

TD (/github/MarcoMalucchi/TD/tree/main) / logbook (/github/MarcoMalucchi/TD/tree/main/logbook)

# Logbook es. 07

## Introduzione

## S07 — Legge di Lambert–Beer

**Scopo generale.** Misurare l'assorbimento di una bevanda colorata con LED monocromatici e un fotodiodo, verificando la Legge di Lambert–Beer.

## Task 1

### Obiettivi

- Individuare la **corrente massima** erogabile dall'op-amp (datasheet);
- Verificare il comportamento del **convertitore V-I** del LED.

### Descrizione

Abbiamo usato l'OpAmp ADA4661, dal cui datasheet risulta (per alimentazione a  $\pm 3V$ ) :  
 $\text{CONTINUOUS OUTPUT CURRENT: } 30\text{mA}$

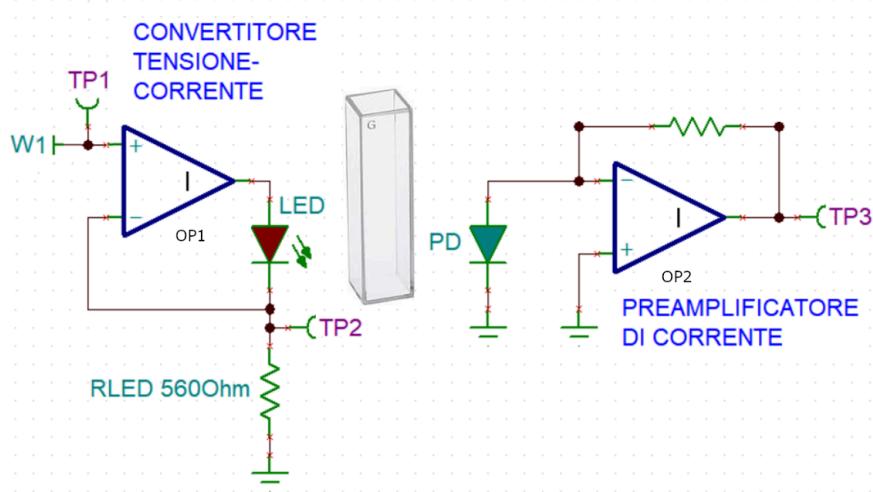
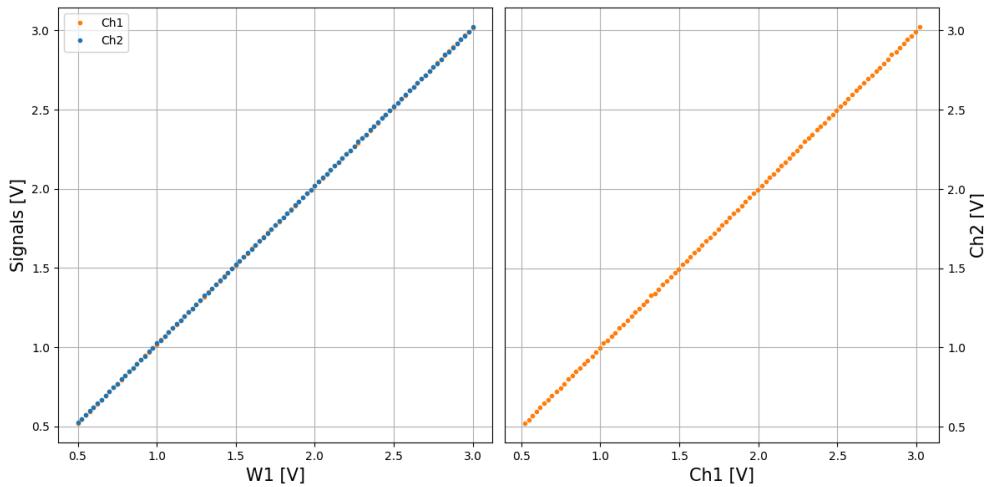


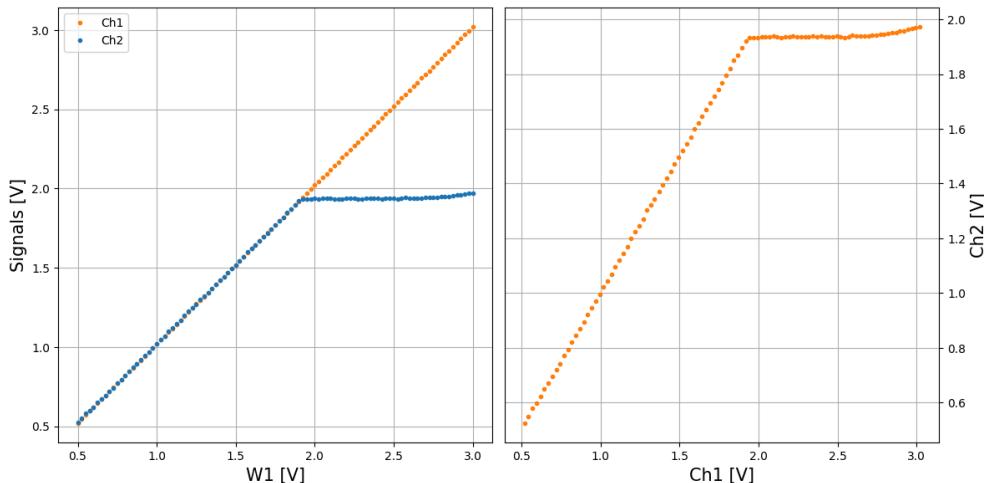
Figura 1: schema circuitale

Per studiare il comportamento del circuito, troviamo, tramite regole d'oro dell'OpAmp, che  $I = \frac{V_{in}}{R_{LED}}$ . Abbiamo dunque deciso di misurare il potenziale di ingresso e quello a monte della resistenza verificando che sia lo stesso. Impostiamo l'alimentazione a  $\pm 5V$ :



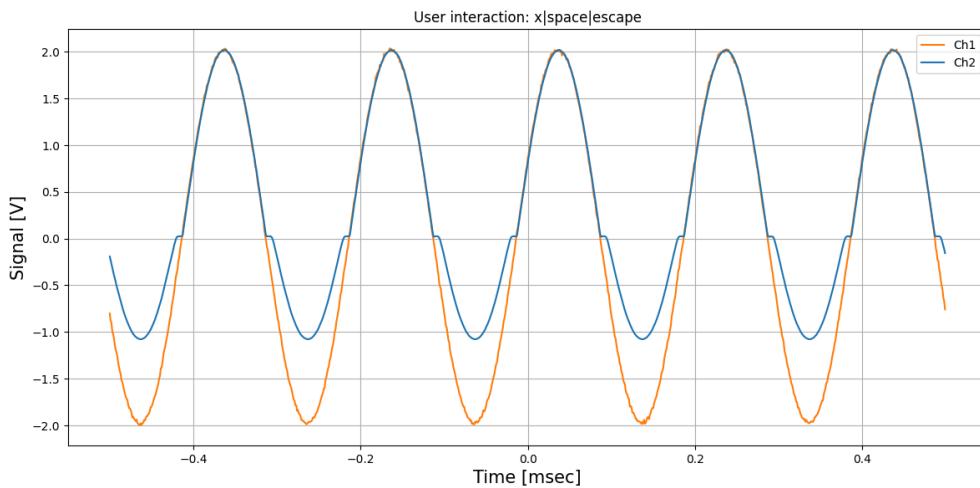
*Figura 2: comportamento della maglia sinistra del circuito con il LED rosso*

