

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○
○○○○○○○○

Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○
○○○○○○

Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○

WAVEMETER

Caratterizzazione di due misuratori di lunghezza d'onda e loro
applicazioni

S. Bottaro¹ L.M. Perrone¹

¹Dipartimento di Fisica
Università di Pisa

Seminario - 2016

Outline

1 Misuratore digitale: APDS-9301

- Caratterizzazione del dispositivo
- Prime misure

2 Misuratore analogico: WS-7.56-T05

- Caratterizzazione del dispositivo
- Caratterizzazione di un LED

3 Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

- Prova APDS-9301
- Colori RGB: WS-7.56-T05

Misuratore digitale: APDS-9301



Caratterizzazione del dispositivo

Misuratore analogico: WS-7.56-T05



Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB



Outline

1 Misuratore digitale: APDS-9301

- Caratterizzazione del dispositivo
- Prime misure

2 Misuratore analogico: WS-7.56-T05

- Caratterizzazione del dispositivo
- Caratterizzazione di un LED

3 Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

- Prova APDS-9301
- Colori RGB: WS-7.56-T05

Misuratore digitale: APDS-9301



Caratterizzazione del dispositivo

Misuratore analogico: WS-7.56-T05



Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB



Struttura APDS-9301

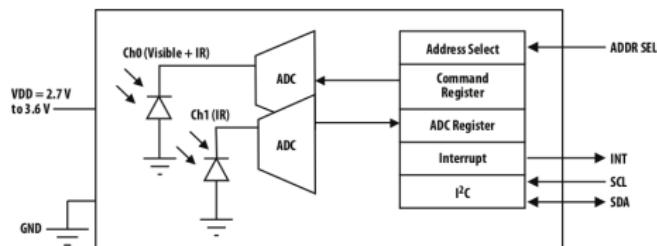


Figura : Diagramma a blocchi

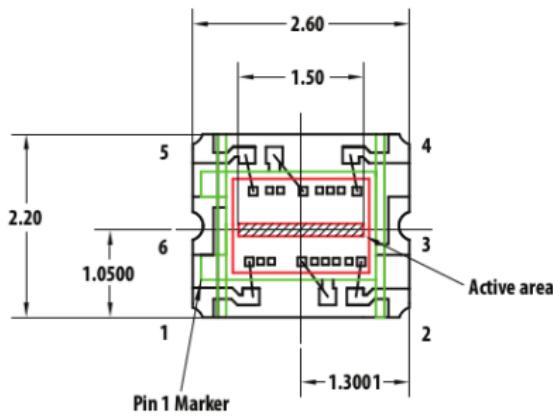


Figura : Configurazione pin e dimensioni (in mm)

Caratteristiche operazionali

Parameter	Channel	Max Value	Conditions
ADC count value [counts]	CH0	65535	$T_{int} > 178 \text{ ms}$
	CH1	65535	
	CH0	37177	$T_{int} = 101 \text{ ms}$
	CH1	37177	
Irradiance responsivity [$\frac{\text{counts}}{\mu\text{W}/\text{cm}^2}$]	CH0	27.5	$\lambda_p = 640 \text{ nm},$ $T_{int} = 101 \text{ ms}$
	CH1	5.5	
	CH0	8.4	$\lambda_p = 940 \text{ nm},$ $T_{int} = 101 \text{ ms}$
	CH1	6.9	
Illuminance responsivity [$\frac{\text{counts}}{\text{lux}}$]	CH0	36	Fluorescence light $T_{int} = 402 \text{ ms}$
	CH1	4	
	CH0	144	Fluorescence light $T_{int} = 101 \text{ ms}$
	CH1	72	

- È stato usato $T_{int} = 402$ ms, dunque i valori massimi di illuminanza e irraggiamento rilevabili sono rispettivamente 1820 lux e $2383 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ per CH0, 16383 lux e $11915 \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ per CH1.
- Tramite protocollo I^2C Arduino restituisce:
 - Valori dei due canali;
 - Rapporto $\frac{CH1}{CH0}$;
 - Illuminanza in lux calcolata tramite funzione di calibrazione.

Funzione di calibrazione

$x = CH1/CH0$	Sensor lux formula
$0 < x \leq 0.50$	$(0.0304 \cdot CH0) - (0.062 \cdot CH0 \cdot x^{1.4})$
$0.50 < x \leq 0.61$	$(0.0224 \cdot CH0) - (0.031 \cdot CH1)$
$0.61 < x \leq 0.80$	$(0.0128 \cdot CH0) - (0.0153 \cdot CH1)$
$0.80 < x \leq 1.30$	$(0.00146 \cdot CH0) - (0.00112 \cdot CH1)$
$x \geq 1.30$	0

