



Using OptSim for teaching optical communications: a virtual lab experience

A. Carena, and V. Curri





- ▶ OptSim history
- ▶ Why use a simulator to teach?
 - ▶ The great value of learning by doing... at least virtually
- ▶ Our experience at Politecnico di Torino
- ▶ A typical OptSim Virtual Lab



- ▶ Back in 1995 our research group started working toward a numerical fiber simulator for research purposes
- ▶ In 1998 OPTCOM began a collaboration with a company to develop a commercial product:
 - ▶ Graphic interfaces were added and the tool engineered:
OptSim was born!!
- ▶ Now OptSim is in the RSoft Design Group product portfolio
- ▶ Since 1999 we are using OptSim for teaching optical communications courses at Politecnico di Torino

- ▶ Inductive teaching vs. Deductive teaching

Data and Observations  General Principles and Theorems

- ▶ Studies have shown that inductive teaching has several advantages for students
- ▶ To organize an entire course based on inductive teaching is difficult
- ▶ We try to pick 'the best of both' approaches, introducing some learning by doing

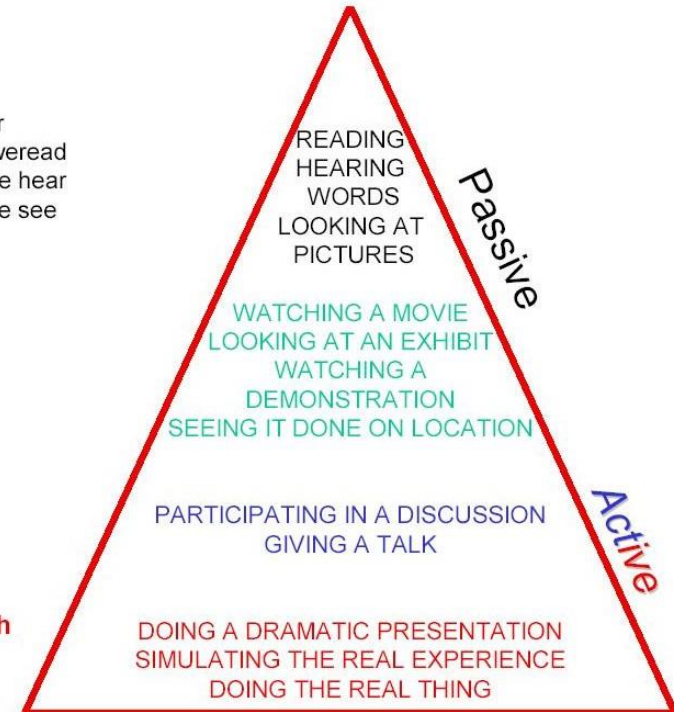
- ▶ Learning by doing is better for long time retention and transfer of concepts

We Remember
10 % of what we read
20% of what we hear
30% of what we see

50% of what
we hear
and see

70% of what
we say

90% of
what we both
say and
do



Why use a simulator to teach?

