

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA  
EMBARCADO PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE  
ÁREA FOLIAR POR INVERSÃO DA RADIAÇÃO  
FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA**

**ELIO SANTOS ALMEIDA JÚNIOR**

**PROF. Dr. MARCELO SACARDI BIUDES  
Orientador**

**Cuiabá, MT  
Setembro de 2017**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO  
INSTITUTO DE FÍSICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA  
EMBARCADO PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE  
ÁREA FOLIAR POR INVERSÃO DA RADIAÇÃO  
FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA**

**ELIO SANTOS ALMEIDA JÚNIOR**

*Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-graduação em  
Física Ambiental da Universidade  
Federal de Mato Grosso, como parte  
dos requisitos para obtenção do título  
de Mestre em Física Ambiental.*

**PROF. Dr. MARCELO SACARDI BIUDES**  
**Orientador**

**Cuiabá, MT  
Setembro de 2017**

### **Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.**

S237d Santos Almeida Júnior, Elio.  
DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA  
OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR POR INVERSÃO DA RADIAÇÃO  
FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA / Elio Santos Almeida Júnior. -- 2017  
49 f. ; 30 cm.

Orientador: Marcelo Sacardi Biudes.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de  
Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2017.  
Inclui bibliografia.

1. Instrumentação Microclimáticas. 2. Microcontroladores PIC. 3. Cobertura  
Vegetal. 4. Sensor Quantum. I. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

**Permitida a reprodução parcial ou total, desde que citada a fonte.**

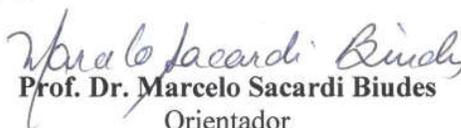
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO**  
**INSTITUTO DE FÍSICA**  
**Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental**

**FOLHA DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO:** DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA  
OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR POR INVERSÃO DA  
RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA

**AUTOR:** ELIO SANTOS ALMEIDA JÚNIOR

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 29 de setembro de 2017, pela  
comissão julgadora:

  
**Prof. Dr. Marcelo Sacardi Biudes**

Orientador  
Instituto de Física – UFMT

  
**Prof. Dr. Leone Francisco Amorim Curado**

Examinador Interno  
Instituto de Física – UFMT

  
**Prof. Dr. Carlos Alexandre Santos Querino**

Examinador Externo  
Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente (IEAA) – UFAM/Humaitá

## **DEDICATÓRIA**

**A Deus.  
Aos meus pais Elio e Leonice,  
e meus irmãos Filipe, Thiago e Nicolas.  
Dedico com muito amor e carinho.**

## AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por nunca me desamparar;

Em especial aos meus pais, **Elio Santos Almeida** e **Leonice Cordeiro Almeida**, que sempre me incentivaram a estudar, e nunca mediram esforços para me ajudar ao longo destes anos. Agradeço por tanto amor, carinho, dedicação, paciência, e por sempre acreditar em mim.

Aos meus irmãos **Filipe**, **Thiago** e **Nicolas** pelo pela confiança, incentivo e carinho.

Ao Prof. Dr. **Marcelo Sacardi Biudes**, pela orientação e principalmente pelo incentivo, apoio e confiança ingredientes que possibilitaram a realização deste trabalho;

Ao Prof. Me. **Armando da Silva Filho** e ao Prof. Dr. **Geraldo Aparecido Rodrigues Neves**, por sua ajuda em conhecimentos dada no passado, presente e sei que no futuro caso necessário, não só para mim más para todos que necessitarem de seus conhecimentos, serão atendidos pela grande pessoa que estes são;

Ao Prof. Dr. **José de Souza Nogueira** pelo grande trabalho feito para a realização deste curso de Pós-graduação em Física Ambiental;

Aos meus amigos e colegas **Lucas Douglas Rothmund**, **Lucas Peres Angelini**, **Juliana Barbosa da Silva Lotufo**, **Névio Lotufo Neto**, **Bruno Santos Abdalla**, **Daniela Roberta Borella**, **Luciene de Mello Taques**, **Luis Philippe de Arruda Lima**, **Flavia Regina Pereira Santos**, **Heloisa Agnes Bodnar Massad**, **Juliana Queiroz Borges de Magalhães Chegury**, **Acabias Marques Luiz**, **Keylyane Santos da Silva Alves**, **Pablinne Cynthia Batista da Silva e Silva**, **Dalila Morgana de Souza Mützenberg**, **Danielle Christine Stenner Nassarden**, **Marcos Alves Fausto**, **Vagner Marques Pavão**, **Larissa Leite Pavão** e **Nelson Mário Banga** pelo companheirismo, carinho, apoio e incentivo;

Aos colegas do Laboratório de Instrumentação **João Basso Marques** e **Lúcio Gonçalves Barbosa de Oliveira Gonçalves** que contribuíram na modelagem 3D e impressão das peças.

A todos os colegas do curso que de alguma forma contribuíram, os quais se tornaram grandes amigos.

A todos os professores e professoras do Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, que compartilharam seus conhecimentos;

Aos Técnicos **Soilce**, **Cesário** e **Jô**, pelo grande trabalho feito para o bom andamento deste curso de pós-graduação;

Ao **CNPQ** pelo apoio financeiro.

“A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro”. (Albert Einstein)

“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê”. (Arthur Schopenhauer)

“Todas as vitórias ocultam uma abdicação”. (Simone de Beauvoir)

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE TABELAS.....	II
LISTA DE ABREVIACOES E/OU SIMBOLOS.....	III
RESUMO.....	V
ABSTRACT.....	VI
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. PROBLEMÁTICA.....	1
1.2. JUSTIFICATIVA.....	1
1.3. OBJETIVO.....	2
1.3.1. Objetivo Geral.....	2
1.3.2. Objetivo Específico.....	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR.....	3
2.1.1. Medidao Direta do IAF.....	4
2.1.2. Medidao Indireta do IAF.....	5
2.2. Radiação Fotossinteticamente Ativa - RFA.....	6
2.3. FRAÇÃO DA RADIAÇÃO INCIDENTE INTERCEPTADA.....	6
2.4. INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO.....	7
2.5. DIODO EMISSOR DE LUZ COMO SENSOR RFA.....	8
2.6. SENSOR FOTOVOLTAICO.....	9
2.7. RESISTOR DEPENDENTE DE LUZ – LDR.....	10
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	11
3.1. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA.....	11
3.1.1. Display de cristal líquido – LCD.....	11
3.1.2. Reguladores de tensão.....	11
3.1.3. Microcontroladores.....	11
3.1.4. Módulo de Comunicação Sem Fio.....	12
3.1.5. Relógio de Tempo Real.....	12
3.1.6. Conversor Analógico Digital.....	13
3.1.7. Multiplexador/Demultiplexador.....	13
3.1.8. Cartão MicroSD.....	13
3.2. PROTOTIPAÇÃO.....	14
3.2.1. Módulo Principal.....	14
3.2.2. Sonda.....	14
3.2.3. Módulo Externo.....	14
3.3. AVALIAÇÃO DOS SENSORES ALTERNATIVOS.....	15
3.4. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO.....	15
3.5. VALIDAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO.....	16
3.6. CÁLCULO DO IAF POR INVERSÃO RFA.....	16
3.6.1. Razão de Transmissibilidade do Dossel.....	16
3.6.2. ngulo Zenital.....	17
3.6.3. Fração de Radiação Direta.....	18
3.6.4. Distribuição Angular das Folhas.....	18
3.6.5. Coeficiente de Extinção.....	18
3.7. Análise estatística dos dados.....	18
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
4.1.1. Avaliação das Características dos Sensores.....	22
4.2. SISTEMA DE CONTROLE E ARMAZENAMENTO.....	23
4.2.1. Módulo Principal.....	23
4.2.2. Sonda.....	24
4.2.3. Módulo Externo.....	24
4.2.4. Custo de Desenvolvimento do Sistema.....	25

4.2.5.	Firmware.....	25
4.3.	CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE MEDIÇÃO DA RFA;.....	28
4.4.	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DESENVOLVIDO .....	29
5.	CONCLUSÕES.....	31
5.1.	CONTRIBUIÇÕES .....	31
5.2.	TRABALHOS FUTUROS .....	31
6.	REFERÊNCIAS .....	32

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Diagrama conceitual de um dossel vegetativo onde (a) IAF = 1 e (b) IAF = 3. ....	4
<b>Figura 2</b> – Fotografia esférica. ....	5
<b>Figura 3</b> – Detalhes internos da estrutura de um LED (a) LED e (b) Chip Semicondutor. ....	8
<b>Figura 4</b> – Luminosidade Relativa para o LED branco. ....	9
<b>Figura 5</b> – Sensibilidade espectral para o fotodiodo BPW34. ....	9
<b>Figura 6</b> – Sensibilidade espectral para o LDR. ....	10
<b>Figura 7</b> – LCD de 20x4. ....	11
<b>Figura 8</b> – PIC18F4550. ....	12
<b>Figura 9</b> – Módulo transceptor nRF24L01+. ....	12
<b>Figura 10</b> – Relógio de tempo real DS1307. ....	12
<b>Figura 11</b> – Conversor analógico digital ADS1115. ....	13
<b>Figura 12</b> – Multiplexador/demultiplexador CD4051. ....	13
<b>Figura 13</b> – Shield para cartão MicroSD. ....	14
<b>Figura 14</b> – Distribuição dos sensores para avaliação, (a) LDR, (b) BPW, (c) LED e (d) Quantum. ....	15
<b>Figura 15</b> – Calibração do sistema desenvolvido, (a) Módulo principal, (b) Módulo Externo, (c) sensor Quantum e (d) Sonda. ....	16
<b>Figura 16</b> – Variação da radiação solar medida pelo sensor BPW34 e o sensor Quantum. ....	20
<b>Figura 17</b> – Correlação entre os dados do sensor BPW34 e sensor Quantum. ....	20
<b>Figura 18</b> – Variação da radiação solar medida pelo sensor LDR e o sensor Quantum. ....	21
<b>Figura 19</b> – Regressão polinomial entre os dados do sensor LDR e sensor Quantum. ....	21
<b>Figura 20</b> – Variação da radiação solar medida pelo sensor LED e o sensor Quantum. ....	22
<b>Figura 21</b> – Regressão linear simples entre os dados do sensor LED e sensor Quantum. ....	22
<b>Figura 22</b> – Comparativo entre as curvas de resposta do BPW34, LDR, Quantum e LED. ....	23
<b>Figura 23</b> – (a) Placa em circuito impresso e (b) case do módulo principal. ....	24
<b>Figura 24</b> – Sonda montagem final. ....	24
<b>Figura 25</b> – Módulo Externo. ....	25
<b>Figura 26</b> – Tela inicial. ....	26
<b>Figura 27</b> – Tela do menu principal. ....	26
<b>Figura 28</b> – Tela em modo de leitura. ....	26
<b>Figura 29</b> – Configuração da data e do horário local. ....	27
<b>Figura 30</b> – Configuração das coordenadas geográficas e do UTC offset. ....	27
<b>Figura 31</b> – Configuração da Distribuição Angular das Folhas. ....	28
<b>Figura 32</b> – Configuração do número de segmentos ativos da sonda. ....	28
<b>Figura 33</b> – Informações a respeito do firmware gravado. ....	28
<b>Figura 34</b> – Reta de calibração para a média dos oito segmentos da sonda. ....	29
<b>Figura 35</b> – Reta de calibração para o Módulo Externo. ....	29
<b>Figura 36</b> – Relação entre a $RFA_i$ , $RFA_t$ , TAU e o IAF obtido pelo ceptômetro comercial e o sistema desenvolvido. ....	30

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Custo dos módulos e sonda desenvolvidos. ....	25
<b>Tabela 2</b> – Custo dos equipamentos importados usados como referência. ....	25
<b>Tabela 3</b> – Arquivo .csv com o registro das medidas efetuadas, armazenando a data e a hora (TIMESTAMP), a RFA incidente (RFA <sub>i</sub> ), RFA transmitida (RFA <sub>t</sub> ), transmissibilidade do dossel (TAU), a fração de radiação direta (F <sub>b</sub> ), a distribuição foliar (X), o coeficiente de extinção (K), a latitude (LAT), a longitude (LONG) e o ajuste de offset UTC (UTC). ....	27
<b>Tabela 4</b> – Correlação de Pearson (r), coeficiente de Willmott (d), erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE) entre as medidas obtidas com o ceptômetro comercial e o sistema desenvolvido. ....	30