Responsività e curva di calibrazione

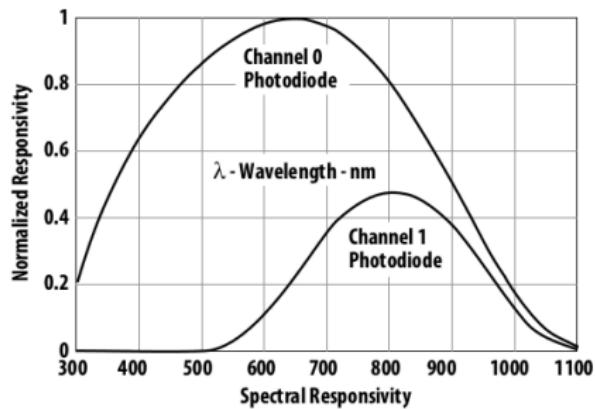


Figura : Curve di responsita' spettrale

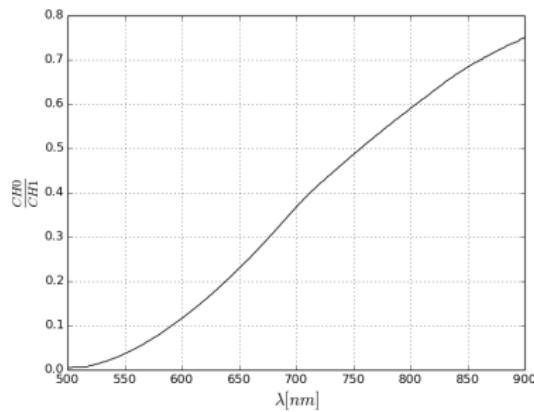


Figura : Curva di calibrazione

Outline

1 Misuratore digitale: APDS-9301

- Caratterizzazione del dispositivo
- Prime misure

2 Misuratore analogico: WS-7.56-T05

- Caratterizzazione del dispositivo
- Caratterizzazione di un LED

3 Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

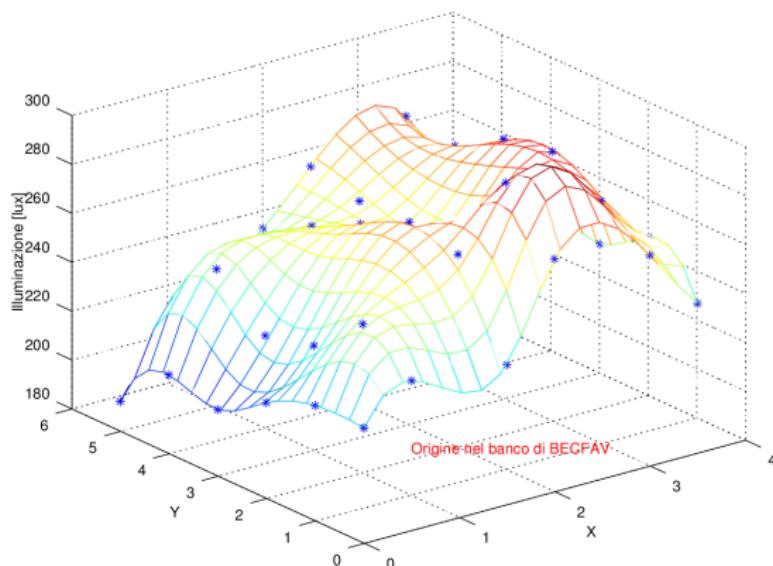
- Prova APDS-9301
- Colori RGB: WS-7.56-T05



Prime misure



Illuminazione stanza



Misuratore digitale: APDS-9301



Prime misure

Misuratore analogico: WS-7.56-T05



Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB



- Grande luminosità in fondo perché vicino alle finestre;
- Luci di destra sembrano più potenti di quelle di sinistra:
PROVVEDERE!

LED

- 4 LED impiegati: HLMP-C115 (rosso), HLMP-C315 (giallo), LT3333 (verde), LB3333 (blu);
- Resistenza di protezione di $470\ \Omega$;
- LED schermati con rotolo di carta spesso: segnale nullo a LED spento

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○
○○○●○○○

Prime misure

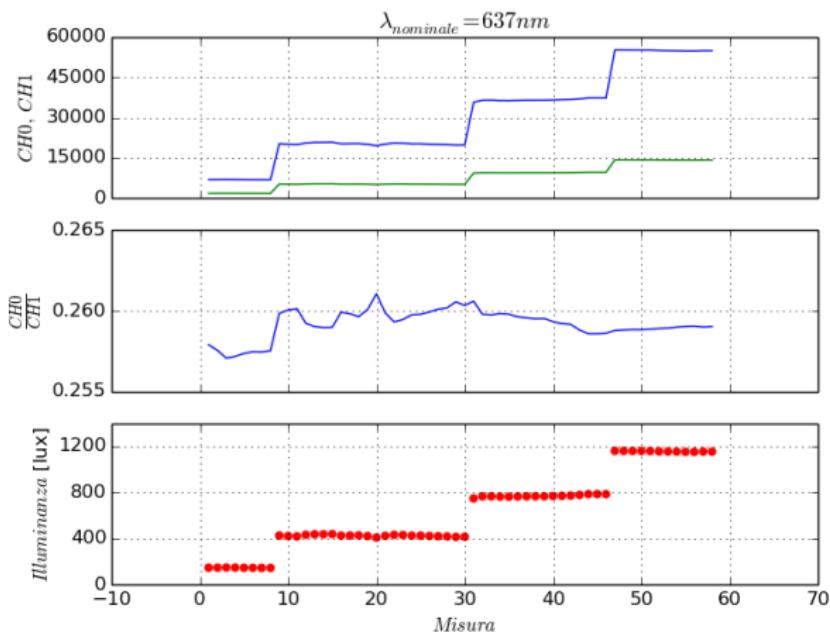
Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○
○○○○○○

Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

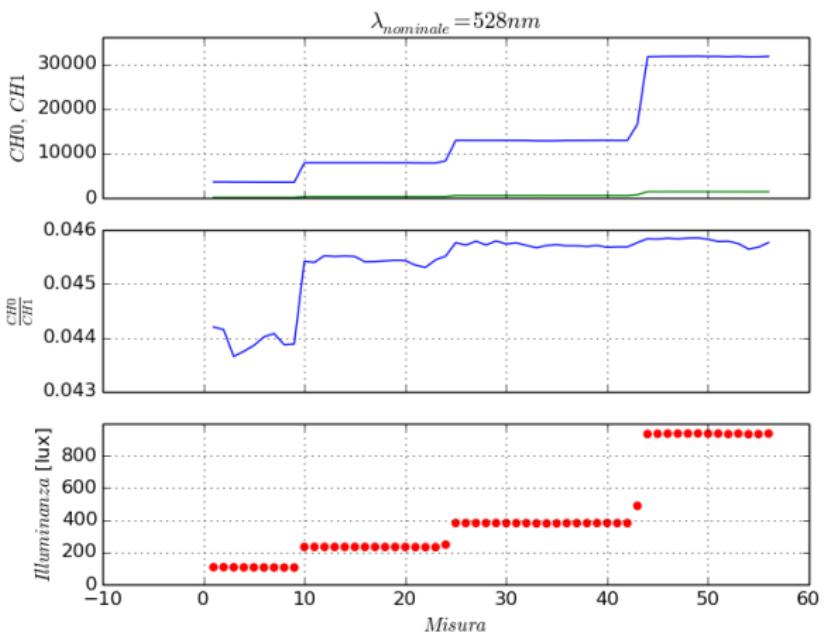
○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○○○

