

Tecnologie Digitali - Relazione di Laboratorio: Misuratori di lunghezze d'onda

Salvatore Bottaro^{1,*} Lorenzo Maria Perrone^{1, †},

1 Dipartimento di Fisica, Università di Pisa

* E-mail: salvo.bottaro@htomail.it

† E-mail: lorenzo.perrone.lmp@gmail.com

1 Introduzione

È possibile tramite dispositivi relativamente poco costosi effettuare delle misure di lunghezza d'onda abbastanza precise. In questa esperienza in particolare ne studieremo due, il misuratore digitale APDS-9301 della **Avago Technologies** e quello analogico WS-7.56-TO5 della **First Sensor AG**. Entrambi i dispositivi sono dei circuiti integrati su cui sono montati due fotorivelatori con responsività spettrale diversa e tale che il rapporto fra le fotocorrenti generate sia una funzione monotona della lunghezza d'onda incidente. Lo scopo di questa esperienza è dunque lo studio di questi rivelatori e il loro impiego per la misura di lunghezze d'onda, in particolare dei LED disponibili in laboratorio.

2 Misuratore digitale

Il dispositivo APDS-9301 è montato su un circuito integrato in grado di comunicare dati tramite protocollo I²C, pertanto la prima fase dell'esperienza è stata dedicata alla realizzazione dei programmi adatti per la comunicazione seriale tramite Arduino. Il seguente codice serve per apprendere il *serial number* del dispositivo, per programmarne l'accensione e il tempo di integrazione per la misura di potenza incidente (nei commenti la funzione dei comandi salienti):

```
#include <Wire.h>
#define AD 0x29 \\ Indirizzo integrato
byte contr;
byte stat;
void setup() {
    Serial.begin(9600);
    Wire.begin();
    Wire.beginTransmission(AD);
    Wire.write(0x80); \\ indirizzo registro CONTROLL per le funzioni di base
    Wire.write(0x03); \\ accensione del dispositivo
    Wire.endTransmission();

    Wire.beginTransmission(AD);
    Wire.write(0x8a); \\ indirizzo registro ID per lettura del serial number
    Wire.endTransmission();
    Wire.requestFrom(AD, 1);
    contr = Wire.read();
```

```

Serial.print(" serial part number: ");
Serial.println(contr, HEX);
delay(200);

Wire.beginTransmission(AD);
Wire.write(0x80); \\sketch per determinare lo status del dispositivo
Wire.endTransmission();
Wire.requestFrom(AD, 1);
stat = Wire.read();
Serial.print(" status ");
Serial.print(stat, DEC);
delay(200);

Wire.beginTransmission(AD);
Wire.write(0x81); \\indirizzo registro di TIMING
Wire.write(0x01); \\tempo di integrazione di 101 ms
Wire.endTransmission();
}

```

Il serial number del dispositivo è risultato essere 50.

Il dispositivo acquisisce su due canali, CH0 e CH1, con responsività spettrali diverse, secondo lo schema a blocchi di figura 1.

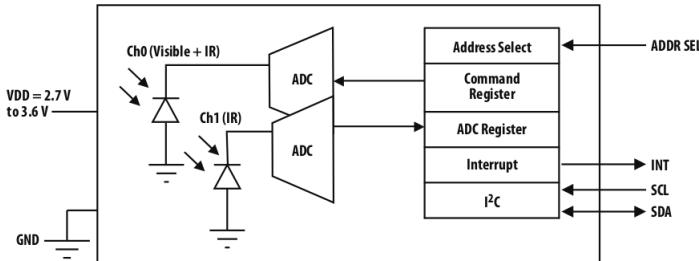


Figure 1. Diagramma a blocchi del APDS-9301

Come si vede il primo canale è più sensibile alle lunghezze d'onda del visibile, mentre il secondo a quelle dell'infrarosso. In figura 2 sono mostrate le due responsività spettrali dei canali, mentre in figura 3 il grafico del rapporto fra i segnali dei due canali e la lunghezza d'onda corrispondente.

In tabella 1 sono raccolte le informazioni reperibili nel datasheet che consentono di dedurre l'illuminazione massima rilevabile.

Dai dati in tabella è possibile stabilire che l'illuminanza massima che il CH0 può ricevere è 1820 lux, mentre CH1 16383 lux, mentre in termini di irraggiamento rispettivamente $2383 \frac{W}{cm^2}$ e $11915 \frac{W}{cm^2}$.

Sempre dal datasheet si vede che è possibile tramite i valori ottenuti dai due canali avere una misura diretta della radiazione incidente in lux, a seconda del rapporto $\frac{CH1}{CH0}$. In tabella 2 è riportata la funzione di calibrazione.

Questa funzione di calibrazione è stata implementata nel seguente sketch in cui vengono registrati i dati acquisiti dai due canali del rivelatore, il loro rapporto e l'equivalente in lux:

```

void loop() {
    byte outbuf[4]; \\dati dei due canali di 2 byte ciascuno
    long ch0, ch1;
    double rat, lux, r4;

```

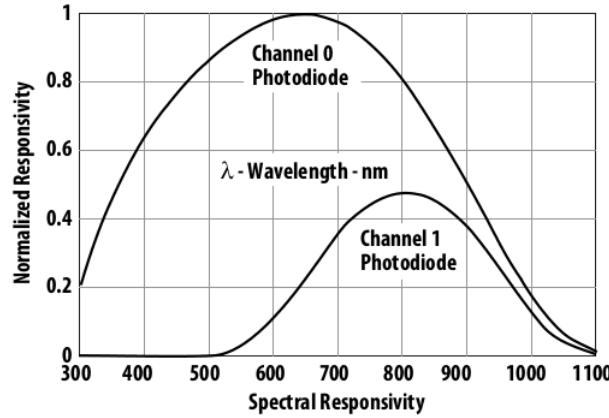


Figure 2. Responsività spettrale normalizzata dei due canali

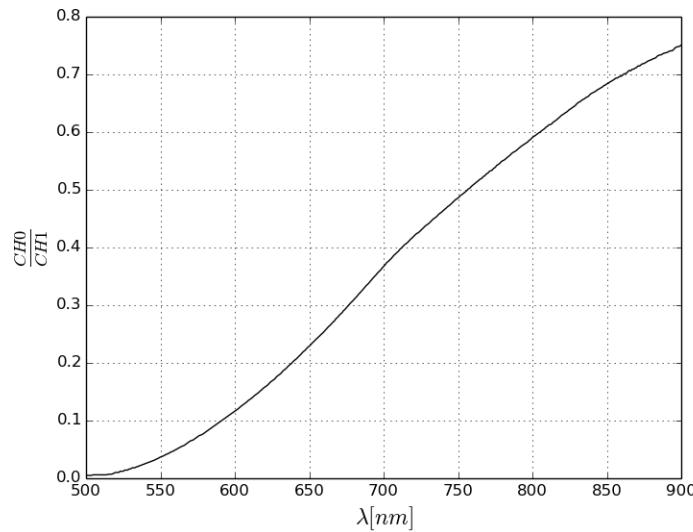


Figure 3. Rapporto fra i segnali rilevati dai due canali in funzione della lunghezza d'onda

```

int c;
Wire.beginTransmission(AD);
Wire.write(0x8C);
Wire.endTransmission();
c=0;
Wire.requestFrom(AD, 4);
while(Wire.available()){
    outbuf[c++]=Wire.read();
}

ch0 = outbuf[1]; \\ variabili con le misure ai due canali
ch0 <= 8;
ch0 += outbuf[0];

ch1 = outbuf[3];

```

Table 1. Caratteristiche operazionali APDS-9301

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	
	CH0	5047	$T_{int} = 13.7 \text{ ms}$
	CH1	5047	
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
	CH1	4	$T_{int} = 402 \text{ ms}$
	CH0	144	Fluorescence light
	CH1	72	$T_{int} = 101 \text{ ms}$