## LISTA DE ABREVIACOES E/OU SIMBOLOS

<b>ADC</b>	Analog to Digital Converter
<b>CSV</b>	Comma-separated values
<b>D</b>	Declinação solar
<i>e</i>	Eficiência de conversão
<b>E</b>	Energia do fóton
<b>EEPROM</b>	Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory
<i>ET</i>	Equação do tempo
<b>Fb</b>	Fração de radiação direta
<i>h</i>	Constante de Planck
<b>H</b>	Horário
<b>H<sub>0</sub></b>	Horário do meio dia solar
<b>IC</b>	Inter-Integrated Circuit
<b>IAF</b>	ndice de rea Foliar
<b>J</b>	Dia juliano do ano (dia do ano)
<b>K</b>	Coeficiente de extinção
<i>LC</i>	Correção da longitude
<b>LCD</b>	Liquid Crystal Display
<b>LED</b>	Light Emitting Diode
<b>MicroSD</b>	Micro Secure Digital
<i>O</i>	Média dos valores obtidos pelo ceptômetro comercial
<i>O<sub>i</sub></i>	Valores obtidos pelo ceptômetro comercial
<b>P</b>	Quantidade de matéria seca
<i>P<sub>i</sub></i>	Valores obtidos pelo sistema desenvolvido
<b>PIC</b>	Programmable Intelligent Computer
<i>r</i>	Coeficiente de correlação
<b>R<sup>2</sup></b>	Coeficiente de determinação
<i>r<sub>c</sub></i>	Refletância da vegetação
<b>RFA</b>	Radiação Fotossinteticamente Ativa
<b>RFA<sub>i</sub></b>	Radiação Fotossinteticamente Ativa Incidente
<b>RFA<sub>t</sub></b>	Radiação Fotossinteticamente Ativa Transmitida
<i>r<sub>i</sub></i>	Fração da radiação incidente refletida medida acima do dossel
<i>r<sub>s</sub></i>	Refletância do solo abaixo do dossel
<b>RTC</b>	Real Time Clock
<b>S</b>	Densidade de fluxo da radiação interceptada pelo cultivo

<b>SPI</b>	Serial Peripheral Interface
<b><math>t</math></b>	Fração de radiação incidente transmitida pelo dossel
<b>USART</b>	Universal Synchronous and Assynchronous Receiver and Transmitter
<b><math>\nu</math></b>	Frequência da luz
<b><math>X</math></b>	Distribuição angular das folhas
<b><math>Z</math></b>	Ângulo zenital
<b><math>f</math></b>	Fração da radiação incidente interceptada
<b><math>\theta</math></b>	Latitude
<b><math>\lambda</math></b>	Longitude
<b><math>\tau</math></b>	Razão de transmissibilidade do dossel
<b><math>\varrho</math></b>	Fração RFA potencial que atinge a sonda

## RESUMO

ALMEIDA JÚNIOR, E. S. **DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA EMBARCADO PARA OBTENÇÃO DO ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR POR INVERSÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA**. Cuiabá, 2017, 49f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

A obtenção do Índice de Área Foliar (IAF) é de grande importância na compreensão e acompanhamento das respostas vegetais aos diferentes estímulos atmosféricos. No entanto, os métodos diretos são destrutivos e demandam intensa mão de obra e tempo. Neste sentido, este trabalho objetivou o desenvolvimento de um sistema embarcado para obtenção do IAF por inversão da radiação fotossinteticamente ativa. O sistema desenvolvido conta com um módulo principal para o controle e armazenamento das médias, uma sonda para a leitura da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) transmitida através do dossel e um módulo externo que obtém a RFA incidente acima do dossel e envia remotamente as medidas para o módulo principal, desta forma obtendo o IAF com medidas simultâneas da RFA. Ao se compara o sistema desenvolvido com um equipamento comercial notou-se alta correlação estatisticamente significativa ( $r = 0,9743$ ), um MAE de 0,3767, RMSE de 0,4372 e um coeficiente de Willmott ( $d = 0,9816$ ) indicando uma alta correspondência entre os valores do IAF obtido com o sistema desenvolvido e o equipamento comercial.

**Palavras-chave:** Instrumentação microclimáticas, microcontroladores PIC, cobertura vegetal, sensor quantum.

## ABSTRACT

ALMEIDA JÚNIOR, E. S. **DEVELOPMENT OF AN EMBEDDED SYSTEM TO OBTAIN THE LEAF AREA INDEX BY INVERSION OF FOTOSINTETICALLY ACTIVE RADIATION.** Cuiabá, 2017, 49f. Dissertation (Masters in Environmental Physics) Institute of Physic, Federal University of MatoGrosso.

The obtaining of the Leaf Area Index (LAI) is of great importance in the understanding and monitoring of plant responses to different atmospheric stimuli. However, direct methods are destructive and require intense labor and time. In this sense, this work aimed the development of an embedded system to obtain LAI by inversion of photosynthetically active radiation. The developed system has a main module for the control and storage of the media, a probe for the reading of the Photosynthetically Active Radiation (PAR) transmitted through the canopy and an external module that obtains the PAR incident above the canopy and remotely sends the measurements to the main module, thus obtaining the LAI with simultaneous measurements of the PAR. When comparing the developed system with commercial equipment, a high statistically significant correlation was observed ( $r = 0.9743$ ), an MAE of 0.3767, RMSE of 0.4372 and a Willmott coefficient ( $d = 0.9816$ ) indicating a high correspondence between the LAI values obtained with the developed system and the commercial equipment.

**Keywords:** Microclimatic instrumentation, PIC microcontrollers, plant cover, quantum sensor.

# **1. INTRODUÇÃO**

## **1.1. PROBLEMÁTICA**

O Índice de Área Foliar (IAF) é um parâmetro biofísico definido como a razão entre a área do limbo foliar por unidade de área da superfície do solo. É uma medida valiosa que possibilita avaliar a densidade do dossel e biomassa do vegetal, possibilitando a compreensão e acompanhamento das respostas vegetais aos diferentes estímulos atmosféricos.

A obtenção do IAF por métodos diretos consiste na coleta e na medida meticulosa das folhas obtendo a área do limbo foliar. Esta técnica requer intensa mão-de-obra, demandando muito tempo e a destruição do exemplar medido, o que impossibilita repetições das medidas.

Na tentativa em obter o IAF, visando a redução do tempo e a preservação dos ecossistemas medidos, métodos indiretos vêm sendo desenvolvidos. Tais métodos se baseiam na utilização de medidas de variáveis relacionáveis, como por exemplo, a quantidade de luz que é transmitida através do dossel.

A obtenção do IAF de forma fácil e rápida é um desafio de grande importância, uma vez que a quantidade e distribuição espacial do material foliar é de grande importância na compreensão das relações solo-planta-atmosfera.

## **1.2. JUSTIFICATIVA**

O desenvolvimento de soluções alternativas é caracterizado pela utilização de componentes eletrônicos de fácil aquisição com capacidade de reproduzir com precisão as medidas feitas por instrumentos comerciais, o que possibilita sua replicação, minimiza a dependência de importação e facilita o acesso a equipamentos de instrumentação.

A partir dos valores de Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) incidente e da RFA transmitida é possível determinar o IAF, esta metodologia parte do princípio de que quanto maior a densidade foliar, maior será a fração da radiação solar absorvida pela planta e conseqüentemente, menor a fração da RFA transmitida. O desenvolvimento de um equipamento alternativo capaz de calcular o IAF instantaneamente empregando este modelo matemático é viável, o que possibilita sua replicação.

### **1.3. OBJETIVO**

#### **1.3.1. Objetivo Geral**

O objetivo desse trabalho foi desenvolver um sistema embarcado para a obtenção do índice de área foliar por inversão da Radiação Fotossinteticamente Ativa.

#### **1.3.2. Objetivo Específico.**

- Avaliar elementos sensores para medição da RFA;
- Desenvolver e construir o sistema de controle e armazenamento das leituras;
- Calibrar os sensores de medição da RFA;
- Avaliar o desempenho do sistema desenvolvido para obter o IAF em relação ao sistema comercial.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

O Índice de Área Foliar (IAF) é uma variável que expressa a quantidade de material foliar que há em um determinado cultivo. Por definição, é a razão da área de um lado das folhas por unidade de área do solo. (WATSON, 1947). Para cultivos que apresentam folhas largas e planas, esta definição é aplicada para ambos os lados de uma folha tendo em vista que possuem a mesma área. Entretanto plantas que não apresentam estas características como folhas enroladas, enrugadas ou cilíndricas não se pode definir claramente o lado da folha (CHEN & BLACK, 1992).

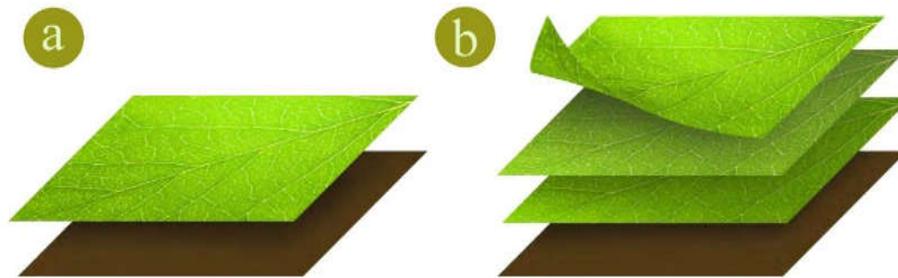
Afim de solucionar esta problemática, o conceito de área foliar projetada foi proposto, levando em consideração a forma irregular das folhas, e o ângulo de projeção, o valor do IAF é apresentado como a maior projeção de área foliar por unidade de área do solo (MYNENI et al., 1997). Com base no cálculo da área total de interceptação de radiação dos elementos da planta e nos cálculos dos coeficientes de projeção média e projeções angulares, obteve-se uma aproximação, onde metade do total da área interceptada por unidade de área do solo fosse mais representativo na obtenção do IAF para plantas de folhas não planares do que a estimativa pela área foliar projetada (LANG et al., 1991; CHEN; BLACK, 1992). Entretanto este raciocínio não possui significado físico ou biológico, enquanto que a área de interceptação total tem um significado físico (interceptação de radiação) e a área total tem uma conotação biológica (troca de gás). Assim outras propostas e interpretações de IAF foram desenvolvidas e estas variam de acordo com a técnica empregada (JONCKHEERE et al., 2004).

Desta forma, assume-se como IAF, a razão entre a metade da área foliar total pela área total da superfície do solo sob o cultivo (WATSON, 1947; KIRA et al., 2016; LIN & WEST, 2016; LI et al., 2017; WASAYA et al., 2017).

A quantidade e distribuição espacial do material foliar é crucial na compreensão das interações entre o dossel vegetativo e a atmosfera, influenciando nos fluxos de energia, massa e momentum da superfície vegetada, a estrutura do dossel é comumente quantificada em termos de seu índice de área foliar (FANG et al. 2014).

Os valores de IAF são adimensionais, por ser a razão entre duas áreas, a exemplo, um dossel com um IAF de 1 possui uma relação de 1:1 de área foliar por área de solo (Figura 1a), um dossel com um IAF de 3 terá uma relação de 3:1 de

área foliar por área de solo (Figura 1b), os valores de IAF podem variar de 0 (solo nú) a 7 ou 8 (florestas tropicais densas). As medidas de IAF servem de parâmetro de entrada nos modelos de interação solo planta atmosfera, modelos de circulação global e na interpretação das medidas de fluxo em ecossistemas (LEVY & JARVIS, 1999).



**Figura 1** – Diagrama conceitual de um dossel vegetativo onde (a) IAF = 1 e (b) IAF = 3.

Não existe a melhor forma de se obter o IAF, cada método possui suas vantagens e desvantagens, sendo a escolha do método dependente principalmente do objetivo da pesquisa.