HLMP-C115





Prime misure



Lunghezze d'onda vs Potenza

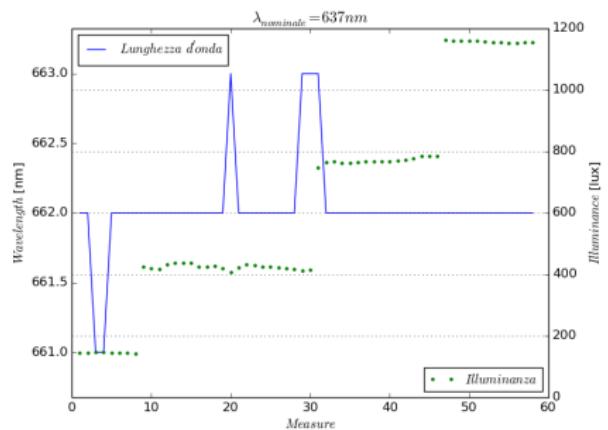


Figura : HLMP-C115

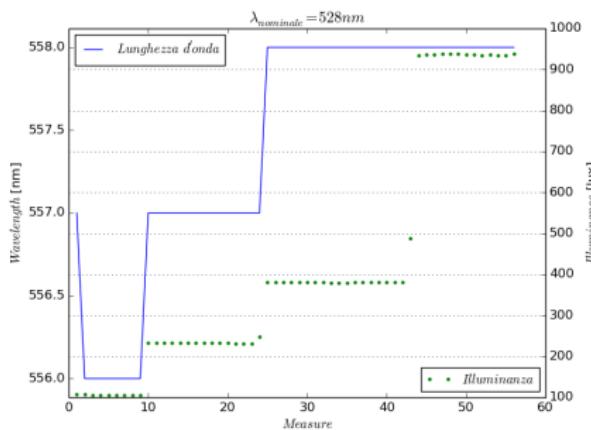


Figura : LT3333

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○○
○○○○○○●○

Prime misure

Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○○
○○○○○○

Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

○○○○○○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○

Misure vs datasheet

LED	Valore misurato [nm]	Valore nominale [nm]
HLMP-C115	662.1 ± 0.1	637
HLMP-C315	608.3 ± 0.2	585
LT3333	557.1 ± 0.2	528
LB3333	519 ± 1	470

Prime Conclusioni

- La lunghezza d'onda non dipende dall'intensità del LED;
- Sovrastima delle lunghezze di 20-30 nm su tutti, 50 nm per il blu, di cui non abbiamo una spiegazione.

Misuratore digitale: APDS-9301



Caratterizzazione del dispositivo

Misuratore analogico: WS-7.56-T05



Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB



Outline

1 Misuratore digitale: APDS-9301

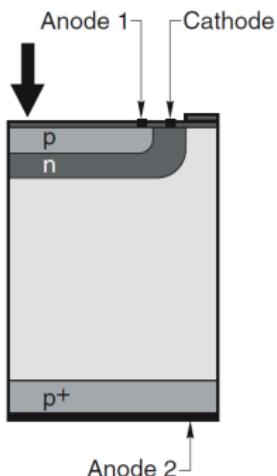
- Caratterizzazione del dispositivo
- Prime misure

2 Misuratore analogico: WS-7.56-T05

- Caratterizzazione del dispositivo
- Caratterizzazione di un LED

3 Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

- Prova APDS-9301
- Colori RGB: WS-7.56-T05



Area attiva	7.56mm^2
Range operativo λ	450-900 nm
Risoluzione spettrale	0.01 nm
Livello di saturazione	$150 \mu\text{W} @0\text{V}$ $3\text{mW} @5\text{V}$
Dark current	100 nA Max 10 nA Typ
Rise time	1-10 μs (Diodo1-Diodo2)

Schema costruttivo
dei fotodiodi del WS-765-T05.

Responsività spettrale

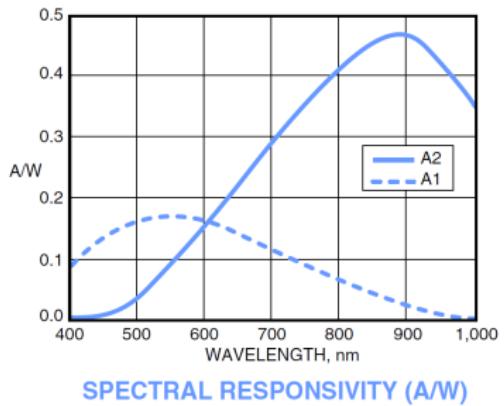


Figura : Curva di responsività spettrale.

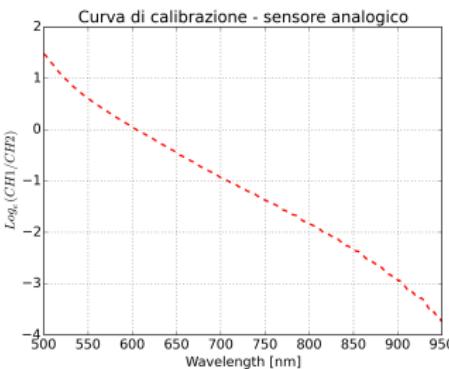
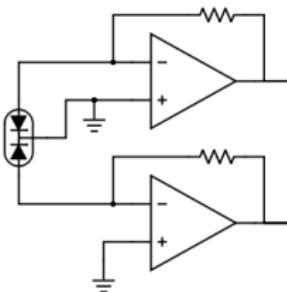


Figura : Curva di calibrazione logaritmo del quoziente.

Montaggio e dimensionamento



- Circuito con due op-amp in modalità invertente
- Due transimpedenze uguali nei limiti dell'errore
- Per dimensionare le trans-impedenze si considera la curva di responsività: l'ordine di grandezza della corrente è $10\text{-}100 \mu\text{A}$, resistenze a trans-impedenza dell'ordine del centinaio di $\text{k}\Omega$
- $R_1 = 82.3\text{k}\Omega$ e $R_2 = 82.2\text{k}\Omega$ (prima) e $R_1 = 219\text{k}\Omega$ e $R_2 = 220\text{k}\Omega$ (poi).



Caratterizzazione del dispositivo

ENEL

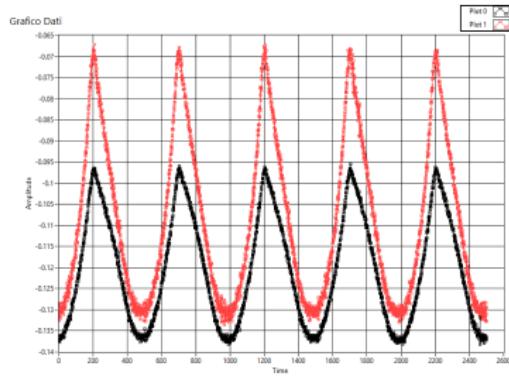


Figura : Segnale relativo all'illuminazione stanza.

CH2 piccato sul rosso.

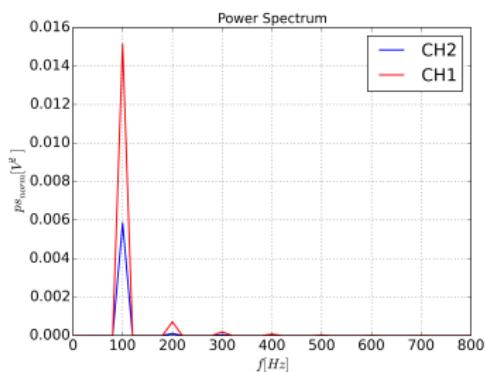


Figura : Fast Fourier transform del segnale di luce ambientale.

