

VIABILIDADE DE TRANSMISSÃO DIGITAL POR FIBRAS ÓPTICAS
EM VÁRIAS CONFIGURAÇÕES SISTÊMICAS

Clayton Bezzan e Edson Moschim

DEE/FEC/UNICAMP

Caixa Postal 6122

13190 - Campinas - SP

RESUMEN

En este trabajo es hecha la comparación del desempeño de configuraciones de sistemas de comunicación por fibra óptica. Parámetros, como taxa de transmission, comprimento de onda, fuentes e detectores utilizados, así como configuraciones de receptores, fueron estudiadas. Los comprimentos de links máximos para varias situaciones fueron determinados; con las fibras de 5 dB/km en 0,85µm, pueden obtenerse links de 9 km (8 Mbit/s), 8 km (34 Mbit/s) e 6 km (140 Mbit/s), sin repetidor intermediario. Con las fibras de 3 dB/km en 0,85µm, se puede obtener links de 15 km (8 Mbit/s), 12 km (34 Mbit/s) e 9 km (140 Mbit/s). Con la tecnologia mas reciente de 1,3µm se puede obtener comprimentos mayores: 36 km (8 Mbit/s), 30 km (34 e 140 Mbit/s).

ABSTRACT

A performance comparison of several fiber optic communication system configurations is presented. Parameters such as transmission bit rate, wavelength, light sources and detectors, as well as receiver configurations were studied. Maximum link lengths were determined for many situations, with fibers of 5 dB/km in 0,85µm it is possible to have link lengths of 9 km (8 Mbit/s), 8 km (34 Mbit/s) and 6 km (140 Mbit/s), without intermediate repeaters. With fibers of 3 dB/km in 0,85µm it is possible to have link lengths of 15 km (8 Mbit/s), 12 km (12 Mbit/s) and 9 km (140 Mbit/s). With the 1,3µm technology longer link lengths are possible: 36 km (8 Mbit/s), 30 km (34 Mbit/s and 140 Mbit/s).

1.- INTRODUÇÃO

A comunicação digital através de fibras ópticas está se viabilizando no contexto internacional, com evidentes vantagens tecnológicas e econômicas em várias hierarquias do Sistema Brasileiro de Comunicações Digitais. Agora, com o desenvolvimento do 1º sistema brasileiro de 34 Mbit/s pelo CPqD da TELEBRÁS, conjuntamente com a UNICAMP e outros grupos de pesquisa, abriu-se a oportunidade para se avaliar o potencial de tais sistemas em 8 Mbit/s (120 canais), 34 Mbit/s (480 canais) e 140 Mbit/s (1920 canais), utilizando a tecnologia disponível a nível nacional e internacional.

Aspectos sistêmicos como configuração transmissor-receptor, utilizando fibra de 1ª ou 2ª geração (0,85µm ou 1,3µm) e configuração de pré-amplificadores são abordados. O desempenho de fibras ópticas de índice gradual de atenuação de 5 dB/km (0,85µm), igual à atualmente obtida pela TELEBRÁS, é comparado com aquele da tecnologia do estado da arte, ou seja, fibras de atenuação de 3 dB/km (0,85µm) e 0,7 dB/km (1,3µm).

São apresentados resultados quantitativos - o espaçamento de cada seção sem repetidor, e aspectos qualitativos do ponto de vista tecnológico e econômico. Com base nesses dados é feita uma escolha de configurações que mais se adequam à solução dos problemas práticos envolvidos em Telefonia Digital de alta capacidade.

2.- DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Um típico Sistema de Comunicações Digitais por Fibra Óptica é apresentado na Fig.1 [1,2].

No transmissor, o sinal digital geralmente é codificado [3,4] e modula uma fonte óptica através de um circuito driver. No caso aqui considerado, um sinal binário NRZ é transmitido com uma taxa de extinção 0,05, por uma fonte óptica que pode ser um diodo LASER ou um LED*. As suas características, são descritas na Tabela 1, para os comprimentos de onda de emissão em 0,85µm e 1,3µm. Essas características são típicas para sistemas práticos [1].