### 2.1.1. Medição Direta do IAF

Tradicionalmente, pesquisadores obtinham o IAF coletando todas as folhas de um exemplar e minuciosamente medindo a área de cada folha. Equipamentos modernos como scanners, tornam este processo mais eficiente, o que não isenta a necessidade de intensiva mão-de-obra, consumindo muito tempo e a impossibilidade de repetições no mesmo exemplar. É, no entanto, o método mais preciso no cálculo do IAF, uma vez que cada folha é medida fisicamente (BRÉDA, 2003).

O método da árvore representativa consiste na amostragem destrutiva de uma pequena quantidade de árvores representativas, a partir das quais a área foliar e a distribuição vertical são medidas. Embora destrutivo, é menos impactante em grandes populações, sendo bastante empregado na avaliação de culturas agrícolas e sistemas florestais (JONCKHEERE et al., 2004).

A utilização de armadilhas é uma metodologia de estimativa semidireta do IAF, não sendo recomendado seu uso em cultivos sempre verde tendo em vista que seu princípio de funcionamento consiste na captura das folhas senescentes que caem, o que permite estimar o IAF (LIU et al., 2015).

Após a coleta das folhas, a área foliar pode ser calculada por meio de técnicas gravimétricas ou planimétricas. O método gravimétrico consiste na correlação do peso seco das folhas e a área foliar das amostras coletadas em campo, a abordagem planimétrica baseia-se no princípio da correlação entre a área foliar individual e o número de unidades de área cobertas por essa folha em um plano horizontal. (DAUGHTRY, 1990).

### 2.1.2. Medição Indireta do IAF

Na tentativa de se obter um método de medir o IAF, visando a redução do tempo necessário a obtenção das medidas e evitar a destruição dos ecossistemas medidos métodos indiretos foram desenvolvidos. Esses métodos inferem o IAF a partir de medidas de variáveis relacionadas, como por exemplo a quantidade de luz que é transmitida ou refletida por um dossel (CHEN et al., 1997).

Fotografias esféricas foi um dos primeiros métodos utilizados na estimativa indireta do IAF (Figura 2).



**Figura 2** – Fotografia esférica tirada próxima ao solo com lente olho de peixe.

Pesquisadores utilizam a fotografia do dossel tirada debaixo para cima próximo ao solo com lentes olho de peixe. A análise é feita por meio de softwares que computam a diferença entre os pixels com vegetação e os pixels dos troncos, céu e nuvens (FOURNIER et al., 1996).

Outro método consiste na utilização de índices de vegetação como dados de entrada para estimativa do IAF (BIUDES et al., 2014). Os índices de vegetação são provenientes das diferentes combinações entre os comprimentos de onda medidos por sensores orbitais para os valores de refletância da superfície, caracterizando

propriedades do dossel como IAF, crescimento do dossel, carências de nutrientes no solo e detecção de doenças ao longo do tempo (HUETE et al., 2002; SILVA et al., 2016).

## 2.2. Radiação Fotossinteticamente Ativa - RFA

RFA (Radiação Fotossinteticamente Ativa) é a parcela do espectro da radiação solar contida no intervalo de 400 a 700 nanômetros de comprimento de onda, representa a parcela do espectro solar utilizado pelas plantas durante a fotossíntese (MCCREE, 1972). A obtenção dos valores da RFA é de grande importância em trabalhos como a compreensão das interações planta atmosfera, eficiência fotossintética, produção vegetal e fixação de carbono (GITELSON et al., 2015).

## 2.3. FRAÇÃO DA RADIAÇÃO INCIDENTE INTERCEPTADA

A produção de matéria seca de um dossel Equação (1) está diretamente relacionado a quantidade de radiação fotossintetizante interceptada pelo dossel e pode ser modelada como o produto de três termos (MONTEITH, 1977).

$$P = e f S \quad (1)$$

onde  $P$  é a quantidade de matéria seca produzida,  $S$  é a densidade de fluxo da radiação interceptada pelo cultivo,  $f$  é fração da radiação incidente interceptada pelo cultivo, e  $e$  é eficiência de conversão. A fração de interceptação ( $f$ ) e a eficiência de conversão ( $e$ ) são determinados pela fisiologia e estrutura do cultivo.

A radiação solar incidente é o único fator ambiental nesta equação, esta pode ser absorvida pelo dossel, transmitida através do dossel e absorvida ou refletida pelo solo, ou refletida pelo dossel. Em princípio, apenas a RFA absorvida pelo dossel é utilizada na produção de matéria seca, desta forma,  $f$  pode ser definido como sendo a fração de absorção (Equação 2).

$$f = 1 - t - r_i + t r_s \quad (2)$$

onde  $t$  é a fração de radiação incidente transmitida pelo dossel,  $r_i$  é a fração da radiação incidente refletida medida acima do dossel e  $r_s$  é a refletância do solo abaixo do dossel. Os dois últimos termos são frequentemente ignorados, a Equação (3) é a aproximação resultante.

$$f \cong 1 - t \quad (3)$$

O erro resultante para esta aproximação é pequeno quando  $t$ ,  $r_i$  e  $r_s$  são medidos no comprimento de onda RFA, isto se deve ao fato de que a maior fração

da radiação RFA é absorvida pelas folhas das plantas. O erro é muito mais significativo quando as medidas são feitas utilizando a radiação solar total, isto é em decorrência aos grandes coeficientes de dispersão das folhas para a radiação do infravermelho próximo.

Como uma estimativa do erro, assume-se que:

$$r_i = (1 - t) r_c + t r_s \quad (4)$$

onde  $r_c$  é a refletância da vegetação, ao se substituir na Equação (2) fica:

$$f = (1 - t)(1 - r_c) \quad (5)$$

O erro resultante para a utilização da Equação (3) é aproximadamente igual a  $r_c$ , tipicamente menor que 0,05 para o comprimento de onda do RFA (MONTEITH, 1977).

## 2.4. INSTRUMENTAÇÃO DE BAIXO CUSTO

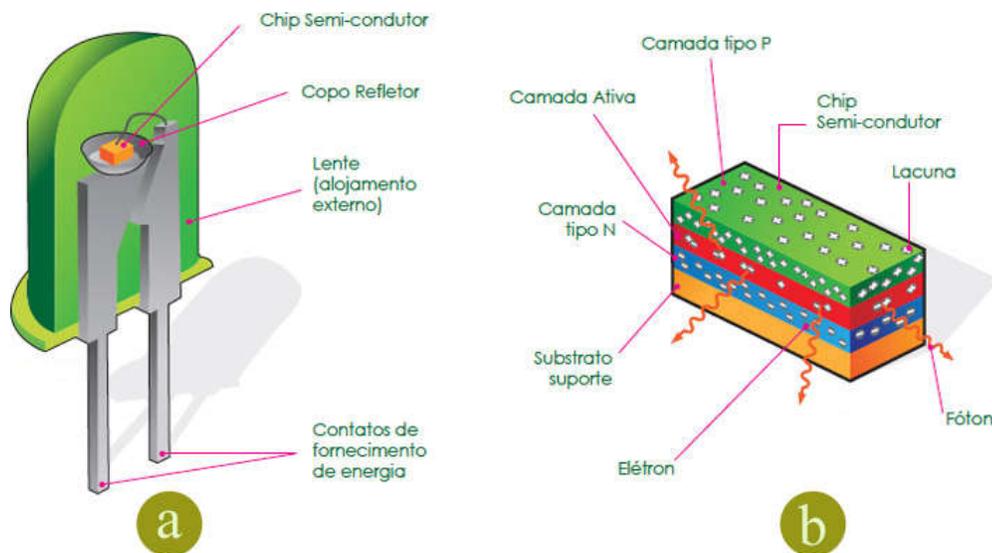
A procura por soluções de baixo custo tem se tornado cada vez mais frequente, evidenciando uma necessidade na aquisição de instrumentos, dataloggers e sensores necessários ao suporte dos pesquisadores. Esta demanda se torna mais presente quando as soluções comercialmente existentes apresentam elevados valores de aquisição ou não possuem as funcionalidades necessárias (MIMS, 1992; FOURNIER et al., 1996; NIEVES et al., 1997; COLLINS e LU, 2001; LAU et al., 2006; HOLSTIUS et al., 2014).

Os circuitos eletrônicos programáveis (microcontroladores) oferecem grandes vantagens, como por exemplo a programação de ações de controle em seus terminais de saída, decorrentes da programação ou reativa as leituras efetuadas em seus terminais de entrada, propiciando o desenvolvimento de diferentes aplicações (LAMBROU et al., 2014). A diferença entre os diversos tipos de microcontroladores se dá através das suas capacidades de processamento, quantidade de memória, quantidade de terminais de entrada e saída e protocolos de comunicação suportados.

O desenvolvimento de novos equipamentos pode ser considerado um processo de negócio de grande importância, propiciando o avanço científico e tecnológico, favorecendo diretamente a capacidade de inovação e contribuindo na popularização do conhecimento científico e da pesquisa (HARMSSEN, 2000).

## 2.5. DIODO EMISSOR DE LUZ COMO SENSOR RFA

O Diodo Emissor de Luz (LED) é um componente eletrônico semicondutor (Figura 3a) construído a partir de uma rede cristalina de silício ou germânio, formando uma junção P-N (Figura 3b). Em um material semicondutor os elétrons ocupam níveis de energia que estão agrupados em duas bandas, condução e valência. Ao se submeter os terminais de um LED a uma diferença de potencial, haverá o deslocamento de eletros da camada de condução para a camada de valência, liberando a energia excedente na forma de um fóton. O comprimento de onda da luz emitida (cor) varia de acordo com a estrutura e os elementos utilizados na dopagem da camada ativa (NIEVES et al., 1997; PIMPUTKAR et al., 2009).



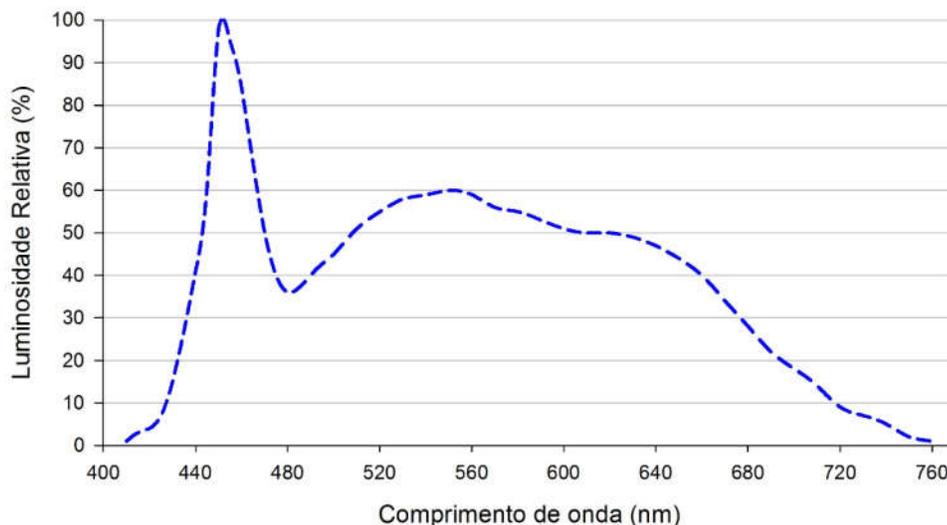
**Figura 3** – Detalhes internos da estrutura de um LED (a) LED e (b) Chip Semi-condutor.

