

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

**Desenvolvimento do sistema embarcado e-Quantum 85n
para obtenção automatizada do Índice de Área Foliar**

ELIO SANTOS ALMEIDA JÚNIOR

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

**Cuiabá, MT
Novembro de 2021**

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

**Desenvolvimento do sistema embarcado e-Quantum 85n
para obtenção automatizada do Índice de Área Foliar**

ELIO SANTOS ALMEIDA JÚNIOR

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

PROF. Dr. MARCELO SACARDI BIUDES
Orientador

**Cuiabá, MT
Novembro de 2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Fonte.

S237d Santos Almeida Júnior, Elio.

Desenvolvimento do sistema embarcado e-Quantum 85n para obtenção automatizada do Índice de Área Foliar / Elio Santos Almeida Júnior. -- 2021
65 f. : il. color. ; 30 cm.

Orientador: Marcelo Sacardi Biudes.

Co-orientadora: Nadja Gomes Machado.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Programa de Pós-Graduação em Física Ambiental, Cuiabá, 2021.

Inclui bibliografia.

1. Inovação. 2. Automatização. 3. Instrumentação. 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.

FOLHA DE APROVAÇÃO

DEDICATÓRIA

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

AGRADECIMENTOS

Em meio a tantas páginas científicas, dedico esta para agradecer aqueles que de alguma forma contribuíram para a concretização desse trabalho.

A **Deus**, meu grande auxiliador;

Em especial aos meus pais, **Elio Santos Almeida** e **Leonice Cordeiro Almeida**, que sempre me incentivaram a estudar, e nunca mediram esforços em 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** pela confiança, incentivo e carinho;

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

Ao Prof. Dr. **Armando da Silva Filho**, por sua ajuda em conhecimentos dada no passado, presente e sei que no futuro caso necessário, não só para mim mas para todos que necessitarem de seus conhecimentos;

Aos meus amigos e colegas **Lucas Rothmund**, **Lucas Angelini**, **Juliana Lotufo**, **Névio Lotufo**, **Bruno Abdalla**, **Daniela Borella**, **Luciene Taques**, **Luis Philippe**, **Juliana Chegury**, **Keylyane Alves**, **Pablinne Angelini**, **Dalila Mützenber**, **Danielle Nassarden** e **Rafael Palácios** pelo companheirismo, carinho, apoio e incentivo;

Aos meus irmãos da **Igreja Batista Boa Esperança**;

Ao grupo de **Jovens CALEBE**, em especial: **Pastor Vitor Hugo**, **Ana Laura**, **Alessandro Cunha**, **Greice Kelly**, **Dona Veronica** (vó Verô), **Johabner Nguenge**, **Thalia Eloisa**, **Sophia Leticia**, **Enzio Mateus**, **Isabela Almeida**, **Geziel Pallu**, **Iara Mendes**, **Gesielle Barros**, **George Luiz**, **Igor Batista**, **Nathaly Batista**, **Ebila Kathryna**, **Alan Gabriel**, **Lucas Colognese**, **Paulo Jurandir**, **Heloisa Veras**, **Ana Gabriela**, **Manoel Onésimo**; **Natália Frazão**, **Mariana Lopes**, **Miguel Lopes**, **Juliano Frazão** e **Maria Eduarda**;

Aos meus amigos **Luã Dutra**, **Luan Lino**, **Hevelin Hespanhol** e **Manuela Pereira**;

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;

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

Ao **CNPQ** pelo apoio financeiro.

Eu sou a videira, vós, os ramos. Quem permanece em mim, e eu, nele, esse dá muito fruto; porque sem mim nada podeis fazer. (João 15:5)

“Inventar, é a atividade humana mais desafiadora, frustrante e recompensadora que existe, e tudo isso ao mesmo tempo”. (Elio Santos Almeida Júnior)

“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)

- Quais traços de caráter ajudaram você a alcançar o sucesso que você tem?
“Diligência, espírito de luta, motivação, trabalho duro, disciplina, criatividade, ser uma pensadora autocrítica, amor pelo jogo e muito mais”. (Judit Polgar)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	3
LISTA DE TABELAS	4
LISTA DE QUADROS	5
LISTA DE ABREVIACÕES E/OU SÍMBOLOS.....	6
RESUMO	8
ABSTRACT	9
1. INTRODUÇÃO	10
1.1. PROBLEMÁTICA.....	10
1.2. JUSTIFICATIVA.....	11
1.3. OBJETIVO.....	12
1.3.1. Objetivo Geral	12
1.3.2. Objetivo Específico.	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR.....	13
2.2. MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DO IAF	13
2.3. RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA	14
2.4. FRAÇÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA TRANSMITIDA	15
2.5. INSTRUMENTAÇÃO COMERCIAL PARA OBTENÇÃO DO IAF.....	15
2.6. INSTRUMENTAÇÃO ALTERNATIVA.....	17
2.6.1. Diodo emissor de luz como sensor da RFA	17
2.7. DECLINAÇÃO MAGNÉTICA	18
3. MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1. E-QUANTUM 85.....	19
3.2. TECNOLOGIAS EMPREGADAS	19
3.2.1. Unidade de Controle.....	20
3.2.2. Sonda	22
3.2.3. Sensor de Incidência.....	23
3.3. CÁLCULO DO IAF POR FRAÇÃO DA RFA INCIDENTE TRANSMITIDA	25
3.3.1. Razão de Transmissibilidade do Dossel	25
3.3.2. Ângulo Zenital.....	25
3.3.3. Fração de Radiação Direta	26
3.3.4. Coeficiente de Extinção	26
3.4. AVALIAÇÃO DO LED RGB COMO SENSOR DE RFA.....	27
3.5. PROCESSO DE PROTOTIPAÇÃO	28
3.5.1. Unidade de Controle.....	28
3.5.2. Sonda	29
3.5.3. Sensor de Incidência.....	30
3.6. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO	31
3.7. VALIDAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO	31
3.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS.....	32
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
4.1. AVALIAÇÃO DO LED RGB PARA MEDIÇÃO DA RFA	34
4.2. PROTÓTIPO PARA OBTENÇÃO AUTOMÁTICA DO IAF	34
4.2.1. Unidade de Controle.....	35
4.2.2. Sonda	40
4.2.3. Sensor de Incidência.....	41
4.3. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE MEDIÇÃO DA RFA	42
4.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS PROTÓTIPOS E OS EQUIPAMENTOS COMERCIAIS	44
4.4.1. Análise de custo em relação ao equipamentos comerciais.....	45

4.5.	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DESENVOLVIDO	45
5.	CONCLUSÕES	51
5.1.	CONTRIBUIÇÕES	53
6.	REFERÊNCIAS	54

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ilustração demonstrativa de medidas de Índice de Área Foliar (IAF) onde (a) representa um IAF de 3 e (b) representa um IAF de 1.	13
Figura 2. Comprimento de onda da faixa eletromagnética que corresponde a radiação fotossinteticamente ativa.	14
Figura 3. Medidores de IAF comerciais, (a) SunScan, (b) LP-80, (c) LAI-2200C.	16
Figura 4. e-Quantum 85, protótipo alternativo inicialmente desenvolvido para obtenção do IAF, onde: (a) unidade de controle, (b) sonda e (c) sensor de incidência.	19
Figura 5. Diagrama de conexões dos módulos e componentes principais da unidade de controle.	20
Figura 6. Diagrama de conexões dos módulos e componentes principais da sonda.	22
Figura 7. Diagrama de conexões dos módulos e componentes principais do sensor de incidência.	23
Figura 8. Micro LED RGB 0606.	28
Figura 9. Aspecto final digital da modelagem da unidade de controle em software 3D.	29
Figura 10. Aspecto final digital da modelagem da sonda em software 3D.	29
Figura 11. Aspecto final digital da modelagem da do sensor de incidência em software 3D.	30
Figura 12. Relação entre a PAR medida pelo LED RGB do e-Quantum 85n e a PAR medida pelo sensor de incidência do LP-80. Error! Bookmark not defined.	
Figura 13. Aspecto final da montagem da unidade de controle.	35
Figura 14. Tela de abertura ao ligar a unidade de controle.	36
Figura 15. Layout da tela principal da unidade de controle e descrição das informações apresentadas.	36
Figura 16. Tela de configurações da unidade de controle.	37
Figura 17. Relatório de erros e alertas apresentados ao usuário.	39
Figura 18. Segmento da sonda constituído por LEDs RGB.	40
Figura 19. Aspecto final da montagem da sonda.	41
Figura 20. Disposição dos micro LEDs RGB do sensor de incidência.	41
Figura 21. Aspecto final da montagem do sensor de incidência.	42
Figura 22. Dispersão e equação de calibração para a PAR _i medida pelo sensor de incidência do e-Quantum 85n e a PAR _i medida pelo sensor de incidência do LP-80. Error! Bookmark not defined.	
Figura 23. Dispersão e equação de calibração para a PAR _t medida pela sonda do e-Quantum 85n e a PAR _t medida pela sonda do LP-80. Error! Bookmark not defined.	
Figura 24. Comparação das medidas da PAR _i obtidas para validação in-situ a) LP-80 vs. e-Quantum 85n, b) LP-80 vs. e-Quantum 85, e c) e-Quantum 85 vs. e-Quantum 85n. Error! Bookmark not defined.	
Figura 25. Comparação das medidas da PAR _t obtidas para validação in-situ a) LP-80 vs. e-Quantum 85n, b) LP-80 vs. e-Quantum 85, e c) e-Quantum 85 vs. e-Quantum 85n.	47
Figura 26. Comparação das estimativas de IAF obtidas para validação in-situ a) LP-80 vs. e-Quantum 85n, b) LP-80 vs. e-Quantum 85, e c) e-Quantum 85 vs. e-Quantum 85n.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores típicos para a distribuição angular (X) das folhas.....	27
Tabela 2. Desempenho de abordagens relacionadas a estimativa do IAF, estudo, abordagem, tipo de vegetação, equipamento de referência, equipamento alternativo, número de medidas, coeficiente de determinação, erro quadrático médio, erro absoluto médio, índice (d) de Willmott, inclinação e interceptação da reta.	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Comparativo das características entre os medidores de IAF SunScan, LP-80 e LAI-2200C.	16
Quadro 2. Comparativo para validação dos sensores desenvolvidos em relação ao comercial.	31
Quadro 3. Relação de códigos de erros e alertas, causa provável, possível solução e implicações.	39
Quadro 4. Comparativo das características dos equipamentos comerciais SunScan, LP-80, LAI-2200C e os protótipos e-Quantum 85 e e-Quantum 85n.	44

