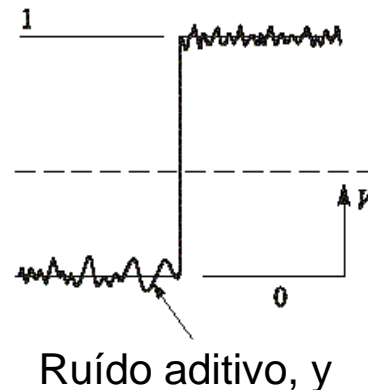
Definida como número de ocorrências de erro em um intervalo t dividido pelo número de pulsos zeros e uns transmitidos neste intervalo, ou seja:

$$BER = \frac{N_e}{N_t} = \frac{N_e}{B t} \quad (\text{valor típico: } BER=1 \times 10^{-9})$$

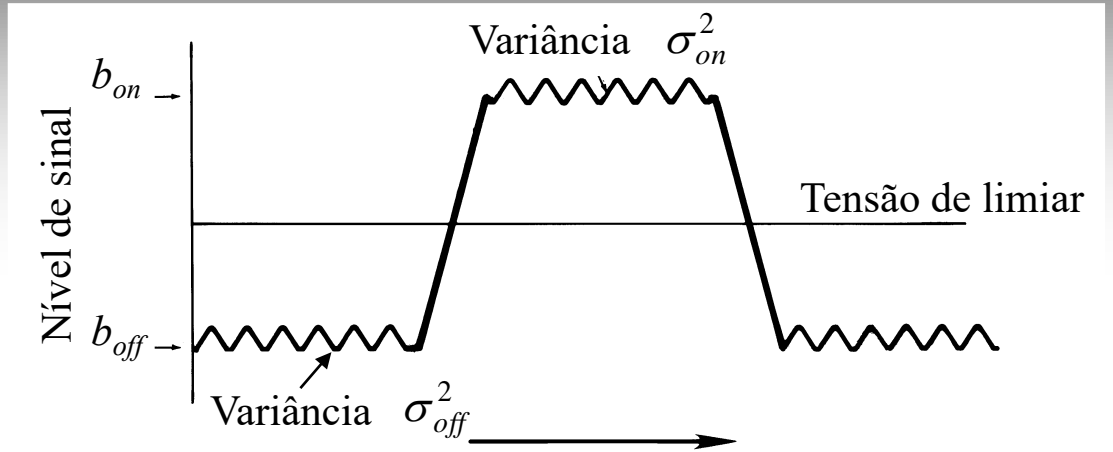
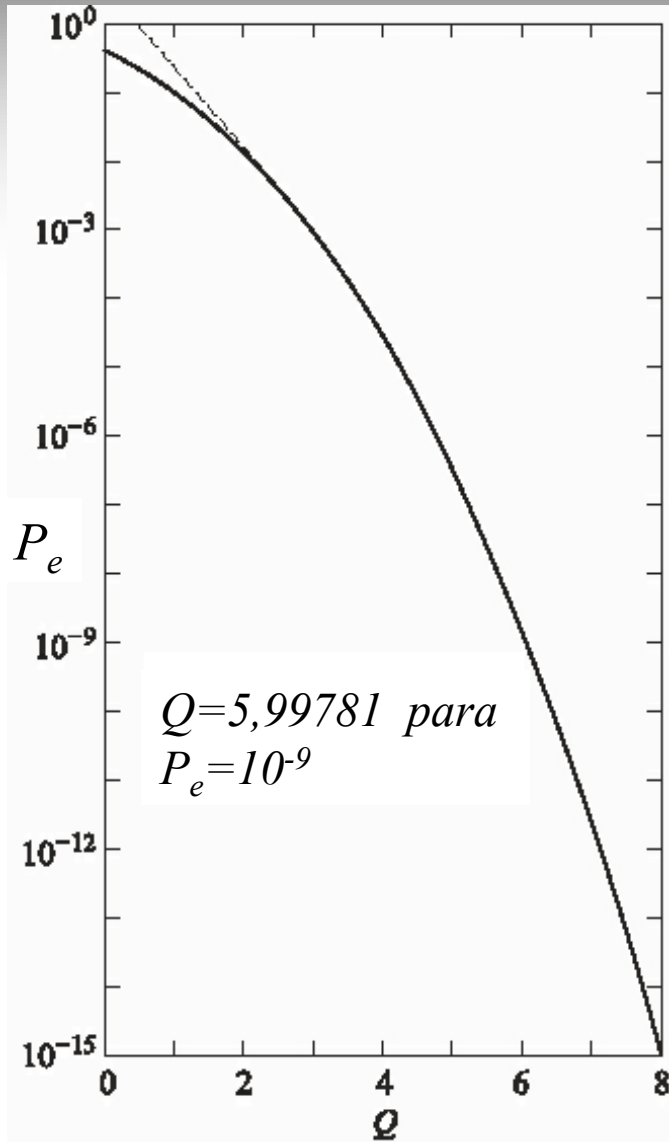
$$B = \frac{1}{T_b}$$

taxa de transmissão do pulso.

