



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA**

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria Industriale

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ENERGETICA

Tesi di Laurea

HORTICULTURAL LIGHTING: accrescimento delle piante con luce LED

HORTICULTURAL LIGHTING: growth of plants with LED light

RELATORE:

Prof. Fabrizio Dughiero

CORRELATORE:

Ing. Paolo Munari

CANDIDATO:

Marco Bridio

n° matr. 1063668

Anno Accademico 2014 / 2015

*Ai miei genitori che mi hanno permesso di raggiungere questo importante traguardo e
a tutta la mia famiglia specialmente ai miei nonni.*

*Ad Anna che mi è sempre stata vicino e mi ha supportato durante questi anni di
Università portando non poca pazienza.*

Ai miei amici che sono come un bicchiere d'acqua fresca in una calda giornata d'Estate.

*All'ing. Alberto Rigoni, per avermi trasmesso la passione e senza il quale forse non mi
sarei mai laureato.*

A Paolo e Luca Munari che mi hanno permesso di scrivere questa tesi.

*Ai miei compagni di avventura, i MagnaWatti: nella vita come nello sport, "Il talento ti
fa vincere una partita. L'intelligenza e il lavoro di squadra ti fanno vincere un
campionato. (Michael Jordan)".*

A Paolo, Cristina e Giacomo grazie ai quali ho imparato un lavoro.

*Infine agli Articolo 31, a J-Ax e a Dj Jad, che mi hanno fatto compagnia durante la
scrittura di questa tesi e da colonna sonora in tutti i momenti più importanti della mia
vita.*

Marco Bridio

SOMMARIO

CAPITOLO 1

HORTICULTURAL LIGHTING: LA COLTIVAZIONE CON LUCE ARTIFICIALE	9
1.1 - LA LUCE	10
1.1.1 - LUCE ARTIFICIALE CON LAMPADE TRADIZIONALI	14
1.1.2 - LA TECNOLOGIA LED.....	14
1.1.2.1 - L'impiego dei LED nell'illuminazione	17
1.1.2.2 - Caratteristiche tecniche e fisiche dei LED.....	19
1.1.2.3 - Sistemi LED per la crescita di piante.....	21
1.1.2.4 - Efficienza dei LED	23
1.1.2.5 - Durata dei LED.....	23
1.1.3 - I VANTAGGI DELLE LAMPADE A LED RISPETTO A LAMPADE A SODIO AD ALTA PRESSIONE (HIGH PRESSURE SODIUM LAMPS).....	24
1.1.4 - DISPOSIZIONE DELLE LAMPADE A LED NELLE SERRE	26
1.2 - STANDARD DI COLTIVAZIONE DI ALCUNE PIANTE	28
1.3 - LA COLTIVAZIONE AEROPONICA	35
1.4 - IL SISTEMA DEI CERTIFICATI BIANCHI.....	38
1.4.1 - METODI DI VALUTAZIONE DEI RISPARMI.....	39
1.4.2 - IL SETTORE DELL'AGRICOLTURA.....	42
1.4.3 - CERTIFICATI BIANCHI E ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE CON TECNOLOGIA LED	43

CAPITOLO 2

STUDIO DELL'HORTICULTURAL LIGHTING IN ALCUNE COLTURE	45
2.1 - LATTUGA	45
2.1.1 - RISULTATI	49
2.2 - BASILICO.....	51
2.2.1 - RISULTATI	52

CAPITOLO 3

DIMENSIONAMENTO DI LAMPADE LED PER L'HORTICULTURAL LIGHTING 57

3.1 - POMODORO E PEPERONCINO	58
3.1.1 - RISULTATI	63
3.1.1.1 - Peperoncino.....	63
3.1.1.2 - Pomodoro.....	64
3.1.2 - OSSERVAZIONI.....	65
3.2 - STUDIO ILLUMINOTECNICO COLTIVAZIONE PEPERONCINO	66
3.2.1 - CASO 1.....	66
3.2.2 - CASO 2.....	68
3.2.3 - OSSERVAZIONI.....	69

CAPITOLO 4

CASO PRATICO DI HORTICULTURAL LIGHTING CON LAMPADE LED 71

4.1 - BIOPLANET	71
4.1.1 - LA CELLA DI PROVA: SITUAZIONE ANTE-OPERA.....	71
4.1.1.1 - Misura del flusso fotonico ante-opera	77
4.1.2 - PRIMA PROVA	79
4.1.3 - SECONDA PROVA.....	84
4.1.3.1 - Misura del flusso fotonico post-opera.....	88
4.2 - CERTIFICATI BIANCHI E ANALISI DELL' INVESTIMENTO.....	89
4.2.1 - CALCOLO CERTIFICATI BIANCHI	89
4.2.1.1 - Situazione ante-opera	89
4.2.1.1 - Situazione post-opera	90
4.2.1 - ANALISI DELL'INVESTIMENTO	92
4.2.1.1 - Pay Back Time	93
4.2.1.2 - Valore Attuale Netto e Indice di Profittabilità.....	94
4.2.1.3 - Tasso Interno di Rendimento.....	95

4.2.1.4 - Return On Investment	97
4.2.1.5 - Costo dell'Energia Conservata	97
CONCLUSIONI.....	99
BIBLIOGRAFIA	101
WEBGRAFIA	103

CAPITOLO 1

HORTICULTURAL LIGHTING: LA COLTIVAZIONE CON LUCE ARTIFICIALE

Dalla zappa, all'aratro trainato da animali per finire al trattore: l'esigenza dell'uomo di migliorare continuamente il suo operato riducendo il più possibile le spese, ha portato a metodi sempre più innovativi per coltivare la terra. La CEA (controlled environment agriculture ovvero agricoltura in ambiente controllato) comprende ogni tecnologia agricola che permette di controllare l'ambiente di coltivazione per mantenerlo nelle condizioni desiderate.

La necessità di migliorare i profitti, la crescente urbanizzazione e quindi la riduzione dei terreni adibiti ad agricoltura e l'aumento dei costi di trasporto e servizi hanno spinto la ricerca verso questo tipo di agricoltura fortemente affiancata dalla tecnologia. Quest'ultima infatti permette al coltivatore di ottenere grossi benefici come:

- La possibilità di coltivare colture non domestiche in un ambiente chiuso;
- Il controllo degli elementi di crescita delle piante (temperatura, umidità, pH...ecc.);
- L'uso efficiente delle aree di coltivazione;
- L'aumento della qualità del prodotto.

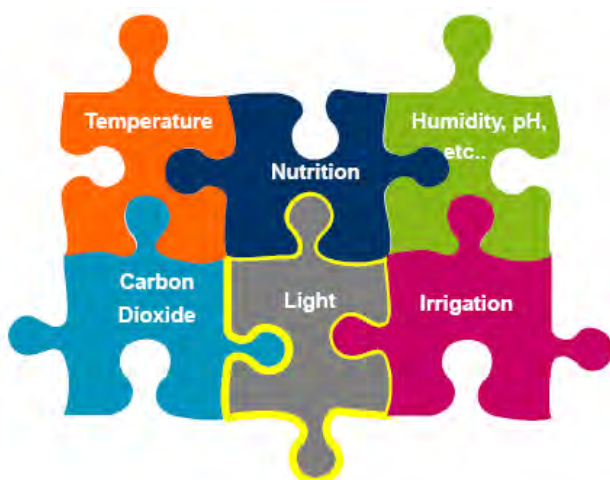


Figura 1: I fattori che influenzano la crescita delle piante

Come si può vedere dalla Figura 1, tra i fattori che influenzano la crescita delle piante si ha la luce. Per controllare tale fattore, è sempre più comune l'utilizzo di lampade che controllano l'illuminazione dell'ambiente coltivato. La coltivazione con luce artificiale, o horticultural lighting, porta ai

seguenti vantaggi:

- Durante i giorni nuvolosi, con poco sole, o nei giorni con poche ore di sole (specialmente nei paesi più vicini ai poli terrestri) consente il necessario apporto di radiazione solare alla pianta;
- Possibilità di disposizione delle piante in serre multipiano;
- Le lampade possono essere posizionate anche sotto la pianta o tra le piante stesse;
- A parità di superficie, con l'illuminazione artificiale, possono starci più piante all'interno di una serra.

L'illuminazione artificiale inoltre può essere utilizzata in tre modi diversi:

- ILLUMINAZIONE SUPPLEMENTARE: si integra la luce solare naturale con quella artificiale al fine di migliorare la fotosintesi, quindi di migliorare la crescita e la qualità delle piante coltivate in serra;
- ILLUMINAZIONE FOTOPERIODICA: si estende la lunghezza naturale del giorno per aumentare il periodo di esposizione delle piante alla luce;
- ILLUMINAZIONE IN ASSENZA DI LUCE NATURALE: si sostituisce totalmente la luce naturale con la luce artificiale.

1.1 - LA LUCE

La luce visibile (400-700 nm) è un fattore ambientale determinante per l'accrescimento e lo sviluppo delle piante. La luce (proveniente dal sole o da una lampada) sotto l'aspetto fisico può essere interpretata mediante la teoria elettromagnetica ondulatoria (la radiazione elettromagnetica come propagazione nello spazio delle oscillazioni di un campo elettromagnetico e dell'energia che a queste è associata) oppure mediante la teoria corpuscolare (la radiazione elettromagnetica come sequenza di pacchetti di energia chiamati fotoni). Nel primo caso, il livello di energia della luce è funzione della sua lunghezza d'onda: più corta è la lunghezza d'onda e più alto è il livello di energia.

Nella tabella 1 si riporta la classificazione della luce sulla base delle diverse lunghezze d'onda. Le piante utilizzano la luce con lunghezze d'onda comprese tra 400 e 700 nm come fonte di energia per realizzare il processo della fotosintesi.

Luce naturale del giorno	λ (nm)
Ultravioletto	290 - 380
Violetto	380 - 440
Blu	440 - 495
Verde	495 - 570
Giallo	570 - 595
Arancio	595 - 625
Rosso	625 - 700
Infrarosso vicino (NIR) 700 - 3000	700 - 3000
Infrarosso lontano (FAR) 3000 - 100.000	3000 - 100.000

Tabella 1: Classificazione della radiazione solare e della luce visibile

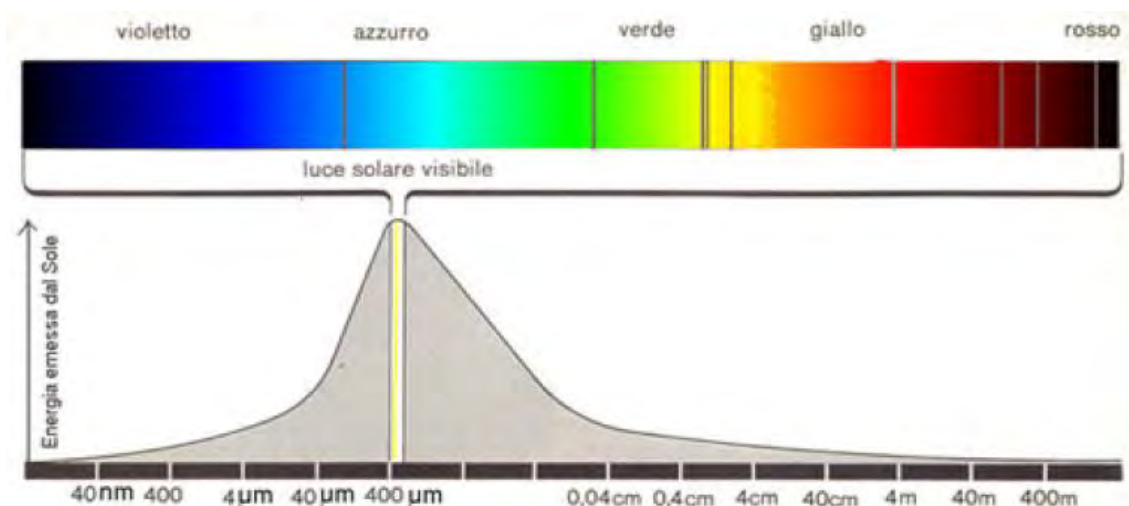


Figura 2: Energia emessa dal sole in funzione della lunghezza d'onda

La luce rossa (650-700 nm) e la luce blu (460-480 nm) costituiscono le lunghezze d'onda più efficienti per il processo di produzione di energia chimica (carboidrati e zuccheri) operato dalle piante attraverso la fotosintesi.

Oltre ad essere fonte di energia, la luce svolge un'importante funzione di informazione per i fenomeni fotomorfogenetici che si verificano nei diversi stadi di crescita della pianta.

I più importanti e maggiormente conosciuti e studiati sono:

1. FOTOPERIODO: tempo (spesso espresso in ore) di esposizione alla luce delle piante. La sua lunghezza risulta fondamentale per le numerose attività delle piante;
2. INTENSITA' LUMINOSA: quantità di energia luminosa che raggiunge la coltura. L' intensità di luce si misura come quantità di energia radiante che le colture intercettano ovvero il flusso radiante per unità di superficie, che viene definito irradianza o flusso quantico fotonico e si esprime come $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$;
3. QUALITA' DELLA LUCE: effetto della luce sull'accrescimento delle piante.

L'importanza della luce per le colture riguarda soprattutto l'effetto che ha sulle risposte fotomorfogeniche, ovvero gli effetti che la luce provoca alla crescita e allo sviluppo delle piante.

Mentre l'intervallo di valori di lunghezza d'onda della luce nel campo del visibile dell'occhio umano varia da 400nm a 700nm, per le risposte fotomorfogeniche il range di valori è maggiore e varia da 200nm a 800nm. Questa differenza è dovuta alla presenza, all'interno delle piante, di particolari molecole dette fotorecettori in grado di catturare la radiazione luminosa a lunghezze d'onda diverse rispetto al campo del visibile. In generale, i fotorecettori delle piante vengono così suddivisi:

1. FOTORECETTORI FOTOSINTETICI: responsabili dell'assorbimento della luce come energia;
2. FOTOSENSORI: specifici pigmenti responsabili delle risposte fotomorfogeniche.

Per le colture in camera di crescita sono i fotosensori ad essere importanti. Tuttavia non si può parlare di un unico fotorecettore ma esso varia col variare dello spettro di emissione della luce.

I fotorecettori conosciuti oggi sono:

- FITOCROMO: capace di assorbire lunghezze d'onda comprese tra 280 nm e 800 nm;
- FOTORECETTORI BLU/UV-A: tra cui il criptocromo, assorbono radiazioni inferiori a 500 nm;

- FOTORECETTORI UV-B: in grado di assorbire nell'ultravioletto con un picco oscillante intorno ai 290 nm e insensibili a lunghezze d'onda superiori a 350 nm.

Le diverse qualità della luce influenzano le risposte fotomorfogeniche delle colture. Tuttavia, le poche indagini effettuate ancora non hanno permesso di approfondire le conoscenze su questo tema.

Il Committee on crop terminology della Crop Science Society of America ha sviluppato alcune definizioni specifiche per studi sulla fotosintesi:

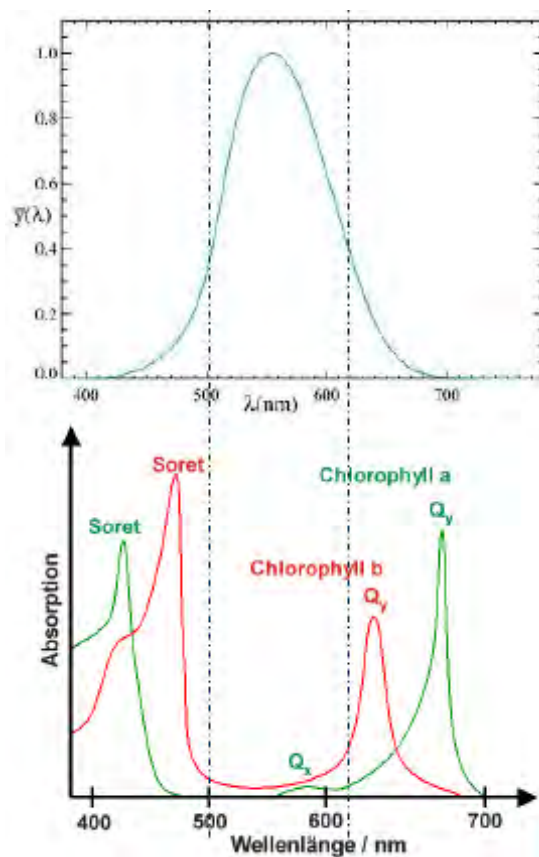


Figura 3: Campo luce visibile e campo di assorbimento massimo di fotoni da parte della clorofilla

particolare gli uomini hanno l'occhio come strumento di rilevazione dei fotoni; Le piante invece hanno la clorofilla come strumento ricevitore di fotoni. La sensibilità dell'occhio umano è massima per lunghezze d'onda della luce prossime a 555 nm; L'assorbimento di fotoni da parte della clorofilla è massimo negli intervalli di lunghezza

- PAR (Photosynthetic Active Radiation), misurato in $\mu\text{mol}/\text{s}\cdot\text{m}^2$. Le piante utilizzano l'intervallo tra 400 e 700 nm (al quale corrispondono circa 300-400 $\mu\text{mol}/\text{s}\cdot\text{m}^2$);
- PPAR (Photo-Physiologically Active Region): la regione dello spettro responsabile dei fenomeni foto-fisiologici delle piante;
- PPFD (densità di flusso fotonico foto sintetico): densità del flusso fotonico nell'intervallo tra 400 e 700 nm. Rappresenta in pratica il numero di fotoni incidenti per unità di tempo sull'unità di superficie. Si misura in $\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{gg}$.

Come già accennato prima, uomini e piante hanno una diversa sensibilità alla luce, in

d'onda di 400-500 nm e 600-700 nm (luce blu e rossa). Piante e uomo hanno quindi un bisogno di luce completamente diversa, in pratica le lampade progettate per l'uomo non sono pensate per la crescita delle piante e viceversa.

1.1.1 - LUCE ARTIFICIALE CON LAMPADE TRADIZIONALI

Esistono in commercio diversi tipi di lampade, ognuna presenta delle caratteristiche diverse che possono essere integrate fra loro o utilizzate separatamente. Le lampade a luminescenza ad alta intensità, conosciute come HID (High Intensity Discharge), rappresentano la soluzione migliore per i coltivatori che operano in serra. Le lampade HID si dividono in tre categorie di base:

- HPS (High Pressure Sodium);
- MH (Metal Halide);
- MV (Mercury Vapor);

La fotosintesi rispetto alla quantità di luce è un processo cumulativo e le piante presentano una crescita ottimale con livelli di luminosità variabili tra 150 e 300 W/m². Le richieste luminose delle diverse specie vegetali potrebbero essere soddisfatte sia con la luce solare e sia con la luce artificiale di lampade.

1.1.2 - LA TECNOLOGIA LED

I LED (Light Emitting Diode) sono uno speciale tipo di diodi a giunzione p-n, formati da un sottile strato di materiale semiconduttore drogato. Quando sono sottoposti ad una tensione diretta per ridurre la barriera di potenziale della giunzione, gli elettroni della banda di conduzione del semiconduttore si ricombinano con le lacune della banda di valenza rilasciando energia sufficiente da produrre fotoni.



Figura 4: Simbolo circuitale del LED

I vantaggi dei LED rispetto ad altre fonti di luce elettrica, oltre a un minore ingombro rispetto alle lampade, includono una durata superiore, maggiore sicurezza e affidabilità. I dispositivi LED attualmente disponibili presentano efficienze elettriche di conversione che si avvicinano alle fonti tradizionali più usate per l'irradiazione della

pianta, con una produzione spettrale ottimale vicino a quella della fotosintesi. Il dispositivo LED sfrutta le proprietà ottiche di alcuni materiali semiconduttori per produrre fotoni a partire dalla ricombinazione di coppie elettrone-lacuna. Gli elettroni e le lacune vengono iniettati in una zona di ricombinazione attraverso due regioni del diodo drogate con impurità di tipo diverso, e cioè di tipo n per gli elettroni e p per le lacune. Il colore della radiazione emessa è definito dalla distanza in energia tra i livelli energetici di elettroni e lacune e corrisponde tipicamente al valore della banda proibita del semiconduttore in questione. A causa dello spessore ridotto del chip interno al LED, un ragionevole numero di questi fotoni può abbandonarlo ed essere emesso come luce.

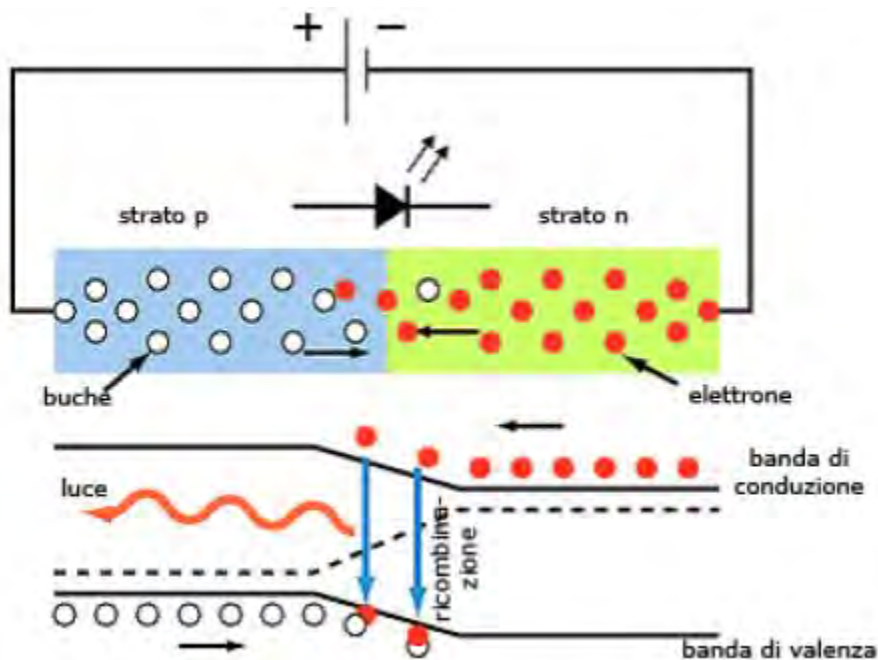


Figura 5: Livelli energetici in un LED

I LED sono formati da:

- GaAs (arseniuro di gallio);
- GaP (fosfuro di gallio);
- GaAsP (fosfuro arseniuro di gallio);
- SiC (carburo di silicio);
- GaInN (nitruro di gallio e indio).

L'esatta scelta dei semiconduttori determina la lunghezza d'onda dell'emissione di picco dei fotoni, l'efficienza nella conversione elettro-ottica e quindi l'intensità luminosa in uscita.

Anche se è cosa poco nota, i LED sono "macchine reversibili": infatti, se la loro giunzione viene esposta direttamente ad una forte fonte luminosa o ai raggi solari, ai terminali appare una tensione, dipendente dall'intensità della radiazione e dal colore del LED in esame (massima per il blu). Questa caratteristica viene abitualmente sfruttata nella realizzazione di sensori, per sistemi di puntamento (inseguitori solari) di piccoli impianti fotovoltaici o a concentratore e per molti altri scopi. I primi LED erano disponibili solo nel colore rosso, successivamente vennero sviluppati LED che emettevano luce gialla e verde e vennero realizzati dispositivi che integravano due LED, generalmente uno rosso e uno verde, nello stesso contenitore permettendo di visualizzare quattro stati (spento, verde, rosso, verde+rosso=giallo) con lo stesso dispositivo. Negli anni novanta vennero realizzati LED con efficienza sempre più alta e in una gamma di colori sempre maggiore fino a quando con la realizzazione di LED a luce blu fu possibile realizzare dispositivi che, integrando tre LED (uno rosso, uno verde e uno blu), potevano generare qualsiasi colore.

I LED in questi anni si sono diffusi in tutte le applicazioni in cui si necessita di:

- Elevata affidabilità;
- Lunga durata;
- Elevata efficienza;
- Basso consumo.

Alcuni utilizzi principali sono:

- Nei telecomandi a infrarossi;
- Indicatori di stato (lampadine spia);
- Retroilluminazione di display LCD;
- Nei semafori e negli "stop" delle automobili;
- Cartelloni a messaggio variabile;
- Illuminazione.

1.1.2.1 - L'impiego dei LED nell'illuminazione

I LED sono sempre più utilizzati in ambito illuminotecnico in sostituzione di alcune sorgenti di luce tradizionali. Il loro utilizzo nell'illuminazione domestica, quindi in sostituzione di lampade ad incandescenza, alogene o fluorescenti compatte (comunemente chiamate a risparmio energetico), è oggi possibile con notevoli risultati raggiunti grazie alle tecniche innovative sviluppate nel campo. Attraverso i nuovi studi, infatti, l'efficienza luminosa (quantità di luce/consumo (lm/W)) è stata calcolata di un minimo di 3 lm/W. Fondamentalmente, il limite dei LED per questo tipo di applicazione è la quantità di luce emessa (flusso luminoso espresso in lumen), che nei modelli di ultima generazione per uso professionale si attesta intorno ai 120 lm, ma che nei modelli più economici raggiunge solo i 20 lumen (una lampada ad incandescenza da 60 W emette un flusso luminoso di circa 550 lumen). Il loro utilizzo diventa invece molto più interessante in ambito professionale, dove l'efficienza luminosa pari a 40-60 lm/W li rende una sorgente molto efficiente. Come termine di paragone basti pensare che una lampada ad incandescenza ha un'efficienza luminosa di circa 20 lm/W, mentre una lampada ad alogeni di 25 lm/W ed una fluorescente lineare fino a 104 lm/W (Tabella 2). Altro loro limite nell'illuminazione funzionale è che le caratteristiche di emissione e durata sono fortemente condizionate dalle caratteristiche di alimentazione e dissipazione. Diventa dunque difficile individuare rapporti diretti tra le varie grandezze, tra le quali entra in gioco anche un ulteriore parametro, ovvero l'angolo di emissione del fascio di luce, che può variare in un range di circa 4 gradi a oltre 120.

