

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

QUALIFICAÇÃO DE UMA BANCADA DE SUPLEMENTAÇÃO DE LUZ PARA CRESCIMENTO  
DE ALFACES (*Lattuca sativa*)

por

Alex Schreiner Baumhardt

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 10 de dezembro de 2012

QUALIFICAÇÃO DE UMA BANCADA DE SUPLEMENTAÇÃO DE LUZ PARA CRESCIMENTO  
DE ALFACES (*Lattuca sativa*)

por

Alex Schreiner Baumhardt

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Ciências Térmicas**

Orientador: Dra. Eng. Letícia Jenisch Rodrigues

Co-orientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Francis Henrique Ramos França

Prof. Bardo Ernst Josef Bodmann

Prof. Sérgio Luiz Frey

Porto Alegre, 10 de dezembro de 2012.

Dedico este trabalho aos meus familiares e à minha namorada que me apoiaram e incentivaram nesta jornada

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família e amigos que ao longo destes anos de vida sempre estiveram comigo. Agradecer também à minha namorada que me motivou e suportou durante este período.

A minha orientadora e ao meu co-orientador que sempre se mostraram flexíveis e dispostos a me ajudar e a me ensinar sempre que necessário.

Aos bolsistas de iniciação científica laboratório LETA: Diogo, Pedro e Bruno que me auxiliaram durante o processo de coleta de dados do experimento.

Baumhardt S.A. **Qualificação de uma bancada de suplementação de luz para crescimento de alfaces (*Lattuca sativa*)**. 2012. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Ano.

## RESUMO

O estudo de suplementação de iluminação para o crescimento e o desenvolvimento de plantas vem crescendo ao longo de décadas. Atualmente tem se observado na literatura especializada o aumento expressivo de lâmpadas LED. Tal procedimento se justifica devido a algumas particularidades deste tipo de lâmpada, como por exemplo, seu baixo consumo de energia e o seu espectro bem definido em termos de um único comprimento de onda. Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo determinar o espectro de emissão de um tipo de lâmpada LED, bem como medir a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa por unidade de tempo emitida pela mesma. Além disso, busca-se verificar a distribuição do iluminamento no piso da bancada. Não obstante, faz-se a calibração de um piranômetro em relação a um quantômetro de forma a obter as curvas de correlação para determinados comprimentos de onda. Os resultados obtidos indicam que a bancada é apropriada no quesito iluminação para os experimentos futuros que irão avaliar o crescimento e desenvolvimento de alfaces em função da suplementação de luz recebida.

**PALAVRAS-CHAVE:** (Suplementação de luz, LED, vegetais, projeto experimental.)

Baumhardt S.A. **Qualification of an experimental stand for the growth of lettuce (*Lattuca sativa*) by supplement light**. 2012. 20f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012

## ABSTRACT

The study of light supplementation for the development and growth of plant is increasing on the past decades. Now days, it has been observed on specialized literature the large increase use of LED. This procedure is justified by some characteristics of the lamp, for an example, its low energy consumption and its well defined light spectrum in terms of one wave length. In this context, this study has the objective to determine the spectrum emission of one particular LED lamp as well as to measure the amount of active photosynthesized radiation by time emitted by the lamp. Beyond, its sought to verify the light distribution on the floor of the stand. Nevertheless, the calibration of the Pyranometer in relation of the quantum meter is a method of obtaining the graphs correlation to determined wave lengths. The results obtained indicate that the stand is appropriate on the matter of illumination for future experiments that will evaluate the growth and development of lettuce by received supplement light.

**KEYWORDS:** (light supplementation, LED, vegetables, experimental Project)

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Objetivo .....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>2</b>
<b>3. DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO .....</b>	<b>2</b>
<b>3.1. Construção da bancada .....</b>	<b>2</b>
<b>3.2. Determinação do espectro da lâmpada LED .....</b>	<b>4</b>
<b>3.3. Modificações na lâmpada .....</b>	<b>5</b>
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>6</b>
<b>5. RESULTADOS .....</b>	<b>7</b>
<b>5.1. Distribuição do iluminamento no piso da bancada .....</b>	<b>7</b>
<b>5.2. Curvas de calibração e correlação .....</b>	<b>10</b>
<b>5.3. Incertezas de medição .....</b>	<b>11</b>
<b>5.4. Refletividade das paredes .....</b>	<b>13</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>13</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>14</b>
<b>ANEXO I – Medidas realizadas.....</b>	<b>14</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Dentre as diversas variáveis ambientais envolvidas no crescimento e desenvolvimento de plantas superiores, a luz se destaca como uma das mais importantes. Dentro do espectro visível, o vermelho e o azul são as cores predominantemente absorvidas pelos pigmentos fotossintéticos das plantas, os quais são responsáveis por dar início às reações fotoquímicas da fotossíntese. Os principais são as clorofilas (*a* e *b*) e os carotenóides, sendo o mais abundante a clorofila *a*, cujos picos de absorção estão em 420 nm (azul) e 660 nm (vermelho).

Existem, também, outros fotorreceptores que são independentes da fotossíntese, participando do processo de fotomorfogênese, i.e., do processo pelo qual a luz regula o desenvolvimento das plantas. São, pelo menos, três classes de fotorreceptores responsáveis pela fotomorfogênese das plantas: os fitocromos, que absorvem o vermelho (650-680 nm) e o vermelho distante (710-740 nm); os criptocromos, que absorvem o azul e o ultravioleta (320-400 nm); e os fotorreceptores que absorvem o UV-B (280-320 nm). Os fitocromos são os fotorreceptores mais conhecidos, estando envolvidos em inúmeros processos como, por exemplo, na floração (fotoperiodismo) e na germinação de sementes (fotoblastia).

Neste cenário, observa-se o emprego crescente de lâmpadas LED (*Light Emitting Diode*) na produção hortícola. A tecnologia utilizada por este tipo de lâmpada é considerada promissora. Elas apresentam alta durabilidade, economia de consumo, pequena dimensão na maioria dos casos, emissão relativamente “fria” sobre a superfície, especificidade de comprimento de onda e linearidade de emissão de fótons com a entrada de corrente elétrica. Não obstante, as LEDs podem ser empregadas para produção, ou suplementação, em qualquer região do planeta. Inclusive, são encontrados na literatura especializada estudos para adaptação de plantas nas conquistas espaciais [Massa et al., 2008; Morrow, 2008; Yeh e Chung, 2009].

As lâmpadas LED, constituídas por diodos semicondutores, não possuem filamento de tungstênio e, por isso, não queimam como lâmpadas incandescentes. Dentre as vantagens da utilização deste tipo de lâmpada, os seguintes pontos-chave são: a possibilidade do controle da composição espectral, qualificando a emissão de luz, e a possibilidade de ajustar a intensidade de luz, simulando quantitativamente as mudanças de intensidade solar [Yeh e Chung, 2009].

Quanto à aplicabilidade direta, por conta da baixa incidência de luz solar durante o inverno, as plantas, em geral, enfrentam dificuldades no seu desenvolvimento, ficando seu crescimento e seu aspecto visual prejudicados. Isto interfere diretamente na produção, qualitativa e quantitativamente, e na renda dos produtores. Estas são algumas das motivações que impulsionam estudo da suplementação de luz para plantas.