Table 2. Funzione di calibrazione del sensore

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

```

ch1 <= 8;
ch1 += outbuf[2];

rat = ch1;
rat = rat/ch0;
if (rat <= 0.50){ \\calcolo illuminazione con i vari casi
    r4 = pow(rat,1.4);
    lux = 0.0304*ch0-0.062*ch0*r4;
}
else if (0.5 < rat <= 0.61){
    lux = 0.0224*ch0-0.031*ch1;
}
else if (0.61 < rat <= 0.80){
    lux = 0.0128*ch0-0.0153*ch1;
}
else if (0.8 < rat <= 1.30){
    lux = 0.00146*ch0-0.00112*ch1;
}
else {
    lux = 0;
}
if (ch1 == 65535 || ch0== 65535){
    lux = 9001;
}
Serial.print(ch0, HEX);
Serial.print(" ");

```

```

Serial.print(ch1, HEX);
Serial.print(" ");
Serial.print(rat, 4);
Serial.print(" ");
Serial.println(lux, 1);
delay(800);
}

```

Sono state effettuate le misure preliminari, prima coprendo il sensore, ottenendo che in condizioni di perfetta oscurità l'illuminazione rilevata dal sensore è effettivamente zero, dopodiché servendoci di un computer portatile abbiamo misurato l'illuminazione in vari punti del laboratorio. I risultati di questi rilevamenti sono mostrati in figura 4.

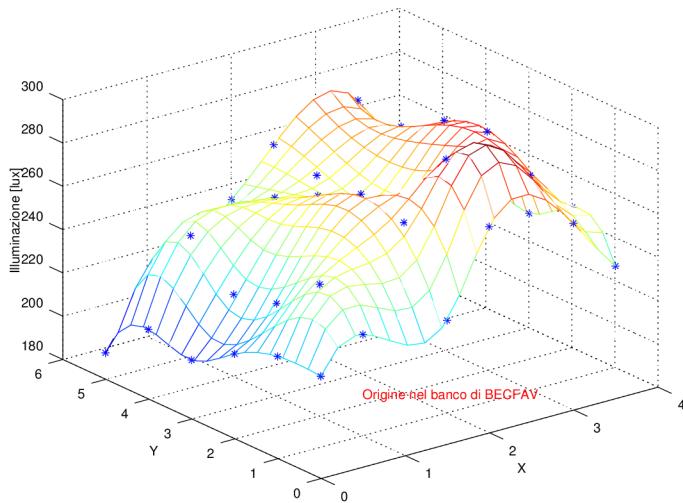


Figure 4. Illuminazione nel laboratorio

Dal grafico sembra che le lampade sul lato sinistro forniscano un'illuminazione minore rispetto alle due file di destra¹. Le due linee di massimi corrispondono ai punti lato corridoio, che godono maggiormente della luce di due file di lampade. Nella precedente esperienza (week 9 (?)) si è ottenuto nel nostro banco un'illuminazione di 13-14 fc, ovvero 140-150 lux, stesso ordine di grandezza ma significativamente più basso, di cui non siamo in grado di dare una spiegazione.

Come prima applicazione abbiamo impiegato alcuni LED a disposizione per effettuare delle misure di lunghezza d'onda. Ci siamo serviti di un tubicino abbastanza spesso di carta in cui infilare il LED per schermare la luce del laboratorio. Abbiamo verificato in tutti i casi che con LED spento l'illuminazione rilevata dal dispositivo fosse nulla. Per il circuito di protezione abbiamo usato una resistenza di $470 \Omega \pm 0.8\%$. I LED impiegati sono HLMP-C115, HLMP-C315, LT3333, LB3333, rispettivamente rosso, giallo, verde e blu.

Abbiamo dapprima osservato la dipendenza del segnale dall'intensità del LED. In figura e i risultati per il led rosso e per quello verde.

Come si vede i valori dei rapporti variano poco all'aumentare dell'intensità, nel caso del LED solo di una frazione di 1%, mentre per il LED verde a parte un significativo

¹La seguente osservazione valga come suggerimento per chi di competenza per prendere i dovuti provvedimenti!

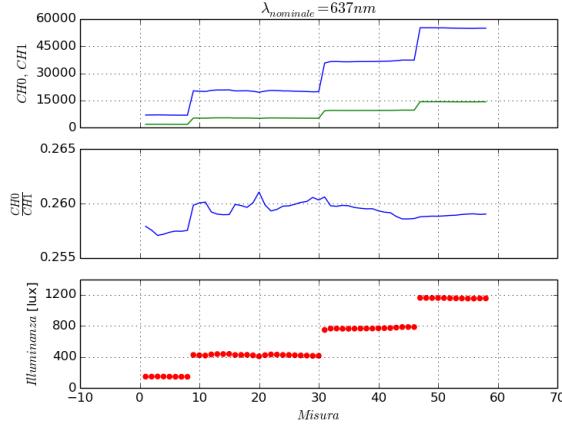


Figure 5. Dati relativi al LED rosso

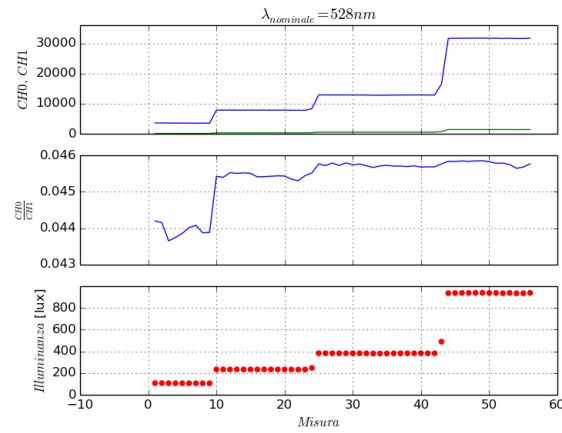


Figure 6. Dati relativi al LED verde

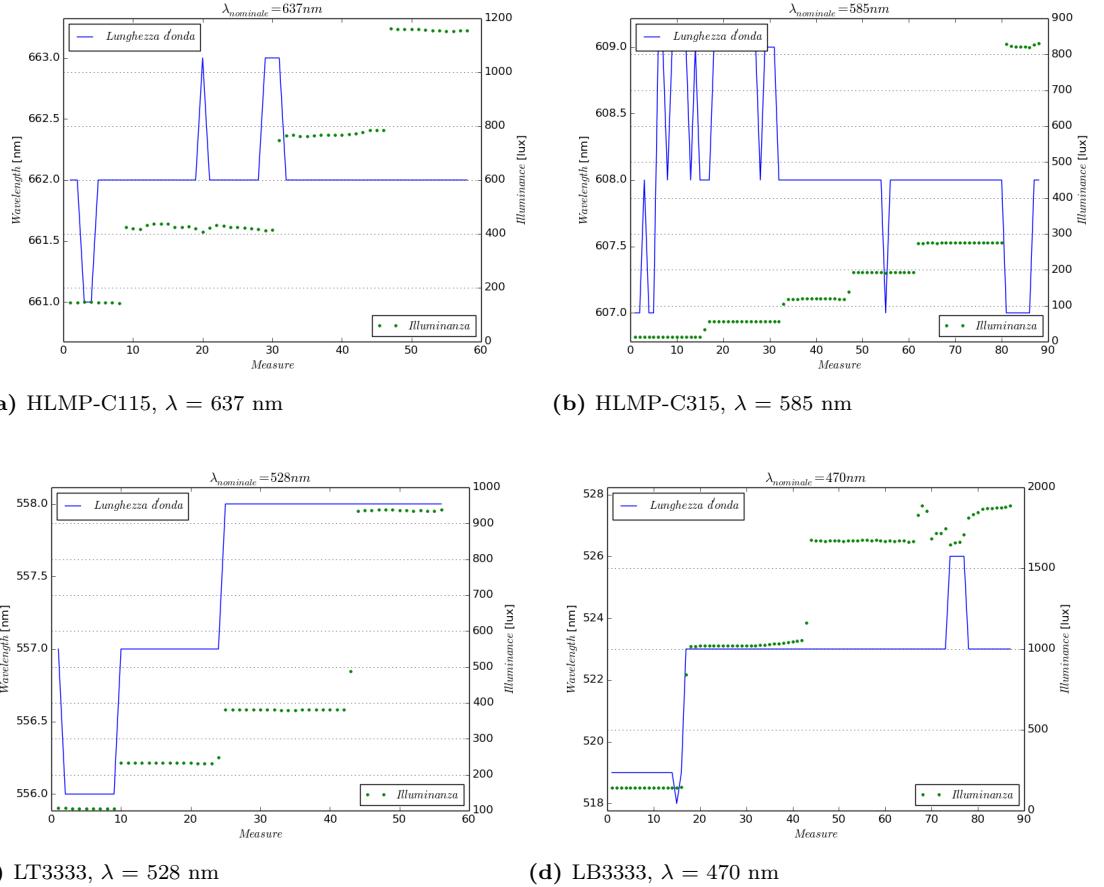
scostamento iniziale rimane pressoché costante. Nelle figure si può apprezzare la piccola variabilità della lunghezza d'onda misurata in funzione dell'intensità anche per gli altri due LED impiegati.