LISTA DE ABREVIACÕES E/OU SÍMBOLOS

ADC	Analog to Digital Converter
CI	Circuito Integrado
CSV	Comma-separated values
D	Declinação solar
DC	Direct current
ET	Equação do tempo
Fb	Fração de radiação direta
GND	Ground (potencial de tensão nulo)
GPS	Global Positioning System
H	Horário local
H₀	Horário do meio dia solar
I²C	Inter-Integrated Circuit
IAF	Índice de Área Foliar
J	Dia juliano do ano (dia do ano)
K	Coeficiente de extinção
LAI	Leaf Area Index
LC	Correção da longitude
LED	Light Emitting Diode
mAh	Miliampere-hora
MCU	Micro-programmed Control Unit
MUX	Multiplexador
PAR	Photosynthetically active radiation
PIC	Peripheral Interface Controller
PLA	Poliácido Láctico
PTH	Pin Throught Hole
RFA	Radiação fotossinteticamente ativa
RFAi	Radiação fotossinteticamente ativa incidente
RFA_t	Radiação fotossinteticamente ativa transmitida
RGB	Red Green Blue
SMD	Surface-mount Device
SPI	Serial Peripheral Interface
TFT	Thin Film Transistor
TTF_F	Time to first fix
V	Vols

X	Distribuição angular das folhas
Z	Ângulo zenital
q	Fração RFA potencial que atinge a sonda
θ	Latitude
λ	Longitude
τ	Razão de transmissibilidade do dossel

RESUMO

ALMEIDA JÚNIOR, E. S. **Desenvolvimento do sistema embarcado e-Quantum 85n para obtenção automatizada do Índice de Área Foliar**. Cuiabá, 2021, 55f. Tese (Doutorado em Física Ambiental) – Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso.

O Índice de área foliar (IAF) é uma variável valiosa, auxiliando na compreensão das interações solo-planta-atmosfera, sendo empregado por exemplo na modelagem das trocas energéticas, de água e carbono entre a superfície e a atmosfera em ecossistemas naturais ou antropizados. Tendo em vista a necessidade de equipamentos que auxiliem na obtenção do IAF, este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento do sistema embarcado e-Quantum 85n para obtenção automatizada do IAF, e também avaliou as medidas obtidas em relação ao equipamento comercial LP-80. Como ponto de partida no desenvolvimento foi utilizado o e-Quantum 85, um sistema previamente desenvolvido pelo grupo de pesquisa Interação Biosfera-Atmosfera, este primeiro protótipo demonstrou a oportunidade de desenvolvimento de uma ferramenta com mais recursos e funcionalidades otimizando sua utilização. O novo sistema desenvolvido conta com módulo GPS para obtenção da posição geográfica, data e hora, um módulo magnetômetro que permite a determinação do polo norte geográfico, tela TFT LCD de 3,2" sensível ao toque, 85 LEDs RGB empregados como elementos sensores, comunicação sem fio com amplificação de sinal, baterias internas recarregáveis, armazenamento das medidas em cartão SD, conversor analógico digital de 16 bits e bluetooth. A comparação entre as medidas do e-Quantum 85n em relação ao modelo comercial LP-80 resultaram em um erro absoluto médio (MAE) de 0,20, um erro quadrático médio (RMSE) de 0,27 e um coeficiente de Willmott ($d = 0,99$) indicando uma alta correspondência entre os valores do IAF. Tendo em vista o potencial científico e comercial deste trabalho, sua conclusão oportunizou o depósito de sua patente junto ao Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), servindo como incentivo para que mais pesquisadores venham investir no desenvolvimento de instrumentação.

Palavras-chave: Inovação, Automatização, Instrumentação.

ABSTRACT

ALMEIDA JÚNIOR, E. S. **Development of the e-Quantum 85n embedded system for automated obtaining the Leaf Area Index.** Cuiabá, 2021, 55f. Thesis (Doctorate in Environmental Physics) – Institute of Physic, Federal University of Mato Grosso.

The Leaf Area Index (INA) is a valuable variable, assisting in the understanding of soil-plant-atmosphere interactions, being used for example in the modeling of energy, water and carbon exchanges between the surface and atmosphere in natural or anthropized ecosystems. In view of the need for equipment to assist in obtaining the IAF, this work aimed to develop the embedded e-Quantum 85n system to obtain automated IAF, and also evaluated the measurements obtained in relation to commercial equipment LP-80. As a starting point in the development was used the quantum 85, a system previously developed by the research group Biosphere-Atmosphere Interaction, this first prototype demonstrated the opportunity to develop a tool with more features and functionalities optimizing its use. The new system developed has GPS module to obtain geographical position, date and time, a magnetometer module that allows the determination of the geographic north pole, 3.2" touch tft LCD screen, 85 RGB LEDs used as sensor elements, wireless communication with signal amplification, rechargeable internal batteries, storage of measurements on SD card, 16-bit digital analog converter and bluetooth. The comparison between the measurements of quantum and 85n in relation to the commercial model LP-80 resulted in an average absolute error (MAE) of 0,20, an average quadratic error (RMSE) of 0,27 and a Willmott coefficient ($d = 0,99$) indicating a high correspondence between the IAF values. In view of the scientific and commercial potential of this work, its conclusion has led to the filing of its patent with the National Institute of Industrial Property (INPI), serving as an incentive for more researchers to invest in the development of instrumentation.

Keywords: Innovation, Automation, Instrumentation.

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

A obtenção do Índice de Área Foliar (IAF) auxilia na compreensão da capacidade fotossintética (WIT, 1965), respiração e transpiração vegetal (YAMORI, 2016), fixação de carbono (HOFF & RAMBAL, 2003), análise da saúde vegetal e na detecção de tensões antropogênicas e naturais sob a vegetação (NJUGUNA et al., 2016). O IAF é definido como sendo a razão entre a metade da área total das folhas da vegetação pela área total da projeção da vegetação no plano horizontal (CHEN & BLACK, 1992). As formas de obtenção do IAF se caracterizam em métodos diretos e métodos indiretos.

Se denomina métodos diretos ao conjunto de métodos caracterizados pela retirada das folhas para posteriores medições na obtenção do IAF. A remoção da folhagem afeta permanentemente a vegetação, sendo necessário extensiva mão de obra e tempo de execução em sua realização (WHITE et al., 2018). Métodos diretos são geralmente limitados a pequenas áreas e em análises por amostragem (JONCKHEERE et al., 2004; LIU et al., 2015).

Métodos indiretos são assim denominados por estarem baseados na utilização de variáveis relacionadas a área foliar, sem a necessidade de remoção e medição das folhas diretamente. Para isso são empregados equipamentos capazes de mensurar a fração de interceptação da radiação solar ou a reflexão da radiação solar pelo dossel vegetativo. As medidas das variáveis relacionadas são utilizadas como valores de entrada, o cálculo leva em consideração a interação da radiação solar com o dossel, obtendo como resultado a estimativa do IAF (JONCKHEERE et al., 2004).

Dentre os equipamentos comercialmente disponíveis para obtenção do IAF se destacam: SS1 SunScan Canopy Analysis System (Delta-T Cambridge, UK), AccuPAR LP-80 (Decagon, Pullman, WA, USA) e o LAI-2200C (LI-COR, Lincoln, NE, USA). Estes equipamentos possuem por princípio de funcionamento o cálculo da fração de interceptação da radiação solar pelo dossel. São equipamentos interessantes por possibilitarem a obtenção das medidas em campo sem pós-processamento, apresentando ao usuário os valores obtidos através do próprio dispositivo.

Estes equipamentos possuem funcionalidades como GPS, alta capacidade de armazenamento de medidas, bateria recarregável, obtenção automática das medidas, comunicação (RS232 ou USB) e sensor de incidência com conexão sem fio. No entanto, além da necessidade de importação, não existe um único equipamento comercial que reúna estas diferentes funcionalidades, de forma a simplificar a obtenção das medidas e propiciar flexibilidade de uso.

1.2. JUSTIFICATIVA

O desenvolvimento tecnológico trouxe recursos que não existiam a alguns anos atrás, possibilitando o acesso a tecnologias cada vez mais eficientes e compactas, por exemplo, computadores completamente funcionais com as dimensões de um cartão de crédito (NAGATA & SUZUKI, 2018). O uso de tecnologias como essa vem crescendo continuamente à medida que seus custos reduzem, flexibilizando o acesso a esses dispositivos, possibilitando a criação de soluções alternativas às já comercialmente existentes e viabilizando o acesso a instrumentação de qualidade (CAVALIERE et al., 2018; WENG & LIN, 2021).