### 1.1. Objetivo

Neste contexto, o presente trabalho tem por objetivo geral qualificar, no quesito iluminação, uma bancada experimental construída especialmente para avaliar o crescimento de alfaces sob iluminação exclusivamente artificial. A motivação reside no fato desta bancada ser pioneira, i.e., utilizar apenas iluminação artificial, deixando as plantas confinadas, sem exposição à radiação solar. Desta forma, os objetivos específicos são os seguintes: conhecer o espectro de emissão das lâmpadas LEDs, encontrar a curva de calibração, que associa as medidas em PAR/s - radiação fotossinteticamente ativa ( $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) - feitas por um quantômetro, com as medidas em mV feitas por um piranômetro, bem como verificar a distribuição da luminosidade no plano onde ficam as alfaces.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

A primeira investigação do LED para o crescimento de plantas foi realizada por Bula e colaboradores [Bula et al. 1991]. Os autores estudaram o crescimento de alface sob LED vermelho associado a lâmpadas fluorescentes azuis. O uso deste LED foi amplamente aceito para a fotossíntese e a fotomorfogênese das plantas por emitir entre 600 nm e 700 nm. A seguir, foi verificado que a emissão em 660 nm era a mais próxima do pico de absorção da clorofila [Bula et al., 1991; Hoenecke et al., 1992; Yorio et al., 2001., Nhut et al., 2003]. Por outro lado, a luz azul necessita de um esclarecimento acerca da condição de “ótimo” para cada espécie, segundo [Yorio et al., 2001; Hogewonig et al., 2010]. O que se observa na literatura especializada é que a combinação do azul com a luz vermelha parece aumentar o efeito do azul em diversos processos morfogênicos, tais como: crescimento do hipocótilo, das hastes, dos cotilédones e das folhas; abertura dos estômatos; fototropismo; florescimento e expressão gênica [Hoenecke et al. 1992; Hogewonig et al., 2010; Samuoliené et al. 2011; Savvides et al., 2012].

Estudos apontam que a ausência de luz azul pode causar severa redução na relação de suprimento/demanda de água na planta, bem como diminuir a sua performance fotossintética. Já o efeito do vermelho como fonte única de luz provoca a alta vulnerabilidade da planta ao estresse hídrico [Savvides et al., 2012]. Segundo dados da literatura, as plantas podem completar seu ciclo de vida apenas sob LED vermelho, porém a suplementariedade do vermelho com a luz azul promove uma maior produção de massa seca em diversas espécies de plantas [Yorio et al., 2001; Samuoliené et al., 2011], o que é de suma importância para os produtores.

A luz verde é ineficiente fotossinteticamente, mas ao longo de 50 anos estudos comentam o papel do verde na regulação do desenvolvimento vegetativo, na floração fotoperiódica, na abertura estomática, na modulação do crescimento do caule, na expressão do gene de cloroplasto e na estatura da planta. Estes relatórios concluem de que o sistema sensorial de luz verde ajusta desenvolvimento e crescimento em orquestração com sensores de vermelho e azul [Folta & Maruhnich, 2007]. Pesquisas recentes mostraram que a taxa fotossintética no verde é maior no comprimento de onda de 510nm em comparação a comprimentos de onda mais longos, 524 e 532nm [Johkan et al., 2012].

Isto posto, o presente trabalho vem auxiliar na continuação deste estudo, buscando oferecer ao agrônomo, um dos idealizadores do projeto, uma análise detalhada a respeito das características das lâmpadas LED adquiridas para o experimento de iluminação exclusivamente artificial, como picos de intensidade e espectro de emissão. De acordo com o exposto acima, os resultados são focados com os comprimentos de onda do vermelho e do azul. Além disso, a partir de um quantômetro, determina-se uma curva de calibração capaz de converter as medidas em mV, de um piranômetro, em PAR/s, radiação fotossinteticamente ativa,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , dada pelo quantômetro. Não obstante, o plano de iluminamento no centro do piso da bancada, local onde serão dispostas as alfaces, foi determinado para cada comprimento de onda.

## 3. DESCRIÇÃO DO MODELO FÍSICO

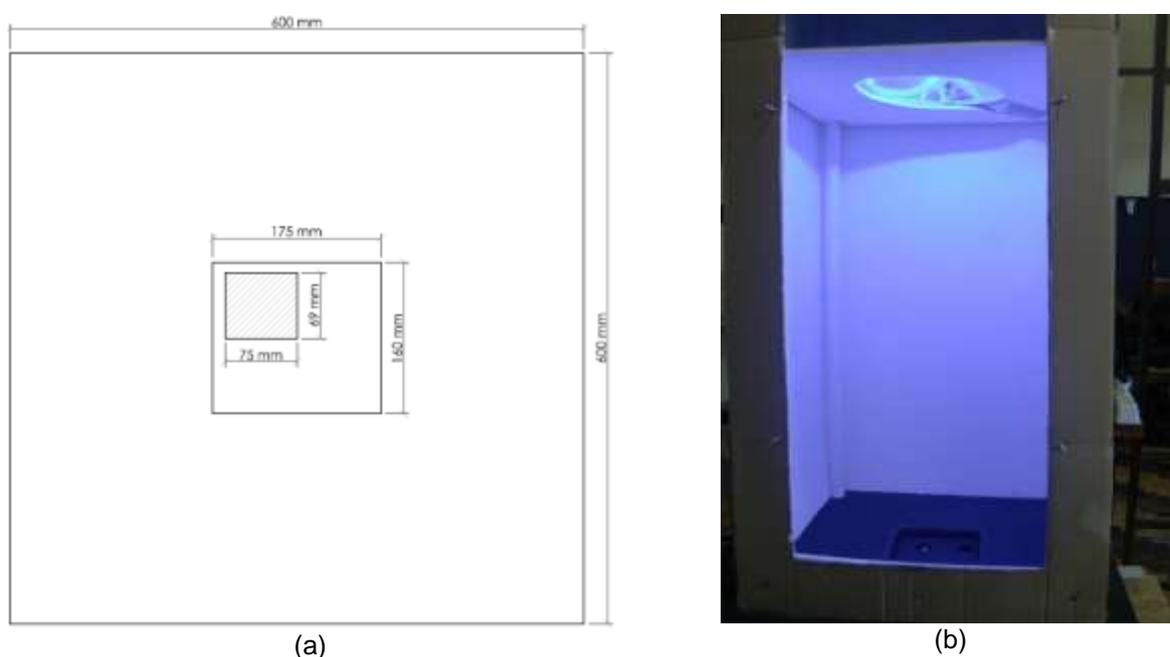
Neste capítulo, descreve-se brevemente a construção da bancada, a determinação do espectro de cores da lâmpada, bem como as melhorias feitas na lâmpada. A subseção 3.1 explica a construção da bancada e as melhorias. A subseção 3.2 apresenta a determinação do espectro de cores (vermelho, verde e azul) da lâmpada LED, e, finalmente, a seção 3.3 apresenta as melhorias realizadas na lâmpada.

### 3.1. Construção da bancada

Para a construção da bancada, materiais como papelão de parede simples, madeira do tipo MDF, parafusos, arruelas e porcas do tipo borboleta foram utilizados. A bancada foi

gerada com o dobramento do papelão formando um quadrado de 600 mm de aresta. A sua abertura para trabalho interno tem dimensões de 400 mm de largura por 800 mm, Figura 1b. Na sua base, em MDF, existe um orifício quadrado para que a luz possa atingir os sensores que estão montados sob a bancada. Este orifício tem dimensões de 175 mm de comprimento por 160 mm de largura, Figura (1a). A sustentação do teto, que é feita em MDF para o apoio da lâmpada, utiliza quatro tubos de PVC. Cada tubo possui furos, de 100 em 100 mm para que a altura da lâmpada possa ser modificada.

Para melhorar a refletividade dentro da cavidade a mesma foi pintada de branco [Incropera et al., 2008], assim como os pilares de sustentação do teto (canos de PVC), e o próprio teto, onde a lâmpada fica apoiada. A lâmpada foi centrada com relação ao centro da base. Os resultados e análises posteriores foram todos realizados sobre este ponto chamado de (0,0). A parte hachurada da Figura 1a (75 mm por 59 mm) representa a região na qual o sensor pode realizar a varredura. A área de 175 mm por 160 mm representa o orifício na base da bancada e a área representada pela área 600 mm por 600 mm representa a base da bancada.