Per  $W_1$  continua tra 0.5 e 3 V si osserva la verifica sperimentale del comportamento atteso per il circuito;



*Figura 3: comportamento della maglia sinistra del circuito con il LED viola*

Per il LED viola si osserva un buon comportamento fino a circa 2V, superati i quali il potenziale del Ch2 entra prima in un plateau orizzontale e poi tende ad aumentare nuovamente, con conseguente spegnimento del LED. Supponendo che questo comportamento sia comune a tutti i LED ma a potenziali sempre maggiori (visto che la luce viola è quella più energetica), sceglieremo di utilizzare un potenziale diverso per ciascun led (che aumenta di volta in volta) e che sceglieremo sulla base del potenziale massimo prima che la curva caratteristica del led entri, appunto, nel plateau orizzontale: questo, per far sì che la luminosità del led (e quindi la corrente passante nel fotodiodo) sia la più alta possibile.



*Figura 4: comportamento della maglia sinistra del circuito con W1 in AC*

Utilizzando per W1 un segnale alternato, invece, si osserva il LED lampeggiare e un comportamento rettificatore del diodo, come atteso dalla teoria.

## Task 2

### Obiettivi

- Misurare la **corrente di buio** del fotodiodo e verificarne la **stabilità** (eventuali drift) nel tempo.

Con fotodiodo schermato, misuriamo la corrente media e la sua deviazione standard, ripetendo all'inizio e alla fine dell'esperienza. Otteniamo i seguenti valori:

INIZIO:

$$M = -2.14e - 07;$$

$$\sigma_M = 2.11e - 06$$

FINE:

$$M = -6.37e - 07$$

$$\sigma_M = 3.72e - 06$$

## Task 3

### Obiettivi

- Preparare una serie di **diluizioni** note;
- Misurare il **cammino ottico** della cuvetta.
- Prepariamo 5 cuvette:
  - sola acqua;

- 1/4 powerade e 3/4 acqua;
- 1/2 powerade e 1/2 acqua;
- 3/4 powerade e 1/4 acqua;
- solo powerade.
- Misuriamo  $I_0$  con acqua pura per ogni LED;
- Misuriamo lo **spessore interno ed esterno** della cuvetta con il calibro, ottenendo:

spessore esterno:  $(1.20 \pm 0.05)$  cm

spessore interno:  $(1.05 \pm 0.05)$  cm

## Osservazione — Task 3 (nota a)

**Domanda** L'ipotesi "la cuvetta con acqua pura ha assorbanza nulla" è sempre valida? Quali effetti hanno le interfacce aria/cuvetta/liquido? Come si può verificare la validità dell'ipotesi?

Non sempre: nel visibile l'acqua ha assorbimento trascurabile, ma non nullo fuori dal visibile (UV/IR) e, soprattutto, possono intervenire effetti strumentali e geometrici. I principali contributi presenti anche con acqua sono:

1. **Riflessioni alle interfacce** (aria-parete cuvetta, parete-liquido, e in uscita);
2. **Assorbimento della cuvetta**;
3. **Allineamento non perfettamente ortogonale**;
4. **Impurezze** nell'acqua (coloranti residui nella preparazione delle concentrazioni nelle varie cuvette, che in alcuni casi abbiamo dovuto ripetere).

Per verificare in pratica la bontà dell'ipotesi, si potrebbe ragionare in termini di:

- Misura  $A_{H2O}(\lambda) = -\log_{10}(I_{H2O}/I_{vuoto})$  usando la stessa cuvetta prima vuota e poi con acqua. Nel visibile ci si aspetta  $A_{H2O} \approx 0$  entro l'errore sperimentale.
- Ripetibilità della misura: deviazione standard piccola indica interfacce pulite.

## Task 4

### Obiettivi

- regolare la corrente di alimentazione del LED per ottenere segnali che sfrutti bene il sistema di misura;
- scegliere i componenti del transimpedente del fotodiodo in modo da sfruttare bene il fondo scala;
- usare i dati del datasheet dell'OSD15 per stimare l'ordine di grandezza dell'intensità della luce in  $\frac{W}{cm^2}$  a partire dal segnale misurato, considerando la dimensione del fascio del LED e la dimensione del sensore.

Come accennato al task 1, si imposta il convertitore V-I e si misura la corrente del fotodiodo con un amplificatore a transimpedenza  $V_{out} = RI_{PD}$  (con eventuale C\_F per stabilità). Si regola  $I_{LED}$  e si sceglie R=10k  $\Omega$  in modo che i segnali non saturino la DAQ e,

al contempo, massimizzino il rapporto S/N. Con il bianco (acqua) si fissa  $I_0$ ; poi, con le soluzioni, si misurano le correnti. Per stimare l'intensità luminosa incidente a partire dalla corrente del fotodiodo segniamo i dati dal datasheet OSD15-0 (OSI Optoelectronics - Typical Electro-Optical Specifications at  $TA=23^\circ C$  - Typical Spectral Response):

- area attiva  $\approx 15 \text{ mm}^2 (\approx 0,15 \text{ cm}^2)$ ;
- responsività tipica  $S(\lambda)$  dipendente dalla lunghezza d'onda, con valore di picco intorno a  $0,47\text{--}0,54 \text{ A/W}$  vicino a  $900 \text{ nm}$  e valori più bassi nel visibile (si usa  $S(\lambda)$  appropriato per il LED impiegato).

