

In una rete telefonica provinciale due centrali distrettuali CD1 e CD2, distanti 79 Km, devono essere collegate per il trasferimento di 3 fasci PCM da 140 Mbit/s (3×1920 canali = 5760 canali) attraverso una linea in cavo coassiale (fascio PC1), una linea in fibre ottica (fascio PC2) ed un ponte radio a 12 GHz (fascio PCM3). Si richiede il dimensionamento delle 3 linee di trasmissione dati.

1) Dimensionamento delle linee in cavo coassiale 4,4/12

Considerando che la lunghezza delle tratte di ripercussione è stata standardizzata a 2 Km
 in hai: $\frac{79}{2} = 39,5$ tratte
 39 tratte da 2 Km
 + 1 tratta da 1 Km
 con 39 ripetitori da $\alpha \cdot 2 = 43,5 \cdot 2 = 87$ dB

mm. 4,4: diametro interno calce
 mm. 12: diametro conduttore interno

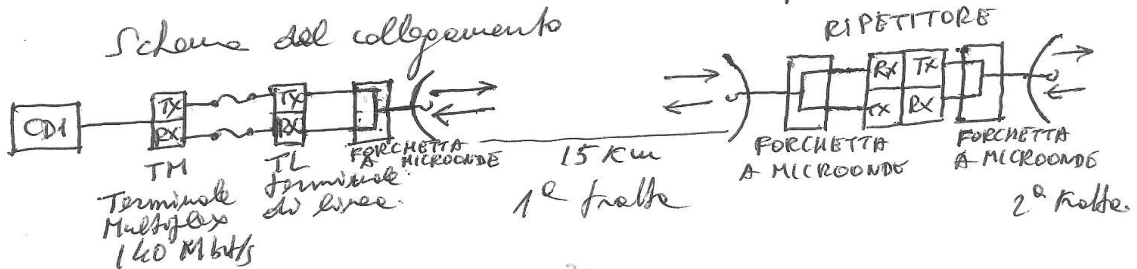
$\alpha = 5,2 \sqrt{f_{MHz}}$
 $5,2 \sqrt{12} = 43,5$ dB/Km

prop. $f_{MHz} = \frac{140 \cdot 10^6}{2}$

2) Ponte radio a 12 GHz

Considerando una lunghezza di tratta di 15 Km,
 in hai: $\frac{79}{15} = 5,26$
 5 tratte da 15 Km
 1 tratta da 4 Km
 5 ripetitori

Schema del collegamento



Dimensionamento del ponte radio a 12 GHz

Ipotesi aggiuntive: Diametro ^{antenna} parabolica $D = 60$ cm
efficienza (rendimento d'antenna): $\eta_a = 0,6$ | $\eta = \frac{P_{rx}}{P_{tx}}$

Sensibilità del ricevitore: $P_{rx\min} = 2 \mu W \rightarrow$
(minimo segnale demodulabile)
 $\rightarrow 10 \log_{10} \frac{P_{rx\min}}{1} =$
 $= -56,98$ dBW decibelwatt
 $P_{rx} = 1 W$

Si ritengono trascurabili, in prime approssimazioni, le perdite di segnale nelle guide d'onda che collegano le antenne al terminale ^{del} ponte radio

Calcolo del guadagno d'antenna:

$$G_{rx} = G_{tx} = G = \frac{\eta_a \pi^2 D^2}{\lambda^2} = 0,6 \cdot 3,14^2 \cdot \frac{60^2}{2,5^2} = 3,4 \cdot 10^3$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8}{12 \cdot 10^9} = 2,5 \cdot 10^{-2} = 2,5 \text{ cm}$$

$$c \text{ (velocità della luce nel vuoto)} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

guadagno d'antenna in dB: $G_{rx} = G_{tx} = G_{dB} = 10 \log_{10} G = 10 \cdot \log_{10} 3,4 \cdot 10^3 = 35,31 \text{ dB}$

Calcolo ^{dB} dell'attenuazione del segnale nello spazio libero corrispondente alle lunghezze della tratta $L = 15$ Km

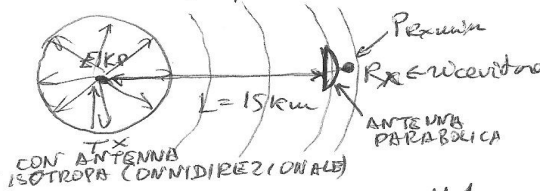
$$A_{SPL} = 32,4 + 20 \log_{10} f_{(MHz)} + 20 \log_{10} L_{(Km)} =$$
$$= 32,4 + 20 \log_{10} 12000 + 20 \log_{10} 15 =$$
$$= 32,4 + 81,58 + 23,52 = 137,5 \text{ dB}$$