Lampade	Percentuale di emissione fotonica (%)				
	300-400 nm	400-500 nm	500-600 nm	600-700 nm	700-1100 nm
DH-TS GaAlAs LEDs	0,0	0,0	0,1	98,9	1,0
High Pressure Sodium	0,3	4,0	23,2	31,8	40,7
Metal Halide	6,5	14,5	38,2	14,7	26,0
Cool-white fluorescent	2,4	18,7	49,2	23,5	6,2

Tabella 2: Confronto delle caratteristiche spettrali di diverse fonti di radiazione artificiale

Photosynthetic Radiation Source	Electrical Efficiency ($\mu\text{mol/s}\cdot\text{W}$)
High Pressure Sodium	1,00 - 1,52
DH-TS GaAlAs LEDs	0,20 - 0,91
Cool White Fluorescent	0,13 - 0,75

Tabella 3: Efficienza elettrica di fonti di irradiazione foto sintetica selezionati ed installati per facilitare l'accrescimento delle piante

Dal punto di vista applicativo i LED sono ad oggi molto utilizzati quando l'impianto di illuminazione deve avere le seguenti caratteristiche:

- Miniaturizzazione;
- Colori saturi;
- Effetti dinamici (variazione di colore RGB);
- Lunga durata e robustezza;
- Valorizzazione di forme e volumi;

In generale, i vantaggi dei LED dal punto di vista illuminotecnico sono:

- Durata di funzionamento (LED ad alta emissione arrivano a circa 50.000 ore);
- Assenza di costi di manutenzione;
- Elevato rendimento (se paragonato a lampade ad incandescenza e alogene);
- Luce pulita perché priva di componenti IR e UV;
- Facilità di realizzazione di ottiche efficienti in plastica;
- Flessibilità di installazione del punto luce;
- Colori saturi;
- Possibilità di un forte effetto spot (sorgente quasi puntiforme);
- Funzionamento in sicurezza perché a bassissima tensione (normalmente tra i 3 e i 24 Vdc);
- Accensione a freddo (fino a -40°C) senza problemi;
- Insensibilità a umidità e vibrazioni;
- Assenza di mercurio;
- Durata non influenzata dal numero di accensioni/spegnimenti;

1.1.2.2 - Caratteristiche tecniche e fisiche dei LED

I LED devono essere alimentati a corrente costante e questo si può fare utilizzando un generatore di corrente o, più semplicemente, ponendovi in serie una resistenza per limitare la corrente per una data tensione di alimentazione. La corrente può variare da 5-6 mA fino a 20 mA quando è richiesta molta luce. Il valore dipende anche dalla lunghezza d'onda della luce emessa dal LED. Il valore della resistenza in serie R_s si calcola mediante la legge di Ohm e la legge di Kirchhoff conoscendo la corrente di lavoro richiesta I_f , la tensione di alimentazione V_s e la tensione di giunzione del LED alla corrente di lavoro data, V_f .

Nel dettaglio, la formula per calcolare la resistenza in serie necessaria è:

$$R_s = \frac{V_s - V_f}{I_f}$$

In linea generale, quando non si possiede il datasheet specifico, si può considerare per i LED consueti di diametro 5 mm una tensione V_f pari a circa 2 V ed una corrente di lavoro I_f prudenziale di 10-15 mA, fino a 20 mA. Valori superiori di corrente sono in genere sopportati, ma non assicurano un funzionamento duraturo. Quindi, secondo la suddetta formula, e considerando una tensione di alimentazione V_s pari a 12 V, la resistenza dovrà essere compresa tra questi due valori:

$$R_{s(\max)} = \frac{12 - 2}{0,010} = 1000 \Omega$$

$$R_{s(\min)} = \frac{12 - 2}{0,020} = 500 \Omega$$

Tipologia LED (colore)	Tensione di giunzione V_f
Infrarosso	1,3 V
Rosso	1,8 V
Giallo	1,9 V
Verde	2,0 V
Arancio	2,0 V
Flash blu/bianco	3,0 V
Blu	3,5 V
Ultravioletto	4 ÷ 4,5 V

Tabella 4: Tensione di giunzione LED in base al colore

A seconda del drogante utilizzato, i LED producono inoltre i seguenti colori:

- AlGaAs – rosso ed infrarosso;
- GaAlP – verde;
- GaAsP – rosso, rosso-arancione, arancione, e giallo;
- GaN – verde e blu;
- GaP – rosso, giallo e verde;
- ZnSe – blu;
- InGaN – blu-verde, blu;
- InGaAlP – rosso-arancione, arancione, giallo e verde;
- SiC come substrato – blu;
- Diamante (C) – ultravioletto;
- Silicio (Si) come substrato – blu (in sviluppo);
- Zaffiro (Al₂O₃) come substrato – blu.

I LED vengono realizzati in vari package, ma la struttura base di cui sono costituiti è all'incirca sempre la stessa. Il semiconduttore viene inserito all'interno di una cavità che ha lo scopo di riflettere la luce, connesso elettricamente ai due terminali circondato da un materiale plastico. Il materiale attorno la guarnizione deve essere trasparente in modo che la luce possa uscire fuori. Quando il sistema è collegato a un circuito elettrico, elettroni e lacune si muovono, si incontrano e producono luce di vari colori: rosso, giallo, blu, verde, a seconda del materiale usato.

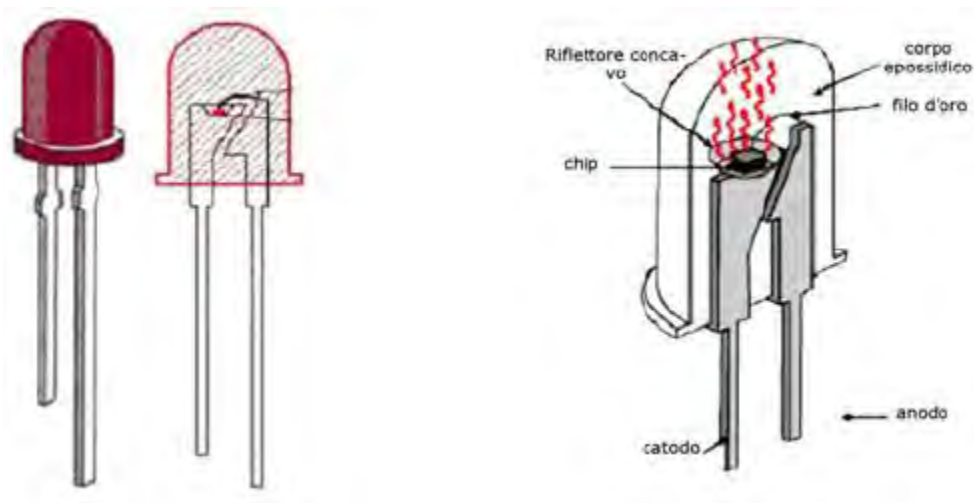


Figura 6: Esempio e sezione di un LED

La costruzione meccanica del LED influenza particolarmente il cosiddetto diagramma di radiazione, che fornisce l'intensità di luce, normalizzata rispetto alla direzione di massima radiazione, in funzione dell'angolo di dispersione. Un diagramma stretto indica che il LED è molto luminoso nella direzione di massima radiazione, ma discostandosi da essa di poco fornirà una luce di intensità molto inferiore. Invece se il diagramma è ampio la luce sarà visibile da un angolo più elevato ma l'intensità in direzione di massima radiazione sarà minore a parità di tutte le altre condizioni.

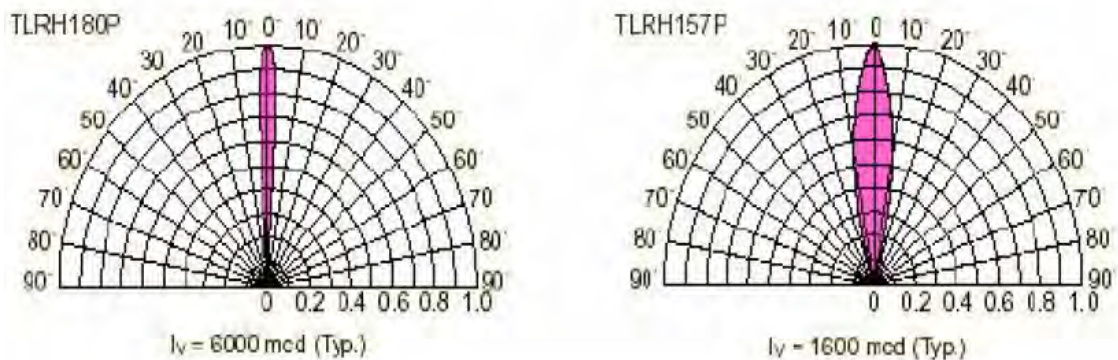


Figura 7: Diagrammi di radiazione per due LED con differente angolo di radiazione

1.1.2.3 - Sistemi LED per la crescita di piante

I sistemi di irradiazione a lampade LED possono essere costruiti collegando i dispositivi in serie fino a raggiungere la tensione di serie voluta. Un dispositivo opera tipicamente a circa 2.0 VDC (voltage direct current). Dodici dispositivi in serie richiedono un voltaggio di serie di circa 24 VDC. Parecchi dispositivi posti in serie potrebbero essere collegati parallelamente ed essere alimentati da una singola fonte di corrente continua controllata. I LED senza l'intelaiatura trasparente potrebbero essere direttamente montati al soffitto della camera di sviluppo, così l'intero soffitto sarebbe essenzialmente una superficie d'emissione, ed il sistema di illuminazione avrebbe volume e massa minimi. L'energia radiante nella regione spettrale blu è necessaria perché interessa le caratteristiche morfologiche di un certo numero di organi della pianta. L'utilizzo dei LED ad emissione rossa come unica fonte di irradiazione, talvolta non è quindi sufficiente ed alcune specie di piante richiedono una quantità di fotoni blu (circa 5-10% dei fotoni totali). L'efficienza elettrica che emette il LED di colore blu

disponibile in commercio, tuttavia, è troppo bassa attualmente per essere utile nel sistema di irradiazione della pianta basato sui LED.

Se si va a verificare la curva di corrente-tensione ad esempio di un comune LED rosso, questa appare abbastanza lineare e sembrerebbe che il punto di lavoro possa essere posto anche a tensione (e corrente) più elevata di 2.0 V trovata sperimentalmente.

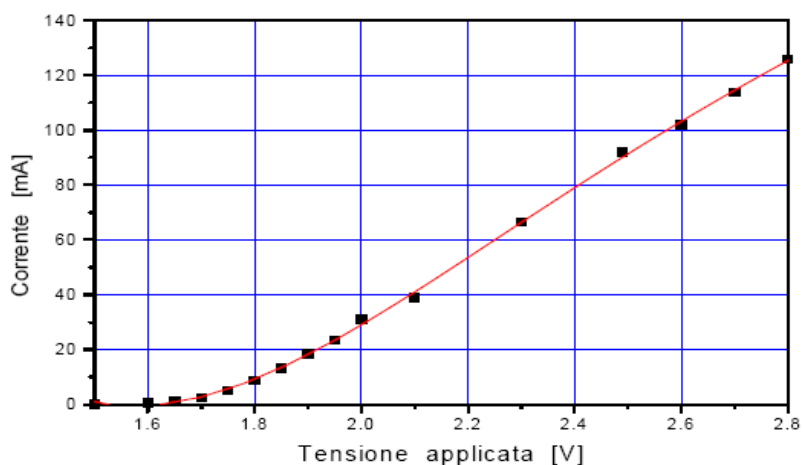


Figura 8: Curva di corrente-tensione di un comune LED rosso

In realtà, non è tanto importante la linearità nella relazione I-V, ma l'interesse è riferito all'intensità della radiazione emessa che deve essere proporzionale alla tensione applicata. Si riscontra che, oltre i 2,3 - 2,4 V, l'intensità della luce emessa non aumenta più, la corrente continua a crescere, ma l'intensità di radiazione emessa presenta saturazione. L'ulteriore corrente non fa altro che aumentare il calore dissipato, mettendo in grave pericolo la sopravvivenza del LED.

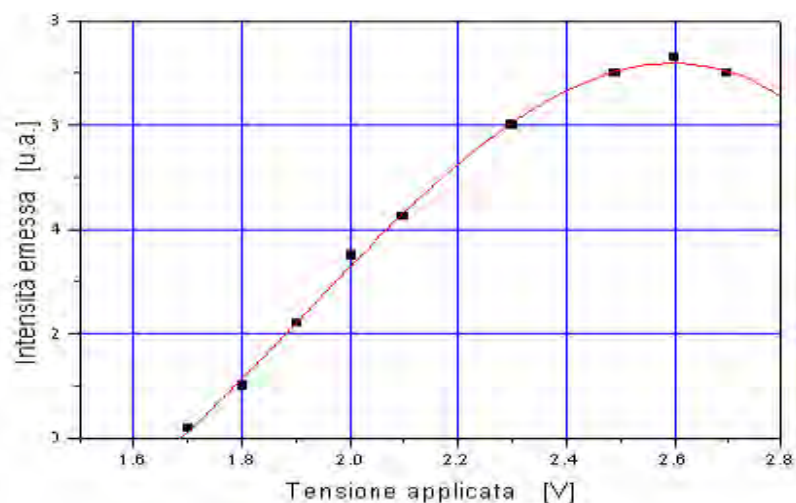


Figura 9: Intensità di radiazione emessa in funzione della tensione applicata

Per quanto riguarda il comportamento ottico, è da dire che varia significativamente con la temperatura. Infatti l'intensità di luce emessa diminuisce al crescere della temperatura: questo è dovuto al fatto che si ha un incremento di coppie elettrone-lacuna che non contribuiscono all'emissione luminosa. Inoltre a causa della variazione provocata dalla temperatura e all'ampiezza del gap, si ha anche un cambiamento della lunghezza d'onda della luce emessa e di conseguenza del colore.

1.1.2.4 - Efficienza dei LED

L'efficienza di conversione elettrica di un LED con rendimento estremamente alto per unità di irradiazione della pianta, si può osservare nella seguente tabella. Efficienze elettriche alte di 0.911 $\mu\text{mol/s}\cdot\text{W}$ sono state realizzate quando i dispositivi installati hanno operato ad una corrente diretta di 10mA. L'efficienza diminuisce se la corrente diretta applicata all'unità LED aumenta. Infatti se si passa da 10 a 50 mA, l'efficienza di conversione elettrica diminuisce del 18%.

LED Forward Current (mA)	Power per Unit Area (W/m^2)	Photon Flux ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)	Electrical Efficiency ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)
10	215	196	0,911
20	447	394	0,882
30	694	583	0,839
40	952	756	0,794
50	1226	913	0,745

Tabella 5: Efficienza elettrica e flusso fotonico di un sistema LED a 5 livelli di carico elettrico

1.1.2.5 - Durata dei LED

I LED hanno un tempo di vita medio (MTBF, Mean Time Between Failures) nell'intervallo compreso tra 100.000 e 1.000.000 ore, che rappresenta un tempo di vita molto elevato rispetto alle 1.000 ore di una lampada a incandescenza. Il consumo di energia è ridotto, (un LED rosso per semaforo usa 15 watt, invece dei 150 watt di una lampada tradizionale). Generalmente viene utilizzato dai costruttori, oltre all'MBTF, anche un altro parametro per tenere conto della bontà di un LED: si considera il tempo che impiega il LED a fornire una radiazione luminosa pari alla metà di quella originale. Il tempo di vita di un LED dipende da molti fattori. I principali sono:

1. Tipo di materiale;
2. Corrente di polarizzazione diretta;
3. Temperatura;
4. Umidità.

L'utilizzo di un LED in condizioni gravose, come quelle di elevata temperatura e umidità o elevata corrente di polarizzazione, può accorciarne anche drasticamente il tempo di vita: le condizioni a cui è sottoposto il LED influenzano infatti il formarsi di difetti nel reticolo cristallino del semiconduttore. Quando scorre corrente nella giunzione, a causa delle differenze di temperatura al suo interno, si genera uno stress del reticolo che provoca delle rotture nello stesso. Questi difetti aumentano con l'uso e il processo di rottura del reticolo è influenzato dalle condizioni di lavoro. L'aumentare di questi difetti causa una riduzione dell'efficienza, con conseguente diminuzione della luce emessa.

1.1.3 - I VANTAGGI DELLE LAMPADE A LED RISPETTO A LAMPADE A SODIO AD ALTA PRESSIONE (HIGH PRESSURE SODIUM LAMPS)

Le lampade a sodio ad alta pressione, (HPS) sono per il momento le lampade più utilizzate per la coltivazione con luce artificiale, semplicemente per motivi economici. Infatti:

- Le lampade HPS più utilizzate, producono 100 lm/W ma in un ampio intervallo di lunghezze d'onda;

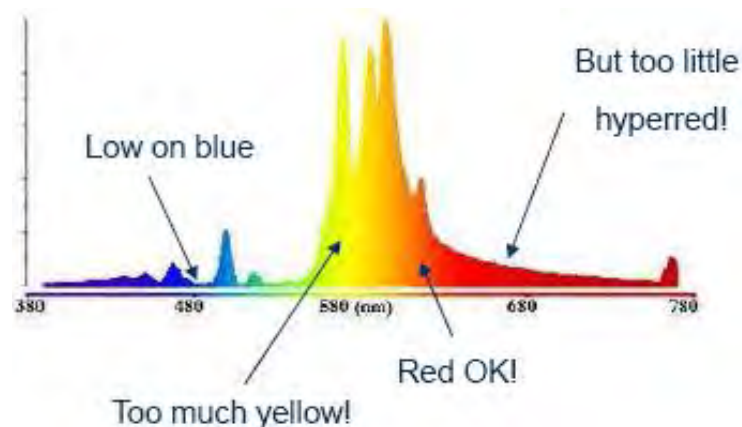


Figura 10: Spettro di emissione luminosa tipico di lampade HPS

- L'intensità luminosa espressa in lm/W nel campo della coltivazione è fuorviante, in quanto serve più ad indicare l'intensità luminosa percepita dall'occhio umano che la ricezione di luce da parte delle piante;
- Il tempo di vita stimato di tali lampade (lifetime) è stimato attorno alle 8000 h;
- Dall'accensione di una lampada HPS occorre aspettare qualche minuto prima che questa arrivi ad erogare la potenza massima consentita.

Per quanto riguarda la coltivazione con l'utilizzo di lampade LED, i vantaggi rispetto a lampade HPS sono:

- Spettro di emissione luminosa su misura per il miglior assorbimento di luce da parte della clorofilla. Questo porta a grandi risparmi di energia;
- Rapido ON/OFF: la piena luminosità viene raggiunta subito, inoltre attraverso dei sensori l'intensità luminosa della luce LED si può adattare dinamicamente ai cambi di intensità di luce solare durante il giorno, permettendo un ulteriore risparmio di energia;
- Lifetime, come già detto, stimato tra 100.000 e 1.000.000 ore, che comporta minor manutenzione;
- Robustezza, compattezza ed alta efficienza.

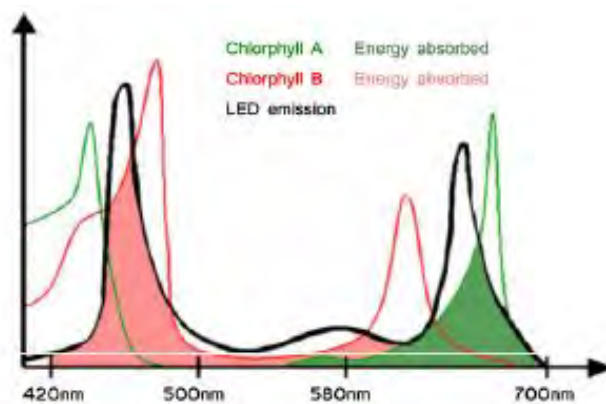


Figura 11: Confronto tra spettro luminoso luce LED e assorbimento luce da parte della clorofilla

Lo sviluppo della nuova tecnologia di semiconduttori luminescenti (LED) come fonte di luce, si presta particolarmente per l'accrescimento di piante in ambienti chiusi e controllati di dimensioni ridotte e, contemporaneamente, offre una fonte di luce "fredda" che non interferisce con le esigenze di un microclima controllato nei confronti della temperatura dell'aria interna.

Si considera un sistema di irradiazione della pianta, che fornisce $400\mu\text{mol}/\text{W}\cdot\text{s}$ con un'efficienza elettrica di conversione di $0,88\mu\text{mol}/\text{W}\cdot\text{s}$, che quindi consuma circa

10,9 kW di energia elettrica per irradiare la zona richiesta. E' evidente che un vantaggio importante del sistema di irradiazione LED si riferisce al picco di produzione spettrale, che può essere quasi coincidente con l'intervallo della gamma di lunghezze d'onda di azione fotosintetica massima delle piante (rosso e blu). Quindi l'utilizzo di lampade LED per la coltivazione di piante in serra, consente una più elevata utilizzazione in termini di efficienza fotosintetica dei "fotoni" emessi dai sistemi LED rispetto a quella di lampade con produzione spettrale diffusa per tutta la gamma delle lunghezze d'onda fotosinteticamente attive.

1.1.4 - DISPOSIZIONE DELLE LAMPADE A LED NELLE SERRE

In base al tipo di coltura, alle caratteristiche della serra, e alla quantità di piante che questa deve ospitare, si possono valutare differenti soluzioni di disposizione delle lampade all'interno della serra. In base al tipo di disposizione scelta, le lampade avranno quindi requisiti diversi da rispettare:

ILLUMINAZIONE A SOFFITTO: è la disposizione più semplice da realizzare e da immaginare. Con questa soluzione si illuminano grandi superfici con grandi lampade montate a pochi metri dalle piante.

Requisiti: lungo lifetime per ridurre i costi di manutenzione; commutazione on/off e regolazione dell'intensità luminosa complementare alla luce solare. L'efficienza della lampada non è uno dei parametri più importanti da rispettare.



Figura 12: Esempi di illuminazione a soffitto

INTERILLUMINAZIONE: questa soluzione prevede che le piante siano posizionate tra le piante o tra il fogliame. Tale disposizione è stata pensata per permettere alla luce di penetrare anche attraverso le piante più fitte, aumentare la crescita delle piante e disporle più vicine tra loro di quanto la natura normalmente permette.

Requisiti: In questo caso le lampade sono molto più vicine alle piante, e bisognerà usare dei LED ad alta efficienza per evitare il riscaldamento radiante. Il vantaggio di tale disposizione riguarda anche l'accesso più facile alle lampade rispetto alla disposizione a soffitto. Quindi riassumendo, in questo caso il lifetime delle lampade risulta meno rilevante per la facilità di manutenzione, ma l'efficienza della lampada acquista un ruolo più importante per non alterare la temperatura locale attorno alla fonte luminosa.



Figura 13: Esempio di lampade disposte secondo i requisiti dell'interilluminazione

COLTIVAZIONE MULTIPIANO: efficiente uso dello spazio per coltivare piccole piante. In



Figura 14: Esempi di coltivazione multipiano

pratica le piante si dispongono in scaffali, in cui ogni piano è dotato della propria illuminazione. Con tale metodo di disposizione si ha un controllo completo dell'ambiente e quindi non si utilizza la luce solare. Soprattutto con questo metodo è possibile pensare ad un tipo di coltivazione completamente slegata dal supporto del terreno, come la coltivazione idroponica o, meglio ancora aeroponica.

Requisiti: bassi consumi energetici sono importanti dal momento che le piante vengono coltivate con luce artificiale al 100%. Le lampade anche in questo caso si trovano vicino alle piante, che possono essere impilate in scaffali: la piccola taglia dei LED è sicuramente un vantaggio, dato che lo spazio è molto limitato.

1.2 - STANDARD DI COLTIVAZIONE DI ALCUNE PIANTE

Di seguito si riportano le tabelle riassuntive dei parametri di coltivazione di alcune piante, in particolare nutrimento, pH, flusso fotonico, fotoperiodo e temperatura.

PLANT Common Name (Genus species Auth)	Nut ^z	pH ^y	Propagation			Vegetative			Flower Initiation/Dev.			Fruit/Seed Dev.			Comments
			Light ^x	Photo- period Hrs / Day	Temp. (°C) L/ Dark	Light ^x	Photo- period Hrs / Day	Temp. (°C) L/ Dark	Light ^x	Photo- period Hrs / Day	Temp. (°C) L/ Dark	Light ^x	Photo- period Hrs / Day	Temp. (°C) L/ Dark	
African Violet <i>Sansevieria ionantha</i> H. Wendl	M	N	V	12	23/23	L	12	23/23	L	12	23/23				Leaf petiole cuttings.
Ageratum <i>Ageratum houssianum</i> Mill.	M	N	M	12-20	25/20	M	12-20	25/20	M	12-20	25/20				
Alfalfa <i>Medicago sativa</i> L.	M	N	M	12-20	25/20	M	12-20	22/22	M	>16	25/25	M	>16	25/25	Little flowering if photoperiod <12. High requirement for K & Mg.
Astroemeria (Peruvian Lily) <i>Astroemeria</i> sp. L.	H	N	M	>12	25/20	M	>12	20/20	M	>12	20/15				Division of rhizomes. For continuous flowering, temp. must be < 13 C.
Annual Bluegrass <i>Poa annua</i> L.	L	N	M	12-20	23/23	M	12-20	20/20	M	12-20	20/20	M	12-20		Break bud dormancy: 2000 to 2500 hrs at 4 C
Apple <i>Malus domestica</i> Borkh.	M	N				H	12-20	25/20	H	12-20	25/20	H	12-20	25/20	Break bud dormancy: 2000 to 2500 hrs at 4 C
Arabidopsis <i>Arabidopsis thaliana</i> L. Heynh	M	N	L	8	24/24	L	8	20/20	L	16	20/20	L	>16	20/20	Light inhibits germination.
Avocado <i>Persea americana</i> Mill.	M	N				M	12-20	25/20	M	12-20	20/15	M	12-20	25/20	Water stress induces flowering.
Azalea <i>Rhododendron</i> spp.	M	L	L	>14	25/23	M	>14	25/20	M	10	25/25				5-cm cuttings, 2500 ppm IBA, 50 for six weeks required for flower development after initiation
Barley <i>Hordeum vulgare</i> L.	M	N	M	12	23/18	M	12	23/18	M	16-24	23/18	M	16-24	23/18	

^z Nutrition
L = Low (50 ppm N)
M = Medium (100 ppm N)
H = High (200 ppm N)

^y pH
N = Normal
L = Low
5.5 - 6.5
4.5 - 5.5

^x Light: Photosynthetic Photon Flux (PPF)
D = Dark
V = Very Low
L = Low
M = Medium
H = High
No light
50 - 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
150 - 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
250 - 450 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
450 - 700 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

PLANT Common Name (Genus species Auth.)	Nutr ^z	pH ^y	Propagation		Vegetative		Flower Initiation/Dev.		Fruit/Seed Dev.		Comments				
			Light ^x	Photo-period Hrs./Day	Temp. (°C) L/Dark	Light ^x	Photo-period Hrs./Day	Temp. (°C) L/Dark	Light ^x	Photo-period Hrs./Day		Temp. (°C) L/Dark			
Bean <i>Phaseolus vulgaris</i> L.	M	N	M	12-20	22/22	M	12-20	22/22	M	12-20	22/18	M	12-20	25/20	Low night temperature for pollination and fruit set.
Blueberry, Highbush <i>Vaccinium corymbosum</i> L.	M	L				H	14	25/20	H	12-20	20/15	H	12-20	20/13	Break bud dormancy: 800 to 2500 hrs at 7.5 C. Initiate flower buds: <12 hr photo period in fall for 50 days.
Blueberry, Rabbit-eye <i>Vaccinium ashei</i> Reade	L	L	H	12-20	25/20	H	14	25/20	H	12-20	25/20	H	12-20	25/20	Break bud dormancy: 300 to 800 hrs at 7 C. Flower bud initiation: <12 hr photo period for 50 days in late fall.
Bramble <i>Rubus</i> spp.	L	N				M	12-20	25/20	M	12-20	25/20	M	12	25/20	Break bud dormancy: 750 to 2000 hrs at 4 C.
Cabbage <i>Brassica oleracea</i> var. <i>capitata</i> L.	M	N	M	12-20	25/25	M	12-14	20/15	H	12-14	8/8	M	12-20	20/15	
Cactus, Thanksgiving <i>Schubbergera truncata</i> (Haw.) Moran	M	N	M	>14	23/23	M	>14	25/18	M	<12	20/18				Commonly termed Christmas cactus Single stem section cuttings
Calceolaria (Pocketbook Plant) <i>Calceolaria herbicorymbida</i> Voss.	M	N	L	12	20/20	M	>18	20/15	M	<8 >18	20/15 20/15				Two pre-anthesis stages: 6 wks short day and cool; 4-5 wks long day.
Carnation <i>Dianthus caryophyllus</i> L.	H	N	L	>12	20/15	M	<12	20/15	M	>12	18/13				4 wks long day initiates buds.
Cherry <i>Prunus</i> spp.	M	N				H	12-20	25/20	H	12-20	25/20	H	12-20	25/20	Break bud dormancy: 750 to 2000 hrs at 4 C.
Chrysanthemum <i>Dendranthema grandiflorum</i> (Ramat.) Kilam	H	N	L	16	23/23	M	16	25/18	M	10	25/15				5 cm cuttings with 2500 ppm IBA.