In tabella è fatto un confronto fra le lunghezze d'onda nominali e quelle ricavate dalle misure.

Table 3. Confronto lunghezze nominali con quelle misurate

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

Come si vede i valori ottenuti sono superiori di 20-30 nm, 50 nm nel caso del blu, rispetto ai valori nominali. Non sappiamo a cosa possa essere attribuita questa discrepanza.



2.1 Caratterizzazione dei colori RGB di un monitor

Come ulteriore applicazione abbiamo impiegato il dispositivo per misurare la lunghezza d'onda del display del computer di laboratorio. Ci siamo serviti di un programma in matlab con il quale viene mostrata una finestra con colore uniforme seguendo una sequenza di 300 punti secondo la decomposizione RGB. Si ricorda che le triplettie RGB generate dallo script sono della forma seguente:

cioè non vi sono mai tutti e tre i LED accesi contemporaneamente, ma solo due per volta, e sono intervallate l'una dall'altra da 0.1s.

In figura 7 è mostrato il grafico in cui compaiono contemporaneamente l'illuminazione rilevata e la lunghezza d'onda ricavata dal rapporto $\frac{CH_1}{CH_0}$.

Come si può vedere il grafico dell'illuminazione è molto simile a quello ottenuto in un'esperienza precedente (cfr Logbook week 9), tuttavia l'aspetto più interessante è dato dalle lunghezze d'onda rilevate. I punti di minimo della curva di illuminazione corrispondono ai punti della sequenza RGB in cui solo un LED è acceso, quindi dovrebbero corrispondere a colori puri, in più l'ordine con cui compiono è R-G-B-R, tuttavia come si vede dal grafico sembra che la lunghezza d'onda più piccola sia invece $\approx 585 \text{ nm}$, che corrispondono ad un giallo. La ragione di tale discrepanza la si può trovare guardando gli estremi del grafico. Il programma è fatto in modo tale che lo schermo rimanga nero 5 secondi prima che venga avviata la sequenza RGB e 5 secondi dopo la fine,

R	G	B		0	1	0.2
1	0	0		.	.	.
1	0.1	0		0	1	1
1	0.2	0		0	0.9	1
.
1	1	0		0	0	1
0.9	1	0		0.1	0	1
0.8	1	0		0.1	0	1
.
0	1	0		1	0	1
0	1	0.1		.	.	.

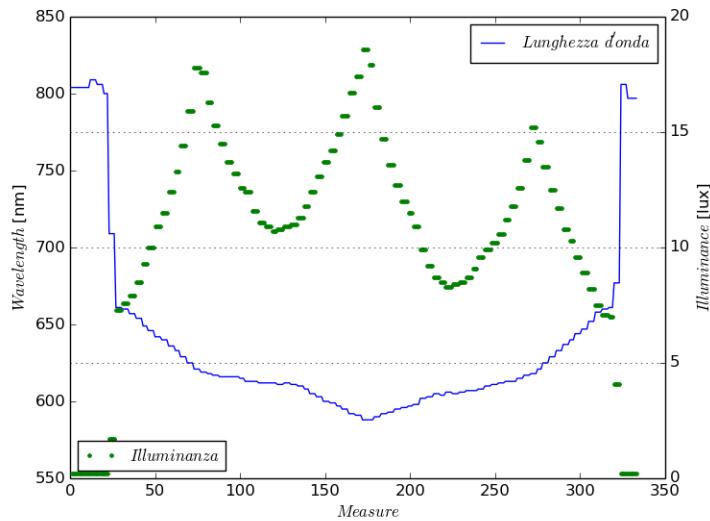


Figure 7. Illuminazione e lunghezza d'onda rilevata sul display del computer

in modo tale da fornire un riferimento per le misure intermedie. Come si può vedere quindi quando lo schermo è nero si ha comunque una piccola illuminazione, dovuta sia alla retroilluminazione dello schermo sia al fatto che il rilevatore non era ovviamente perfettamente schermato, e la componente dominante è quella infrarossa a 800 nm circa. Si può quindi immaginare che questa componente, per quanto fornisca un contributo piccolo all'illuminazione incidente, dia comunque un contributo tale da produrre uno shift nella lunghezza d'onda misurata. Nelle ipotesi che l'intensità della radiazione infrarossa di fondo rimanga costante e che i valori in uscita dai canali CH0 e CH1 siano 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 arriva sul rilevatore (ipotesi ragionevole visto che CH0 e CH1 sono proporzionali alla fotocorrente, anch'essa proporzionale al numero di fotoni incidente e dunque alla potenza incidente) si può scrivere:

$$CH0 = CH0_V + CH0_I \equiv x + CH0_I \quad (1)$$

$$CH1 = CH1_V + CH1_I \equiv y + CH1_I \quad (2)$$

dove il pedice *V* sta per visibile, *I* per infrarosso. I valori di $CH0_I$ e $CH1_I$ si possono ricavare dai dati restituiti da Arduino, operando ad esempio una procedura di media

dei dati con schermo "nero", si ha $CH0_I = 62$, $CH1_I = 37$. Pertanto ricavando i valori di x e y dalle equazioni precedenti per le misure di interesse (quelle con almeno un LED acceso) si ottengono i rapporti $\frac{y}{x}$ che consentono di risalire alla lunghezza d'onda prodotta dallo schermo. I risultati sono raccolti in figura 8.

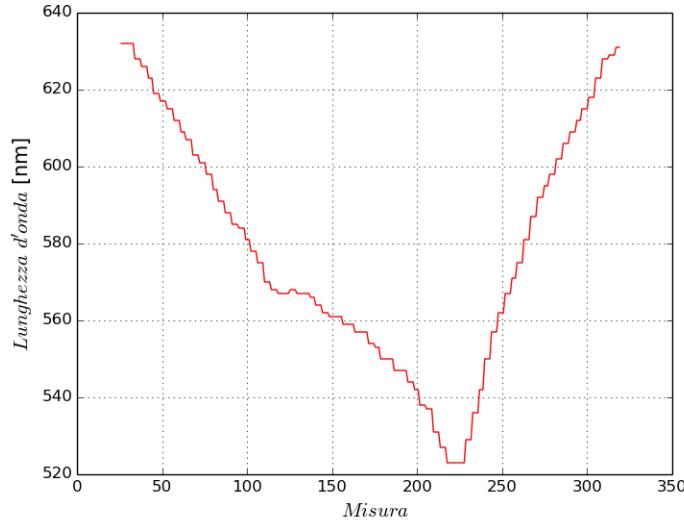


Figure 8. Lunghezze d'onda pulite dall'infrarosso

In figura 9 sono messi a confronto il grafico dell'illuminazione sul dispositivo con le lunghezze d'onda calcolate prima e dopo aver eliminato il contributo infrarosso.

