

**D. MURRA, M. AQUILINI, S. BOLLANTI,  
P. DI LAZZARO, F. FLORA, G.P. GALLERANO,  
E. GIOVENALE, L. MEZI**

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare  
Laboratorio Applicazioni dei plasmi  
ed esperimenti interdisciplinari  
Centro Ricerche Frascati

## **PROGETTAZIONE, REALIZZAZIONE E TEST SPERIMENTALI DI UN ILLUMINATORE A LED UV-C**

RT/2023/3/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

D. MURRA, M. AQUILINI, S. BOLLANTI,  
P. DI LAZZARO, F. FLORA, G.P. GALLERANO,  
E. GIOVENALE, L. MEZI

Dipartimento Fusione e Tecnologie per la Sicurezza Nucleare  
Laboratorio Applicazioni dei plasmi  
ed esperimenti interdisciplinari  
Centro Ricerche Frascati

# PROGETTAZIONE, REALIZZAZIONE E TEST SPERIMENTALI DI UN ILLUMINATORE A LED UV-C

RT/2023/3/ENEA



AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE,  
L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

I rapporti tecnici sono scaricabili in formato pdf dal sito web ENEA alla pagina [www.enea.it](http://www.enea.it)

I contenuti tecnico-scientifici dei rapporti tecnici dell'ENEA rispecchiano l'opinione degli autori e non necessariamente quella dell'Agenzia

The technical and scientific contents of these reports express the opinion of the authors but not necessarily the opinion of ENEA.

## PROGETTAZIONE, REALIZZAZIONE E TEST SPERIMENTALI DI UN ILLUMINATORE A LED UV-C

D. Murra, M. Aquilini, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, F. Flora, G. P. Gallerano, E. Giovenale, L. Mezi

### Riassunto

Le lunghezze d'onda comprese tra 200 e 280 nanometri, intervallo spettrale denominato UV-C, sono particolarmente adatte a debellare batteri e virus in quanto tale radiazione spezza i legami proteici e può danneggiare in modo irreversibile le catene del DNA/RNA.

Sino a poco tempo fa, le sorgenti UV-C disponibili in commercio erano lampade a gas, basate tipicamente su deuterio, xenon, vapori di mercurio, o eccimeri. Queste lampade funzionano a tensioni piuttosto elevate, sono fragili e hanno tempi di accensione di diversi minuti prima di arrivare a regime ed emettere la potenza nominale.

La disponibilità di LED (Light Emitting Diodes, dispositivi a stato solido) che emettono radiazione nell'intervallo dell'UV-C consente oggi di realizzare una "lampada", basata su una matrice di tali sorgenti, che utilizza un alimentatore a bassa tensione, può essere disegnata in configurazioni geometriche adattabili ad ogni esigenza, si accende istantaneamente ed è meccanicamente molto robusta.

In questo Rapporto Tecnico sono illustrati il progetto, la realizzazione e la caratterizzazione di una lampada a LED UV-C e del relativo alimentatore. È inoltre brevemente descritto un esperimento, a scopo fitosanitario, in cui tale lampada è stata utilizzata.

**Parole chiave:** lampada, UV-C, LED, sanificazione, germicida, ormesi.

### Abstract

*Optical radiation with wavelengths between 200 and 280 nanometers, in the UV-C range, is particularly suitable for eradicating bacteria and viruses, as this radiation breaks protein bonds and can irreversibly damage DNA/RNA chains. Until recently, the commercial UV-C sources were gas lamps, typically based on deuterium, xenon, mercury vapor, or excimers. All of these lamps operate at quite high voltages, are fragile and require several minutes of warming up before working at full power.*

*The availability of solid-state LEDs (Light Emitting Diodes) that emit radiation in the UV-C range allows a "lamp" to be made by assembling an array of such light sources, which uses a low-voltage power supply, can be designed in geometric configurations adaptable to any need, turns on/off instantly and is robust.*

*This Technical Report illustrates the work done at ENEA Frascati on the design and assembly of a UV-C LED lamp and of its power supply, its characterization and application to a phytosanitary experiment.*

**Keywords:** UV-C, lamp, LED, , disinfection, sanitization, sterilization, germicidal, hormesis.



## INDICE

1. Introduzione .....	7
2. Scelta e caratterizzazione dei LED.....	8
3. Disegno della matrice di LED e realizzazione dell'illuminatore .....	11
4. Progettazione, realizzazione e test del circuito di alimentazione .....	13
5. Test dell'alimentatore e collaudo dell'illuminatore a LED UV-C .....	19
6. Uso dell'illuminatore a LED UV-C per il trattamento di piante da frutto.....	21
7. Conclusioni .....	23
Bibliografia .....	24



# Progettazione, realizzazione e test sperimentali di un illuminatore a LED UV-C

## 1. Introduzione

Nell'ambito delle attività dell'ex-Laboratorio *Sorgenti, Diagnostiche e interazione Laser materia* del Dipartimento FSN dell'ENEA di Frascati, uno dei filoni di ricerca del gruppo Eccimeri è stato negli ultimi anni quello di sviluppare, studiare, caratterizzare ed utilizzare sorgenti incoerenti di radiazione UV per applicazioni spaziali, medicali e fitosanitarie [1,2,3].

Lo spettro della radiazione ultravioletta è diviso in tre bande convenzionali: UV-A (tra 400 e 315 nm), UV-B (tra 315 e 280 nm) e UV-C (tra 280 e 100 nm). Tali fasce dividono i raggi UV in base ai loro effetti biologici, e la porzione relativa agli UV-C è quella più incisiva nell'interazione con gli organismi, in quanto provoca la rottura sia dei legami nelle proteine presenti nel rivestimento esterno (capside) dei virus che dei legami nel DNA e RNA dei virus e delle cellule costituenti la parete cellulare che riveste i batteri [4,5].

L'uso dei raggi UV-C, quindi, è utile nel caso di disinfezione di superfici, sanificazione di aria/acqua, ma ha anche un potenziale utilizzo in ambito agronomico poiché studi scientifici hanno dimostrato che basse dosi di UV-C stimolano, nelle piante officinali e da frutto, un'aumentata risposta immunitaria nei confronti dei patogeni [3]. In questo Rapporto Tecnico illustriamo il progetto e la realizzazione di un illuminatore a matrice di LED UV-C, la sua caratterizzazione e, infine, un'applicazione in ambito agronomico.

La realizzazione dell'illuminatore a LED UV-C è avvenuta in diverse fasi: la scelta del tipo di LED, la definizione della loro disposizione geometrica e il conseguente disegno delle piste elettriche sulla basetta, l'assemblaggio e la costruzione della scheda, la progettazione del circuito elettrico di alimentazione, l'assemblaggio dei componenti, il test della parte elettrica, la schematizzazione della logica di funzionamento, la

programmazione del microcontrollore e, infine, il collaudo del sistema. A valle del test finale, poi, sono state verificate le prestazioni dell'illuminatore in termini di potenza emessa, di distribuzione spaziale di luminosità e di comportamento in caso di accensione per tempi lunghi.

In fase di progettazione, la filosofia scelta è stata quella di realizzare tutto 'in casa', sfruttando competenze e materiali già in possesso, limitando al minimo l'acquisto di componentistica. A una ditta esterna è stato demandato il compito del montaggio dei LED su una basetta appositamente disegnata, operazione che richiede attrezzature e competenze non facilmente reperibili in ENEA.

## 2. Scelta e caratterizzazione dei LED

Molte ditte producono e distribuiscono LED con lunghezze d'onda nella banda UV-C. La scelta è caduta sulla ditta statunitense Luminus, che è stata ritenuta la più affidabile. I LED acquistati, della serie XBT-3535-UV, emettono un flusso radiante nominale di 35 mW alla lunghezza d'onda di 275 nm se alimentati con una corrente di 350 mA [6]. La tabella 1 riassume le specifiche elettriche ed ottiche dei LED usati.