Calcolo della potenza del trasmettitore

Potenza irradiata da un'antenna isotropa (non direzionale)

$$EIRP = P_{R_{x\min}} - G_{Tx} + A_{SPL} =$$

$$= -56,98 \text{ dBW} - 35,31 \text{ dB} + 137,5 \text{ dB} = 45,21 \text{ dBW}$$



EIRP
Equivalent
Isotropically
Radiated
Power
(potenza che dovrebbe
essere irradiata da
un'antenna isotropa
non direzionale per
ottenere la stessa
intensità di campo
in prossimità del
ricevitore.
L'EIRP calcolato
corrisponde a $P_{10} = \frac{45,21}{10} = 33199 \text{ W} \approx$
 $\frac{EIRP}{EIRP} \approx 33 \text{ kW}$

P_{Tx} potenza del trasmettitore (dBW)

$$= EIRP - G_{Tx} =$$

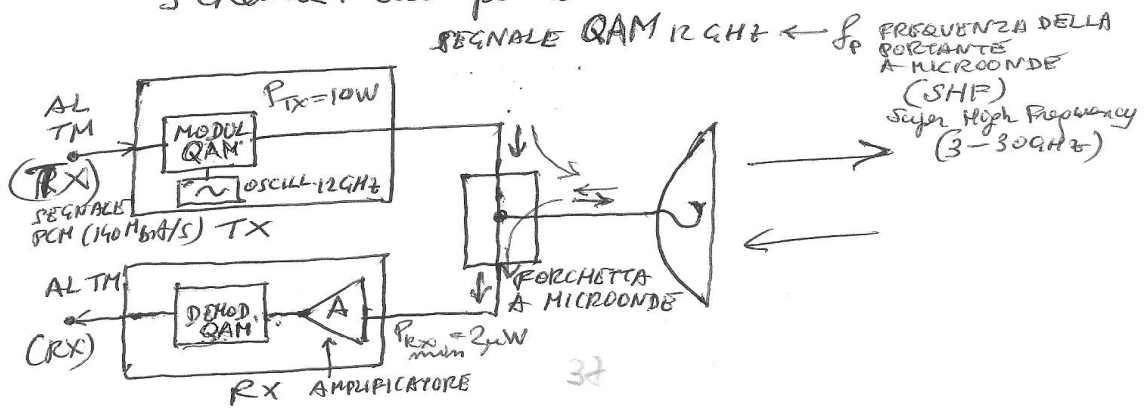
$$= 45,21 - 35,31 = 10 \text{ dBW}$$

$$P_{Tx} = 10 \log_{10} \frac{P_{Tx}}{1}$$

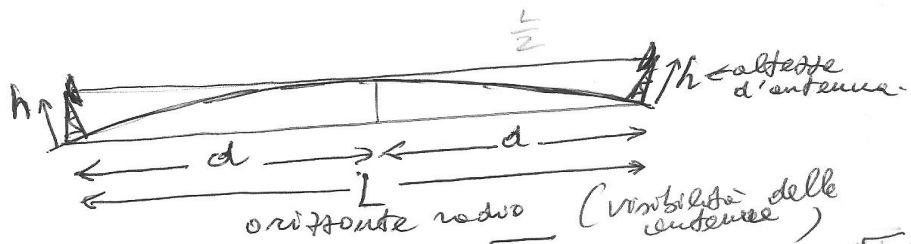
$$P_{Tx} = 10 \frac{P_{Tx}(\text{dBW})}{10} = 10 \frac{10}{10} = 10 \text{ W}$$