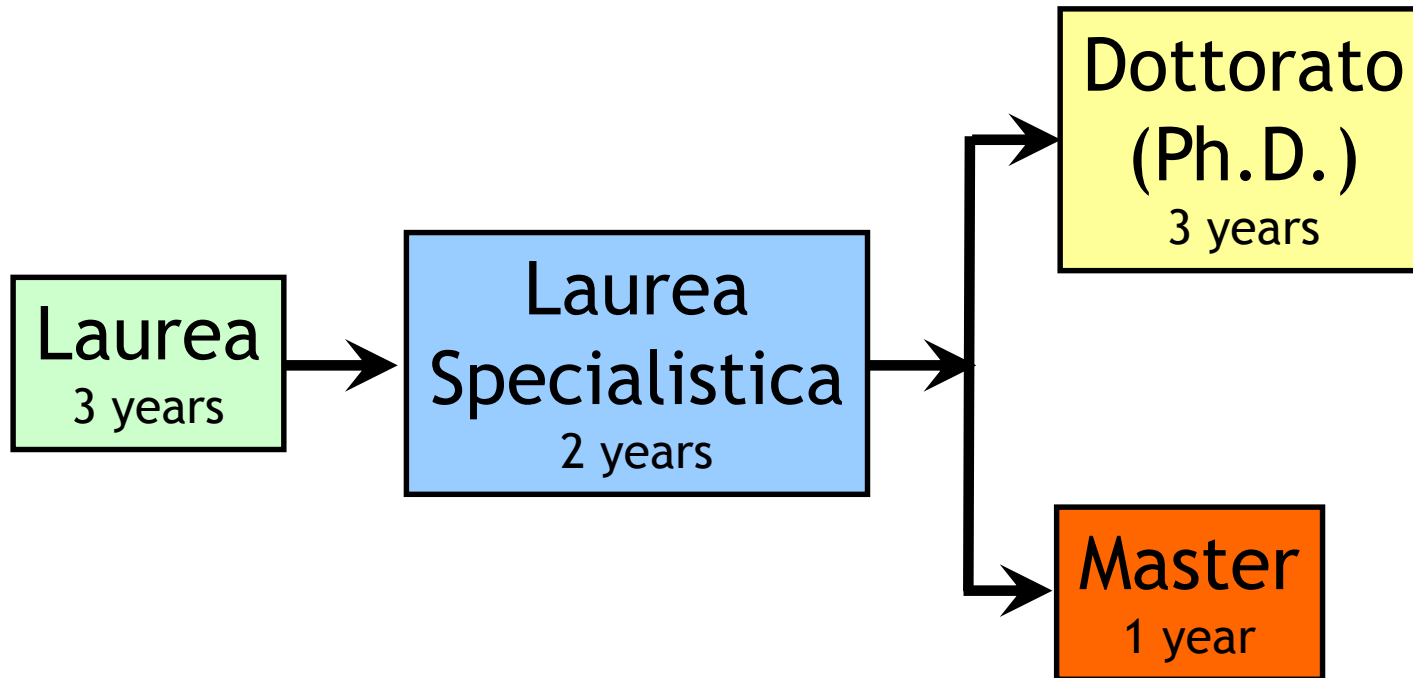
- ▶ **Very expensive** equipment for real lab experience:
 - ▶ In order to show a state-of-the-art transmission experiments we need:
 - ▶ BERT 10 Gbit/s
 - ▶ Oscilloscope
 - ▶ OSA
 - ▶ WDM sources (16 or more channels)
 - ▶ EDFAs
 - ▶ Optical and electrical components
- ▶ Moreover we need to replicate each bench in order to accommodate several groups of student: we can not afford it!!
- ▶ A simulation tool is a must!!



- ▶ At Politecnico di Torino we have several computer labs
- ▶ OptSim is always available through all of them
- ▶ We decided to introduce OptSim based Virtual Experiences in our optical communications courses



- ▶ In Italy the University systems has three levels:



- ▶ We have Optical Communications courses in Laurea and Laurea Specialistica in Telecommunications
- ▶ We also have a Master in Optical Communications and Photonic Technologies



- ▶ In particular we teach
 - ▶ A basic introductory course at Laurea level
 - ▶ ~ 100 students
 - ▶ Two courses at Laurea Specialistica level
 - ▶ ~ 120 students for the first course
 - ▶ ~ 40 students for the advanced course
 - ▶ Two courses at Master level
 - ▶ ~ 15 students

- ▶ We use OptSim Virtual Lab for teaching in Laurea Specialistica and in Master



- ▶ A typical course lasts 7-10 weeks
- ▶ A week is organized as follow:
 - ▶ 4 hours of lesson
 - ▶ 2 hours of exercises presented to students
 - ▶ 2 hours of assisted virtual lab



- ▶ Two hours introduction lesson on OptSim during first course
 - ▶ Guided tour on main software functionalities
- ▶ Virtual Lab experiments requirements are published on the course website
 - ▶ System data and step-by-step description for critical parameters
- ▶ We guarantee at least four hours of assisted OptSim Virtual Lab for each experience
- ▶ A short report is required for each experience
 - ▶ It is graded and it counts toward the final exam grade