FONTE	PARÂMETRO	$\lambda_0 = 0,85\mu\text{m}$	$\lambda_0 = 1,3\mu\text{m}$
LED	Δ_λ (nm)	55	90
	\bar{P}_T (dBm)	-15	-15
	B_{max} (Mbit/s)	50	150
LASER	Δ_λ (nm)	2	2
	\bar{P}_T (dBm)	-3	-3
	B_{max} (Mbit/s)	1000	1000

- λ_0 - comprimento de onda de emissão
- Δ_λ - largura espectral da fonte de luz
- \bar{P}_T - potência óptica média injetada na fibra
- B_{max} - máxima taxa de modulação

Tabela 1 - Parâmetros do transmissor

* Neste trabalho teórico, não analisamos os efeitos do enbaralhamento e do codificador, mas assumiremos que os pulsos binários transmitidos assumem níveis equiprováveis, sem relação de bits.

O sinal óptico na saída do transmissor é acoplado a uma fibra multimodo índice gradual, de diâmetro de núcleo 50µm e diâmetro externo 125µm, A.N. = 0,2 (recomendada pela CCITT). A fibra introduz uma atenuação e causa uma dispersão gaussiana no pulso transmitido. Para alguns aspectos de tecnologia utilizada, suas características de atenuação e dispersão podem ser obtidas das eqs. (1) e (2), e parâmetros da Tabela 2 [1].

A função de transferência da fibra é dada por:

$$H_f(f) = \exp \left\{ - \frac{\log e}{10} [(\alpha + \alpha_c)\ell + P_c] \right\} \exp \left\{ - \sqrt{2\pi} \sigma_d f/B \right\}^2 \quad (1)$$

onde σ_d é a dispersão normalizada, dada por:

$$\sigma_d = 0,1874B \sqrt{\left(\frac{\ell \gamma}{W_0}\right)^2 + \left(\frac{10^{-6} \mu \Delta \lambda}{0,44 \ell}\right)^2} \quad (2)$$

ℓ é o comprimento da seção de enlace (km)

α é a atenuação da fibra (dB/km)

α_c é a perda por km devida a emendas na linha (dB/km)

P_c é a perda por conexões e emendas nos terminais (dB)

B é a taxa de transmissão de bits (Mbit/s)

W_0 é a largura de faixa da fibra, devido à dispersão modal, em 1 km de fibra (MHz.km).

γ é um fator de dependência da largura de faixa modal com o comprimento (0,6 a 0,8), adotado aqui como sendo 0,8.

μ é o coeficiente de dispersão material (ps/nm.km)

PARÂMETRO	$\lambda_0 = 0,85\mu\text{m}$	$\lambda_0 = 1,3\mu\text{m}$
α (dB/km)	5 ou 3	0,7
α_c (dB/km)	0,3	0,3
P_c (dB)	2	2
W_0 (MHz.km)	500(5) ou 800(3)	1000
μ (ps/nm.km)	100	5

Tabela 2 - Parâmetros da fibra óptica

No receptor os pulsos ópticos recebidos são convertidos em forma elétrica por um fotodiodo PIN ou um fotodiodo de avalanche (APD), e em seguida amplificados e equalizados para se obter uma máxima relação sinal/ruído no instante de decisão. O fotodetector produz uma corrente eletrônica $i(t)$ com média estatística proporcional à potência óptica instantânea recebida (eq.(3)). No uso do APD há um ganho de avalanche G , além da constante de proporcionalidade R (responsividade).

$$i(t) = R G P_R(t) \quad (3)$$

($G = 1$, para fotodiodos PIN)

Os fotodiodos práticos apresentam algumas imperfeições que devem ser tomadas em consi-

deração. A introdução de parâmetros tais como a corrente de escuro não multiplicativa (I_{D_0}), multiplicativa (I_{D_M}), eficiência quântica (η), taxa de coeficientes de ionização no APD (k), possibilita a avaliação da degradação devida a tais imperfeições. A Tabela 3 apresenta os valores típicos desses parâmetros, em dispositivos utilizados em sistemas de 1ª e 2ª geração.

dispositivo	parâmetro	$\lambda_0 = 0,85\mu\text{m}$	$\lambda = 1,3\mu\text{m}$
PIN	tecnologia	Si	In Ga As
	R (A/W)	0,5	0,73
e APD	η	0,72	0,70
	I_{D_0} (nA)	15	20
APD	I_{D_M} (nA)	100	2,5
	k	0,02	0,5