^z Nutrition
L = Low (50 ppm N)
M = Medium (100 ppm N)
H = High (200 ppm N)

^y pH
N = Normal 5.5 - 6.5
L = Low 4.5 - 5.5

^x Light: Photosynthetic Photon Flux (PPF)
D = Dark No light
V = Very Low 50 - 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
L = Low 150 - 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
M = Medium 250 - 450 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
H = High 450 - 700 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

PLANT Common Name (Genus species Auth.)	Null ^z	pH ^y	Propagation			Vegetative			Flower Initiation/Dev.			Fruit/Seed Dev.			Comments
			Light ^k	Photo- period Hrs/Day	Temp. (°C) Lt/Dark	Light ^k	Photo- period Hrs/Day	Temp. (°C) Lt/Dark	Light ^k	Photo- period Hrs/Day	Temp. (°C) Lt/Dark	Light ^k	Photo- period Hrs/Day	Temp. (°C) Lt/Dark	
Chenaria <i>Senecio cruentus</i> (Masson ex L'Her.) D.C.	M	N	M	12	20/20	M	12	20/20	M	>12	20/13				In post-anthesis stage, do not allow to wilt.
Citrus <i>Citrus spp.</i>	M	N	M	12-20	28/23	H	12-20	28/23	H	12-20	28/23	H	12-20	28/23	Water stress induces flowering.
Cocklebur <i>Xanthium strumarium</i> L.	M	N	M	16	25/25	M	16-20	25/20	M	8	25/20	M	8	25/20	
Com <i>Zea mays</i> L.	H	N	M	14	28/23	M-H	12-20	28/23	M-H	12-14	28/23	H	14	28/23	
Cosmos <i>Cosmos bipinnatus</i> Cav.	L	N	M	16	23/23	M	16	25/20	M	8	25/20				
Cotton <i>Gossypium hirsutum</i> L.	M	N	M	12-20	28/28	M	12-20	28/28	M	12	30/25	M	12-20	30/25	Most cultivars will flower under any photoperiod. Some cultivars require short days for flower initiation.
Cucumber <i>Cucumis sativus</i> L.	M	N	M	12-20	25/25	M	16	25/25	M	12-20	25/25	M	12-20	25/25	
Cyclamen <i>Cyclamen persicum</i> Mill.	M	N	D	0	16/16	M	12	20/20	M	12	20/20				High temp. inhibits germination. In post-anthesis stages, do not allow to wilt.
Easter Lily <i>Lilium longiflorum</i> Thunb. var. <i>eximium</i> (Courtois) Baker	H	N				M	12	20/20	M	12	20/20				Bulbs cooled at 5 C for 6 weeks induces flowering.
Fuchsia <i>Fuchsia X hybrida</i> Hort. ex Villm.	M	N	L	<12	23/23	M	<12	20/20	M	16	20/20				5-cm cuttings with 2500 ppm IBA.

^z Nutrition
L = Low (50 ppm N)
M = Medium (100 ppm N)
H = High (200 ppm N)

^y pH
N = Normal
L = Low
5.5 - 6.5
4.5 - 5.5

^x Light: Photosynthetic Photon Flux (PPF)
D = Dark
V = Very Low
L = Low
M = Medium
H = High
No light
50 - 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
150 - 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
250 - 450 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
450 - 700 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

PLANT Common Name (Genus species Auth.)	Nut. z	pH ^y	Propagation		Vegetative		Flower Initiation/Dev.		Fruit/Seed Dev.		Comments	
			Light ^x	Photo- period Hrs/Day	Temp. (°C) L/Dark	Light ^x	Photo- period Hrs/Day	Temp. (°C) L/Dark	Light ^x	Photo- period Hrs/Day		Temp. (°C) L/Dark
Geranium <i>Pelargonium</i> spp.	M	N	M	12-20	25/20	M	12-20	25/20	M	12-20	25/20	
Gerbera (Transvaal Daisy) <i>Gerbera jamesonii</i> Bours ex Hook f.	H	N	L	>12	25/20	M	>12	25/18	M	>12	25/18	Seeds should not dry out.
Gloxinia <i>Sinningia speciosa</i> (Lodd.) Hiern	M	N	L	>12	20/20	M	>12	25/20	M	>12	25/20	Seeds uncovered on top of media.
Grape <i>Vitis</i> spp.	M	N	H	12-20	25/20	H	12-20	25/20	M	12-20	25/20	Break bud dormancy; 750 to 3000 hrs at 4 C.
Herbane <i>Hyocyamus niger</i> L.	L	N	M	8	25/25	M	8	23/23	M	16	23/20	
Hydrangea <i>Hydrangea macrophylla</i> (Thunb.) Ser.	M	LN	M	>14	23/23	M	>14	25/18	M	<14	25/15	5-cm cuttings with 2500 ppm IBA. Blue: pH<5.5. Pink: pH>5.5. 5 C for 6 wks required for flower development after initiation
Kalanchoe <i>Kalanchoe blossfeldiana</i> Poeell.	H	N	M	>14	23/23	M	>14	23/20	M	10	23/120	Seed or 5-7 cm cuttings.
Lamb's ears <i>Chenopodium album</i> L.	M	N	M	>14	25/20	M	>14	25/20	M	<12	25/20	
Lettuce <i>Lactuca sativa</i> L.	M	N	L-M	12-20	25/20	M	12-20	25/20	M	12-20	25/20	Tip burn at high light, and high RH. 17 mol/m ² day ^y or PPF suggested.
Liatris (Gayfeather) <i>Liatris</i> spp.	H	N	L	>12	23/23	M	>12	25/15	M	>12	25/15	Seed or division of corms. 2 C for 5 wks before forcing period.

^z Nutrition
L = Low (50 ppm N)
M = Medium (100 ppm N)
H = High (200 ppm N)

^y pH
N = Normal 5.5 - 6.5
L = Low 4.5 - 5.5

^x Light: Photosynthetic Photon Flux (PPF)
D = Dark
V = Very Low 50 - 150 μmol m⁻²s⁻¹
L = Low 150 - 250 μmol m⁻²s⁻¹
M = Medium 250 - 450 μmol m⁻²s⁻¹
H = High 450 - 700 μmol m⁻²s⁻¹
No light

PLANT Common Name (Genus species Auth.)	Nut ^z	pH ^y	Propagation		Vegetative		Flower Initiation/Dev.		Fruit/Seed Dev.		Comments				
			Light ^x	Photo- period Hrs / Day	Temp. (°C) L / Dark	Light ^x	Photo- period Hrs / Day	Temp. (°C) L / Dark	Light ^x	Photo- period Hrs / Day		Temp. (°C) L / Dark			
Marigold <i>Tagetes erecta</i> L.	M	N	M	12-20	25 / 20	M	12-20	25 / 20	M	12-20	25 / 20				
Oats <i>Avena sativa</i> L.	M	N	M	12-20	25 / 20	M	12-20	25 / 20	M	16-24	25 / 20				
Olive <i>Olea europaea</i> L.	M	N				H	14	23 / 18	H	12-20	12 / 12	H	12-20	23 / 18	Flower bud initiation: 750 to 2500 hrs at 12 C during early spring.
Pea <i>Pisum sativum</i> L.	M	N	M	12-20	23 / 23	M	12-20	23 / 23	M	12-20	20 / 15	M	12-20	23 / 18	Desirable at anthesis to reduce maximum temperature to 22C.
Peach <i>Prunus persica</i> (L.) Batsch	M	N				H	12-20	25 / 20	H	12-20	25 / 20	H	12-20	25 / 20	Break bud dormancy: 250 to 2000 hrs at 4 C
Peanut <i>Arachis hypogaea</i> L.	M	N	D	N/A	25 / 25	M	12-20	25 / 25	>M	12-20	30 / 23	>M	12-20	30 / 23	Plants flower under most photoperiods. Short days may increase harvest index.
Pear <i>Pyrus communis</i> L.	M	N				H	12-20	25 / 20	H	12-20	25 / 20	H	12-20	25 / 20	Break bud dormancy: 750 to 2500 hrs at 4 C
Pepper <i>Capiscum annuum</i> (L.) var. annuum	M	N	M	12-20	25 / 20	M	12-20	25 / 20	M	12-20	25 / 20	M	12-20	25 / 20	
Perilla <i>Perilla frutescens</i> (L.) Britt	L	N	M	16	25 / 25	M	16	20 / 20	M	8	20 / 20	M	8	20 / 20	
Petunia <i>Petunia x hybrida</i> Vilm.	M	N	M	12-20	25 / 20	M	12-20	25 / 20	M	16-20	25 / 20				

^z Nutrition
L = Low (50 ppm N)
M = Medium (100 ppm N)
H = High (200 ppm N)

^y pH
N = Normal 5.5 - 6.5
L = Low 4.5 - 5.5

^x Light: Photosynthetic Photon Flux (PPF)
D = Dark No light
V = Vary Low 50 - 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
L = Low 150 - 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
M = Medium 250 - 450 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
H = High 450 - 700 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

PLANT Common Name (Genus species Auth)	Nut ^z	pH ^y	Propagation		Vegetative		Flower Initiation/Dev.		Fruit/Seed Dev.		Comments						
			Photo- period Hrs/Day	Temp. (°C) L/Dark	Light ^x	Photo- period Hrs/Day	Temp. (°C) L/Dark	Light ^x	Photo- period Hrs/Day	Temp. (°C) L/Dark		Light ^x	Photo- period Hrs/Day	Temp. (°C) L/Dark			
Pharbitis Pharbitis Nil(L.) Roth	L	N	L	16	25/25	M	16	25/25	M	8	30/30						
Pigeon Amrathus spp.	M	N	M	>16	25/20	M	>16	25/20	M	8	25/20						
Poinsettia Euphorbia pulcherrima Willd. ex Klotzsch	H	N	L	>14	25/20	M	>14	25/20	M	10	25/18						5-cm cuttings with 2500 ppm IBA.
Potato, Sweet Ipomoea batatas (L.) Lam.	M	N	M	12-20	25/25	L	<14	25/25	M	>14	25/25	M	>14	25/25			Requirements are for storage root formation Higher N levels favor vegetative growth; requires high K.
Potato, White Solanum tuberosum L.	M	N	M	12-20	23/18	M	12-20	23/18	M	12-20	23/18	M	12-20	23/18			Requirements are for tuberization. Long days with low PPF delays tuberization. pH<6.0.
Rice Oryza sativa L.	M	N	M	12-20	30/20	>M	12-20	30/20	>M	12	30/20						Short day crop; critical daylength for flowering varies with cultivar.
Rose Rosa mult. flora Thunb.	H	N	L	12	23/23	M	12	23/18	M	12	23/18						5-cm cuttings with 2500 ppm IBA.
Ryegrass Lolium multiflorum Lam.	M	N	M	12-20	23/18	M	12-20	20/15	M	16	23/18						
Salvia Salvia splendens Sellow ex Schlles	L	N	M	24	23/23	M	12	25/20	M	12	25/20						
Scrophularia Scrophularia marilandica L.	L	N	L	8	20/13	M	8	20/20	M	16	20/20						

^z Nutrition
L = Low (50 ppm N)
M = Medium (100 ppm N)
H = High (200 ppm N)

^y pH
N = Normal
L = Low
5.5 - 6.5
4.5 - 5.5

^x Light: Photosynthetic Photon Flux (PPF)
D = Dark
V = Very Low
L = Low
M = Medium
H = High
No light
50 - 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
150 - 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
250 - 450 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
450 - 700 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

PLANT Common Name (Genus species Auth)	Nut ^z	pH ^y	Propagation			Vegetative			Flower Initiation/Dev.			Fruit/Seed Dev.			Comments
			Light ^x	Photo- period Hrs / Day	Temp. (°C) L / Dark	Light ^x	Photo- period Hrs / Day	Temp. (°C) L / Dark	Light ^x	Photo- period Hrs / Day	Temp. (°C) L / Dark	Light ^x	Photo- period Hrs / Day	Temp. (°C) L / Dark	
Silene <i>Silene aemera</i> L.	L	N	D	N/A	25 / 25	M	8	20 / 20	M	16	20 / 20				
Sinapis <i>Sinapis alba</i> L.	L	N	M	12-20	25 / 25	M	12-20	20 / 20	M	8	20 / 20				
Shardragon <i>Auricularia majus</i> L.	H	N	M	>12	23 / 23	M	>12	25 / 15	M	>12	20 / 13				Sow seed on top of moist media. Facilitative long day for flowering.
Soybean <i>Glycine max</i> (L.) Merr	M	N	M	12	28 / 23	M	12-20	28 / 23	M	12-20	28 / 23	12	28 / 23		Short day crop; critical daylength for flowering varies with cultivar
Spinach <i>Spinacia oleracea</i> L.	M	N	M	12	20 / 20	M	12	20 / 20	M	>15	25 / 25	>15	25 / 25		Elevated temperatures encourage earlier flowering.
Strawberry/ <i>Fragaria x ananassa</i> Duch.	M	N	M	12-20	18 / 18	M	12-20	20 / 15	M	<12	20 / 15	12-20	20 / 15		For day neutral cultivars only; exposing crowns to 4-6 wks at 4 C will stimulate flowering.
Tobacco <i>Nicotiana tabacum</i> L.	M	N	M	12-20	25 / 20	M	12-20	25 / 20	M	12-20	25 / 20	12-20	25 / 20		
Tomato <i>Lycopersicon esculentum</i>	M	N	M	12-20	25 / 20	H	12-20	25 / 20	H	12-20	25 / 20	12-20	25 / 20		Requires high K and Ca. High nutrition may induce fruit set.
Wheat <i>Triticum aestivum</i> L.	M	N	M	12-20	25 / 20	M	12-20	20 / 15	M	12-20	23 / 18	12-20	23 / 18		Winter wheat requires cold treatment (vernalization) for floral induction. Long photoperiod decreases time to flowering.

^z Nutrition
L = Low (50 ppm N)
M = Medium (100 ppm N)
H = High (200 ppm N)

^y pH
N = Normal 5.5 - 6.5
L = Low 4.5 - 5.5

^x Light: Photosynthetic Photon Flux (PPF)
D = Dark No light
V = Very Low 50 - 150 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
L = Low 150 - 250 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
M = Medium 250 - 450 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$
H = High 450 - 700 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$

1.3 - LA COLTIVAZIONE AEROPONICA

L'aeroponica è un nuovo tipo di coltivazione in serra che deriva dalla coltivazione idroponica. E' un tipo di coltivazione che avviene in assenza di substrato, cioè senza l'utilizzo di terra o di qualsiasi altro aggregato di sostegno. Tecnicamente infatti le radici delle piante non sono immerse



Figura 15: Esempio di coltivazione aeroponica

in alcun terreno ma sono sospese in aria, da cui proviene il principale nutriente, oltre che una maggiore ossigenazione. Questo metodo di coltivazione indoor rimuove molti degli svantaggi propri della coltivazione outdoor e della coltivazione idroponica. È adatto infatti alla maggior parte di piante e fiori, ed associato all'horticultural lighting, in particolare all'uso di lampade LED, fornisce un ambiente controllato sotto tutti i punti di vista: temperatura, luce, irrigazione e nutrimento delle piante. Il metodo è utilizzato dai coltivatori che hanno bisogno di uno stretto controllo sui propri impianti e che non vogliono usare pesticidi. L'aeroponica consente inoltre la coltivazione naturale biologica e senza malattie.

Le differenze principali della coltura aeroponica rispetto a quella idroponica sono essenzialmente due:

- non c'è il gocciolio o l'inondazione di soluzione nutritiva sulla pianta, o nel substrato, tipico dell'idroponica. Le piante infatti sono sostenute artificialmente e la loro alimentazione è garantita da sistemi di nebulizzazione di acqua arricchita da fertilizzanti minerali che investe direttamente l'apparato radicale della pianta;
- la nebulizzazione di fertilizzanti e acqua, permette un'aerazione supplementare delle radici quindi una maggior ossigenazione della pianta.

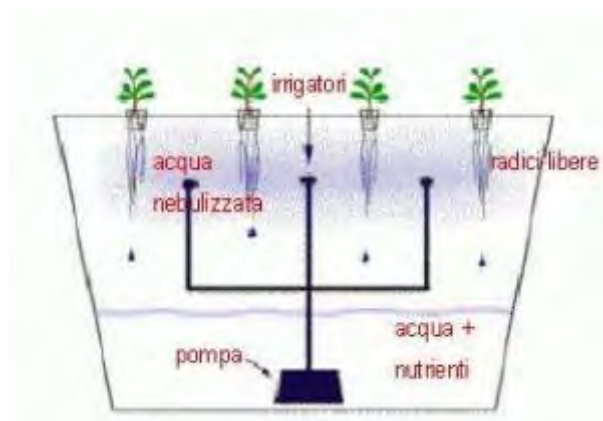


Figura 16: Schema di funzionamento di un impianto per coltivazione idroponica

Come già detto, le piante si coltivano sospese, sorrette da appositi pannelli forati in polistirolo espanso all'interno di canalette in pvc antiusura, diverse per tipo e forma a seconda della coltura scelta. In questo modo le radici delle piante sono esposte all'aria e non sono a contatto con alcun substrato, quindi con nessuna sostanza inquinante, ma solo con quelle nebulizzate sul sistema radicale.

Questa tecnica è sviluppata soprattutto in serra dove l'obiettivo primario è l'ottenimento di condizioni che incrementino sviluppo, salute, fioritura e fruttificazione della pianta, attraverso l'uso di soluzioni ricche di nutrienti spruzzate sulle radici nude. Infatti l'ambiente chiuso e idealmente isolato dall'esterno, combinato con l'assenza di terreno permette di annullare l'esposizione delle piante ad agenti infestanti e patogeni facilitando il loro sviluppo. Il tempo di crescita e sviluppo delle piante è il medesimo di quelle coltivate in terra, ma con il grosso vantaggio di non avere interruzioni, avendo così una maggiore resa produttiva.

Attualmente la coltura aeroponica in Italia come nel resto d'Europa è ancora in via di sviluppo, i paesi che già la utilizzano sono il Canada, l'Australia e alcuni paesi degli Stati Uniti.

Questo tipo di sistema adeguatamente seguito, permetterebbe, in assenza di substrato, di poter coltivare varietà vegetali indipendentemente dal luogo.

L'aeroponica è un metodo utile di crescita che ha portato a molti progressi nella scienza. Sicuramente sul piano pratico, ci sono però ancora diversi svantaggi che ne rallentano lo sviluppo; il primo riguarda l'elevato costo degli impianti, mentre non meno importante è l'elevato consumo di energia e la scarsa adattabilità dei sistemi di

coltura alle varietà vegetali. Inoltre è un metodo di coltivazione che richiede molta precisione, e l'installazione con la messa a punto corretta può essere molto complicata e costosa. Il risultato finale può essere molto vantaggioso, visto che questo metodo di coltivazione permette una maggiore densità di piante e una resa maggiore.

In seguito si riportano nel dettaglio i vantaggi dovuti all'aeroponica:

- Aumento delle piante coltivate per metro quadrato;
- Risparmio idrico del 95%;
- Riduzione dei trattamenti antiparassitari del 90%;
- Risparmio dei Fertilizzanti del 90%;
- Ciclo chiuso di irrigazione (protezione delle falde acquifere e dell'ambiente);
- Velocità di trapianto e cambio coltura;
- Nessun problema di smaltimento di substrati;
- Abbattimento delle malattie fungine e batteriche delle radici e dell'ambiente;
- Possibilità di autoalimentarsi grazie all'utilizzo di fonti rinnovabili;
- Migliore qualità di vita dell'operatore agricolo in un ambiente salubre;
- Garanzia sui materiali;
- Certificazione del Prodotto;
- Consulenza e corsi di formazione per gli operatori;
- Contratti di Produzione;
- Commercializzazione.

Anche se giustificati dai notevoli benefici, l'aeroponica però comporta i seguenti costi:

- Acquisto dell'impianto, manutenzione e messa a punto;
- Energia elettrica;
- Fertilizzanti;
- Lotta biologica;
- Personale specializzato, quindi costoso.

1.4 - IL SISTEMA DEI CERTIFICATI BIANCHI

I certificati bianchi, anche noti come “Titoli di Efficienza Energetica” (TEE), sono titoli negoziabili che certificano il conseguimento di risparmi energetici negli usi finali di energia attraverso interventi e progetti di incremento di efficienza energetica.

Il sistema dei certificati bianchi è stato introdotto nella legislazione italiana dal decreto ministeriale del 20 luglio 2004 e prevede che i distributori di energia elettrica e di gas naturale raggiungano annualmente determinati obiettivi quantitativi di risparmio di energia primaria, espressi in Tonnellate Equivalenti di Petrolio risparmiate (TEP).

Un certificato equivale al risparmio di una tonnellata equivalente di petrolio (TEP).

Le aziende distributrici di energia elettrica e gas possono assolvere al proprio obbligo realizzando progetti di efficienza energetica che diano diritto ai certificati bianchi oppure acquistando i TEE da altri soggetti sul mercato dei Titoli di Efficienza Energetica organizzato dal GME.

Il quadro normativo nazionale in quest’ambito è stato recentemente modificato con la pubblicazione del decreto 28 dicembre 2012, che definisce degli obiettivi quantitativi nazionali di risparmio energetico per le imprese di distribuzione di energia elettrica e gas per gli anni dal 2013 al 2016, e introduce nuovi soggetti ammessi alla presentazione di progetti per il rilascio dei certificati bianchi.

Possono presentare progetti per il rilascio dei certificati bianchi le imprese distributrici di energia elettrica e gas con più di 50.000 clienti finali (“soggetti obbligati”), le società controllate da tali imprese, i distributori non obbligati, le società operanti nel settore dei servizi energetici, le imprese e gli enti che si dotino di un energy manager o di un sistema di gestione dell’energia in conformità alla ISO 50001. A partire dal 3 febbraio 2013, il decreto 28 dicembre 2012 stabilisce il trasferimento dall’AEEG al GSE delle attività di gestione, valutazione e certificazione dei risparmi correlati a progetti di efficienza energetica condotti nell’ambito del meccanismo dei certificati bianchi. L’accesso a tale sistema incentivante è articolato su tre diversi metodi di valutazione: il metodo standardizzato, il metodo analitico ed il metodo a consuntivo. I primi due si sostanziano nell’esistenza di schede tecniche le quali facilitano l’accesso al sistema, avendo già incluso l’algoritmo di calcolo dei risparmi che incorpora implicitamente la

baseline, la verifica dell'addizionalità, gli aggiustamenti, ecc. Il metodo a consuntivo, viceversa, comporta un maggior coinvolgimento del proponente il quale, nel presentare il proprio progetto, è invitato a pronunciarsi sul complessivo quadro al contorno, sia di tipo tecnologico, che normativo, che di mercato.

1.4.1 - METODI DI VALUTAZIONE DEI RISPARMI

Al fine di meglio comprendere il calcolo dei certificati bianchi, si elencano le seguenti definizioni:

- Risparmio lordo (RL) è la differenza nei consumi di energia primaria prima e dopo la realizzazione di un progetto, determinata con riferimento ad un certo orizzonte temporale mediante una misurazione o una stima ed assicurando la normalizzazione delle condizioni esterne che influiscono sul consumo energetico, misurata in tonnellate equivalenti di petrolio;
- Risparmio netto (RN) è il risparmio lordo, depurato dei risparmi energetici non addizionali, cioè di quei risparmi energetici che si stima si sarebbero comunque verificati, anche in assenza di un intervento o di un progetto, per effetto dell'evoluzione tecnologica, normativa e del mercato;
- Risparmio netto integrale (RNI) è il risparmio netto che si stima venga conseguito nell'arco della vita tecnica di un intervento e applicando il tasso di decadimento annuo; esso è costituito dalla somma di due componenti: il risparmio netto conseguito nel corso della vita utile (RNC) e il risparmio netto conseguito dal termine della vita utile al termine della vita tecnica dell'intervento stesso (RNa);
- Coefficiente di addizionalità a : è un coefficiente percentuale intero positivo minore o uguale al 100%, pari al rapporto tra il valore del risparmio netto e il valore del risparmio lordo;
- Coefficiente di durabilità τ : è un coefficiente positivo, pari al rapporto tra il valore del risparmio netto integrale e il valore del risparmio netto, calcolato con riferimento alla vita utile dello stesso;

Come detto in precedenza, per valutare i risparmi conseguibili attraverso ciascuna tipologia di intervento si distinguono:

- Metodi di valutazione standardizzata;
- Metodi di valutazione analitica;
- Metodi di valutazione a consuntivo.