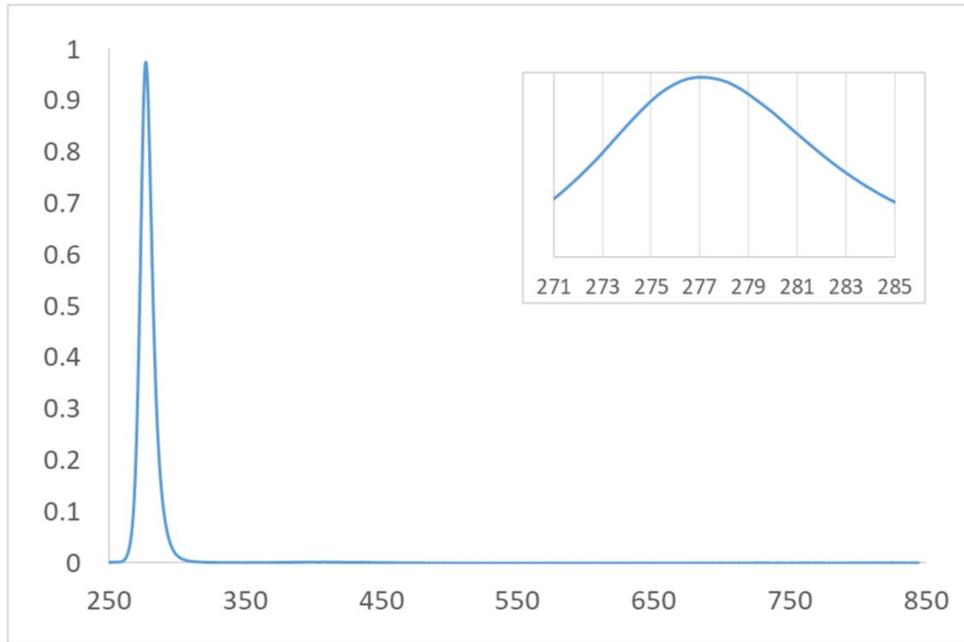
Parametro	Valore
Lunghezza d'onda	275 – 280 nm
Larghezza di banda	10 nm
Tensione diretta	5 -7.5 V
Corrente	100 – 800 mA
Angolo di emissione	130°
Flusso radiante @ 350 mA	35 mW
Dimensioni	3.5mm x 3.5mm x 1.2mm

**Tabella 1:** Specifiche ottiche ed elettriche da catalogo del singolo LED Luminus mod. XBT-3535-UV [6]

Prima di passare al disegno della matrice di LED abbiamo verificato le caratteristiche ottiche dei singoli elementi.

Inizialmente, abbiamo misurato lo spettro di emissione di un LED tramite lo spettrometro Hamamatsu TM-UV/VIS C10082CAH, uno strumento con un intervallo di sensibilità compreso tra 200 e 800 nm ed una risoluzione spettrale di 1.5 nm nella regione ultravioletta [7].

La figura 1 mostra che l'emissione del LED ha un picco a circa 277 nm e la larghezza a metà altezza è di 10 nm, caratteristiche rispondenti alle specifiche indicate nella tabella 1.

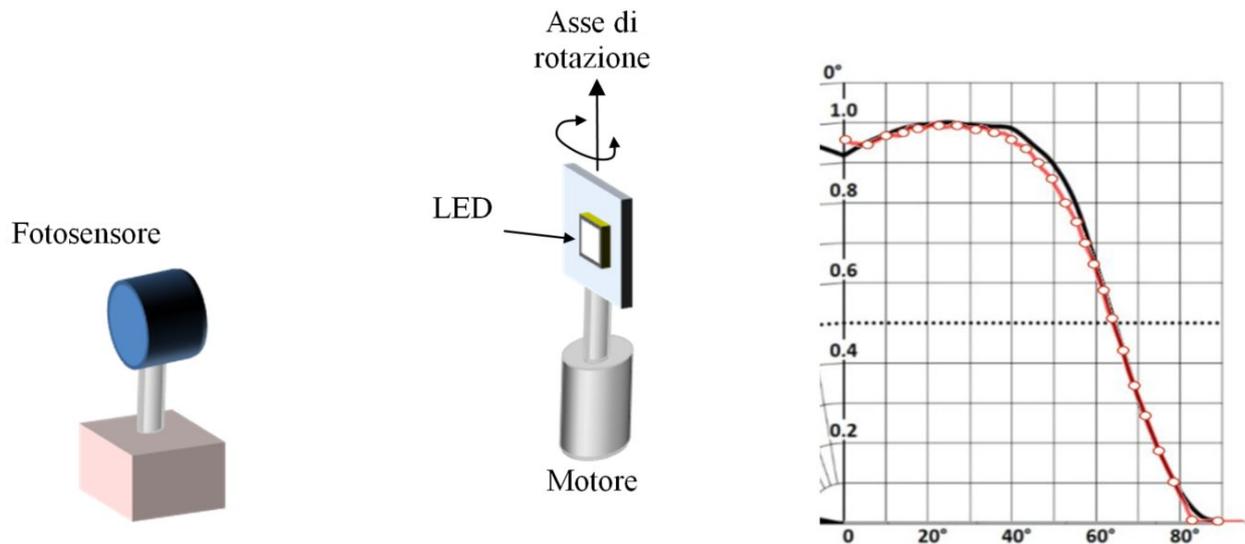


**Figura 1:** spettro di emissione di un LED Luminus mod. XBT-3535-UV, misurato con uno spettrometro ad alta risoluzione (vedi testo).

Per misurare il flusso radiante del singolo LED avremmo dovuto raccogliere tutta la luce emessa dal LED, utilizzando, ad esempio, una sfera integratrice. Non avendo a disposizione tale strumento, per avere una stima affidabile della potenza totale emessa dal LED abbiamo dapprima misurato la distribuzione angolare dell'intensità emessa, facendo ruotare il LED davanti a un fotosensore mantenuto fisso ad una certa distanza. Questo ci ha permesso di ottenere il valore dell'intensità emessa ai vari angoli relativamente a quella emessa in direzione perpendicolare alla superficie del LED.

Per eseguire tale misura, il LED è stato montato su un supporto girevole intorno ad un asse verticale mosso da un motorino passo-passo comandato da una scheda Arduino [8]e, a circa 100 mm di distanza dal LED è stato posizionato un sensore elettro-ottico, interfacciato con un convertitore analogico-digitale presente sulla stessa scheda.

La figura 2 mostra il set-up della misura e il risultato ottenuto, quest'ultimo sovrapposto al dato da catalogo dalla Luminus [6], che riproduce con ottima approssimazione i dati sperimentali.



**Figura 2:** a sinistra, set-up della misura della distribuzione angolare dell'emissione luminosa dei LED, a destra il risultato della misura. La curva nera è il dato fornito nelle specifiche tecniche, i cerchi sono i valori misurati interpolati dalla curva rossa. Figura tratta da [8].

Per completare la misura del flusso radiante, abbiamo posto un fotodiodo in un punto situato lungo la perpendicolare alla superficie del LED (ovvero lungo l'asse centrale di emissione) alla distanza di 7.5 mm, ed abbiamo misurato la potenza assoluta incidente sulla superficie del sensore del fotodiodo.

La misura dell'intensità nella direzione dell'asse centrale del LED è stata eseguita tramite il fotodiodo DET210 della Thorlabs [9] e il valore ottenuto è stato di  $167 \text{ W/m}^2$ . Combinando questa misura con quella relativa alla distribuzione angolare, tramite calcoli di integrazione numerica è possibile ricavare la potenza totale emessa dal LED su metà angolo solido ( $2\pi$ ). A tale scopo, abbiamo realizzato un programma di simulazione che, a partire dalla distribuzione angolare e dalla potenza emessa dal singolo LED, fornisce i valori di intensità su un piano posto alla distanza desiderata. Il programma prevede anche la possibilità di fornire in input una configurazione di più LED, ciascuno dei quali è individuato da 3 coordinate spaziali ( $x, y, z$ ), che ne fissano la posizione nello spazio, e due coordinate angolari ( $\theta, \varphi$ ), che ne definiscono l'orientamento rispetto al piano  $xy$ . Grazie a tale programma, abbiamo verificato che il dato di  $167 \text{ W/m}^2$  ottenuto dal fotodiodo alla distanza di 7.5 mm dal singolo LED, si ha per un LED la cui distribuzione angolare è quella di figura 2 e che emetta un flusso radiante pari a 36.2 mW, in accordo con il valore nominale.