01EVMER – Optical Transmission I

OptSim Lab #1

Consider the following optical communication system

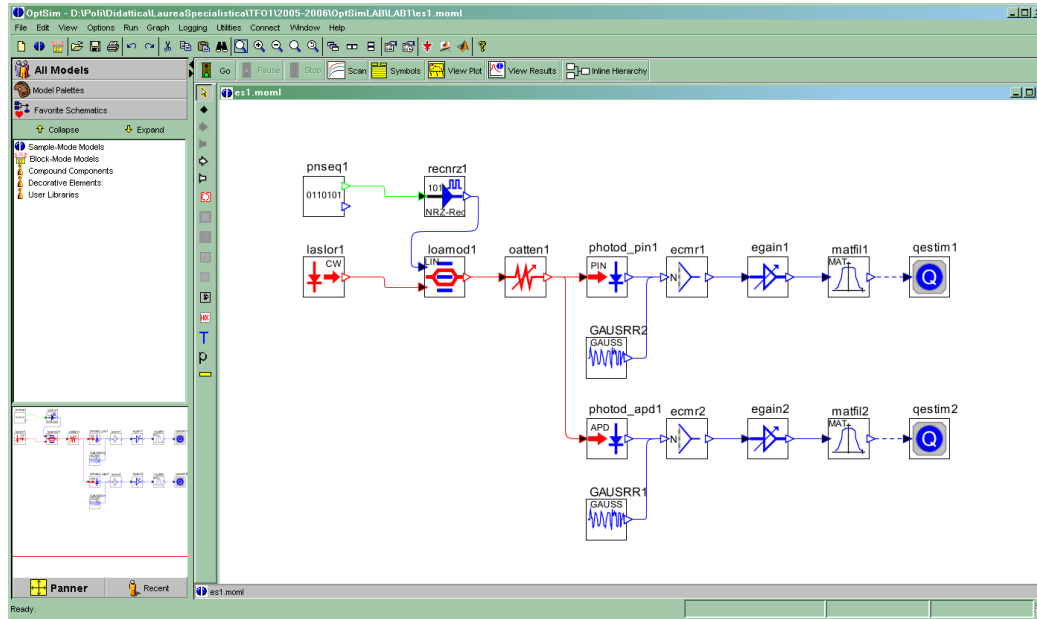
- Transmitter:
 - CW laser, emitting at 193 THz and having 0 MHz FWHM linewidth (ideal laser)
 - External linear amplitude modulator (assume the modulator to be ideally linear);
 - Data source having a Bitrate of 10 Gbit/s, Random sequence and Pseudo-Random Sequence Degree of 13
 - NRZ rectangular driver able to achieve full depth modulation (bit '0': no power, bit '1': all power).
- Receiver:
 - For the photodiode consider two options, always neglecting the dark current and the band limitation (Single-Pole electrical filtering: 'Off')
 - PIN: $R=0.85 \text{ A/W}$;
 - APD: $R=0.8 \text{ A/W}$, $G=15$, $x=0.7$.
 - Transimpedance amplifier (TIA):
 - $R_f=1500 \Omega$
 - Input referred noise density= $15 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ (one-sided);
 - Electrical filter: matched to the pulse shape.

Assuming the performance to be achieved by the systems $P(e)=10^{-12}$, i.e. $Q=7$:

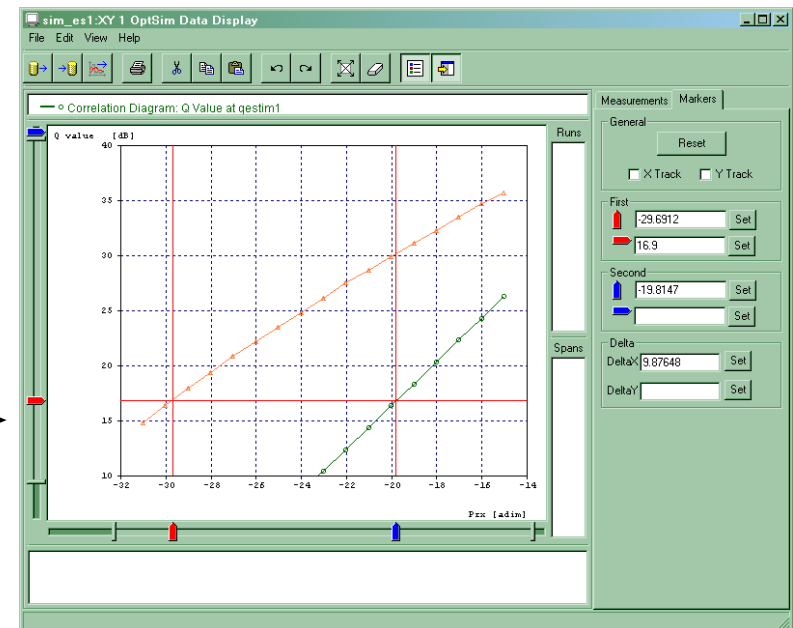
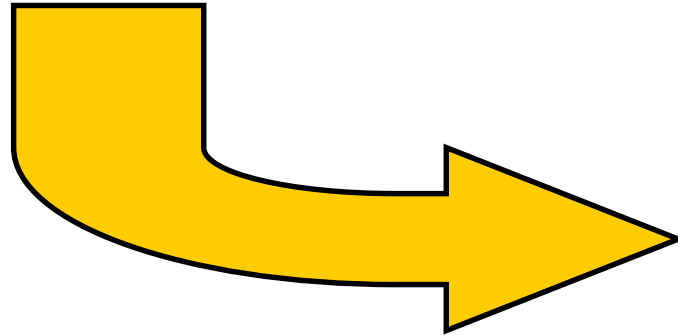
- 1) Analytically calculate the receiver sensitivity when the electrical matched filter is used. Quantify the enhancement (sensitivity gain in expressed dB) achieved using an APD. Describe and explain differences in eye diagrams.
- 2) Using OptSim, verify all previous results. Suggestion: use a parametric run to sweep the received average power over an adequate range of values. Properly use a symbol in order to automatically obtain a plot of Q vs. the received average power.
- 3) Consider a more realistic filter: a Bessel low pass filter, 4 poles, $f_{3dB}=8 \text{ GHz}$. Evaluate by simulation the receiver sensitivity, both for the PIN and the APD based receivers, and quantify the penalty with respect to matched filter case.
- 4) Assume to have a transmitter with an average output power of -10 dBm. Using OptSim, evaluate the maximum reachable distance for both a PIN based and an APD based receiver. Consider the realistic setup with the Bessel filter. Assume the fiber has an attenuation of 0.2 dB/km. Suggestion: use a parametric run, sweeping the fiber length over an adequate range and obtain a Q vs. length plot. Emulate the fiber using an optical attenuator, setting the attenuation to 0.2*length.

Generale notes for the simulation

- a) In the Sample-Mode Simulation Parameters window set:
 - a. in the Run Options tab:
 - i. Simulation Method: VBS
 - ii. VBS Simulation Option: VBS Full
 - iii. Enable both optical and electrical noise
 - b. in the Time Domain tab:
 - i. set the lower and upper bandwidth limit respectively to 192.88 THz and 193.12 THz, in order to have 30 samples per bit at 10 Gbit/s
 - ii. set the reference bit rate to 10 Gbit/s
 - iii. set the Total Simulated Timespan #Bits @ Ref Bitrate to 8192 bits, equal to the length of the PN sequence generated by the data source
 - iv. set the Optical Field Representation to Dual Polarization
- b) Model the transimpedance amplifier as an ideal gain and a white gaussian electrical noise to be added at the photodetected signal. Properly convert the input referred noise density units. Note that the Input referred Noise Density supplied is one_sided, as usually given in datasheets.



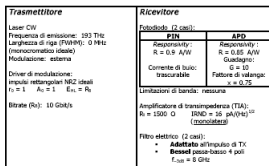
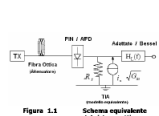
Sensitivity of a Receiver PIN vs. APD



Esercitazione 1

L'esercitazione ha per scopo la caratterizzazione della sensitività di un ricevitore ottico a variare del tipo di fotodiodo (PIN o APD) e del filtro elettrico (adattato all'impulso o Bessel passa-basso), fissate le specifiche prestazionali (Q ovvero P₀). Lo studio termina con i relativi confronti in termini di massima distanza raggiungibile, per tutti i casi di ricevitore analizzati.

1.1 Modello di sistema ottico



Il sistema è stato simulato mediante il simulatore di reti ottiche OptSim[®], secondo il layout rappresentato in Figura 1.2. Lo schema è da considerarsi valido per tutte le parti della simulazione: esso, infatti, non varia nella sua struttura, ma solo nelle 4 differenti coppie fotodiodo-filtro elettrico di ricezione, così come richiesto dal testo dell'esercitazione.

L'attenuatore ottico posto tra il trasmettitore e il ricevitore serve a riprodurre l'effetto di un tratto di fibra ottica (attenuazione: 0.2 dB/km), utile nella parte di verifica della massima distanza raggiungibile.