Onde: $p(y|x)$ é probabilidade da saída ser y quando x é transmitido (*i.e.*, de y ser maior ou menor que a tensão de limiar.)



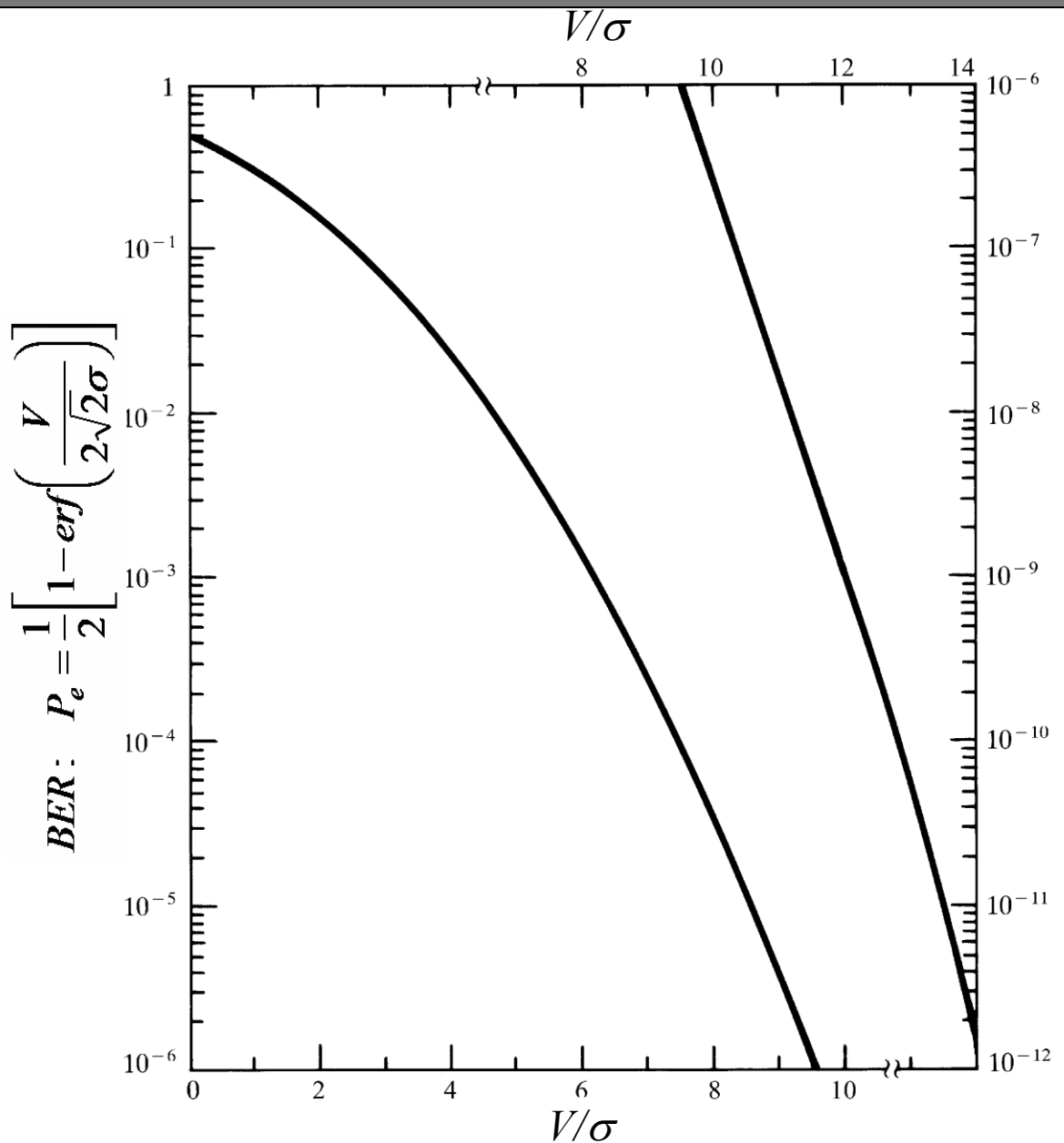
BER versus Fator Q



$$P_e(Q) = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{Q}{\sqrt{2}} \right) \right]$$

$$Q = \frac{b_{on} - v_{th}}{\sigma_{on}}$$

BER versus relação sinal ruído (S/N)