### 3. Disegno della matrice di LED e realizzazione dell'illuminatore

Per gli scopi applicativi dell'illuminatore a LED (disinfezione di superfici, sanificazione di aria/acqua, esperimenti fitosanitari) è necessario raggiungere un'intensità luminosa di diverse decine di  $W/m^2$  ad una distanza di 50-100 millimetri. I LED hanno un angolo di emissione molto ampio, come si può desumere dalla figura 2. Ciò permette di ottenere una distribuzione spaziale uniforme, ma implica che l'energia si ripartisce su un angolo solido prossimo a  $2\pi$ . Di conseguenza, un singolo LED con le proprietà descritte nella tabella 1, a 50 mm di distanza emette un'intensità di picco di soli  $3.6 W/m^2$ . Pertanto, per ottenere l'intensità richiesta, è necessario che la lampada sia composta da molti LED.

Abbiamo scelto di assemblare 20 LED, ipotizzando un'emissione di picco totale di  $72 W/m^2$  a 50 mm di distanza, qualora tutti i LED siano posizionati il più vicino possibile tra di loro, così da simulare un'unica sorgente di radiazione. Tuttavia, due problemi impediscono di avvicinare i LED per formare una sorgente compatta: l'ingombro del LED, assai maggiore della dimensione dell'area emittente ( $12 mm^2$  rispetto a  $1 mm^2$ ), ed il calore sviluppato a causa dell'efficienza di emissione molto bassa (inferiore al 2%), per cui più del 98% della potenza elettrica di alimentazione è perduta per effetti termici. Ad esempio, 20 LED alimentati a 6.5 V e 350 mA richiedono circa 45 W elettrici, di cui almeno 44 W dissipati in calore. Per evitare il surriscaldamento dei LED, al quale si accompagnerebbe una diminuzione di potenza emessa, è necessario distanziare opportunamente i LED e dimensionare un sistema per il raffreddamento degli stessi.

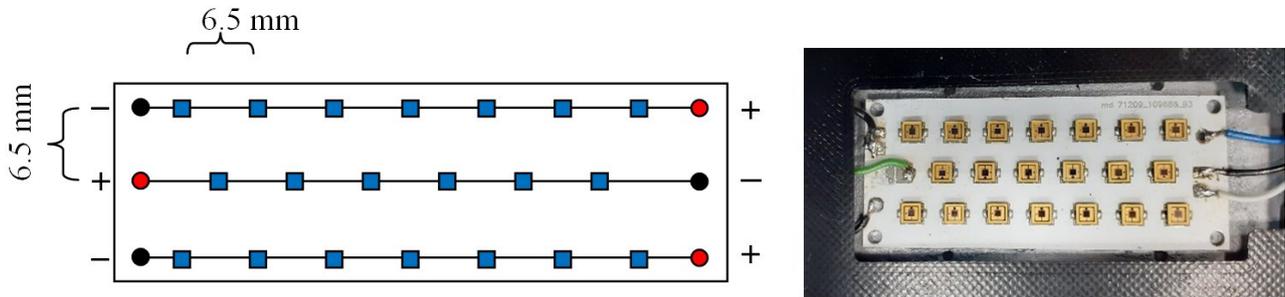
Abbiamo deciso, quindi, di disporre i LED su 3 linee distanti 6.5 mm tra loro, di cui due composte da 7 LED ed una, quella centrale, da 6 LED, con una spaziatura di 6.5 mm tra un LED e l'altro, come mostrato in figura 3. Elettricamente le tre linee sono disposte in parallelo tra loro, mentre su ogni linea i LED sono connessi in serie.

Le 3 linee sono alimentate singolarmente, con una tensione che deve superare la somma delle differenze di potenziali minime per accendere ogni LED, variabili tra 5 V e 7.5 V, e con una corrente di almeno 350 mA su ogni linea.

La progettazione e la realizzazione di un sistema che abbia le caratteristiche adatte ad alimentare la basetta con i 20 LED sono riportate nel paragrafo 4.

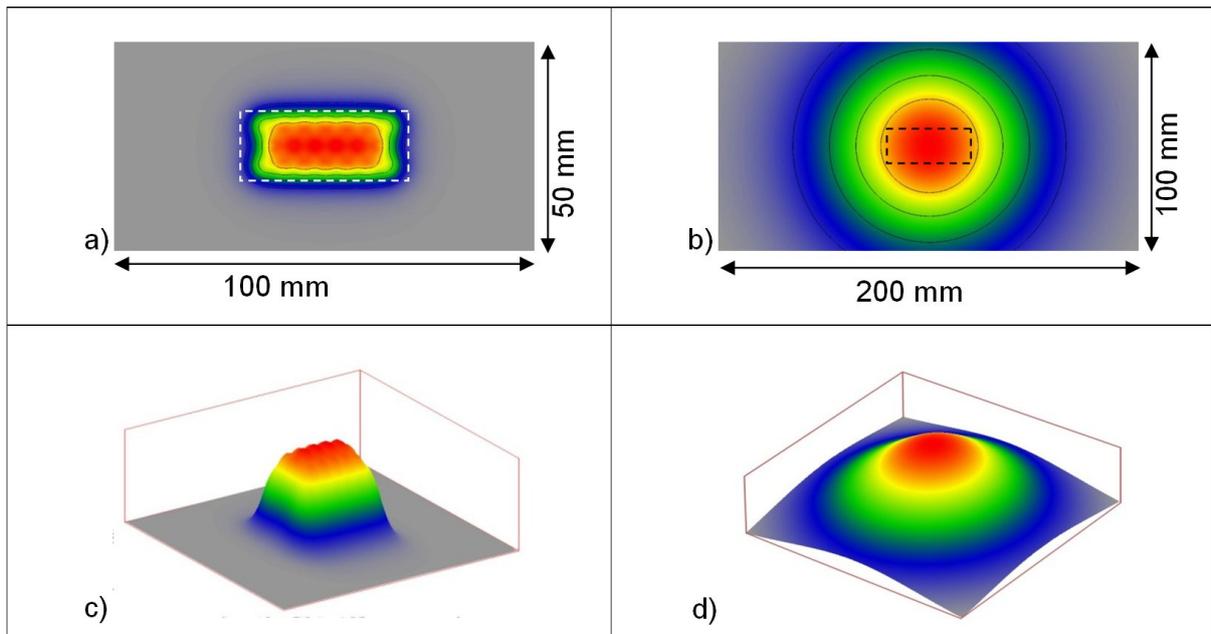
La figura 4 riporta le distribuzioni spaziali di intensità di tale matrice, stimate tramite il software di simulazione, alle distanze di 4 mm e 50 mm. Dato il grande angolo di emissione delle singole sorgenti LED (vedi figura 2), la radiazione luminosa diventa

spazialmente omogenea già a brevissima distanza dai LED e a 50 mm la simmetria della distribuzione d'intensità si è già trasformata da rettangolare a circolare.



**Figura 3:** a sinistra, la schematizzazione delle posizioni dei LED e delle connessioni elettriche, a destra la basetta realizzata, con i LED ed i collegamenti elettrici ai lati.