Neste sentido é notório os avanços tecnológicos disponíveis que juntos contribuem para a implementação de um sistema embarcado completamente funcional, versátil e acessível na obtenção do IAF. O módulo GPS e o magnetômetro são duas destas tecnologias, estas permitem ao usuário sua orientação em campo, além de possibilitar a obtenção automática das coordenadas geográficas, data e horário, altitude e o norte magnético da terra durante as medidas.

Em termos de conectividade sem fio, diferentes módulos podem ser empregados, o bluetooth por exemplo, permite a fácil conexão com dispositivos como computadores e smartphones, facilitando a transmissão de dados entre dispositivos. Outro módulo é o transceptor nRF24L01, este permite a transmissão de dados em tempo real entre dispositivos utilizando um canal dedicado, possibilitando a obtenção de medidas simultâneas remotamente.

Como interface para com o usuário foram utilizadas telas sensíveis ao toque TFT, que permitem a apresentação das diversas variáveis empregadas no cálculo do IAF de forma simultânea, sem perda de legibilidade. Como fonte de energia para o dispositivo, temos as baterias de íons de lítio, estas já são amplamente empregadas na indústria o que facilita sua aquisição, e por serem recarregáveis contribuem para a redução na produção de resíduos tecnológicos.

Como elementos sensores para obtenção da Radiação Fotossinteticamente Ativa (RFA) temos a possibilidade de empregar LEDs, inicialmente estes componentes são fabricados com a finalidade de emitir luz em uma determinada faixa do espectro eletromagnético. Entretanto, estes componentes ao serem expostos a uma fonte eletromagnética do mesmo comprimento de onda que foram projetados para funcionar, passam a produzir um diferencial de tensão em seus terminais (MIMS, 1992). Essa característica permite que LEDs possam ser utilizados como sensores, desta forma são utilizados LEDs RGB, que correspondem a faixa da RFA de 400 nm até 700 nm (MAHANTA et al., 2017).

A flexibilidade de acesso a estas tecnologias, oportuniza o desenvolvimento e prototipação de um dispositivo alternativo aos comercialmente existentes, englobando as diferentes funcionalidades em um único dispositivo. Resultando no desenvolvimento de um equipamento que seja ao mesmo tempo preciso, de fácil utilização e replicável, contribuindo no amparo à pesquisa científica brasileira. Possibilitando ainda com a conclusão deste trabalho, o depósito do pedido de patente do mesmo, tendo em vista que atende aos critérios de atividade inventiva, novidade e aplicação industrial.

1.3. OBJETIVO

1.3.1. Objetivo Geral

Este trabalho tem como principal objetivo o desenvolvimento do sistema embarcado e-Quantum 85n para obtenção automatizada do Índice de Área Foliar utilizando componentes alternativos.

1.3.2. Objetivo Específico.

- Avaliar a utilização do LED RGB como elemento sensor da radiação fotossinteticamente ativa;
- Desenvolver e implementar novas funcionalidades (GPS, magnetômetro, nRF24L01 com amplificador de sinal, bluetooth, baterias de Li-Ion e tela TFT) ao protótipo e-Quantum 85n;
- Avaliar o desempenho do protótipo em relação a um modelo comercial.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. ÍNDICE DE ÁREA FOLIAR

O Índice de Área Foliar (IAF) é definido como sendo a razão entre a metade da área total das folhas da vegetação pela área total da projeção horizontal da vegetação (CHEN & BLACK, 1992). O IAF é uma medida adimensional, apresentando sempre valores iguais ou superiores a zero, na Figura 1a é representado uma medida de IAF igual a 3, já na Figura 1b a é representado uma medida de IAF igual a 1.

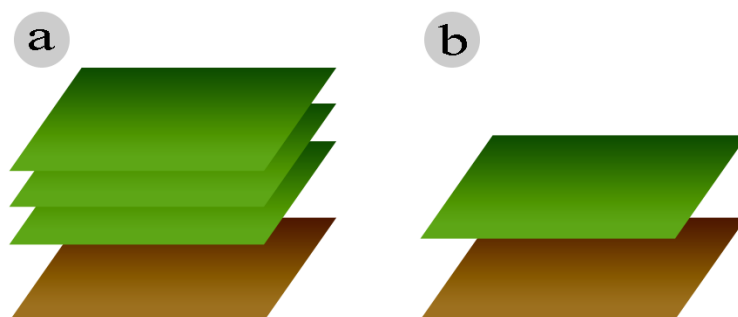


Figura 1. Ilustração demonstrativa de medidas de Índice de Área Foliar (IAF) onde (a) representa um IAF de 3 e (b) representa um IAF de 1.

O IAF é um parâmetro estrutural de grande importância, possibilitando a quantificação da capacidade fotossintética (WIT, 1965), respiração e transpiração da folhagem vegetal (YAMORI, 2016), fixação de carbono (HOFF & RAMBAL, 2003), a análise da saúde vegetal. Podendo ainda ser empregado na detecção de tensões antropogênicas e naturais sob a vegetação (NJUGUNA et al., 2016).

2.2. MÉTODOS PARA OBTENÇÃO DO IAF

Os métodos para obtenção do IAF são organizados basicamente em dois grupos, os métodos diretos e os métodos indiretos. Os métodos diretos consistem na medida da área foliar através de medidas destrutivas, onde as amostras foliares são coletadas em campo sua área foliar medida manualmente ou utilizando equipamentos como o medidor de área LI-3100C (LI-COR, Lincoln, NE, USA).

Métodos diretos afetam o dossel, demandam tempo e mão de obra, sendo geralmente limitados a pequenas áreas de amostragem ou com o propósito de referência (SANDHU et al., 2019). Existem alternativas como o uso de armadilhas (LIU et al., 2015), no entanto não é recomendado a espécies vegetais que não apresentam senescência.

Métodos indiretos empregam no cálculo do IAF um parâmetro facilmente medido, como por exemplo a quantificação da luz solar que atravessa o dossel vegetativo. A partir das medidas indiretas é possível determinar uma relação com IAF, o que possibilita obter de forma menos onerosa o IAF, demandando menos recursos pessoais e tempo (QU et al., 2014). Dentre os métodos indiretos destacam-se as fotografias esféricas (FOURNIER et al., 1996), estimativa por análise de imagens de satélite (BIUDES et al., 2014) ou pela medida da fração da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) incidente e transmitida (NORMAN & JARVIS, 1974; MYNENI et al., 1997).

Visto que as medições diretas do IAF são destrutivas e laboriosas, os métodos indiretos na obtenção do IAF oferecem uma alternativa viável na obtenção do IAF. Todos os métodos indiretos são, no entanto, afetados por vários fatores, como os algoritmos e a abordagem utilizados, as condições de radiação e o ângulo zenital no momento das medições, as características do dossel e distribuição foliar (RYU et al., 2010; ARIZA-CARRICONDO et al., 2019), ficando a critério do pesquisador determinar qual método se adequa melhor ao objeto de estudo, definindo assim qual instrumento será empregado na obtenção das medições (FANG et al., 2019).

2.3. RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA

Radiação fotossinteticamente ativa (RFA) ou, em inglês, Photosynthetically active radiation (PAR) compreende a faixa do espectro eletromagnético visível variando de 400 nm até 700 nm (Figura 2). Esta faixa é assim definida e utilizada por considerar o processo fotossintético das plantas (MONTEITH, 1972), sendo uma variável de importante análise, sendo empregada em estimativas como variável de entrada em modelos de análise ambiental (TAN & ISMAIL, 2015).

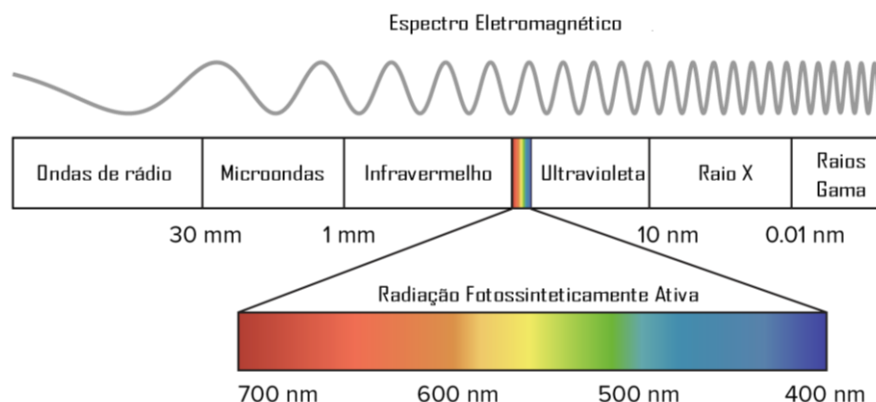


Figura 2. Comprimento de onda da faixa eletromagnética que corresponde a radiação fotossinteticamente ativa.

A RFA é empregada no cálculo do IAF porque quando interage com a estrutura do dossel vegetativo não apresenta variação considerável de absorção e refração, tendo um comportamento uniforme, mesmo em condições variadas de stress hídrico (XIE et al., 2018).

2.4. FRAÇÃO DA RADIAÇÃO FOTOSSINTETICAMENTE ATIVA TRANSMITIDA

A RFA incidente sobre um dossel pode ser refletida, absorvida e ou transmitida através do dossel. A fração da radiação fotossinteticamente ativa transmitida é a parcela da radiação que passa através do dossel atingindo o solo, e está diretamente relacionada a densidade foliar do dossel. Desta forma é possível determinar o IAF a partir da relação entre a RFA incidente e a RFA transmitida (MONTEITH, 1977).

O emprego do método de estimativa do IAF pela fração da RFA transmitida tem sido amplamente aplicado com sucesso (BAUER et al., 2016). Entretanto sua utilização requer um nível de abstração e simplificação, assumindo desta forma suposições como: a distribuição aleatória das folhas; a obtenção de medidas em faixas do espectro eletromagnético onde as folhas são consideradas como corpos negros; a distribuição uniforme entre elementos verdes e não verdes; e a adoção de uma forma geométrica que melhor represente a estrutura do dossel (WEISS et al., 2004).