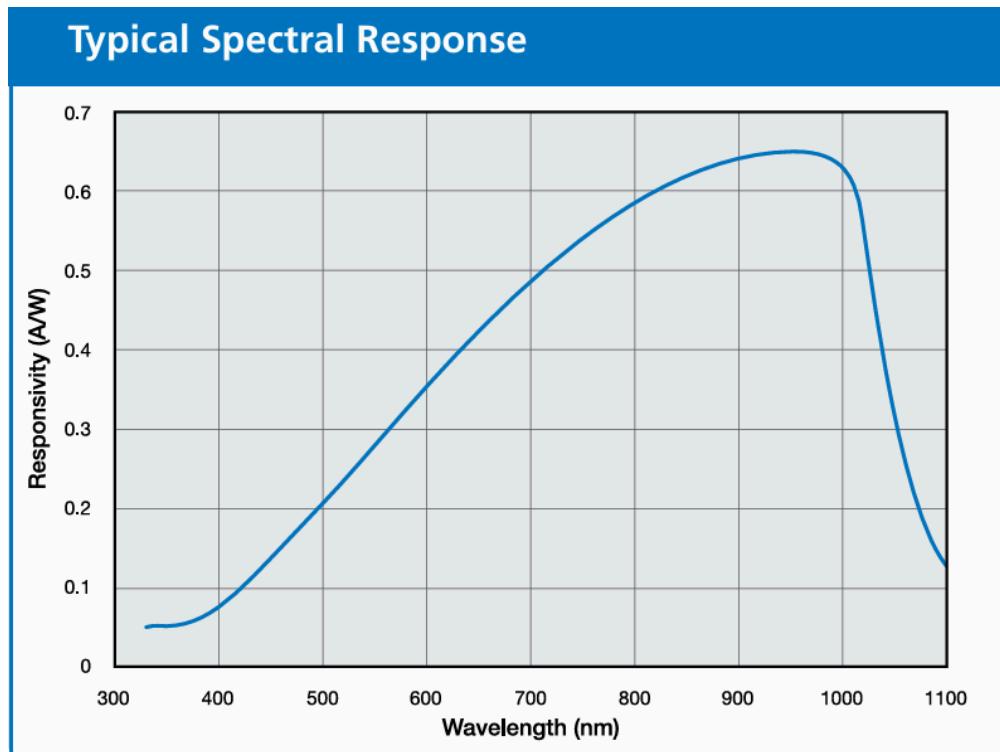


Figura 5: Tipica risposta spettrale riportata dal datasheet a pag. 1

Model Number	Active Area		Peak Responsivity Wavelength (nm)	Responsivity at $\lambda_p$ (A/W)		Capacitance (pF)		Dark Current (nA)		NEP (W/ $\sqrt{\text{Hz}}$ )	Reverse Voltage (V)	Temp.* Range ( $^\circ C$ )		Package Style ①	
	Area (mm $^2$ )	Dimensions (mm)		typ.	min.	typ.	typ.	typ.	max.			typ.	typ.	typ.	
														-10V 632nm 50 $\Omega$	
<b>'O' Series, Metal Package</b>															
OSD1-0	1	1.0 sq				12	3	1	3	4.5 e-14		10		7 / TO-18	
OSD5-0	5	2.5 $\phi$				50	8	5	10	1.0 e-13		8		5 / TO-5	
OSD15-0	15	3.8 sq	900	0.47	0.54	150	20	8	15	1.3 e-13	50	9	z	5 / TO-5	
OSD60-0	58	7.6 sq				600	75	15	50	1.7 e-13		14		-40	69 / TO-8
OSD100-0A	100	11.3 $\phi$				1000	130	30	70	2.5 e-13		19	-25	-40	55 /Special

Figura 6: Valori di riferimento nel datasheet a pag. 2

Stima dell'intensità luminosa (ordine di grandezza):

1. ricaviamo la corrente del fotodiodo dal circuito transimpedante

$$I_{PD} = \frac{V_{out}}{R}$$

2. scegliamo  $S(\lambda)$  dal datasheet in corrispondenza della lunghezza d'onda del LED (nel visibile  $S(\lambda)$  è tipicamente  $0,2\text{--}0,4 \text{ A/W}$  per questo sensore)

3. potenza ottica incidente effettiva sul sensore

$$P_{inc} \simeq \frac{I_{PD}}{S(\lambda)}$$

4. calcolare l'area effettivamente illuminata  $A_{eff}$ : prendiamo  $A_{eff}$  = area del fascio collimato

$$5. \text{ intensità } E \approx \frac{P_{inc}}{A_{eff}} [\text{W/cm}^2]$$

Esempio con LED arancio:

- $I_{PD}$  (misurata) = 3.66e-06 A
- LED arancio, prendo  $S(\lambda)$  arancio  $\approx 0,35 \text{ A/W}$
- $P_{inc} \approx 3.66e-06 \text{ A} / 0,35 \text{ A/W} \approx 10.5 \mu \text{ W}$
- fascio  $\sim 3 \text{ mm} \rightarrow A_{eff} = 0,0707 \text{ cm}^2$
- $E \approx 0,33 \text{ mW} / 0,0707 \text{ cm}^2 \approx 4,7 \text{ mW/cm}^2$

## Task 5

Obiettivo: Misurare la corrente emessa dal fotodiodo con "sweepbias.ipynb", al variare della concentrazione nella cuvetta.

Nota: Fare opportuni test di ripetibilità sul posizionamento della cuvetta, i.e. assicurarsi che ogni volta che si cambia cuvetta questa si riponga sempre nella stessa posizione.

Infine fare un grafico conclusivo dell'assorbanza e fittarla linearmente per estrarre il parametro di assorbimento.

Procedendo per passi:

1. Partiamo dal modello di fit, in modo da avere ben chiaro che cosa e come misurare:

$$A \equiv -\log \frac{I(d)}{I_0} = \frac{V_L}{V_W + V_L} c_0 \epsilon_\lambda d$$

A livello teorico  $I_0$  e  $I(d)$  sono delle intensità luminose, prese rispettivamente prima che la luce entri nel liquido e subito dopo che ne è esce, nel nostro caso si traducono in:

- $I(d) \equiv$  corrente misurata dal fotodiodo in uscita dal liquido (ipotizzando le pareti della cuvetta perfettamente trasparenti, quindi che non assorbono e non riflettono).
- $I_0 \equiv$  corrente in uscita dalla cuvetta riempita d'acqua, assumendo le caratteristiche ottiche della cuvetta come sopra e trascurando l'assorbanza dell'acqua (vero se la variazione della corrente generata dal fotodio tra caso cuvetta vuota e cuvetta piena d'acqua non è apprezzabile, come indagato nel task 3).

Poi il prodotto tra  $c_0$ ,  $\epsilon_\lambda$  e  $d$  costituisce il parametro di fit ( $p_{fit}$ ), da esso si può ricavare il coefficiente di assorbimento del liquido come:

$$c_0 \epsilon_\lambda = \frac{p_{fit}}{d}$$

con  $d \equiv$  diametro interno dell cuvetta (assumendo che la cuvetta si incastri perfettamente nel supporto di fotodiode e LED, se così non fosse si potrebbe comunque procedere nel solito modo assumendo trascurabile l'assorbanza dell'aria, e della cuvetta), il suo valore misurato è riportato a seguire:

$$d = 1.2 \pm 0.05 \text{ cm}$$

Infine resta il rapporto  $\frac{V_L}{V_W + V_L}$ , dove:

- $V_W \equiv$  volume di acqua nella pivetta.
- $V_L \equiv$  volume di liquido di interessa nella pivetta

Posso misurarli entrambe con la siringa graduata, come discusso nel task 3

Nota: nel modello si è volutamente trascurato il fattore dato dalla corrente di buio del LED, misurato nel task2. Ciò è giustificato dal fatto che lo si assume ragionevolmente costante per tutte le intensità di correnti misurate e tutte le lunghezze d'onda in esame e, per ciascuno di questi valori, molto piccolo rispetto ad essi, quindi trascurabile (giustificazione segue da valore misurato nel task 2)

## 2. Misura delle correnti.

Prima cosa da fare è fissare il LED, preso un LED tra quelli a disposizione il procedimento si ripete uguale per tutti gli altri:

- Tradurre la ddp misurata in corrente. Uso le regole d'oro degli OpAmp e considero il diodo in conduzione, risolvo quindi il circuito del preamplificatore di corrente ed ottengo:

$$I_{fd} = \frac{V_{mis}}{R}$$

con  $R = 10 \text{ k}\Omega$ .

- Misurare  $I_0$ , voglio una misura di  $I_0$  per ogni cuvetta utilizzata, così da non dividere tutte le misure di  $I(d)$  per uno stesso valore e renderle tutte dipendenti, rendendo i risultati del fit non significativi
- Misurare  $I(d)$
- Calcolare  $A$  propagando correttamente gli errori

## 3. Misure delle concentrazioni.

Vedi tabella relativa al task 3.