I metodi di valutazione standardizzata consentono di quantificare il risparmio specifico lordo annuo dell'intervento attraverso la determinazione dei risparmi relativi ad una singola unità fisica di riferimento (UFR), senza procedere a misurazioni dirette. L'UFR, il risparmio specifico lordo annuo conseguibile per UFR (RSL), i valori dei coefficienti di addizionalità e di durabilità si definiscono per ogni tipologia di intervento attraverso apposite schede tecniche per la quantificazione dei risparmi. La quota di risparmio netto integrale riconosciuta nell'ambito della richiesta di verifica e certificazione, si calcola come prodotto del numero di UFR oggetto dell'intervento, del RSL, del coefficiente di addizionalità e del coefficiente di durabilità.

$$RNI = UFR \cdot RSL \cdot a \cdot \tau$$

I metodi di valutazione analitica consentono di quantificare il risparmio lordo conseguibile sulla base di un algoritmo di valutazione predefinito e della misura diretta di alcuni parametri di funzionamento del sistema dopo che è stato realizzato l'intervento. L'algoritmo di valutazione, i parametri da misurare e le modalità di misura, nonché i valori dei coefficienti di addizionalità e di durabilità, sono indicati nell'ambito di schede tecniche per la quantificazione dei risparmi. Il risparmio lordo è contabilizzato con riferimento ai valori dei parametri misurati nel corso di un periodo di monitoraggio di lunghezza pari o inferiore a dodici mesi. La quota di risparmio netto integrale riconosciuta si calcola moltiplicando il risparmio lordo per il coefficiente di addizionalità e per il coefficiente di durabilità.

$$RNI = RL \cdot a \cdot \tau$$

I metodi di valutazione a consuntivo consentono di quantificare il risparmio netto conseguibile attraverso uno o più interventi in conformità ad un programma di misura proposto dal soggetto titolare del progetto unitamente ad una descrizione del

progetto medesimo. Il risparmio netto integrale riconosciuto è quindi pari al prodotto del risparmio netto misurato e del coefficiente di durabilità.

$$RNI = RN \cdot \tau$$

I progetti standardizzati devono avere una dimensione tale da permettere il riconoscimento di una quota di risparmio netto integrale non inferiore a 20 tep/anno.

I progetti analitici devono aver generato nel corso del periodo di riferimento una quota di risparmio netto integrale non inferiore a 40 tep.

I progetti a consuntivo devono aver generato nel corso dei primi dodici mesi della misura una quota di risparmio netto integrale non inferiore a 60 tep.

Per tutti i metodi di valutazione dell'RNI, i risparmi conseguiti si contabilizzano per un numero di anni pari a quelli di vita utile U dell'intervento.

In seguito si riportano le tabelle con i valori standard assegnati dai decreti ministeriali stessi di vita utile U, vita tecnica T e coefficiente di durabilità τ utilizzati per interventi di sostituzione di lampade tradizionali con lampade LED. In particolare il coefficiente τ cambia se l'intervento prevede l'applicazione di dispositivi per l'efficientamento di impianti esistenti (retrofit) o se l'intervento prevede l'installazione di nuovi impianti efficienti oppure la riprogettazione completa di impianti esistenti (new).

Esempio di intervento	U	T	τ
Realizzazione di impianti di illuminazione pubblica ad alta efficienza in aree precedentemente non illuminate	5	15	2,65

Tabella 6: IPUB-NEW. Illuminazione pubblica: nuovi impianti efficienti o rifacimento completo degli esistenti

Esempio di intervento	U	T	τ
Sostituzione di corpi illuminanti con altri ad alta efficienza	5	10	1,87
Installazione di sistemi automatici di accensione, spegnimento e regolazione dell'intensità (sistemi di rilevazione presenze, di illuminazione naturale, crepuscolari, ecc.)			

Tabella 7: IPUB-RET. Illuminazione pubblica: applicazione di dispositivi per l'efficientamento di impianti esistenti (retrofit)

Esempio di intervento	U	T	τ
	5	15	2,65

Tabella 8: IPRIV-NEW. Illuminazione privata: nuovi impianti efficienti o riprogettazione completa di impianti esistenti

Esempio di intervento	U	T	τ
Sostituzione di sorgenti luminose con altre ad alta efficienza e lunga durata	5	10	1,87
Installazione di sistemi automatici di accensione, spegnimento e regolazione dell'intensità (sistemi di rilevazione presenze, di illuminazione naturale, crepuscolari, ecc.)			

Tabella 9: IPRIV-RET. Illuminazione privata: applicazione di dispositivi per l'efficientamento di impianti esistenti (retrofit)

1.4.2 - IL SETTORE DELL'AGRICOLTURA

Secondo i dati riportati nel RAEE 2012 (Rapporto Annuale sull'Efficienza Energetica) elaborato dall'ENEA, i consumi energetici finali interni complessivi di energia (termica ed elettrica) per il settore agricoltura sono stati pari a 5,2 Mtep, di cui:

- 3 Mtep per le attività relative all'irrigazione, alla lavorazione terra, all'elettricità e ai processi di essiccazione
- ulteriori 2,25 Mtep per il consumo di combustibili, fitosanitari, fertilizzanti e plastica per le serre e la pacciamatura delle coltivazioni.

I consumi di energia elettrica per uso agricolo risultano complessivamente di 5,61 TWh, pari all'1,81% del bilancio elettrico nazionale nel 2010. Più in generale, i consumi totali di energia del sistema agroalimentare (nella sua accezione più ampia di agricoltura, agro-industria e industria alimentare) sono stati valutati in 16,31 Mtep.

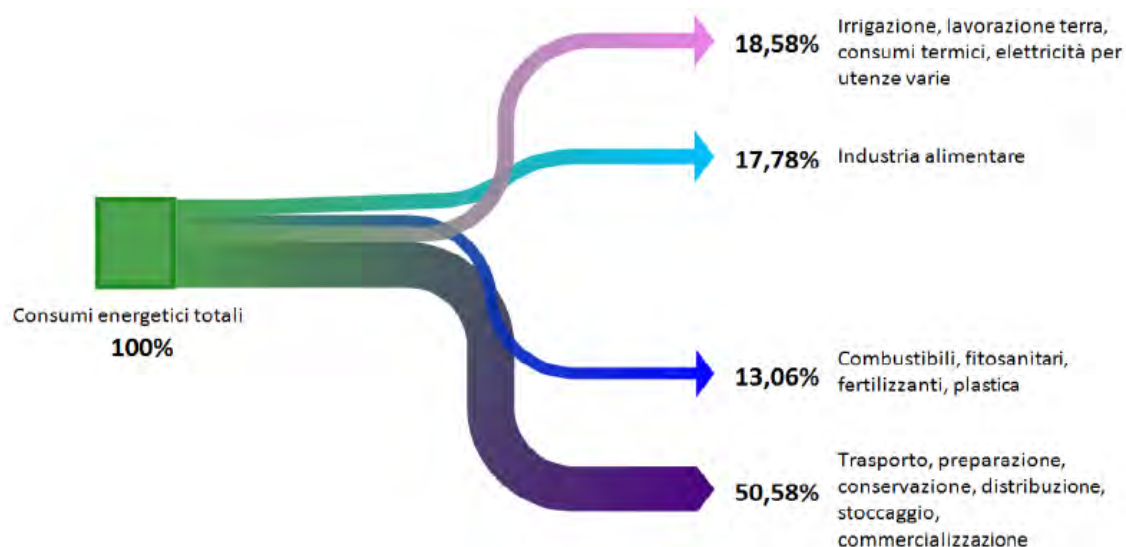


Figura 17: Flussi energetici del sistema agro-alimentare (agricoltura, agro-industria, industria alimentare) (ENEA, RAEE 2012-2013)

1.4.3 - CERTIFICATI BIANCHI E ILLUMINAZIONE ARTIFICIALE CON TECNOLOGIA LED

Il comparto orto-floro-vivaistico in particolar modo, tra pieno campo e coltura protetta, interessa circa 40.000 aziende in Italia (tra serre, grandi tunnel e piccoli tunnel) con volumi economici di oltre 3 miliardi di Euro in termini di produzione lorda vendibile, con un numero di occupati superiore alle 100.000 unità (dati ISTAT del 6° Censimento, 2010). Di particolare importanza per la filiera dei sistemi serra, ai fini della competizione commerciale con i Paesi del Nord-Europa (Olanda, Germania), risulta il controllo microclimatico della serra che, tuttavia, sebbene migliori significativamente i cicli colturali e la qualità delle produzioni, risulta ancora poco diffuso a causa del costo energetico elevato, soprattutto a causa dell'illuminazione artificiale. Per tale intervento, si impiegano lampade con tubi mercurio fluorescenti o lampade al sodio, con potenze spesso superiori ai 400 W.

Ambienti protetti	Consumo totale per l'illuminazione (tep)	Risparmio totale (tep)
Serre florovivaistiche	169.811	50.943
Ricoveri animali	55.690	16.707

(*) Stima su 500 ha di serre, 85 PAR W/m² e 900 ore di illuminazione/anno.

Tabella 10: Utilizzo dei LED. Consumo energetico annuo per l'illuminazione degli ambienti protetti (serre, ambienti di lavoro aziendali)

L'algoritmo per il calcolo dei risparmi è quello che confronta i consumi scelti come baseline, ovvero i consumi della tecnologia più utilizzata (nel campo della coltivazione con luce artificiale sono le lampade fluorescenti), con quelli misurati nella nuova situazione impiantistica che viene proposta per verificare i risparmi di energia. L'algoritmo proposto si basa sui consumi specifici, che rappresentano la differenza tra il consumo nella configurazione post e quanto avrebbe consumato l'azienda agricola di riferimento per coprire le medesime utenze mediante i sistemi già esistenti in azienda. In particolare per il caso di coltivazione con luce artificiale, la sostituzione di delle lampade usate tradizionalmente nelle serre con lampade LED, comporta un risparmio netto relativo all'energia elettrica calcolabile in questo modo:

$$RN = (C_{e_{baseline}} - C_{e_{post}}) \cdot c \text{ [tep/anno]}$$

In cui:

- $C_{e_{baseline}}$ = Consumo elettrico di baseline [kWh] (in questo caso lampade a fluorescenza);
- $C_{e_{post}}$ = consumo di energia elettrica post-intervento [kWh] (ovvero con le lampade LED);
- $c = 0,187 \cdot 10^{-3}$ [tep/kWh]

CAPITOLO 2

STUDIO DELL'HORTICULTURAL LIGHTING IN ALCUNE COLTURE

2.1 - LATTUGA

L'obiettivo di tale studio è quello di confrontare la crescita della foglia di lattuga in camera di coltivazione attraverso due metodi di illuminazione differenti: la lampada a LED e quella a sodio ad alta pressione (HPS), ovvero lo standard industriale per l'illuminazione nelle coltivazioni indoor.

L'esperimento si svolge facendo crescere 31 piante di lattuga varietà Live Gourmet in camera di coltivazione. Le piante sono disposte in 5 canalette adatte alla coltivazione idroponica con metodo NFT (Nutrient Film Technique) e separate nel centro da una barriera per la luce.



Figura 18: Camera di coltivazione con sistema idroponico, lampade HPS a sinistra e luci LED a destra

Quindi:

- La camera di coltivazione si divide in 2 zone in cui vengono coltivate 15 piante illuminate con lampade HPS EYE HORTILUX 600 W (parte sinistra della camera) e 16 piante illuminate con lampade LED LUMIGROW ES 330 W (parte destra della camera);
- La riserva di acqua fertilizzata necessaria a nutrire le piante è la stessa per entrambe le zone ed ha un pH di circa 5,8;
- La temperatura media della camera è di $22 \pm 7,3$ °C;

- Il sistema idroponico NFT di nutrizione delle piante funziona sempre;
- Il fotoperiodo per la luce è di 16 ore al giorno sia per le HPS che per le lampade LED (accensione delle lampade alle ore 6:00 e spegnimento alle ore 22:00);
- Le piante vengono coltivate per 32 giorni, ovvero il ciclo standard commerciale di crescita.



Figura 19: Le 15 piante di lattuga irraggiate dalle lampade HPS



Figura 20: Le 16 piante di lattuga irrigate da lampade LED

I dati registrati per ogni pianta che verranno utilizzati per comparare la crescita delle piante sono:

- Lunghezza delle radici (pollici);
- Peso (grammi);
- Diametro della pianta (pollici).



Figura 21: Piante di lattuga coltivate con luce LED in alto a sinistra, con HPS in alto a destra e confronto tra le piante diversamente irraggiate in basso

2.1.1 - RISULTATI

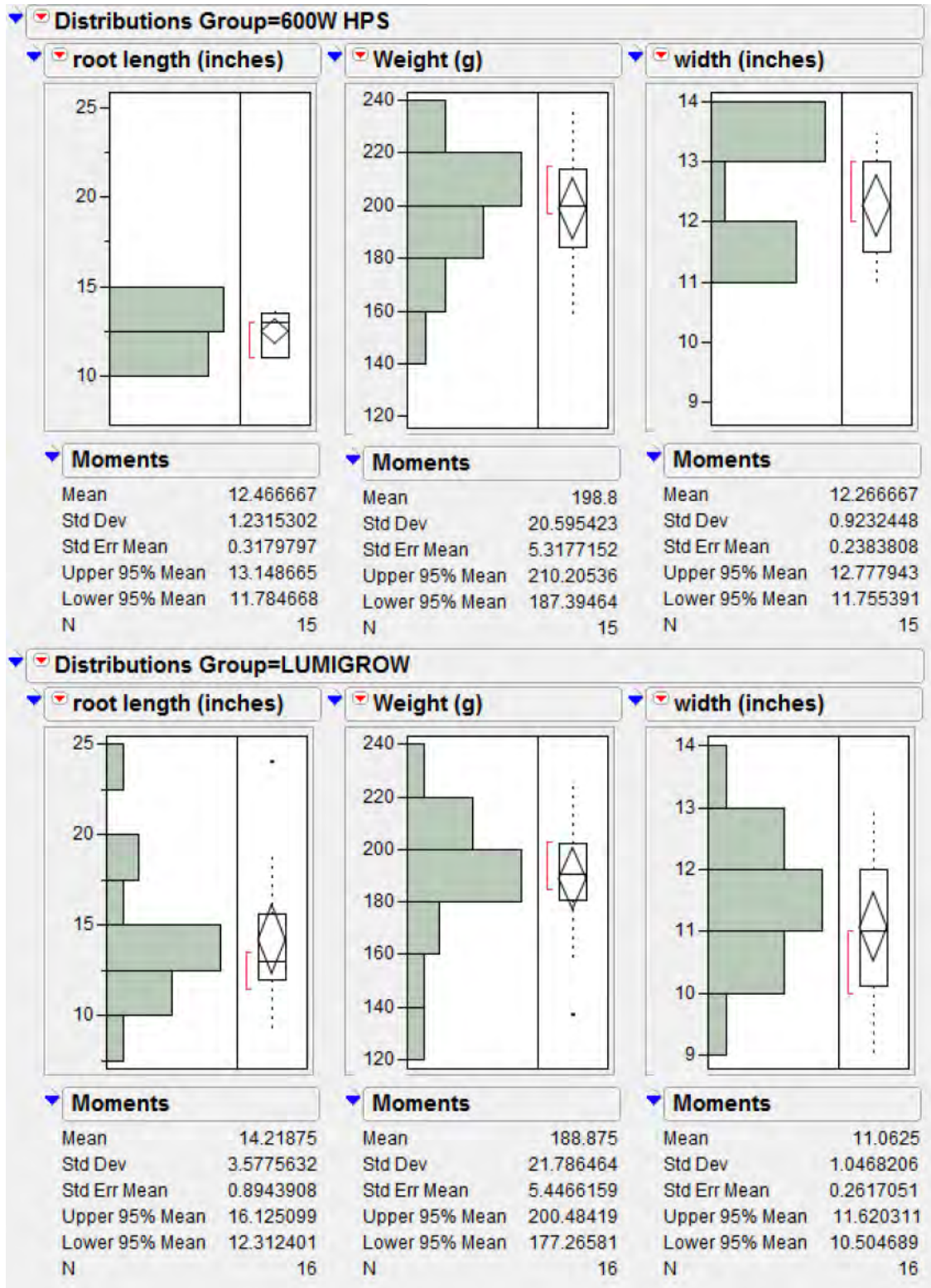


Figura 22: Risultati del confronto tra l'illuminazione della lattuga con luce da LED o HPS

LUNGHEZZA DELLE RADICI: in media le radici delle piante cresciute con illuminazione LED sono più lunghe di quelle delle piante cresciute con illuminazione HPS, ovvero 14,21" e 12,46" rispettivamente. Questa differenza è però statisticamente insignificante.

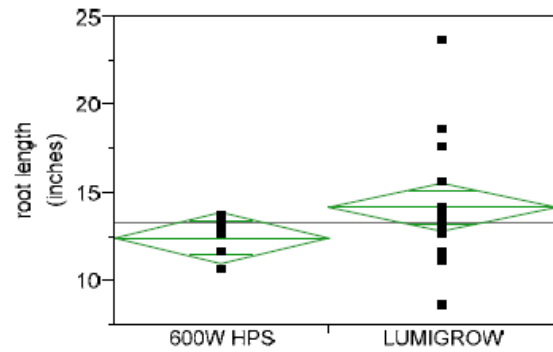


Figura 23: Confronto risultati sulla lunghezza delle radici

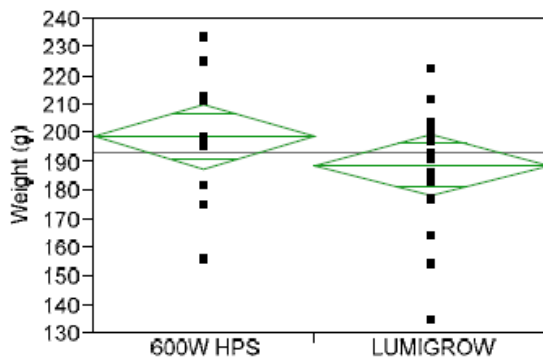


Figura 24: Confronto risultati sul peso

PESO: in media le piante cresciute con le HPS sono 10 grammi più pesanti di quelle cresciute con luce LED (rispettivamente 198,8 g e 188,9 g). Anche in questo caso la differenza è statisticamente insignificante.

DIAMETRO: in media le piante del gruppo LED sono più compatte delle piante del gruppo HPS di 1,2" (11,06" e 12,26" rispettivamente). In questo caso invece la differenza è statisticamente significativa.

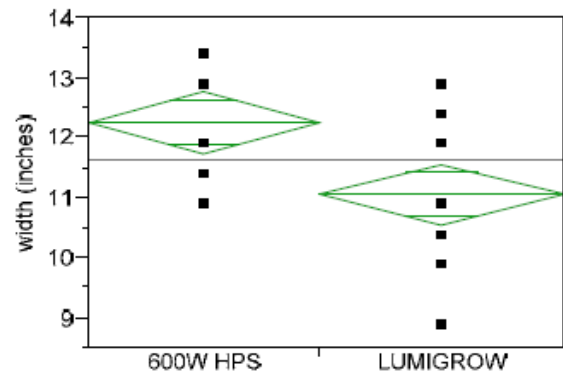


Figura 25: Confronto risultati sul diametro

In conclusione, il trattamento della lattuga con luce a LED ha evidenziato differenze statisticamente significative rispetto al trattamento con lampade HPS soprattutto nel diametro delle piante, oltre che a un notevole risparmio di energia elettrica. In particolare, la lattuga coltivata con luce LED è rimasta più stretta e compatta rispetto a quella coltivata con le tradizionali HPS utilizzate nella coltivazione indoor, di un

diametro medio di 1,2". Non si è invece verificata alcuna differenza significativa tra i trattamenti con luce LED e HPS per la lunghezza delle radici o il peso delle piante.

2.2 - BASILICO

In questo studio sono stati usati dispositivi LED per esaminare gli effetti della variazione del rapporto di luce nelle piante di basilico, coltivate con luce artificiale come unica fonte di illuminazione. Con lo studio dell'effetto di differenti rapporti di luce blu, rossa e bianca nella crescita del basilico, si permette ai coltivatori di variare lo spettro di luce emesso dai LED per guidare la crescita delle piante di basilico e il loro sapore.

Usando apparecchi LED in cui è possibile variare il rapporto di luce blu, rossa e bianca in maniera indipendente, sono state coltivate piante di basilico con cinque trattamenti di luce diversi, ma tutti a $250 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ per un fotoperiodo di 14 ore al giorno. Si sono poi valutate le differenze morfologiche delle piante, del sapore e della fioritura nei 5 diversi trattamenti di luce.

I semi di basilico sono stati piantati in vasi da 4" usando del terriccio normalmente disponibile in commercio, le piante sono state irrigate poi secondo le necessità per mantenere un'adeguata umidità del suolo e sono state fertilizzate se necessario, mantenendo una temperatura media dell'aria di $25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ e un'umidità relativa di circa il 46% per tutto il trattamento. Le piante di basilico sono cresciute in camera di coltivazione con cinque diverse condizioni di luce, variando il rapporto di luce blu e rossa mantenendo costante il livello di luce bianca.

Light treatment	Blue ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	White ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	Red ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)
0% Blue, 0B:20W:230R	0	20	230
8% Blue, 20B:20W:210R	20	20	210
16% Blue, 40B:20W:190R	40	20	190
24% Blue, 60B:20W:170R	60	20	170
32% Blue, 80B:20W:150R	80	20	150

Tabella 11: Densità di flusso fotonico fotosintetico (PPFD) valutata per la luce blu, bianca e rossa nei diversi trattamenti di luce

2.2.1 - RISULTATI

Dopo 63 giorni di crescita delle piante per ogni trattamento, sono stati misurati altezza, peso, diametro dello stelo, numero di rami di ogni pianta ed infine ne è stato testato il sapore.

Light treatment	Averages			
	Height (cm)	Total weight (g)	Stem diameter (mm)	Number of branches
0% Blue, 0B:20W:230R	55,32	62,93	6,48	18,07
8% Blue, 20B:20W:210R	59,29	69,34	7,08	16,17
16% Blue, 40B:20W:190R	60,01	78,93	7,55	15,59
24% Blue, 60B:20W:170R	62,29	76,97	6,67	16,19
32% Blue, 80B:20W:150R	60,13	72,50	6,67	17,73

Tabella 12: Medie di altezza, peso, diametro dello stelo e numero di rami per ogni trattamento dopo 63 giorni

ALTEZZA MEDIA E PESO: in tutti i trattamenti, le differenze di altezza delle piante sono state minime e statisticamente insignificanti. E' interessante notare che il trattamento che ha cresciuto le piante con peso medio più alto è stato quello con luce blu al 16%: la massa infatti è cresciuta con la percentuale di luce blu fino a questo punto, per poi diminuire all'aumentare della luce blu fino al 32%.

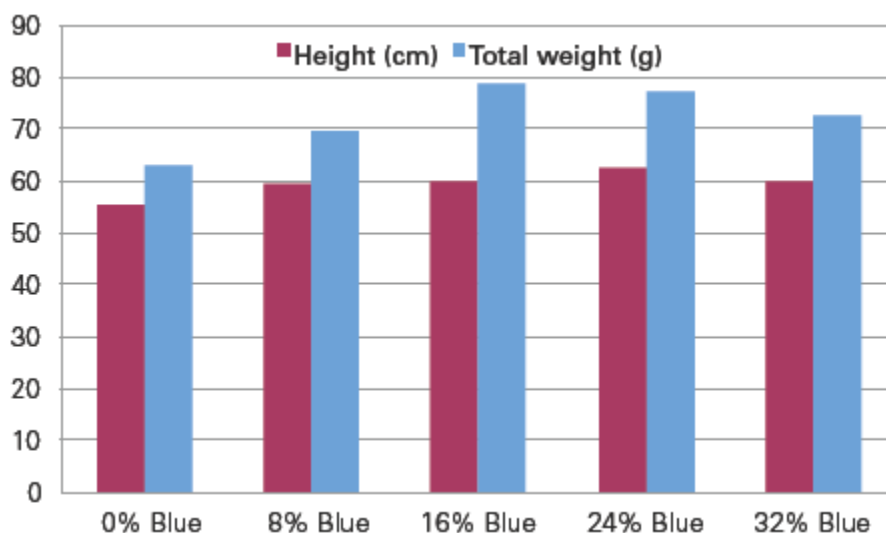


Figura 26: Altezza media e peso delle piante di basilico dopo 63 giorni



Figura 27: Pianta di basilico cresciuta con il 16% di luce blu dopo 63 giorni di trattamento

Per misurare la densità di massa delle piante, è stato confrontato il peso medio della pianta con l'altezza della stessa. Il trattamento con il 16% di luce blu ha avuto la più alta densità di massa.

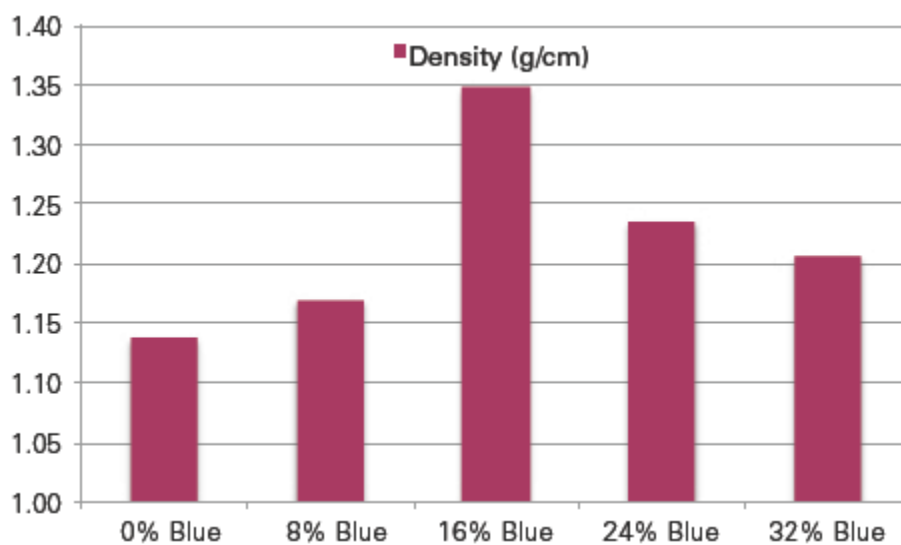


Figura 28: Densità di massa delle piante di basilico per ogni tipo di trattamento

DIAMETRO DELLO STELO E NUMERO DI RAMI: i trattamenti con luce blu all'8% e al 16% sono quelli che hanno cresciuto le piante con le dimensioni dello stelo più grandi. I trattamenti a 0% e 32% sono quelli che hanno cresciuto le piante di basilico con le dimensioni dello stelo più piccole di una quantità significativa rispetto agli altri trattamenti. Inoltre questi ultimi due trattamenti sono quelli che hanno sviluppato

nelle piante un numero di rami più alto, a differenza del trattamento con il 16% di luce blu, che è quello che ha sviluppato il minor numero di rami nella pianta di basilico. I trattamenti a 8% e 24% di luce blu hanno prodotto un simile numero di rami.