Como forma de minimizar os erros decorrentes da adoção de suposições na estimativa do IAF pela fração da RFA transmitida, é necessário confrontar o método adotado e as configurações de cada equipamento em relação as diferentes variedades vegetais, estágio fenológico e estrutura do dossel, e desta forma avaliar a melhor abordagem e obter os menores erros possíveis (CONFALONIERI et al., 2013; POBLETE-ECHEVERRÍA et al., 2015; MORA et al., 2016; PEARSE et al., 2016; POKOVAI & FODOR, 2019).

2.5. INSTRUMENTAÇÃO COMERCIAL PARA OBTENÇÃO DO IAF

Neste trabalho foram analisados alguns dos instrumentos comercialmente disponíveis que utilizam o método da fração da RFA incidente transmitida como forma de obter o IAF. Três equipamentos foram estudados, sendo estes o SS1 SunScan Canopy Analysis System (Delta-T Cambridge, UK) (Figura 3a), o AccuPAR LP-80 (Decagon, Pullman, WA, USA) (Figura 3b) e o LAI-2200C (LI-

COR, Lincoln, NE, USA) (Figura 3c) (WILHELM et al., 2000). No Quadro 1 são apresentadas as especificações de cada equipamento.



Figura 3. Medidores de IAF comerciais, (a) SunScan, (b) LP-80, (c) LAI-2200C.

Quadro 1. Comparativo das características entre os medidores de IAF SunScan, LP-80 e LAI-2200C.

	SunScan	LP-80	LAI-2200C
Fabricante	Delta-T	Decagon	LI-COR
Custo	R\$ 74.764,84	R\$ 17.068,05	R\$ 48.222,00
Unidade de controle			
Teclado	10 teclas	7 teclas	22 teclas
Peso	0,490 Kg	0,55 Kg	0,454 Kg
Dimensões	191(c) x 80(l) x 35(a) mm	158(c) x 95(l) x 33(a) mm	209(c) x 98(l) x 35(a) mm
Memória	1.000.000 de leituras (interna ou uSD)	16.000 de leituras (interna)	1.500.000 de leituras (interna)
Alimentação	Bateria recarregável (12h de uso)	4 x baterias alcalinas AAA	4 x baterias alcalinas AA (40h de uso)
GPS	Não possui	Não possui	Possui
Bússola digital	Não possui	Não possui	Não possui
Conexão	-	Serial (RS232)	USB (dispositivo de armazenamento)
Sonda			
Corpo da sonda	Conexão por cabo	Integrado a unidade de controle	Conexão por cabo
Número de sensores na sonda	64	80	5
Espaçamento entre os sensores	15,6 mm	10 mm	-
Área ativa da sonda	1 m	0,865 m	-
Resposta espectral	400 – 700 nm (PAR)	400 – 700 nm (PAR)	320 – 490 nm
Acurácia	±10%	-	-
Tempo de leitura	120 ms	1 s	-
Range de leitura	0 - 2500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	0 - 2500 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	-
Resolução	0,3 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	1 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$	-
Peso	1,7 Kg	-	0,845 Kg
Dimensões	1300(c) x 100(l) x 130(a) mm	865(c) x 19(l) x 10(a) mm	638(c) x 29(l) x 29(a) mm

Alimentação	4 x baterias alcalinas AA	Proveniente da unidade de controle	2 x baterias alcalinas AA (180h de uso)
Sensor de incidência			
Sensor de incidência	Possui	Possui	Não possui
Resposta espectral	400 – 700 nm (PAR)	400 – 700 nm (PAR)	-
Acurácia (Total)	$\pm 12\% \pm 10 \mu\text{mol/m}^2\text{s}$	-	-
Peso	0,635 Kg	-	-
Dimensões	120(c) x 122(l) x 95(a) mm	-	-
Alimentação	4 x baterias alcalinas AA	Proveniente da unidade de controle	-
Conexão	Sem fio (250 m)	Cabo (5 m)	-

Dentre os instrumentos estudados o que possui um funcionamento ótico diferenciado é o LAI-2200C, este emprega um conjunto de cinco lentes para determinar a intensidade da radiação em cinco ângulos de visada, (0,0-12,3°), (16,7-28,6°), (32,4-43,4°), (47,3-58,1°) e (62,3-74,1°) e utiliza uma faixa menor da RFA como medida de intensidade, compreendendo a faixa do azul (320-490 nm). Isso se deve as propriedades óticas dessa faixa do espectro eletromagnético que ao interagir com o dossel, minimizando o efeito da luz difundida pela folhagem, levando em consideração que as folhas se comportam como um corpo negro (WELLES & COHEN, 1996).

2.6. INSTRUMENTAÇÃO ALTERNATIVA

Em conjunto à crescente oferta de componentes e módulos eletrônicos de alta qualidade e variedade, observa-se o aumento do interesse dos pesquisadores no desenvolvimento de equipamentos alternativos aos produtos comercialmente existentes (FISHER & GOULD, 2012). Outro ponto importante consiste em que ao se desenvolver uma solução tecnológica, flexibiliza a espacialização na coleta de dados (QU et al., 2014) e o monitoramento contínuo durante longos períodos de tempo (FANG et al., 2018). Outros pontos importantes são a redução de custos (QU et al., 2016; OSROOSH et al., 2018), otimização de recursos (QU et al., 2017), obtenção de novas funcionalidades (KIRBY et al., 2018) ou ainda como forma de atender a novas demandas instrumentais (JIAO et al., 2016).

2.6.1. Diodo emissor de luz como sensor da RFA

Um diodo emissor de luz (LED) possui a capacidade de ser uma fonte luminosa para uma determinada faixa do espectro eletromagnético, outra característica é que podem ser utilizados como fotodetectores (MIMS, 1992). As

vantagens de se utilizar LEDs como fotodetectores são de que são amplamente disponíveis para aquisição, baixo custo e possuem uma propriedade ótica estável. O princípio básico do uso dos LEDs como fotodetectores é que eles podem produzir uma pequena fotocorrente ao absorver fótons (ACHARYA et al., 1995).

A propriedade mais importante dos LEDs como fotodetectores é a fotoseletividade, onde cada LED é sensível a um comprimento de onda específico, um LED azul produzirá fotocorrente somente se a luz azul incidir sobre ele. O mesmo é aplicado a todos os outros LEDs de comprimento de onda diferente (MAHANTA et al., 2017). De forma que uma associação de LEDs RGB compondo o espectro eletromagnético correspondente a RFA pode ser utilizado como sensor para a RFA.

2.7. DECLINAÇÃO MAGNÉTICA

Equipamentos que utilizam dados provenientes do campo magnético da terra para orientação, de modo geral possuem uma variável de ajuste denominada declinação magnética. A declinação magnética é a variação do ângulo entre a direção norte apontada pela bússola e o norte geográfico, essa variação muda ao passar do tempo e conforme a localidade da medição (SMITH, P. J. & NEEDHAM, 1967), para a devida utilização do e-Quantum 85n o valor da declinação magnética pode ser obtido por meio do site do Observatório Nacional na plataforma ASTRO disponível em < <https://daed.on.br/astro/magnetismo-terrestre> >.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. TECNOLOGIA DE BASE (E-QUANTUM 85)

Como ponto de partida para o desenvolvimento deste trabalho foi utilizado o e-Quantum 85 (Figura 4), um instrumento anteriormente desenvolvido como instrumentação alternativa ao LP-80 em uma demanda observada pelo grupo de pesquisa Interação Biosfera-Atmosfera. Este é constituído de três unidades, sendo: a unidade de controle (Figura 4a) responsável pelo registo das medidas, configurações e interface, o sensor de incidência (Figura 4b) sensor que mede a radiação incidente sob o dossel e a sonda (Figura 4c) mede a fração da RFA incidente transmitida através do dossel. O e-Quantum 85 foi utilizado como ponto de partida no desenvolvimento de um novo equipamento e na comparação das medidas obtidas com a sonda.



Figura 4. e-Quantum 85, protótipo alternativo inicialmente desenvolvido para obtenção do IAF, onde: (a) unidade de controle, (b) sonda e (c) sensor de incidência.

3.2. TECNOLOGIAS EMPREGADAS

Os componentes e módulos empregados na construção do protótipo foram escolhidos com base nas funcionalidades que estes oferecem e a sua disponibilidade no mercado nacional. A seguir são descritos os componentes que constituem a unidade, suas características, funcionalidades e forma de conexão com os demais componentes.

3.2.1. Unidade de Controle

A Figura 5 é um diagrama de blocos onde é representada a estrutura do hardware da unidade de controle.