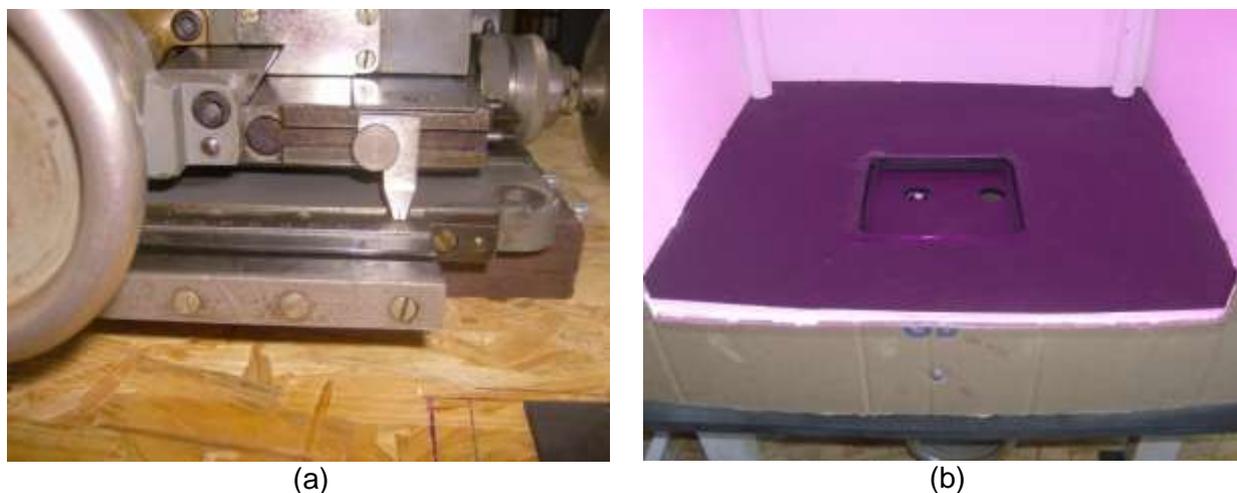


**Figura 1** – (a) Mapa da base do experimento dimensões em milímetros. (b) Bancada experimental.

A tampa da abertura da bancada, Figura 1b, também é de papelão sendo fixada na bancada por quatro parafusos prisioneiros à bancada e fixados por porcas do tipo borboleta para que não seja necessário o uso de ferramentas para abertura e fechamento da mesma. Os sensores estão montados sob a caixa, ficando expostos pelo orifício da base da bancada, Figura 2b. Para melhorar o isolamento da luz, impedindo a fuga e também a penetração de luz externa, foi colado nas aberturas o material EVA a fim de se diminuir a deformação do fechamento das aberturas. O piso foi pintado de preto para reduzir a sua reflexão para o restante da bancada, simulando uma situação extrema de ausência de refletividade.

Melhorias foram incorporadas na estrutura para que as medidas pudessem ser realizadas de forma mais eficaz e com aproveitamento maior da luz proveniente da lâmpada. Uma mesa de usinagem foi instalada na base da caixa com movimentação em dois sentidos, eixo x para o comprimento e y para a largura, Figura 2a. Os manípulos têm os seus movimentos lineares medidos em milímetros, Figura 1a, facilitando o mapeamento da luminosidade sem que fosse necessária a abertura para cada averiguação da posição dos sensores. Esta mesa está suportando o MDF na qual estão instalados os sensores.

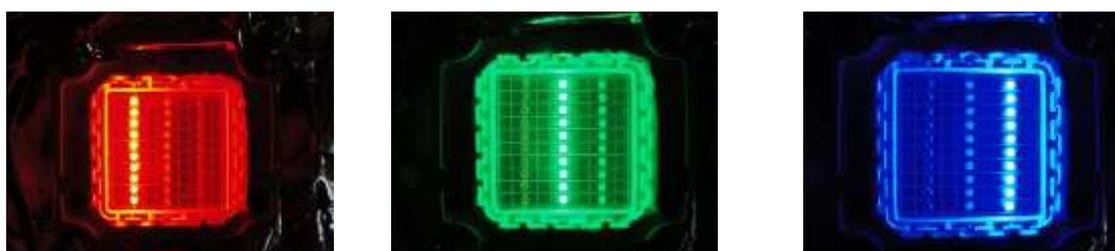
A altura mínima possível da lâmpada com relação ao sensor é de 200 mm, e a máxima é de 1100 mm. Os intervalos de altura são de 100 mm. As medidas foram realizadas a partir de 300 mm de altura para simular a existência do vegetal dentro da bancada até a altura máxima permitida.



**Figura 1** – (a) Mesa bidirecional de posicionamento. Escala em milímetros. (b) Sensores de luz, quantômetro e piranômetro, dispostos no piso da bancada.

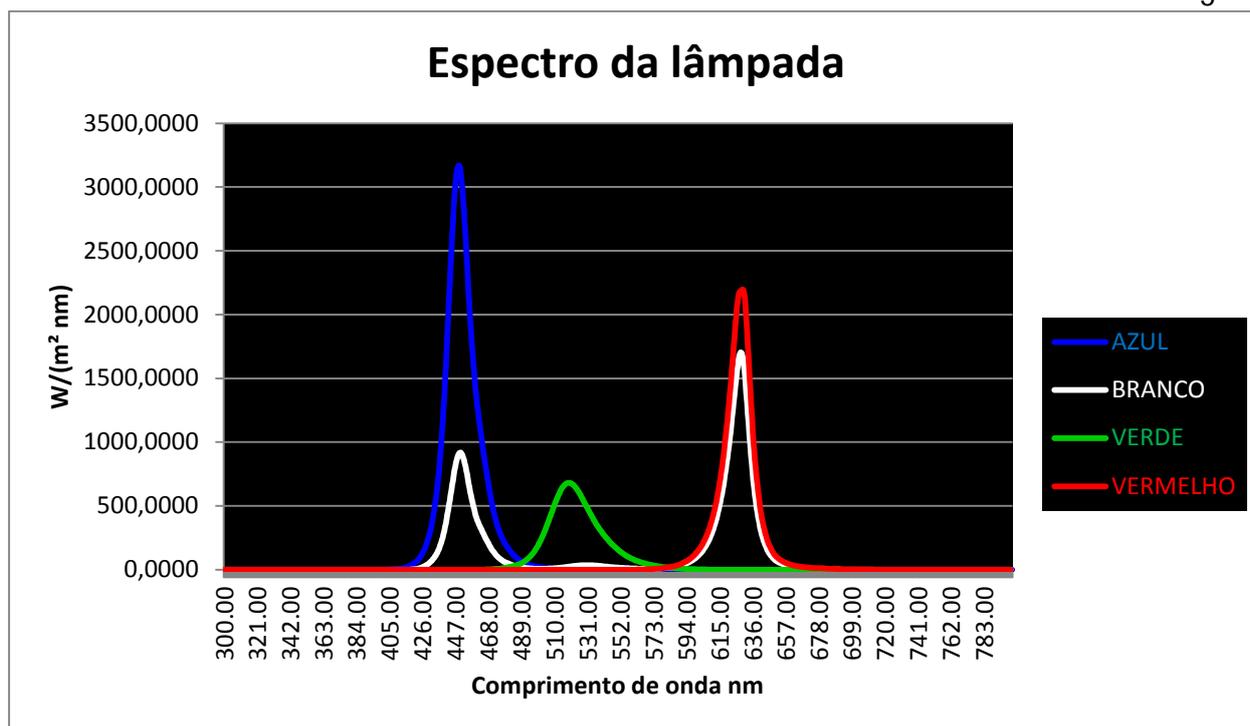
### 3.2. Determinação do espectro da lâmpada LED

Conforme comentado anteriormente, a iluminação interna para a suplementação provém de uma lâmpada LED de 30 W de potência elétrica consumida, contendo três fileiras de diodos (uma vermelha, uma verde e outra azul), Figura 3. Esta possui capacidade de iluminação também em outras cores, as quais são compostas pela mistura das mesmas, alterando-se somente a intensidade de cada uma das fileiras de LEDs.



**Figura 3** – Cores primárias da lâmpada LED. Em destaque as fileiras RGB.

Os espectros de emissão desses LEDs, Figura 4, foram obtidos com o auxílio de um espectrorradiômetro (espectômetro + fibra óptica + esfera de integração), esta esfera de integração revestida com óxido de bário, Figura 5. Resumidamente, o princípio de funcionamento do espectrorradiômetro é capturar a luz, por meio de uma entrada óptica, e enviá-la através de fibra óptica para um dispositivo monocromador, que separa os comprimentos de onda detectados. Posteriormente estes dados são enviados para um detector para pós-processamento da informação. Gera-se então um gráfico e uma tabela relacionando o poder emissivo espectral,  $W m^{-2} mm^{-1}$ , com os comprimentos de onda. O sensor é capaz de medir comprimentos de onda que variam entre 200 nm e 1000 nm.