1.2 Calcolo della sensitività

Date le specifiche in Q, la sensitività (come numero medio di fotoni per bit richiesti, N₀) è stata calcolata secondo la nota formula valida per il caso di filtro elettrico adattato:

$$N_0 = \frac{Q^2}{2 \ln 2} \cdot G \cdot A_s \cdot \frac{1}{G \cdot R_p R_{th} R_{th}} \cdot \sigma_n = R_p \sqrt{\frac{2 \ln 2}{G \cdot A_s}} \cdot \sigma_n$$

(in cui, per il solo fotodiodo PIN, G = 1, ovvero nessun effetto di moltiplicazione a valanga).

Il calcolo è stato velocizzato grazie alla costruzione di un'apposita routine in ambiente MATLAB[®].

Schema RX	N ₀ [fotoni]	N ₀ [dBm]	P ₀ [dBm]
PIN + FA	2915	-21.00	-8.93
APD + FA	931.62	-203.05	1.191

PIN + FA
Dalla valutazione separata dei singoli addendi si può notare (cfr. Tabella Comparativa 1.1), come, nel caso PIN, il contributo di shot (N_{0,shot}) sia effettivamente trascurabile rispetto al contributo termico (numero elettrico del TIA, N_{0,term}).

APD + FA
Contrariamente al caso con fotodiodo PIN, i singoli addendi della formula assumono qui una diversa rilevanza: il contributo di shot (N_{0,shot}) non risulta più trascurabile rispetto al contributo termico, mentre quest'ultimo è minore rispetto al suo omologo del caso con PIN. Infatti:

- il contributo di shot è aumentato di un fattore G², che mette in conto l'effetto di moltiplicazione a valanga;
- il contributo di shot è aumentato di un fattore G², che mette in conto l'effetto di moltiplicazione a valanga del fotodiodo APD;

Schema RX	N _{0,shot} [fotoni]	N _{0,term} [fotoni]	N _{0,tot} [fotoni]
PIN + FA	2915	21.00	2936
APD + FA	931.62	203.05	1134.67

2 PIN + Bessel / APD + Bessel

In questi casi non sono stati eseguiti calcoli teorici preliminari - la sensitività è stata direttamente valutata tramite simulazione.

- il contributo termico è diminuito di un fattore G, fatto che traduce come l'uso di un APD aiuti a rendere proporzionalmente meno rilevante il rumore termico del ricevitore elettrico.

1.3 Verifica della sensitività per via simulativa

La simulazione con il software OptSim[®] è stata impostata come run parametrico che realizza direttamente un grafico del parametro Q rispetto alla potenza media di ricezione (in dBm), uguale alla potenza media trasmessa (chiamata P_{in}), in quanto in questa fase è stato escluso l'attenuatore.

L'intervallo di simulazione (valori di P_{in} in dBm) è stato scelto nell'ordine dei valori teorici di sensitività calcolati, in modo da ottenere un grafico su un congruo numero di punti precedenti e successivi.

Q [dB]	MIN [dBm]	MAX [dBm]	Passo [dB]
7	-30	-17	1

Schema RX	Valore Analitico [dBm]	Risultato Simulazione [dBm]	Guadagno risp. PIN + FA [dB]	Guadagno risp. APD + FA [dB]
PIN + FA	-20.53	-20.53	-	-9.72
APD + FA	-29.23	-29.26	+8.72	-
PIN + Bessel	-	-19.62	+8.14	-9.81
APD + Bessel	-	-27.92	+7.33	-1.11

NOTA: i valori in verde (positivi) indicano un effettivo guadagno, quelli in rosso (negativi) una penalità.

I valori di sensitività ottenuti in simulazione (cfr. Tabella Comparativa 1.2) confermano efficacemente quelli ricavati dai calcoli teorici.

Un confronto complessivo degli andamenti di Q per i 4 diversi ricevitori è visibile in Figura 1.3.

È evidente come l'uso di un filtro non adattato introduca sempre una penalità. Essa è in entrambi i casi, di poco superiore a 1 dB - piuttosto contenuta, grazie alle buone caratteristiche del filtro di Bessel.

Le differenze relative tra ricevitore con PIN e ricevitore con APD si mantengono spaziosamente inalterate rispetto allo schema (dosato) con filtro adattato (Penalità PIN vs APD = 8.7 dB circa).