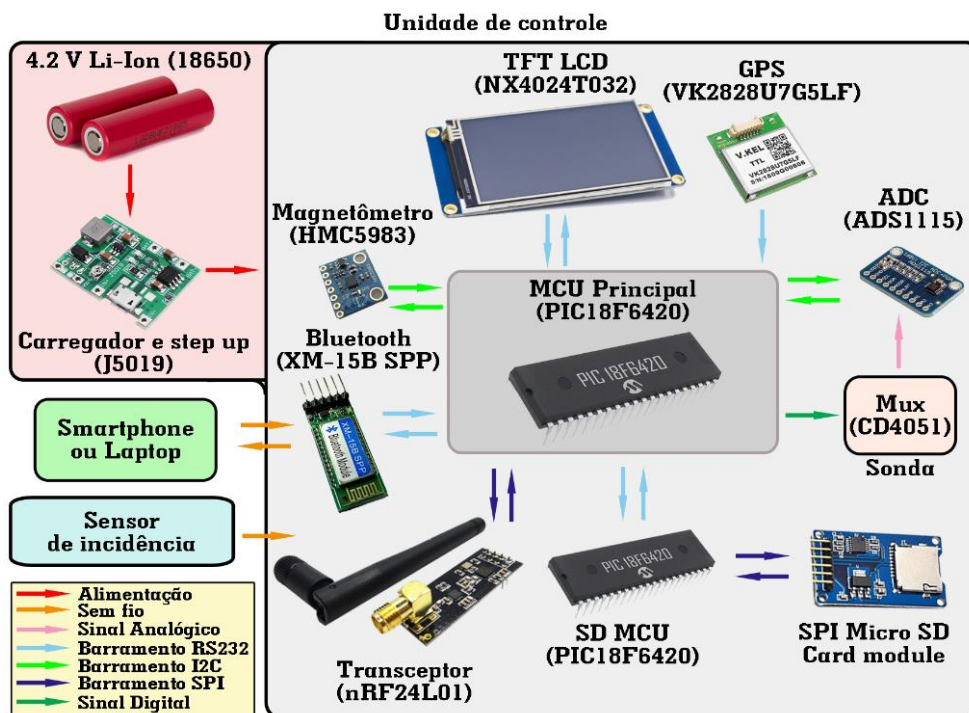


Figura 5. Diagrama de conexões dos módulos e componentes principais da unidade de controle.

A tela sensível ao toque (Nextion NX4024T032 - 3.2" HMI TFT LCD Touch) é um display interativo. Possibilita uma apresentação de várias variáveis ao usuário sem poluir a tela, esta tela foi adicionada para uma melhor interação do usuário com o dispositivo. A tela está conectada ao MCU Principal (Microprogrammed Control Unit) através de um barramento RS232 dedicado.

O MCU Principal consiste em um PIC18F4620, desenvolvido pela Microchip Technology Inc., possui 33 pinos de entrada e ou saída e 64 Kbytes de memória para programação. Este microcontrolador foi escolhido por possuir 64 Kbytes, suporte a SPI, I2C, RS232 e a customização dos pinos de entrada e/ou saída, o MCU Principal tem a finalidade de armazenar e executar o firmware que controla a unidade de controle. Este é o componente central do sistema, sendo conectado diretamente aos demais componentes.

O módulo GPS (VK2828U7G5LF) possui uma precisão da posição horizontal de 2,5 m, taxa de atualização de 1 Hz, sensibilidade autônoma de -148 dBm, e tempo de primeira fixação (TTFF), hot start: 1 s; warm start: 6 s (típico); cold start (com boa visibilidade do céu): 37 s 90% de probabilidade. O GPS tem como finalidade fornecer os dados atualizados da data, hora e coordenada do posicionamento geográfico necessários ao cálculo do IAF e como forma de

orientação geográfica ao usuário. Este componente está conectado diretamente ao MCU Principal por um segundo barramento RS232 dedicado.

O módulo ADS1115 é um conversor analógico digital (ADC) de 16 bits e quatro canais de entrada singular ou dois pares de canais diferenciais. A principal funcionalidade deste dispositivo é efetuar a conversão dos sinais analógicos em valores digitais computáveis pelo MCU Principal a uma taxa de 120 amostras por segundo. O ADS1115 está conectado ao MCU Principal por um barramento I²C dedicado, no canal 0 é feita a leitura multiplexada da sonda e no canal 1 é feita a leitura do nível de tensão da bateria.

O magnetômetro (HMC5983) é um módulo capaz de medir a intensidade do campo magnético nos 3 eixos cartesianos a uma taxa máxima de atualização de 220 Hz. A partir das medidas do campo magnético é possível determinar o norte magnético e geográfico terrestre com uma precisão de rumo da bússola de 1° a 2° o que auxilia o usuário na sua orientação em campo durante a tomada das medidas de IAF. O (HMC5983) está conectado ao MCU Principal através de um segundo barramento I²C dedicado.

O SD MCU é um microcontrolador (PIC18F4620) e opera em conjunto com módulo adaptador de cartão SD no gerenciamento do sistema de arquivos FAT32 permitindo a utilização de cartões SD de 1 Gb até 128 Gb. O SD MCU é responsável por executar as rotinas referentes à organização e armazenamento das medidas no cartão SD sendo estas registradas conforme são salvas e posteriormente organizadas em um arquivo .CSV quando solicitado pelo usuário. O módulo adaptador de cartão SD está conectado ao SD MCU através de um barramento SPI exclusivo e a conexão entre o SD MCU e o MCU Principal é feita por meio de um terceiro barramento RS232.

O módulo de rede sem fio (nRF24L01) é um transceptor que permite o envio e recebimento de dados remotamente, operando em uma frequência de 2,40 GHz, taxa de transferência de 2 Mbit/s, amplificador interno de sinal e antena. Este módulo permite o recebimento dos dados provenientes do sensor de incidência permitindo a obtenção simultânea das medidas necessárias ao cálculo do IAF. O módulo transceptor está conectado ao MCU Principal através de um barramento SPI dedicado e conectado remotamente ao módulo transceptor do sensor de incidência.

O módulo de rede sem fio bluetooth (XM-15B SPP) é compatível com o Bluetooth 2.1, opera na frequência de 2,45 GHz e possui o alcance de até 10 m.

do conjunto, variando a amplitude do sinal em relação a magnitude da iluminação a qual são expostos. O polo negativo (cátodo) de cada segmento é conectado diretamente ao GND do sistema, já o polo positivo (ânodo) de cada segmento é conectado a um dos canais do MUX (CD4051) (Figura 6).

O (MUX) (CD4051) é um multiplexador bidirecional de oito canais comutável por um barramento paralelo de três bits. O emprego de um multiplexador permite que seja utilizado apenas um canal do ADC para a leitura dos oito segmentos da sonda, o que torna o hardware mais simples e compacto. O polo positivo de cada um dos oito segmentos da sonda é conectado diretamente a um canal do MUX, a saída do MUX é conectada ao canal 0 do ADC e os pinos de comutação são ligados ao PIC Principal.

3.2.3. Sensor de Incidência

A Figura 7 é um diagrama de blocos onde é representada a estrutura do hardware do sensor de incidência.

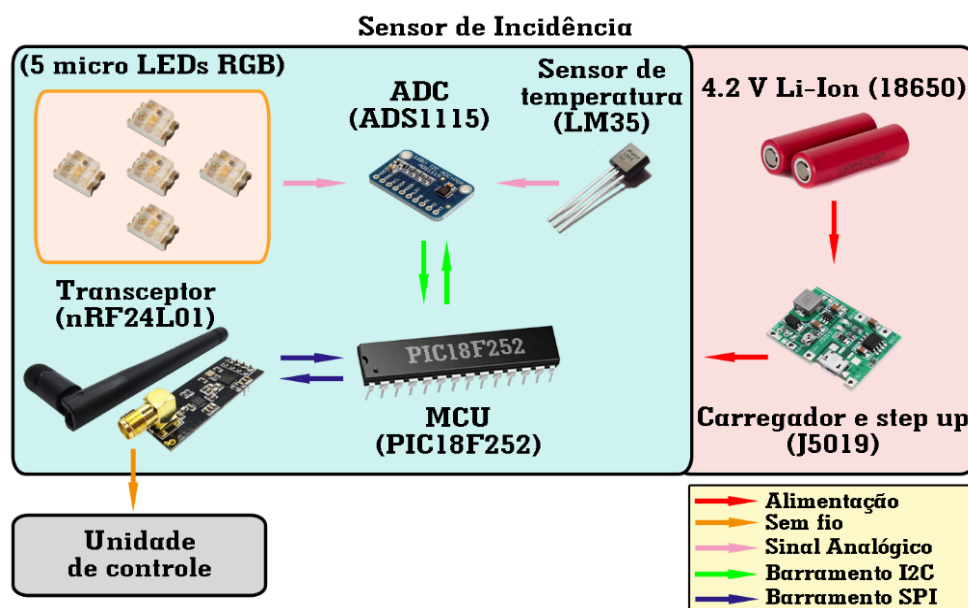


Figura 7. Diagrama de conexões dos módulos e componentes principais do sensor de incidência.

O elemento sensor do sensor de incidência consiste em cinco micro LEDs RGB ligados em paralelo. Semelhantemente a sonda os LEDs do elemento sensor atuam como fotocélulas, produzindo um diferencial de tensão entre os polos do conjunto, variando a amplitude do sinal em relação a magnitude da iluminação a qual são expostos. O polo negativo (cátodo) do elemento sensor é conectado diretamente ao GND do sistema, já o polo positivo (ânodo) é conectado ao canal 0 do conversor analógico digital (ADS1115) (Figura 7).

O sensor de temperatura LM35 possui resposta linear variando 10 mV a cada 1°C, sendo 0 V = 0°C. Tendo em vista que o sensor de incidência fica posicionado diretamente sob os raios solares, como medida de precaução foi incorporado ao sistema o sensor de temperatura, emitindo um alerta caso a temperatura interna ultrapasse 65°C. A saída do sensor de temperatura é conectada diretamente ao canal 1 do conversor analógico digital (ADS1115) (Figura 7).

O módulo (ADS1115) empregado no sensor de incidência é o mesmo conversor analógico digital (ADC) de 16 bits de quatro canais de entrada singular empregado na unidade de controle. O conversor analógico digital do sensor de incidência tem a finalidade de fazer a conversão dos sinais analógicos provenientes do elemento sensor, do sensor de temperatura e da tensão da bateria interna. O ADC está conectado ao MCU por um barramento I²C dedicado, no canal 0 é feita a leitura do elemento sensor, no canal 1 é feita a leitura da temperatura e no canal 2 é feita a leitura da tensão da bateria interna.