La basetta, realizzata dalla ditta Elettro Rail S.r.l. [10], è in alluminio per favorire la dissipazione termica dei LED e, al fine di aumentare la velocità di raffreddamento dei LED stessi, è stata posta in contatto con una piastra in alluminio di circa 3 mm di spessore, a sua volta in contatto con un dissipatore in alluminio dotato di ventola, della Cool Innovations [11]. Tra i vari elementi è stata inserita una pasta conduttiva per favorire la trasmissione termica.



**Figura 4:** distribuzione spaziale del flusso luminoso della scheda previsto dal software di simulazione a 4 mm (a, c) e a 50 mm (b, d) dal centro della lampada. L'equidistanza delle curve di livello delle figure a) e b) è il 20% del massimo, mentre i rettangoli tratteggiati rappresentano la dimensione della basetta con i LED.

#### 4. Progettazione, realizzazione e test del circuito di alimentazione

I LED sono giunzioni a semiconduttore N-P, le quali, se alimentate in modo diretto, fanno sì che, una volta superata la tensione di giunzione, scorra corrente e venga emessa luce. Al contrario dei LED che emettono luce visibile, i quali presentano una tensione di giunzione generalmente minore di 3 V, i LED ultravioletti necessitano di voltaggi maggiori. Per accendere una serie di 7 LED UV-C occorre una tensione non inferiore a  $6.5 \times 7 = 45.5$  V. Superata la tensione minima, la corrente che scorre nei LED aumenta all'aumentare della tensione stessa, pertanto la differenza di potenziale deve essere incrementata fino ad ottenere la corrente desiderata. Abbiamo scelto, quindi, un alimentatore in grado di fornire almeno 48 V +/- 5 V.

Affinché l'emissione luminosa emessa dai LED non subisca variazioni, la corrente deve essere regolata in modo preciso e costante. Nei LED, infatti, ad una piccola variazione di tensione corrisponde una forte variazione della corrente con conseguente drastico cambiamento nell'emissione luminosa. Poiché i LED sono soggetti a forti sbalzi di temperatura che alterano la tensione di giunzione, se la corrente non fosse mantenuta costante si avrebbero forti oscillazioni di emissione luminosa. A corrente costante, al contrario, la variazione della tensione di giunzione con la temperatura porta ad una modifica dell'emissione luminosa molto più contenuta.

Le opzioni per stabilizzare la luce emessa sono tre: scegliere un'alimentazione a corrente costante a priori; partire da un'alimentazione in tensione che viene regolata in corrente a posteriori; alimentare in tensione il LED, controllando il flusso luminoso ed agendo in retroazione sulla tensione.

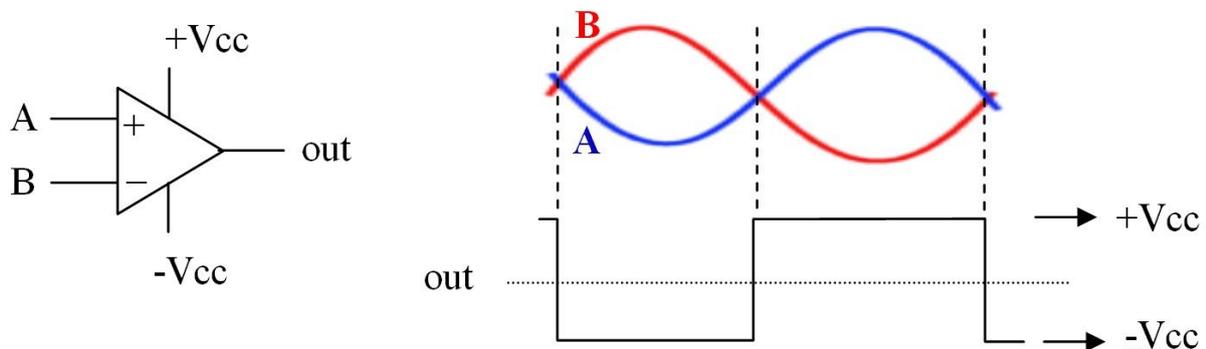
La prima soluzione è la più semplice in quanto è sufficiente usare un alimentatore dedicato per ogni singola linea di LED collegati in serie, ma ha lo svantaggio di dover utilizzare tanti alimentatori quante sono le linee di LED. Per 3 linee, come nel caso della matrice in figura 3, lo svantaggio è relativo, ma nell'ottica di sviluppare lampade con un elevato numero di linee di LED si è deciso di scartare questa soluzione. La scelta migliore sarebbe quella di controllare il flusso luminoso e poi agire sulla tensione per mantenere costante l'intensità di luce, ma questo metodo comporterebbe una complicazione sia a livello elettrico che di sistema, dovendo prevedere un sensore ottico, una conversione analogico-digitale ed un potenziometro digitale per poter variare in tempo reale la tensione applicata. Si è dunque

optato per l'utilizzo di un singolo alimentatore in tensione e la suddivisione della linea di alimentazione in più rami a corrente costante.

Per regolare in modo fine la corrente e far sì che rimanga costante, abbiamo utilizzato un amplificatore operazionale in combinazione con un transistor ad alto guadagno.

L'amplificatore operazionale è un circuito integrato dotato di cinque pin di collegamento: due sono relativi alla sua alimentazione, due sono gli ingressi, chiamati rispettivamente 'invertente' e 'non invertente', ed un piedino è l'uscita [12].

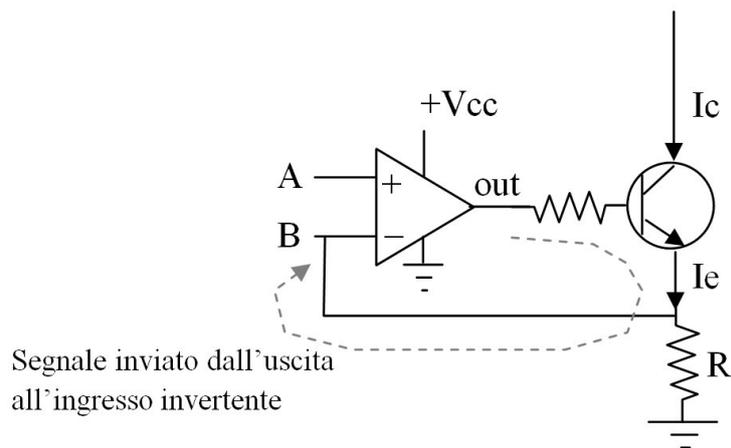
La caratteristica di un amplificatore operazionale ideale è quella di presentare in uscita un valore di tensione che dipende dal rapporto delle tensioni applicate ai suoi due ingressi. Ad esempio, supponendo di alimentare tale circuito con una tensione di +5V sul positivo e -5V sul negativo, quando sull'ingresso non invertente la tensione è più alta di quella presente sull'ingresso invertente, all'uscita avremo +5V (pari all'alimentazione sul positivo). Quando la tensione sul piedino invertente è maggiore di quella sul piedino non invertente, la tensione di uscita sarà di -5V (pari all'alimentazione sul negativo). La figura 5 mostra schematicamente il funzionamento di un amplificatore operazionale.



**Figura 5:** a sinistra il simbolo dell'amplificatore operazionale e, a destra, il comportamento ideale della tensione in uscita in funzione delle tensioni all'ingresso A, non invertente, e B, invertente.

La tipica funzione di un amplificatore operazionale è di equilibrare la sua uscita, in quanto, collegando l'uscita all'ingresso invertente, si crea un effetto di retroazione negativa che tende a mantenere una tensione stabile in output. Per l'applicazione al nostro caso ed ottenere un regolatore di corrente, occorre inserire nel circuito anche un transistor nel quale far scorrere la corrente desiderata.

La figura 6 illustra il funzionamento di questo sistema.



**Figura 6:** schema del funzionamento del circuito regolatore di corrente. Sul ramo dell'emettitore del transistor la corrente crea una caduta di potenziale su R, che viene inviata all'ingresso invertente dell'operazionale. L'uscita di quest'ultimo, che pilota la base del transistor, fa sì che ad un aumento della corrente corrisponda una diminuzione del guadagno del transistor e viceversa.