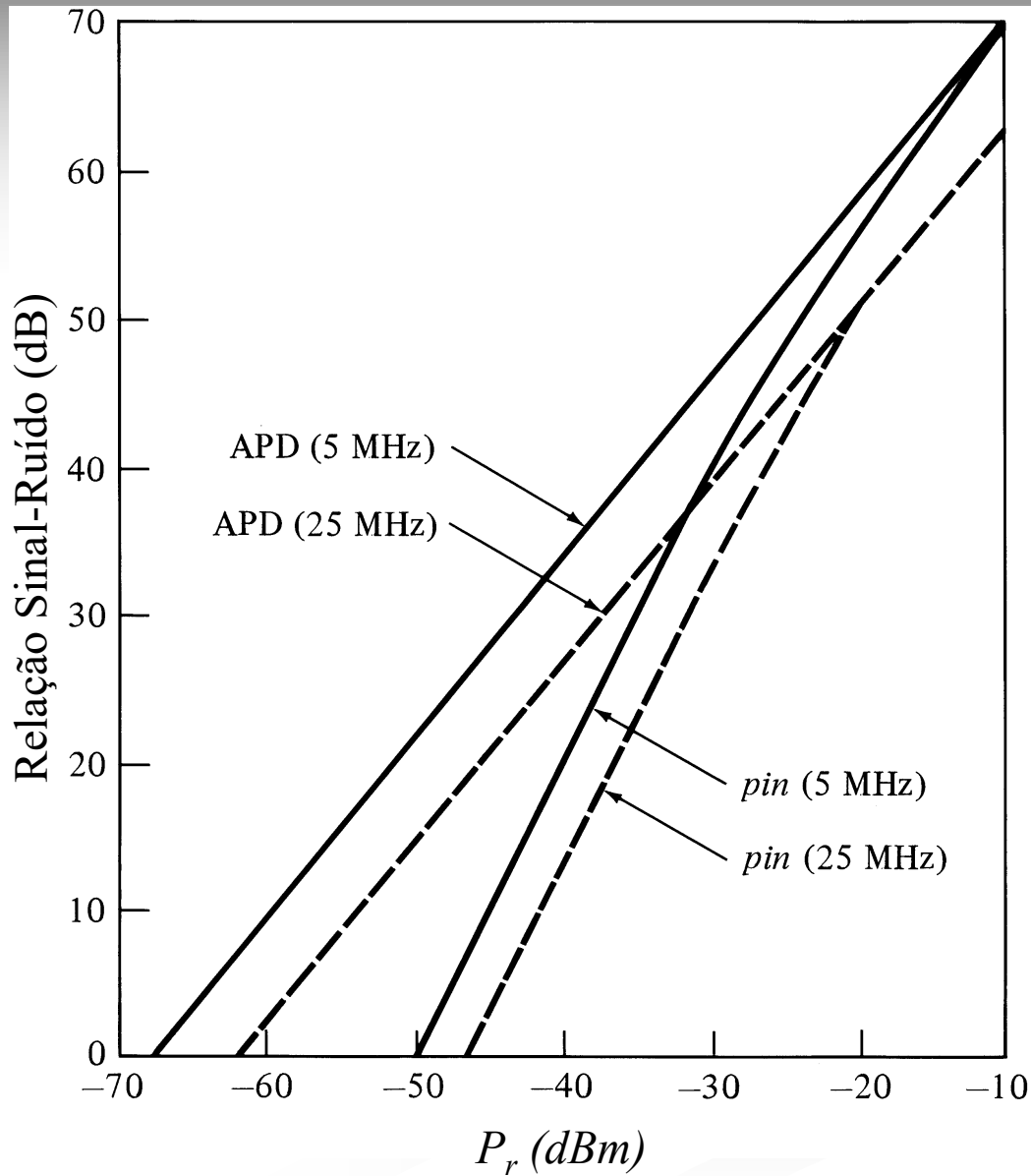


V é a amplitude do sinal
 σ é o valor eficaz (rms) do ruído

A razão V/σ é então denominada a *razão do pico do sinal para o ruído rms*.

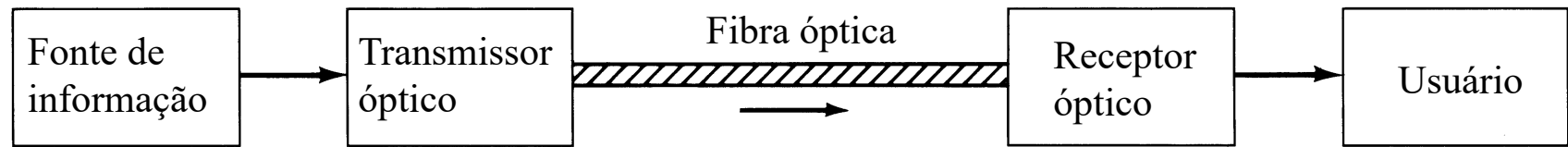
Ela relaciona a probabilidade de erro de bit (BER) para a relação S/N.

SNR versus potência óptica recebida para *pin* e APD



Enlace ponto-a-ponto

Por ser a configuração mais simples, ela serve para definir as bases para sistemas mais complexos.