Segnale di buio

In condizioni di *buio* la risposta in tensione è diversa da zero per entrambi i fotodiodi: valore medio **positivo** \sim a 7-8mV.

Ipotesi:

- Non si tratta della *dark current*, corrente di ricombinazione: la I_D scorre dal catodo all'anodo, così come la fotocorrente in modalità di funzionamento fotovoltaica. La tensione sarebbe dello stesso segno.
- L'input offset current del μ A741CP: valore tipico 20nA alle nostre condizioni di lavoro, potrebbe essere responsabile di $\sim 5\text{mV}$.

Nelle misure successive si è cercato di rilevare tensioni di almeno 1-2 ordini di grandezza maggiori.

Misuratore digitale: APDS-9301



Caratterizzazione di un LED

Misuratore analogico: WS-7.56-T05



Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB



Outline

1 Misuratore digitale: APDS-9301

- Caratterizzazione del dispositivo
- Prime misure

2 Misuratore analogico: WS-7.56-T05

- Caratterizzazione del dispositivo
- Caratterizzazione di un LED

3 Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

- Prova APDS-9301
- Colori RGB: WS-7.56-T05

Misuratore digitale: APDS-9301



Caratterizzazione di un LED

Misuratore analogico: WS-7.56-T05



Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

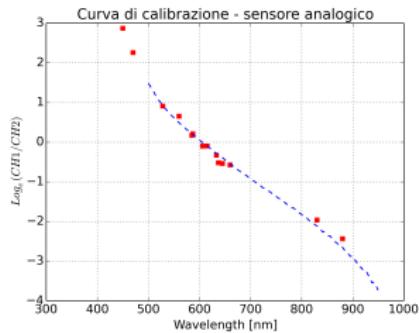


LED impiegati

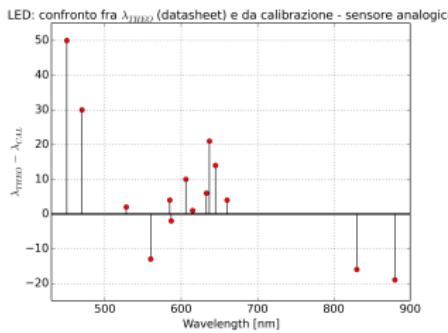
LED	Wavelength datasheet (nm)	$\log(CH1/CH2)$	$\delta \log$
HLMPD101-645	645	-0.539	0.006
HLMPC115-RED	637	-0.522	0.003
HLMPC315-Y	585	0.172	0.006
LA3366	615	-0.101	0.003
LB3333	470	2.26	0.02
LED450	450	2.87	0.02
LO3336	606	-0.101	0.002
LPK376	560	0.65	0.04
LS3336	633	-0.332	0.001
LT3333	528	0.908	0.01
LY3336	587	0.209	0.001
SFH4873-880	880	-2.439	0.004

◀ □ ▶ ⟲ ⟳ ⟷ ⟸ -2.439 ⟹ ⟸ ⟷ ⟲ ⟳ □ ▶

Lunghezze d'onda (datasheet) e curva di calibrazione



(a) LED (λ datasheet) sulla curva di calibrazione del sensore analogico.



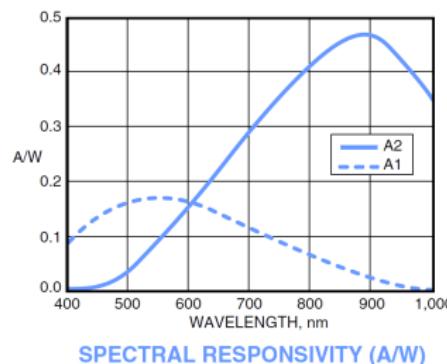
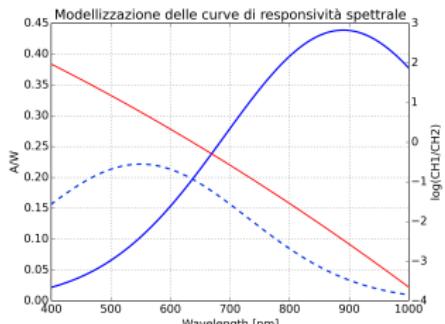
(b) Scarto fra λ datasheet e calibrazione (interpolate) per ciascun LED.

- Per i LED nel blu, la curva di calibrazione non copre valori di interesse.

Estrapolazione della curva

Vogliamo avere a disposizione dei valori attendibili nella regione 450-500nm.

- Per mezzo di Octave cerchiamo un polinomio interpolatore dei punti di calibrazione e prolunghiamolo per λ fra 450-500nm.
- Funzione di interpolazione: POLYFIT. Di che grado? Comportamento estremamente variabile.
- Ci aiutiamo modellizzando le curve di responsività come gaussiane.



Risultato:

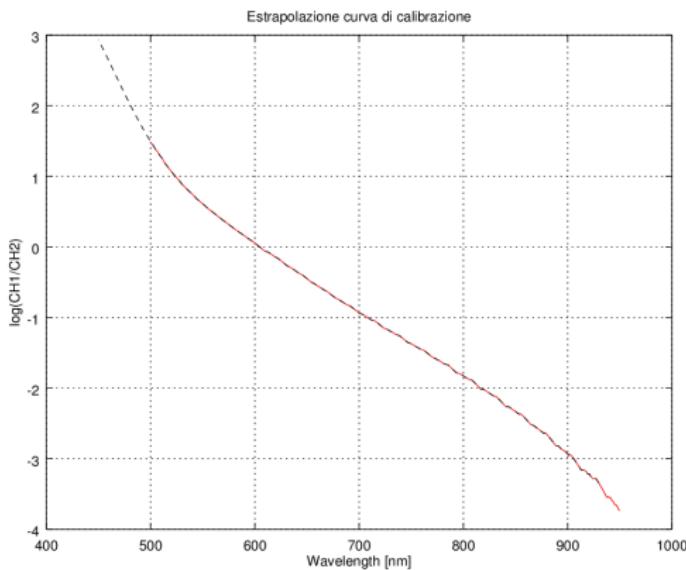
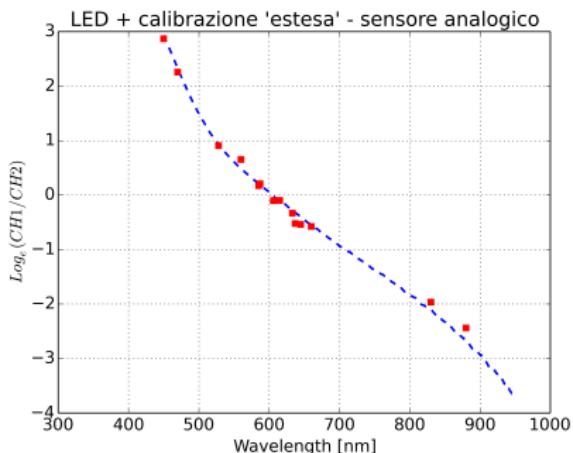
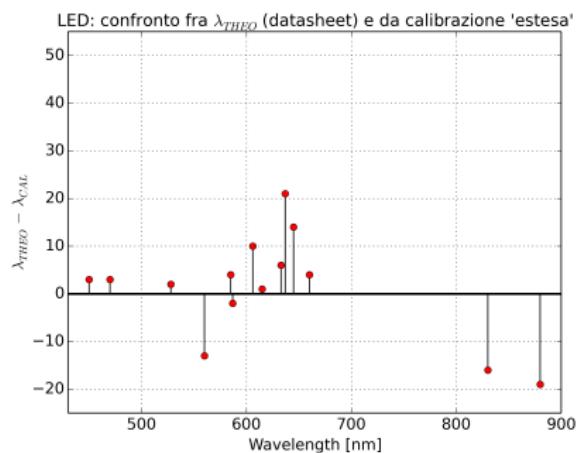