La tensione di uscita dell'operazionale viene inviata alla base di un transistor NPN, il quale consente il passaggio della corrente tra collettore ed emettitore a seconda del valore di tale tensione. La corrente di emettitore  $I_e$  passa attraverso una resistenza R (di valore preciso e molto basso) e tra i suoi capi cade una tensione pari a  $R \times I_e$  che viene riportata all'ingresso invertente B dell'operazionale. Ora, se tale tensione fosse superiore a quella, fissa, collegata all'ingresso non invertente A, l'uscita dell'operazionale si porterebbe a zero (in questo esempio il polo negativo dell'operazionale è connesso a massa). Una tensione nulla, applicata alla base del transistor, porterebbe quest'ultimo in interdizione, con la conseguenza che  $I_e$  diventa zero. A questo punto si annulla anche la tensione sulla resistenza R e all'ingresso B. Di conseguenza, all'uscita dell'operazionale si avrebbe +Vcc che fa di nuovo scorrere corrente nel transistor e aumentare la tensione sull'ingresso invertente. Tale sistema si equilibra quando la tensione al punto B diventa pari a quella presente al punto A, costringendo il transistor a far scorrere una corrente costante. Agendo sulla tensione A si può variare in modo fine la corrente  $I_e$  e, conseguentemente,  $I_c$  che è la corrente che interessa controllare (ma  $I_c$  ed  $I_e$  sono quasi uguali e differiscono di un piccolo valore fisso).

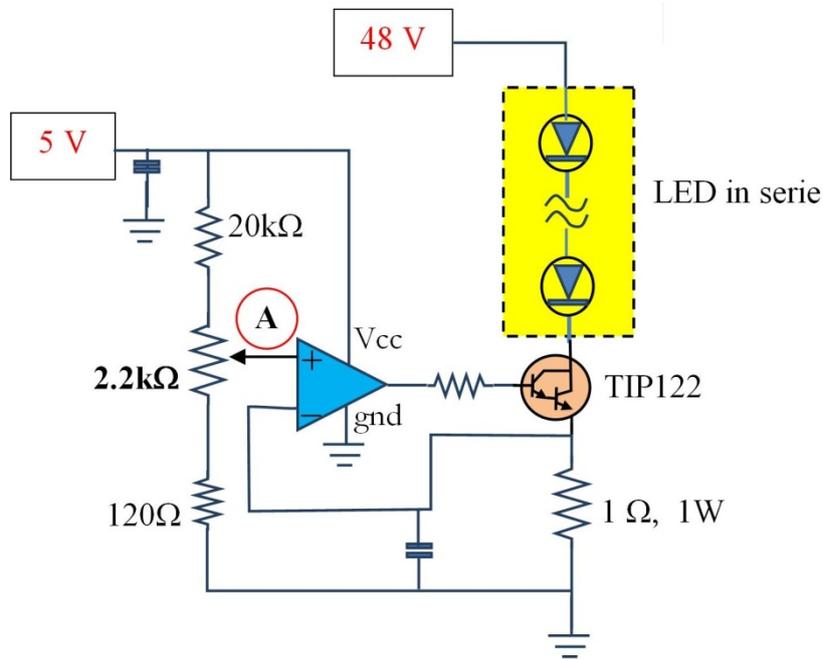
Nel circuito in esame, si è scelto di usare l'integrato LM324, dotato di 4 amplificatori operazionali di tipo *rail-to-rail* ovvero che possono essere alimentati con la sola tensione positiva (l'altro pin di alimentazione va collegato a massa), garantendo un'uscita minima pari a zero.

Come transistor è stato selezionato il TIP122, un transistor in configurazione Darlington che consente un guadagno di corrente molto elevato. La schematizzazione completa del circuito progettato, nella parte che riguarda il controllo di corrente e relativo ad una sola serie di LED, è riportata nella figura 7, in cui la resistenza variabile da 2.2 k $\Omega$  determina la tensione di riferimento al punto A e consente di regolare la corrente che scorre nel ramo dei LED, posti tra i +48V e il collettore del transistor. Per 3 linee di LED il circuito è semplicemente una replica di quello di figura 7, tenendo presente che la tensione di riferimento è sempre la stessa e che i 3 amplificatori operazionali sono contenuti nel solo chip LM324. Una volta ultimato il circuito, ne abbiamo verificato il corretto funzionamento, ma per far scorrere i 350 mA desiderati sulla serie da 7 LED è stato indispensabile alzare la tensione dell'alimentatore a quasi 52 V (nel prosieguo del Rapporto continueremo ad usare il termine '48 V' per l'alimentazione dei LED, sebbene la tensione fosse effettivamente più alta).

Prima di considerare completato l'alimentatore si deve tener conto che la lampada ad UV-C deve rimanere accesa per un periodo predeterminato e deve avere controlli di sicurezza che ne impediscano l'accensione involontaria. La radiazione UV-C, infatti, è nociva per gli organismi biologici, uomo compreso. È stato necessario, dunque, predisporre un circuito logico che provvedesse al controllo dell'accensione dei LED, garantendone la sicurezza nell'uso, e al monitoraggio della temperatura della basetta, possibilmente con un'interfaccia utente limitata a poche funzioni essenziali. Ciò è stato realizzato attraverso l'uso del microcontrollore ATMEGA328P. Questo microcontrollore è il cuore delle schede Arduino più semplici (la NANO e la UNO) ed ha il vantaggio di essere programmabile tramite l'ambiente software messo a disposizione dai creatori di Arduino [8].

Nel nostro circuito, la principale funzione di questo chip è quella di accendere/spegnere i LED, ma come si può notare dalla figura 7, tale accensione/spegnimento avviene collegando o scollegando la linea dei 48 V dai LED. Tale operazione potrebbe essere svolta da un relè elettromeccanico o a stato solido, ma un tale componente è fonte di forti interferenze elettriche ed elettromagnetiche che possono creare disturbi al microcontrollore. Abbiamo scelto, quindi, di usare un altro circuito integrato, il MIC2982, che è un chip che funge da multi-interruttore. La sua funzione è quella di portare la tensione, applicata ad un suo piedino d'ingresso, ad una serie di pin di uscita a seconda che ci sia un livello logico alto o basso sui pin di input (uno per ogni pin di uscita). La massima tensione sopportata dal chip è dichiarata pari a 50 V, di poco inferiore ai 52

necessari per far scorrere i 350 mA sulle linee di LED. Ad ogni modo, sottoposto a diverse prove di stress, questo integrato ha funzionato senza problemi anche a 52 V.