**Figura 4** – Espectro do comprimento de onda das cores da lâmpada.



**Figura 5** - Lâmpadas na esfera de integração.

### 3.3. Modificações na lâmpada

Foram testadas duas situações de iluminação. Na primeira foi utilizada a lâmpada com a iluminação mais direcional para verificar o campo de iluminação na base e a variação de intensidade apresentada. Na outra configuração, buscou-se tornar a fonte aproximadamente difusa, lixando-se o acrílico de proteção da mesma. Para esta configuração, também se verificou o campo de iluminação na base e a homogeneidade do campo. Conforme será mostrado nos resultados, esta modificação acarretou em uma perda no valor máximo medido. No entanto, isto não acarretou em perdas significativas para o propósito do experimento. Outra explicação para a utilização de uma fonte aproximadamente difusa é a de a iluminação atingir todos os pontos da planta mais uniformemente. Finalmente, para melhorar o desempenho da lâmpada, material reflexivo, Figura 6, foi colado na parte côncava da mesma. Este material é semelhante a uma folha de alumínio.



**Figura 6** – Modificações na lâmpada.

#### 4. METODOLOGIA

Para a tomada das medidas com os sensores na bancada a porta foi fechada e a lâmpada foi ajustada para a sua intensidade máxima e definida uma cor. A partir destes ajustes se posicionou os sensores – um piranômetro, Figura 7, da marca Apogee modelo SP-110 e um quantômetro, Figura 8, da marca Li-Cor modelo 190 - por meio dos manipululos para a posição desejada.



**Figura 7** - Sensor do tipo piranômetro.

Foram definidas as posições nos quatro vértices e no centro da área de varredura para serem medidos. Este processo foi repetido para todas as cores analisadas e para as alturas de 300 mm até 1100 mm. Primeiramente o quantômetro, Figura 8 - Sensor do tipo quantômetro com o seu medidor.foi utilizado para realizar a medição e posteriormente foi utilizado o sensor piranômetro.



**Figura 8** - Sensor do tipo quantômetro com o seu medidor.

A partir do posicionamento do quantômetro, foram realizadas três medidas utilizando o modo de calcular a média, no qual são realizadas medidas por quinze segundos. Esta função é obtida no medidor de luz LI-250A acoplado ao sensor. Depois dos valores serem medidos, estes foram repassados para uma tabela, e foi calculada uma nova média. Este procedimento foi realizado para minimizar as flutuações e possíveis variações das medidas.

Posteriormente, as medidas foram tomadas pelo piranômetro. O processo de coleta foi semelhante ao do quantômetro, utilizando a média para minimizar flutuações e variações das medidas. Para este sensor, Figura 7, a medição foi realizada pelo equipamento de aquisição de dados, Figura 9, HP 34970A. Este aparelho foi ajustado para realizar quinze medidas em um intervalo de tempo de dois segundos entre as leituras. Para o pós-processamento também foi calculada a média dos valores obtidos.



**Figura 9** – Data logger HP 34970A para aquisição de dados.

De posse destes valores, foi possível comparar as medidas dos dois sensores para que se possa utilizar o piranômetro [mV] para o experimento de cultivo de alfaces (*Lattuca sativa*), uma vez que a unidade de referência para este tipo de experimento é  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , PAR/s – radiação fotossinteticamente ativa, unidade resultante da medida do medidor LI-250A convertida a partir da leitura de uma determinada corrente gerada, em  $\mu\text{A}$  (micro-Ampère).

## 5. RESULTADOS

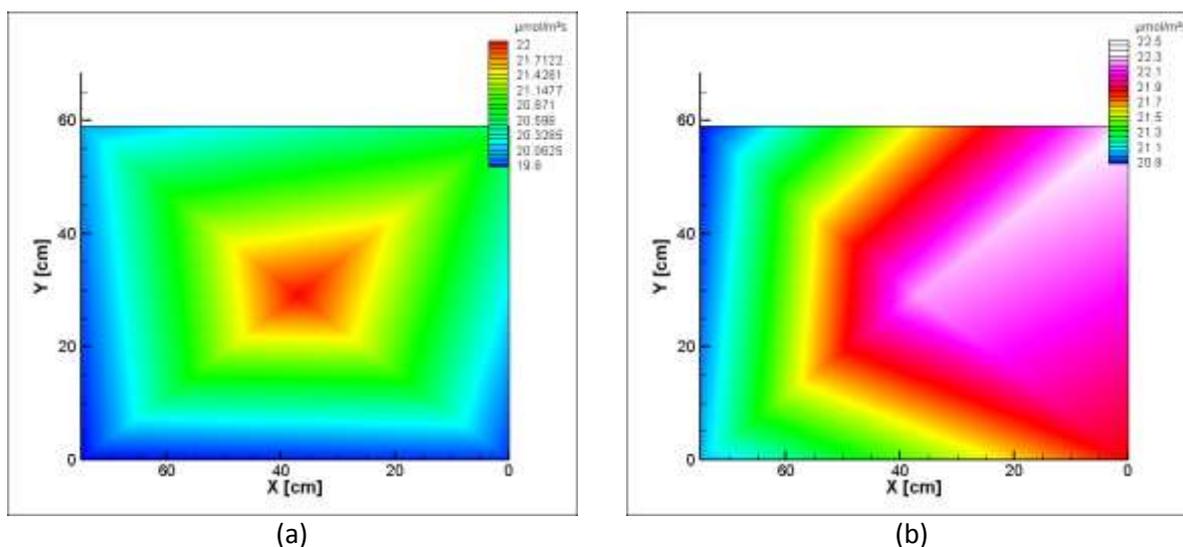
Os resultados obtidos estão divididos em quatro subseções. Na primeira são apresentados os planos de iluminação no piso da bancada, para a cor vermelha, em Três diferentes alturas. Na segunda são apresentadas as equações que relacionam as medidas em PAR/s com mV para as cores vermelha e azul, na terceira as incertezas de medição do experimento e na quarta considerações sobre a refletividade das paredes. Os resultados apresentados, quando apropriado (segunda e terceira subseção), são relativos às medidas realizadas no ponto (0,0), ver Figura 1a.

### 5.1. Distribuição do iluminamento no piso da bancada

De posse dos dados adquiridos é possível realizar um mapa de distribuição da luminosidade na base da bancada. Neste caso, a luz de maior interesse para a planta é a de cor vermelha. A planta depende do espectro completo de cores para o seu desenvolvimento pleno, porém para o caso de estudo o comprimento de onda correspondente à luz vermelha é a de maior interesse, pois é a cor que os fitocromos da planta absorvem para realizar a fotomorfogênese, objeto de estudo do agrônomo. Desta forma, os dados apresentados neste

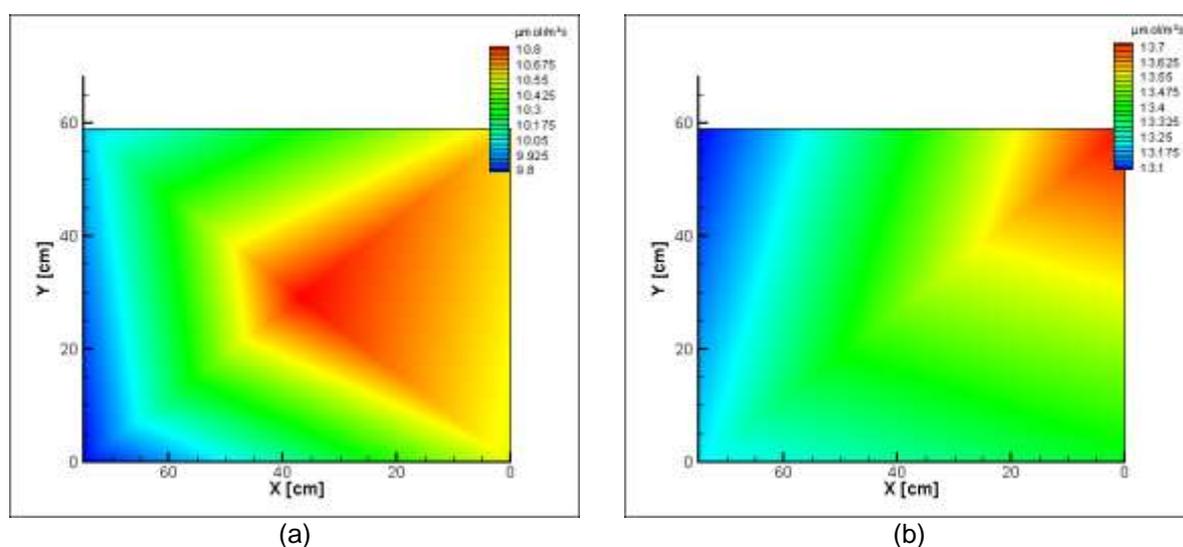
trabalho se referem à cor vermelha. Contudo, o mesmo procedimento foi efetuado para as cores azul, verde e branca.