Tabela 3 - Parâmetros típicos de fotodiodos

O estágio de pré-amplificação dos receptores tem papel revelante no projeto de receptores óticos. Há duas configurações de frente de entrada do amplificador sendo consideradas aqui: entrada integradora e entrada não integradora, dependendo da resistência de entrada R_{in} , da resistência de realimentação R_f e da capacitância total de entrada C_T do pré-amplificador (incluindo a capacitância do fotodetector, etc.). No caso do pré-amplificador tipo integra e diferencia (Fig. 2), não há realimentação e R_{in} é alta (FET) [5]. O sinal é integrado e portanto é necessário uma diferenciação no filtro receptor para equalizá-lo. Geralmente esse tipo de procedimento prejudica bastante a faixa dinâmica do receptor. O fator de ruído do receptor, denominado parâmetro Z , é bastante reduzido, pois R_{in} contribui com um ruído baixo (i_{n1}), da ordem do também baixo ruído de canal do FET (i_{n2}).

No caso do pré-amplificador tipo transimpedância (Fig. 3), é feita uma realimentação, através do resistor R_f , de modo que apareça na sua entrada uma resistência virtual R_f/A (onde A é o ganho de malha aberta do amplificador). O sinal não mais será integrado dentro de sua faixa, porque se obtém uma resistência de entrada baixa, evitando problemas com a faixa dinâmica, sem a necessidade de incluir um resistor ruidoso na entrada. O parâmetro Z obtido neste caso é maior do que o do tipo integra - diferencia, embora não seja muito pior. Em muitos casos, é um excelente compromisso entre faixa-dinâmica e minimização do ruído térmico.

Frentes de entrada com transistor bipolar são comuns para algumas aplicações, embora não sejam abordadas aqui.

* R_f é otimizada de modo a se ter uma baixa resistência virtual na entrada, e um baixo ruído i_{nf} gerado por ela.

Na Tabela 4, são apresentados os parâmetros típicos que caracterizam a frente de entrada do pré-amplificador, nas várias hierarquias de Transmissão Digital. O filtro receptor é projetado de modo a equalizar o sinal transmitido, na ausência de dispersão na fibra. A característica do canal é suposta do tipo cosseno levantado-"roll-off" 1. Não há ocorrência de interferência intersimbólica para baixas dispersões.

3.- DESEMPENHO DO SISTEMA E PROJETO DO ESPAÇAMENTO DE REPETIDORES

O desempenho do receptor depende de uma série de parâmetros. No entanto, para o projeto do espaçamento de repetidores e avaliação do desempenho do sistema, o receptor pode ser completamente caracterizado do ponto de vista externo pelo nível de potência média recebida necessário para uma dada taxa de erros P_e , que chamaremos de sensibilidade de potência média - S. Essa sensibilidade pode ser calculada pela aproximação gaussiana [6] através de programas de computador desenvolvidos no DEE/FEC da UNICAMP [2]. Para enlaces, curtos, sem dispersão ($\sigma_d = 0$): $S = S_0$. Para distâncias onde a dispersão da fibra se torna relevante, há uma penalidade P adicionada a S_0 : $S = S_0 + P$.

Com as características do transmissor, da fibra e a sensibilidade do receptor conhecidas, pode-se proceder a um projeto do espaçamento de repetidores (ou do comprimento de enlace sem repetidores), através da "contabilidade" da potência óptica.

A atenuação disponível para a fibra é dada por A_D :

$$A_D = \bar{P}_T - S - P_C - M, \quad (4)$$

onde \bar{P}_T é um dado da Tabela 1, P_C da Tabela 2 e S é calculada usando o programa de [2], com os dados das Tabelas de 1 a 4. M é a margem de segurança (7 dB para LED, 9 dB para LASER) [1], que leva em conta aproximações de cálculo, outras imperfeições não consideradas, etc.