Os fótons possuem energia, podendo ser representada pela Equação (6), onde  $\nu$  é a frequência da luz e  $h$  a constante de Planck (NIEVES et al., 1997). Quando estes fótons incidem sobre uma junção P-N ao penetrar o material podem ser absorvidos por elétrons na banda de valência, se a energia absorvida pelo elétron for a mesma que a diferença entre as bandas de valência e condução, o elétron posará à banda de condução gerando uma lacuna, o processo contínuo provocará uma diferença de potencial entre os terminais da junção, a este fenômeno é dado o nome de efeito fotoelétrico e é o princípio de funcionamento das placas solares e dos fotosensores (MIMS, 1992; LAU et al., 2006).

$$E = h \nu \quad (6)$$

Assim como em outros transdutores, o efeito inverso ao qual foi projetado pode ser observado, neste sentido, ao se expor um LED a uma fonte de luz, o efeito fotovoltaico ocorre, permitindo sua utilização como sensor para o mesmo

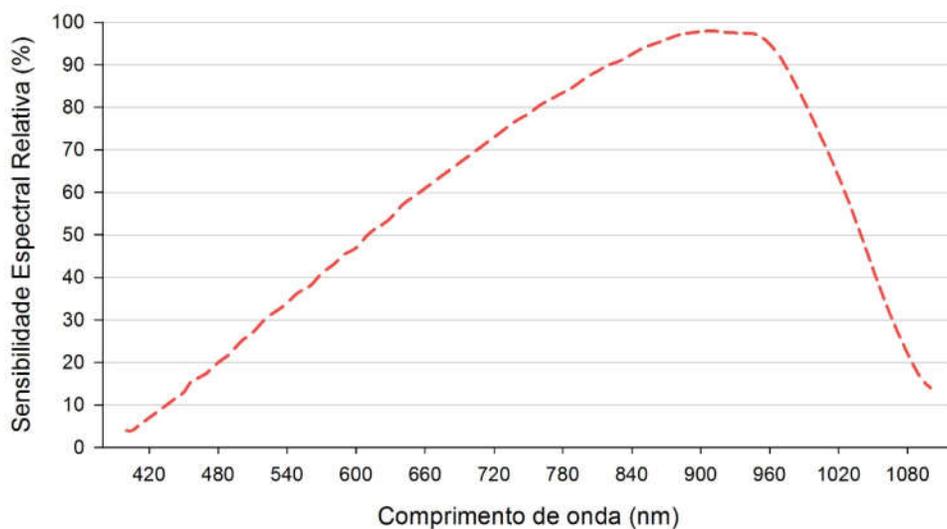
comprimento de onda de seu brilho (MIMS, 1992; COLLINS e LU, 2001; O'TOOLE e DIAMOND, 2008). Na Figura (4) é possível observar o espectro emitido pelo LED, variando de 410nm até 760nm.



**Figura 4** – Luminosidade Relativa para o LED branco em função do comprimento de onda (nm).

## 2.6. SENSOR FOTOVOLTAICO

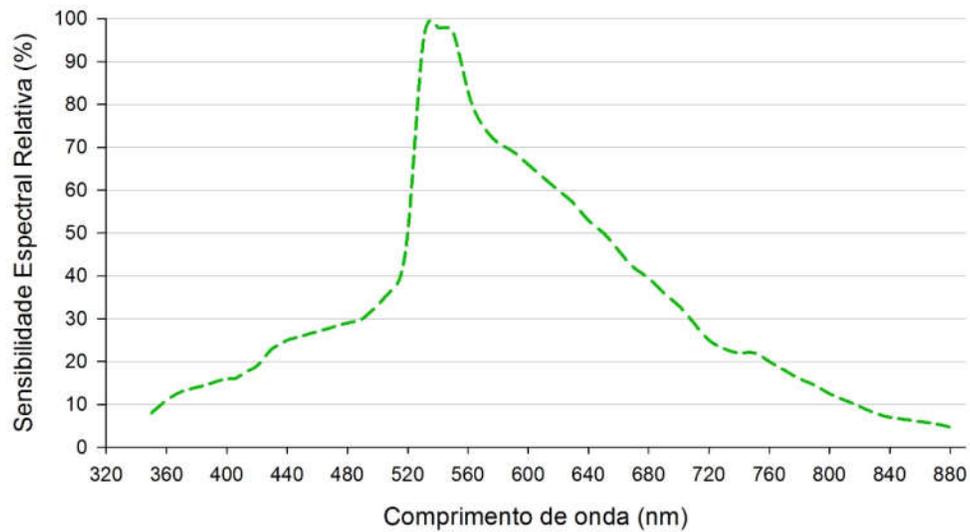
Os sensores fotovoltaicos são fotodiodos construídos especificamente para gerar um sinal elétrico proporcional à radiação incidente, o que caracteriza seu emprego como sensor (ČEKON et al., 2016). A sensibilidade espectral compreendida pelo fotodiodo vai de 430nm até 1100nm (Figura 5).



**Figura 5** – Sensibilidade espectral para o fotodiodo BPW34 em função do comprimento de onda (nm).

## 2.7. RESISTOR DEPENDENTE DE LUZ – LDR

O Resistor Dependente de Luz (LDR) é um sensor fotossensível cujo o valor da resistência interna varia em relação a radiação a qual é exposto. Construído a partir de dois terminais de material condutor separadas por uma fina camada de material semiconductor, quanto maior a incidência luminosa menor o valor da resistência interna, servindo assim como sensor de luminosidade (NWANKWO et al., 2012; SHERKAR et al., 2017). Possui sensibilidade espectral compreendida de 350nm até 880nm (Figura 6).



**Figura 6** – Sensibilidade espectral para o LDR em função do comprimento de onda (nm).

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. INSTRUMENTAÇÃO UTILIZADA

##### 3.1.1. Display de cristal líquido – LCD

Os valores obtidos foram exibidos através do dispositivo utilizou-se de um LCD (Figura 7) de quatro linhas por vinte colunas. Este display foi escolhido por permitir uma boa visualização das mensagens, uma boa relação custo/benefício, baixo consumo energético, além de sua flexibilidade de uso.



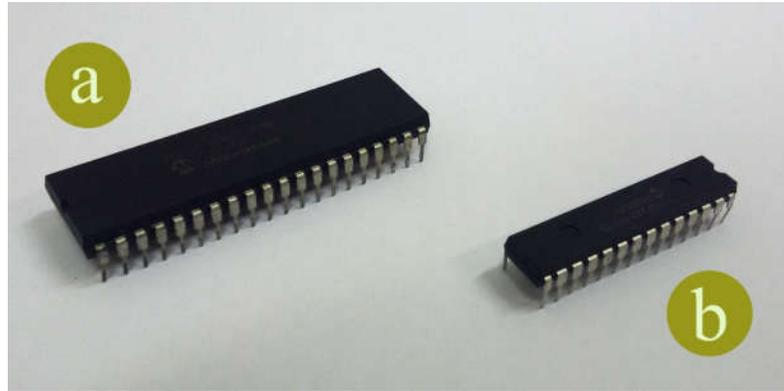
Figura 7 – LCD de 20x4.

##### 3.1.2. Reguladores de tensão

Regulador de tensão é o componente responsável por manter constante a tensão de alimentação do sistema. Foram empregados o modelo LM317 para a alimentação geral do sistema (5v) e o modelo LM1117 para alimentação do módulo nRF24L01+ (3v).

##### 3.1.3. Microcontroladores

Foram utilizados os microcontroladores PIC18F4550 (Figura 8a) e PIC18F252 (Figura 8b), ambos desenvolvidos pela Microchip Technology Inc., pertence à família de microcontroladores de 8 bits e possui arquitetura RISC. O PIC18F4550 foi utilizado para o controle geral do sistema por possuir 33 pinos de entrada e saída e 32 Kbytes de memória para programação. Foram utilizadas dois microcontroladores PIC18F252 por possuir comunicação SPI integrada, um no módulo principal para controle do cartão MicroSD e o segundo no controle do Módulo Externo.



**Figura 8** – Microcontroladores PIC18F4550(a) e PIC18F252(b) da Microchip Technology Inc.

### 3.1.4. Módulo de Comunicação Sem Fio

Para a obtenção simultânea dos valores para a RFA incidente e a RFA transmitida foi utilizado o módulo nRF24L01+ (Figura 9) fabricado pela Nordic Semicondutores por proporcionar uma comunicação sem fio de alto desempenho, flexível e de baixo custo.



**Figura 9** – Módulo transceptor nRF24L01+ da Nordic Semicondutores.

### 3.1.5. Relógio de Tempo Real

A sincronia temporal foi obtida do relógio de tempo real DS1307 (Figura 10), por possuir comunicação I<sup>2</sup>C compatível com os níveis de tensão do microcontrolador utilizado, baixo consumo de energia e sistema auxiliar de alimentação e baixo custo.



**Figura 10** – Relógio de tempo real DS1307.

### 3.1.6. Conversor Analógico Digital

Um dos requisitos do projeto é a utilização dos LEDs como sensores fotovoltaicos, tendo em vista que o microcontrolador escolhido possui um conversor analógico digital de apenas 10 bits, optou-se pela utilização de um conversor dedicado, o que resulta em maior precisão e mais recursos. O modelo utilizado é um shield ADC (Figura 11) de quatro canais, com base no CI ADS1115.



Figura 11 – Conversor analógico digital modelo ADS1115.

### 3.1.7. Multiplexador/Demultiplexador

A sonda desenvolvida é composta por oito segmentos de sensores. Cada segmento de sensor é lido individualmente e, em virtude disso foi adicionado ao sistema um multiplexador/demultiplexador, CI responsável pela comutação entre os segmentos sensores e o conversor analógico digital (Figura 12).



Figura 12 – Multiplexador/demultiplexador modelo CD4051.

### 3.1.8. Cartão MicroSD

Para o armazenamento das medidas efetuadas pelo usuário foi empregado um módulo de cartão MicroSD (Figura 13) que permite o armazenamento em um cartão de memória FLASH em um arquivo .CSV todos os dados necessários ao cálculo e o IAF calculado no momento da leitura.



**Figura 13** – Shield para cartão MicroSD.

## **3.2. PROTOTIPAÇÃO**

### **3.2.1. Módulo Principal**

O circuito impresso foi montado utilizando uma placa de fenolite de 100mm x 100mm. Possui em sua estrutura dois microcontroladores, o principal (PIC18F4550) onde toda a programação de controle é armazenada e executada, e o secundário, (PIC18F252), responsável pelo gerenciamento das funções referentes ao módulo uSD. Um relógio de tempo real (RTC DS1307), um módulo ADC (ADS1115) de 16bits, um módulo transceptor (nRF24L01+), um LCD de (20x4), sistema de alimentação, e um teclado com três botões. A case foi modelada e impressa em 3D contribuindo para leveza e um acabamento profissional.

### **3.2.2. Sonda**

A sonda foi construída utilizando um perfil único de alumínio com 1m de comprimento, um difusor que consiste em um filete de tecnil com 20mm de largura por 800mm de comprimento e 30mm de espessura, sendo a empunhadura e a ponteira modeladas e impressas em 3D, foi posicionado na empunhadura um nível olho de boi como recurso no alinhamento da sonda durante as medições.

Para a obtenção da RFA transmitida na sonda foram utilizados 8 sensores LED de 3mm, espaçados igualmente entre si, um multiplexador/demultiplexador (CD4051) é responsável pela comutação dos canais para leitura dos sensores pelo módulo principal, possui também um botão, que ao ser pressionado inicia a leitura da sonda e do módulo externo.

### **3.2.3. Módulo Externo**

O módulo externo é composto por um microcontrolador (PIC18F252), um modulo transceptor com antena (nRF24l01+), um módulo ADC (ADS1115) de 16bits, sistema de alimentação e um sensor LED para obtenção da PAR incidente.

Este módulo é controlado remotamente pelo módulo principal e tem por finalidade medir a RFA incidente e enviá-la ao módulo principal. A case do módulo externo foi modelada e impressa em 3D e como difusor para o LED foi utilizado uma peça de tecnil com 20mm de diâmetro e 30mm de espessura.

### 3.3. AVALIAÇÃO DOS SENSORES ALTERNATIVOS

Para avaliação da resposta e sensibilidade dos sensores alternativos em relação ao sensor Quantum (LI190SB-L, Campbell Sci, Inc., USA) ambos foram expostos as mesmas condições atmosféricas e posicionados sob o telhado do bloco da Pós-graduação em Física Ambiental localizada na Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá – Mato Grosso (Figura 14). Os sensores alternativos e o sensor Quantum foram conectados a um datalogger (CR1000, Campbell Scientific, Inc., Ogden, Utah) para registro e armazenamento dos dados, com leituras a cada 5 segundos e armazenamento da média a cada 5 minutos.