a blocchi delle sezioni trasmettente TX e ricevente RX

Schemi del ponte radio e di ciascun ripetitore



Calcolo dell'altezza delle antenne paraboliche 4



$$L = 2d \approx 2 \cdot 4,124 \sqrt{h}$$

$$L^2 = (2 \cdot 4,124)^2 \cdot h \text{ (m)}$$

$$d = 4,124 \sqrt{h} \text{ (m)}$$

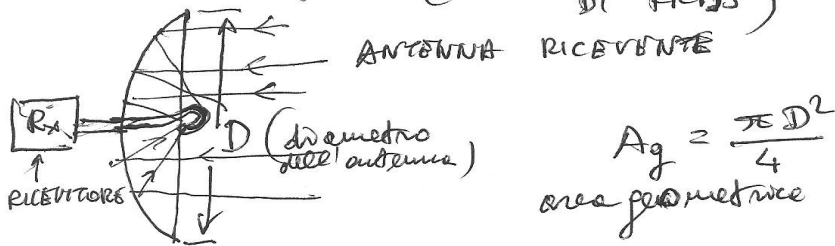
$$L = 8,248 \sqrt{h}$$

$$h = \frac{L^2}{(2 \cdot 4,124)^2} = \frac{15^2}{8,248^2} = \frac{225}{68,029} = 3,3 \text{ m}$$

in condizioni ideali, cioè senza ostacoli
interferenti
(in linea d'aria)

Collegamento su ponte radio terrestre
(DIMOSTRAZIONE DELLA FORMULA DI FRIS)

tabis



$$A_g = \frac{\pi D^2}{4}$$

area geometrica

$$A_{eff} = \eta_e A_g$$

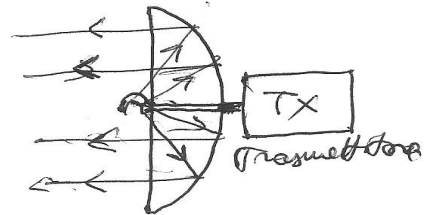
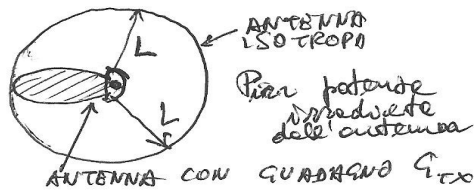
AREA EFFICACE

↑
EFFICIENZA
(RENDIMENTO
DELL'ANTENNA)

$$G_{RX} = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2} = \frac{4\pi \eta_e A_g}{\lambda^2} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \eta_e \frac{\pi D^2}{4} = \eta_e \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$$

paradigma $A_{eff} = G_{RX} \frac{\lambda^2}{4\pi}$

ANTENNA TRASMETTENTE



$$S_{iso} = \frac{P_{irr}}{4\pi L^2}$$

densità di potenza
obtenibile alla distanza L
dal trasmettitore irradinando
con antenna isotropa (con direttiva)

$$S = G_{TX} S_{iso} = G_{TX} \frac{P_{irr}}{4\pi L^2}$$

densità di
potenza ottenibile alla
distanza L irradinando con antenna
direttiva con guadagno G_{TX}

$$P_{rx} = S \cdot A_{eff} = \frac{G_{tx} P_{irr}}{4\pi L^2} \cdot A_{eff} = \frac{G_{tx} P_{irr}}{4\pi L^2} \cdot G_{rx} \frac{\lambda^2}{4\pi} =$$

Potenza ricevuta alle distanze L con un'antenna di area efficace A_{eff} e guadagno $G_{rx} = \frac{4\pi A_{eff}}{\lambda^2}$

$$= G_{tx} G_{rx} P_{irr} \left(\frac{\lambda}{4\pi L}\right)^2$$

Essendo $\lambda = \frac{c}{f}$ (nel vuoto o nell'aria), si ottiene la formula della trasmissione (o collegamento) dell'energia elettromagnetica, (di Friis):

$$P_{rx} = G_{tx} G_{rx} P_{irr} \left(\frac{c}{4\pi L f}\right)^2 = EIRP \cdot G_{rx} \left(\frac{c}{4\pi L f}\right)^2$$

$EIRP = G_{tx} \cdot P_{irr}$ è la potenza che darebbe (Equivalent Isotropically Radiated Power) essere irradiata da un'antenna isotropa per ottenere la stessa densità di potenza che si ottiene alle distanze L con un'antenna direttiva con guadagno G_{tx} .

Calcolo dell'attenuazione di potenza del collegamento;

$$A_{coll} = \frac{P_{irr}}{P_{rx}} = \frac{\left(\frac{4\pi L f}{c}\right)^2}{G_{tx} G_{rx}} = \frac{A_{sp}}{G_{tx} G_{rx}}$$

dove $A_{sp} = \left(\frac{4\pi L f}{c}\right)^2$ è l'attenuazione dello spazio libero

$$A_{coll} (dB) = 10 \log_{10} \frac{P_{irr}}{P_{rx}} = 10 \log_{10} A_{sp} - 10 \log_{10} G_{tx} - 10 \log_{10} G_{rx} =$$

$$= A_{sp} (dB) - G_{tx} (dB) - G_{rx} (dB)$$

$$A_{sp}(\text{dB}) = 10 \log_{10} \left(\frac{4\pi L f}{c} \right)^2 = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right) + 20 \log_{10} L + 20 \log_{10} f,$$

Equation

con L espresso in m e f in Hz.