O comprimento máximo de seção (l_{MAX}) é obtido de:

$$\bar{P}_T - S_{l_{MAX}} - P_C - M = (\alpha + \alpha_c) l_{MAX} \quad (5)$$

Neste trabalho calculamos l_{MAX} aproximadamente por:

$$l_{MAX} = (\bar{P}_T - S_0 - P_C - M) / (\alpha + \alpha_c) \quad (6)$$

Caso a dispersão σ_d correspondente a l_{MAX} ocasione uma penalidade P relevante, l_{MAX} é recalculado levando em conta essa penalidade:

$$l_{MAX} = (\bar{P}_T - S_0 - P - P_C - M) / (\alpha + \alpha_c) \quad (7)$$

Se $\sigma_d > 0,5$ para l_{MAX} , l_{MAX} será calculado por (5). E se $\sigma_d > 0,5$ para algum l_{MAX} , o projeto será considerado inviável e será

adotado o valor de l correspondente a $\sigma_d = 0,5$ para referência.

Seguindo esse procedimento, foram obtidos os resultados para cada hierarquia de sistema, e várias configurações apresentadas nas Tabelas 5, 6 e 7. Ali, são feitas as contabilidades de potência óptica, de maneira a se calcular a disponibilidade para a fibra em cada configuração e o espaçamento correspondente, para cada atenuação da fibra. Obteve-se assim as distâncias l_{MAX} para os diversos casos.

O desempenho de cada configuração de sistema pode ser analisado por meio desses dados e por meio das viabilidades tecnológicas e econômicas:

4.- CONCLUSÕES

A aplicação de cada opção de configuração de sistema está ligada aos aspectos de capacidade, distância, custo e tecnologia:

Para enlaces curtos (< 3 km), uma opção de configuração transmissor-receptor LED-PIN é a mais adequada para 8 e 34 Mbit/s, devido à sua simplicidade; para 140 Mbit/s, a configuração melhor é a LASER-PIN, devido à dispersão material, que inviabiliza a utilização do LED.

Para distâncias médias e longas, as configurações transmissor-receptor mais atrativas são: LASER-APD e LASER-PIN em $0,85 \mu m$ e LED-PIN e LASER-PIN em $1,3 \mu m$, nas três hierarquias.

Em 8 e 34 Mbit/s, foi escolhido o receptor tipo transimpedância, por ter um projeto simples e ter um desempenho adequado de faixa dinâmica e ruído térmico. Em altas taxas, o projeto de receptores tipo transimpedância é dificultado por problemas de oscilação. Por esta razão e também devido ao excelente desempenho quanto ao ruído, utilizou-se o receptor tipo integra-diferencia nesta análise, para 140 Mbit/s.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados obtidos para os valores do espaçamento nas configurações relevantes.

Observa-se que os resultados mais interessantes, para distâncias máximas sem repetidor são marcados com *, para $0,85 \mu m$. Para longas distâncias, cada vez mais se torna interessante desenvolver a tecnologia de $1,3 \mu m$. Neste caso, as distâncias são marcadas com **.

A tecnologia de $0,85 \mu m$ está bastante desenvolvida atualmente, enquanto que a tecnologia em $1,3 \mu m$ é recente e está em fase de industrialização. É de se esperar que num futuro bem próximo, essa tecnologia esteja acessível e competitiva com relação a $0,85 \mu m$, até mesmo superando-a, pois possibilita enlaces extremamente longos, sem a necessidade de repetidores.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Moncalvo, R. Pietrolusti, "Transmission Systems using Optical Fibers", Telecomm Journal, Vol. 49, II/1982, pp. 84-92.
- [2] H. Waldman, C. Bezzan, E. Moschim, "Cálculo Geral de Desempenho de Receptores Ópticos em Sistemas de Transmissão Digital"

tal...", NT-7*, Maio de 1983.

- [3] P.T.Hosoe, D.S.Arantes, "Codificação Digital para Comunicações Ópticas", RT-98*, Fevereiro de 1983.
- [4] J.M.Romano, H.Waldman, "Códigos Balanceados para Transmissão Digital por Fibra Óptica", RT-118*, Junho de 1984.
- [5] W.Waldman, C.Bezzan, E.Moschim, C.de Almeida, "Modelos Básicos para o Detector

e o Amplificador de Receptores Ópticos", NT-2*, Fevereiro de 1982.