A seguir são apresentados os mapas de distribuição de luz para três diferentes alturas. As comparações são realizadas, não somente por altura, como também pela utilização ou não do acrílico difuso. As imagens à esquerda são geradas com a utilização do acrílico e as da direita não utilizam o acrílico. A Figura 10 apresenta a distribuição para uma altura de 300 mm. Comparando-se os valores máximos e mínimos das duas configurações, observa-se que os mesmos não apresentam diferenças significativas. No entanto, a distribuição com iluminação aproximadamente difusa, Figura 10a, apresenta uma distribuição centrada no plano medido, conforme esperado.



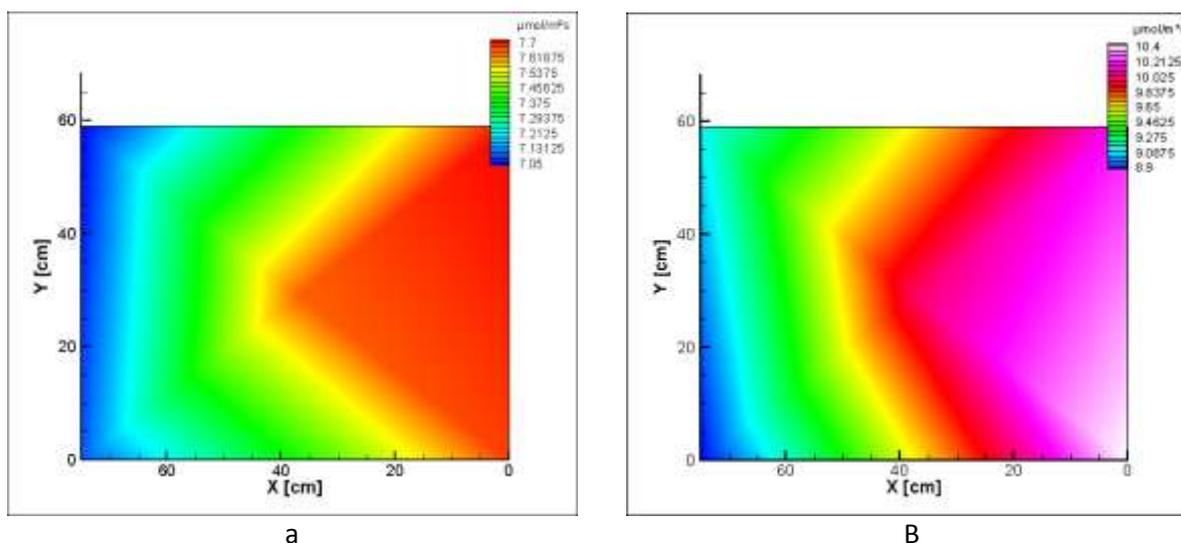
**Figura 10** – (a) Mapa de distribuição de luz para a lâmpada aproximadamente difusa a 300 mm de altura. (b) Mapa de distribuição para lâmpada com emissão direcional a 300 mm de altura

A distribuição para a altura de 700 mm é apresentada abaixo. A distribuição para a iluminação aproximadamente difusa, Figura 11a também é mais centrada no plano medido do que a direcional, Figura 11b. No entanto, os valores atingidos para a configuração direcional são em torno de 30% maiores.



**Figura 11** – (a) Mapa de distribuição de luz para a lâmpada aproximadamente difusa a 700 mm de altura. (b) Mapa de distribuição para lâmpada direcional a 700 mm de altura.

Por fim, a distribuição para 1100 mm mostra, mais claramente que as demais, as diferenças encontradas. Para a distribuição direcional, Figura 12b, o valor máximo atingido foi de  $10,3 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  frente aos  $7,65 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para a distribuição aproximadamente difusa, Figura 12a, com uma diferença relativa de 35%. Os menores valores encontrados para a iluminação espectral, Figura 13b, o valor obtido foi de  $8,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  contra  $7,05 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para a distribuição aproximadamente difusa, com uma diferença relativa de 26%. Em termos de amplitude, as diferenças entre o máximo e o mínimo para a iluminação aproximadamente difusa é de  $0,60 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  contra  $1,4 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  para a iluminação espectral. Este resultado já era esperando, uma vez que com uma fonte praticamente difusa tem-se um campo de iluminação bem mais centrado no plano de trabalho que com uma fonte direcional.



**Figura 12** – (a) Mapa de distribuição de luz para a lâmpada aproximadamente difusa a 1100 mm de altura. (b) Mapa de distribuição para lâmpada direcional a 1100 mm de altura.

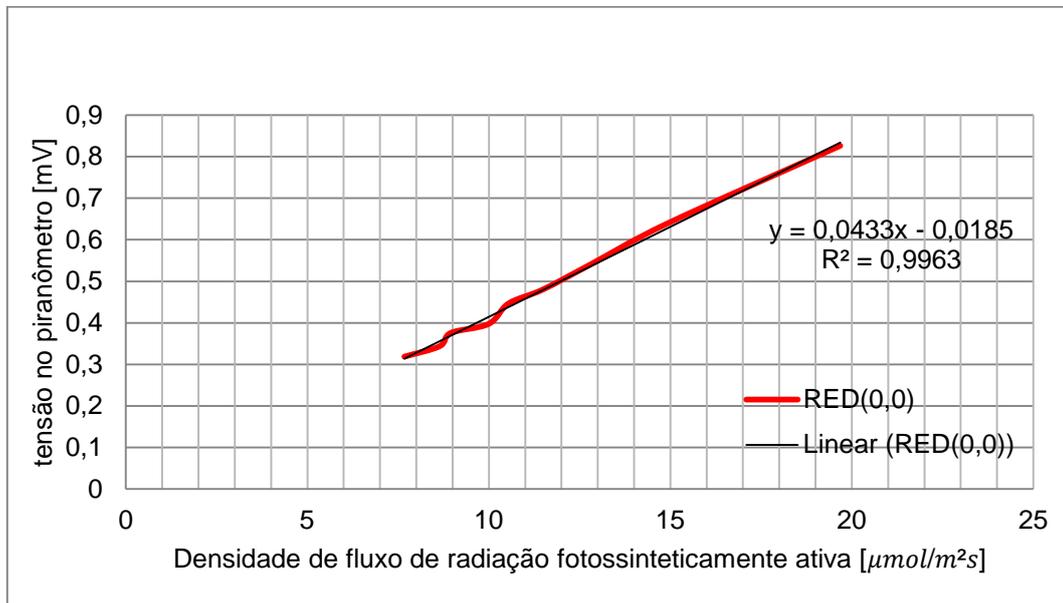
## 5.2. Curvas de calibração e correlação

Uma vez que o sensor de referência era o quantômetro, as curvas de calibração, Figuras 13 e 14, foram construídas a partir dos dados apresentados na Tabela 1. As cores consideradas foram o vermelho e o azul.