**Figura 14** – Distribuição dos sensores para avaliação, (a) LDR, (b) BPW, (c) LED e (d) Quantum.

### 3.4. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

Para a calibração, a sonda e o módulo externo foram expostos ao sol nas mesmas condições que o sensor comercial (Figura 15), as medidas foram realizadas das 10:00 às 14:00 de 18/08/2017 até 24/08/2017, dias de céu claro ou com poucas nuvens. A calibração foi realizada por regressões lineares, adotando por referência o sensor comercial Quantum (LI190SB-L, Campbell Sci, Inc., USA). A sonda, o módulo externo e o sensor de referência foram conectados ao módulo principal e expostos as condições atmosféricas. Um cartão MicroSD foi utilizado para registro e armazenamento dos dados. Durante a amostragem, foram feitas 10 leituras. As leituras e o armazenamento da média foram feitos a cada 5 segundos. O horário definido para a calibração é decorrente da especificação para obtenção do IAF com ângulos zenitais menores, recomendação do fabricante do equipamento comercial.



**Figura 15** – Calibração do sistema desenvolvido, (a) Módulo principal, (b) Módulo Externo, (c) sensor Quantum e (d) Sonda.

### 3.5. VALIDAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

Para validação do sistema desenvolvido foram feitas medidas simultâneas com o ceptômetro de referência (AccuPAR LP-80, Decagon Devices, USA), em dias de céu claro, no período das 10:00 às 14:00 de 25/08/2017 até 30/08/2017, afim de obter medidas de IAF para diferentes exemplares arbóreos próximos ao prédio da Pós-graduação em Física Ambiental na Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá – MT. As medidas de RFA incidente, transmitida, TAU e IAF foram utilizadas para a análise de desempenho.

### 3.6. CÁLCULO DO IAF POR INVERSÃO RFA

O IAF foi calculado utilizando o método de inversão da RFA. Foi empregado uma versão modificada do modelo desenvolvido por Norman & Jarvis (1974). As cinco variáveis principais utilizadas como entradas são apresentadas a seguir.

#### 3.6.1. Razão de Transmissibilidade do Dossel

A razão de transmissibilidade do dossel ( $\tau$ ), é a variável de maior influência na determinação do IAF para os modelos de inversão RFA, e é definida como sendo

a razão entre a RFA transmitida mediada próximo ao solo abaixo do dossel ( $RFA_t$ ) e a RFA incidente medida acima do dossel ( $RFA_i$ ) (Equação 7).

$$\tau = \frac{RFA_t}{RFA_i} \quad (7)$$

Quando o IAF é baixo, a maior parte da radiação incidente é transmitida através do dossel ao invés de ser absorvida ou refletida, portanto  $\tau$  será próximo de 1. Como o aumento da quantidade de folhas do dossel há um aumento proporcional da quantidade de luz absorvida ou refletida e um decréscimo da quantidade de luz que será transmitida para a superfície do solo.

### 3.6.2. Ângulo Zenital

O ângulo zenital solar ( $Z$ ) (Equação 8) é utilizado para descrever a trajetória dos fótons através do dossel e para determinar a interação entre a radiação do feixe e a orientação da folha.

$$Z = \arccos(\text{sen}(\theta) \text{sen}(D) + \cos(\theta) \cos(D) \cos(0,2618(H - H_0))) \quad (8)$$

onde  $\theta$  é a latitude do local,  $D$  a declinação solar,  $H$  é o horário local dada em horas decimais e  $H_0$  o horário do meio dia solar.

A declinação solar é obtida através da Equação (9):

$$D = \arcsen(0,397\text{sen}(4,869 + 0,017J + 0,033\text{sen}(6,224 + 0,017J))) \quad (9)$$

onde  $J$  é o dia juliano do ano.

O horário foi calculado utilizando a Equação (10):

$$H_0 = 12 - LC - ET \quad (10)$$

onde  $LC$  é a correção da longitude e  $ET$  a Equação do Tempo.

O valor da correção da longitude  $LC$  foi obtido utilizando a Equação (11):

$$LC = \frac{(\lambda - UTC 15)}{15} \quad (11)$$

onde  $\lambda$  é a longitude do local e UTC o fuso horário de referência.

A Equação do Tempo é uma correção de 15 a 20 minutos dependendo do dia do ano, foi calculada utilizando a Equação (12):

$$\begin{aligned} ET = & (-104,7\text{sen}(\Phi) + 596,2\text{sen}(2\Phi) + 4,3\text{sen}(3\Phi) \\ & - 12,7\text{sen}(4\Phi) - 429,3\cos(\Phi) - 2\cos(2\Phi) \\ & + 19,3\cos(3\Phi))/3600 \end{aligned} \quad (12)$$

onde  $\Phi = (279,575 + 0,986 J) \pi/180$ .

### 3.6.3. Fração de Radiação Direta

A radiação que atinge a sonda pode vir diretamente do feixe solar, ou ser difundida por aerossóis ou nuvens. Essas duas fontes são afetadas de maneira distinta pela arquitetura do dossel e, portanto, devem ser tratadas separadamente no cálculo do índice da área foliar.

A fração de radiação direta foi calculada com base no método publicado por Spitters, Toussaint e Goudriaan (1986) Equação (13):

$$Fb = 1,395 + \rho(-14,43 + \rho(48,57 + \rho(-59,024 + \rho 24,835))) \quad (13)$$

onde  $\rho$  é a fração RFA potencial que atinge a sonda.

### 3.6.4. Distribuição Angular das Folhas

A distribuição angular das folhas, ( $X$ ), é a razão entre o comprimento do eixo horizontal pelo vertical da esferoide descrita pelo dossel, o valor padrão usualmente empregado para ( $X = 1,0$ ), onde assume-se que o ângulo de distribuição foliar é esférico.

### 3.6.5. Coeficiente de Extinção

O coeficiente de extinção do dossel, ( $K$ ), descreve quanto da radiação incidente é absorvida pelo dossel, levando em consideração o ângulo zenital e a distribuição angular das folhas. Baseia-se na ideia de que o ângulo de incidência dos feixes de radiação solar interagem com a distribuição angular das folhas para determinar a probabilidade que um fóton seja interceptado por uma folha. O coeficiente de extinção foi calculado segundo a Equação (14):

$$K = \frac{\sqrt{X^2 + \tan Z^2}}{X + 1,744(X + 1,182)^{-0,733}} \quad (14)$$

Uma vez calculado o coeficiente de extinção e todas as variáveis intrínsecas, o índice de área foliar foi calculado utilizando a Equação (15):

$$L = \frac{\left[ \left(1 - \frac{1}{2K}\right) Fb - 1 \right] \ln \tau}{0,86(1 - 0,47 Fb)} \quad (15)$$

### 3.7. Análise estatística dos dados

O índice (d) de Willmott (Equação 16), o erro quadrático médio "RMSE" (Equação 17), o erro absoluto médio "MAE" (Equação 18) e a correlação de

Pearson foram utilizados para avaliar o desempenho do sistema desenvolvido em relação ao ceptômetro comercial.

$$d = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (16)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (17)$$

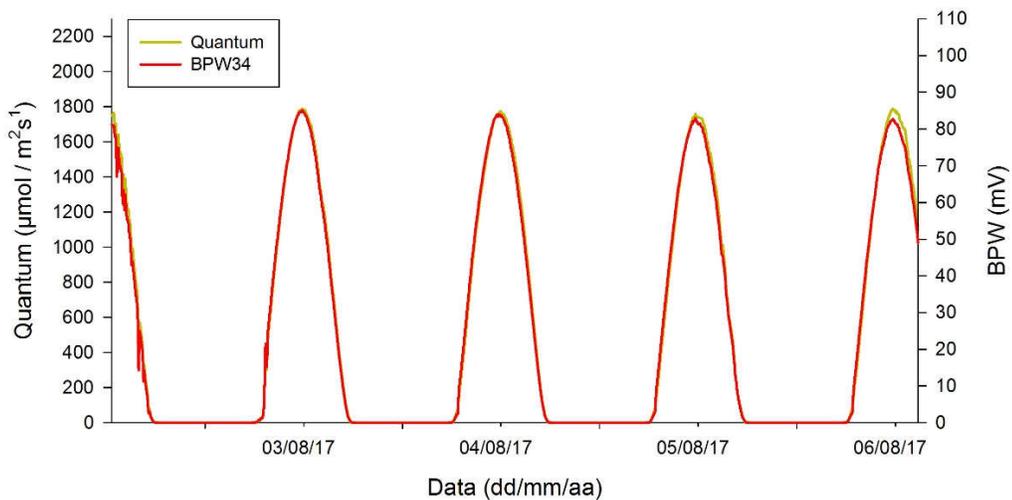
$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{n} \quad (18)$$

sendo que  $P_i$  são os valores obtidos pelo sistema desenvolvido,  $O_i$  são os valores obtidos pelo ceptômetro comercial e  $O$  a média dos valores obtidos pelo ceptômetro comercial.

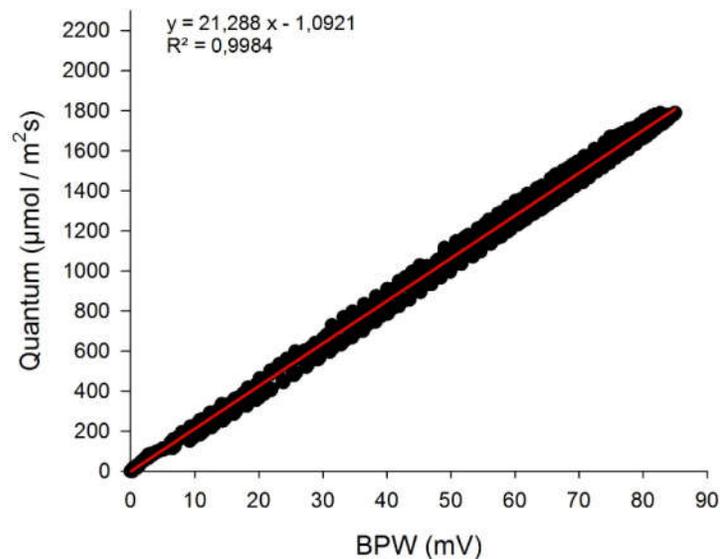
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. AVALIAÇÃO DOS ELEMENTOS SENSORES PARA MEDIÇÃO DA RFA

O sensor BPW34 apresentou variação diária semelhante à do sensor de referência Quantum (Figura 16), haja visto que ambos os sensores se utilizam do efeito fotovoltaico como princípio de funcionamento e ao fato de serem projetados para esta finalidade. Verifica-se pela Figura (17) que o sensor alternativo BPW34 apresentou uma resposta linear em relação ao sensor de referência. Os valores para o coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,998$ ) e para a correlação de Pearson ( $r = 0,998$ ).



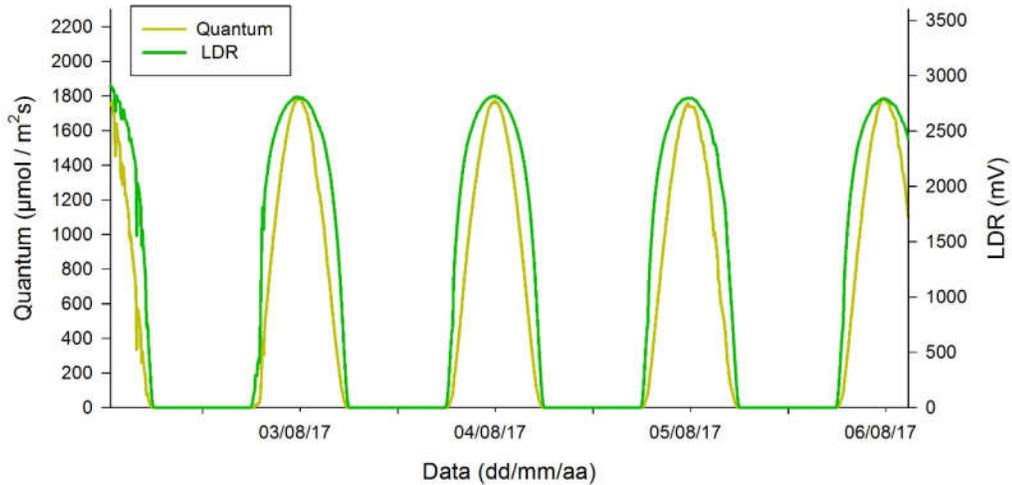
**Figura 16** – Variação da radiação solar medida pelo sensor BPW34 e o sensor Quantum.