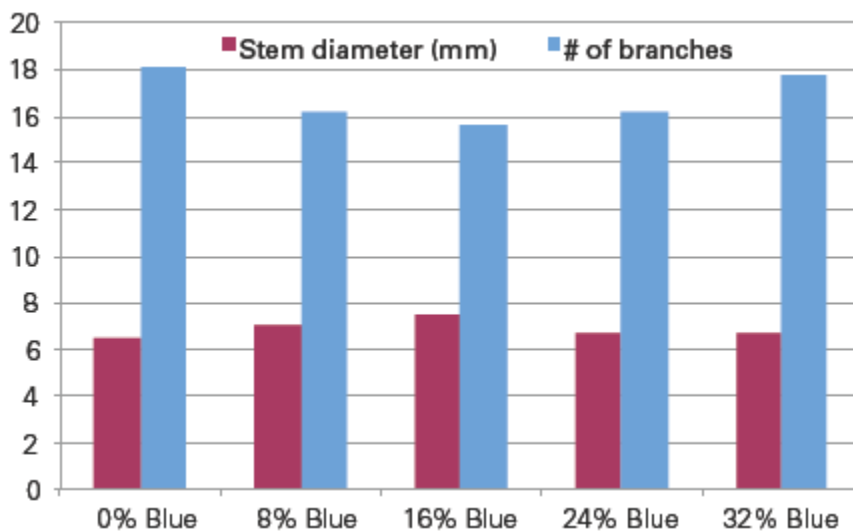


Figura 29: Diametro dello stelo e numero di rami sviluppati per ogni tipo di trattamento

GUSTO E SAPORE: I test effettuati sul gusto hanno prodotto notevoli risultati. Il trattamento con luce blu al 32% ha avuto il più alto punteggio per gusto, aroma e piccantezza, al contrario il basilico descritto come “il più amaro” è stato cresciuto con luce blu al 24%.

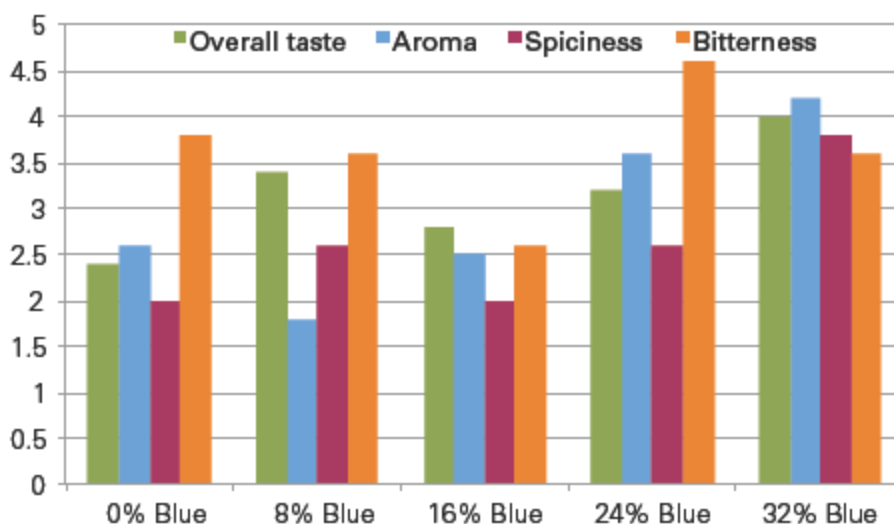


Figura 30: Risultati del test del sapore e del gusto per le piante di basilico coltivate secondo i diversi tipi di trattamento

Anche se non era oggetto dello studio si sono verificati casi di edema su alcune delle piante coltivate con un certo trattamento. Il significato di edema è descritto come l'incapacità delle piante di traspirare l'acqua in maniera abbastanza veloce, formando delle vescicole sulle foglie. Misurando la percentuale di edema in ogni trattamento con diverso rapporto di luce, si è riscontrato che livelli più alti di luce blu riducono la formazione di edema, sottolineando la necessità di introdurre la luce blu nell'horticultural lighting.



Figura 31: Esempio di edema su una foglia di basilico trattata con bassi livelli di luce blu

Un'altra osservazione interessante riguarda la fioritura: in genere i coltivatori cercano di non consentire alla pianta di basilico di fiorire, ma se questo avviene si è osservato che la fioritura aumenta con l'aumento del livello di luce blu, cosa che va in contrasto a ciò che si è osservato in molte altre specie di piante.

In conclusione si può dire che i livelli di luce blu ai quali vengono esposte le piante cambiano la morfologia, il sapore e l'aroma del prodotto finale. Attraverso trattamenti di luce regolabili, i coltivatori possono quindi soddisfare il costante bisogno della domanda di mercato di variare, quindi di accontentare il più possibile i consumatori. In questo studio il miglior basilico per i consumatori è stato coltivato con livelli di luce blu di 8% o 32%. Per i coltivatori, che invece vendono a peso, il livello di luce blu al 16% è quello che ha prodotto le piante con il più alto peso medio. Se invece si valuta il gusto,

il basilico cresciuto con livello di luce blu pari al 32% è quello che è stato valutato come più saporito, più piccante e con il miglior aroma.

Date le diverse risposte di crescita e i diversi profili di sapore prodotti da ogni trattamento, i coltivatori esperti possono sviluppare il proprio programma di luce per personalizzare la propria coltivazione di basilico.

CAPITOLO 3

DIMENSIONAMENTO DI LAMPADE LED PER L'HORTICULTURAL LIGHTING

Ogni coltura ha bisogno di un certo flusso fotonico per crescere in maniera adeguata. Alcuni esempi si possono vedere nella seguente tabella.

Flusso fotonico di crescita [$\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$]	
Violetta africana	150 - 250
Piante da foglia ornamentali	
Garofano	250 - 450
Crisantemo	
Giglio	
Geranio	
Poinsettia	
Cetriolo	
Lattuga	
Fragola	450 - 750
Rosa	
Pomodoro	

Tabella 13: Livelli di luce raccomandati per diverse specie vegetali

Il flusso fotonico che arriva alle piante dipende essenzialmente da 3 fattori:

- Distanza verticale lampada/pianta: il flusso fotonico varia con il quadrato della distanza dalle piante;
- Corrente di pilotaggio dei LED: il flusso fotonico aumenta con correnti più alte ma diminuisce la vita utile del LED;
- Cono d'illuminazione: aumentando l'angolo del cono, a parità di distanza, diminuisce il flusso fotonico che raggiunge le piante. All'interno del cono si ipotizza che il flusso fotonico non scenda sotto il 50% del valore fissato.

3.1 - POMODORO E PEPERONCINO

In particolare si vanno ora a dimensionare le lampade per le coltivazioni di pomodoro e peperoncino. Rispettivamente queste due colture hanno bisogno di un livello di luce compreso tra 450 e 700 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ per il pomodoro e tra 250 e 450 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ per il peperoncino. Il dimensionamento si esegue per il massimo valore di flusso fotonico necessario alla crescita di pomodoro e peperoncino (quindi per 450 e 700 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$).

I dati per cui vogliamo dimensionare le lampade sono:

- Altezza lampada: 1,2 – 3,5 m;
- Corrente di pilotaggio: 350 – 1000 mA;
- Cono d'illuminazione: 80° – 150°

I tipi di LED usati per effettuare la prova si catalogano in base all'angolo del cono d'illuminazione e sono:

- OSLO 80
LD CQ7P deep blue
LH CP7P hyper red;
- OSLO 150
LD CQDP deep blue
LH CPDP hyper red.

Il rapporto di LED LD/LH (luce blu/luce rossa) è pari a 1:8. Si ipotizzano 10% di perdite ottiche e 10% di perdite elettriche.

OSLON SSL® 80
Datasheet
LD CQ7P



OSRAM
Opto Semiconductors

Features:

- **Package:** SMT ceramic package with silicone resin and silicone lens
- **Viewing angle at 50 % I_V :** 80°
- **Color:** 451 nm (deep blue)
- **Radiant Flux:** typ. 600 mW
- **Radiant Efficiency:** typ. 59 %
- **Corrosion Robustness:** Superior Corrosion Robustness

Characteristics ($T_s = 25\text{ °C}$; $I_F = 350\text{ mA}$)

Kennwerte

Parameter Bezeichnung		Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Wavelength at peak emission Wellenlänge d. emittierten Lichtes	(typ.)	λ_{peak}	451	nm
Dominant Wavelength ^{3) page 22} Dominantwellenlänge ^{3) Seite 22}	(min.) (typ.) (max.)	λ_{dom} λ_{dom} λ_{dom}	439 455 461	nm nm nm
Spectral bandwidth at 50% $I_{\text{rel max}}$ Spektrale Bandbreite b. 50% $I_{\text{rel max}}$	(typ.)	$\Delta\lambda$	20	nm
Viewing angle at 50 % I_V Abstrahlwinkel bei 50 % I_V	(typ.)	2ϕ	80	°
Forward voltage ^{4) page 22} Durchlassspannung ^{4) Seite 22}	(min.) (typ.) (max.)	V_F V_F V_F	2.75 2.90 3.25	V V V
Reverse voltage Sperrspannung ($I_R = 20\text{ mA}$)	(max.)	V_R	1.2	V
Real thermal resistance junction / solder point ^{5) page 22}	(typ.) (max.)	$R_{\text{th JS real}}$ $R_{\text{th JS real}}$	9.6 10.8	K/W K/W
Realer Wärmewiderstand Sperrschicht / Lötspad ^{5) Seite 22}				
"Electrical" thermal resistance junction / solder point ^{5) page 22}	(typ.) (max.)	$R_{\text{th JS el}}$ $R_{\text{th JS el}}$	3.9 4.4	K/W K/W
"Elektrischer" Wärmewiderstand Sperrschicht / Lötspad ^{5) Seite 22} (with efficiency $\eta_e = 59\text{ %}$)				

Figura 32: Caratteristiche OSLON 80 LD CQ7P

OSLON SSL® 80
Datasheet
LH CP7P



OSRAM
 Opto Semiconductors

Features:

- **Package:** SMT ceramic package with silicone resin and silicone lens
- **Viewing angle at 50 % I_V :** 80°
- **Color:** 660 nm (hyper red)
- **Radiant Flux:** typ. 365 mW
- **Radiant Efficiency:** typ. 50 %
- **Corrosion Robustness:** Superior Corrosion Robustness
- **Lumen Maintenance:** Test results according to IESNA LM-80 available

Characteristics ($T_S = 25\text{ °C}$; $I_F = 350\text{ mA}$)

Kennwerte

Parameter Bezeichnung		Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Wavelength at peak emission Wellenlänge d. emittierten Lichtes	(typ.)	λ_{peak}	660	nm
Centroid Wavelength Zentrumswellenlänge	(min.)	λ_{centr}	646	nm
	(typ.)	λ_{centr}	657	nm
	(max.)	λ_{centr}	666	nm
Dominant Wavelength ^{3) page 22} Dominantwellenlänge ^{3) Seite 22}	(typ.)	λ_{dom}	640	nm
Spectral bandwidth at 50% $I_{\text{rel max}}$ Spektrale Bandbreite b. 50% $I_{\text{rel max}}$	(typ.)	$\Delta\lambda$	25	nm
Viewing angle at 50 % I_V Abstrahlwinkel bei 50 % I_V	(typ.)	2ϕ	80	°
Forward voltage ^{4) page 22} Durchlassspannung ^{4) Seite 22}	(min.)	V_F	1.80	V
	(typ.)	V_F	2.10	V
	(max.)	V_F	2.60	V
Reverse voltage Sperrspannung ($I_R = 20\text{ mA}$)	(max.)	V_R	1.2	V
Real thermal resistance junction / solder point ^{5) page 22} Realer Wärmewiderstand Sperrschicht / Lötpad ^{5) Seite 22}	(typ.)	$R_{\text{th JS real}}$	9.6	K/W
	(max.)	$R_{\text{th JS real}}$	10.8	K/W
"Electrical" thermal resistance junction / solder point ^{5) page 22} "Elektrischer" Wärmewiderstand Sperrschicht / Lötpad ^{5) Seite 22} (with efficiency $\eta_e = 50\text{ %}$)	(typ.)	$R_{\text{th JS el}}$	4.8	K/W
	(max.)	$R_{\text{th JS el}}$	5.4	K/W

Figura 33: Caratteristiche OSLON 80 LH CP7P

OSLON SSL® 150
Datasheet
LD CQDP



Features:

- **Package:** SMT ceramic package with silicone resin and silicone lens
- **Viewing angle at 50 % I_V:** 150°
- **Color:** 451 nm (deep blue)
- **Radiant Flux:** typ. 600 mW
- **Radiant Efficiency:** typ. 59 %
- **Corrosion Robustness:** Superior Corrosion Robustness

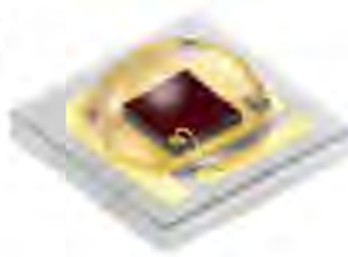
Characteristics (T_S = 25 °C; I_F = 350 mA)

Kennwerte

Parameter Bezeichnung	Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Wavelength at peak emission Wellenlänge d. emittierten Lichtes	(typ.) λ _{peak}	451	nm
Dominant Wavelength ^{3) page 22} Dominantwellenlänge ^{3) Seite 22}	(min.) λ _{dom} (typ.) λ _{dom} (max.) λ _{dom}	439 455 461	nm nm nm
Spectral bandwidth at 50% I _{rel max} Spektrale Bandbreite b. 50% I _{rel max}	(typ.) Δλ	20	nm
Viewing angle at 50 % I _V Abstrahlwinkel bei 50 % I _V	(typ.) 2φ	150	°
Forward voltage ^{4) page 22} Durchlassspannung ^{4) Seite 22}	(min.) V _F (typ.) V _F (max.) V _F	2.75 2.90 3.25	V V V
Reverse voltage Sperrspannung (I _R = 20 mA)	(max.) V _R	1.2	V
Real thermal resistance junction / solder point ^{5) page 22}	(typ.) R _{th JS real} (max.) R _{th JS real}	9.6 10.8	K/W K/W
Realer Wärmewiderstand Sperrschicht / Lötpad ^{5) Seite 22}			
"Electrical" thermal resistance junction / solder point ^{5) page 22}	(typ.) R _{th JS el} (max.) R _{th JS el}	3.9 4.4	K/W K/W
"Elektrischer" Wärmewiderstand Sperrschicht / Lötpad ^{5) Seite 22} (with efficiency η _e = 59 %)			

Figura 34: Caratteristiche OSLON 150 LD CQDP

OSLON SSL® 150
Datasheet
LH CPDP



OSRAM
Opto Semiconductors

Features:

- **Package:** SMT ceramic package with silicone resin and silicone lens
- **Viewing angle at 50 % I_V:** 150°
- **Color:** 660 nm (hyper red)
- **Radiant Flux:** typ. 365 mW
- **Radiant Efficiency:** typ. 50 %
- **Corrosion Robustness:** Superior Corrosion Robustness
- **Lumen Maintenance:** Test results according to IESNA LM-80 available

Characteristics (T_S = 25 °C; I_F = 350 mA)

Kennwerte

Parameter Bezeichnung	Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Wavelength at peak emission Wellenlänge d. emittierten Lichtes (typ.)	λ_{peak}	660	nm
Centroid Wavelength Zentrumswellenlänge (min.) (typ.) (max.)	λ_{centr}	646	nm
	λ_{centr}	657	nm
	λ_{centr}	666	nm
Dominant Wavelength ^{3) page 22} Dominantwellenlänge ^{3) Seite 22} (typ.)	λ_{dom}	640	nm
Spectral bandwidth at 50% I _{rel max} Spektrale Bandbreite b. 50% I _{rel max} (typ.)	$\Delta\lambda$	25	nm
Viewing angle at 50 % I _V Abstrahlwinkel bei 50 % I _V (typ.)	2φ	150	°
Forward voltage ^{4) page 22} Durchlassspannung ^{4) Seite 22} (min.) (typ.) (max.)	V _F	1.80	V
	V _F	2.10	V
	V _F	2.60	V
Reverse voltage Sperrspannung (I _R = 20 mA) (max.)	V _R	1.2	V
Real thermal resistance junction / solder point ^{5) page 22} (typ.) (max.) Realer Wärmewiderstand Sperrschicht / Lötpad ^{5) Seite 22}	R _{th JS real}	9.6	K/W
	R _{th JS real}	10.8	K/W
"Electrical" thermal resistance junction / solder point ^{5) page 22} (typ.) (max.) "Elektrischer" Wärmewiderstand Sperrschicht / Lötpad ^{5) Seite 22} (with efficiency η _e = 50 %)	R _{th JS el}	4.8	K/W
	R _{th JS el}	5.4	K/W

Figura 35: Caratteristiche OSLON 150 LH CPDP

**Maximum Ratings
Grenzwerte**

Parameter Bezeichnung	Symbol Symbol	Values Werte	Unit Einheit
Operating temperature range Betriebstemperatur	T_{op}	-40 ... 120	°C
Storage temperature range Lagertemperatur	T_{stg}	-40 ... 120	°C
Junction temperature absolute * Sperrschichttemperatur absolut *	$T_{j, abs}$	160	°C
Junction temperature Sperrschichttemperatur	T_j	135	°C
Forward current Durchlassstrom ($T_s = 25$ °C)	I_F	100 ... 1000	mA
Surge current Stoßstrom	I_{FM}	2000	mA
Reverse current ^{2) page 22} Sperrstrom ^{2) Seite 22}	I_R	200	mA
ESD withstand voltage ESD Festigkeit (acc. to ANSI/ESDA/JEDEC JS-001 - HBM, Class 3B)	V_{ESD}	8	kV

Figura 36: Valori massimi LED OSLON

3.1.1 - RISULTATI

I risultati per le varie configurazioni di funzionamento e per le diverse colture sono i seguenti:

3.1.1.1 - Peperoncino

LED	Corrente Pilotata	lm/ LED	Angolo Cono	Altezza	lx/ lm	Flusso fotonico necessario per 450 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$	Numero di LED necessari	Numero di LED per lampada
LHCP7P	350 mA	355	80°	1,2 m	0,398	1130,7 $\mu\text{mol}/\text{s}$	591	664
LDCQ7P		535					73	
LHCP7P		355		3,5 m	0,047	9574,5 $\mu\text{mol}/\text{s}$	5005	5621
LDCQ7P		535					616	
LHCP7P	1 A	931	80°	1,2 m	0,398	1130,7 $\mu\text{mol}/\text{s}$	225	256
LDCQ7P		1270					31	
LHCP7P		931		3,5 m	0,047	9574,5 $\mu\text{mol}/\text{s}$	1908	2167
LDCQ7P		1270					259	

Tabella 14: prova con OSLON 80

LED	Corrente Pilotata	lm/ LED	Angolo Cono	Altezza	lx/ lm	Flusso fotonico necessario per 450 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$	Numero di LED necessari	Numero di LED per lampada
LHCPDP	350 mA	355	150°	1,2 m	0,167	2694,6 $\mu\text{mol}/\text{s}$	1408	1581
LDCQDP		535					173	
LHCPDP		355		3,5 m			11761	13208
LDCQDP		535					1447	
LHCPDP	1 A	931	150°	1,2 m	0,167	2694,6 $\mu\text{mol}/\text{s}$	537	610
LDCQDP		1270					73	
LHCPDP		931		3,5 m			4484	5094
LDCQDP		1270					610	

Tabella 15: Prova con OSLON 150

3.1.1.2 - Pomodoro

LED	Corrente Pilotata	lm/ LED	Angolo Cono	Altezza	lx/ lm	Flusso fotonico necessario per 700 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$	Numero di LED necessari	Numero di LED per lampada
LHCP7P	350 mA	355	80°	1,2 m	0,398	1758,8 $\mu\text{mol}/\text{s}$	919	1032
LDCQ7P		535					113	
LHCP7P		355		3,5 m			7785	8770
LDCQ7P		535					985	
LHCP7P	1 A	931	80°	1,2 m	0,398	1758,8 $\mu\text{mol}/\text{s}$	351	399
LDCQ7P		1270					48	
LHCP7P		931		3,5 m			2968	3372
LDCQ7P		1270					404	

Tabella 16: prova con OSLON 80

LED	Corrente Pilotata	lm/ LED	Angolo Cono	Altezza	lx/ lm	Flusso fotonico necessario per 450 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$	Numero di LED necessari	Numero di LED per lampada
LHCPDP	350 mA	355	150°	1,2 m	0,167	4191,6 $\mu\text{mol}/\text{s}$	2191	2461
LDCQDP		535					270	
LHCPDP		355		3,5 m			18294	20545
LDCQDP		535					2251	
LHCPDP	1 A	931	150°	1,2 m	0,167	4191,6 $\mu\text{mol}/\text{s}$	835	949
LDCQDP		1270					114	
LHCPDP		931		3,5 m			6976	7954
LDCQDP		1270					978	

Tabella 17: Prova con OSLON 150

3.1.2 - OSSERVAZIONI

Si può vedere dai risultati che la configurazione ottimale, ovvero la soluzione che prevede l'impiego del minor numero di LED, è quella che utilizza LED OSOLON 80 (sia Deep Blue che Hyper Red) con corrente pilotata a 1 A e posizionati ad un'altezza di 1,2 m. Viceversa la configurazione peggiore è quella che utilizza LED OSOLON 150 con corrente pilotata a 350 mA e posizionati a 3,5 m. La configurazione che prevede l'utilizzo di OSOLON 150 prevede infatti un numero di LED circa 2,4 volte superiore a quella che prevede l'uso di OSOLON 80. Si può quindi affermare che per ben dimensionare una lampada in modo tale che la pianta riceva il flusso fotonico fissato, bisogna che:

- Angolo di ampiezza del cono di luce sia il più piccolo possibile;
- Corrente pilotata del LED sia più alta possibile;
- Distanza della lampada dalla pianta sia più piccola possibile.

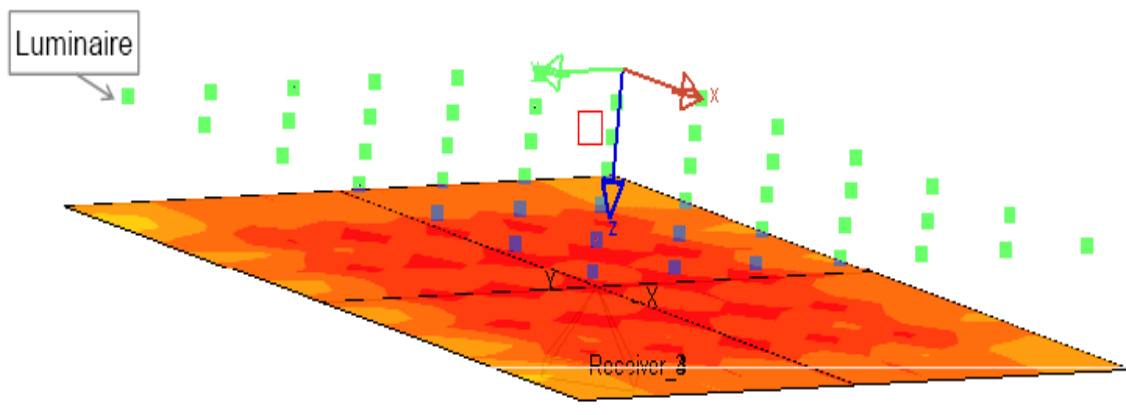
Questo è comunque il caso in cui bisogna fornire totalmente il flusso fotonico di luce necessario alla pianta per crescere. Se invece si coltiva all'aperto, o comunque in luoghi in cui è necessario integrare il flusso fotonico che la pianta già riceve, le lampade saranno più piccole e quindi dotate di un numero di LED meno proibitivo rispetto a quello appena calcolato. Inoltre, nella pratica, se bisogna fornire totalmente il flusso fotonico di luce alle piante, quindi se si coltiva in celle buie come avviene nei calcoli precedenti, il flusso fotonico medio necessario per ottenere risultati comunque soddisfacenti è molto minore di quello teorico.

3.2 - STUDIO ILLUMINOTECNICO COLTIVAZIONE PEPERONCINO

La dipendenza del flusso fotonico dall'altezza delle sorgenti di luce è meglio verificabile graficamente, attraverso software per lo studio illuminotecnico.

Si ipotizza di voler illuminare un'area 10x10m con lampade formate da LED OSOLON 80; si assume che tali lampade siano puntiformi. Le lampade sono disposte in 7 righe per 7 colonne distanti tra di loro 1,5 m. Si procede quindi con lo studio illuminotecnico di due casi diversi, uno con le lampade poste a 1,2 m di altezza e l'altro con lampade a 3,5 m. Il flusso fotonico da raggiungere nell'area illuminata è di $450 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$: si suppone quindi di voler coltivare del peperoncino su un'area di 100 m^2 .