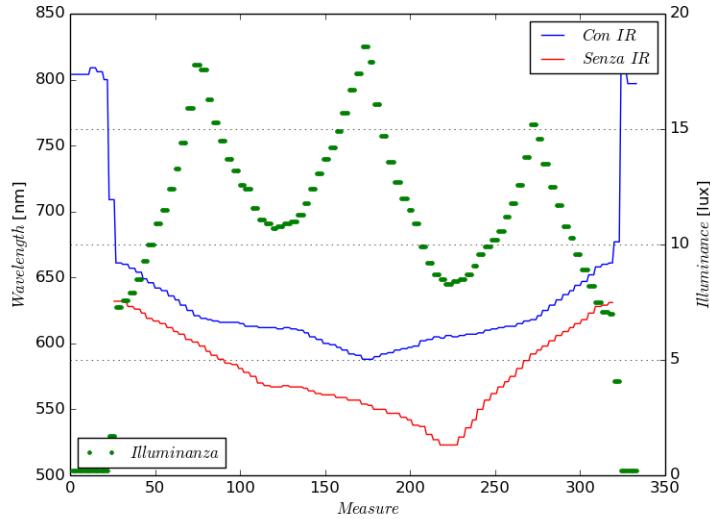


Figure 9. Confronto fra illuminazione e lunghezze d'onda prima e dopo l'eliminazione dell'infrarosso

Come si può vedere la curva relativa alle lunghezze d'onda senza IR è "sincronizzata" con i minimi della curva di illuminanza; i valori trovati sono più ragionevoli (568 per il verde, 523 per il blu) anche se sembrano soffrire dello stesso problema dei LED, ovvero lunghezze d'onda maggiori di circa 20-30 nm rispetto a quelle attese. Si può inoltre

notare che i punti in cui la distanza fra le curve delle lunghezze d'onda è minima in corrispondenza dei massimi e massima in corrispondenza dei colori puri, questo perché nel primo caso almeno due LED sono accesi, per cui il contributo infrarosso è meno importante, al contrario del secondo caso in cui invece essendo acceso un solo LED il fondo infrarosso è più evidente. Inoltre il divario in corrispondenza del blu è maggiore vista la minore responsività di entrambi i fotorivelatori a questa lunghezza d'onda rispetto all'infrarosso, mentre hanno una responsività maggiore al verde, da cui il divario minore.

3 Misuratore analogico di lunghezza d'onda

Come seconda parte dell'esperienza, ci è stato messo a disposizione un integrato analogico, il ws-7.56-TO5 prodotto dalla Pacific Silicon Sensor, composto da due giunzioni p-n costruite sullo stesso substrato, come visibile nello schema in Figura (10). I due fotodiodi possiedono curve di responsività alla radiazione incidente differenti (il principio di funzionamento è lo stesso del sensore digitale APDS-9301): il diodo superiore ha una risposta maggiore al blu, il secondo, quello inferiore, ha il picco sul rosso. Viene garantito che il rapporto dei due segnali è indipendente dalla luminosità incidente, purchè si sia in condizione di non saturazione; per tale motivo è possibile utilizzare la quantità $\log(CH1/CH2)$ per stabilire una corrispondenza biunivoca con la lunghezza d'onda del segnale incidente. La curva di calibrazione per il nostro sensore è riportata in Figura (11).

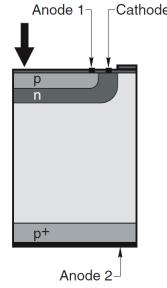


Figure 10. Schema costruttivo dei fotodiodi del WS-765-TO5.

Nella seguente tabella si riportano alcune fra le caratteristiche più rilevanti del ws-7.56-TO5.

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

Poichè il sensore è composto da due fotodiodi, si deve montare un circuito con due op-amp in modalità invertente con due transimpedenze (eventualmente differenti); il catodo è a comune e andrà collegato ad entrambi gli ingressi non-invertenti, come mostrato nello schema in Figura (12a).

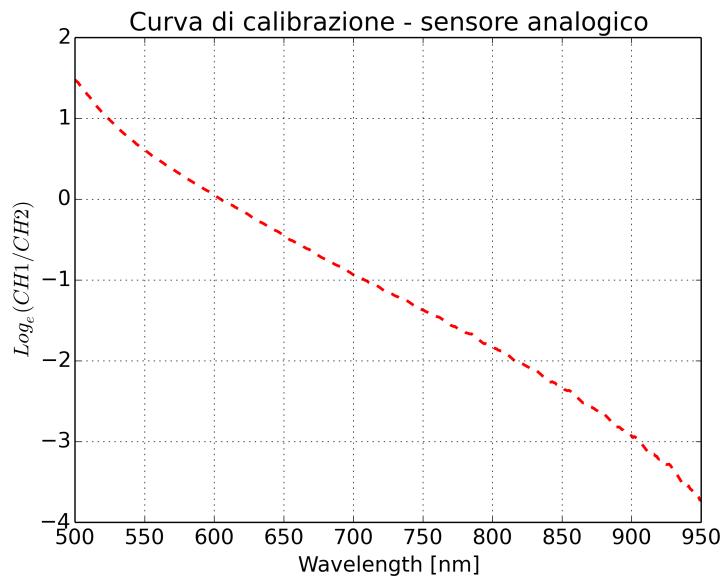
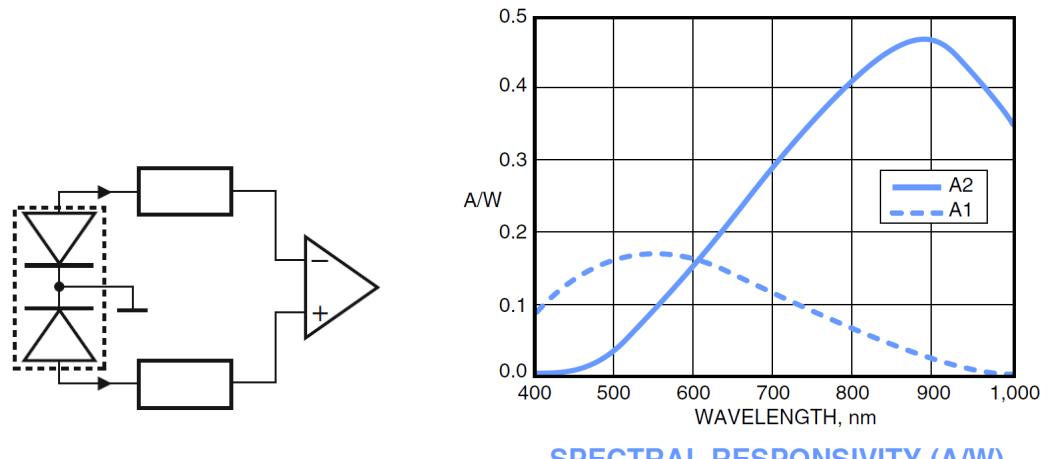


Figure 11. Curva di calibrazione del logaritmo del quoziente fra i segnali in funzione della lunghezza d'onda della radiazione.



(a) Schema di montaggio della coppia di fotodiodi del WS-756-TO5 **(b)** Curva di responsività spettrale dei due diodi in funzione della lunghezza d'onda incidente.