1.4 Confronto Diagrammi ad Occhio

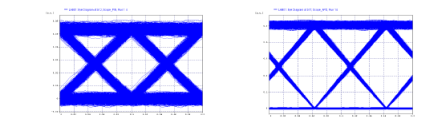


Figure 1.4 Diagrammi ad Occhio a parità di P₀ = -17 dBm - Confronto PIN (SX) vs APD (DX)

3 Osservando la Figura 1.4, una prima evidenza va alla maggiore apertura dell'occhio per il caso di ricevitore con APD, che permette una più efficace protezione dai rumori. Con questo setup, infatti, l'uso di un diodo APD garantisce prestazioni migliori rispetto al caso con diodo PIN a parità di potenza ricevuta.

In conseguenza di ciò, occorre ricordare come le scale di ampiezza (base delle ordinate) non siano uguali e sia dunque irrisultante un confronto immediato sui dettagli dei segnali livelli: una visione locale delle scelte parametrizzatrici di rumore per APD il livello "alto" medio d_{1,APD} sia maggiore di un fattore pari a

$$\frac{d_{1,APD}}{d_{1,PIN}} = 9.44$$

nel rispetto della formula $\bar{d}_1 = GRX \cdot 2 \sqrt{P_{in}} \cdot A_s$.

Risulta infatti: $d_{1,PIN} = 0.055$ e $d_{1,APD} = 0.52$.
In cui il secondo è maggiore del primo di un fattore che è, appunto, circa pari a 9.44.

Inoltre, le varianze sui livelli "bassi" di segnale piovono diverse per la differenza di scale, mentre in realtà non lo sono, in quanto determinate dalla sola varianza del rumore termico $\sigma_{n,term}^2$ - in corrente di bias, in questo caso, è considerata trascurabile, ed è quindi trascurabile il termine dipendente da essa e dal guadagno G₀ nell'espressione:

$$\sigma_{n,term}^2 = G_0 \cdot q \cdot R_p \cdot I_{bias} + \sigma_{n,term}^2$$

Le varianze sui livelli "alti", invece, sono effettivamente differenti, in quanto determinate dalla formula

$$\sigma_{n,shot}^2 = G_0 \cdot R_p \cdot 2 \sqrt{P_{in}} \cdot q \cdot A_s + G_0 \cdot q \cdot R_p \cdot I_{bias} + \sigma_{n,term}^2$$

In cui è da trascurare il termine legato alla corrente di bias (secondo addendo).

Il fattore che rende maggiore il primo termine di $\sigma_{n,shot}^2$ nel caso di ricevitore con APD, sempre a parità di P₀, è

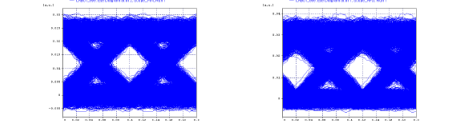
$$\frac{G_{APD}}{G_{PIN}} = 53.11$$


Figure 1.5 Diagrammi ad Occhio a parità di prestazioni (Q = 7) - Confronto PIN (SX) vs APD (DX)

Osservando invece i diagrammi ad occhio a parità di prestazioni (Figura 1.5), ovvero a parità di Q, si può notare, in modo analogo alla situazione precedente, un inasprimento del livello "alto" nel caso del diodo APD, tuttavia meno marcato, in quanto pesato di un fattore pari al rapporto delle rispettive P_{0,0} (a parità di prestazioni, infatti, due sistemi a differente sensitività lavoreranno con differenti potenze ricevute):

$$\frac{G_{APD} \cdot P_{in,APD}}{G_{PIN} \cdot P_{in,PIN}} = 1.2720$$

Risulta infatti: $d_{1,PIN} = 0.027$ e $d_{1,APD} = 0.03$.

Tali valori sono confermati dai dati presenti sui grafici.

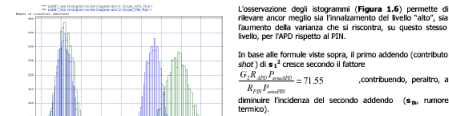


Figure 1.6 Istogrammi Frequenze Livelli (Q = 7) - Confronto PIN (SX) vs APD (DX)

L'osservazione degli istogrammi (Figura 1.6) permette di rilevare ancor meglio sul frangimento del livello "alto", sia l'aumento della varianza che si riscontra, su questo stesso livello, per APD rispetto al PIN.