- [6] W.Waldman, C.Bezzan, E.Moschim, C.de Almeida, "Cálculos de Sensitividade em Receptores Ópticos, utilizando a Aproximação Gaussiana e a Desigualdade de Chernoff", NT-04*, Maio de 1982.

* Convênio UNICAMP/TELEBRÁS 033/80, P.A.Transmissão por Fibra Óptica - Departamento de Engenharia Elétrica - FEC/UNICAMP.

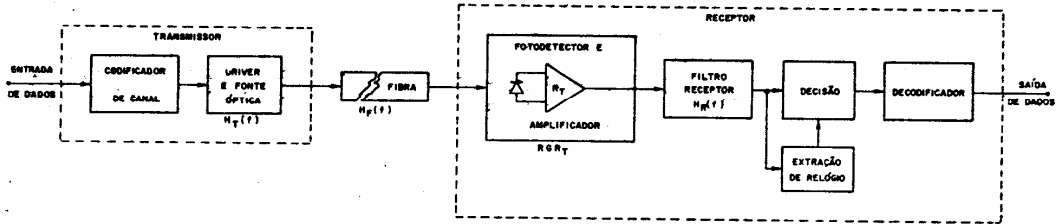


Fig. 1 - Diagrama de Blocos de um Sistema de Comunicações Ópticas

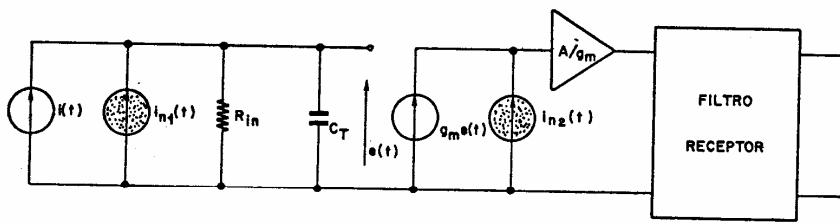


Fig. 2 - Circuito equivalente da frente de entrada de um receptor tipo integra-diferencia

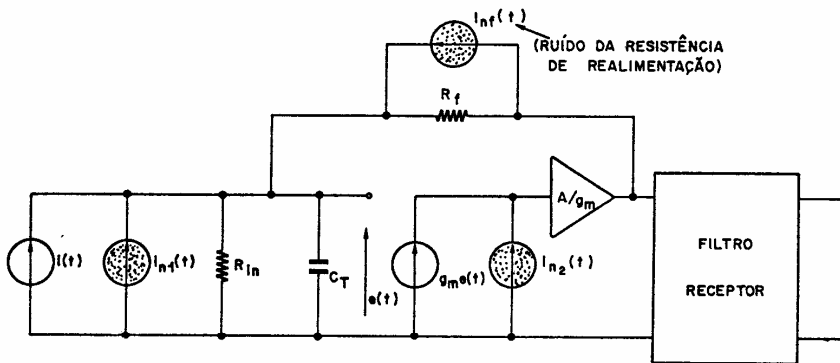


Fig. 3 - Circuito equivalente da frente de entrada de um receptor tipo transimpedância

TIPO	PARÂMETRO	B = 8 Mbit/s	B = 34 Mbit/s	B = 140 Mbit/s
	tecnologia	JFET	JFET	MESFET
	C_T (pF)	10	10	5
	g_m (mS)	10	10	25
integra-diferencia	R_{in} (k Ω)	1000	1000	500
	Z	405	721	71
transimpedância	R_f (k Ω)	50	10	4
	Z	1001	1321	796