Figure 12

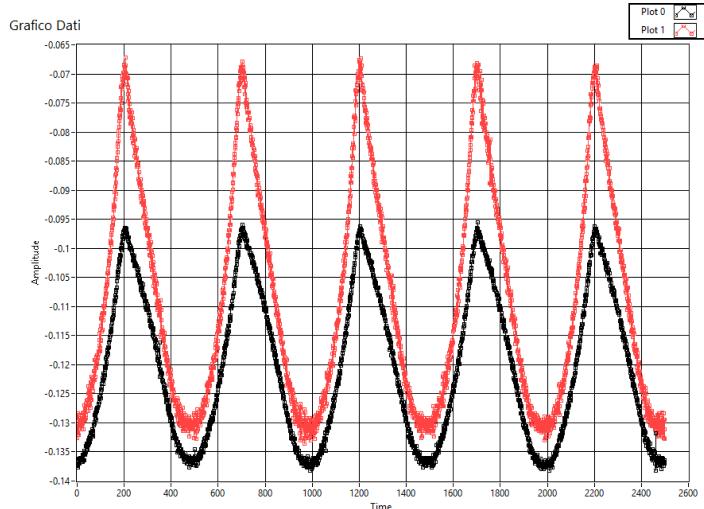


Figure 13. Segnale relativo all’illuminazione della stanza data dalle lampade.

Per dimensionare opportunamente le trans-impedenze è sufficiente considerare la curva di responsività (Figura (12b)) e stimare gli ordini di grandezza delle tensioni risultanti: infatti, come si evince dal grafico, per potenze incidenti limitate superiormente dal valore di saturazione (si prenda il caso non polarizzato), l’ordine di grandezza della corrente in uscita è delle decine, o al massimo centinaia, di μA . Affinchè si possano rivelare delle tensioni dell’ordine dei volt con i canali CB33 e CB65, possiamo impiegare delle resistenze a trans-impedenza dell’ordine del centinaio di $\text{k}\Omega$. Le nostre prove sono state effettuate con $R_1 = 82.3\text{k}\Omega$ e $R_2 = 82.2\text{k}\Omega$ prima e $R_1 = 219\text{k}\Omega$, $R_2 = 220\text{k}\Omega$ poi.

Come prima acquisizione, mostriamo in Figura (13) il segnale prodotto dall’illuminazione ambientale della stanza, in cui è facilmente visibile la frequenza di 50Hz della rete elettrica (in realtà noi misuriamo 100Hz, il doppio, poichè l’intensità luminosa delle lampade va come il quadrato di $V_{ENEL}(t)$). Notiamo in particolare le tensioni negative, dovute all’uso dell’op-amp in modalità invertente come si vede dallo schema circuitale. Per verificare che le frequenze siano quelle previste, eseguiamo una veloce FAST-FOURIER TRANSFORM di entrambi i segnali dei canali, riportata in Figura (14). Come si nota, avendo tolto il segnale di frequenza nulla, vi sono picchi nelle frequenze di armoniche multiple di 100Hz.

In condizioni di *buio*, cioè in assenza di illuminazione e cercando di evitare fonti di calore che potrebbero essere rilevate come IR, la risposta in tensione è diversa da zero per entrambi i fotodiodi, poichè si attesta su un valore medio prossimo a 7-8mV, e soprattutto è positiva, contrariamente al comportamento del circuito in condizioni normali di lavoro ad esempio con la luce ambientale.

In particolare il segno diverso ci fa sospettare che possa trattarsi dell’effetto della corrente oscura (*dark current*), dovuta al trasporto dei portatori di carica minoritari e che scorre dal catodo all’anodo di un dispositivo a semiconduttore, quindi nella direzione giusta per determinare l’effetto che stiamo osservando. Più precisamente: come riportato nella tabella con le specifiche tecniche del ws-7.56-TO5, questo fotodiodo è caratterizzato da una dark current tipica di 10 nA, che, su una transimpedenza di 220 k Ω (circa), determina una tensione rilevata di 2.2mV, che è lo stesso ordine di grandezza del segnale di buio, ma corrisponde a circa un terzo di quello effettivamente rilevato. Tuttavia, grazie alla nostra ormai annuale esperienza con gli op-amp, siamo in grado di ipotizzare l’incidenza di un’altra grandezza: l’input offset current del $\mu\text{A}741\text{CP}$ che come valore tipico riportato sul datasheet ha 20nA alle nostre condizioni di lavoro. Evidentemente il suo contributo

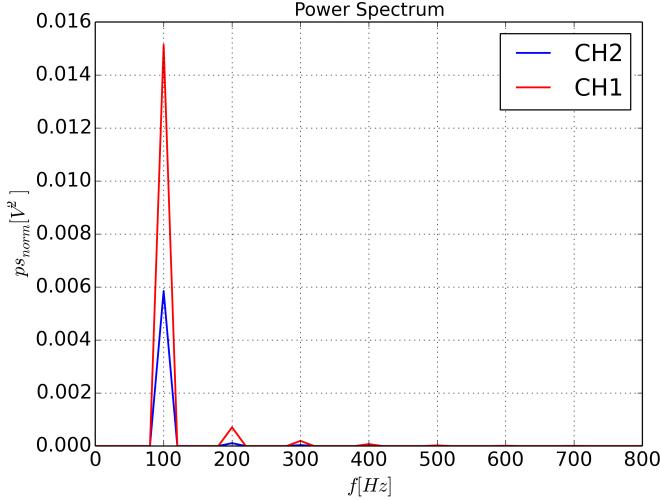


Figure 14. Fast Fourier transform del segnale di luce ambientale.

si somma alla dark current, triplicando la tensione rilevata sulla transimpedenza per cui $220\text{k}\Omega * 30\text{nA} \simeq 7\text{mV}$, molto vicino a quanto osservato.

Ad ogni modo, questo offset *buio* non pregiudica in modo sostanziale le misure successive poichè si è cercato di rilevare tensioni di almeno 1-2 ordini di grandezza maggiori.

Può essere interessante discutere della possibilità di eliminare in maniera sistematica questo segnale dovuto al passaggio nella transimpedenza della dark current e dell'input offset current. Un modo che ci è sembrato abbastanza furbo consiste nell'impiegare un secondo sensore analogico **coperto** da collegare a polarità invertita alla transimpedenza: questi produrrà una sua propria dark current, sperabilmente molto prossima in valore a quella del sensore originario, ma in senso opposto, annullandone gli effetti. Il difetto principale di questa procedura sta nell'aver rinunciato a rimediare all'input offset current che quindi produrrà sempre un offset di tensione in uscita. O si tiene conto di ciò nel trattamento dei dati, compensando artificialmente per la tensione mancante, che però sotto condizioni differenti di lavoro e di alimentazione potrebbe variare, oppure si introduce un circuito sommatore a valle dell'op-amp che riceve in ingresso il segnale originario più quello prodotto da un ulteriore op-amp con una transimpedenza dello stesso valore.

3.1 Caratterizzazione dei LED

Mettiamo alla prova il nostro rilevatore con (tutti) i LED a disposizione del laboratorio. Ogni LED è stato posto in corrispondenza dell'area esposta della giunzione e quanto meglio isolato dall'illuminazione esterna della stanza; quindi sono state acquisiti per ciascuno circa 10^4 campionamenti con il VI ACQUIS_BASE2, da cui è stata calcolata la media aritmetica e lo scarto quadratico medio. Per ciascuno di essi è stato estratto il valore del logaritmo dei rapporti fra i due segnali (come spiegato nell'introduzione al sensore analogico) e plottati insieme alla curva di calibrazione del ws-7.56-T05, in modo da verificare se la lunghezza d'onda stimata a partire da tale curva coincide con quella effettiva riportata sul datasheet. Nella Tabella (4) vengono riassunti i LED impiegati e le loro λ di fabbrica, ove disponibili.