Esprimendo L in Km e f in MHz si ottiene:

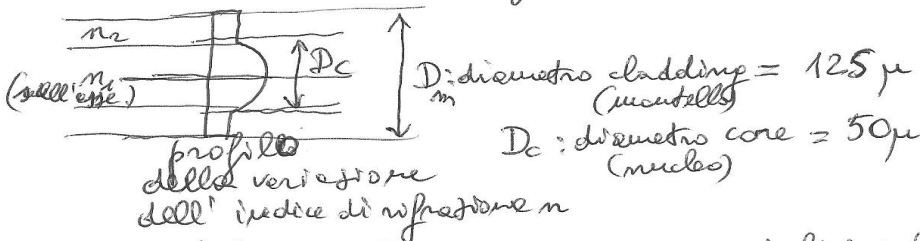
$$\begin{aligned} A_{sp}(\text{dB}) &= 20 \log_{10} \frac{4 \cdot 3,14}{3 \cdot 10^8} + 20 \log_{10} (10^3 L) + \\ &\quad + 20 \log_{10} (10^6 f) = \\ &= 20 \log_{10} 4,186 \cdot 10^{-8} + 20 \log_{10} 10^3 + 20 \log_{10} L + \\ &\quad + 20 \log_{10} 10^6 + 20 \log_{10} f = \\ &= -147,56 + 60 + 120 + 20 \log_{10} L + 20 \log_{10} f = \\ &= 32,44 + 20 \log_{10} L \text{ (in Km)} + 20 \log_{10} f \text{ (in MHz)} \end{aligned}$$

3) Dimensionamento delle linee in fibra ottica

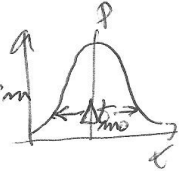
lunghezza $L = 79 \text{ Km}$

Si impieghino 79 spezzoni da 1 Km con 78 giunzioni caratterizzate da una perdita di 0,1 dB/giunzione.

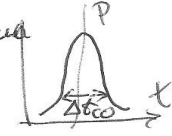
1° caso Si suppone di impiegare una fibra ottica multimodale del tipo graded index con le seguenti caratteristiche:



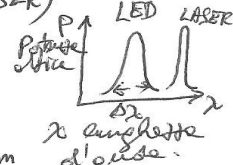
Δt_{mo} : allargamento temporale degli impulsi/Km dovuto alla dispersione modale
 $\Delta t_{mo} = 0,3 \text{ ns/Km}$



Δt_{co} : allargamento temporale degli impulsi/Km dovuto alla dispersione cromatica (per effetto della larghezza spettrale $\Delta \lambda$ delle sorgenti (LED o LASER))



$\Delta t_{co} = m \Delta \lambda$
 con $m = 100 \text{ ps/(nm} \cdot \text{Km)}$



II Finestra di funzionamento: da 1250 a 1350 nm lunghezza d'onda λ $\lambda = 1300 \text{ nm}$

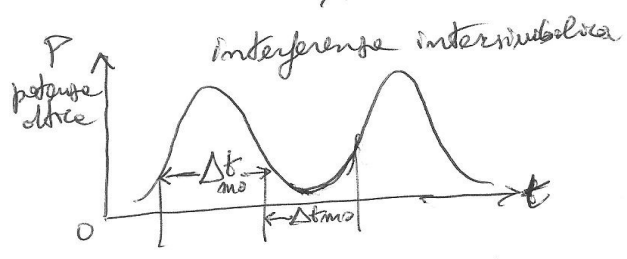
perdite (attenuazione) Kilometrica = 1 dB/Km
 Kilometrica

Calcolo di

$$B_{mo} = \frac{0,44 \cdot 10^3}{\Delta t_{mo}} \quad B_{mo} \text{ in MHz} \cdot \text{Km}$$

larghezza di banda Kilometrica determinata dalle dispersioni modali (relativa ad uno spettro largo 1 Km)