Tabela 4 - Parâmetros da frente de entrada do pré-amplificador

Fonte de luz	LED (0,85 μ m)								LASER (0,85 μ m)							
	PIN				APD				PIN				APD			
Receptor	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID		
S_0 (dBm)	-47,7	-51,6	-63,2	-64,4	-47,7	-51,6	-63,2	-64,4	-47,7	-51,6	-63,2	-64,4	-47,7	-51,6		
M (dB)	7	7	7	7	7	7	7	7	9	9	9	9	9	9		
P_C (dB)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
P_T (dBm)	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-3	-3	-3	-3	-3	-3		
A_D (dB)	23,7	27,6	39,2	40,4	23,7	27,6	39,2	40,4	33,7	37,6	49,2	50,4	33,7	37,6		
R_{MAX} (km)	7,2 ^A	4,5 ^B	8,4 ^A	5,2 ^B	11,9 ^A	7,4 ^B	12,2 ^A	7,6 ^B	10,2 ^A	6,4 ^B	11,4 ^A	7,1 ^B	14,9 ^A	9,3 ^B		
Q_d	0,14	0,08	0,16	0,1	0,22	0,14	0,23	0,14	0	0	0	0	0	0		
P (dB)	0,5	0,15	0,6	0,3	1,8	1,1	2,6	1,1	0	0	0	0	0	0		
R_{MAX} (km)	7	4,5	8,2	5,1	11,3	7,0	11,5	7,2	10,2	6,4	11,4	7,1	14,9	9,3		

Fonte de luz	LED (1,30 μ m)								LASER (1,30 μ m)							
	PIN				APD				PIN				APD			
Receptor	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID		
S_0 (dBm)	-49,8	-53,7	-54,9	-57,8	-49,8	-53,7	-54,9	-57,8	-49,8	-53,7	-54,9	-57,8	-49,8	-53,7		
M (dB)	7	7	7	7	7	7	7	7	9	9	9	9	9	9		
P_C (dB)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
P_T (dBm)	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-3	-3	-3	-3	-3	-3		
A_D (dB)	25,8	29,7	30,9	33,8	25,8	29,7	30,9	33,8	35,8	39,7	40,9	43,8	35,8	39,7		
R_{MAX} (km)	25,8 ^C	29,7 ^C	30,9 ^C	33,8 ^C	25,8 ^C	29,7 ^C	30,9 ^C	33,8 ^C	35,8 ^C	39,7 ^C	40,9 ^C	43,8 ^C	35,8 ^C	39,7 ^C		
Q_d	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
P (dB)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
R_{MAX} (km)	25,8	29,7	30,9	33,8	25,8	29,7	30,9	33,8	35,8	39,7	40,9	43,8	35,8	39,7		

Tabela 5 - Contabilidade de potências para transmissão digital em 8 Mbit/s

Fonte de luz	LED (0,85 μ m)								LASER (0,85 μ m)							
	PIN				APD				PIN				APD			
Receptor	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID		
S_0 (dBm)	-40,6	-42,8	-56,7	-57,4	-40,6	-42,8	-56,7	-57,4	-40,6	-42,8	-56,7	-57,4	-40,6	-42,8		
M (dB)	7	7	7	7	7	7	7	7	9	9	9	9	9	9		
P_C (dB)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
P_T (dBm)	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-3	-3	-3	-3	-3	-3		
A_D (dB)	16,6	18,8	32,7	33,4	16,6	18,8	32,7	33,4	26,6	28,8	42,7	43,4	26,6	28,8		
R_{MAX} (km)	5,0 ^A	3,1 ^B	5,7 ^A	3,6 ^B	9,9 ^A	6,2 ^B	10,1 ^A	6,3 ^B	8,1 ^A	5,0 ^B	8,7 ^A	5,4 ^B	12,9 ^A	8,1 ^B		
Q_d	0,46*	0,25	0,46	0,29	0,5*	0,5	0,5*	0,5	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05		
P (dB)	3,47	1,37	4,44	1,97	10,9	10,88	11,2	11,2	0	0	0	0	0,5	0,1		
R_{MAX} (km)	4,0	2,9	4,4	3,2	6,2	4,1	6,2	4,2	8,1	5,0	8,7	5,4	12,8	8,0		