O sensor de incidência possui um MCU modelo PIC18F252, desenvolvido pela Microchip Technology Inc., possui 22 pinos de entrada e ou saída e 32K bytes de memória para programação. O MCU é responsável por gerenciar as rotinas referentes à leitura do conversor analógico digital e do envio dos dados remotamente pelo módulo nRF24L01 para a unidade de controle. O MCU está conectado ao ADC por meio de um barramento I²C, ao nRF24L01 através de um barramento SPI e alimentado pelo módulo controlador de carga e descarga da bateria.

O módulo de rede sem fio (nRF24L01) é um transceptor que permite o envio e recebimento de dados remotamente, operando em uma frequência de 2,40 GHz, taxa de transferência de 2 Mbit/s, amplificador interno de sinal e antena. Este módulo permite o envio das medidas para a unidade de controle, permitindo a obtenção simultânea das medidas necessárias ao cálculo do IAF. O módulo transceptor está conectado ao MCU através de um barramento SPI dedicado e conectado remotamente ao módulo transceptor da unidade de controle.

O (J5019) é um módulo de controle de carregamento com elevador de tensão DC-DC para baterias de 4,2 V de Íons de Lítio, a saída do módulo fornece uma tensão ajustada em 5,1 V e corrente máxima de 1 A. O módulo faz o gerenciamento do controle de carga de duas baterias de 4,2 V de Li-Ion (18650) associadas em paralelo, fornecendo uma capacidade máxima de 4400 mAh. Como fonte de energia

para o carregamento das baterias é utilizado uma fonte externa de 5,0 V, a saída de tensão do módulo (J5019) é ligada diretamente ao barramento de 5,1 V do sistema.

3.3. CÁLCULO DO IAF POR FRAÇÃO DA RFA INCIDENTE TRANSMITIDA

O método da fração da RFA incidente transmitida é empregado no cálculo do IAF. O método foi inicialmente criado por Norman & Jarvis (1974), e posteriormente adaptado por Norman (1979). O modelo adaptado tem como entrada quatro variáveis principais, sendo elas a razão de transmissibilidade do dossel (τ), o ângulo zenital solar (Z), a fração de radiação direta (Fb), e o coeficiente de extinção do dossel (K).

3.3.1. Razão de Transmissibilidade do Dossel

A razão de transmissibilidade do dossel (τ), 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 1).

$$\tau = \frac{RFA_t}{RFA_i} \quad (1)$$

Quando o IAF é baixo, a maior parte da radiação incidente é transmitida através do dossel ao invés de ser absorvida ou refletida pelas folhas, portanto τ 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 através do dossel.

3.3.2. Ângulo Zenital

O ângulo zenital solar (Z) (Equação 2) 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 (NORMAN, 1979).

$$Z = \arccos(\sin(\theta) \sin(D) + \cos(\theta) \cos(D) \cos(0,2618(H - H_0))) \quad (2)$$

onde θ 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 (3):

$$D = \arcsen(0,397\sin(4,869 + 0,017J + 0,033\sin(6,224 + 0,017J))) \quad (3)$$

onde J é o dia juliano do ano.

O horário do meio dia solar é calculado utilizando a Equação (4):

$$H_0 = 12 - LC - ET \quad (4)$$

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 (5):

$$LC = \frac{(\lambda - UTC\ 15)}{15} \quad (5)$$

onde λ 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, obtêm-se utilizando a Equação (6):

$$\begin{aligned} ET = & (-104,7\text{sen}(\Phi) + 596,2\text{sen}(2\Phi) + 4,3\text{sen}(3\Phi) \\ & - 12,7\text{sen}(4\Phi) - 429,3\text{cos}(\Phi) - 2\text{cos}(2\Phi) \\ & + 19,3\text{cos}(3\Phi))/3600 \end{aligned} \quad (6)$$

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

3.3.3. 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 (NORMAN, 1979).

A fração de radiação direta é calculada com base no método publicado por Spitters et al., (1986) Equação (7):

$$Fb = 1,395 + \varrho(-14,43 + \varrho(48,57 + \varrho(-59,024 + \varrho 24,835))) \quad (7)$$

onde ϱ é a fração RFA potencial que atinge o sensor de incidência.

3.3.4. 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 (Z) e a distribuição angular das folhas (X). A distribuição angular das folhas, é a razão entre o comprimento do eixo horizontal pelo comprimento do eixo vertical da esferoide descrita pelo dossel, é um valor definido pelo pesquisador, usualmente ($X = 1,0$), onde assume-se que o ângulo de distribuição foliar é esférico, na Tabela 1 são apresentados alguns valores para a distribuição angular das folhas.

Tabela 1. Valores típicos para a distribuição angular (X) das folhas.

Cultivo	X
Lolium	0,67 até 2,47
Milho	0,76 até 2,52
Centeio	0,80 até 1,27
Trigo	0,96
Cevada	1,2
Phleum	1,13
Sorgo	1,43
Alfafa	1,54
Nabo-sueco	1,29 até 1,81
Colza	1,92 até 2,13
Pepino	2,17
Tabaco	1,29 até 2,22
Batata	1,70 até 2,47
Fava	1,81 até 2,17
Girassol	1,81 até 2,31
Trevo-branco	2,47 até 3,26
Morango	3,03
Alcachofra-de-Jerusalém	2,16

O coeficiente de extinção do dossel baseia-se na ideia de que o ângulo de incidência dos feixes de radiação solar interage 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 (8):

$$K = \frac{\sqrt{X^2 + \tan Z^2}}{X + 1,744(X + 1,182)^{-0,733}} \quad (8)$$

Uma vez calculado o coeficiente de extinção e todas as variáveis intrínsecas, o índice de área foliar foi calculado utilizando a Equação (9):

$$L = \frac{\left[\left(1 - \frac{1}{2K} \right) Fb - 1 \right] \ln \tau}{0,86(1 - 0,47 Fb)} \quad (9)$$

3.4. AVALIAÇÃO DO LED RGB COMO SENSOR DE RFA

A resposta e sensibilidade do micro LED RGB 0606 foi avaliada em relação ao sensor comercial de incidência do AccuPAR LP-80 (Decagon, Pullman, WA, USA) efetuando medidas simultâneas com ambos os sensores. Foram utilizados 10 LEDs RGB conectados em paralelo entre os diferentes canais R, G. e B e entre os 10 LEDs, com o conjunto operando como uma fotocélula (Figura 8).

Para o registro e armazenamento das medidas foi utilizado a unidade de controle do e-Quantum 85 (Figura 4a), equipada com um DAC e entrada de cartão SD para registro. As medidas foram realizadas nos dias 20/08/2020, 23/04/2021 e

27/04/2021 expondo ambos os sensores as mesmas condições ambientais com pouca ou nenhuma nebulosidade e observando o horário recomendado pelo fabricante do LP-80, das 10:00 às 14:00.

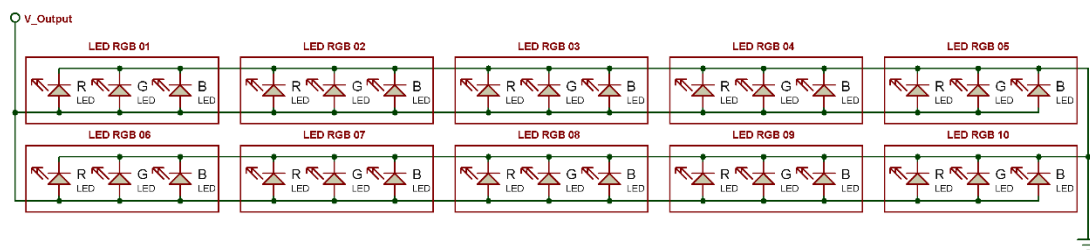


Figura 8. Micro LED RGB 0606.

3.5. PROCESSO DE PROTOTIPAÇÃO

O processo de desenvolvimento e prototipação do novo sistema (e-Quantum 85n) consistiu na execução das etapas de:

- Levantamento dos requisitos a serem implementados ao sistema (GPS, tela sensível ao toque, bússola digital, miniaturização dos componentes, bluetooth, melhoria no alcance da comunicação sem fio e o emprego de baterias recarregáveis ao sistema de alimentação);
- Aquisição dos componentes e módulos eletrônicos a serem implementados ao projeto;
- Montagem do diagrama eletrônico do protótipo e teste de bancada;
- Programação do MCU integrando as funcionalidades e ajustes no diagrama eletrônico;
- Prototipação das placas em circuito impresso;
- Montagem das placas em circuito impresso;
- Modelagem da estrutura em software 3D;
- Impressão 3D;
- Montagem do protótipo;
- Testes e calibração;
- Validação.

3.5.1. Unidade de Controle

Toda a unidade de controle e seus componentes internos foram modelados em 3D (Figura 9), isso permitiu uma melhor otimização de espaço a fim de obter um equipamento compacto, ergonômico, leve e funcional.