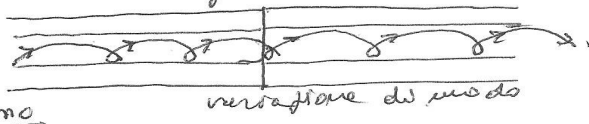
$$B_{mo} = \frac{0,44 \cdot 10^3}{0,3} \approx 1467 \text{ MHz} \cdot \text{Km}$$



$$B_{mo} = \frac{1}{2 \Delta t_{mo}} \text{ formula storica.}$$

In pratica, invece di considerare $B_{mo} = \frac{0,5 \cdot 10^3}{\Delta t_{mo}}$, si considera $B_{mo} = \frac{0,44 \cdot 10^3}{\Delta t_{mo}}$, essendo più precisa la forma dell'impulso.

Poiché nel nostro caso, si adoperano più spessori, bisogna tenere conto del cambiamento dei modi di propagazione nel passaggio da uno spessore all'altro.



$$B_m = \frac{B_{mo}}{L \delta}$$

larghezza di banda delle linee, determinate dalle dispersioni modali

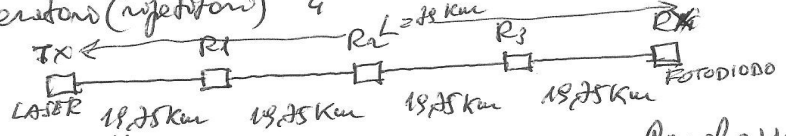
dove δ è un coefficiente $\approx 0,85$, che tiene conto delle perdite delle giunzioni.

$$B_m = \frac{B_{mo}}{L^0} = \frac{1467 \text{ MHz} \cdot \text{km}}{79^{0,85}} = \frac{1467}{41,01} = 35,77 \text{ MHz}$$

la larghezza di banda ^{robale} è maggiore rispetto ad una linea delle stesse lunghezze, senza ripetitori.

Si deduce che, avendo la banda richiesta $B=70 \text{ MHz}$, con frequenze di cifre di 140 Mbit/s non è possibile fare a meno dei ripetitori.

Nel nostro caso si può suddividere la linea in quattro tratti da $\frac{79}{4} = 19,75 \text{ km}$, impiegando 3 ripetitori (ripetitori).



Oppure tronco è caratterizzato da una larghezza di banda per dispersione modale $B_m = \frac{B_{mo}}{L^0} = \frac{1467}{19,75^{0,85}}$
 $= \frac{1467}{12,625} = 116,19 \text{ MHz} > B=70 \text{ MHz}$

Calcolo di $B_{co} = \frac{0,44 \cdot 10^6}{\Delta t_{co}}$ B_{co} in $\text{MHz} \cdot \text{km}$
 larghezza di banda Kilometrica per dispersione cromatica
 $B_{co} = \frac{0,44 \cdot 10^6}{\Delta t_{co}} = \frac{0,44 \cdot 10^6}{m \Delta x} = \frac{0,44 \cdot 10^6}{100 \cdot 2} = 2200 \text{ MHz} \cdot \text{km}$
 (m = 100 ps/(nm·km))
 Se $\Delta x = 2 \text{ nm}$ (larghezza spettrale della sorgente laser)

La larghezza di banda B_c per dispersione cromatica di ciascun tronco risulta essere:

$$B_c = \frac{B_{co}}{L'} = \frac{2200}{19,75} = 111,39 \text{ MHz}$$

La larghezza di banda effettiva B_{eff} della fibra ottica si ottiene con la formula:

$$B_{eff} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{B_m^2} + \frac{1}{B_c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{116,19^2} + \frac{1}{111,39^2}}} = \frac{1}{\sqrt{7,407 \cdot 10^{-5} + 8,033 \cdot 10^{-5}}} = \frac{1}{\sqrt{1,546 \cdot 10^{-4}}} = 80,42 \text{ MHz}$$

Calcolo perdite totali di un tronco

Perdite nelle giunzioni $P_g = 1,9 \cdot 0,1 \text{ dB/giunzione} = 1,9 \text{ dB}$
↑
giunzioni/tronco

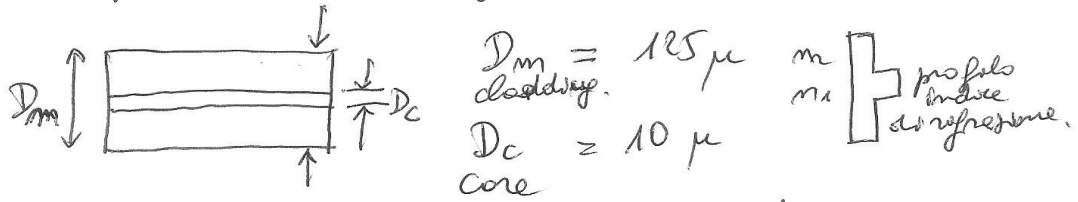
Perdite lineari $P_{LW} = 19,75 \cdot \text{km} \cdot 0,1 \text{ dB/km} = 19,75 \text{ dB}$
↑
lunghezza di un tronco di linea.