## 4. Procedere con fit del modello per ogni LED.

Raccolti i dati si è osservato come, per ognuno dei dataset, l'errore sulle concentrazioni, propagato attraverso il modello sulla variabile dipendente, risultasse maggiore dell'errore sulle assorbanze, quindi è stato necessario invertire la funzione modello, in

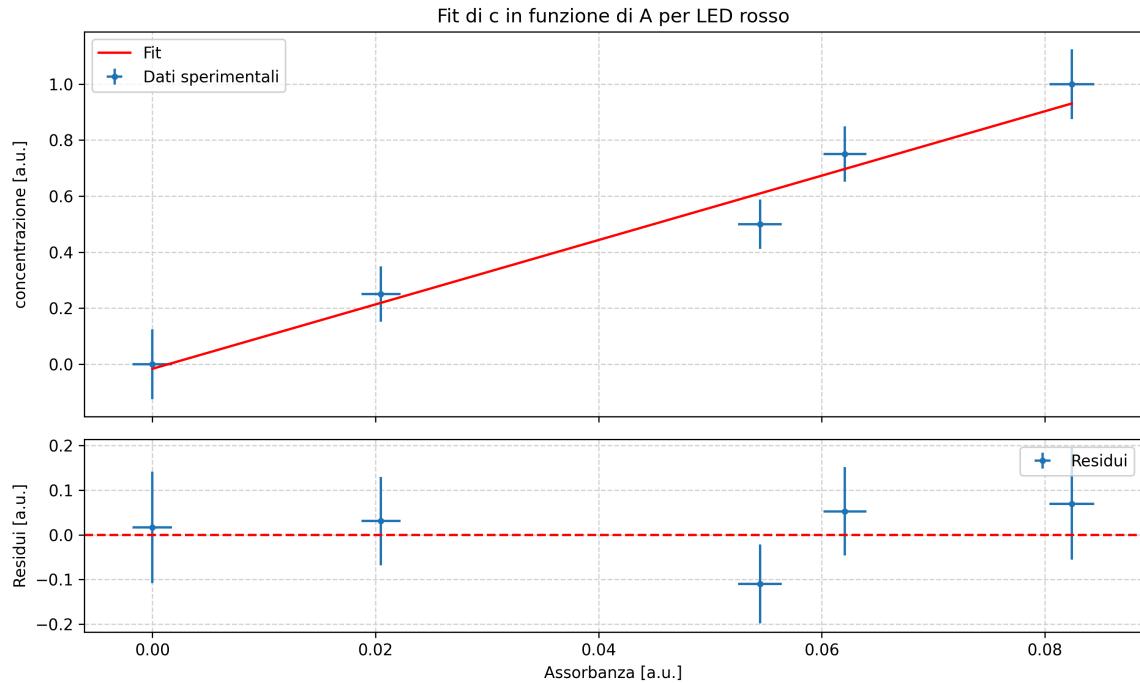
modo da garantire le condizioni necessarie per l'esecuzione di un buon fit.

Quindi si è usato il seguente modello:

$$\frac{V_L}{V_W + V_L} = -\log \frac{I(d)}{I_0} \cdot M + C$$

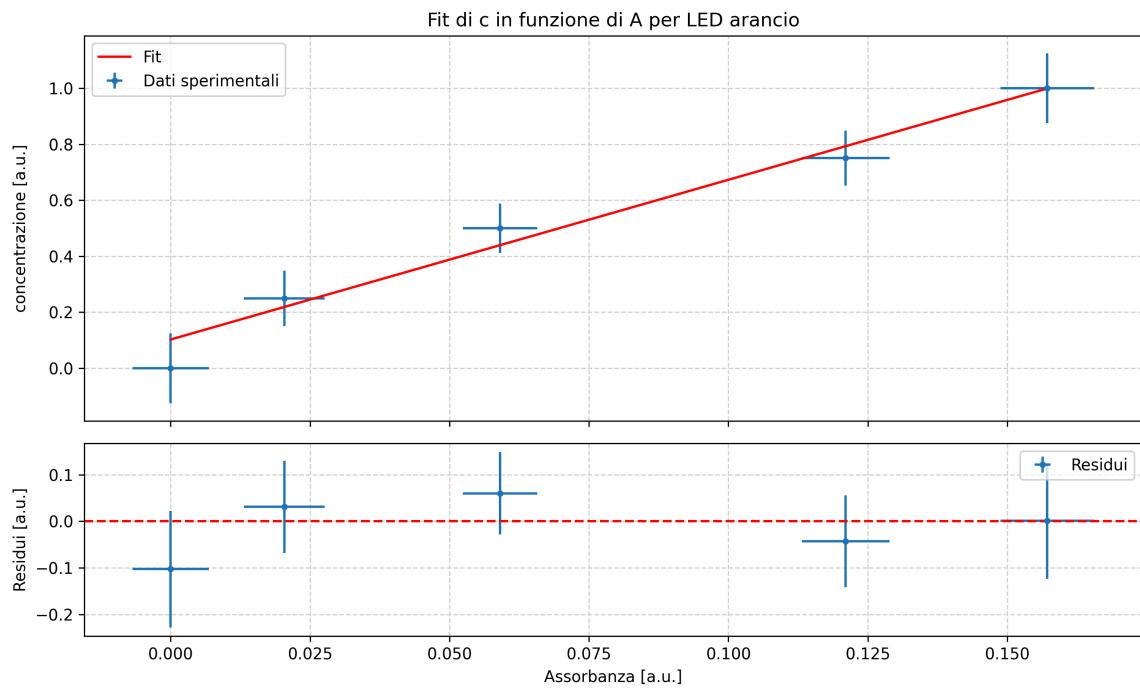
dove  $M$  è il coefficiente angolare e  $C$  è un offset costante aggiunto per completezza.

Di seguito riportiamo i risultati di ciascun fit:



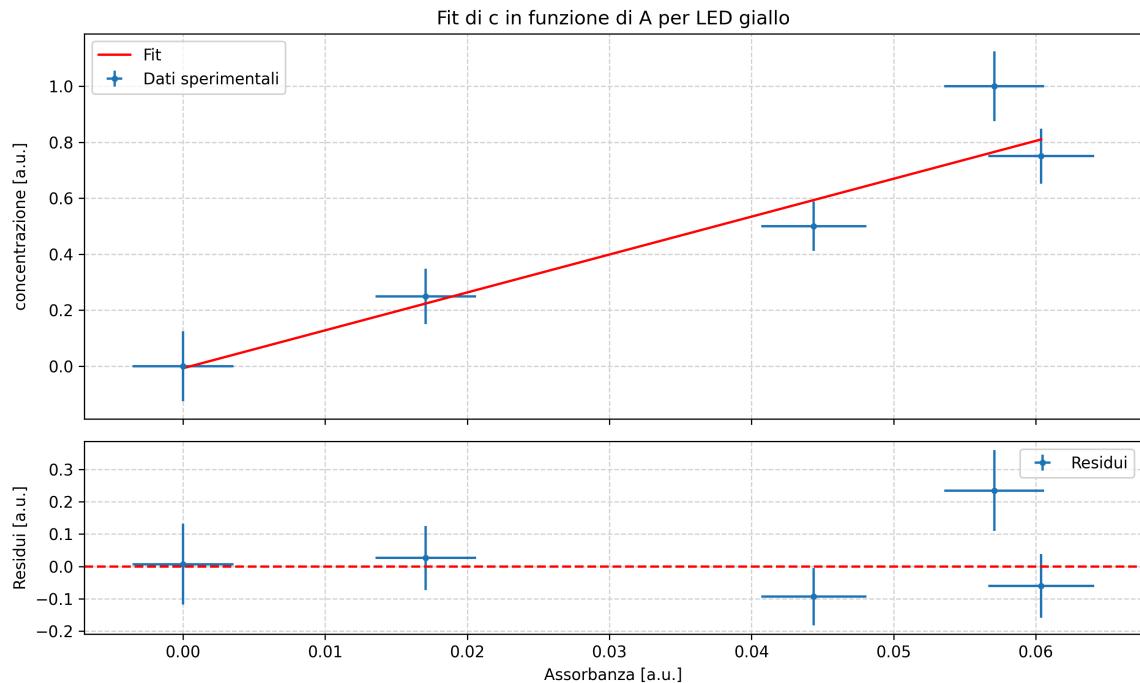
*Figura 7: fit concentrazione in funzione dell'assorbanza per LED rosso.*