LED	Wavelength (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
SSL-LXA	660	-0.58	0.02
TSHG8400-830	830	-1.964	0.007

Table 4. title

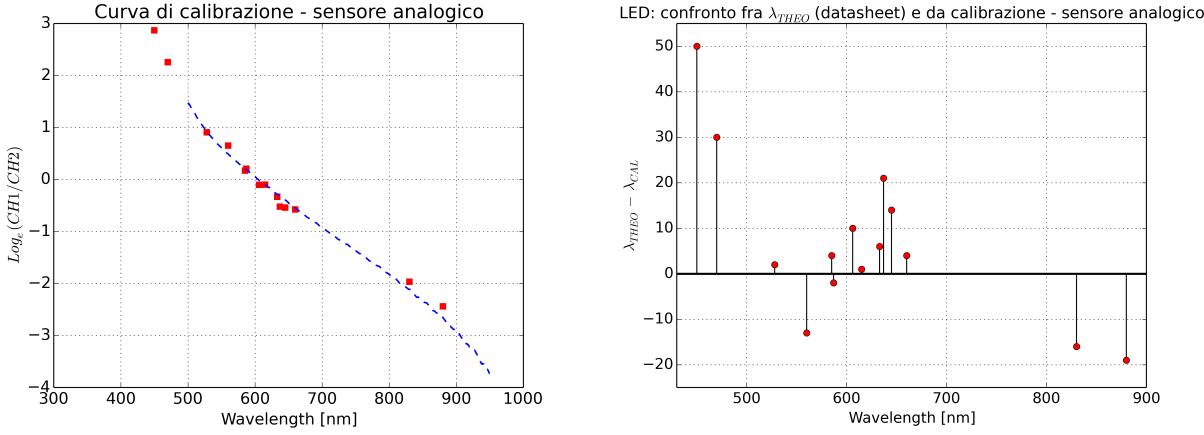
Si riporta in Figura (15a) il grafico con il logaritmo del rapporto $CH1/CH2$ dei LED in funzione di λ , insieme con i punti della curva di calibrazione. Come si può notare, in generale l'accordo è piuttosto buono con i punti di calibrazione: stimiamo che non vi siano più di una ventina di nm di differenza fra i punti corrispondenti ai LED e la curva. Rileviamo, inoltre, due punti sperimentali dei LED blu LB3333 e LED450 che si trovano a lunghezze d'onda inferiori al limite minimo della curva di calibrazione, ma posizionati in modo tale da disporsi abbastanza bene lungo un prolungamento ideale di tale curva.

Vogliamo essere più quantitativi, perciò per valutare in maniera più precisa lo scarto fra λ_{THEO} (che sarebbe quella di fabbrica) e la λ_{CAL} , cioè quella che risulterebbe dal $\log(CH1/CH2)$ secondo la calibrazione, è possibile scrivere un semplice algoritmo che colloca il log del rapporto lungo la curva, per estrarre λ_{CAL} . Nel grafico in Figura (15b), viene plottato lo scarto fra queste due lunghezze d'onda per ciascun LED. Per quanto riguarda i LED nel blu, si tenga presente che lo scarto calcolato è quello fra λ_{THEO} e il valore minimo di λ dato dalla curva di calibrazione, pari a 500nm: supponiamo che l'accordo possa essere molto migliore se avessimo dati per lunghezze d'onda inferiori.

3.2 Caratterizzazione dei colori RGB di un monitor

Riproponendo la stessa analisi effettuata con l'integrato APDS-9301, e con le stesse condizioni di lavoro per lo script che riproduce i colori sul monitor in uso ², cerchiamo di rilevare ancora una volta le lunghezze d'onda *effettive* dei colori mostrati su schermo. In Figura (16) sono plottati i segnali di tensione sui due canali in funzione del tempo. Le tensioni sono negative (per l'uso invertente dell'op-amp) per cui per ritrovare la familiare forma dell'esperienza della week-09 (se la numerazione è corretta) bisogna immaginarle ribaltate. I picchi negativi corrispondono alle situazioni di RGB del tipo (110, 101, 011), quelle in cui due LED sono accesi contemporaneamente al massimo della loro intensità. Le *valli* (immaginando ribaltata l'immagine) sono invece relate alle triplette pure (100, 010, 001), quindi solo rosso, verde o blu in quest'ordine. Si noti come il segnale del CH2 (in rosso) nel grafico, ha una risposta molto marcata sul rosso (colore), maggiore di

²300 triplette RGB intervallate l'una dall'altra da 0.1s



(a) Dispersione dei LED sulla curva di calibrazione del sensore analogico.
(b) Scarto fra lunghezze d'onda di "fabbrica" e da calibrazione per ciascun LED.

Figure 15. Rilevazione della lunghezza d'onda dei LED e confronto con il valore atteso.

quella del CH1 (plot bianco) che invece prevale sul verde e sul blu. Questo è in linea con quanto ci aspettavamo a partire dallo studio del grafico della responsività spettrale riportato in Figura (12b).

Un'ulteriore caratteristica del plot è la sua evidente *rumorosità*, vale a dire la dispersione piuttosto ampia delle tensioni in un breve intervallo di tempo: i parametri di acquisizione del segnale sono stati settati in modo da ottenere 10 acquisizioni per ogni tripletta RGB mostrata su schermo. Una spiegazione di questo fenomeno può essere dovuta ai microscostamenti del sensore che inevitabilmente sono avvenuti durante l'acquisizione (il sensore era mantenuto a diretto contatto con lo schermo), che possono aver introdotto delle interferenze da parte della luce ambientale, così come la familiare distorsione cromatica che si verifica quando viene esercitata della pressione su delle porzioni di monitor LCD, che potrebbero aver reso il colore disomogeneo.

Risulta naturale, a questo punto, ripulire il segnale mediando su queste dieci misure per ottenere dei rapporti CH1/CH2 puliti. Il risultato è in Figura (17) dove, sulla scala di sinistra, vi sono le tensioni e i punti sperimentali sono provvisti di errore (scarto quadratico medio), mentre sulla scala di destra in blu vi è il logaritmo del rapporto. Sappiamo, dalla calibrazione del sensore, che valori alti del $\log(CH1/CH2)$ corrispondono a lunghezze d'onda minori, per cui indicativamente verifichiamo che procedendo dal rosso al blu λ diminuisce per poi riaumentare tornando sul rosso.

Per mezzo dello stesso algoritmo usato in precedenza con i LED, sfruttando la curva di calibrazione possiamo stimare la lunghezza d'onda a partire dal log: i valori ottenuti sono provvisti di barra di errore, dato da quello calcolato sul $\log(CH1/CH2)$ e si possono vedere in Figura (18), dove la scala di destra, questa volta, è usata per la *wavelength*. Nella Tabella (5) vengono riassunte le λ stimate con questo metodo per i colori *puri* RED, GREEN, BLUE. Per riferimento, sono riportati gli intervalli in nm in cui vengono definiti i colori: i dati sono tratti da Wikipedia che a sua volta cita come referenza [3, Thomas J. Bruno, Paris D. N. Svoronos. CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts]. Notiamo che il rosso riusciamo a stimarlo piuttosto bene, il verde inizia ad essere tendente al giallo, invece il blu è accettabile solo entro i limiti dell'errore. Si ricordi che comunque il limite inferiore che possiamo quantificare è dato dalla scala di

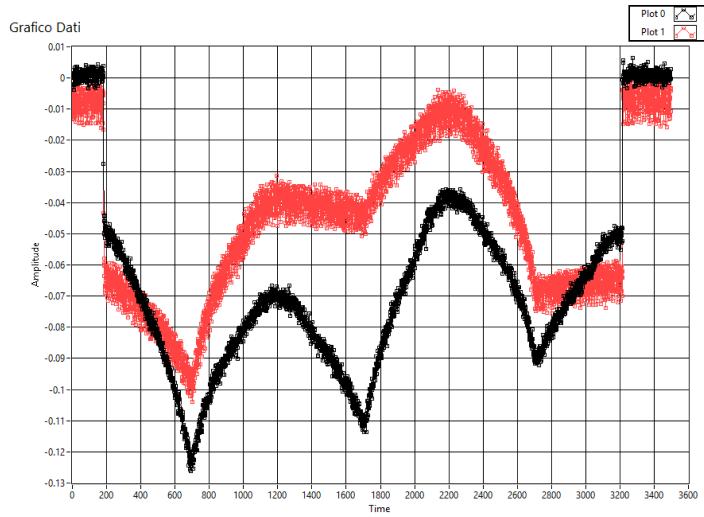


Figure 16. Segnali di tensione dei due canali CH1, CH2 durante lo svolgimento dello script.