Figura : Curva di calibrazione estesa interpolata con un polinomio di grado 11.

Caratterizzazione dei LED - II



(a) Dispersione dei LED sulla curva di calibrazione 'estesa'.



(b) Scarto fra lunghezze d'onda datasheet e da calibrazione.

LED	λ nom. [nm]	λ calibr. [nm]
HLMPD101-645	645	659(1)
HLMPC115-RED	637	658(2)
HLMPC315-Y	585	589(2)
LA3366	615	616(1)
LB3333	470	473(1)
LED450	450	453(1)
LO3336	606	616(1)
LPK376	560	547(4)
LS3336	633	639(1)
LT3333	528	530(1)
LY3336	587	585(1)
SFH4873-880	880	861(1)
SSL-LXA	660	664(2)
TSHG8400-830	830	814(1)

Outline

- 1 Misuratore digitale: APDS-9301**
 - Caratterizzazione del dispositivo
 - Prime misure
- 2 Misuratore analogico: WS-7.56-T05**
 - Caratterizzazione del dispositivo
 - Caratterizzazione di un LED
- 3 Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB**
 - Prova APDS-9301
 - Colori RGB: WS-7.56-T05

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○
○○○○○○○○

Prova APDS-9301

Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○
○○○○○○

Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

○●○○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○

Colori RGB

- È stato impiegato un programma di OCTAVE che mostra una finestra di colore variabile secondo una matrice di 300 triplette RGB
- Prima e dopo la fine della serie di colori è stato posto un fondo nero (0,0,0) come riferimento
- Per ogni punto è stata ricavata l'intensità e la lunghezza d'onda tramite la curva di calibrazione.

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○
○○○○○○○○

Prova APDS-9301

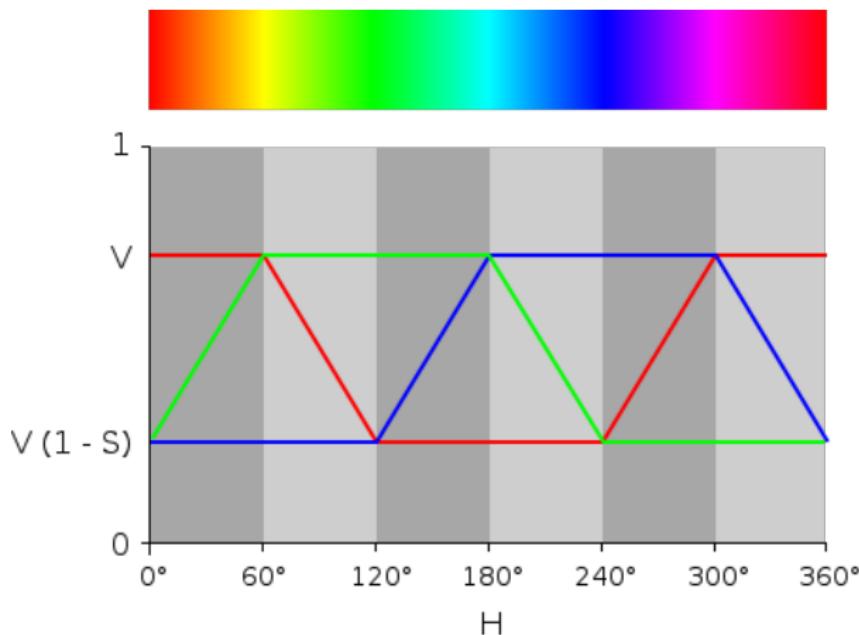
Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○
○○○○○○

Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

○○●○○○○○
○○○○○○○○○○○○○○

Colori RGB: sequenza triplette



Colori RGB: misure e confronto

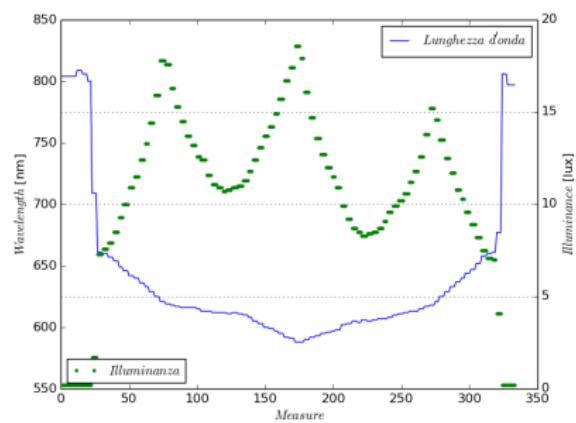


Figura : Dati APDS-9301

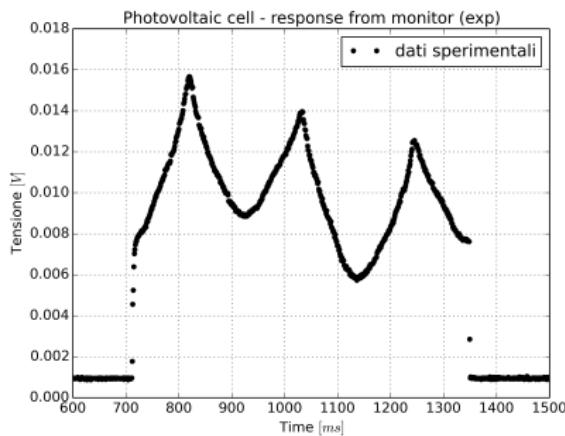


Figura : Dati cella fotovoltaica

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○
○○○○○○○○

Prova APDS-9301

Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○
○○○○○○

Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

○○○●○○○
○○○○○○○○○○○○○○

Colori RGB: osservazioni

- Curve di illuminazione molto simili;
- In generale lunghezze d'onda molto diverse
- Minima lunghezza d'onda ≈ 580 nm (giallo), neanche in corrispondenza del blu (secondo minimo);
- Illuminazione non nulla per il nero, ma si rileva luce a 800 nm circa (infrarosso).