Ciascun amplificatore deve pertanto compensare almeno $P_g + P_{LW} = (1,9 + 19,75) \text{ dB} = 21,65 \text{ dB}$
→ 22 dB

Supponendo che la potenza incidente sul ciascun rivelatore (fotodiodo terminale e fotodiode) debba essere di -46 dBm e ritenendo per rispettivamente 4 dB ed a 3 dB le perdite di accoppiamento tra nodo laser e fibre e tra fibre e fotodiode (PAM, si ha:

$$P_{LASER} = -46 \text{ dBm} + 4 \text{ dB} + 3 \text{ dB} + 22 \text{ dB} = -17 \text{ dBm} = 10^{-17/10} = 10^{-1,7} = 1,99 \cdot 10^{-2} \text{ mW} = 19,9 \mu\text{W}$$

2° caso
 fibra monomodale step index fondamentale con $\lambda = 1300 \text{ nm}$ (2° finestra)
 step index con le seguenti caratteristiche;



Attenuazione (perdite) = $0,45 \text{ dB/Km}$

Essendo in questo caso $\Delta t_m \approx 0$, si ha;
 l'allargamento per dispersione modale è nullo

$B_{eff} \approx B_c$ $\Delta t_{co} \approx 20 \text{ ps/Km}$
 larghezza di banda effettiva larghezza di banda per dispersione cromatica.

$B_{co} = \frac{0,44 \cdot 10^6}{\Delta t_{co}} = \frac{0,44 \cdot 10^6}{20} = 22000 \text{ MHz} \cdot \text{Km}$
 larghezza di banda Kilo metriche con sorgente LASER con $\Delta x = 1 \pm 3 \text{ nm}$

$B_{eff} \approx B_c = \frac{B_{co}}{L} = \frac{22000}{79} = 278,48 \text{ MHz} \rightarrow B$

Non occorrono ripetitori ed è possibile approssimare al velocità di 140 Mb/s e 140 Mb/s per l'espansione del sistema fibra a $140 \times 3 = 420 \text{ Mb/s}$

$P_{in} \text{ (perdite) (kilometriche)} \cdot 0,45 \text{ dB/Km} = 79 \cdot 0,45 = 35,55 \text{ dB}$
 $P_c = 0,1 \text{ dB/connessione} \cdot 78 = 7,8 \text{ dB}$
 $P_{total} = P_c + P_{in} = 7,8 + 35,55 = 43,35 \text{ dB}$
 de Asimmetria in fibra ottica perdite nella linea ottica

$$P_{\text{ottica d'ingresso}} = P_{\text{ottica incidente sul rivelatore (fotodiodo PIN)}} + P_{\text{perdite nelle linee ottiche}} = -46 + 43,3 = -2,7 \text{ dBm}$$

$$P_{\text{PIN}} = 10 \log_{10} \frac{2,511 \cdot 10^{-2} \text{ mW}}{2,511 \text{ mW}} = -46 \text{ dBm} \quad 43,3 \text{ dB} \quad \leftarrow \text{30 mW}$$

Sono state ritenute trascurabili le perdite di accoppiamento tra fibre ottica e rivelatore (fotodiodo PIN)

Assumendo una perdita di accoppiamento di 4 dB tra diodo LASER e fibre ottiche, si ha:

$$P_{\text{diodo LASER d'ingresso}} = P_{\text{ottica}} + P_{\text{perdite accoppiamento LASER-FIBRA}} = -2,7 \text{ dBm} + 4 \text{ dB} = 1,3 \text{ dBm}$$

$$1,3 = 10 \log_{10} \frac{P_{\text{diodo LASER}}}{1 \text{ mW}}$$

$$P_{\text{diodo LASER}} = 10^{\frac{1,3}{10}} = 1,34 \text{ mW}$$

Si utilizza un diodo LASER da 2 mW,