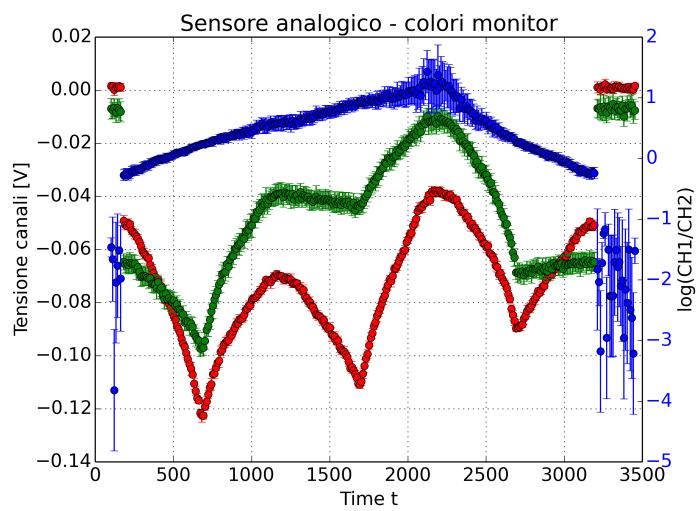


Figure 17. Segnale acquisito dal sensore mediato e ripulito, e logaritmo del rapporto.

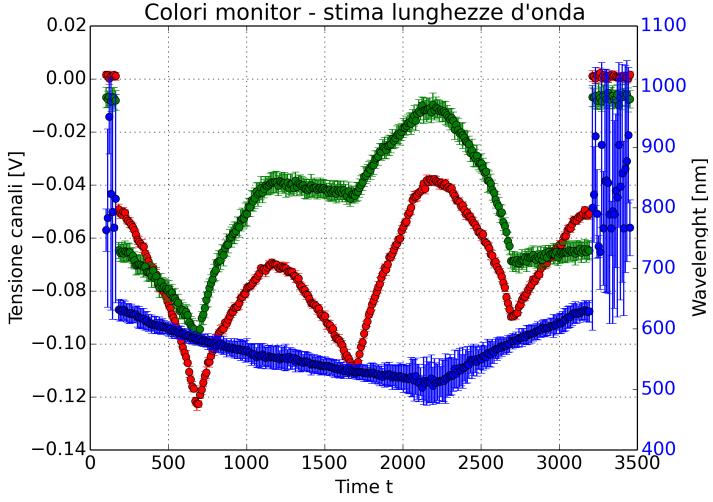


Figure 18. Stima della lunghezza d'onda a partire dal logaritmo del rapporto dei segnali, per ogni colore visualizzato sullo schermo.

calibrazione, che termina a 500nm.

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

Table 5. Lunghezza d'onda dei colori puri RGB

Una particolarità che osserviamo anche in questo caso (cfr. sensore digitale) è la presenza di un segnale non nullo in corrispondenza del colore nero proiettato sul monitor LCD. Questa volta il fenomeno è maggiormente evidente poichè è asimmetrico rispetto ai due fotodiodi: il diodo corrispondente al CH2, con curva di responsività piccata sul rosso (nei plot precedenti è la curva verde), rileva un segnale non trascurabile, contrariamente al diodo del CH1 che mostra tensioni compatibili con lo zero. Per essere più precisi: bisogna ricordarsi che esiste un segnale di buio stimato intorno ai 7-8mV che in questo caso incide in misura evidente ma il suo effetto si compensa con quella radiazione di calore infrarossa che viene emanata dal monitor e comunque rilevata dal sensore. In particolare, nel caso del CH1 questi due contributi si annullano a vicenda (uno è negativo e il secondo positivo), mentre nel CH2 prevale l'effetto dell'IR (come ci aspettiamo in base alla responsività spettrale). Si può provare a sottrarre questo fondo IR dal CH2 (il CH1 lo lasciamo inalterato) per vedere se otteniamo delle lunghezze d'onda maggiormente compatibili con i valori di riferimento.

Il plot è in Figura (19): si noti la saturazione a 500nm in corrispondenza del BLU. La stessa tabella di prima può essere riscritta come:

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

Table 6. Lunghezza d'onda dei colori puri RGB - no IR

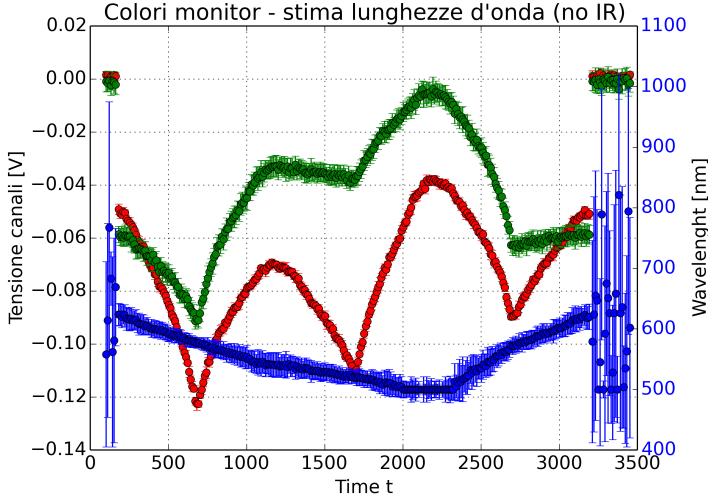


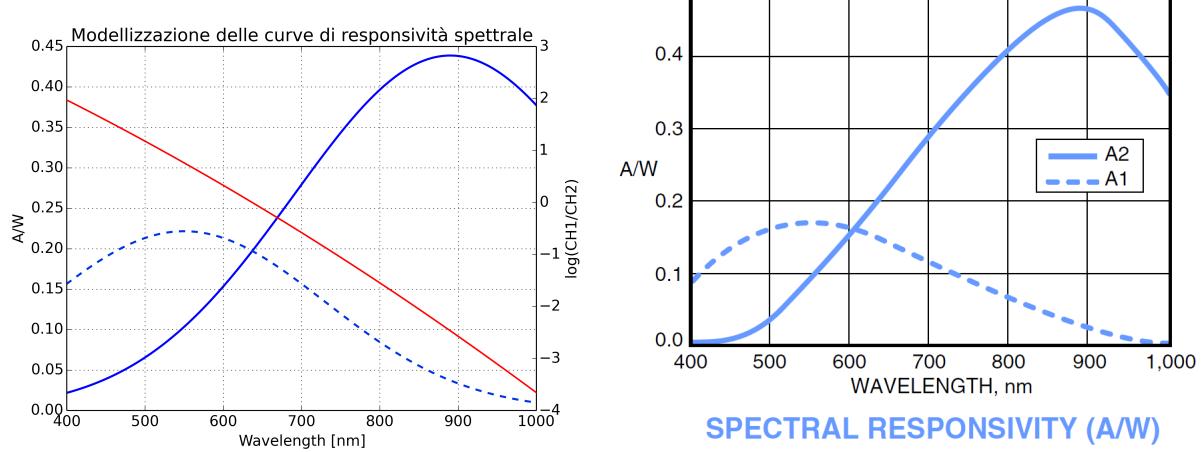
Figure 19. Stima della lunghezza d'onda a partire dal logaritmo del rapporto dei segnali, per ogni colore visualizzato sullo schermo, senza IR

Il rosso è rimasto più o meno fisso, mentre per il verde abbiamo una corrispondenza molto migliore e quasi coincidente con un verde *puro*. Per quanto riguarda il BLU possiamo agire nel seguente modo: per mezzo di Octave cerchiamo un polinomio interpolatore dei punti di calibrazione e prolunghiamolo per lunghezze d'onda comprese nel range 450-500nm.