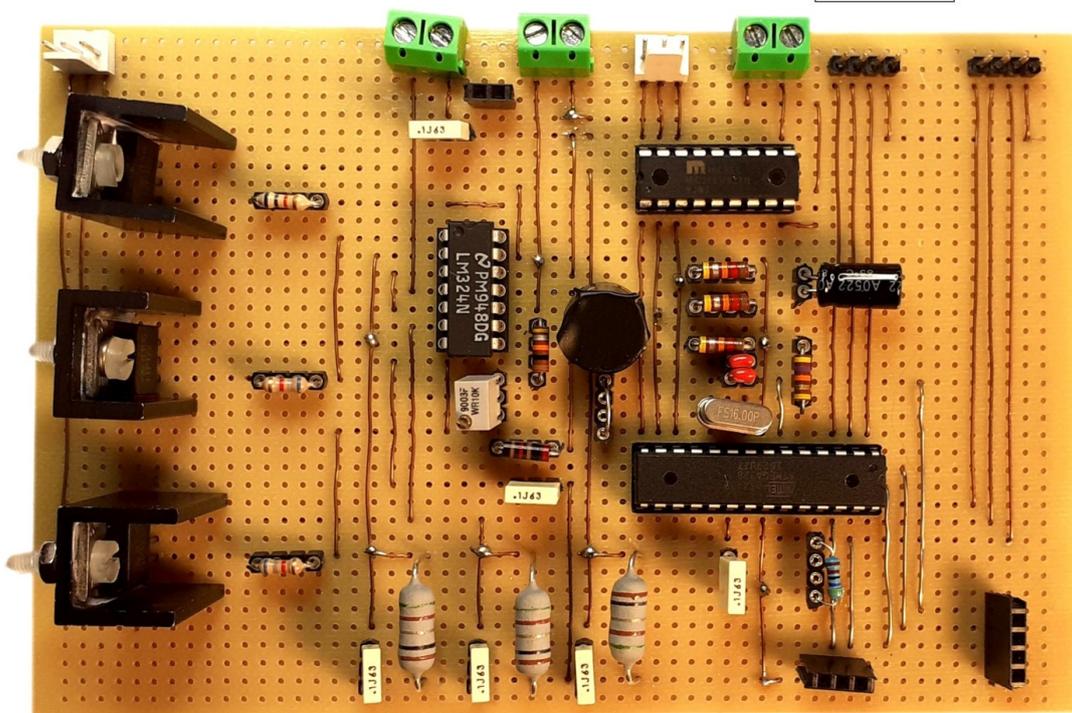
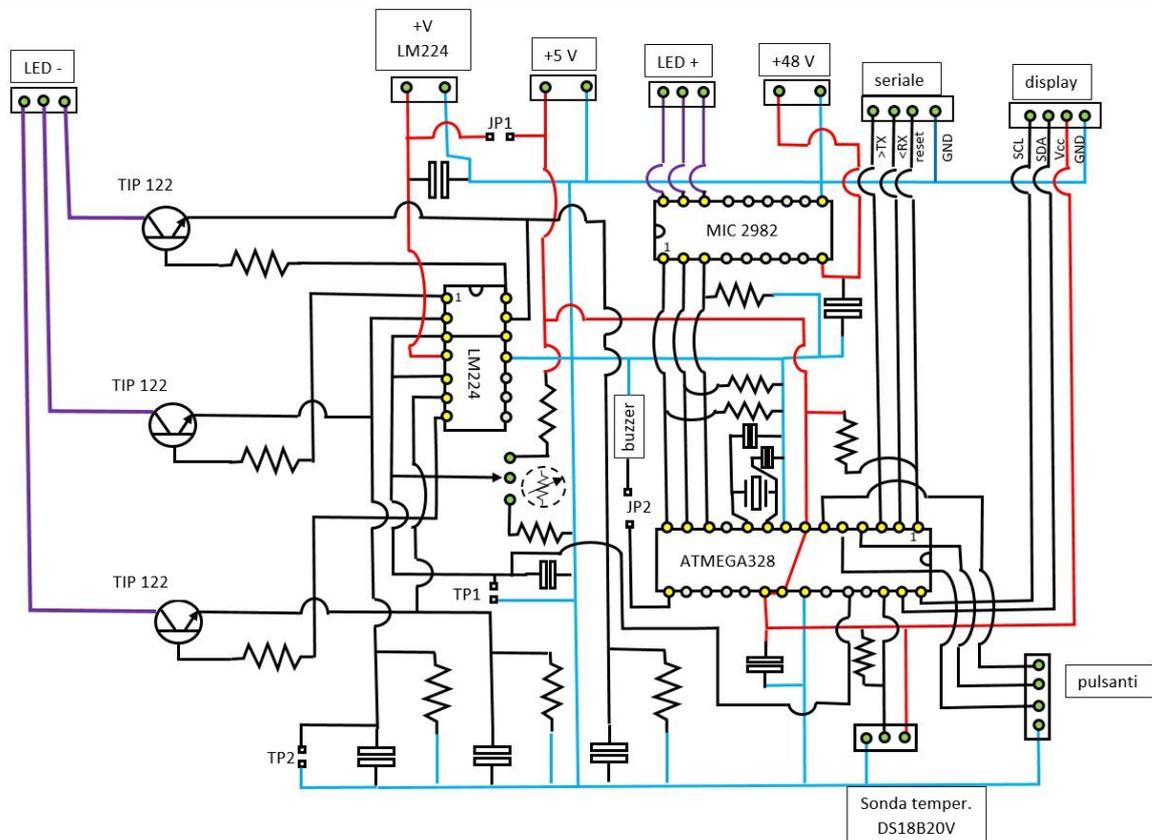
**Figura 7:** schema completo del circuito di alimentazione a corrente costante di una fila di LED.

Il circuito di fig. 7, replicato per le 3 file di LED, è stato completato, quindi, con l'inserimento del microcontrollore, del circuito logico, dell'integrato che funge da interruttore elettronico e dei sistemi di interfaccia utente (pulsanti e display) come illustrato nella figura 8, ove è riportata anche la fotografia della scheda con le piste elettriche e i componenti inseriti.

Il circuito di figura 8 è stato inserito, insieme all'alimentatore da 48 V e ad uno da 5 V per la logica, in un contenitore di metallo il cui frontalino è stato realizzato tramite stampa 3D. La figura 9 mostra la fotografia del pannello anteriore del sistema di controllo e alimentazione, che chiameremo per semplicità alimentatore.

Sulla parete posteriore dell'alimentatore è stato collocato un connettore da cui parte il cavo di alimentazione dei LED. Lo stesso cavo fornisce una tensione di 5 V che alimenta la ventola del dissipatore termico, necessaria per il raffreddamento della basetta, e connette il microprocessore ad un sensore digitale di temperatura, modello DS18B20, con il quale si controllano le condizioni termiche della basetta stessa. Come già accennato, infatti, i LED UV-C sono emettitori a bassa efficienza (circa 2%), per cui la quasi totalità della potenza elettrica viene convertita in calore che deve essere smaltito per mantenere costante l'emissione luminosa.

Completato l'assemblaggio dell'alimentatore, abbiamo eseguito le prove per verificare il corretto funzionamento del sistema completo, come descritto nel paragrafo seguente.



**Figura 8:** in alto, schema elettrico del circuito completo, con i punti di connessione verso i LED e l'interfaccia utente. In basso, fotografia del circuito realizzato su scheda millefori.



**Figura 9:** frontalino dell'alimentatore. Le luci rossa e verde indicano, rispettivamente, la presenza dei 48 V per i LED e dei 5 V per gli integrati; i pulsanti servono per la gestione dell'accensione (durata, intervallo di stand by prima dell'accensione, start/stop), il potenziometro a destra è utilizzato per la regolazione della corrente, a LED spenti, mentre, sopra di esso, vi è un connettore attraverso il quale è possibile controllare la corrente che scorre in una delle file di LED quando sono accesi.

## 5. Test dell'alimentatore e collaudo dell'illuminatore a LED UV-C

La bassetta con i LED, completa di dissipatore, è stata alloggiata in un telaio in plastica costruito appositamente e collocata su un banco ottico per le misure di potenza e distribuzione spaziale d'intensità.

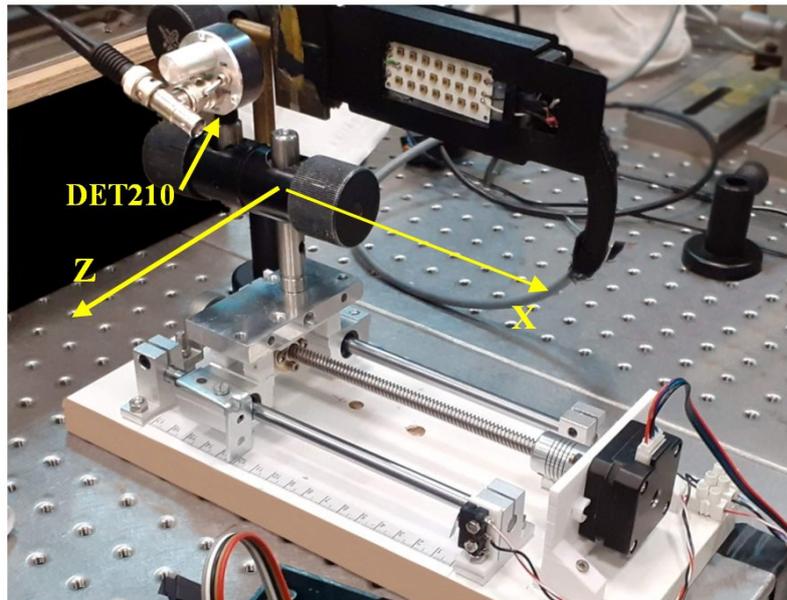
Tali misure sono state eseguite tramite il fotodiode DET210 montato su una slitta micrometrica con motore passo-passo comandato da un'elettronica che provvede contemporaneamente ad acquisire, elaborare e memorizzare il dato di tensione proveniente dal fotodiode.