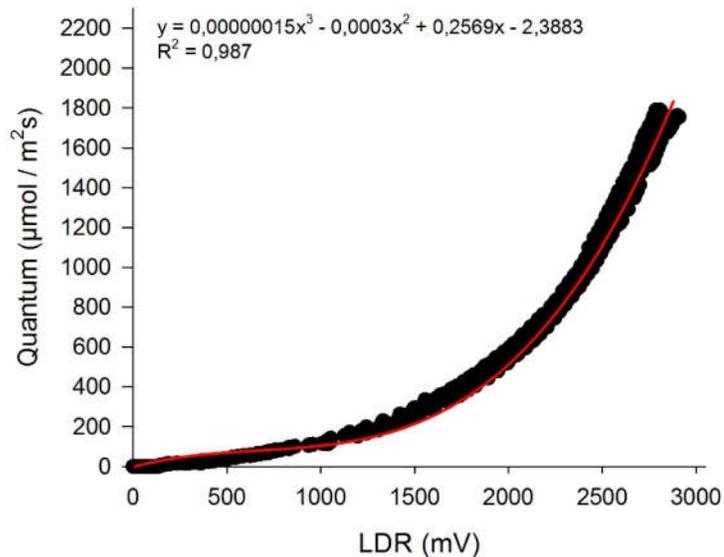
**Figura 17** – Regressão linear simples entre os dados do sensor BPW34 e sensor Quantum.

Na Figura (18) são apresentadas as leituras diárias do LDR e do sensor de referência Quantum. O LDR apresentou um comportamento diário próximo ao do

Quantum, entretanto por possuir uma resposta logarítmica, apresenta uma defasagem temporal. Como alternativa ao comportamento exponencial do LDR optou-se por efetuar uma regressão polinomial de ordem três (Figura 19), o que possibilitou um ajuste melhor as respostas do sensor, obtendo um coeficiente de determinação igual a ( $R^2 = 0,987$ ) e uma correlação de Pearson ( $r = 0,993$ ).



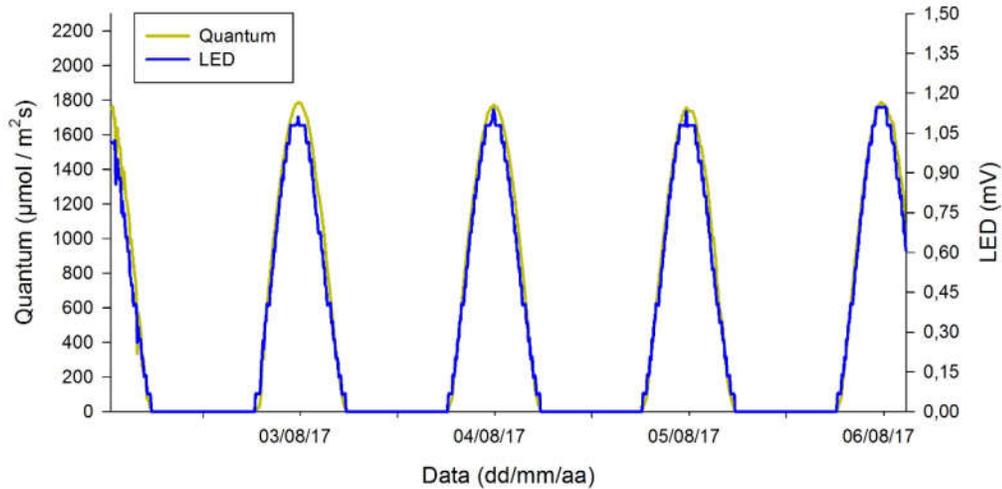
**Figura 18** – Variação da radiação solar medida pelo sensor LDR e o sensor Quantum.



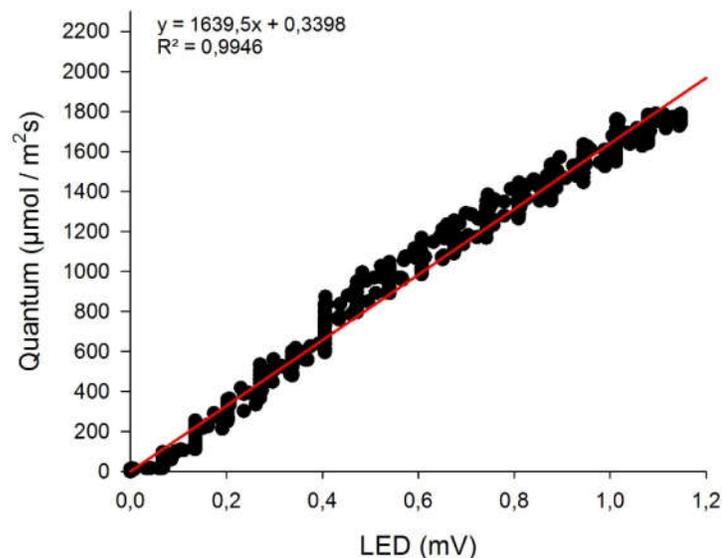
**Figura 19** – Regressão polinomial entre os dados do sensor LDR e sensor Quantum.

Na Figura (20) são apresentadas as leituras diárias do LED como sensor alternativo e do sensor de referência Quantum. O LED apresentou variação diária semelhante à do sensor de referência, assim como o BPW34 confirmado a possibilidade do seu emprego como sensor para RFA, mesmo não sendo idealizado para esta finalidade. Verifica-se pela Figura (21) que o sensor alternativo LED apresentou e resposta linear em relação ao sensor de referência Quantum e alta

correlação com o sensor de referência, com coeficiente de determinação de ( $R^2 = 0,995$ ) uma correlação de Pearson ( $r = 0,997$ ).



**Figura 20** – Variação da radiação solar medida pelo sensor LED e o sensor Quantum.

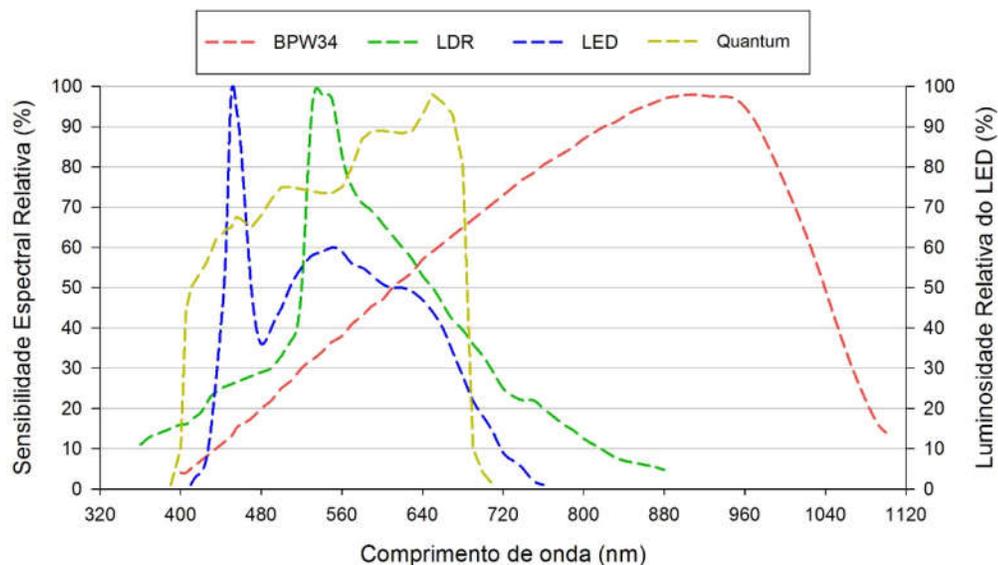


**Figura 21** – Regressão linear simples entre os dados do sensor LED e sensor Quantum.

Para todos os sensores alternativos analisados foram obtidos índices de determinação e de correlação de Pearson próximos a 1, o que demonstra uma boa correlação entre as medidas dos sensores analisados e o sensor de referência Quantum.

#### 4.1.1. Avaliação das Características dos Sensores

Janela espectral se refere a faixa do espectro eletromagnético a qual os sensores avaliados são sensíveis. Na Figura (22) é apresentado um comparativo entre a sensibilidade e a janela espectral dos diferentes sensores analisados.



**Figura 22** – Comparativo entre as curvas de resposta do BPW34, LDR, Quantum e LED.

Dos sensores analisados o que possui a maior janela espectral é o BPW34 indo de 430nm até 1100nm (Figura 22), intervalo superior ao do sensor Quantum, pouco compatível ao método de obtenção do IAF por inversão RFA, o que impossibilita sua utilização na construção do sistema.

Ao observar o desempenho do LDR verifica-se que o mesmo possui uma janela espectral de 350nm até 880nm, valores próximos as especificações do sensor Quantum. No entanto, a não escolha deste componente se deve ao fato de que o mesmo não possui resposta exponencial e sua implementação depende da utilização de um circuito divisor de tensão, o que elevaria o consumo energético do sistema.

O LED possui uma janela espectral variando de 410nm a 750nm, em relação ao sensor de referência é o que apresenta a maior proximidade das especificações apresentadas pelo fabricante. A escolha deste componente para o desenvolvimento do sistema se deve também ao fato de que o mesmo pode ser adquirido em grandes quantidades com facilidade no comércio local e apresenta resposta linear satisfatória.

## 4.2. SISTEMA DE CONTROLE E ARMAZENAMENTO

### 4.2.1. Módulo Principal

Na Figura (23a) é apresentado a placa em circuito impresso desenvolvida e construída e na Figura (23b) o aspecto do módulo principal com todos os componentes posicionados. O módulo possui 47mm de altura, 125mm de comprimento, 115mm de largura e um peso de 335g.



**Figura 23** – Visualização do módulo principal (a) placa em circuito impresso e (b) visual externo do case.

#### 4.2.2. Sonda

O aspecto da montagem da sonda com todos os componentes montados é apresentado na Figura (24). A sonda possui 37mm de altura, 1m de comprimento, 35mm de largura e um peso de 438g. O cabo para conexão da sonda com o módulo principal possui 800mm de comprimento.



**Figura 24** – Visualização da sonda responsável pela obtenção da RFA transmitida.

#### 4.2.3. Módulo Externo

Na Figura (25) é apresentado o aspecto da montagem do módulo externo. O módulo externo possui 110mm de altura, 105mm de comprimento, 75mm de largura e um peso de 210g.



**Figura 25** – Visualização do módulo externo responsável pela obtenção da RFA incidente.

#### 4.2.4. Custo de Desenvolvimento do Sistema

O custo dos módulos e sonda desenvolvidos (**Tabela 1**) apresentaram custo reduzido em relação ao equivalente comercial (**Tabela 2**) usado como referência.

**Tabela 1** – Custo dos módulos e sonda desenvolvidos.

<b>Sistema desenvolvido</b>	<b>Custo (R\$)</b>
Módulo Principal	300,00
Módulo Externo	140,00
Sonda	100,00
<b>Total:</b>	<b>540,00</b>

**Tabela 2** – Custo dos equipamentos importados usados como referência.

<b>Equipamento comercial</b>	<b>Custo (R\$)</b>
AccuPAR LP-80 Ceptometro PAR e IAF	32.816,30
Cabo de extensao Accupar de 7,6m	1.257,90
<b>Total:</b>	<b>34.074,20</b>

O custo da estação desenvolvida representou 1,6% do custo do equipamento comercial de referência. Deve-se ressaltar que o custo apresentado leva em conta somente o investimento necessário a aquisição dos componentes eletrônicos.