3.2.1 - CASO 1



Area	: 10meter X 10meter
LED	: OSOLON 80
Luminaire array	: 7 rows and 7 columns
Array Pitch	: X:1.5meter, Y1.5meter
Total # luminaire	: 49
Luminaire mounting distance	: 1.2meter

Figura 37: Disposizione lampade e dati

Potenza Lampada: 188 W

Numero di LED per ogni lampada:

- 500 LED se pilotati a 350 mA
- 194 LED se pilotati a 1 A

Numero totale di LED:

- $500 \times 49 = 24500$ se pilotati a 350 mA
- $194 \times 49 = 9506$ se pilotati a 1 A

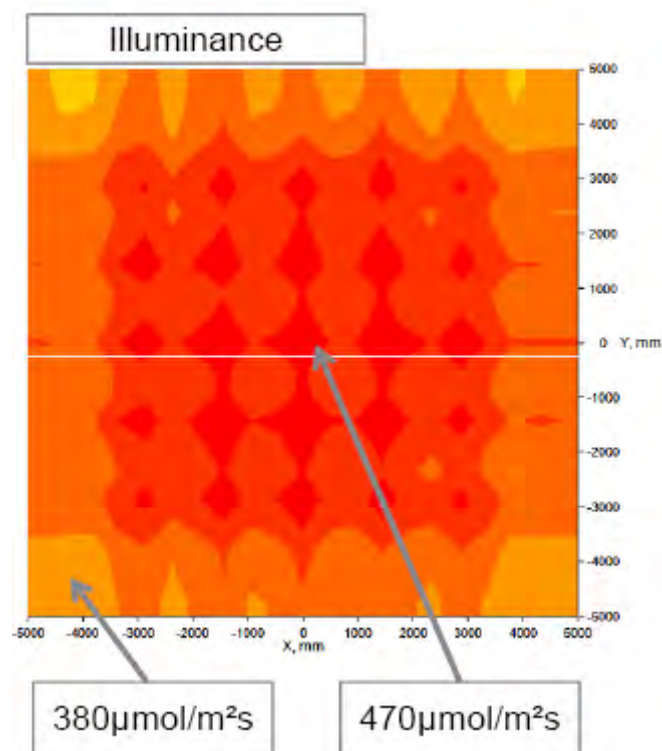
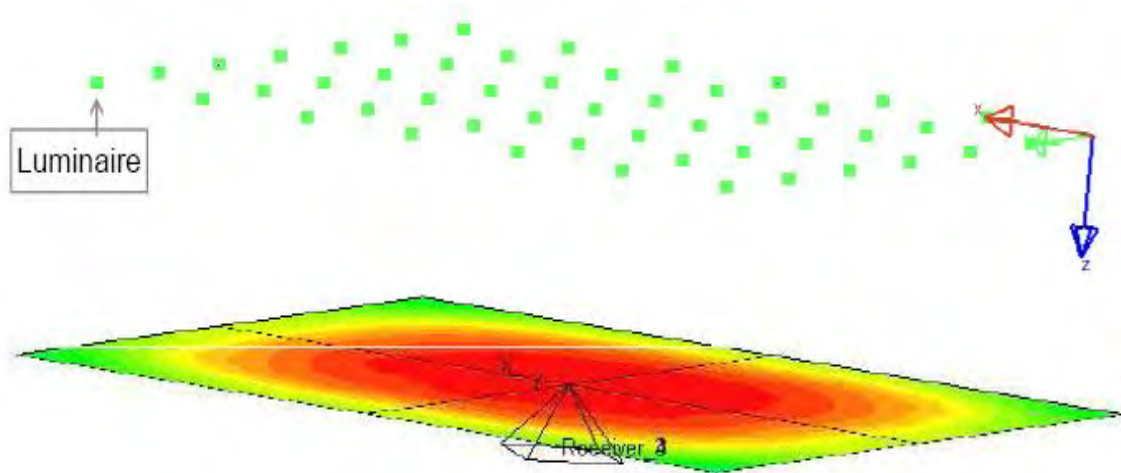


Figura 38: Rappresentazione della distribuzione di flusso fotonico sulla superficie

3.2.2 - CASO 2



Area	: 10meter X 10meter
LED	: OSOLON 80
Luminaire array	: 7 rows and 7 columns
Array Pitch	: X:1.5meter, Y1.5meter
Total # luminaire	: 49
Luminaire mounting distance	: 3.5meter

Figura 39: Disposizione lampade e dati

Potenza Lampada: 225 W

Numero di LED per ogni lampada:

- 600 LED se pilotati a 350 mA
- 233 LED se pilotati a 1 A

Numero totale di LED:

- $600 \times 49 = 29400$ se pilotati a 350 mA
- $233 \times 49 = 11417$ se pilotati a 1 A

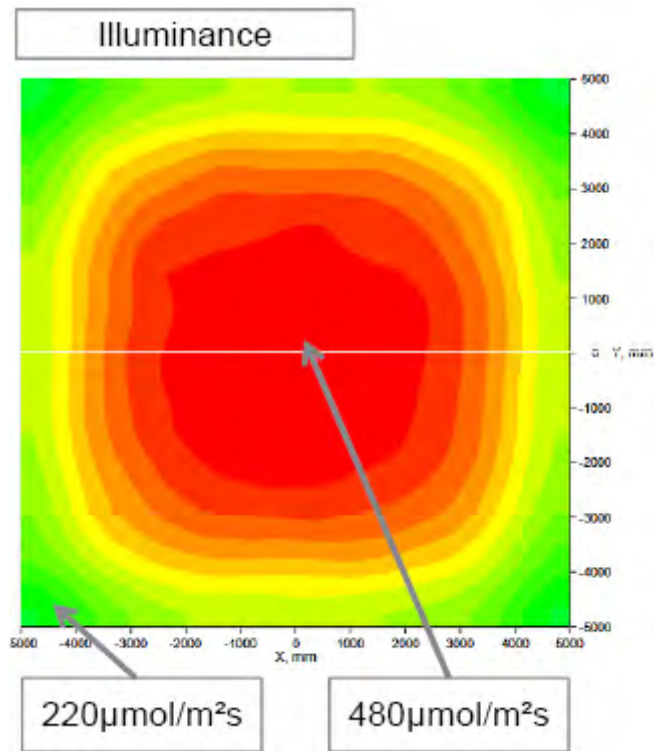


Figura 40: Rappresentazione della distribuzione di flusso fotonico sulla superficie

3.2.3 - OSSERVAZIONI

La distribuzione di flusso fotonico risulta essere più omogenea nel caso in cui le lampade sono posizionate a 1,2 m: spostandosi verso gli estremi dell'area considerata infatti si ha un minore decremento del flusso fotonico rispetto al caso in cui le lampade sono posizionate a 3,5 m. Inoltre se si aumenta l'altezza aumenta la potenza di ogni lampada, quindi il numero di LED utili a garantire le $450 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ necessarie alla crescita del peperoncino.

Anche se si sceglie la miglior configurazione delle lampade, il numero di LED totale da utilizzare rimane ancora proibitivo: a 1,2 m e pilotando i LED a 1 A infatti sono necessari 9506 LED per illuminare 100 m^2 , questo significa che servirebbero $950 \text{ LED}/\text{m}^2$.

CAPITOLO 4

CASO PRATICO DI HORTICULTURAL LIGHTING CON LAMPADE LED

Si procede ora allo studio di un caso pratico, in cui si è richiesto l'intervento di Munari Rinnovabili S.R.L. per sostituire lampade sodio ad alta pressione (HPS) con lampade LED per l'horticultural lighting. Munari Rinnovabili S.R.L. è una società di servizi energetici che studia soluzioni innovative al fine di risparmiare energia, inoltre progetta e installa impianti per la produzione di energia da fonti rinnovabili.

4.1 - BIOPLANET

L'azienda BIOPLANET di Cesena, si occupa dell'allevamento di insetti utili all'agricoltura: tali insetti sono utili per la difesa biologica delle colture in alternativa a metodi di difesa fondati sulla chimica. L'allevamento di tali insetti avviene in "piante a foglia larga" situate all'interno di celle a temperatura controllata e illuminate da luce artificiale. L'illuminazione delle piante è affidata a lampade HPS SON T di potenza 400 W che ne assicurano un'ottima crescita. L'intervento richiesto ha come obiettivo finale quello di sostituire le lampade HPS con le più efficienti lampade LED al fine di:

- Ridurre i consumi di energia elettrica;
- Migliorare il controllo del processo di crescita delle piante senza però danneggiare gli insetti e compromettere la loro crescita;
- Acquisire certificati bianchi.

4.1.1 - LA CELLA DI PROVA: SITUAZIONE ANTE-OPERA

L'azienda si compone di 20 celle di coltivazione a temperatura controllata, per un totale di 80 lampade HPS da 400 W in tutto lo stabilimento. Nella seguente pianta, nella quale non si vedono tutte le celle presenti nell'azienda, è stata evidenziata la cella in cui si sono svolte le prove di accrescimento delle piante con le luci LED.

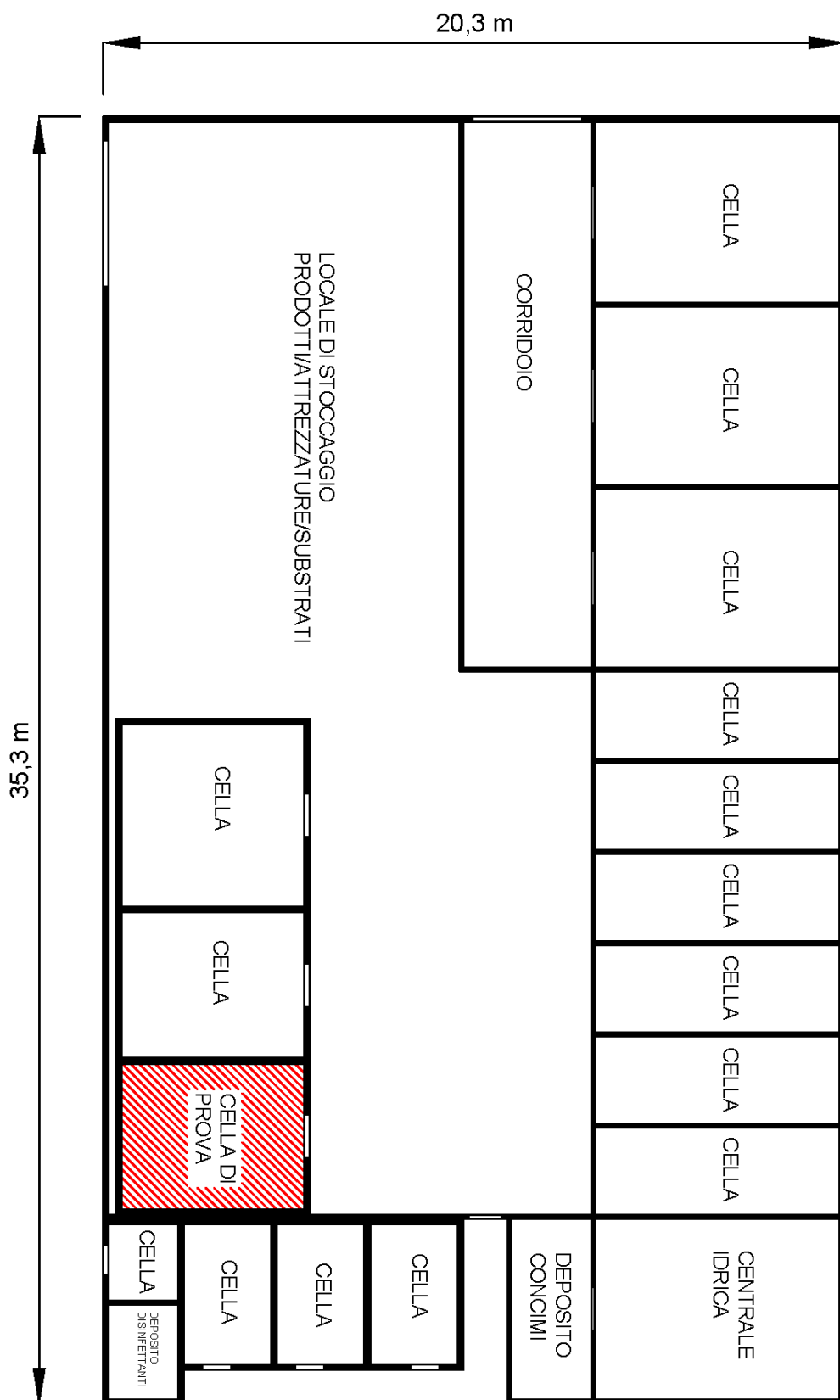


Figura 41: Pianta capannone BIOPLANET con evidenziata la cella di prova. Misure non in scala

Di seguito si può vedere la situazione ante-opera all'interno della cella di prova. La cella, di dimensioni 4x5 m e alta 2,70 m, è dotata di 4 lampade SON T da 400 W poste a 2 m circa di altezza dalla pianta, ciascuna posizionata come in figura. Le piante crescono su un substrato di perlite all'interno di un bancalino largo 28 cm.

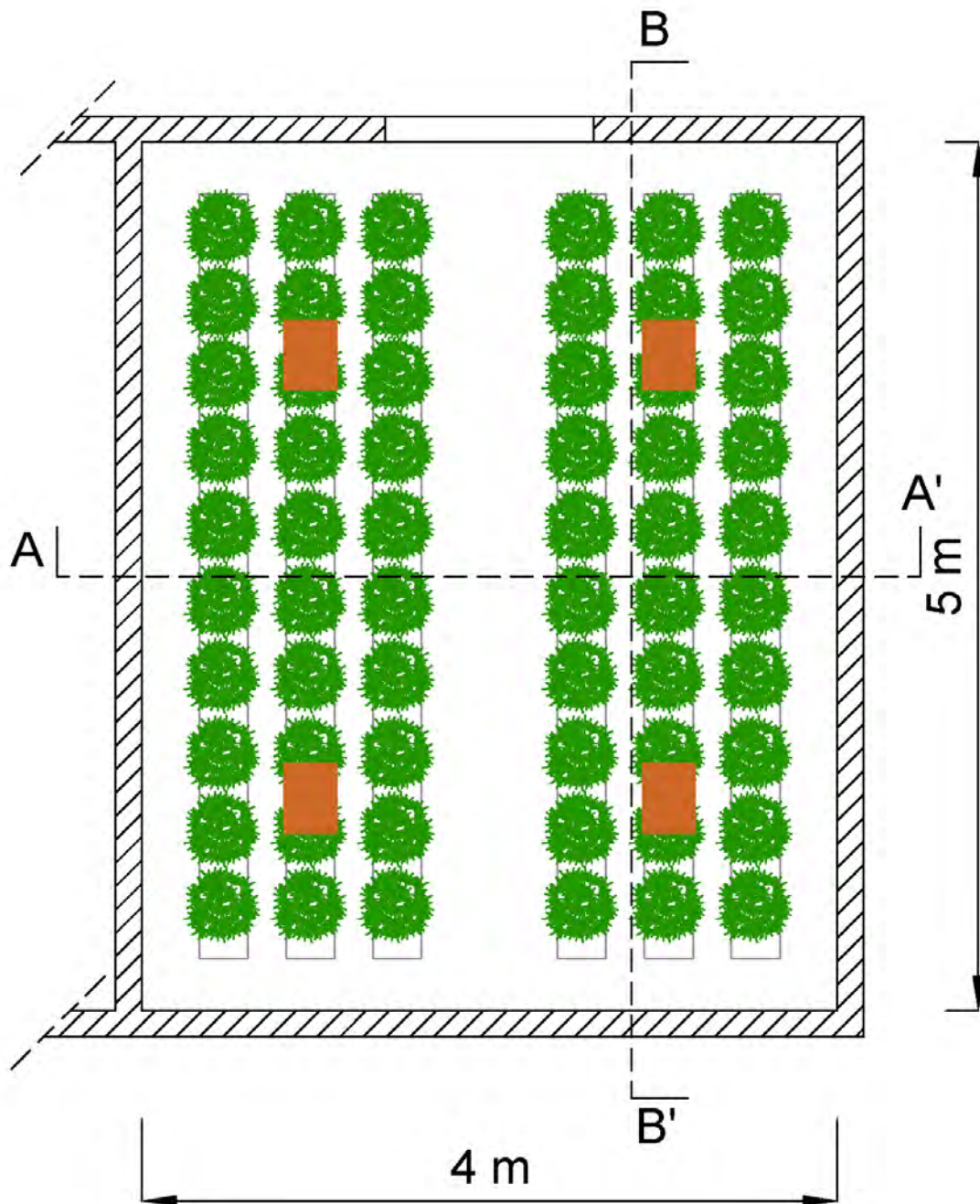


Figura 42: Cella di prova ante-opera. Misure non in scala

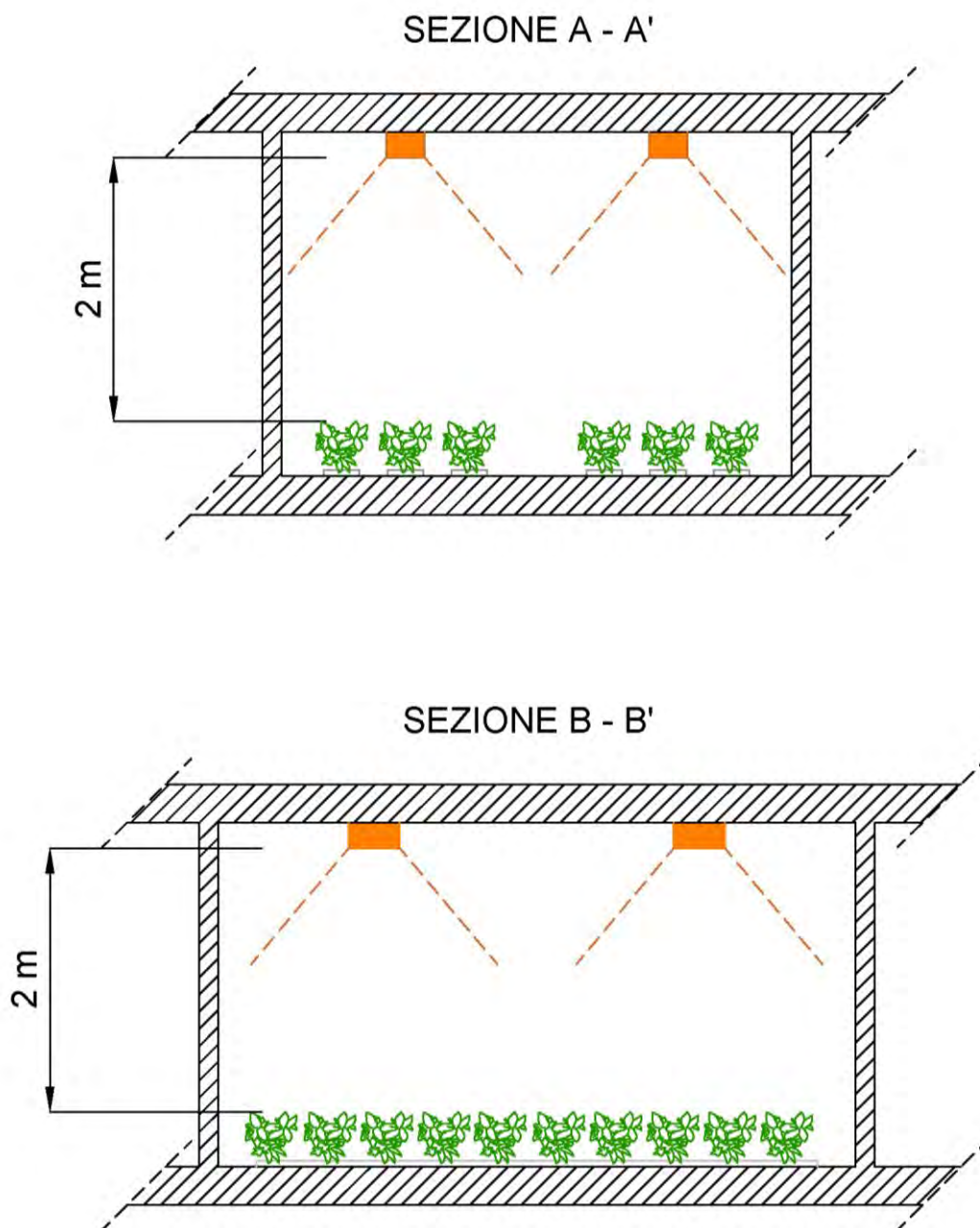


Figura 43: Sezione cella di prova ante-opera. Misure non in scala



Figura 44: La cella di prova ante-opera. Le lampade HPS sono circondate da una retina



Figura 45: Dettaglio lampada HPS SON T

4.1.1.1 - Misura del flusso fotonico ante-opera

Secondo la letteratura, queste “piante a foglia larga” hanno bisogno di un flusso fotonico compreso tra 250 - 450 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ per crescere correttamente. Al fine di verificare il flusso fotonico fornito dalle lampade HPS, è stato utilizzato lo strumento in figura per verificare il livello di luce ricevuto dalle piante.



Figura 46: Strumento di misura del flusso fotonico con il relativo sensore

Con non poca sorpresa si è riscontrato che le lampade HPS forniscono alle piante un valore di flusso fotonico compreso tra 30 - 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$. Questo significa che le piante crescono lo stesso anche con valori di flusso fotonico nettamente inferiori rispetto a quanto la letteratura dichiara.

Si può quindi osservare che le piante crescono lo stesso e molto bene fornendo circa 30 - 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ alle stesse, a discapito però di una crescita più lenta.

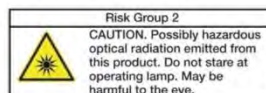
Attraverso la collaborazione di OSRAM e di uno studio di progettazione specializzato in lampade, è stata progettata una lampada LED in grado di fornire tale range di flusso fotonico. Sono state eseguite poi delle misure di flusso fotonico sulla lampada con lo stesso strumento di misura utilizzato con le HPS. Perpendicolarmente al centro della

lampada il flusso fotonico misurato è di 450 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ a 11 cm di distanza dalla lampada, 250 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ a 23 cm dalla stessa, 40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ a 110 cm dalla stessa.



Horticultural Lighting LED

Sistema completo e di facile installazione per l'illuminazione a LED per orticoltura.



Dati del Prodotto

● Caratteristiche Generali

Grado di protezione barra	IP65
Grado di protezione alimentatore	IP67
Protezione surriscaldamento	Spegnimento automatico reversibile

● Dati Illuminotecnici

LED OSRAM modello	OPTOLOSS SSL
Colorazione	Hiper Red / Deep Blue
Numero LED Hiper Red	72
Numero LED Deep Blue	18
Grado di aperture del fascio	80°/150°

● Caratteristiche elettriche

Alimentatore OSRAM modello	OPTOTRONIC 80/220-240-24 - 24V 80 W
Potenza	80 W
Potenza assorbita	72 W
Dimerabile	si

● Dimensioni del prodotto

Lunghezza	1000 mm
Larghezza	50 mm
Peso	4,5 Kg. (Compreso alimentatore)
Vetro temperato spessore	4 mm

Figura 47: Datasheet lampada LED per Horticultural Lighting

4.1.2 - PRIMA PROVA

Si è deciso di posizionare la lampada progettata a 1,1 m di altezza dalle piante, fornendo quindi un flusso fotonico di circa $40 \mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$ sotto la lampada, con grado di apertura del fascio di luce di 80° . Si è quindi proseguito con la seguente disposizione di 4 lampade LED per verificare la qualità di crescita delle piante.

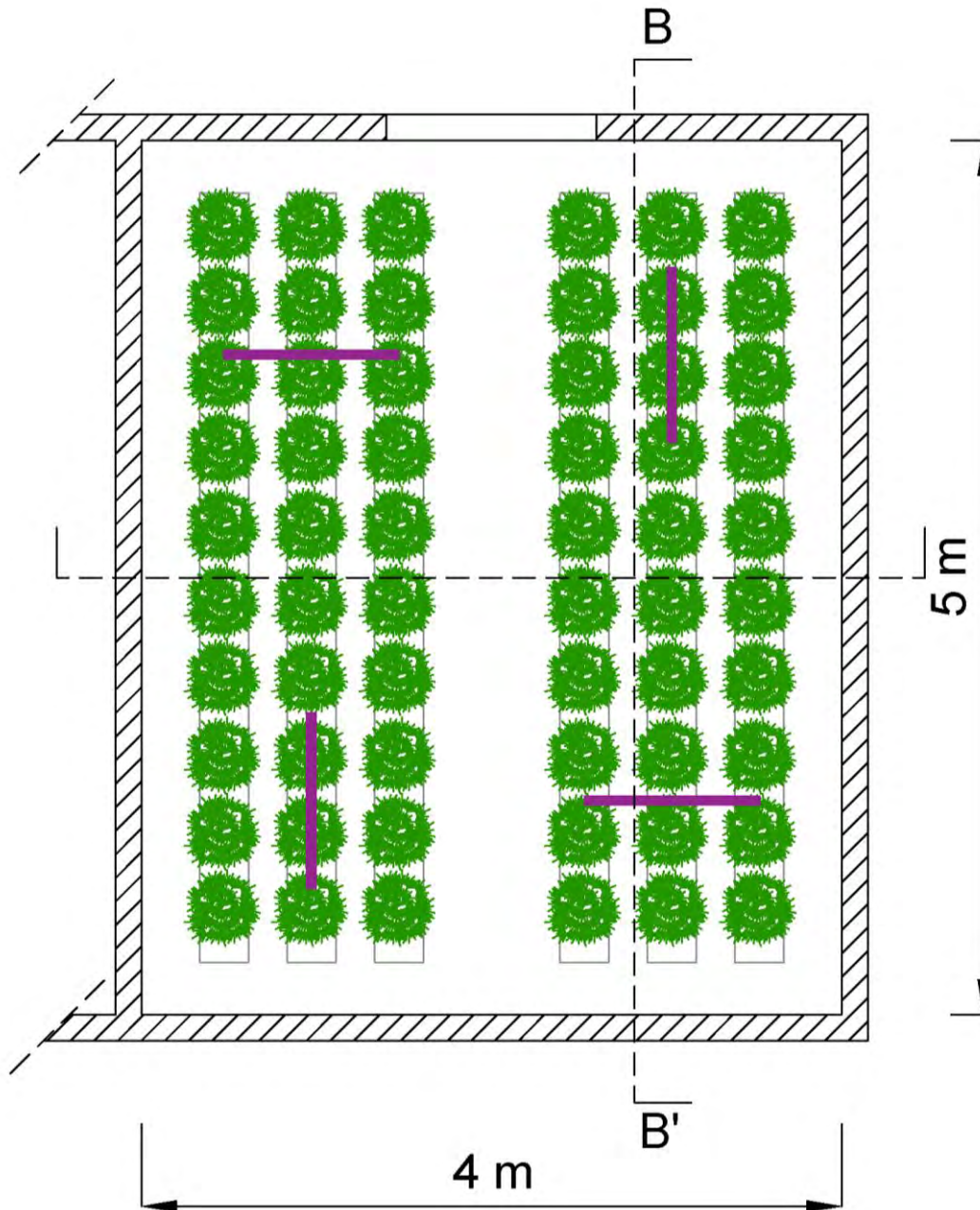


Figura 48: Disposizione lampade LED durante la prima prova di crescita piante. Misure non in scala