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○
○○○○○○○○

Prova APDS-9301

Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○
○○○○○○

Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

○○○○●○○○
○○○○○○○○○○○○○○

WARNING

NON possiamo parlare di lunghezze d'onda per i colori ottenuti come somma di R,G,B.

Definizione valida SOLO per i colori puri.

Colori RGB: possibile soluzione

- Fondo infrarosso non trascurabile;
- Ipotesi: il fondo infrarosso rimane costante durante la presa dati;
- I valori in uscita da CH0 e CH1 dati dalla somma dei valori che si avrebbero se sul rilevatore incidesse solo radiazione monocromatica della stessa frequenza e intensità di quelle che compongono quella che effettivamente viene rilevata;
- Possibile soluzione: sottrarre a CH0 e CH1 il fondo infrarosso, in questo caso i valori a schermo nero, rispettivamente 62 e 37.

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○
○○○○○○○○

Prova APDS-9301

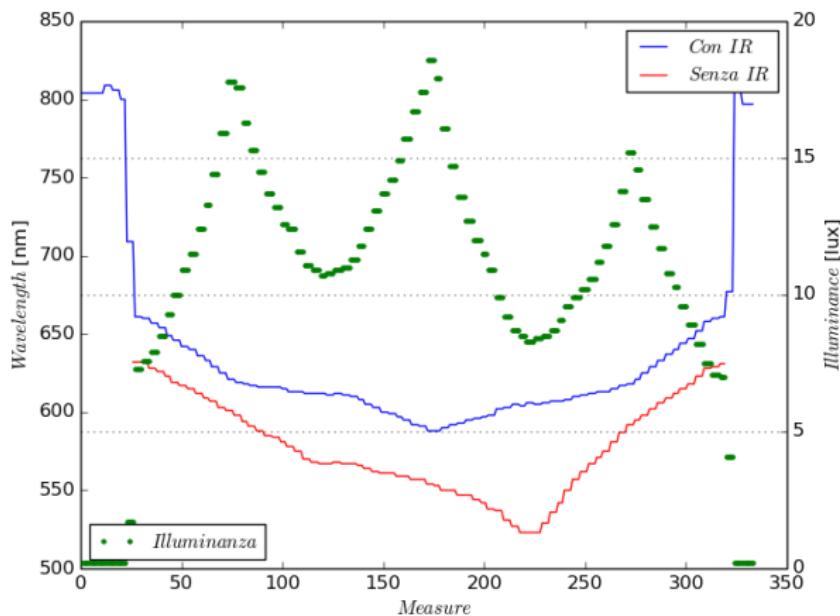
Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○
○○○○○○

Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

○○○○○○○●○
○○○○○○○○○○○○○○

Colori RGB: risultato



Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○○
○○○○○○○○

Prova APDS-9301

Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○○
○○○○○○○

Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

○○○○○○○●
○○○○○○○○○○○○

Colori RGB: conclusioni

- Nuova curva "sincronizzata" con i minimi;
- Divario maggiore nei minimi di illuminazione, minore nei massimi;
- Lunghezze d'onda dei colori puri ancora poco precise, circa la stessa differenza che con i LED.

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○○
○○○○○○○○

Colori RGB: WS-7.56-T05

Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○○
○○○○○○○

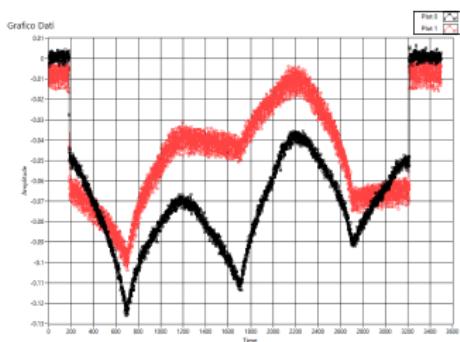
Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

○○○○○○○○○○
●○○○○○○○○○○○○○○

Outline

- 1 Misuratore digitale: APDS-9301**
 - Caratterizzazione del dispositivo
 - Prime misure
- 2 Misuratore analogico: WS-7.56-T05**
 - Caratterizzazione del dispositivo
 - Caratterizzazione di un LED
- 3 Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB**
 - Prova APDS-9301
 - Colori RGB: WS-7.56-T05