#### 4.2.5. Firmware

O Firmware foi desenvolvido em C padrão CCS. É responsável pelo controle do hardware e pelo cálculo do IAF, sendo dividido em sete funções principais:

- READ MODE;
- CALIBRATION;
- SET DATE AND TIME;
- SET LOCATION;
- SET LEAFDISTRIBUTION;
- SET ACTIVE SEGMENTS;
- ABOUT.

Para que o sistema inicialize corretamente é obrigatório que a sonda esteja conectada e o cartão MicroSD posicionado, quando tudo correto, ao término da checagem do hardware a tela inicial é apresentada (Figura 26). As mensagens de erro denotam a ausência da sonda ou do cartão MicroSD.

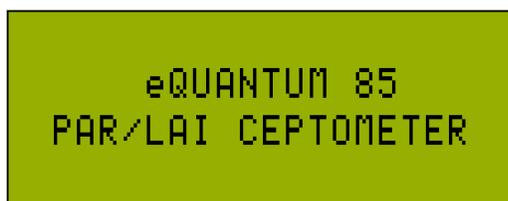


Figura 26 – Tela inicial.

A manipulação do menu principal é através do teclado, onde as setas mudam a opção e OK seleciona a desejada, na Figura (27) é possível observar a tela do menu principal.



Figura 27 – Tela do menu principal.

Ao se escolher a opção “READ MODE” o sistema é configurado em modo de leitura, a tela padrão é apresentada na Figura (28).

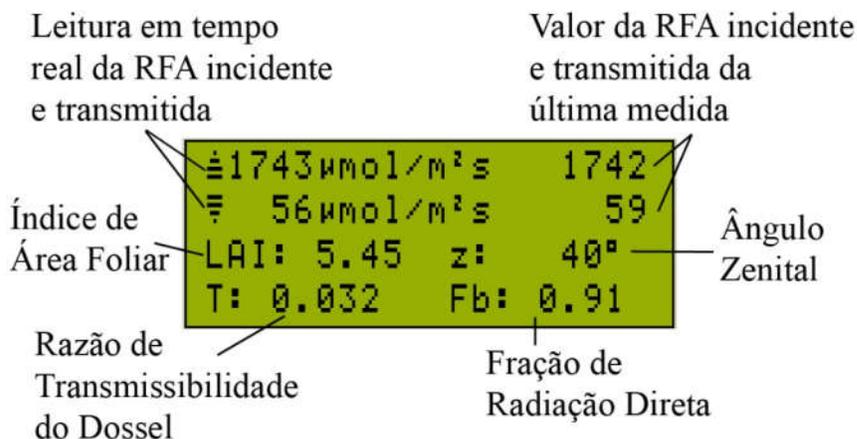


Figura 28 – Tela em modo de leitura.

Ao se pressionar o botão de leitura na sonda é calculado o Ângulo Zenital, a Razão de Transmissibilidade do Dossel, a Fração de Radiação Direta e o Índice de Área Foliar a partir dos valores da última medida. Podendo a medida efetuada ser armazenada no cartão de memória como apresentado na (**Tabela 3**).

**Tabela 3** – Arquivo .csv com o registro das medidas efetuadas, armazenando a data e a hora (TIMESTAMP), a RFA incidente (RFAi), RFA transmitida (RFAt), transmissibilidade do dossel (TAU), a fração de radiação direta (Fb), a distribuição foliar (X), o coeficiente de extinção (K), a latitude (LAT), a longitude (LONG) e o ajuste de offset UTC (UTC).

TIMESTAMP	RFAi	RFAt	TAU	Z	Fb	X	K	LAI	LAT	LONG	UTC
28/08/2017 12:19:32	1714	407	0,237	27	0,85	1	0,57	2,5	-16	-56	-4
28/08/2017 12:21:36	1665	772	0,464	27	0,84	1	0,57	1,3	-16	-56	-4
29/08/2017 13:50:47	1742	59	0,032	40	0,91	1	0,63	5,45	-16	-56	-4

A opção “CALIBRATION” foi utilizada durante o processo de calibração, onde os dados coletados a partir das leituras da sonda, do módulo externo e do sensor de referência são armazenados no cartão de memória.

O horário e a data são configurados utilizando a opção “SET DATE AND TIME” (Figura 29).

```

DATE TIME
YYYY-MM-DD  HH:MM
2017-08-09  13:08

```

**Figura 29** – Configuração da data e do horário local.

As coordenadas geográficas e o UTC offset utilizados no cálculo do IAF é configurado pela opção “SET LOCATION” (Figura 30), as coordenadas geográficas são dadas em graus.

```

LOCATION
LATITUDE:   -15°
LONGITUDE:  -56°
UTC offset:  -4h

```

**Figura 30** – Configuração das coordenadas geográficas e do UTC offset.

A Distribuição Angular das Folhas é configurada por meio da opção “SET LEAFDISTRIBUTION” (Figura 31) e definida pelo usuário de acordo com as características do dossel a ser analisado, podendo assumir valores de 0,00 até 9,99.



**Figura 31** – Configuração da Distribuição Angular das Folhas.

O número de segmentos ativos da sonda é configurado utilizando a opção “SET ACTIVE SEGMENTS” (Figura 32), os segmentos da sonda são enumerados de 1 a 8, sendo o primeiro o da ponta, quando um segmento não é ativado, não é feita sua leitura para o cálculo do IAF.



**Figura 32** – Configuração do número de segmentos ativos da sonda.

A opção “ABOUT” exibe uma tela com as informações do ceptômetro desenvolvido, como a versão e a data da última compilação do firmware (Figura 33).

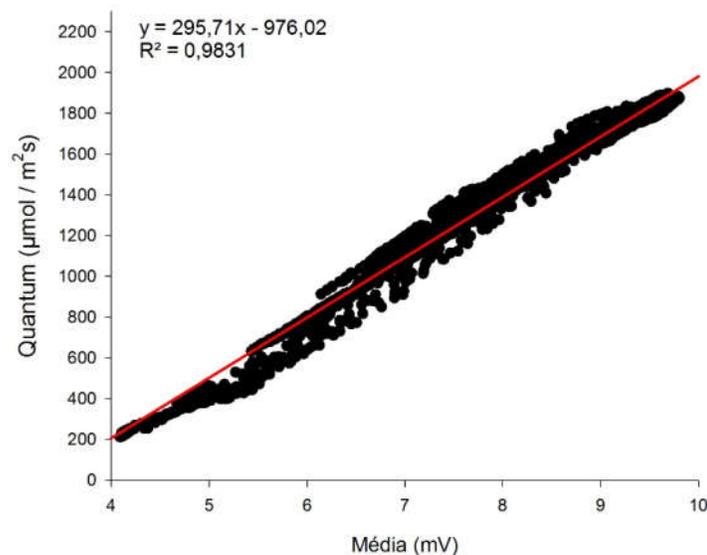


**Figura 33** – Informações a respeito do firmware gravado.

Todas as alterações efetuadas pelas funções de configuração são armazenadas na memória interna do microcontrolador (EEPROM), não sendo necessário a reprogramação dos parâmetros necessários ao funcionamento do dispositivo a cada inicialização.

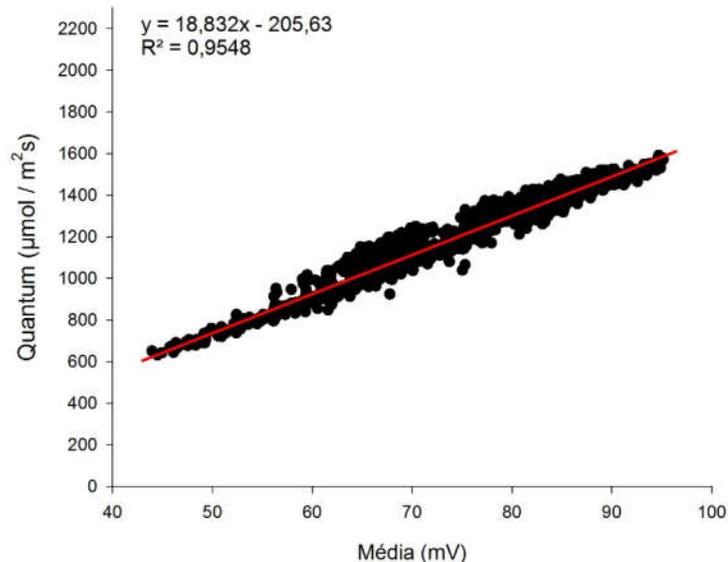
#### **4.3. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE MEDIÇÃO DA RFA;**

Na Figura (34) é apresentado a reta e o coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,983$ ) para a média dos oito segmentos da sonda em relação ao sensor de referência Quantum, o que indica alta correlação entre os valores medidos pela sonda em relação ao sensor Quantum, permitindo a obtenção de uma equação para conversão da média em  $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ .



**Figura 34** – Reta de calibração para a média dos oito segmentos da sonda.

Na Figura (35) é apresentado a reta de calibração para o Módulo Externo em relação ao sensor de referência Quantum. O valor para o coeficiente de determinação foi de ( $R^2 = 0,955$ ), o que indica uma boa correlação entre os sensores e permite utilizar a equação da reta obtida para obtenção dos valores em  $\mu\text{mol} / \text{m}^2\text{s}$  para o módulo externo.



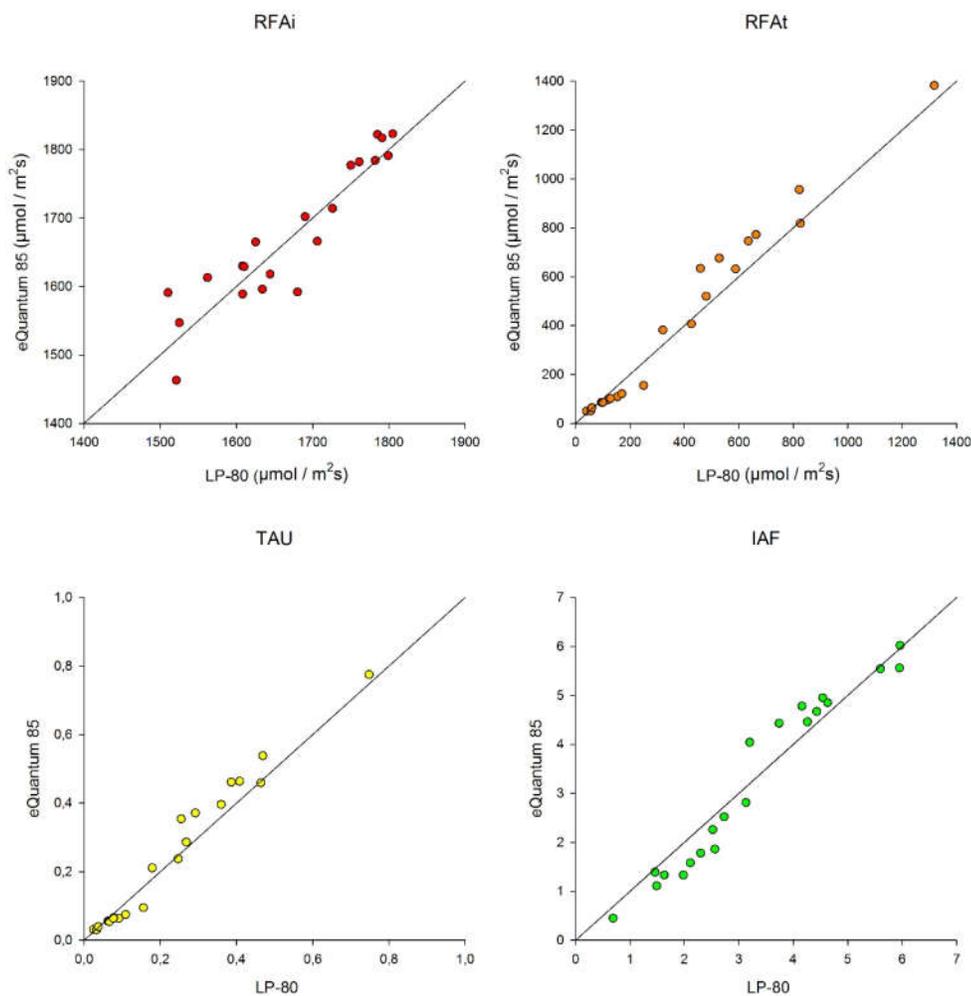
**Figura 35** – Reta de calibração para o Módulo Externo.