Fonte de luz	LED (1,30 μ m)								LASER (1,30 μ m)							
	PIN				APD				PIN				APD			
Receptor	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID	TI	ID		
S_0 (dBm)	-42,5	-44,9	-48,0	-49,7	-42,5	-44,9	-48,0	-49,7	-42,5	-44,9	-48,0	-49,7	-42,5	-44,9		
M (dB)	7	7	7	7	7	7	7	7	9	9	9	9	9	9		
P_C (dB)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
P_T (dBm)	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-15	-3	-3	-3	-3	-3	-3		
A_D (dB)	18,5	20,9	24,0	25,7	18,5	20,9	24,0	25,7	28,5	30,9	34,0	35,7	28,5	30,9		
R_{MAX} (km)	18,5 ^C	20,9 ^C	24,0 ^C	25,7 ^C	18,5 ^C	20,9 ^C	24,0 ^C	25,7 ^C	28,5 ^C	30,9 ^C	34,0 ^C	35,7 ^C	28,5 ^C	30,9 ^C		
Q_d	0,15	0,15	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,22	0,25	0,25	0,2	0,25		
P (dB)	0,5	0,5	1,2	1,1	0,9	0,9	1,1	1,1	0,9	1,3	1,8	1,8	0,9	1,3		
R_{MAX} (km)	18,0	20,4	22,8	24,6	18,0	20,4	22,8	24,6	27,6	29,6	32,2	33,9	27,6	29,6		

Tabela 6 - Contabilidade de potências para transmissão em 34 Mbit/s

Fonte de luz	LED (0,85µm)								LASER (0,85µm)							
Fotodetector	PIN				APD				PIN				APD			
Receptor	TI		ID		TI		ID		TI		ID		TI		ID	
S ₀ (dBm)	-36,2		-46,5		-51,1		-53,5		-36,2		-46,3		-51,1		-53,5	
M (dB)	7		7		7		7		9		9		9		9	
P _C (dB)	2		2		2		2		2		2		2		2	
P _T (dBm)	-15		-15		-15		-15		-3		-3		-3		-3	
A _D (dB)	12,2		22,5		27,1		29,5		22,2		32,5		37,1		39,5	
λ _{MAX} (km)	3,7 ^A	2,3 ^B	6,8 ^A	4,2 ^B	8,2 ^A	5,1 ^B	8,9 ^A	5,6 ^B	6,7 ^A	4,2 ^B	9,8 ^A	6,1 ^B	11,2 ^A	7,0 ^B	12,0 ^A	7,5 ^B
σ _d	0,5*	0,45*	0,5*	0,5*	0,5*	0,5*	0,5*	0,5*	0,17	0,17	0,23	0,23	0,25	0,25	0,27	0,25
P (dB)	5,5	4,4	5,3	5,3	11,1	11,1	8,4	8,4	0,7	0,7	1,3	1,3	3,0	3,0	3,5	2,4
λ _{MAX} (km)	1,5	1,3	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	6,5	4,1	9,5	5,9	10,3	6,4	10,9	7,0
Fonte de luz	LED (1,30µm)								LASER (1,30µm)							
Fotodetector	PIN				APD				PIN				APD			
Receptor	TI		ID		TI		ID		TI		ID		TI		ID	
S ₀ (dBm)	-38,3		-48,6		-43,2		-50,7		-38,3		-48,6		-43,2		-50,7	
M (dB)	7		7		7		7		9		9		9		9	
P _C (dB)	2		2		2		2		2		2		2		2	
P _T (dBm)	-15		-15		-15		-15		-3		-3		-3		-3	
A _D (dB)	14,3		24,6		19,2		26,7		24,3		34,6		29,2		36,7	
λ _{MAX} (km)	14,3 ^C		24,6 ^C		19,2 ^C		26,7 ^C		24,3 ^C		34,6 ^C		29,2 ^C		36,7 ^C	
σ _d	0,35*		0,5*		0,43*		0,5*		0,35		0,45		0,40		0,47	
P (dB)	2,7		5,3		5,2		8,1		3,7		4,9		4,5		7,7	
λ _{MAX} (km)	11,0		16		14,0		16		20,6		29,7		24,7		29,0	

Tabela 7 - Contabilidade de potências para transmissão em 140 Mbit/s

CONFIGURAÇÃO	LED-PIN		LASER-PIN		LASER-APD		LED-PIN	LASER-PIN
FIBRA	0,85µm 3 dB	0,85µm 5 dB	0,85µm 3 dB	0,85µm 5 dB	0,85µm 3 dB	0,85µm 5 dB	1,3µm 0,7 dB	1,3µm 0,7 dB
8 Mbit/s	7	4	10	6	15*	9*	26	36**
34 Mbit/s	4	3	8	5	12*	8*	18	28**
140 Mbit/s	-	-	9*	6*	10	7	16	30**

Tabela 8 - Máximos valores de espaçamento para as melhores configurações