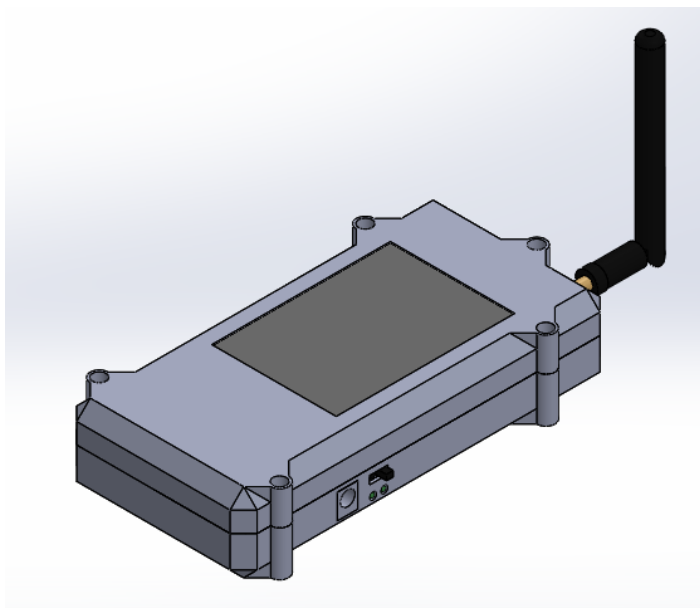


Figura 9. Aspecto final digital da modelagem da unidade de controle em software 3D.

Ao término da organização dos componentes e da modelagem das peças, as partes estruturais foram impressas em 3D utilizando filamento PLA.

A unidade de controle possui um invólucro que são impressos em PLA, o invólucro possui uma configuração que permite sua fácil impressão. A unidade de controle possui uma tela sensível ao toque e é o principal meio de interação do usuário com o dispositivo. Nela é possível exibir as medidas em tempo real, visualizar e excluir os registros armazenados e configurar os parâmetros de utilização.

3.5.2. Sonda

As peças da empunhadura e seus componentes internos foram modelados em 3D (Figura 10), isso permitiu a melhor otimização de espaço a fim de obter um equipamento compacto, ergonômico, leve e funcional.

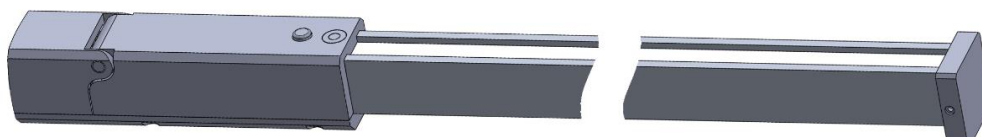


Figura 10. Aspecto final digital da modelagem da sonda em software 3D

Ao término da organização dos componentes e da modelagem das peças, as partes estruturais da sonda foram impressas em 3D utilizando filamento PLA.

A sonda é composta por um perfil metálico em alumínio, onde os elementos sensores são fixados e sob estes é posicionado um difusor. O difusor tem a finalidade de proteger os elementos sensores e difundir uniformemente a radiação fotossinteticamente ativa sobre eles.

Na extremidade oposta a empunhadura, foi fixada uma tampa para proteção dos componentes internos da sonda. A sonda é conectada à unidade de controle por meio de um cabo com conector RJ45 macho nas duas pontas, a ser conectado a um conector RJ45 fêmea. Sobre esse conector, está disposta uma tampa articulada para proteger o conector de impactos mecânicos.

3.5.3. Sensor de Incidência

As peças do sensor de incidência e seus componentes internos foram modelados em 3D (Figura 11), isso permitiu a melhor otimização de espaço a fim de obter um equipamento compacto, ergonômico, leve e funcional.

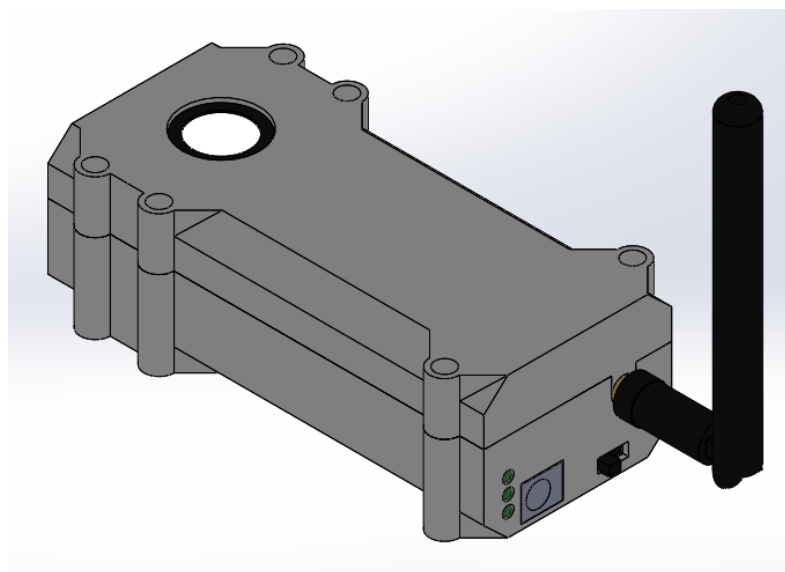


Figura 11. Aspecto final digital da modelagem da do sensor de incidência em software 3D.

Ao término da organização dos componentes e da modelagem das peças, as partes estruturais do sensor de incidência foram impressas em 3D utilizando filamento PLA.

O sensor de incidência possui um invólucro bipartido, composto de uma tampa e uma base. Na tampa, existe uma janela óptica composta por um difusor com a finalidade de distribuir a RFA uniformemente sobre os elementos sensores.

3.6. CALIBRAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

A calibração foi realizada por regressão linear, adotando por referência o equipamento comercial LP-80 (AccuPAR LP-80, Decagon Devices, USA), obtendo simultaneamente medidas de RFA transmitida e RFA incidente para o equipamento de referência e para o protótipo. As medidas foram realizadas nos dias 20/08/2020, 23/04/2021, 27/04/2021 e 21/06/2021 expondo ambos os sensores as mesmas condições ambientais com pouca ou nenhuma nebulosidade e observando o horário recomendado pelo fabricante do LP-80, das 10:00 às 14:00.

3.7. VALIDAÇÃO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

Foram feitas medidas simultâneas com o equipamento comercial de referência (AccuPAR LP-80, Decagon Devices, USA), o e-Quantum 85 e o e-Quantum 85n. As medidas foram realizadas nos dias 07/07/2021, 08/07/2021, 15/07/2021, 17/07/2021, 03/08/2021 e 04/08/2021. Expondo os equipamentos as mesmas condições ambientais com pouca ou nenhuma nebulosidade e observando o horário recomendado pelo fabricante do LP-80, das 10:00 às 14:00. Foram obtidas medidas de incidência e transmitância sob diferentes espécies arbóreas localizadas nas proximidades do prédio da Pós-graduação em Física Ambiental na Universidade Federal de Mato Grosso.

Para análise foram utilizadas as medidas de RFA transmitida (RFAt), RFA incidente (RFAi) e as estimativas do IAF. No Quadro 2 é demonstrado a forma como as análises foram feitas. Não foi utilizado o sensor de incidência do e-Quantum 85 (Figura 4b) em decorrência de ter sido desmontado, sendo os dados provenientes do sensor de incidência do e-Quantum 85n compartilhados para ambos os protótipos.

Quadro 2. Comparativo para validação dos sensores desenvolvidos em relação ao comercial.

Variável	Referência	Avaliado
RFA incidente	Sensor de incidência LP-80	Sensor de incidência e-Quantum 85n
RFA transmitida	Sonda LP-80	Sonda e-Quantum 85n
RFA transmitida	Sonda e-Quantum 85	Sonda e-Quantum 85n
RFA transmitida	Sonda LP-80	Sonda e-Quantum 85
IAF	LP-80	e-Quantum 85n
IAF	e-Quantum 85	e-Quantum 85n
IAF	LP-80	e-Quantum 85

3.8. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

O índice (d) de Willmott (Equação 10), indica exatidão entre as variáveis, e quanto maior seu valor, maior a concordância entre a variável observada e a variável de referência. A correlação (r) de Pearson (Equação 11), mede o grau de correlação linear entre a variável observada e a variável de referência, variando de -1 a 1, onde 0 não existe correlação, -1 é uma ótima correlação inversa e 1 é uma ótima correlação direta. O coeficiente de determinação (R^2) (Equação 12), descreve a fração da variância total nos dados da variável observada que podem ser explicados pelos dados da variável de referência, seu valor fica entre 0 e 1, e quanto maior o valor, melhor a concordância entre dados.

O erro absoluto médio (MAE) (Equação 13), representa o desvio médio entre a variável observada e a variável de referência, possui unidade de medida igual as das medidas analisadas dando peso igual a todos os desvios. O erro quadrático médio (RMSE) (Equação 13), representa a medida do desvio ao quadrado entre a variável observada e a variável de referência, dando um peso maior aos maiores desvios, possui unidade de medida igual as das medidas analisadas. Quanto mais próximos os valores entre o RMSE e o MAE indica que a distribuição dos erros é uniforme.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O| + |O_i - O|)^2} \right] \quad (10)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}} \quad (11)$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - O)(P_i - P)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - O)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - P)^2}} \right]^2 \quad (12)$$

$$MAE = \sum_{i=1}^n \frac{|P_i - O_i|}{n} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}} \quad (13)$$

Onde P_i representa os valores da variável observada e P a média, O_i representa os valores da variável de referência e O a média.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. AVALIAÇÃO DO LED RGB PARA MEDIÇÃO DA RFA

O sensor alternativo LED RGB apresentou resposta linear em relação ao sensor comercial de incidência do AccuPAR LP-80 (Decagon, Pullman, WA, USA) (Figura 12). As medidas obtidas com os LEDs RGB obtiveram um coeficiente de determinação de 99% ($R^2 = 0,99$) o que representa uma ótima concordância entre as medidas obtidas.