Aspectos chave para a análise de sistemas:

- Distância de transmissão possível (ou desejável)
- Taxa de dados ou largura de banda do canal
- Taxa de erro de bit (BER)

Escolha de componentes:

- 1) Fibra monomodo ou multimodo
 - Tamanho do núcleo
 - Perfil de índice de refração
 - Largura de banda ou dispersão
 - Atenuação
 - Abertura numérica ou diâmetro modal

Enlace ponto-a-ponto

2) Fonte óptica: LED ou LASER

- Comprimento de onda de emissão
- Largura de linha espectral
- Potência de saída
- Área de radiação efetiva
- Padrão de emissão
- Número de modos emitidos

3) Fotodetector: *pin* ou *APD*

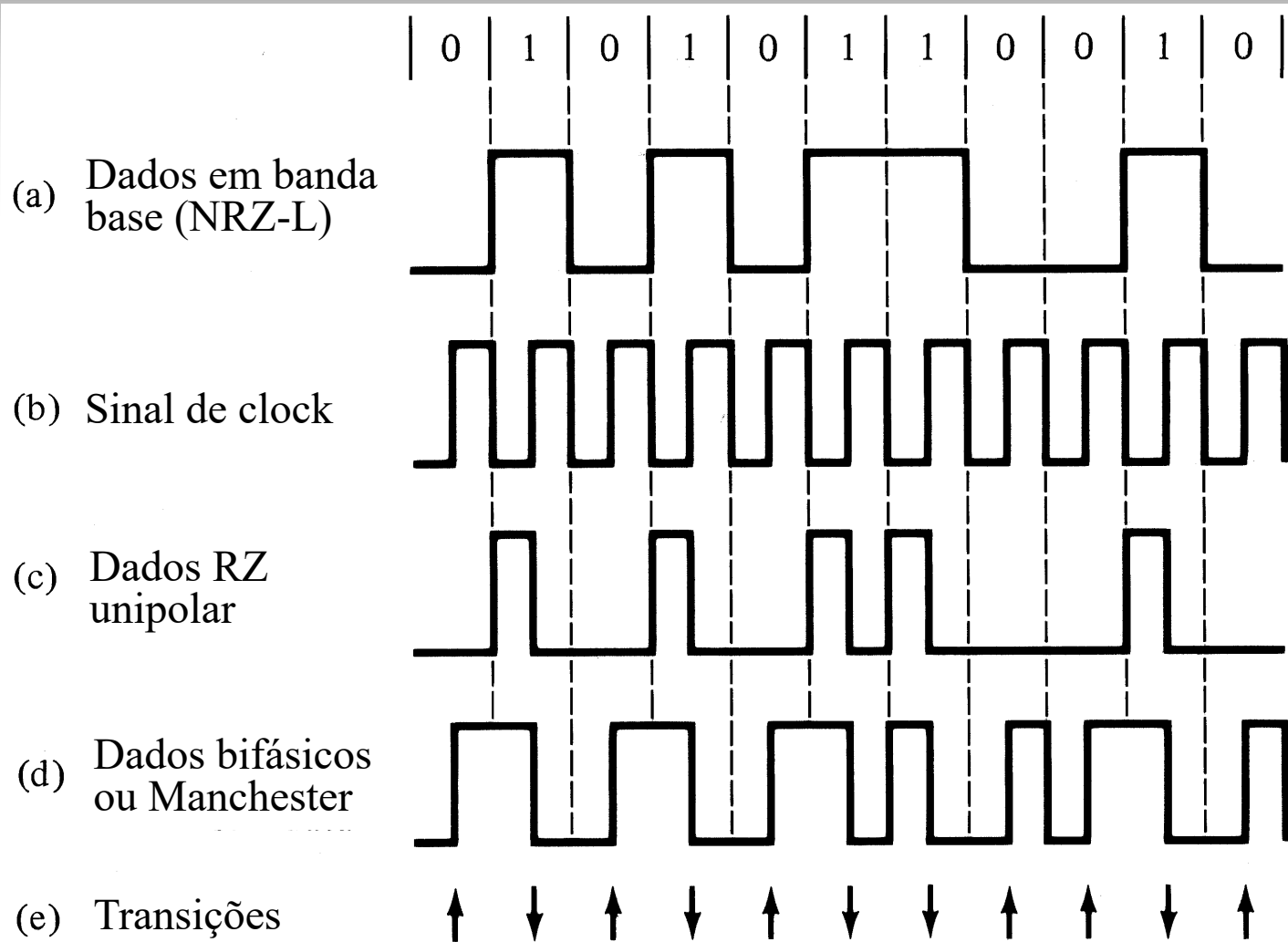
- Responsividade
- Comprimento de onda de operação
- Velocidade
- Sensitividade

Para garantir a operação satisfatória do enlace, são necessárias duas análises para o sistema:

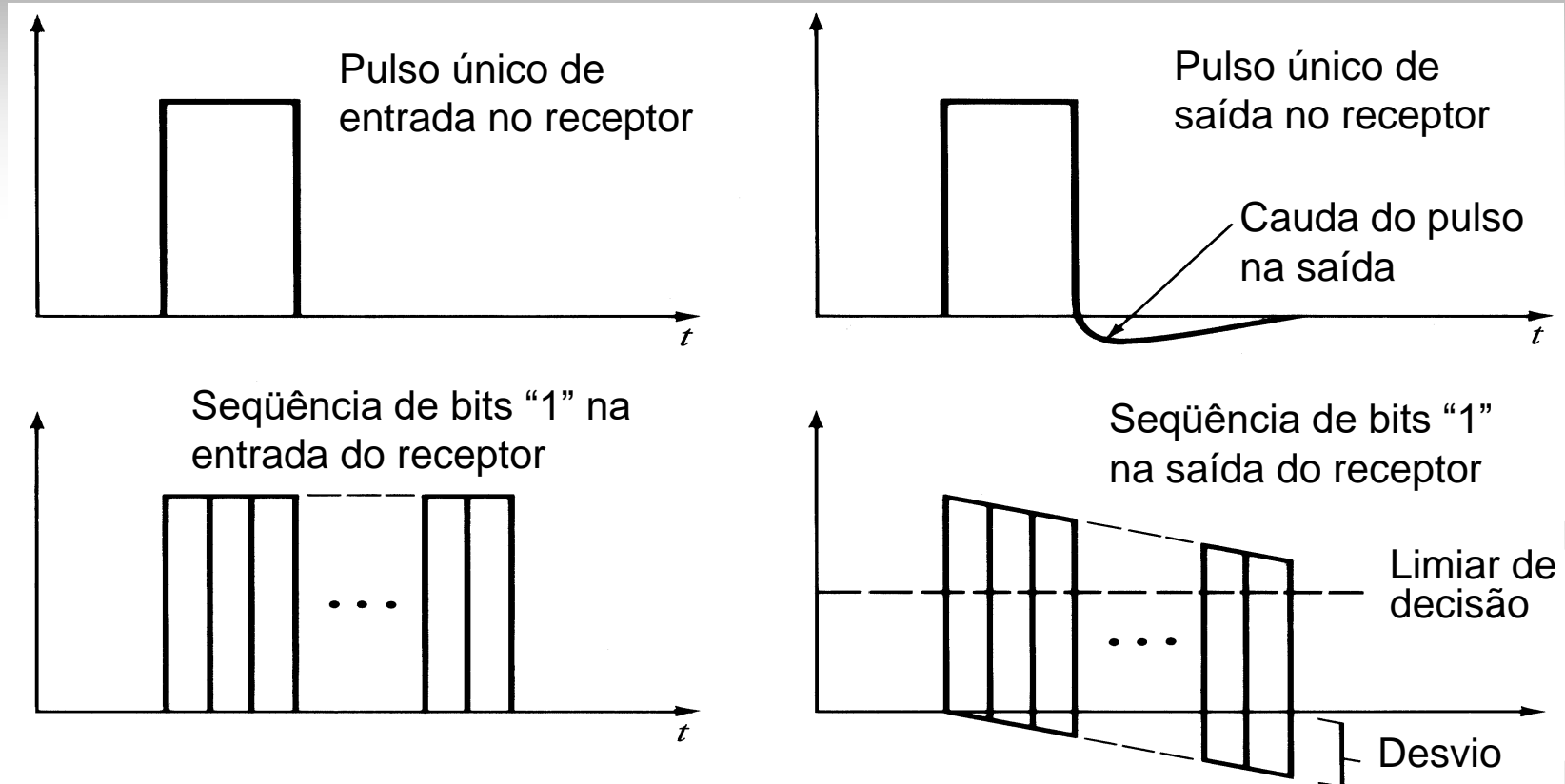
- a) Previsão de potência do enlace;
- b) Previsão do tempo de subida do sistema.

Ambos serão discutidos a seguir.

Formato de dados RZ



Desvio de linha base



Este desvio ocorre após uma longa seqüência de bits 1. Resulta da acumulação de "caudas dos pulsos" que surge da característica de baixa freqüência do filtro de acoplamento ac no receptor.