Parametro	Valore
$\chi^2_{\text{rid}}$	$0.7 \pm 0.8$
M	$11 \pm 2$
Q	$-0.02 \pm 0.09$



*Figura 8: fit concentrazione in funzione dell'assorbanza per LED arancione.*

Parametro	Valore
$\chi^2_{\text{rid}}$	$0.5 \pm 0.8$
M	$5.7 \pm 0.9$
Q	$0.10 \pm 0.08$



*Figura 9: fit concentrazione in funzione dell'assorbanza per LED giallo.*

Parametro	Valore
$\chi^2_{\text{rid}}$	$1.7 \pm 0.8$
M	$13 \pm 2$

Parametro	Valore
-----------	--------

Q	$-0.007 \pm 0.09$
---	-------------------

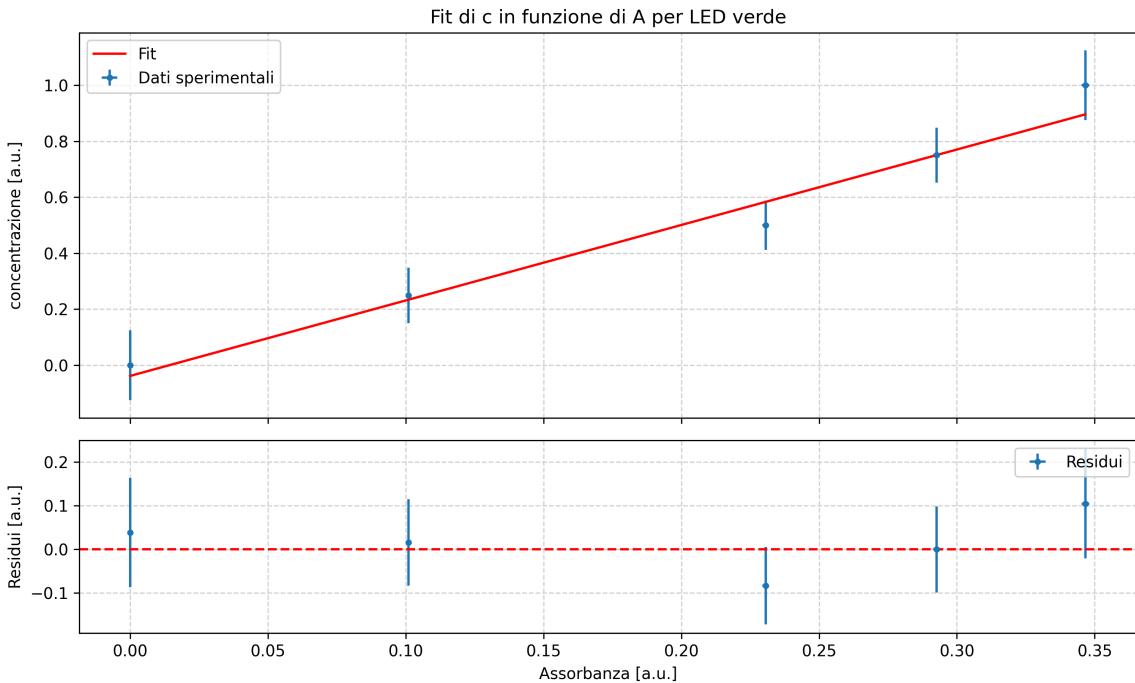


Figura 10: fit concentrazione in funzione dell'assorbanza per LED verde.

Parametro	Valore
-----------	--------

$\chi^2_{\text{rid}}$	$0.6 \pm 0.8$
-----------------------	---------------

M	$2.7 \pm 0.4$
---	---------------

Q	$-0.04 \pm 0.09$
---	------------------

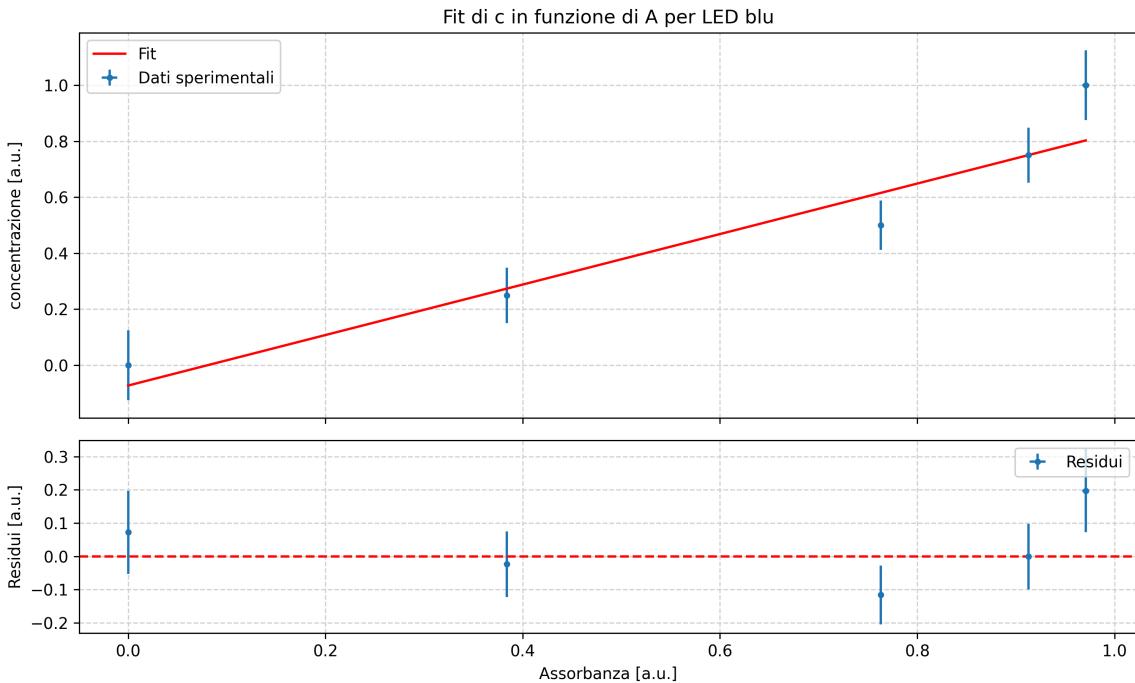


Figura 11: fit concentrazione in funzione dell'assorbanza per LED blu.