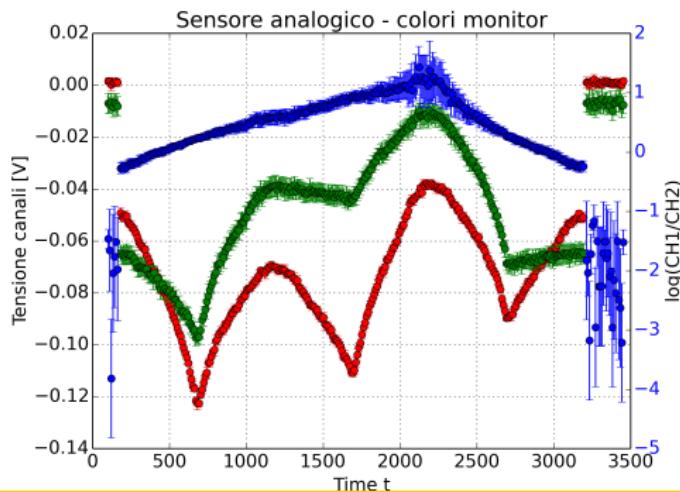
Rilevazione del segnale

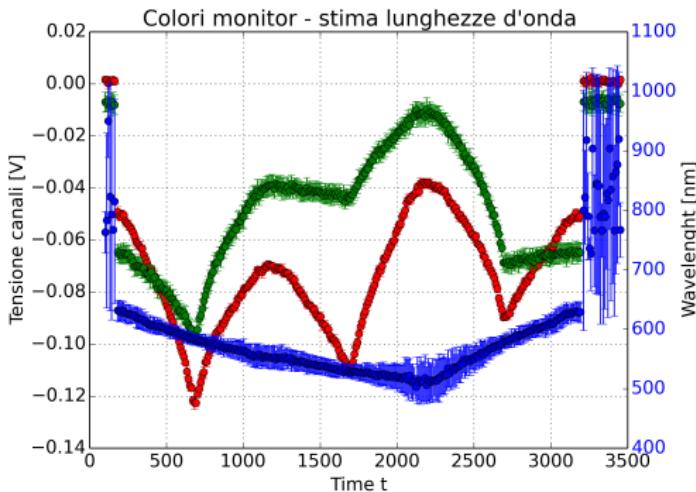


- 300 triplette RGB intervallate l'una dall'altra da 0.1s
 - I picchi negativi corrispondono alle situazioni RGB del tipo (110, 101, 011).
 - Le *valli* (immaginando ribaltata l'immagine) sono invece le triplette pure (100, 010, 001).
 - Il segnale del CH2 (in rosso) nel grafico, ha una risposta molto marcata sul rosso (colore), come ci aspettiamo dalla responsività spettrale.

Segnale pulito

- Alta rumorosità: microspostamenti del sensore avvenuti durante l'acquisizione → interferenze da parte della luce ambientale
- Alta rumorosità: distorsione cromatica dovuta pressione su delle porzioni di monitor LCD, potrebbe aver reso il colore disomogeneo.



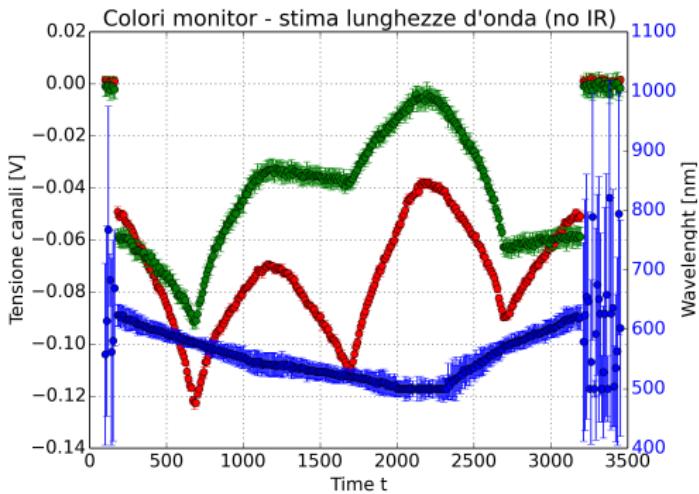


	RED	GREEN	BLUE
Wavelength (nm)	632(17)	552(18)	503(20)
Colour ranges (nm)	620-750	495-570	450-495

Tabella : Lunghezza d'onda dei colori puri RGB

Prime osservazioni

- Gli intervalli in nm in cui vengono definiti i colori sono tratti da *Thomas J. Bruno, Paris D. N. Svoronos. CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts.*
- Il rosso riusciamo a stimarlo bene, il verde tende al giallo, il blu è accettabile solo entro i limiti dell'errore.
- Segnale non nullo in corrispondenza del colore nero proiettato sul monitor LCD. Fenomeno è asimmetrico rispetto ai due fotodiodi: il diodo CH2, con curva di responsività piccata sul rosso rileva un segnale non trascurabile, contrariamente al diodo del CH1 che mostra tensioni compatibili con zero.
- Nel caso del CH1 i due contributi del segnale di buio e IR si annullano a vicenda (uno è negativo e il secondo positivo).
- Togliamo il fondo IR da CH2.



	RED	GREEN	BLUE
Wavelength (nm)	627(18)	538(15)	<500(20)
Colour ranges (nm)	620-750	495-570	450-495

Tabella : Lunghezza d'onda dei colori puri RGB - no IR

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○
○○○○○○○○

Colori RGB: WS-7.56-T05

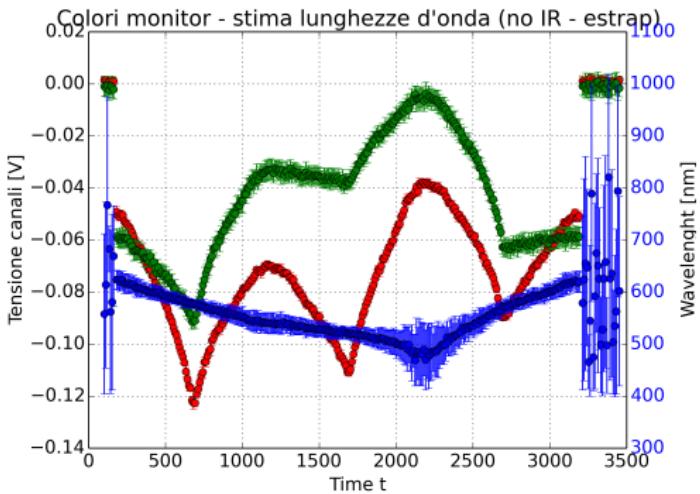
Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○
○○○○○○

Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB

○○○○○○○○○○
○○○○○●○○○○○○○○

- Il rosso è rimasto più o meno fisso.
- Per il verde corrispondenza molto migliore e quasi coincidente con un verde puro.
- Blu saturato a 500nm: usiamo la curva di calibrazione estrapolata.



	RED	GREEN	BLUE
Wavelength (nm)	627(18)	538(15)	470(50)
Colour ranges (nm)	620-750	495-570	450-495

Tabella : Lunghezza d'onda dei colori puri RGB - no IR

- Il rosso e il verde sono (ovviamente) rimasti gli stessi, in buon accordo con le lunghezze d'onda effettive.
- Finalmente il blu risulta avere una λ decisamente buona, circa a metà dell'intervallo di definizione.
- Errore considerevole sul blu dovuto alla bassissima responsività del fotodiodo 2 a lunghezze d'onda fra 400-500 nm: errore percentuale affatto trascurabile.
- Significatività del BLU garantita dai LED.