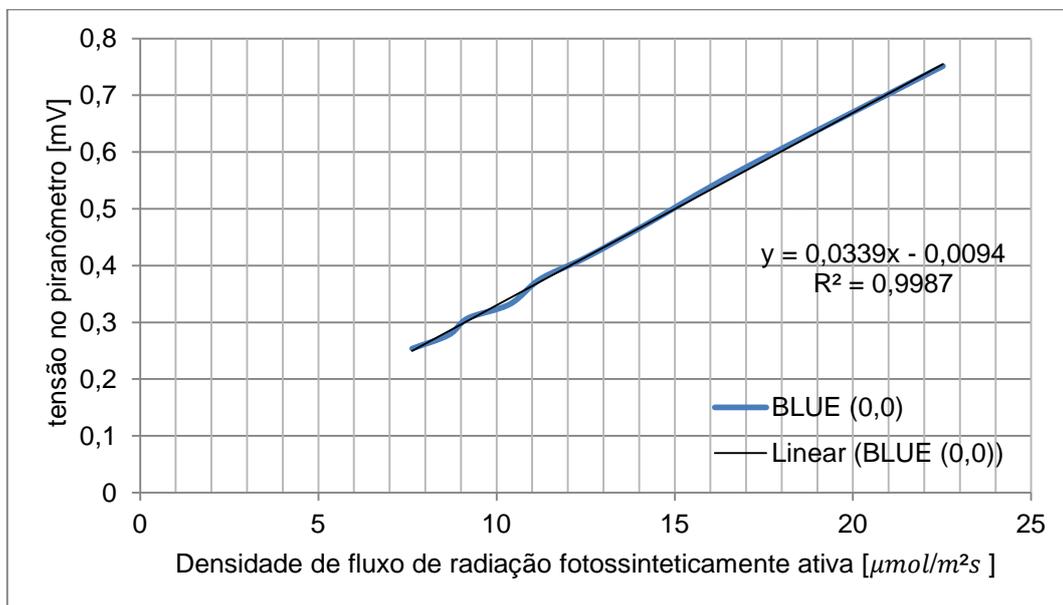
**Tabela 1** – Valores medidos na origem para as cores azul e vermelha para as alturas de 300 mm até 1100 mm

Altura[mm]	Vermelho (0,0)		Azul (0,0)	
	Quantômetro [ $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	Piranômetro [mV]	Quantômetro [ $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	Piranômetro [mV]
300	19,68	0,83	22,52	0,75
400	14,90	0,64	16,84	0,57
500	12,80	0,54	14,23	0,47
600	11,49	0,48	12,51	0,41
700	10,54	0,45	11,23	0,38
800	10,00	0,40	10,37	0,33
900	8,95	0,38	9,20	0,31
1000	8,65	0,34	8,66	0,28
1100	7,67	0,32	7,63	0,25

Conforme já era esperado, as curvas tem um comportamento linear visto que ambos os aparelhos obedecem a Lei de Ohm, a qual é linear. Isto é corroborado pela linha de tendência aplicada e pelo valor da variância,  $R^2$ , muito próximo de um, Figuras 13 e 14.

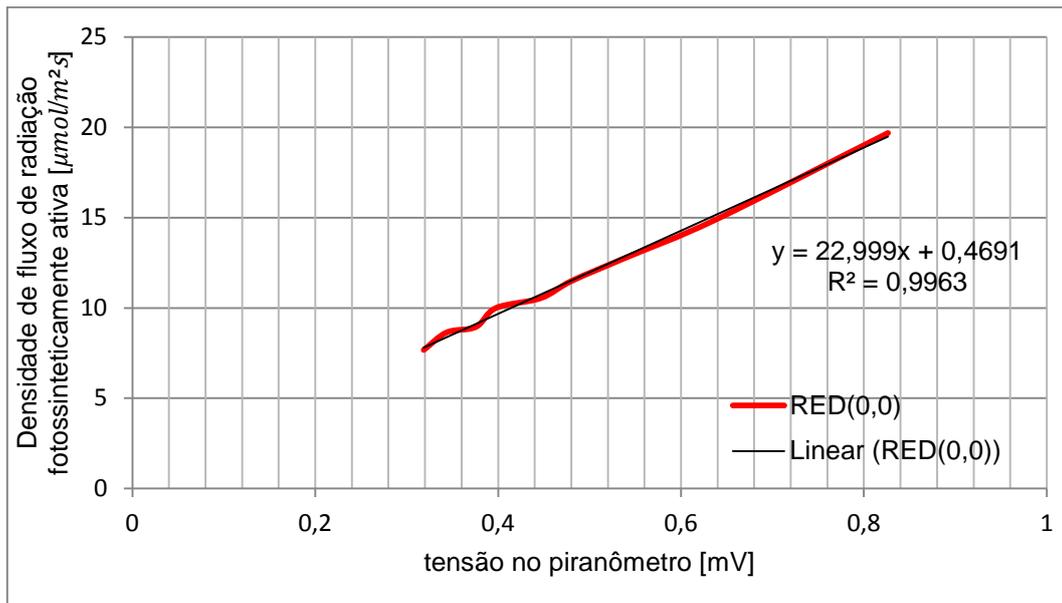


**Figura 13** – Curva de calibração do piranômetro com relação ao quantômetro para o vermelho.

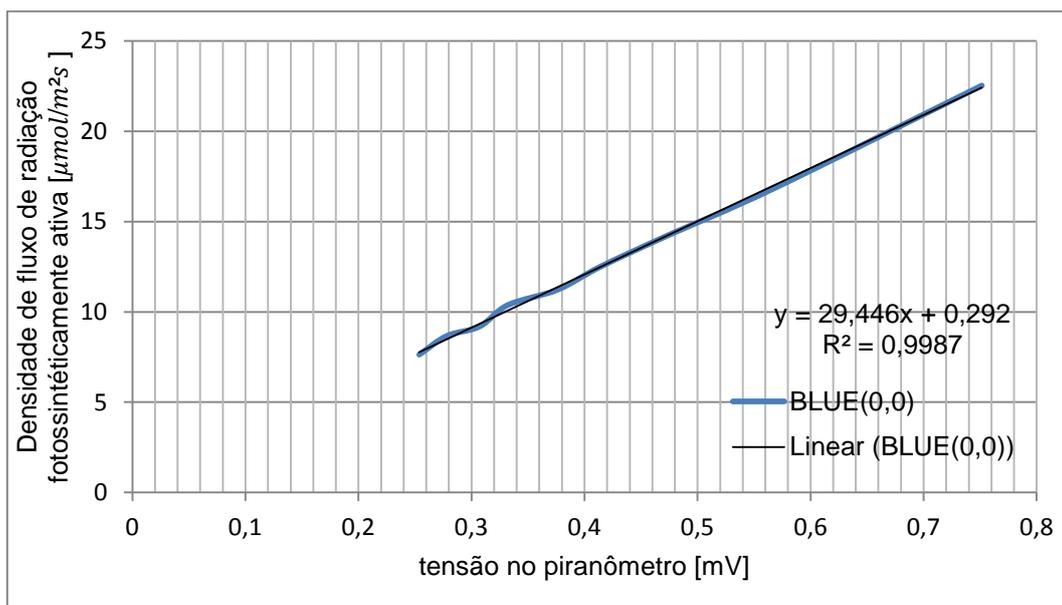


**Figura 14** - Curva de calibração do piranômetro com relação ao quantômetro para o azul.

A partir das curvas de calibração é possível obter as curvas de correlação, Figuras 15 e 16. A importância da obtenção destas reside no fato de que as medidas, dos próximos experimento, serão efetuadas com o piranômetro e, portanto, há a necessidade de se relacionar o valor de tensão medido, em mV, com a radiação emitida pela lâmpada, em PAR/s.



**Figura 15** – Curva de correlação para o vermelho.



**Figura 16** – Curva de correlação para o azul.

Em todos os gráficos, Figuras 13 a 16, observa-se uma pequena flutuação na curva de dados. De maneira geral, esta se estende até 0,4 mV. Uma provável causa para este comportamento, pode ser justificada pelo fato de se estar trabalhando muito próximo do fundo de escala do piranômetro, cuja faixa de medida varia entre 0,0 mV e 240 mV.