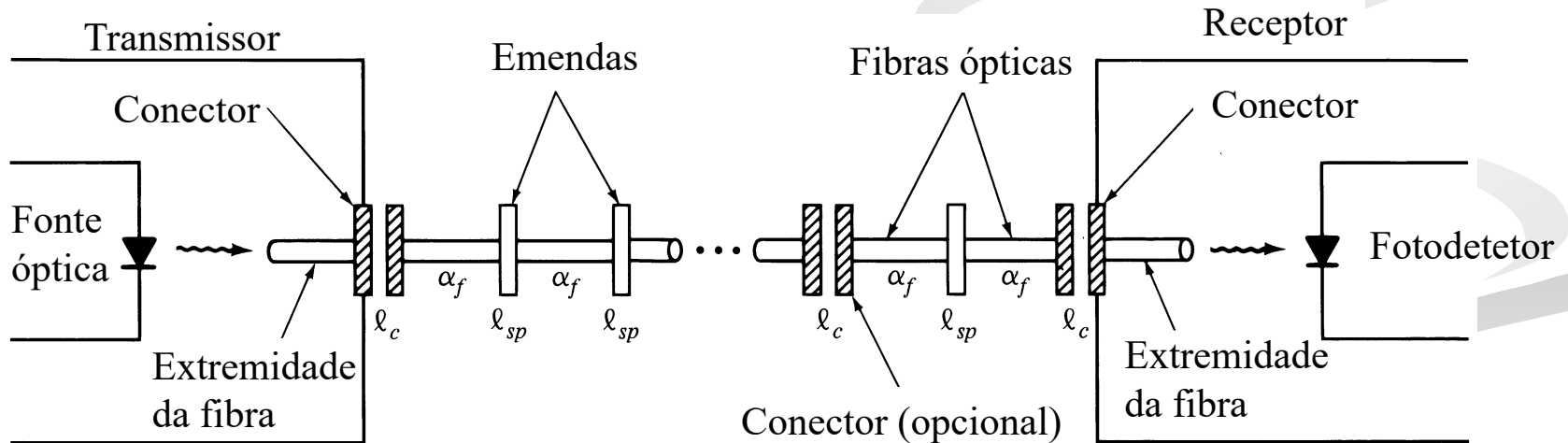
Modelo de perda de potência óptica

A contribuição das perdas referente a cada componente deve ser computada. Cada perda deve ser expressa em decibéis, ou seja:

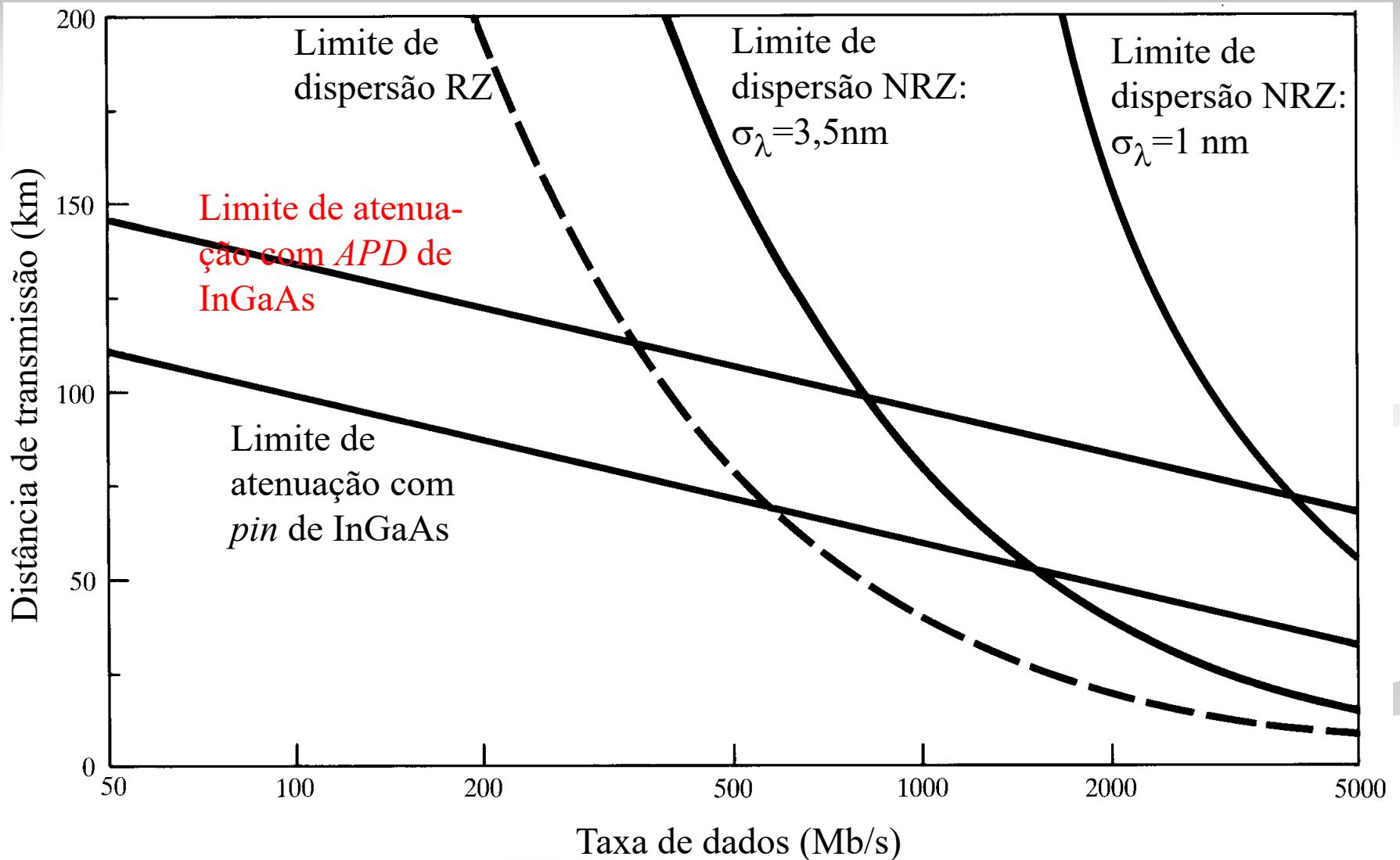
$$Perda = 10 \log \frac{P_{saída}}{P_{entrada}}$$

Perdas que devem ser consideradas:

- Conectores (l_c);
- Emendas (l_{sp});
- Fibra (l_f).