Il fotodiode è stato posto lungo la normale alla bassetta (asse z), a 3 diverse distanze da essa, 34 mm, 55 mm e 70 mm, con possibilità di movimento trasverso nella direzione dell'asse longitudinale di circa 100 mm (asse x, vedi figura 10).

La corrente dell'alimentatore è stata regolata a 150 mA, in modo da evitare un inutile stress termico. Con questa corrente, da catalogo la potenza del singolo LED è pari a circa 15 mW. Questo dato è stato inserito nel software di simulazione descritto nel paragrafo 2, tramite il quale è possibile valutare, in qualsiasi punto dello spazio, l'intensità risultante da

una configurazione di LED impostabile a piacere. Il risultato della simulazione per i valori di intensità lungo l'asse della matrice di LED mostra un ottimo accordo con i dati sperimentali, riportati nella tabella 2.

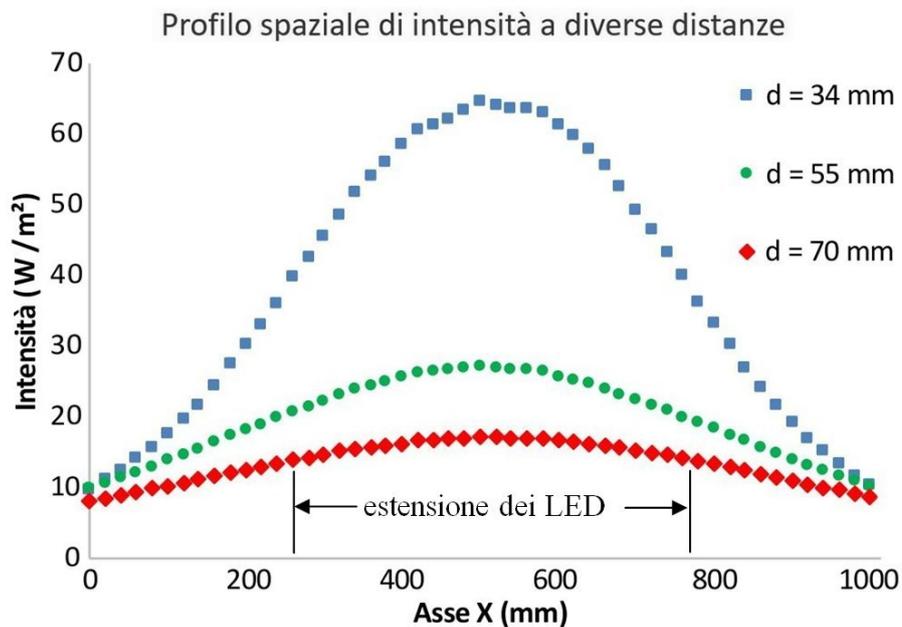
Nella figura 11 sono riportati i profili spaziali ottenuti con la misura del set-up di figura 10.



**Figura 10:** Set-up della misura del profilo trasverso d'intensità a diverse distanze dalla sorgente. Si nota la basetta di LED ed il supporto che regge il fotodiodo, montato su una slitta a movimento orizzontale parallelo alla basetta.

<b>Distanza (mm)</b>	<b>Intensità misurata (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Intensità teorica (W/m<sup>2</sup>)</b>
34	64	64
55	27	25
70	17	16

**Tabella 2:** valori dell'intensità luminosa misurata lungo l'asse della basetta di LED a diverse distanze, e confronto con i dati ottenuti dal software di simulazione.



**Figura 11:** profili spaziali trasversi ottenuti con il set-up di figura 10 a diverse distanze dalla bassetta di LED. In figura è indicata la distanza tra il primo e l'ultimo LED sul lato lungo della bassetta.

## 6. Uso dell'illuminatore a LED UV-C per il trattamento di piante da frutto

L'uso della radiazione UV-C per il trattamento fitosanitario è basato prevalentemente su lampade a vapori di mercurio, molto potenti ed efficienti, ma meno compatte delle lampade a LED. Gli effetti benefici della radiazione UV-C su piante e frutti si differenziano a seconda della dose: a dosi elevate si ha un effetto germicida, con una drastica riduzione della densità e attività dei patogeni, mentre a basse dosi si crea uno stress positivo (effetto ormesi) che induce reazioni biochimiche atte a stimolare le difese naturali delle piante, che diventano più resistenti agli attacchi degli agenti patogeni.

La dose di radiazione UV-C necessaria a debellare funghi e batteri non è stata definita in modo inconfutabile dai tanti esperimenti condotti in questo campo, poiché le variabili in gioco sono molte e il comportamento degli organismi biologici non è deterministico [13].

Anche nel caso della risposta 'immunitaria' o, usando il termine più corretto, 'ormetica' delle piante, l'intervallo di valori di dose che si riscontra in letteratura è piuttosto ampio e va da poche decine a migliaia di  $J/m^2$ . Disponendo di una sorgente in grado di rilasciare una dose di  $100 W/m^2$  a pochi centimetri di distanza, i tempi di irraggiamento per raggiungere tali dosi vanno dalle decine di secondi fino a diversi minuti.

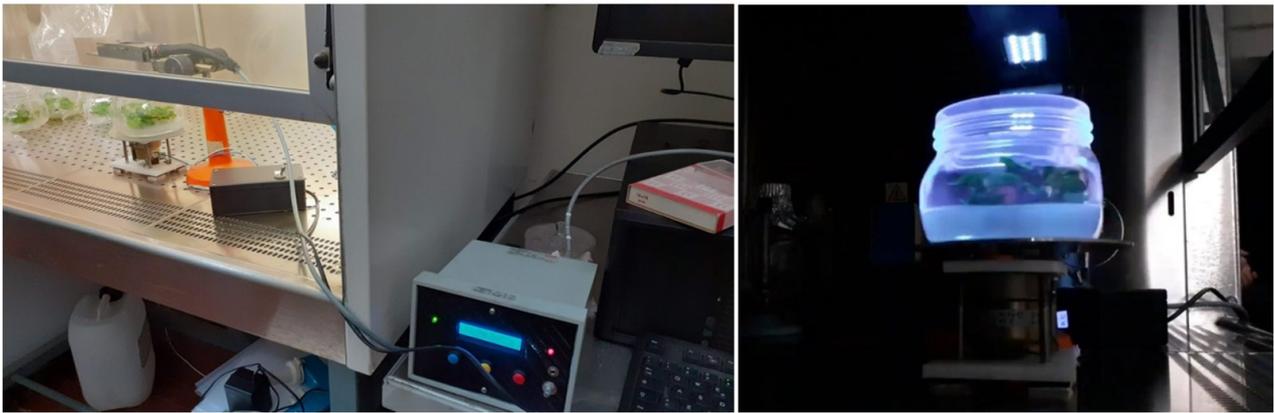
Nell'ambito di una collaborazione con il Consiglio per la Ricerca in agricoltura e l'analisi dell'Economia Agraria (CREA), abbiamo messo a disposizione la lampada descritta in questo Rapporto Tecnico per l'irraggiamento di piantine di kiwi cresciute *in vitro*.