### 5.3. Incertezas de medição

A incerteza do resultado de uma medição é composta por diversos componentes que devem ser agrupados em duas categorias, de acordo com o método utilizado para estimar seu valor numérico. São elas:

(1) Tipo A – os que foram determinados utilizando-se a análise estatística em uma série de observações.

(2) Tipo B – os que foram determinados por quaisquer outros meios.

Assim, de posse das equações de correlação, ou seja,

$$y = 22,999 * x + 0,4691, \quad (1)$$

para o vermelho, e

$$y = 29,446 * x + 0,292, \quad (2)$$

para o azul, parte-se para a determinação das incertezas, nas quais  $y$  está em  $[\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}]$ ,  $x$  está em [mV] e as constantes possuem unidade de  $[\mu\text{mol}(\text{m}^{-2}\text{s}^{-1} \text{mV}^{-1})]$  e [mV] respectivamente.

As incertezas são determinadas para o vermelho e o azul, na altura 700 mm. O cálculo é realizado a partir da derivada da função de correlação multiplicada pela incerteza padrão, isto é,

$$\sqrt{\left(\frac{dy}{dx}u\right)^2}. \quad (3)$$

A determinação da incerteza padrão é tomada pela divisão do desvio padrão pelo número de amostras. A forma final é apresentada pelo valor médio da amostra e pela incerteza combinada, ou seja

$$y = x_{med} \pm U. \quad (4)$$

Para a incerteza associada às medidas realizadas com os LEDs vermelho e azul tem-se que, de acordo com as Equações (1) e (2), os seus valores são apresentados na Tabela (2).

**Tabela 2** – Tabela da determinação das incertezas para as cores vermelha e azul à 700 mm de altura.

	Vermelho (0,0)	Azul (0,0)
$\frac{dy}{dx}$ [ $\mu\text{mol m}^{-3}\text{s}^{-1}$ ]	22,999	29,446
$x_{med}$ [mV]	0,44172	0,44172
$u$ [mV]	0,002593	0,00216
$U$ [mV]	0,0596	0,0636
$y$ [ $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ]	$0,44172 \pm 0,0596$	$0,37334 \pm 0,0636$

A título de informação, seguem as informações técnicas sobre os sensores, tais como: erro, linearidade, repetibilidade e sensibilidade. Os dados são apresentados na Tabela 2 abaixo.

**Tabela 2** – Informações técnicas dos sensores.

	<b>Quantômetro</b>	<b>Piranômetro</b>
<b>Calibração</b>	$\pm 5\%$	$\pm 5\%$
<b>Linearidade</b>	1% até $10.000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\pm 3\%$
<b>Repetibilidade</b>	$\pm 2\%$	$\pm 1\%$
<b>Sensibilidade</b>	$6,07 \mu\text{A}$ por $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$5.00 \text{ W m}^{-2}$ per mV

#### 5.4. Refletividade das paredes e demais modificações

A pintura interna da caixa mostrou-se satisfatória em comparação com a configuração inicial, onde se tinha o papelão cru. Adicionada às demais modificações, certa medição para o vermelho ficou em  $0,0008262 \text{ mV}$ . Por outro lado, na configuração inicial, para mesma altura e mesma cor, mediu-se  $0,0001273 \text{ mV}$ . Isto é, um ganho de seis vezes em quantidade de energia entregue à planta.

## 6. CONCLUSÃO

A partir dos resultados apresentados, pôde-se observar que com as modificações realizadas na lâmpada, principalmente pela utilização do acrílico lixado, e pintura da bancada, obteve-se um campo centrado, uniformemente distribuído no plano onde ficarão dispostas as alfaces. O piso da bancada passou a receber uma iluminação mais uniforme, e quantidade de energia entregue à planta foi consideravelmente aumentada.

Embora a quantidade máxima de PAR/s medida para cada lâmpada LED tenha ficado uma ordem de grandeza abaixo do mínimo necessário para a fotossíntese, i.e., por volta de  $200$  a  $250 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , isso não se caracteriza como um problema para o experimento. Pelo contrário, uma vez que o objeto de interesse de estudos futuros são os fotorreceptores, o que realmente interessa é o fluxo de energia entregue à planta e não o fluxo de energia por tempo, i.e., a quantidade medida.

Outro ponto positivo a se destacar foi a calibração do sensor piranômetro para utilização no decorrer dos experimentos futuros. Foram comparados os dois sensores e determinada uma curva de correlação entre as unidades. Isto é de suma importância, uma vez que o sensor do tipo quantômetro não pertence ao laboratório (LETA – Laboratório de Estudos Térmicos e Aerodinâmicos). Desta forma, tem-se que os objetivos específicos do presente trabalho foram alcançados e contribuirão de maneira efetiva para os experimentos futuros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bula, R.J., Morrow, R.C., Tibbitts, T.W., Barta, D.J., Ignatius, R.W. e Martin, T.S. 1991: Light-emitting Diodes as a radiation source for plants. **HortScience**, **26(2)**: 203-205.
- Folta, K.M. & Maruhnich, S.A. 2007: Green light: a signal to slow down or stop. **Journal of Experimental Botany**, **58(12)**: 3099-3111.
- Hoenecke, M.E., Bula, R.J. e Tibbitts, T.W. 1992: Importance of 'blue' photon levels for lettuce seedlings grown under red-light-emitting diodes. **HortScience** **27(5)**: 427-430.
- Hogewonig, S.W., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., van Ieperen, W. e Harbinson, J. 2010: Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. **Journal of Experimental Botany**, **v61, n°11**: 3107-3117.
- Incropera F.P., Dewitt, D.P., Bergman, T.L., Lavine, A.S. "Fundamento de Transferência de Calor e Massa", LTC, 6ª edição, 2008.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto F., Hahida, S. e Toshihara, T. 2012: Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. **Environmental and Experimental Botany**, **75**: 128-133.
- Massa, G.D., Kim, H-H., Wheeler, R.M. e Mitchell, C.A. 2008: Plant productivity in response to LED lighting. **HortScience**, **43(7)**December: 1951-1956.
- Morrow, R.C. 2008: LED lighting in Horticulture. **HortScience**, **v43(7)**December: 1947-1950.
- Nhut, D.T., Takamura, T., Watanabe, H., Okamoto, K. e Tanaka, M. 2003: Responses of strawberry plantlets cultured *in vitro* under superbright red and blue light-emitting diodes (LEDs). **Plant Cell, Tissue and Organ Culture** **73**: 43-52.
- Samuolienė, G., Sirtautas, R., Brazaitytė, A., Sakalauskaitė, J., Sakalauskienė, S. e Duchovskis, P. 2011: The impact of red and blue light-emitting diode illumination on radish physiological indices. **Cent. Eur. J. Biol.** **6(5)**: 821-828.
- Savvides, A., Fanourakis, D. e van Ieperen, W. 2012: Co-ordination of hydraulic and stomatal conductances across light qualities in cucumber leaves. **Journal of Experimental Botany**, **63(3)**: 1135-1143.
- Yorio, N.C., Goins, G.D., Kagie, H.R., Wheeler, R.M. e Sager, J.C. 2001: Improving spinach, radish, and lettuce growth under red light-emitting diodes (LEDs) with blue light supplementation. **HortScience** **36(2)**: 380-383.

## ANEXO I – Medidas realizadas

Tabela AI - Dados obtidos das medições realizadas pelo quantômetro e piranômetro.