Parametro	Valore
$\chi^2_{\text{rid}}$	$1.5 \pm 0.8$
M	$0.9 \pm 0.1$
Q	$-0.0 \pm 0.1$

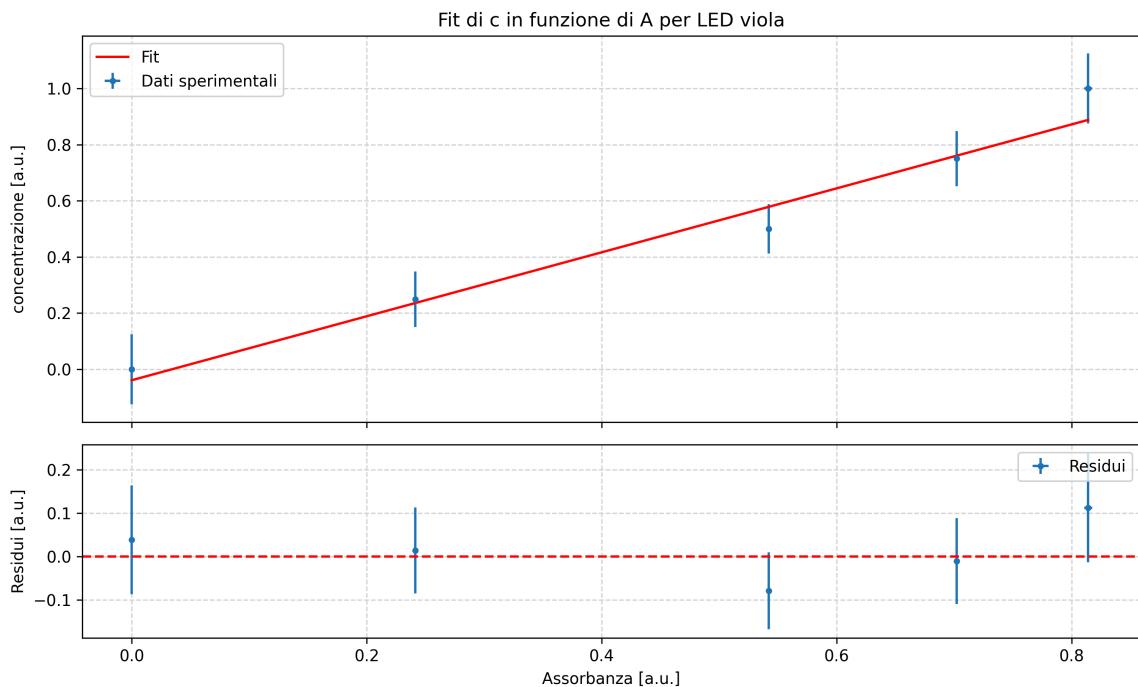


Figura 12: fit concentrazione in funzione dell'assorbimento per LED viola.

Parametro	Valore
$\chi^2_{\text{rid}}$	$0.6 \pm 0.8$
M	$1.1 \pm 0.1$
Q	$-0.04 \pm 0.09$

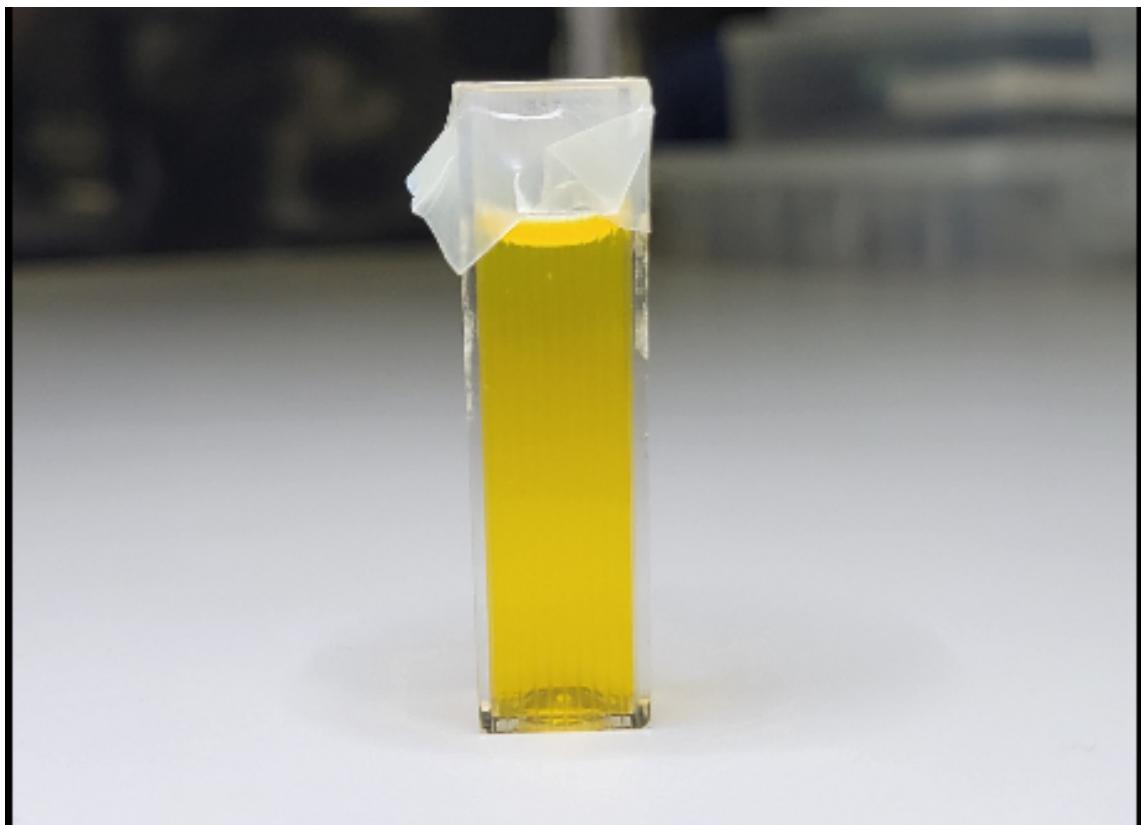
Si vede, dai grafici e dai risultati riportati, come tutti i chi quadri rientrino perfettamente entro una sigma ad 1 e come tutti gli offset siano compatibili con 0, allo stesso tempo non sono presenti residui correllati.

## Task 6

Obiettivo: Riportare osservazioni qualitative sulla forma dello spettro di assorbimento (assorbenda per lunghezza d'onda) atteso.

L'idea di base delle considerazioni a seguire è che il colore della sostanza in esame è dato da quello che rimane della luce bianca che lo attraversa a cui vengono sottratte le lunghezze d'onda che esso assorbe, quindi mi aspetto che il suo coefficiente di assorbimento sia massimo in corrispondenza della lunghezza d'onda del colore complementare a quello del messo in esame.

Di seguito riportiamo un'immagine di esempio del campione.



*Figura 13: Esempio di campione del liquido studiato, si noti il suo colore.*

e la si confronta con il diagramma di cromaticità riportato di seguito, che mostra la risposta in funzione della lunghezza d'onda della retina umana.