Distância de transmissão versus taxa de dados



Exemplo de previsão de potência em um enlace

Fotodetetor = pin

Fibra = multimodo ($\phi = 50\mu\text{m}$)

Taxa = 20Mb/s

BER = 10^{-9}

$\lambda = 850\text{nm}$

$P_{\text{acoplada pelo LED}} = P_S = 50\mu\text{W}$ (-13dBm)

$P_{\text{pin}} = -42\text{dBm}$ (mínima pelo pin)

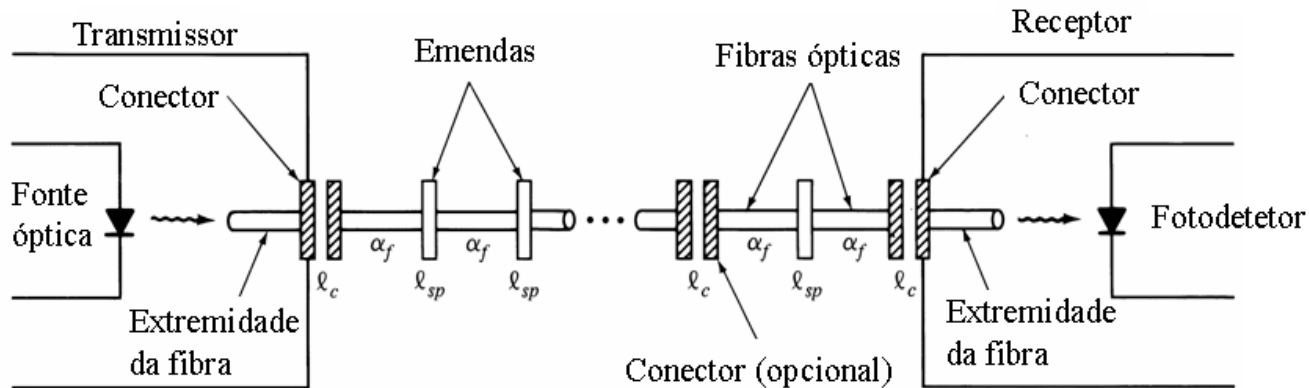
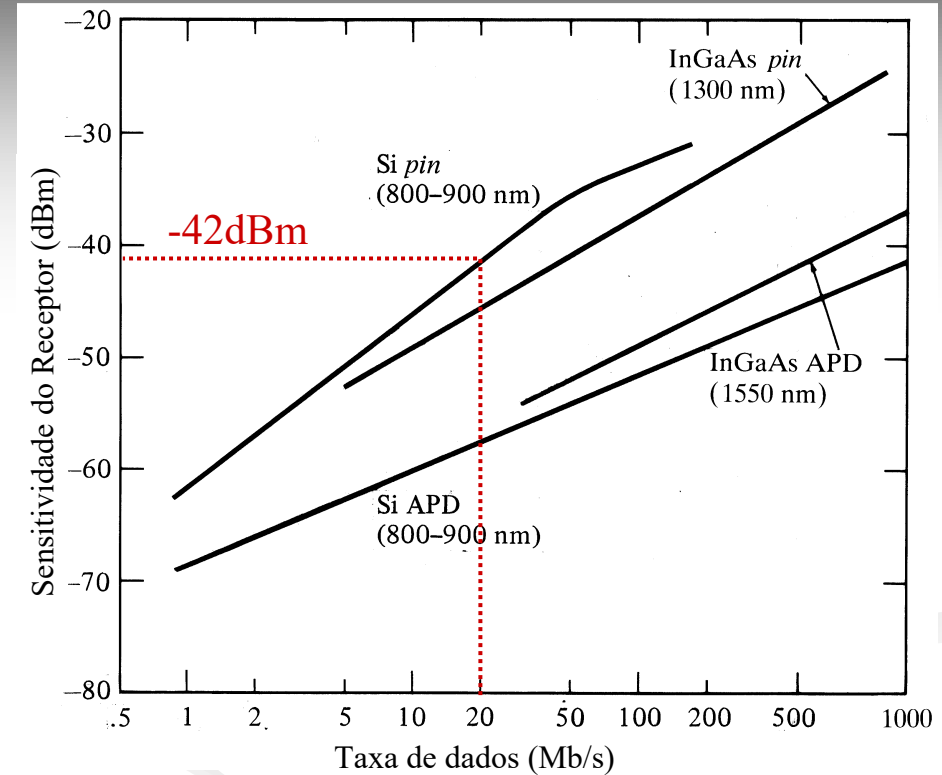
$P_{\text{extremidade fibra}} = l_c = 1\text{dB}$