Alt.	X	Y	Quant.	Norm	Piran.									
30	0	0	19,68	<b>0,965</b>	0,826	8,86	<b>0,971</b>	0,364	22,52	<b>0,97</b>	0,752	21,13	<b>0,963</b>	0,838
30	0	59	20,65	<b>1,013</b>	0,847	9,3	<b>1,02</b>	0,374	23,63	<b>1,017</b>	0,771	22,25	<b>1,014</b>	0,856
30	37	29	22,07	<b>1,082</b>	0,857	9,81	<b>1,076</b>	0,377	24,95	<b>1,074</b>	0,778	23,77	<b>1,083</b>	0,868
30	75	0	19,56	<b>0,96</b>	0,796	8,713	<b>0,955</b>	0,348	22,28	<b>0,959</b>	0,72	21,07	<b>0,96</b>	0,806
30	75	59	19,97	<b>0,98</b>	0,813	8,917	<b>0,978</b>	0,357	22,76	<b>0,98</b>	0,739	21,48	<b>0,979</b>	0,825
40	0	0	14,9	<b>1,006</b>	0,639	6,72	<b>1,006</b>	0,281	16,84	<b>1,003</b>	0,568	15,91	<b>1,004</b>	0,644
40	0	59	15,06	<b>1,017</b>	0,646	6,813	<b>1,02</b>	0,284	17,09	<b>1,018</b>	0,578	16,09	<b>1,016</b>	0,652
40	37	29	15,28	<b>1,032</b>	0,654	6,893	<b>1,032</b>	0,287	17,31	<b>1,031</b>	0,582	16,34	<b>1,031</b>	0,659
40	75	0	14,38	<b>0,971</b>	0,621	6,46	<b>0,967</b>	0,271	16,27	<b>0,969</b>	0,55	15,38	<b>0,971</b>	0,626
40	75	59	14,44	<b>0,975</b>	0,624	6,517	<b>0,975</b>	0,273	16,44	<b>0,979</b>	0,555	15,49	<b>0,978</b>	0,629
50	0	0	12,8	<b>1,022</b>	0,541	5,773	<b>1,024</b>	0,237	14,23	<b>1,021</b>	0,474	13,6	<b>1,022</b>	0,543
50	0	59	12,88	<b>1,028</b>	0,548	5,81	<b>1,03</b>	0,241	14,36	<b>1,03</b>	0,482	13,69	<b>1,028</b>	0,550
50	37	29	12,9	<b>1,03</b>	0,551	5,803	<b>1,029</b>	0,242	14,33	<b>1,028</b>	0,483	13,69	<b>1,028</b>	0,554
50	75	0	12,09	<b>0,965</b>	0,513	5,423	<b>0,962</b>	0,224	13,44	<b>0,964</b>	0,449	12,86	<b>0,966</b>	0,515
50	75	59	11,96	<b>0,955</b>	0,521	5,383	<b>0,955</b>	0,229	13,37	<b>0,959</b>	0,46	12,73	<b>0,956</b>	0,526
60	0	0	11,49	<b>1,018</b>	0,48	5,16	<b>1,019</b>	0,21	12,51	<b>1,016</b>	0,414	12,13	<b>1,014</b>	0,480
60	0	59	11,8	<b>1,046</b>	0,489	5,3	<b>1,046</b>	0,214	12,85	<b>1,044</b>	0,422	12,49	<b>1,044</b>	0,489
60	37	29	11,66	<b>1,033</b>	0,492	5,267	<b>1,04</b>	0,215	12,77	<b>1,038</b>	0,423	12,52	<b>1,047</b>	0,491
60	75	0	10,65	<b>0,944</b>	0,461	4,76	<b>0,94</b>	0,201	11,61	<b>0,943</b>	0,399	11,25	<b>0,94</b>	0,462
60	75	59	10,81	<b>0,958</b>	0,467	4,843	<b>0,956</b>	0,204	11,8	<b>0,959</b>	0,405	11,42	<b>0,955</b>	0,469
70	0	0	10,54	<b>1,019</b>	0,447	4,71	<b>1,02</b>	0,195	11,23	<b>1,018</b>	0,376	11,08	<b>1,02</b>	0,444
70	0	59	10,62	<b>1,027</b>	0,452	4,747	<b>1,028</b>	0,198	11,33	<b>1,027</b>	0,383	11,15	<b>1,027</b>	0,451
70	37	29	10,84	<b>1,048</b>	0,454	4,84	<b>1,048</b>	0,198	11,51	<b>1,044</b>	0,383	11,38	<b>1,048</b>	0,452
70	75	0	9,747	<b>0,942</b>	0,424	4,35	<b>0,942</b>	0,185	10,43	<b>0,946</b>	0,358	10,24	<b>0,943</b>	0,422
70	75	59	9,963	<b>0,963</b>	0,433	4,443	<b>0,962</b>	0,189	10,65	<b>0,966</b>	0,367	10,46	<b>0,963</b>	0,433
80	0	0	10	<b>1,04</b>	0,398	4,437	<b>1,037</b>	0,173	10,37	<b>1,032</b>	0,332	10,44	<b>1,038</b>	0,395
80	0	59	9,917	<b>1,031</b>	0,416	4,413	<b>1,032</b>	0,181	10,35	<b>1,03</b>	0,346	10,37	<b>1,031</b>	0,413
80	37	29	9,853	<b>1,025</b>	0,412	4,387	<b>1,025</b>	0,179	10,3	<b>1,024</b>	0,342	10,3	<b>1,024</b>	0,408
80	75	0	9,03	<b>0,939</b>	0,379	4,023	<b>0,94</b>	0,165	9,513	<b>0,946</b>	0,316	9,463	<b>0,941</b>	0,376
80	75	59	9,277	<b>0,965</b>	0,396	4,13	<b>0,965</b>	0,172	9,743	<b>0,969</b>	0,329	9,723	<b>0,966</b>	0,393
90	0	0	8,95	<b>1,031</b>	0,376	3,963	<b>1,03</b>	0,163	9,197	<b>1,028</b>	0,307	9,32	<b>1,031</b>	0,372
90	0	59	9,003	<b>1,037</b>	0,38	4,003	<b>1,04</b>	0,165	9,267	<b>1,036</b>	0,312	9,37	<b>1,037</b>	0,376
90	37	29	8,93	<b>1,029</b>	0,382	3,97	<b>1,031</b>	0,166	9,2	<b>1,029</b>	0,312	9,3	<b>1,029</b>	0,378
90	75	0	8,33	<b>0,96</b>	0,355	3,68	<b>0,956</b>	0,154	8,583	<b>0,96</b>	0,29	8,687	<b>0,961</b>	0,351
90	75	59	8,177	<b>0,942</b>	0,359	3,63	<b>0,943</b>	0,156	8,463	<b>0,946</b>	0,295	8,523	<b>0,943</b>	0,356
100	0	0	8,647	<b>1,056</b>	0,344	3,803	<b>1,051</b>	0,149	8,66	<b>1,046</b>	0,278	8,93	<b>1,052</b>	0,340
100	0	59	8,477	<b>1,036</b>	0,352	3,763	<b>1,04</b>	0,152	8,56	<b>1,034</b>	0,283	8,8	<b>1,037</b>	0,346
100	37	29	8,58	<b>1,048</b>	0,35	3,79	<b>1,047</b>	0,151	8,667	<b>1,047</b>	0,282	8,887	<b>1,047</b>	0,345
100	75	0	7,55	<b>0,922</b>	0,322	3,34	<b>0,923</b>	0,139	7,7	<b>0,93</b>	0,261	7,84	<b>0,924</b>	0,318
100	75	59	7,67	<b>0,937</b>	0,331	3,397	<b>0,939</b>	0,143	7,817	<b>0,944</b>	0,268	7,98	<b>0,94</b>	0,326
110	0	0	7,673	<b>1,032</b>	0,319	3,383	<b>1,031</b>	0,138	7,633	<b>1,028</b>	0,254	7,927	<b>1,031</b>	0,313
110	0	59	7,717	<b>1,038</b>	0,323	3,413	<b>1,04</b>	0,139	7,697	<b>1,037</b>	0,258	7,98	<b>1,038</b>	0,317
110	37	29	7,65	<b>1,029</b>	0,322	3,39	<b>1,033</b>	0,14	7,64	<b>1,029</b>	0,257	7,907	<b>1,029</b>	0,317
110	75	0	7,09	<b>0,954</b>	0,299	3,12	<b>0,95</b>	0,129	7,09	<b>0,955</b>	0,239	7,337	<b>0,954</b>	0,294
110	75	59	7,033	<b>0,946</b>	0,306	3,107	<b>0,946</b>	0,132	7,063	<b>0,951</b>	0,244	7,287	<b>0,948</b>	0,300