Una certa arbitrarietà sorge nella scelta del grado del polinomio di interpolazione che può condurre ad esiti totalmente differenti fra loro, come una divergenza a $+\infty$ o a $-\infty$ al diminuire di λ . Tuttavia possiamo in qualche modo aiutarci modellizzando le curve di responsività come due gaussiane centrate attorno al loro valore massimo (chiaramente esplicitato nel datasheet e riportato nella tabella riassuntiva di inizio capitolo), con larghezza stimabile a partire dal Grafico (12b). Questa modellizzazione è riportata in Figura (20) assieme alla curva originaria per un confronto. Se guardiamo la Figura (11) dove è plottata la curva di calibrazione del sensore analogico per compararla quella del modello gaussiano notiamo ovviamente delle differenze, in particolare nella sua concavità, dovute essenzialmente al fatto che verso le code degli spettri l'approssimazione gaussiana è sempre meno rispettata: si noti, ad esempio, il comportamento del segnale del CH1 per lunghezze d'onda decrescenti. In ogni caso è utile per selezionare il migliore polinomio di interpolazione, scelto di grado 11. La curva di calibrazione *estesa* è in Figura (21) e le lunghezze d'onda estrapolate da questa sono in Figura (22).

I risultati delle λ per i colori puri sono riassunti in Tabella (7): il rosso e il verde sono (ovviamente) rimasti gli stessi, in buon accordo con le lunghezze d'onda effettive; finalmente il blu, nonostante un errore considerevole dovuto essenzialmente alla bassissima responsività del fotodiodo 2 a lunghezze d'onda fra 400-500 nm, e quindi con un errore percentuale affatto trascurabile, risulta avere una λ decisamente buona, circa a metà dell'intervallo di definizione.

Per dimostrare in maniera forse più significativa la validità dell'estrapolazione offerta della curva di calibrazione per lunghezze d'onda fra 450-500 nm, ritorniamo al grafico



(a) Modellizzazione della curva di responsività: la curva in rosso rappresenta il logaritmo naturale del rapporto. Per due gaussiane il risultato è una parabola se le loro larghezze sono differenti, altrimenti una retta.

(b) Curva di responsività spettrale dei due diodi in funzione della lunghezza d'onda incidente.

Figure 20

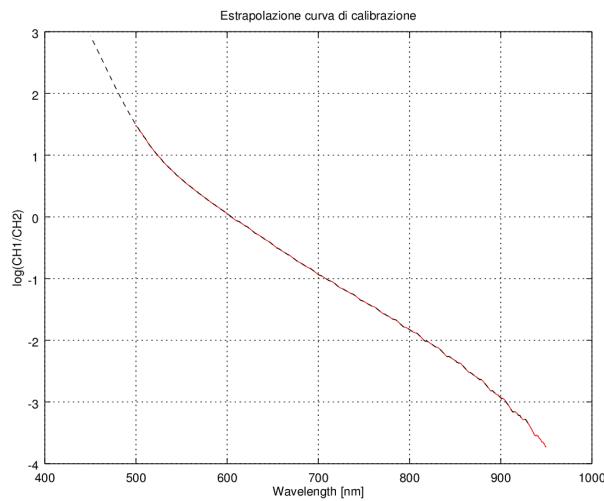


Figure 21. Curva di calibrazione "estesa" interpolata con un polinomio di grado 11.

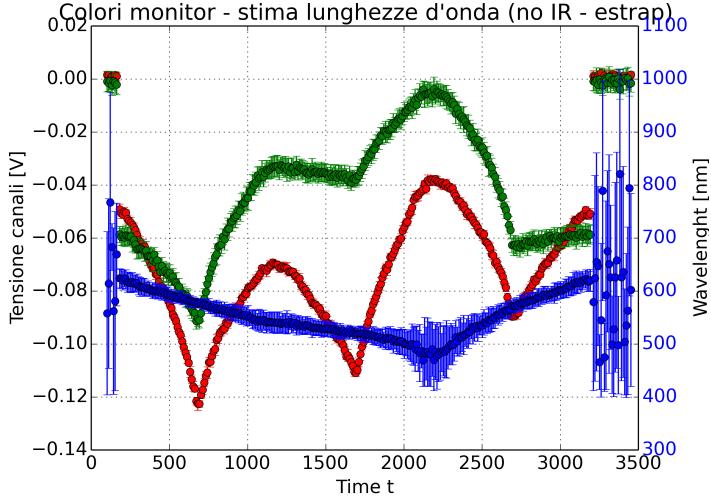
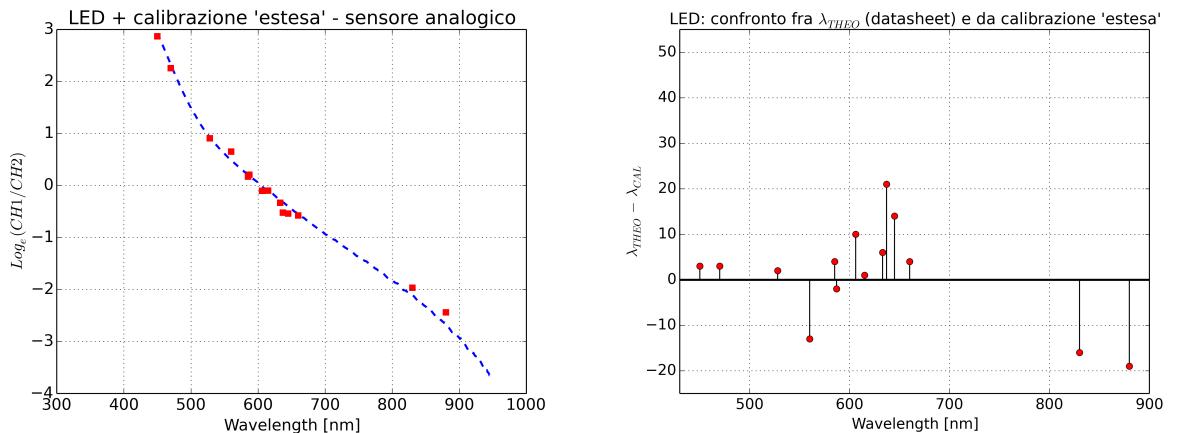


Figure 22. Stima della lunghezza d'onda del monitor: senza fondo IR ed usando la curva di calibrazione "estesa".

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

Table 7. Lunghezza d'onda dei colori puri RGB - no IR

dei LED di Figura (15a): si ricorda che per i LED nel blu non vi erano punti della curva con cui quantificare l'eventuale scostamento della lunghezza d'onda. Proviamo, quindi, a riplottare esattamente lo stesso grafico usando, questa volta, la curva *estesa* per verificare se la nostra estrappolazione è stata efficace. Il risultato, in Figura (23) è davvero buono ed offre una giustificazione indipendente del procedimento seguito, da cui segue che anche i valori di λ ottenuti per il blu del monitor possiedono una certa significatività.



(a) Dispersione dei LED sulla curva di calibrazione 'estesa' del sensore analogico. **(b)** Scarto fra lunghezze d'onda di "fabbrica" e da calibrazione "estesa" per ciascun LED.

Figure 23. Rilevazione della lunghezza d'onda dei LED e confronto con il valore atteso.

References

1. Avago Technologies - APDS-9301. Miniature Ambient Light Photo Sensor with Digital (I²C) Output.
2. Pacific Silicon Sensor Incorporated - Datasheet WS-7.56-T05.
3. Hawlett Packard - T-1 $\frac{3}{4}$ Super Ultra-Bright LED Lamps.
4. OSRAM - Hyper 3 mm (T1) LED Hyper-Bright LED. LS 3336, LO 3336, LY 3336
5. OSRAM - Hyper 3 mm (T1) LED Hyper-Bright LED. LB 3333, LT 3333
6. Thomas J. Bruno, Paris D. N. Svoronos - CRC Handbook of Fundamental Spectroscopic Correlation Charts