$P_{\text{margem}} = 6\text{dB}$

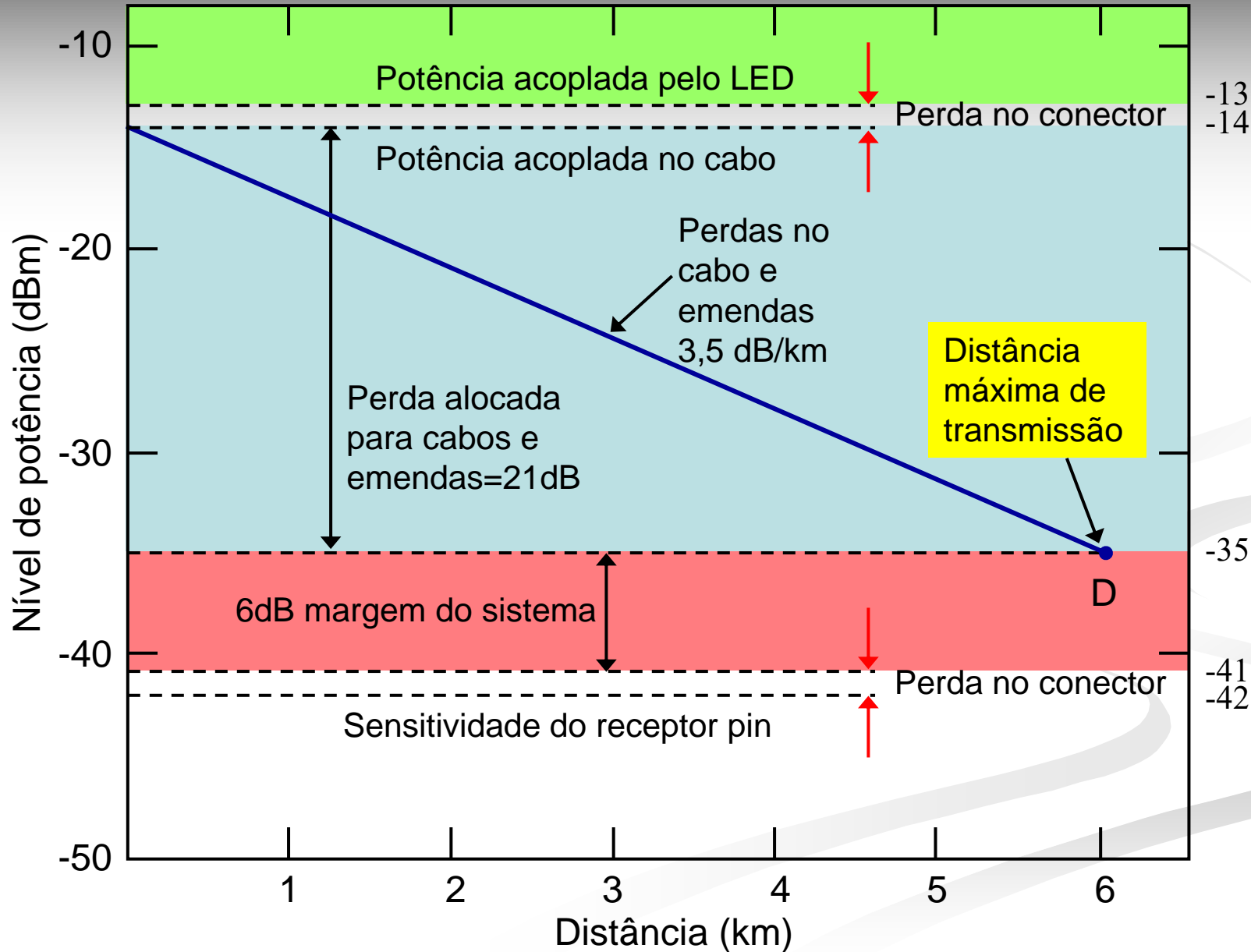
$P_{\text{fibra}} = 3,5\text{dB/km}$ (atenuação e emendas)

$P_{\text{perdas totais}} = P_S + P_R = 2l_c + \alpha_f L + P_{\text{margem}} = 29\text{dB}$

Onde $L = 6\text{km}$, que é a máxima distância possível



Exemplo de previsão de potência em um enlace



Referências Bibliográficas

- Ben-Hur V. Borges, Notas de Aula, SEL 366 Comunicações Ópticas.
- Gerd Keiser, Optical Fiber Communications, Second Edition, McGraw-Hill, 1991.
- Orazio Svelto, Principles of Lasers, Third Edition, Plenum Press, 1989.
- Shyh Wang, Fundamentals of Semiconductor Theory and Device Physics, Prentice Hall Series in Electrical and Computer Engineering, 1989.
- Reinhard März, Integrated Optics: Design and Modeling, Artech House, 1995.
- Gerd Keiser, Optical Fiber Communications, 2nd Ed., 1991.
- Dietrich Marcuse, Theory of Dielectric Waveguides, Second Edition, Academic Press, 1991.
- Robert G. Hunsperger, Integrated Optics: Theory and Technology, Third Edition, Springer Series in Optical Science, Springer-Verlag, 1991.
- Theodor Tamir, Guided-Wave Optoelectronics, Second Edition, Springer Series in Electronics and Photonics 26, Springer-Verlag, 1990.
- Amnon Yariv, Quantum Electronics, Third Edition, Wiley, 1989.