La lampada a LED UV-C è stata collocata in una cappa biologica, con la basetta dei LED rivolta verso il basso, ad un'altezza di circa 250 mm dal piano ventilato della cappa. Sotto la lampada è stata posta una base, che poteva ruotare intorno al suo asse verticale a circa 0.5 Hz, sulla quale sono stati collocati in successione vari barattoli contenenti diverse specie di piantine di kiwi cresciute in ambiente sterile su un gel di Agar. La rotazione delle piantine è funzionale a migliorare l'uniformità della dose media rilasciata alle foglie di kiwi. Misurata la distanza media tra LED e foglie della piantina da irraggiare, tenendo conto dell'intensità fornita dalla lampada a quella distanza, si è calcolato il tempo di esposizione necessario a raggiungere la dose voluta. Nel caso di durate superiori ai 20 s, l'esposizione è stata frazionata in più fasi opportunamente intervallate tra loro, per consentire all'illuminatore di operare nelle condizioni ottimali di temperatura.

Stabiliti quindi la durata dell'esposizione e l'eventuale numero di accensioni consecutive, il barattolo veniva posizionato sulla base rotante, quest'ultima messa in moto, la cappa richiusa e avviata la sequenza di accensioni.

La figura 12 mostra a sinistra il set-up poco prima dell'irraggiamento, in cui sono visibili alcuni barattoli con le piantine, uno dei quali si trova sulla base rotante, sotto la lampada; fuori dalla cappa è riconoscibile l'alimentatore (precedentemente mostrato in figura 9). A destra, nella stessa figura, è stato ripreso un momento in cui i LED erano accesi: in alto si vedono le 3 file di LED, che presentano una fluorescenza nel visibile emessa dai vetrini di protezione posti sopra ogni singolo LED, ed in basso il barattolo di vetro, che emette una luce di fluorescenza nel violetto. La radiazione UV-C, chiaramente, non è visibile in modo diretto, neppure in fotografia.

I risultati dell'irraggiamento non sono ancora disponibili in quanto l'influenza della radiazione sulla fisiologia delle piante va misurata con metodi statistici su tempi molto lunghi. Tuttavia, questi irraggiamenti fitosanitari hanno dimostrato che l'illuminatore a LED UV-C è in grado di funzionare continuativamente, purché si adotti un duty cycle opportuno, senza che la potenza emessa risenta in modo significativo dell'inevitabile aumento di temperatura dei LED.



**Figura 12:** fotografie eseguite prima (a sinistra) e durante (a destra) l'irraggiamento di piantine di kiwi. A sinistra, la cappa biologica che ospita alcuni barattoli contenenti piantine di kiwi: uno di questi è posto sopra il supporto rotante e sotto l'illuminatore UV-C, mentre fuori dalla cappa è visibile l'alimentatore di figura 9. A destra, un fotogramma ripreso durante l'irraggiamento: si notano in alto le 3 file di LED accesi (grazie alla debole fluorescenza nel visibile dei vetrini di protezione dei LED) e il barattolo, fluorescente di luce bluastra a causa dell'illuminazione UV.

## 7. Conclusioni

Abbiamo illustrato la progettazione, la realizzazione e il test di un dispositivo per irraggiamento con luce UV-C. L'illuminatore, costituito da una basetta con 20 LED ed un alimentatore a corrente costante, è stato interamente disegnato dagli autori e, a parte il circuito con i LED e il dissipatore, è stato realizzato utilizzando laboratori e competenze interne all'ENEA.

Il dispositivo finale emette una potenza nominale di circa 700 mW alla lunghezza d'onda di  $277 \pm 5$  nm. Il circuito di alimentazione è progettato per consentire di variare la potenza da 0 fino a 800 mW, in modo da rendere il dispositivo adattabile alle esigenze di utilizzo.

Sia eseguendo misure sperimentali che tramite un software di simulazione appositamente sviluppato, abbiamo verificato la rispondenza delle caratteristiche dei LED alle specifiche fornite dal costruttore. Il software permette di ricavare, in ogni punto dello spazio, il valore dell'intensità di luce emessa da una combinazione di sorgenti luminose puntiformi, in funzione delle loro potenze e del profilo radiativo angolare.

Infine, l'intero dispositivo è stato utilizzato per alcune applicazioni germicide e ormetiche: in particolare, abbiamo descritto il setup realizzato e la procedura seguita per un esperimento di irraggiamento di piante di kiwi per determinare l'effetto della radiazione UV-C in termini di stimolazione della risposta immunitaria delle piante nei confronti di agenti patogeni.

## Bibliografia

---

- [1] B. Alpat et al., “Testing of substrates for flexible optical solar reflectors: irradiations of nano-hybrid coatings of polyimide films with 20 keV electrons and with 200–400 nm ultraviolet radiation”, *Journal of Instrumentation*, vol. 14 T06003 (2019), <https://doi.org/10.1088/1748-0221/14/06/T06003>
- [2] P. Di Lazzaro, D. Murra, S. Bollanti, F. Flora, L. Mezi, T. Kaplanoğlu, B. Alpat “Test di substrati per telescopi spaziali: irraggiamenti nell’ultravioletto di film poliammide in aria, vuoto e atmosfera controllata”, *Rapporto Tecnico ENEA*, RT/2017/9/ENEA, 2017 <https://iris.enea.it/retrieve/handle/10840/8534/526/RT-2017-09-ENEA.pdf>
- [3] L. Bacchetta, G. Bernabei, S. Bollanti, P. Di Lazzaro, A. Lai, G. Metelli, M. Montecchi, D. Murra, “Risposta ormetica in diverse specie vegetali di interesse agronomico, stimolata da radiazione ultravioletta”, *Rapporto Tecnico ENEA*, RT/2021/11/ENEA, 2021 <https://iris.enea.it/retrieve/handle/20.500.12079/59421/14621/RT-2021-11-ENEA.pdf>
- [4] W. Kowalsky: “Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009, ISBN 978-3-642-01998-2, e-ISBN 978-3-642-01999-9, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-85425-w>
- [5] A. Rotella, G. Campurra, C. Ravalli, “Manuale Medicina del Lavoro 2016”, Wolters Kluwer Italia, 2016, pagg. 680 e segg.
- [6] [https://download.luminus.com/datasheets/Luminus\\_XBT-3535-UV\\_Datasheet.pdf](https://download.luminus.com/datasheets/Luminus_XBT-3535-UV_Datasheet.pdf)
- [7] <https://www.hamamatsu.com/eu/en/product/optical-sensors/spectrometers/mini-spectrometer/C10082CAH.html>
- [8] D. Murra, “Schede Arduino e sensori di luce”, *Rapporto Tecnico ENEA*, RT/2021/7/ENEA, 2021, <https://hdl.handle.net/20.500.12079/57661>
- [9] The photodiode DET210 has been discontinued and replaced by DET 10A2, see <https://www.thorlabs.com/thorproduct.cfm?partnumber=DET10A2#ad-image-0>
- [10] <https://www.elettrorail.com/>
- [11] <https://coolinnovations.com/products/low-profile-fan-sinks/integrated/>
- [12] R. C. Dorf, J. A. Svoboda, “Circuiti elettrici”, ed. Apogeo, 2001, cap. 6
- [13] M. Turtoi, “Ultraviolet light treatment of fresh fruits and vegetables surfaces: a review” *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies* vol. 19, 325–337, 2013. [https://www.journal-of-agroalimentary.ro/admin/articole/22340L53\\_Vol\\_19\\_3\\_2013\\_325-337.pdf](https://www.journal-of-agroalimentary.ro/admin/articole/22340L53_Vol_19_3_2013_325-337.pdf)

ENEA  
Servizio Promozione e Comunicazione  
[www.enea.it](http://www.enea.it)

Stampa: Laboratorio Tecnografico ENEA - C.R. Frascati  
febbraio 2023