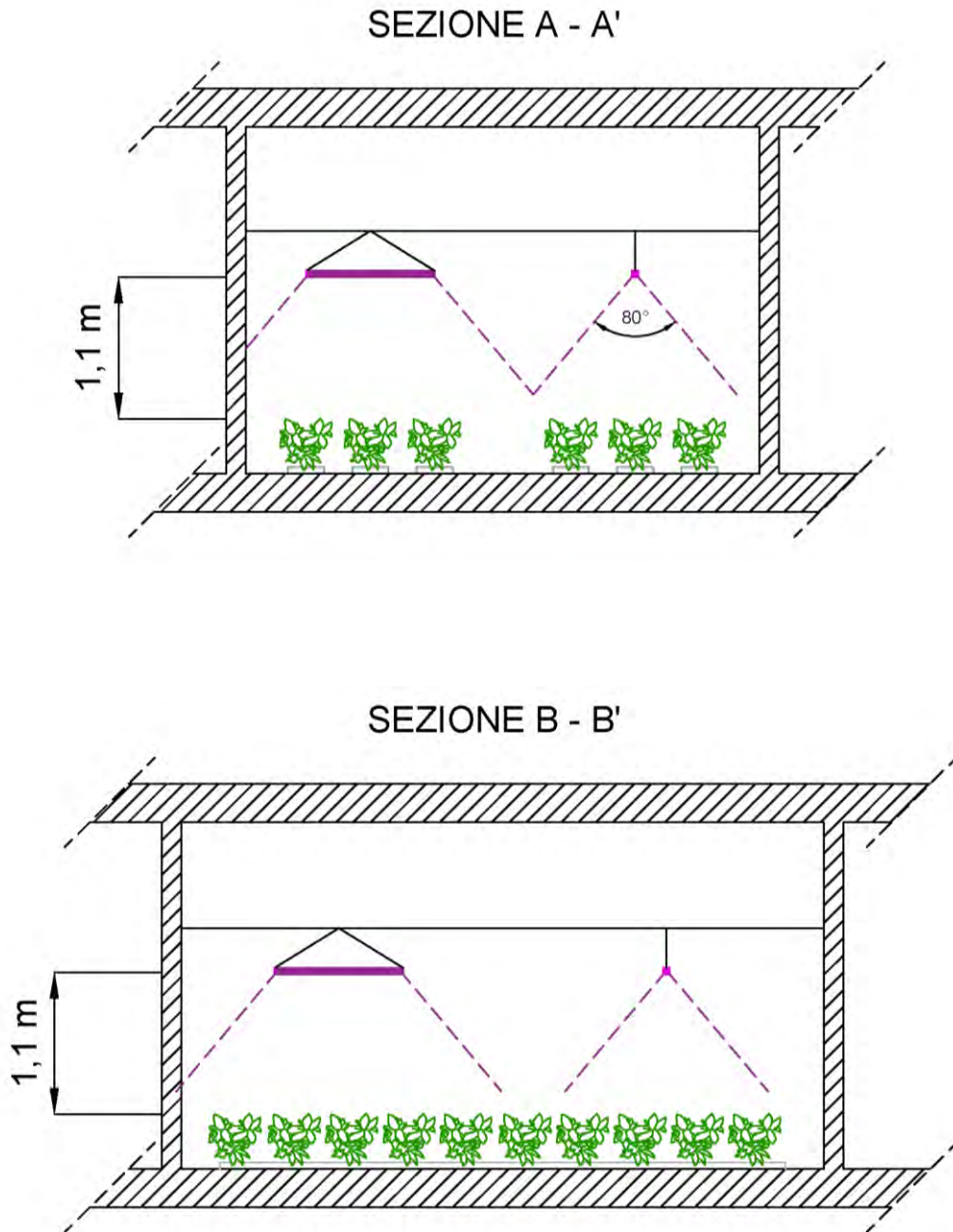


Figura 49: Sezione cella di prova con disposizione delle lampade LED per la prima prova di crescita piante. Misure non in scala

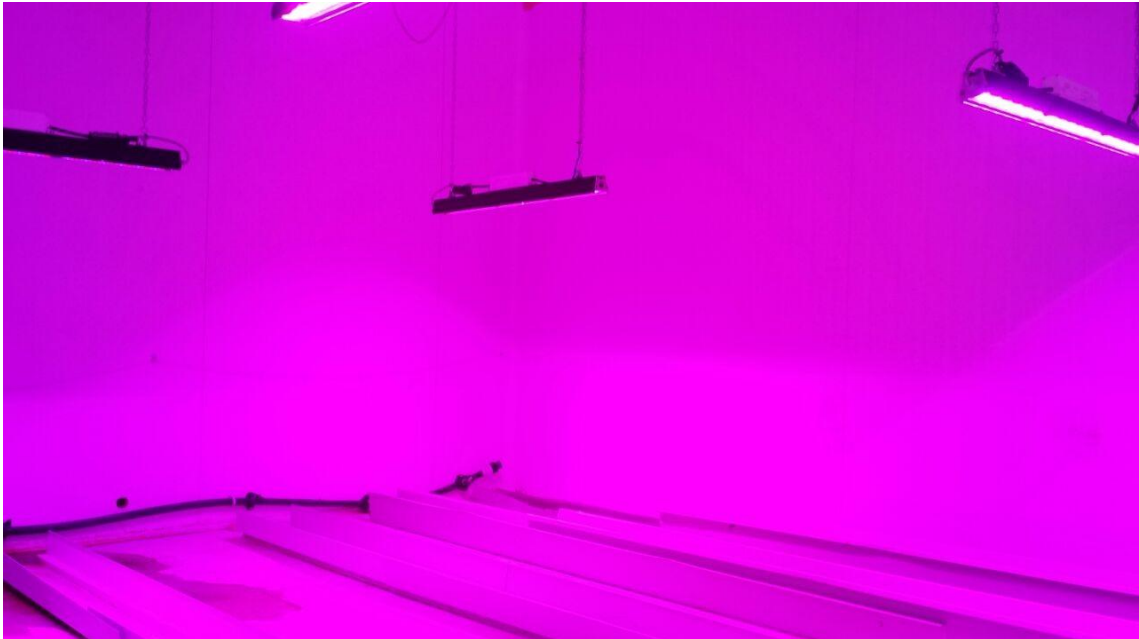


Figura 50: Disposizione lampade LED durante la prima prova di crescita delle piante

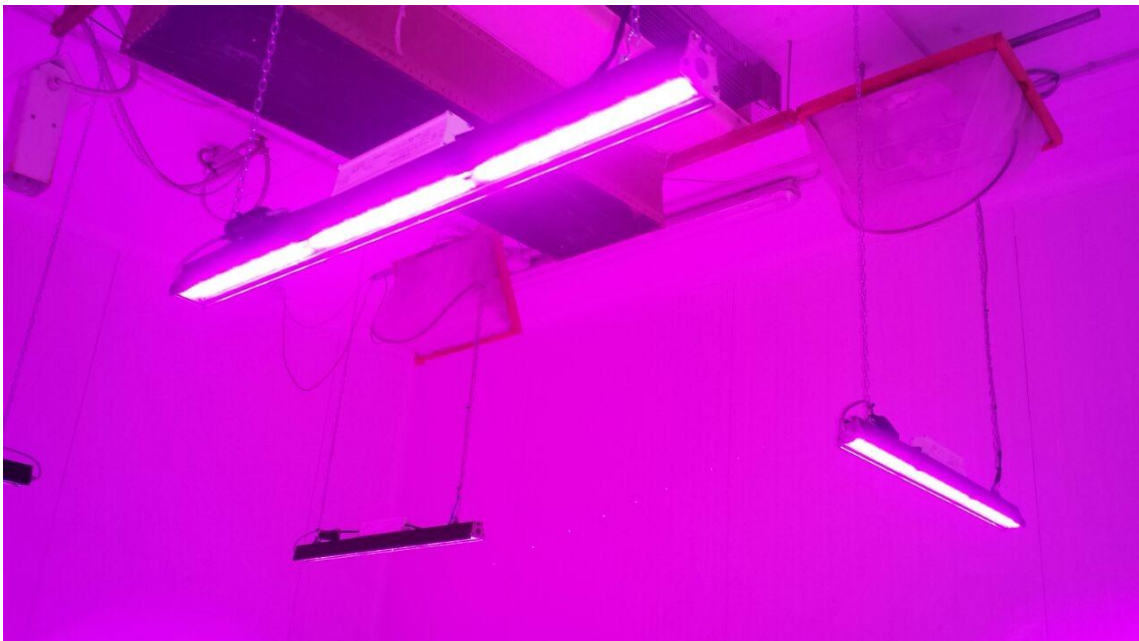


Figura 51: Disposizione lampade LED durante la prima prova di crescita delle piante



Figura 52: Disposizione lampade

I risultati della prova sono stati abbastanza soddisfacenti: le piante che erano poste esattamente sotto le lampade, sono cresciute molto bene. Ciò non si può dire invece per le piante che si trovano più distanti dalle lampade. La disposizione delle lampade e il loro numero hanno infatti evidenziato delle aree di disomogeneità di crescita delle piante con valori massimi raggiunti esattamente sotto la lampada, dove appunto le piante sono cresciute bene.

Dopo questa prima prova si è quindi deciso di:

- Cambiare disposizione delle lampade;
- Raddoppiare il numero di lampade LED;
- Inserire 4 lampade LED bianche: la mancanza di luce bianca ha creato infatti dei problemi per quanto riguarda la crescita degli insetti.

4.1.3 - SECONDA PROVA

Una volta procurato il materiale necessario si è provveduto alla nuova disposizione delle lampade: questa volta sono state posizionate in due file di 4 lampade ciascuna, distanti tra loro 85 cm e sempre 1,1 m sopra le piante. Le lampade sono posizionate perpendicolarmente al lato lungo dei bancalini contenenti le piante.

I risultati in questo caso sono stati certamente migliori rispetto alla prima prova, in quanto il raddoppio del numero di lampade e la nuova disposizione hanno permesso una distribuzione di crescita delle piante più omogenea e uniforme in tutta la superficie illuminata. Le piante infatti sono cresciute meglio in un'area più grande rispetto alla prima prova.

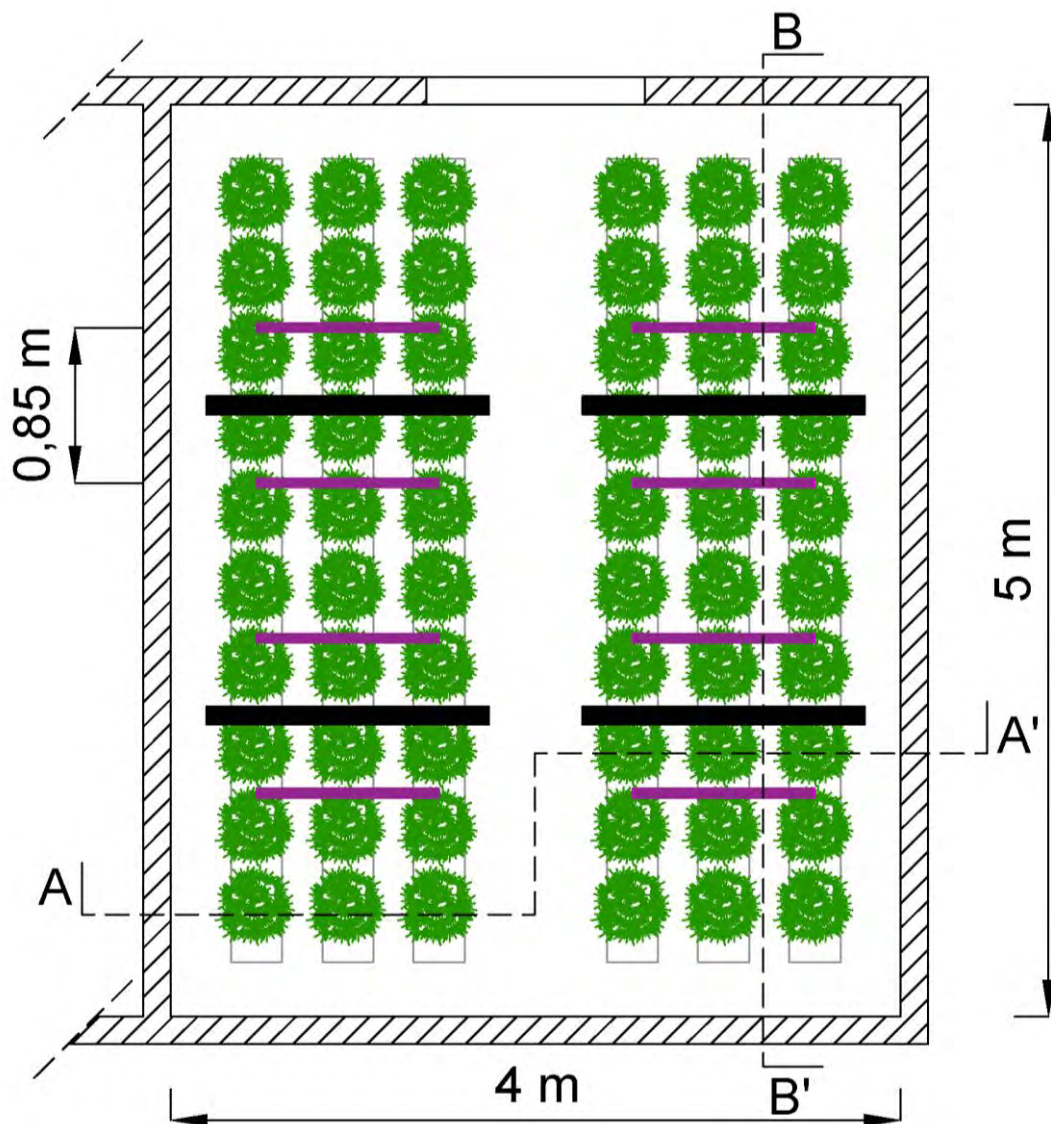


Figura 53: Disposizione lampade LED durante la seconda prova di crescita piante. In viola le lampade LED per l'orticoltura, in nero le lampade LED bianche. Misure non in scala

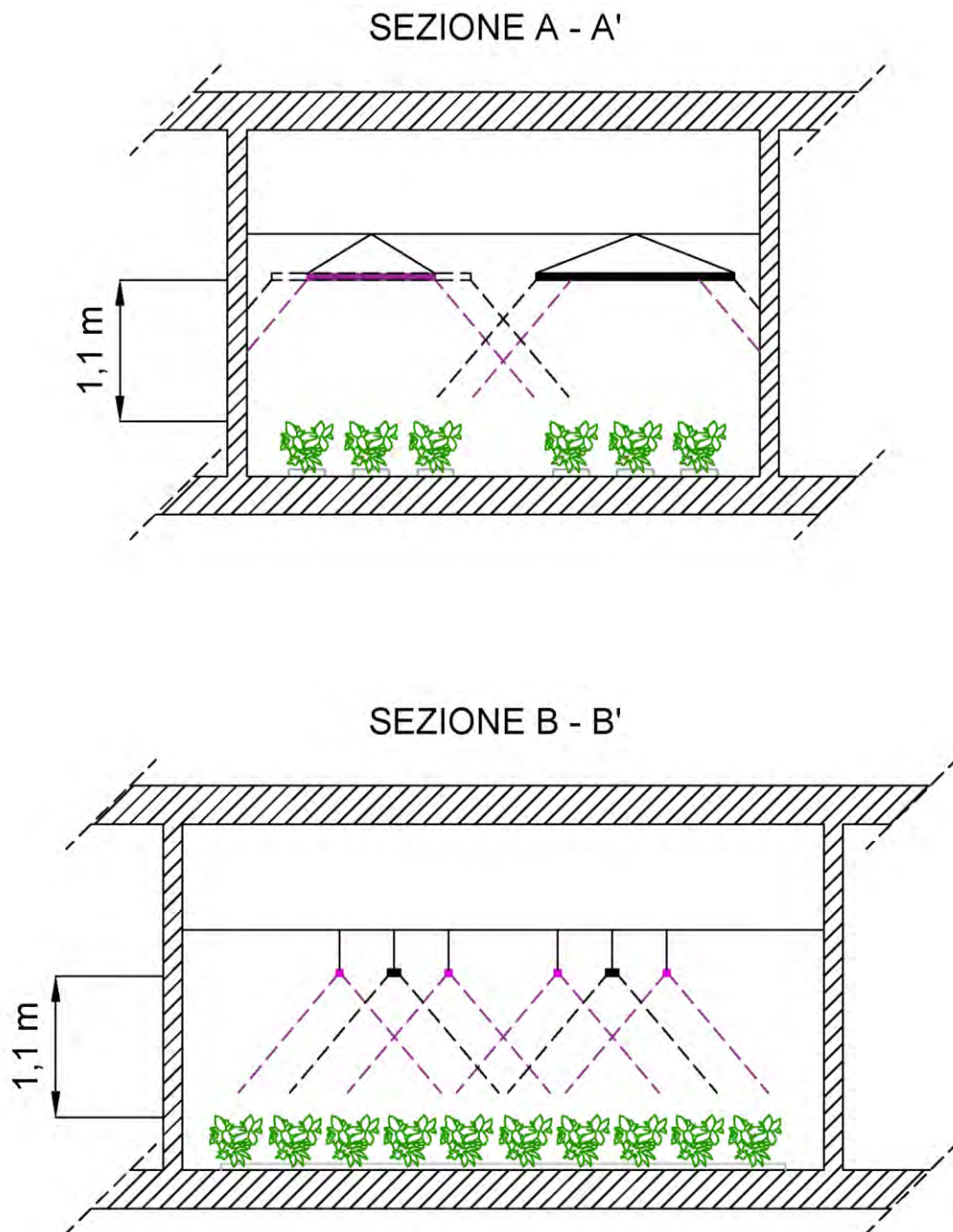
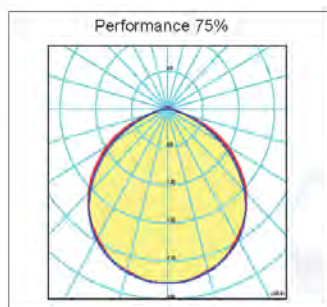
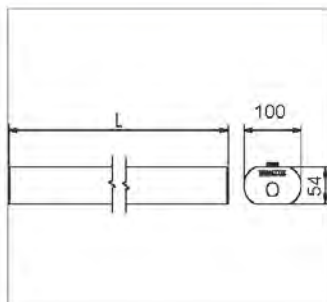


Figura 54: Sezione cella di prova con disposizione delle lampade LED per la seconda prova di crescita piante. Misure non in scala

INE57NOP

Innova Ecolight



Destinazione d'uso:	L'illuminazione a LED per l'industria e il terziario.
Corpo / Struttura :	Estruso di policarbonato opale autoestinguente, con procedimento JEDEX di coestrusione anti-UV.
Tappi:	Materiale plastico con connettore ad innesto rapido tripolare.
Riflettore / Ottica:	Alluminio
Grado protezione:	IP67.
Emissione:	Diretta.
Alimentazione:	Elettronica incorporata.
Sorgente luminosa:	Led SMD
Flusso max led Tj25°:	7.450 Lm
Flusso max led Tj65°:	6.705 Lm
Flusso max apparecchio Tj 25°:	5.587 Lm
Flusso max apparecchio Tj 65°:	5.028 Lm
Durata Utile:	L80/B10: 50.000 h
Ta Max:	-20° +40°
Potenza totale:	57w
Temperatura colore:	4000 K
Resa Cromatica	>80
Rischio fotobiologico:	Esente
Peso:	2,0 Kg.
Colore:	_____
Fissaggio:	Aggancio rapido a molla
Dimensioni:	152 mm
Configurazione led:	=====
Accessori:	
IN-MOL-AV	Staffa di fissaggio antivandalo

Durata 50.000 ore

Figura 55: Datasheet lampada LED bianca necessaria alla crescita degli insetti

4.1.3.1 - Misura del flusso fotonico post-opera

A titolo di verifica, si è misurato il flusso fotonico in vari punti della cella con le lampade LED bianche spente. I risultati sono stati i seguenti.

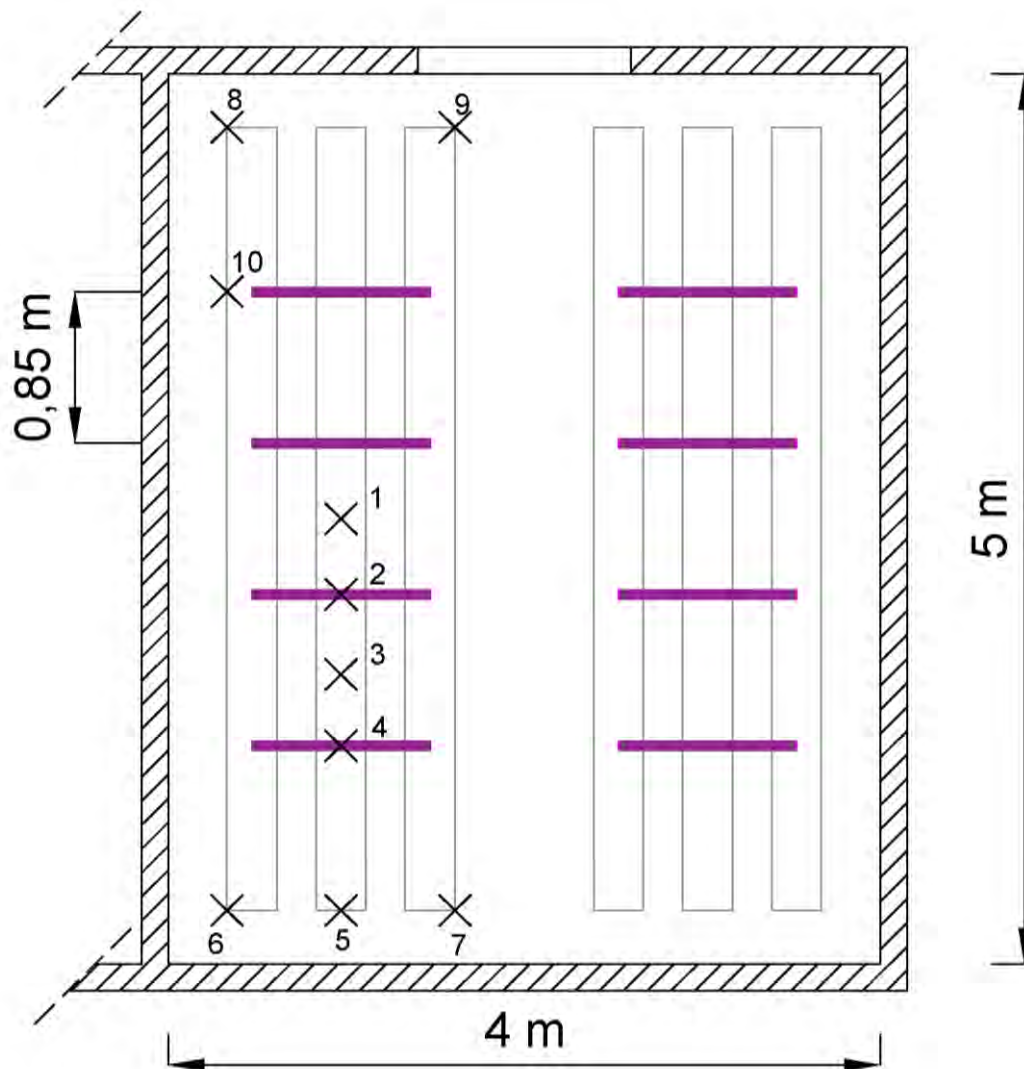


Figura 56: Punti di misura flusso fotonico con lampade LED bianche spente

Punti	Flusso Fotonico Misurato ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)	Punti	Flusso Fotonico Misurato ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$)
1	50	6	12
2	48	7	16
3	45	8	12
4	39	9	18
5	18	10	30

Tabella 18: Valori di flusso fotonico misurato nei punti indicati

Quello che si può vedere è che nella fascia centrale il valore di flusso fotonico oscilla tra i 40 - 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, nei punti estremi invece il valore scende a 10 - 20 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\cdot\text{s}$.

4.2 - CERTIFICATI BIANCHI E ANALISI DELL' INVESTIMENTO

4.2.1 - CALCOLO CERTIFICATI BIANCHI

Per il calcolo dei certificati bianchi, si è deciso di procedere con metodo di valutazione a consuntivo. Le celle saranno quindi dotate di strumenti di misurazione dei consumi effettivi di energia pre e post intervento. Per semplicità supponiamo che i consumi siano uguali per ogni cella e costanti per ogni anno fino alla fine della vita tecnica dell'impianto. In base al tipo di intervento richiesto per il calcolo dei certificati bianchi si ricade sotto la categoria IPRIV-NEW (riprogettazione completa degli impianti esistenti nel privato) che prevede:

- Vita utile $U = 5$ anni;
- Vita tecnica $T = 15$ anni;
- Coefficiente di durabilità $\tau = 2,65$.

4.2.1.1 - Situazione ante-opera

A causa delle perdite per effetto Joule, l'alimentatore delle lampade HPS assorbe una potenza dalla rete maggiore rispetto al consumo reale della lampada. Si è stimato che l'assorbimento di potenza dalla rete è superiore di circa il 15% rispetto alla potenza nominale della lampada.

- Potenza nominale lampade HPS:

$$P_{HPS}' = 400 \text{ W}$$

- Potenza realmente assorbita dalla rete dalle lampade HPS:

$$P_{HPS} = P_{HPS}' \cdot 1,15 = 400 \cdot 1,15 = 460 \text{ W}$$

- Numero lampade HPS presenti nell'azienda:

$$N_{HPS} = 80$$

- Ore di funzionamento giornaliere:

$$H = 16 \text{ h/gg}$$

- Giorni di funzionamento annuali:

$$GG = 350 \text{ gg}$$

- Potenza totale assorbita dalle lampade HPS:

$$P_{TOT-HPS} = P_{HPS} \cdot N_{HPS} = 460 \cdot 80 = 36,8 \text{ kW}$$

- Energia consumata in un anno dalle lampade HPS:

$$E_{TOT-HPS} = P_{TOT-HPS} \cdot H \cdot GG = 36,8 \cdot 16 \cdot 350 = 206.080 \text{ kWh/anno}$$

4.2.1.1 - Situazione post-opera

Nel caso di lampade LED non essendoci dissipazioni per effetto Joule, la potenza che la lampada assorbe dalla rete è pari alla potenza nominale della lampada.

- Potenza nominale lampade LED:

$$P_{LED} = 72 \text{ W}$$

- Numero lampade LED:

$$N_{LED} = 2 \cdot N_{HPS} = 2 \cdot 80 = 160$$

- Potenza totale assorbita dalle lampade LED:

$$P_{TOT-LED} = P_{LED} \cdot N_{LED} = 72 \cdot 160 = 11,52 \text{ kW}$$

- Potenza nominale lampade LED bianche:

$$P_{LED-B} = 57 \text{ W}$$

- Numero lampade LED bianche:

$$N_{LED-B} = \frac{N_{LED}}{2} = \frac{160}{2} = 80$$

- Potenza totale assorbita dalle lampade LED bianche:

$$P_{TOT-LED-B} = P_{LED-B} \cdot N_{LED-B} = 57 \cdot 80 = 4,56 \text{ kW}$$

- Potenza totale assorbita da tutte le lampade LED:

$$P_{TOT} = P_{TOT-LED} + P_{TOT-LED-B} = 11,52 + 4,56 = 16,08 \text{ kW}$$

- Energia consumata in un anno dalle lampade LED:

$$E_{TOT-LED} = P_{TOT} \cdot H \cdot GG = 16,08 \cdot 16 \cdot 350 = 90.048 \text{ kWh/anno}$$

- Risparmio netto di energia in un anno:

$$RN = E_{TOT-HPS} - E_{TOT-LED} = 206.080 - 90.048 = 116.032 \text{ kWh/anno}$$

- Risparmio netto di energia in un anno espresso in tep:

$$RN = RN \cdot 0,187 \cdot 10^{-3} = 116.032 \cdot 0,187 \cdot 10^{-3} = 21,7 \text{ tep/anno}$$

- Risparmio netto integrale di energia riconosciuto come numero di T.E.E:

$$RNI = RN \cdot \tau = 21,7 \cdot 2,65 = 57,5 \text{ tep/anno} \cong 58 \text{ tep/anno}$$

Si può vedere dai risultati che nonostante il numero di lampade LED sia più del doppio del numero di lampade HPS, i consumi di energia elettrica in un anno si sono più che dimezzati.