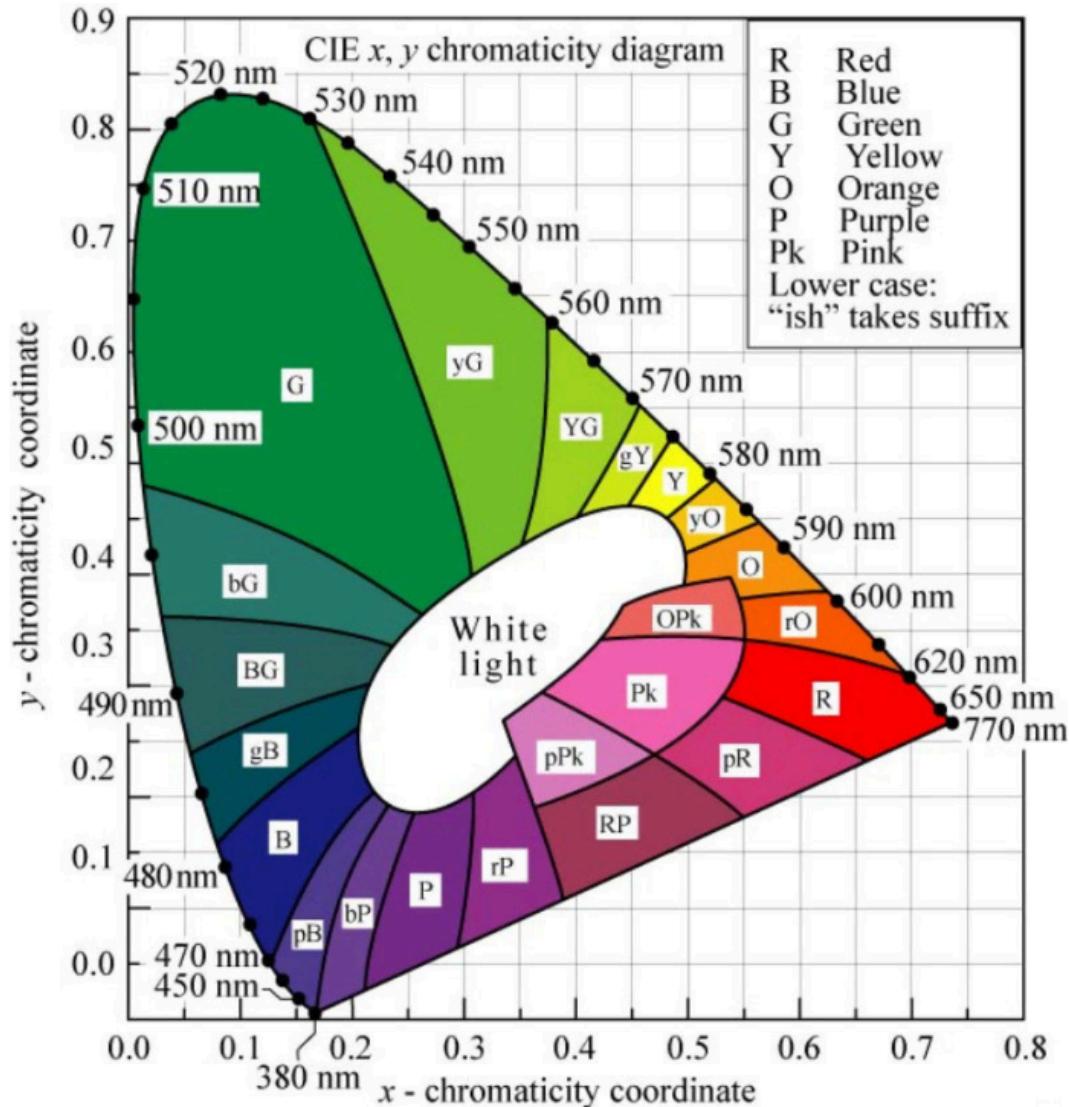


Figura 14: Diagramma di cromaticità: mostra la risposta della retina in funzione della lunghezza d'onda.

Come si evince da un semplice confronto qualitativo, il colore del liquido corrisponde alla lunghezza d'onda di circa 580-585 nm riportata nel diagramma di cromaticità, o meglio coincide ai blocchi indicati con Y e yO (rispettivamente Yellow e yellow Orange).

Di conseguenza, per quanto detto sopra, mi aspetto che il coefficiente di assorbimento del nostro liquido sia massimo in corrispondenza delle lunghezze d'onda del blu e del viola, mentre sarà minimo in corrispondenza di quelle del giallo e dell'arancione.

## Task 7

Obiettivo: Analizzare i dati raccolti raccolti per ogni LED (come fatto nle task 5) e riportare i risultati in un grafico conclusivo "coefficiente di assorbimento vs lunghezza d'onda"

I fit lineari ed i relativi risultati sono riportati nel task 5, di seguito si riportano i valori del coefficiente di assorbimento per lunghezza d'onda ottenuti dai fit ed il relativo plot in funzione di  $\lambda$ .

Colore	$\lambda$ [nm]	$\alpha$ [1/m]
Rosso	$625 \pm 7$	$7 \pm 1$
Arancione	$604 \pm 8$	$46 \pm 8$
Giallo	$588 \pm 7$	$6 \pm 1$
Verde	$532 \pm 13$	$31 \pm 5$
Blu	$469 \pm 7$	$(9 \pm 2) \cdot 10$
Viola	$483 \pm 5$	$(7 \pm 1) \cdot 10$

Notare il mismatch tra l'ordine dei colori e delle lunghezze d'onda per blu e viola: mi aspetto che la lunghezza d'onda del viola sia minore di quella del blu, in effetti lo è; il problema sta in come si è ricavato tale valore, con la procedura di media vista nella scorsa esercitazione: nello spettro del LED viola era presente un picco secondario che ha spostato la lunghezza d'onda media a valori maggiori, provocando il mismatch. Probabilmente, per sistemare questo problema, bisognerebbe prendere la lunghezza d'onda del picco più prominente dello spettro direttamente come lunghezza d'onda media, oppure ridurre l'intervallo di lunghezze d'onda su cui si media.

Prendendo quindi come lunghezza d'onda media la lunghezza corrispondente al picco più prominente, si ottiene:

Colore	$\lambda$ [nm]	$\alpha$ [1/m]
Rosso	$625 \pm 7$	$7 \pm 1$
Arancione	$604 \pm 8$	$46 \pm 8$
Giallo	$588 \pm 7$	$6 \pm 1$
Verde	$532 \pm 13$	$31 \pm 5$
Blu	$469 \pm 7$	$(9 \pm 2) \cdot 10$
Viola	$401 \pm 5$	$(7 \pm 1) \cdot 10$

Di seguito il grafico del coefficiente di assorbimento in funzione della lunghezza d'onda:

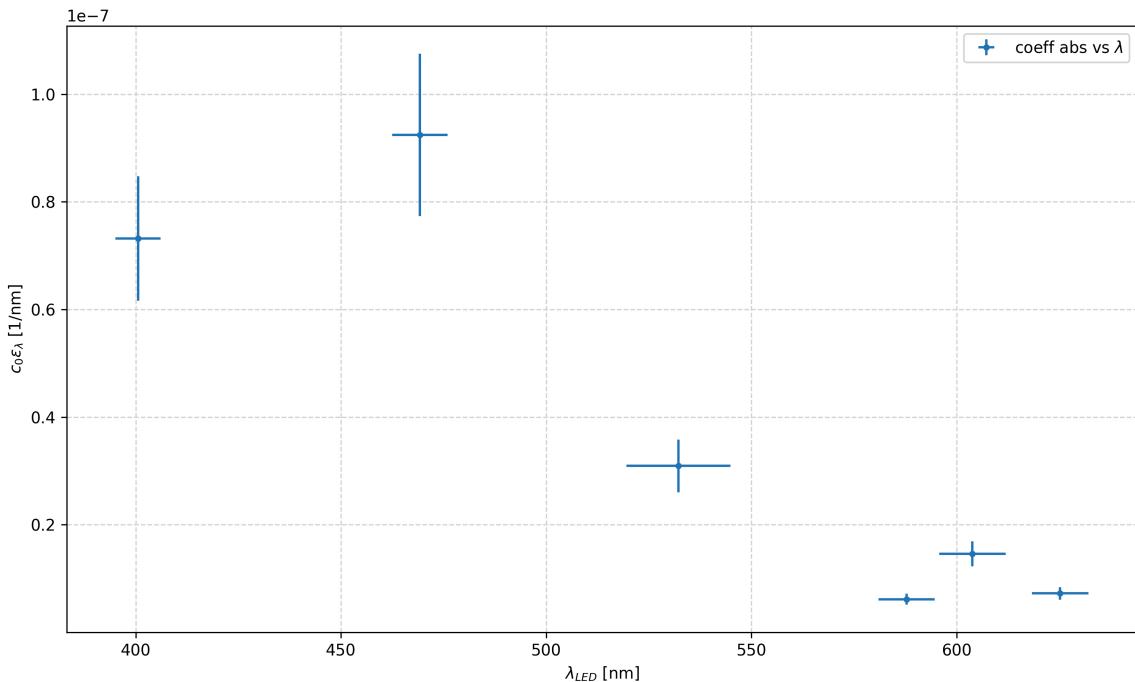


Figura 15: andamento del coefficiente di assorbimento del liquido in esame con la lunghezza d'onda.

Come atteso (vedi discussione al task 6) il coefficiente di assorbimento è maggiore alle lunghezze d'onda più corte (blu, viola), in quanto di per sè il liquido riflette nel giallo/verde/arancio, dove invece il coefficiente di assorbimento è minore (rosso compreso). Indice del fatto che i risultati ottenuti sono significativi.

NOTA: rifare il plot del coefficiente di assorbimento mettendo i punti con i relativi colori della luce corrispondente.

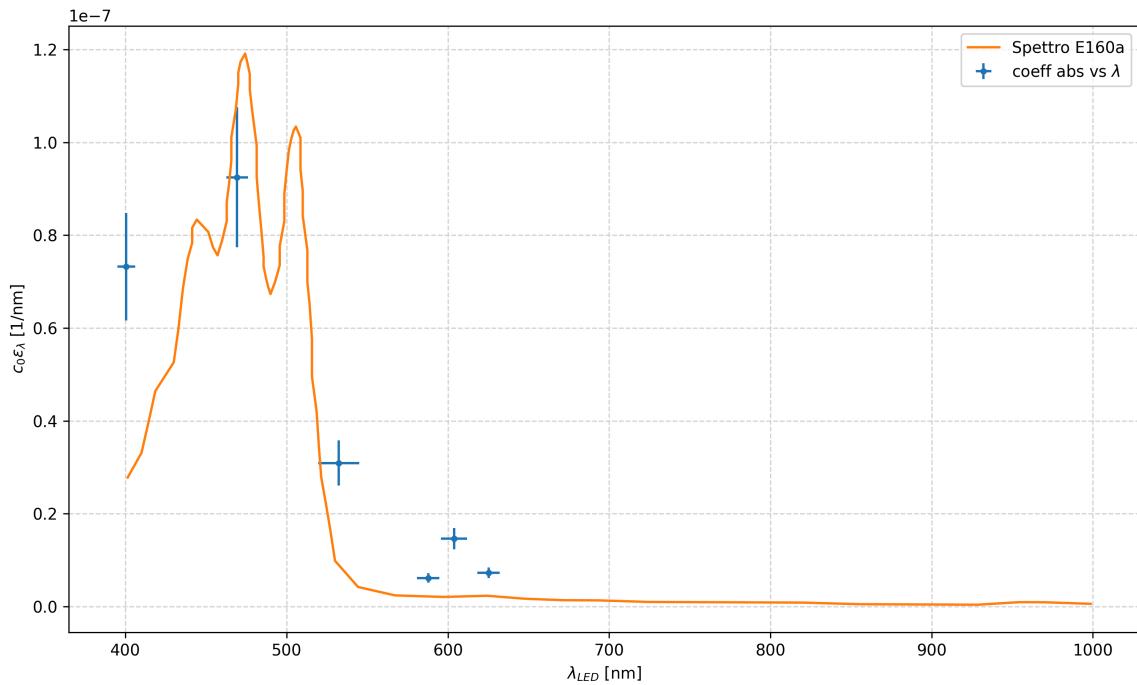
## Task 8

Obiettivo: Ricercare online informazioni sugli spettri di assorbimento degli ingredienti del liquido utilizzato e confrontare i dati ottenuti alle lunghezze d'onda dei LED impiegati con spettri replicati online.

Il liquido studioato nell'esperienza è l'"Orange Powerade", bevanda energetica, che contiene al suo interno il colorante E160a, comunemente noto come beta-carotene. Si è quindi effettuata una ricerca online per ricavare lo spettro di assorbimento di questo composto organico.

La fonte da cui si è ricavato tale spettro è riportata al seguente link:

Miljkovic, V. (2022). Rosa canina L. fruit and jam made of it – natural food colors E160a and E160d content and antioxidant capacity  
[https://www.researchgate.net/publication/368744208\\_Rosa\\_canina\\_L\\_fruit\\_and\\_jam\\_made\\_natural\\_food\\_colors\\_E160a\\_and\\_E160d\\_content\\_and\\_antioxidant\\_capacity](https://www.researchgate.net/publication/368744208_Rosa_canina_L_fruit_and_jam_made_natural_food_colors_E160a_and_E160d_content_and_antioxidant_capacity)



*Figura 16: Confronto tra spettro di assorbimento Orange Powerade riportato in letteratura e spettro del relativo coefficiente di assorbimento misurato.*

Gli spettri sono in accordo qualitativo tra loro, purtroppo non si è riusciti ad osservare i 3 picchi nello spettro di assorbimento della sostanza causa le poche lunghezze d'onda indagate, strano rimane il valore del coefficiente di assorbimento nell'arancione, maggiore al giallo ed al rosso. In definitiva, visto la scarsità di informazione in lunghezza d'onda ottenuta, l'unica cosa che si può affermare è che la sostanza in esame assorbe le lunghezze d'onda del blu e del viola, come dimostrato sperimentalmente in letteratura ed è trasparente alle lunghezze d'onda dal giallo in poi. Per quanto riguarda l'indagine dei picchi d'assorbimento e dello spettro di assorbimento più accurato è definitivamente necessario esplorare molti più valori della lunghezza d'onda.