In base alle formule viste sopra, il primo addendo (contributo shot) di $\sigma_{n,shot}^2$ cresce secondo il fattore

$$\frac{G_{APD}}{G_{PIN}} = 53.11$$

contribuendo, peraltro, a diminuire l'incidenza del secondo addendo ($\sigma_{n,term}$ numero termico).

Viene inoltre confermata la stessa varianza per il livello "basso" nei due casi.

4 In ultimo, si evidenzia una asimmetria dell'occhio per APD, da cui consegue l'esigenza di scegliere una soglia diversa dalla banale soglia mid-eye.

Validando il problema in termini di $\gamma = \sigma_{n,low}^2 / \sigma_{n,high}^2$, dove $\gamma = 1$ equivale ad avere un occhio simmetrico, si conferma come nel caso del diodo APD l'incidenza del termine di rumore termico venga ridimensionata. Infatti, applicando le formule, si trova

$$\gamma_{PIN} = 1.02 \rightarrow \gamma \approx 1$$

$$\gamma_{APD} = 2.42 \rightarrow \gamma > 1 \rightarrow \text{occhio asimmetrico}$$

Calcolando $\sqrt{\gamma}$ si perviene al valore indicativo del rapporto tra le altezze delle "APD" sui due livelli del segnale, che risulta essere

$$\frac{PIN}{APD} \approx \frac{1}{1.56} \approx 0.64$$

corrispondenti a quanto osservabile sui rispettivi diagrammi ad occhio e, in particolare, sugli istogrammi, sui quali è stato verificato il diverso supporto della "campina" tra livello "basso" e livello "alto".

1.5 Verifica della massima distanza raggiungibile

Per tutti i 4 casi di ricevitore ottico, si è calcolato analiticamente la massima distanza di collegamento (L_{max}), fissate la potenza media di emissione della sorgente ottica (P₀ = -10 dBm) le prestazioni attese (Q=7), secondo la formula

$$L_{max} = \frac{P_{0,0}}{2 \cdot \alpha} \cdot \frac{1}{\sigma_{n,term}^2}$$

i cui valori sono inseriti nella Tabella Comparativa 1.3 e confrontati con quelli di simulazione.

I risultati ottenuti mostrano, sotto altro punto di vista, le migliori prestazioni del ricevitore con APD rispetto a quello con fotodiodo PIN (a parità di scelta del filtro elettrico), e del sistema con filtro elettrico adattato (dosato) rispetto a quello (più realistico) con filtro di Bessel.

Schema RX	L _{max} [km]	L _{max} [dBm]	Passo [km]
PIN + FA	10.53	-21.6	51.63
APD + FA	96.3	-203.05	96.27
PIN + Bessel	19.62	-8.93	46.87
APD + Bessel	27.92	-1.191	62.26

La simulazione è stata impostata come run parametrico sulla lunghezza "virtuale" del tratto di fibra modulare come blocco di attenuazione (parametro Length, attenuazione reale = -10 dB/km [dB]) così da produrre direttamente un grafico di Q rispetto alla lunghezza.

L'intervallo di valori di lunghezza (in km) è stato scelto in modo da comprendere i valori teorici di lunghezza massima raggiungibile per tutti i 4 casi di ricevitore ottico analizzati.

Schema RX	Optical Sensitivity (Simulazione) [dBm]	Loss Margin (P ₀ = -10 dBm) [dB]	L _{max} (Valore Analitico) [km]	L _{max} (Simulazione) [km]
PIN + FA	-20.53	10.53	10.53	51.63
APD + FA	-29.26	19.26	96.3	96.27
PIN + Bessel	-19.62	8.93	19.62	46.87
APD + Bessel	-27.92	17.92	27.92	62.26

Se si considera l'incertezza sulla ampiezza propria del simulatore, che è pari a 0.3 dB (così come segnalato nei report sui parametri di OptSim[®]), fissata l'attenuazione della fibra a 0.2 dB/km, si evince come tale lunghezza sia ammissibile allo scarto massimo (in valore assoluto) pari a 1.5 km rispetto ai valori teorici.

Tale intervallo di tolleranza risulta già pienamente rispettato: lo scarto massimo è, infatti, di 0.23 km (caso PIN + Bessel).



- ▶ We have several years of experience on using OptSim for teaching optical communications
- ▶ OptSim is easy to use: after a quick demo all students are able to start work by themselves
- ▶ Students like this approach based on some level of learning by doing
- ▶ **See you this afternoon for a live demo: W1.1 in Room B131**