Secondo i calcoli, la quantità di RNI annuale non rispetta le dimensioni minime per la valutazione a consuntivo dei risparmi di energia (almeno 60 tep nel primo anno). In questo caso si prende il risultato lo stesso come valido in quanto il risparmio netto di energia si è calcolato analiticamente e non attraverso misure effettive dei consumi e il risultato non si discosta di molto dal valore minimo. Inoltre nel caso il risparmio di energia sia effettivamente inferiore a 60 tep, l'azienda di servizi energetici che si occupa dell'installazione può accorpate più interventi dello stesso tipo per raggiungere le dimensioni minime di risparmio.

Visti i valori di mercato, si ipotizza che il valore medio di 1 tep si aggiri attorno ai 100 €. Tale ipotesi è conservativa, in quanto il valore del tep non è mai sceso sotto tale cifra. Per avere il suo valore effettivo giornaliero si fa riferimento al valore indicato dal GME (Gestore Mercati Energetici). A titolo di esempio, al 10/03/2015 il valore di riferimento di un T.E.E. risulta di 104,64 €.

Tramite il sistema dei certificati bianchi si ha quindi un ricavo annuale di

$$CB = RNI \cdot 100 = 58 \cdot 100 = 5.800 \text{ €/anno}$$

Che prolungato per i 5 anni di vita utile prevista ammonta a un ricavo totale di

$$CB_5 = CB \cdot 5 = 5.800 \cdot 5 = 29.000 \text{ €}$$

Tale cifra non comprende il pagamento della Società di Servizi Energetici (Munari Rinnovabili) a titolo di commissione per la prestazione eseguita al fine di ottenere T.E.E., che quindi si trascura.

Dal punto di vista dei risparmi energetici sull'energia elettrica acquistata, si ipotizza un valore medio dell'energia acquistata dalla rete di circa 0,2 €/kWh. Grazie all'intervento di sostituzione di lampade HPS con lampade LED, il risparmio economico annuo sarà di

$$RE = RN \cdot 0,2 = 116.032 \cdot 0,2 = 23.206,40 \text{ €/anno}$$

Che per i 5 anni di vita utile previsti ammonta a un risparmio totale di

$$RE_5 = RE \cdot U = 23206,40 \cdot 5 = 116.032 \text{ €}$$

Considerando quindi il risparmio di energia garantito dall'intervento e il valore dei certificati bianchi riconosciuto, tale intervento porta a un risparmio in 5 anni di

$$R_5 = RE_5 + CB_5 = 116.032 + 29.000 = 145.032 \text{ €}$$

4.2.1 - ANALISI DELL'INVESTIMENTO

Si ipotizza, come già detto, che le quote di risparmio di energia annue siano costanti e che i certificati bianchi vengano remunerati in quote fisse ogni anno.

Il risparmio netto nel corso della vita utile U sarà quindi di

$$RNc = RE + CB = 23.206,40 + 5.800 = 29.006,40 \text{ €}$$

Il risparmio netto conseguito dal termine della vita utile U al termine della vita tecnica T , chiamato anche RNa , rimane pari al risparmio annuo di energia RE .

Per il calcolo dell'investimento iniziale I_0 si considerano i seguenti fattori:

- Costo lampade LED per l'orticoltura comprensive di alimentatore $\cong 600 \text{ €/cad}$;
- Costo lampade LED bianche con alimentatore incorporato = 163 €/cad .

L'investimento iniziale sarà quindi pari a:

$$I_0 = 600 \cdot N_{LED} + 163 \cdot N_{LED-B} = 600 \cdot 160 + 163 \cdot 80 = 109.040 \text{ €}$$

Si considera inoltre un costo medio di misurazione dei consumi, previsto dal metodo di valutazione a consuntivo per gli anni di vita utile, pari a 75 €/anno per ogni cella di coltivazione. Essendoci in tutto 20 celle di coltivazione si avrà una spesa media di misurazione dei consumi pari a 1.500 €/anno . La disponibilità annuale per i primi 5 anni sarà quindi di

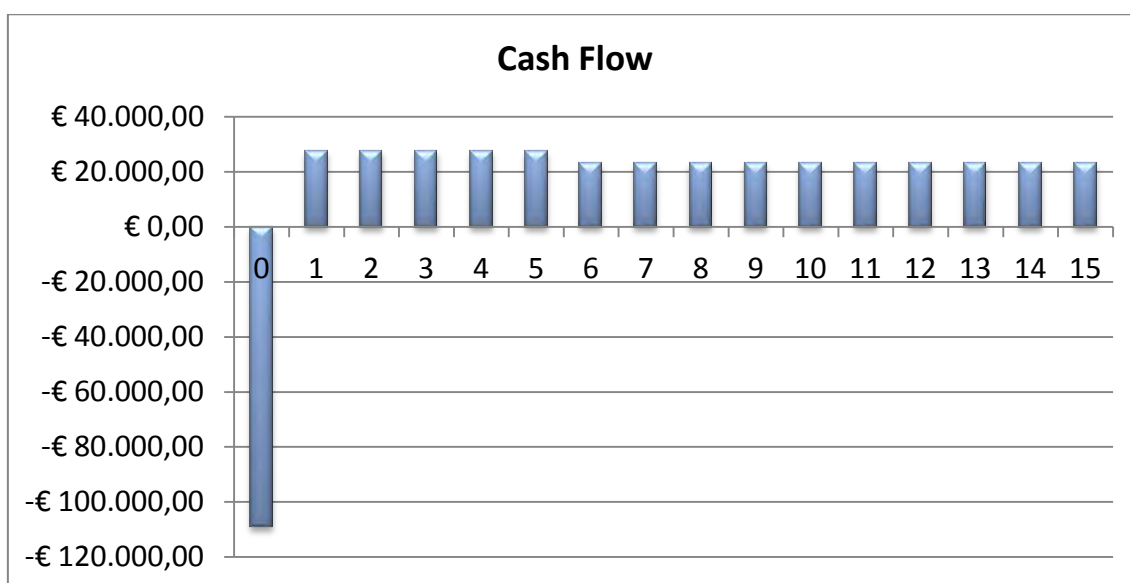
$$D_{1-5} = RNc - 1.500 = 29.006,40 - 1.500 = 27.506,40 \text{ €}$$

Per i 10 anni successivi invece rimane

$$D_{6-15} = RE = RNa = 23.206,40 \text{ €}$$

Anni	Importi	Anni	Importi
0	- € 109.040,00	8	€ 23.206,40
1	€ 27.506,40	9	€ 23.206,40
2	€ 27.506,40	10	€ 23.206,40
3	€ 27.506,40	11	€ 23.206,40
4	€ 27.506,40	12	€ 23.206,40
5	€ 27.506,40	13	€ 23.206,40
6	€ 23.206,40	14	€ 23.206,40
7	€ 23.206,40	15	€ 23.206,40

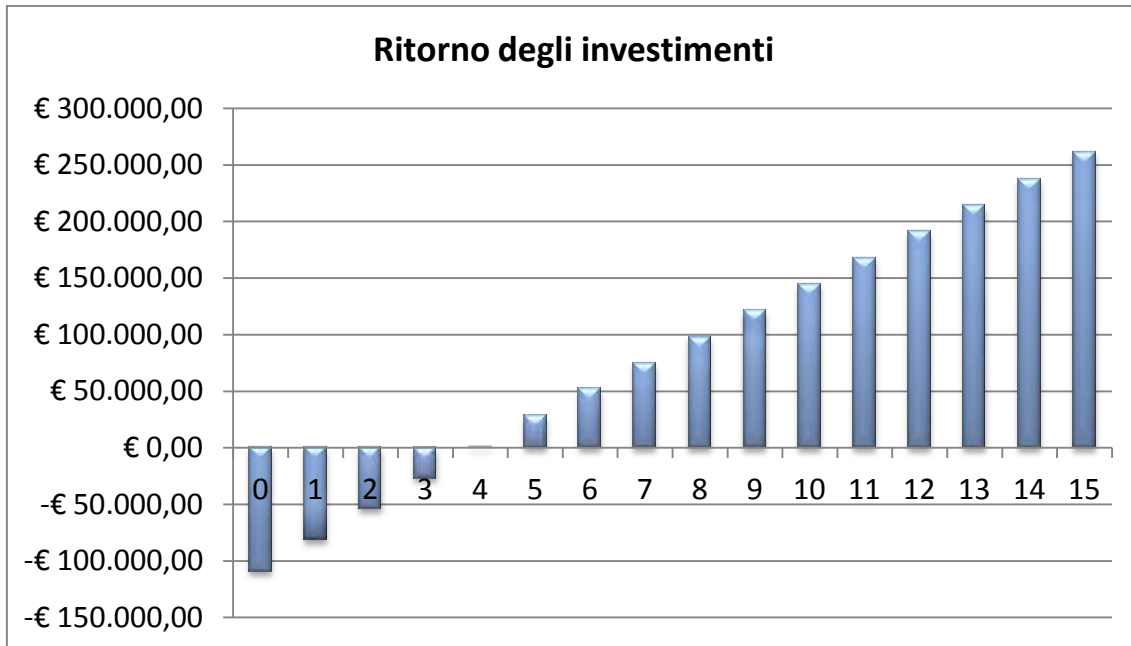
Tabella 19: Cash Flow



4.2.1.1 - Pay Back Time

Anni	Importi	Anni	Importi
0	- € 109.040,00	8	€ 98.111,20
1	- € 81.533,60	9	€ 121.317,60
2	- € 54.027,20	10	€ 144.524,00
3	- € 26.520,80	11	€ 167.730,40
4	€ 985,60	12	€ 190.936,80
5	€ 28.492,00	13	€ 214.143,20
6	€ 51.698,40	14	€ 237.349,60
7	€ 74.904,80	15	€ 260.556,00

Tabella 20: Ritorno degli investimenti



Per il calcolo analitico del Pay Back Time, ovvero il tempo di recupero dei costi di investimento, si procede dividendo l'investimento iniziale per la disponibilità annuale dei primi 5 anni (graficamente infatti si può vedere che il tempo di ritorno degli investimenti sarà sicuramente inferiore a 5 anni)

$$PB = \frac{I_0}{D_{1-5}} = \frac{109.040}{27.506,40} = 3,964 \text{ anni} \cong 4 \text{ anni}$$

Tale risultato è ottimo, in quanto PB risulta inferiore a T.

4.2.1.2 - Valore Attuale Netto e Indice di Profittabilità

Il valore attuale netto o VAN, è la differenza attualizzata a qualsiasi istante di esborsi e ricavi. Indica quindi la convenienza o meno ad effettuare un investimento a seconda che il risultato sia positivo o negativo. Fissando quindi un tasso di attualizzazione ipotetico si procede al calcolo del VAN con i seguenti dati:

- Tasso di attualizzazione ipotizzato:
a = 5%
- Investimento iniziale concentrato al momento attuale:
 $I_0 = 109.040 \text{ €}$
- Quota annuale riscossa con i T.E.E. per i primi 5 anni:
CB = 5.800 €

- Spese annue di misurazione dei consumi previste per i primi 5 anni:

$$SM = 1.500 \text{ €}$$

- Quota di risparmio energetico annua:

$$RE = 23.206,40 \text{ €}$$

$$\begin{aligned} VAN &= -I_0 + (CB - SM) \cdot \left(\frac{1 - (1 + a)^{-5}}{a} \right) + RE \cdot \left(\frac{1 - (1 + a)^{-15}}{a} \right) = \\ &= -109.040 + (5.800 - 1.500) \cdot \left(\frac{1 - (1 + 0,05)^{-5}}{0,05} \right) + 23.206,40 \cdot \\ &\cdot \left(\frac{1 - (1 + 0,05)^{-15}}{0,05} \right) = 150.451,25 \text{ €} \end{aligned}$$

Il valore del VAN risulta positivo, quindi indica che i ricavi realizzati e attualizzati al momento dell'investimento sono superiori all'investimento stesso. L'intervento di sostituzione delle lampade conviene.

A sostegno di quanto detto si può calcolare l'indice di profittabilità IP come il rapporto tra il VAN e l'investimento I_0 :

$$IP = \frac{VAN}{I_0} = \frac{150.451,25}{109.040} = 1,38$$

Tale indice misura il guadagno netto attualizzato per ogni moneta investita. Affinchè l'investimento risulti interessante è importante che tale valore sia maggiore di 1.

4.2.1.3 - Tasso Interno di Rendimento

Il tasso interno di rendimento o TIR, è il tasso di attualizzazione che eguaglia a zero i flussi di cassa e che rende il VAN nullo. È il tasso che permette di eguagliare i ricavi attualizzati con l'investimento effettuato. Tassi minori del TIR portano a un VAN positivo e quindi a una convenienza di investimento, tassi maggiori al TIR invece restituiscono un VAN negativo e quindi una non convenienza di investimento. Il TIR non è calcolabile analiticamente ma solo tramite iterazioni.

$$I_0 = \sum_{j=0}^n \frac{D_j}{(1 + TIR)^j}$$

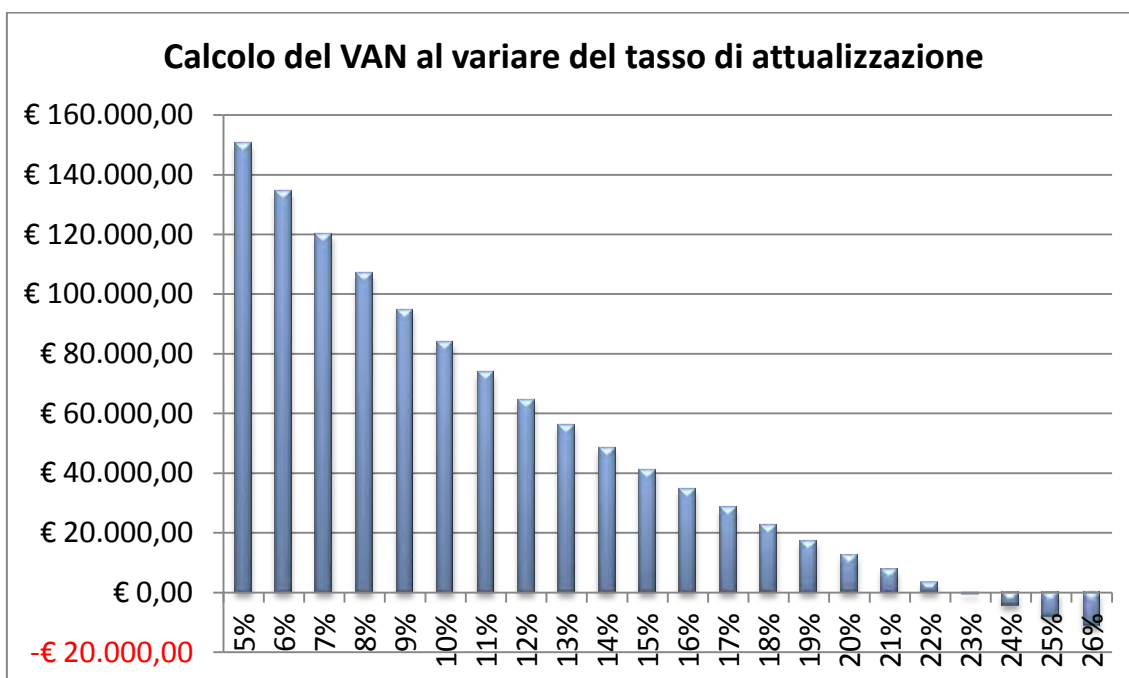
In questo caso il TIR è pari a

$$TIR = 22,844\%$$

Il risultato si ritrova anche graficamente calcolando il VAN al variare del tasso di attualizzazione.

Tasso di attualizzazione	VAN	Tasso di attualizzazione	VAN
5%	€ 150.451,25	16%	€ 34.425,73
6%	€ 134.459,50	17%	€ 28.272,41
7%	€ 119.952,74	18%	€ 22.564,02
8%	€ 106.763,34	19%	€ 17.259,05
9%	€ 94.745,06	20%	€ 12.320,52
10%	€ 83.770,11	21%	€ 7.715,42
11%	€ 73.726,55	22%	€ 3.414,26
12%	€ 64.516,18	23%	- € 609,39
13%	€ 56.052,64	24%	- € 4.379,22
14%	€ 48.259,86	25%	- € 7.916,51
15%	€ 41.070,68	26%	- € 11.240,42

Tabella 21: Calcolo del VAN al variare del tasso di attualizzazione



Graficamente inoltre si può notare che l'indice di profittabilità IP sarà maggiore di 1 sicuramente per valori del tasso di attualizzazione inferiori all'8%. Precisamente l'indice IP sarà superiore a 1 se il tasso di attualizzazione è inferiore a

$$a = 7,82\%$$

L'investimento è quindi sicuramente conveniente per valori del tasso di attualizzazione inferiori.

4.2.1.4 - Return On Investment

Il Return On Investment o ROI è il rapporto tra l'utile netto annuo e l'investimento. È un valore che esprime la percentuale di ritorno degli investimenti. Come utile netto annuo U_j dell'anno j -esimo, si intende la differenza tra la disponibilità D_j e la quota di ammortamento dell'investimento A_j dell'anno stesso. La quota di ammortamento dipende dal criterio con cui si distribuisce l'investimento negli anni: si suppone per semplicità che sia pari all'investimento iniziale diviso il numero di anni di vita tecnica T dell'impianto.

$$A_j = \frac{I_0}{T}; U_j = D_j - A_j$$
$$ROI = \frac{\sum_{j=0}^n U_j}{n} \Big/ I_0 = \frac{5 \cdot \left(27.506,40 - \frac{109.040}{15}\right) + 10 \cdot \left(23.206,40 - \frac{109.040}{15}\right)}{15} \Big/ 109.040$$
$$= \frac{(5 \cdot 27.506,40 + 10 \cdot 23.206,40) - 109.040}{15} \Big/ 109.040 = 0,1593 = 15,93\%$$

4.2.1.5 - Costo dell'Energia Conservata

Il Costo dell'Energia Conservata o CEC, indica il costo di ogni kWh di energia risparmiato. Il CEC si può utilizzare per valutare i programmi d'impiego dell'investimento iniziale I_0 per un risparmio annuale costante di energia Q .

- Tasso di attualizzazione ipotizzato
 $a = 5\%$
- Investimento iniziale
 $I_0 = 109.040 \text{ €}$
- Quantità di energia annua risparmiata
 $Q = 116.032 \text{ kWh/anno}$

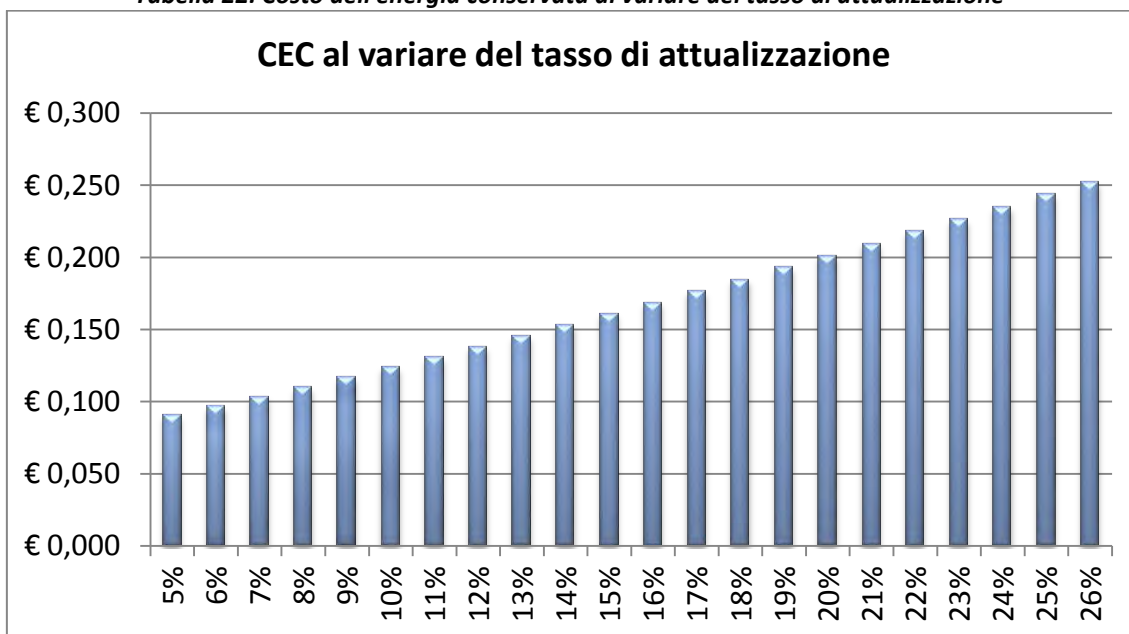
$$CEC = \frac{I_0}{Q} \cdot \frac{a}{1 - (1 + a)^{-n}} = \frac{109.040}{116.032} \cdot \frac{0,05}{1 - (1 + 0,05)^{-15}} = 0,09 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 9 \text{ c€/kWh}$$

La scelta deve essere limitata agli investimenti con CEC minore del prezzo unitario dell'energia che si vuole risparmiare. Ipotizzando quindi un prezzo unitario di acquisto dell'energia elettrica dalla rete di 20 c€/kWh, si vede come il CEC sia inferiore di più

della metà, quindi l'intervento risulta conveniente. Calcolando il CEC per tassi di attualizzazione superiori a quello ipotizzato si vede che l'investimento è conveniente per tassi inferiori al 20%.

Tasso di attualizzazione	CEC	Tasso di attualizzazione	CEC
5%	€ 0,091	16%	€ 0,169
6%	€ 0,097	17%	€ 0,177
7%	€ 0,103	18%	€ 0,185
8%	€ 0,110	19%	€ 0,193
9%	€ 0,117	20%	€ 0,201
10%	€ 0,124	21%	€ 0,209
11%	€ 0,131	22%	€ 0,218
12%	€ 0,138	23%	€ 0,226
13%	€ 0,145	24%	€ 0,235
14%	€ 0,153	25%	€ 0,244
15%	€ 0,161	26%	€ 0,252

Tabella 22: Costo dell'energia conservata al variare del tasso di attualizzazione



CONCLUSIONI

L'utilizzo del LED nell'orticoltura è una tecnologia ancora in fase di crescita soprattutto in Italia e, più in generale, nei paesi mediterranei. Nei paesi del nord Europa invece, a causa delle difficili condizioni climatiche e della forte variazione del fotoperiodo in base alla stagione, la diffusione della "coltivazione indoor" si è sviluppata in maniera più forte rispetto alle nostre latitudini. In stati come Olanda, Danimarca, Svezia, Norvegia e Finlandia è già da molti anni che si utilizza la luce LED per la coltivazione di piante al posto delle più comuni tecnologie di Horticultural Lighting. Come ampiamente visto infatti le lampade LED migliorano l'orticoltura e soprattutto sono molto importanti per il risparmio energetico. Proprio per questo motivo l'utilizzo della luce LED per la coltivazione di piante sta sempre più interessando anche i coltivatori italiani. Concludendo si è ampiamente verificato che tali lampade permettono di:

- Aumentare la produzione rispetto alle tradizionali tecniche di coltivazione indoor e outdoor senza sacrificare genuinità e qualità del prodotto;
- Ottenere un prodotto sempre più vicino alle necessità del coltivatore. Variando infatti la tipologia, l'intensità, la qualità e i rapporti di colore della luce è possibile controllare la crescita della pianta, la fioritura e addirittura il sapore del prodotto finale;
- Non alterare i livelli di temperatura con la dissipazione di calore. Il LED infatti è fonte di luce fredda;
- Risparmiare energia primaria utilizzando lampade più efficienti sia per quanto riguarda i consumi che per quel che concerne l'irraggiamento della pianta con luce concentrata in determinati range di lunghezza d'onda;
- Rientrare nel sistema dei T.E.E. ammortizzando in tempi più brevi le spese d'investimento.

In particolare la Società di Servizi Energetici Munari Rinnovabili, si sta impegnando nel continuo miglioramento dell'horticultural lighting, in particolare cercando di:

- Diminuire i problemi di uniformità del flusso fotonico fornito alle piante dalle lampade;
- Ridurre i costi;
- Analizzare alternative al LED, ad esempio con lampade a induzione drogate al fine di emettere luce alle lunghezze d'onda necessarie alla crescita delle piante.

BIBLIOGRAFIA

- Campiotti, Bernardini, Di Carlo, Scoccianti, Alonzo, Carlino, Dondi, Bibbiani; Accrescimento delle piante con luce LED; ENEA; 2008;
- Greenhouse Lighting with LEDs; OSRAM; 2012;
- Campiotti, Scoccianti, Viola; Guida Operativa all'ottenimento dei certificati bianchi in agricoltura; ENEA; 2014;
- Robert L. Starnes, Chris P. Durand; Primary Lighting in a Growth Chamber with Lettuce 330 Watt LED vs. 600 Watt HPS; BTO solutions; prepared for Lumigrow Inc. ;2010;
- Melanie Yelton, Jimmy Byrtus and George Chan; Better Tasting Basil Grown with LED Lighting Technology; Lumigrow; 2014;
- Linee guida per la preparazione, esecuzione e valutazione dei progetti di cui all'articolo 5, comma 1, dei decreti ministeriali 20 Luglio 2004 e S.M.I. e per la definizione dei criteri e delle modalità per il rilascio dei titoli di efficienza energetica;
- Studi illuminotecnici svolti da JACK LEE; OSRAM; 2014;
- Appunti di lezione del corso di "Economia dell'energia" tenuto dal Prof. Arturo Lorenzoni A.A. 2013/2014.

WEBGRAFIA

- www.coltivazioneindoor.it/aeroponica.html
- www.lavorincasa.it/coltivazione-aeroponica
- www.laeroponica.com/aeroponica.html
- www.gse.it/it/CertificatiBianchi/Pages/default.aspx
- www.osram-os.com/osram_os/en/products/product-catalog/leds-for-general-lighting
- www.controlledenvironments.org/Growth_Chamber_Handbook/Plant_Growth_Chamber_Handbook.htm