Misuratore digitale: APDS-9301

○○○○○
○○○○○○○○

Colori RGB: WS-7.56-T05

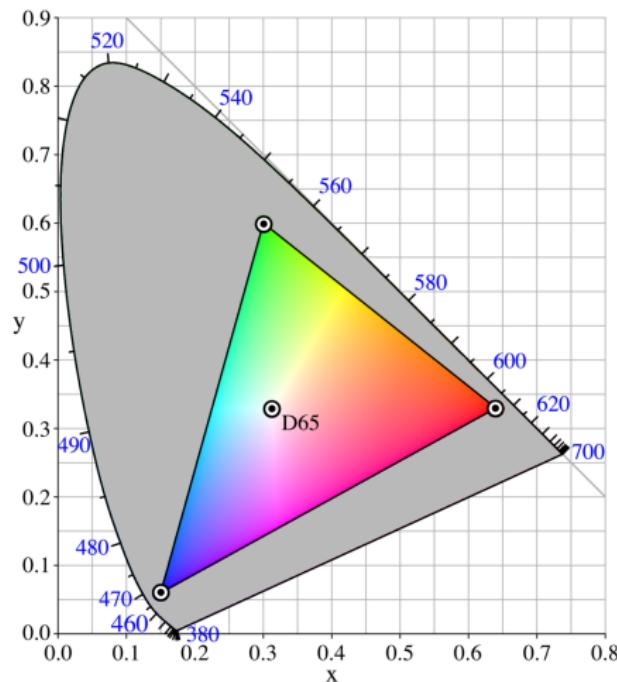
Misuratore analogico: WS-7.56-T05

○○○○○
○○○○○○

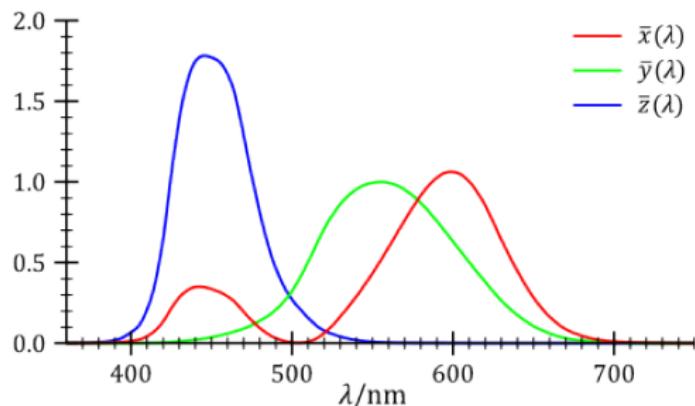
Applicazione: lunghezze d'onda e triplete RGB

○○○○○○○○○
○○○○○○○○●○○○○

Gamut



Tristimulus Functions



$$X = \int_{380}^{780} M(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

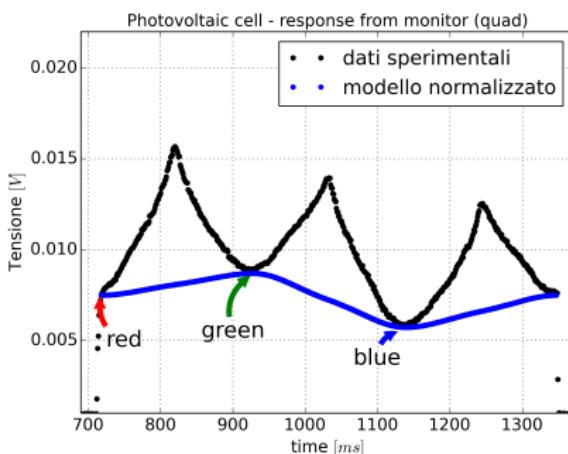
$$Y = \int_{380}^{780} M(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = \int_{380}^{780} M(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Luminosity Function - X

- $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ e $\bar{z}(\lambda)$ si definiscono *colour matching functions*.
- Le colour matching functions sono definite in modo tale da riprodurre la responsività dei tre tipi di coni presenti nell'occhio.
- In particolare la $\bar{y}(\lambda)$ è detta *luminosity function*: descrive la sensitività spettrale media della percezione visuale della luminosità (da parte dell'occhio umano).
- Qualitativamente la tristimulus function X (definita prima) rappresenta la percentuale di rosso che compone la radiazione incidente.

Cella fotovoltaica



- Con il modello quadratico avevamo ricavato le intensità relative dei colori puri.
- Adesso siamo in grado di assegnare un valore di pseudo wavelength per ogni tripletta.

Misuratore digitale: APDS-9301



Colori RGB: WS-7.56-T05

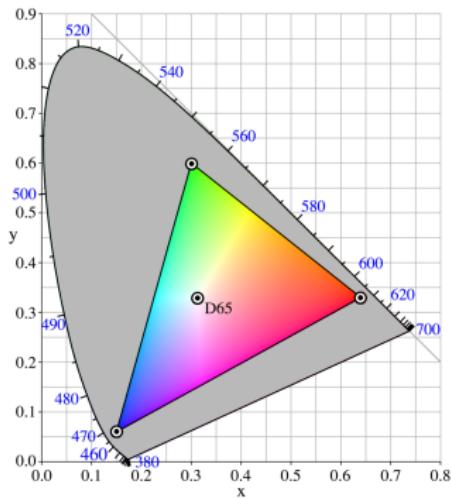
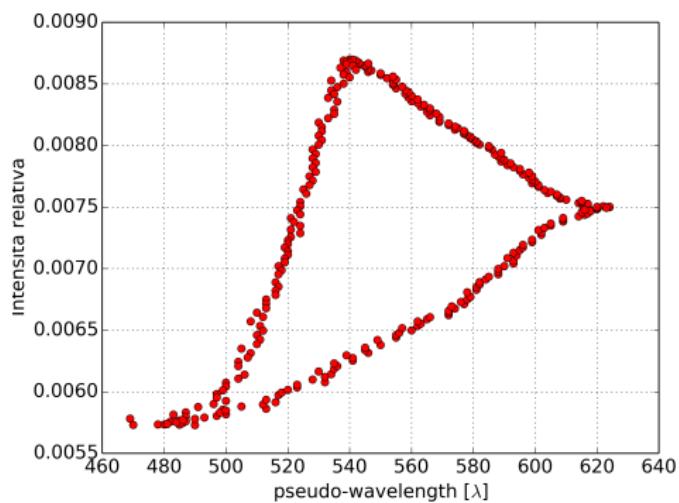
Misuratore analogico: WS-7.56-T05



Applicazione: lunghezze d'onda e triplette RGB



Coincidenze? Noi crediamo di no.



- Nel nostro grafico l'asse y corrisponde alla luminosità relativa dei colori ↔ asse y del gamut.
- L'asse x del gamut è una misura di quanto rosso è presente nella radiazione e questa quantità aumenta andando da sinistra a destra. Incidentalmente la nostra pseudo lunghezza d'onda classifica a sua volta i colori RGB in base allo stesso criterio poichè procedendo verso λ maggiori ci avviciniamo al colore rosso.
- Con questo non vogliamo dire le scale coincidono, ma che è possibile stabilire fra le due una certa corrispondenza qualitativa.
- In questo modo abbiamo ottenuto il gamut per i colori RGB.