#### 4.4. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

Na Figura (36) é apresentado a avaliação do desempenho do sistema desenvolvido (eQuantum 85) em relação ao ceptômetro comercial de referência (AccuPAR LP-80, Decagon Devices, USA).

Na **Tabela (4)** é apresentado os valores obtidos para a Correlação de Pearson ( $r$ ), coeficiente de Willmott ( $d$ ), erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE) entre as medidas obtidas com o ceptômetro comercial e o sistema desenvolvido.

O IAF obtido com o sistema desenvolvido apresentou forte correlação como ceptômetro comercial ( $r = 0,9743$ ), baixos valores de erro MAE de 0,3767 e RMSE de 0,4372, e um coeficiente de Willmott ( $d = 0,9816$ ), o que indica uma alta correspondência entre os valores obtidos com o sistema desenvolvido e o comercial.



**Figura 36** – Relação entre a RFA<sub>i</sub>, RFA<sub>t</sub>, TAU e o IAF obtido pelo ceptômetro comercial e o sistema desenvolvido.

**Tabela 4** – Correlação de Pearson ( $r$ ), coeficiente de Willmott ( $d$ ), erro quadrático médio (RMSE) e erro absoluto médio (MAE) entre as medidas obtidas com o ceptômetro comercial e o sistema desenvolvido.

Medidas de erro	$r$	$d$	RMSE	MAE
RFA <sub>i</sub>	0,9252	0,9601	38,5295	31,7619
RFA <sub>t</sub>	0,9870	0,9879	76,0786	56,8095
TAU	0,9861	0,9880	0,0431	0,0324
IAF	0,9743	0,9816	0,4372	0,3767

## 5. CONCLUSÕES

Os sensores alternativos avaliados, LDR, BPW34 e LED apresentaram boa correlação em relação ao sensor de referência Quantum. O LED é o sensor com as características óticas mais próximas as especificações do sensor Quantum, caracterizando desta forma como a melhor alternativa na obtenção da RFA.

O sistema desenvolvido para o controle e armazenamento das leituras apresentou confiabilidade, estabilidade, flexibilidade e conectividade, operando com sensores alternativos e comerciais. O firmware programado funcionou perfeitamente, permitindo o manuseio do sistema desenvolvido de forma fácil e confiável, equiparando-se em nível de funcionalidades ao sistema comercial de referência.

A sonda e o módulo externo foram calibrados em relação ao sensor de referência Quantum. O sistema desenvolvido é capaz de obter medidas de IAF com os valores para RFAi e RFA<sub>t</sub> obtidos simultaneamente. O sistema desenvolvido ao ser comparado em relação ao comercial é capaz de reproduzir as medidas obtidas para o IAF.

### 5.1. CONTRIBUIÇÕES

Estas foram as principais contribuições geradas no desenvolvimento deste trabalho:

- A análise da utilização de diferentes sensores na medição da radiação RFA;
- A utilização do LED como sensor da RFA;
- A disponibilização de mais um equipamento para a obtenção do Índice de Área Foliar;
- A redução de custos para instrumentação.

### 5.2. TRABALHOS FUTUROS

Apesar das contribuições científicas e tecnológicas já obtidas até o momento, no tangente ao desenvolvimento de novas tecnologias, entende-se que melhorias podem ser feitas e novas funcionalidades agregadas, como:

- O incremento no número de sensores da sonda RFA;
- A implementação de um GPS ao módulo principal;

## 6. REFERÊNCIAS

- BIUDES, M. S.; MACHADO, N. G.; DANELICHEN, V. H. M.; SOUZA, M. C.; VOURLITIS, G. L.; NOGUEIRA, J. S. Ground and remote sensing-based measurements of leaf area index in a transitional forest and seasonal flooded forest in Brazil. **International journal of biometeorology**, v. 58, n. 6, p. 1181-1193, 2014.
- BRÉDA, N. J. J. Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. **Journal of experimental botany**, v. 54, n. 392, p. 2403-2417, 2003.
- ČEKON, M.; SLÁVIK, R.; JURÁŠ, P. Obtainable Method of Measuring the Solar Radiant Flux Based on Silicone Photodiode Element. **Applied Mechanics & Materials**, v. 824, 2016.
- CHEN, J. M.; BLACK, T. A. Defining leaf area index for non-flat leaves. **Plant, Cell & Environment**, v. 15, n. 4, p. 421-429, 1992.
- CHEN, J. M.; RICH, P. M.; GOWER, S. T.; NORMAN, J. M.; PLUMMER, S. Leaf area index of boreal forests: Theory, techniques, and measurements. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D24, p. 29429-29443, 1997.
- COLLINS, G. E.; LU, Q. Radionuclide and metal ion detection on a capillary electrophoresis microchip using LED absorbance detection. **Sensors and Actuators B: Chemical**, v. 76, n. 1, p. 244-249, 2001.
- DAUGHTRY, C. S. Direct measurements of canopy structure. **Remote Sensing Reviews**, v. 5, n. 1, p. 45-60, 1990.
- FANG, H.; LI, W.; WEI, S.; JIANG, C. Seasonal variation of leaf area index (LAI) over paddy rice fields in NE China: Intercomparison of destructive sampling, LAI-2200, digital hemispherical photography (DHP), and AccuPAR methods. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 198, p. 126-141, 2014.
- FOURNIER, R. A.; LANDRY, R.; AUGUST, N. M.; FEDOSEJEVS, G.; GAUTHIER, R. P. Modelling light obstruction in three conifer forests using hemispherical photography and fine tree architecture. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 82, n. 1, p. 47-72, 1996.
- GITELSON, A. A.; PENG, Y.; ARKEBAUER, T. J.; SUYKER, A. E. Productivity, absorbed photosynthetically active radiation, and light use efficiency in crops: Implications for remote sensing of crop primary production. **Journal of plant physiology**, v. 177, p. 100-109, 2015.
- HARMSSEN, H. Company Competencies As A Network: The Role Of Product Development. **The Journal of Product Innovation Management**. v.17, n.3, p.194-207, May. 2000.
- HOLSTIUS, D. M.; PILLARISSETTI, A.; SMITH, K. R.; SETO, E. Field calibrations of a low-cost aerosol sensor at a regulatory monitoring site in California. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 7, n. 4, p. 1121-1131, 2014.

- HUETE, A.; DIDAN, K.; MIURA, T.; RODRIGUEZ, E. P.; GAO, X.; FERREIRA, L.G. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 83, p. 195–213, 2002.
- JONCKHEERE, I.; FLECK, S.; NACKAERTS, K.; MUYS, B.; COPPIN, P.; WEISS, M.; BARET, F. Review of methods for in situ leaf area index determination: Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. **Agricultural and forest meteorology**, v. 121, n. 1, p. 19-35, 2004.
- KIRA, O.; NGUY-ROBERTSON, A. L.; ARKEBAUER, T. J.; LINKER, R.; GITELSON, A. A. Informative spectral bands for remote green LAI estimation in C3 and C4 crops. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 218, p. 243-249, 2016.
- LAMBROU, T. P.; ANASTASIOU, C. C.; PANAYIOTOU, C. G.; POLYCARPOU, M. M. A low-cost sensor network for real-time monitoring and contamination detection in drinking water distribution systems. **IEEE sensors journal**, v. 14, n. 8, p. 2765-2772, 2014.
- LANG, A.R.G.; MCMURTRIE, R.E.; BENSON, M.L. Validity of surface area indices of *Pinus radiata* estimated from transmittance of the sun's beam. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 57, n. 1, p. 157-170, 1991.
- LAU, K. T.; BALDWIN, S.; O'TOOLE, M.; SHEPHERD, R.; YERAZUNIS, W. J.; IZUO, S.; UEYAMA, S.; DIAMOND, D. A low-cost optical sensing device based on paired emitter–detector light emitting diodes. **Analytica Chimica Acta**, v. 557, n. 1, p. 111-116, 2006.
- LEVY, P. E.; JARVIS, P. G. Direct and indirect measurements of LAI in millet and fallow vegetation in HAPEX-Sahel. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 97, n. 3, p. 199 – 121, 1999.
- LI, X.; MAO, F., DU, H.; ZHOU, G.; XU, X.; HAN, N.; SUN, S.; GAO, G.; CHEN, L. Assimilating leaf area index of three typical types of subtropical forest in China from MODIS time series data based on the integrated ensemble Kalman filter and PROSAIL model. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 126, p. 68-78, 2017.
- LIN, Y.; WEST, G. Retrieval of effective leaf area index (LAI<sub>e</sub>) and leaf area density (LAD) profile at individual tree level using high density multi-return airborne LiDAR. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 50, p. 150-158, 2016.
- LIU, Z.; WANG, C.; CHEN, J. M.; WANG, X.; JIN, G. Empirical models for tracing seasonal changes in leaf area index in deciduous broadleaf forests by digital hemispherical photography. **Forest Ecology and Management**, v. 351, p. 67-77, 2015.
- MCCREE, K. J. Test of current definitions of photosynthetically active radiation against leaf photosynthesis data. **Agricultural Meteorology**, v. 10, p. 443-453, 1972.
- MIMS, F. M. Sun photometer with light-emitting diodes as spectrally selective detectors. **Applied Optics**, v. 31, n. 33, p. 6965-6967, 1992.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain [and discussion]. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, 281(980), 277-294.

MYNENI, R.B.; NEMANI, R.R.; RUNNING, S.W. Estimation of global leaf area index and absorbed PAR using radiative transfer models. **IEEE Transactions on Geoscience and remote sensing**, v. 35, n. 6, p. 1380-1393, 1997.

NIEVES, L.; SPAVIERI, G.; FERNANDEZ, B.; GUEVARA, R. A. Measuring the Planck constant with LED's. **The Physics Teacher**, v. 35, n. 2, p. 108-109, 1997.

NORMAN, J. M.; JARVIS, P. G. Photosynthesis in Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.). III. Measurements of canopy structure and interception of radiation. **Journal of Applied Ecology**, p. 375-398, 1974.

NWANKWO, S. N.; NNABUCHI, M. N.; EKPE, J. E. Construction and characterization of a pyranometer using locally available materials for global solar radiation measurement. **Asian Transactions on Basic and Applied Sciences**, v. 2, n. 4, p. 26, 2012.

O'TOOLE, M.; DIAMOND, D. Absorbance based light emitting diode optical sensors and sensing devices. **Sensors**, v. 8, n. 4, p. 2453-2479, 2008.

PIMPUTKAR, S.; SPECK, J. S.; DENBAARS, S. P.; NAKAMURA, S. Prospects for LED lighting. **Nature Photonics**, v. 3, n. 4, p. 180-182, 2009.

SHERKAR, V.; SURWASE, A.; KALEKAR, P.; GAVHANE, B. Smart Poly-House Surveillance Using IOE. **International Research Journal of Engineering and Technology**, v. 4, n. 3, p. 2784-2786, 2017.

SILVA, J. F.; SILVA, E. R. A. C.; FERREIRA, P. S.; GOMES, V. P.; BARBOZA, K. M. N.; CANDEIAS, A. L. B. Spatial-temporal evolution analysis of the vegetation in the Chapadinha microregion (Maranhão, Brazil) through remote sensing. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v.6, n.6, p. 329-337, 2016.

SPITTERS, C. J. T.; TOUSSAINT, H. A. J. M.; GOUDRIAAN, J. Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis Part I. Components of incoming radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 38, n. 1-3, p. 217-229, 1986.

WASAYA, A.; TAHIR, M.; ALI, H.; HUSSAIN, M.; YASIR, T. A.; SHER, A.; IJAZ, M. Influence of varying tillage systems and nitrogen application on crop allometry, chlorophyll contents, biomass production and net returns of maize (*Zea mays* L.). **Soil and Tillage Research**, v. 170, p. 18-26, 2017.

WATSON, D. J. Comparative physiological studies on the growth of field crops: I. Variation in net assimilation rate and leaf area between species and varieties, and within and between years. **Annals of Botany**, v. 11, n. 41, p. 41-76, 1947.