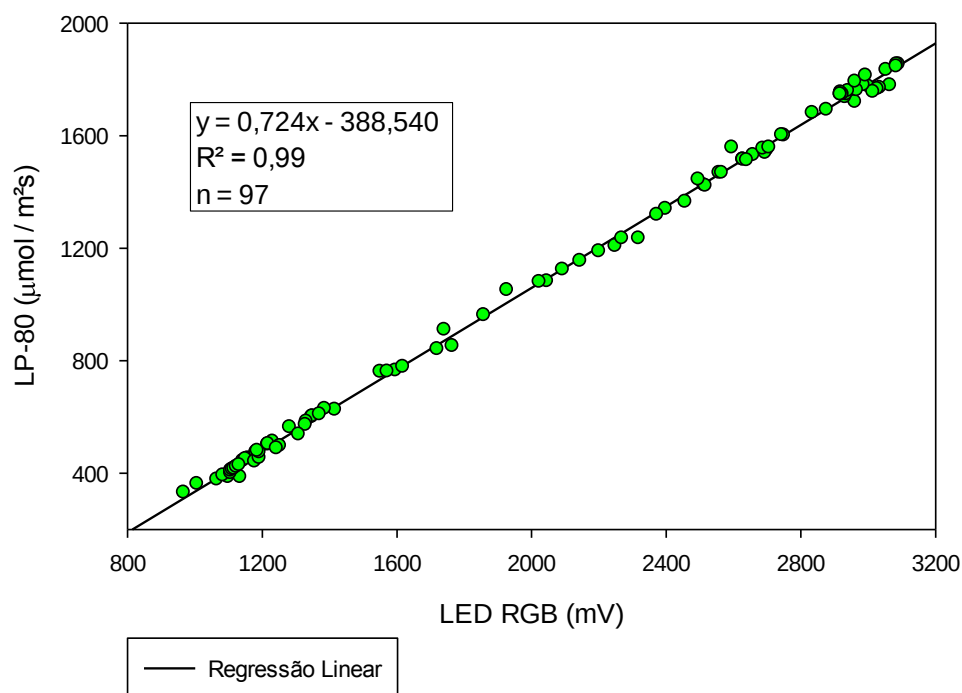


Figura 12. Relação entre a PAR medida pelo LED RGB do e-Quantum 85n e a PAR medida pelo sensor de incidência do LP-80.

4.2. PROTÓTIPO PARA OBTENÇÃO AUTOMÁTICA DO IAF

O sistema desenvolvido durante a execução deste trabalho é denominado e-Quantum 85n, refere-se a um dispositivo de detecção não destrutiva para obtenção do índice de área foliar (IAF) de uma única planta ou dossel de diferentes cultivos ou áreas reflorestadas baseado na medição da transmitância da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) de forma prática e rápida.

O sistema é constituído de três partes, uma unidade microprocessada, com algoritmo específico, de controle geral do dispositivo, cálculo do IAF e armazenamento dos dados, denominada unidade de controle; a sonda para detecção da RFA transmitida; e o sensor de incidência, unidade responsável pela detecção da RFA incidente e transmissão remota e instantânea das medidas.

4.2.1. Unidade de Controle

A unidade de controle (Figura 13) é construída para ser operada de forma muito semelhante a um telefone celular, possuindo formato e peso adequado, de modo a ser facilmente controlado por uma das mãos.



Figura 13. Aspecto final da montagem da unidade de controle.

A unidade de controle permite ao usuário controlar o sistema para obter e registrar as medidas da RFA e do IAF. Nessa unidade estão instalados um GPS e uma bússola digital como forma de orientação, os quais permitem registrar as coordenadas geográficas de cada medida, o dia e horário, além orientar o usuário sobre a direção, respectivamente.

Quando o dispositivo é inicializado, a primeira tela apresentada ao usuário é a tela de abertura (Figura 14), sendo possível acompanhar uma barra de status e uma descrição da inicialização das diferentes funcionalidades do dispositivo.

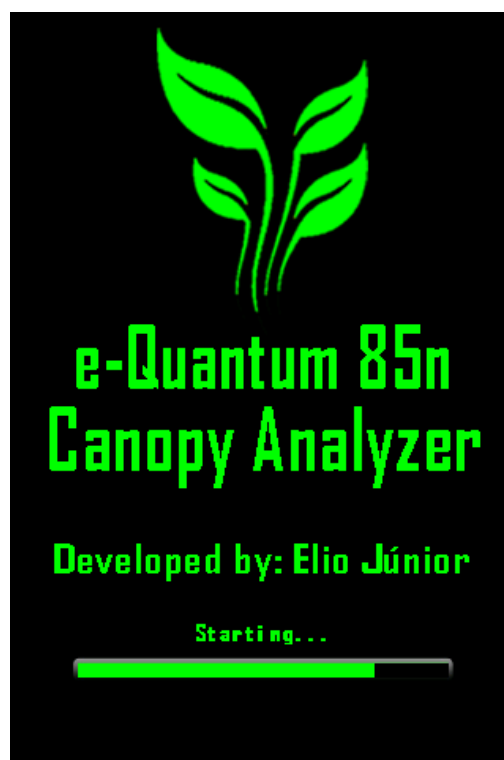


Figura 14. Tela de abertura ao ligar a unidade de controle.

O layout da tela principal (Figura 15) foi otimizado, as informações na tela são atualizadas a uma taxa de 1 Hz, sendo apresentado ao usuário o horário e a data, a tensão da bateria, alertas, RFA incidente, RFA transmitida, a média das leituras para RFA incidente e transmitido, o IAF, o ângulo zenital no momento da leitura, o número de leituras já efetuadas, a latitude e longitude e o valor em graus em relação ao norte. Na parte inferior ficam posicionados os botões para apagar a leitura atual, salvar a leitura atual, fazer uma nova medida e acessar as opções do equipamento.



Figura 15. Layout da tela principal da unidade de controle e descrição das informações apresentadas.

Através do menu de opções Figura 16 é possível definir o número de segmentos ativos da sonda de 1 até 8, a distribuição angular das folhas (X), o UTC offset, o valor da declinação magnética para a bússola digital, gerar um arquivo .csv das leituras armazenadas e acessar as informações a respeito do protótipo. Este menu só é acessível caso não haja uma leitura ativa, se houver a mesma tem de ser salva ou limpa para que o usuário possa definir as novas configurações.



Figura 16. Tela de configurações da unidade de controle.

O magnetômetro integrado ao projeto tem resposta semelhante a uma bússola convencional, para a utilização correta em campo é necessário informar ao sistema a declinação magnética para a coordenada geográfica e data da utilização. O GPS permite a obtenção das coordenadas geográficas, altitude em relação ao nível do mar, data e horário a 1 Hz ditando o ritmo de funcionamento do sistema, facilitando o uso do aparelho e possibilitando maior acurácia no cálculo do IAF. Os módulos de comunicação sem fio nRF24l01 com antena e amplificador de sinal possibilitaram o recebimento dos dados do sensor de incidência a distâncias menores e iguais a 200 m.

O novo sistema de alimentação possui 4400 mAh e possibilita a utilização do dispositivo por 3 horas de uso contínuo e demora 3 horas para atingir carga máxima. Por estar sendo empregado baterias recarregáveis, favorece a redução da produção de lixo eletrônico, e pôr as baterias já estarem integradas ao sistema, não há necessidade de abertura do equipamento.

Para que um novo registro seja salvo é necessário informar um label (descrição) para o mesmo, por padrão o sistema sugere NONE, mas o usuário pode identificar o novo registro empregando caracteres alfanuméricos, espaços e o caractere de underscore. Os diferentes registros são armazenados no cartão de memória em arquivos .lio individuais, para a fácil acesso e manuseio dos registros armazenados um arquivo .csv pode ser facilmente gerado através do menu de opções.

Os arquivos .csv gerados provenientes do e-Quantum 85n são salvos em colunas ordenados por:

1. ID do registro – Valor que representa o número de gravação do registro.
2. Tipo de registro – Caractere de registro do dado;
3. Data e horário – Data e horário local no momento da medida;
4. Anotação – A anotação é uma string de no máximo 8 caracteres que o usuário utiliza para identificar o registro;
5. Média da RFA incidente – Média de todas as medidas da RFA medida acima do dossel;
6. Média da RFA transmitida – Média de todas as medidas da RFA medida abaixo do dossel;
7. Tau – Tau é a razão entre a média da RFA incidente pela média da RFA transmitida;
8. Índice de área foliar (IAF) – Índice de Área Foliar é definido como sendo a medida da metade da área foliar por unidade de área do solo ocupado pelo cultivo;
9. Distribuição foliar – Distribuição foliar é a razão da área projetada de um elemento de cobertura médio em um plano horizontal para sua projeção em um plano vertical, este valor é fornecido pelo usuário.
10. Fração de radiação direta – Fração de radiação direta é a razão entre a radiação direta do feixe proveniente diretamente do sol e a radiação proveniente da difusão pelo ambiente;
11. Coeficiente de extinção – Descreve quanto da radiação incidente é absorvida ou refletida pelo dossel.
12. Segmentos Ativos – Número de segmentos ativos da sonda no momento da medida;
13. Ângulo zenital – Ângulo que o sol faz em relação ao zênite (ponto no céu diretamente acima do observador);
14. UTC offset – Diferença de horário entre o meridiano local e o de Greenwich;

15. Latitude – Latitude em graus decimais na posição da última medida;
16. Longitude – Longitude em graus decimais na posição da última medida;
17. Norte magnético – Diferença em graus em relação ao norte magnético terrestre na orientação da última medida;
18. Declinação magnética – Correção da diferença entre o norte magnético terrestre e o norte magnético geográfico informado pelo usuário.

O sistema desenvolvido é capaz de lidar com alguns erros possíveis de ocorrer, tais erros quando ocorrem geram um ícone de alerta vermelho na tela principal, ao clicar sobre o ícone, é apresentado ao usuário uma tela de log (Figura 17).

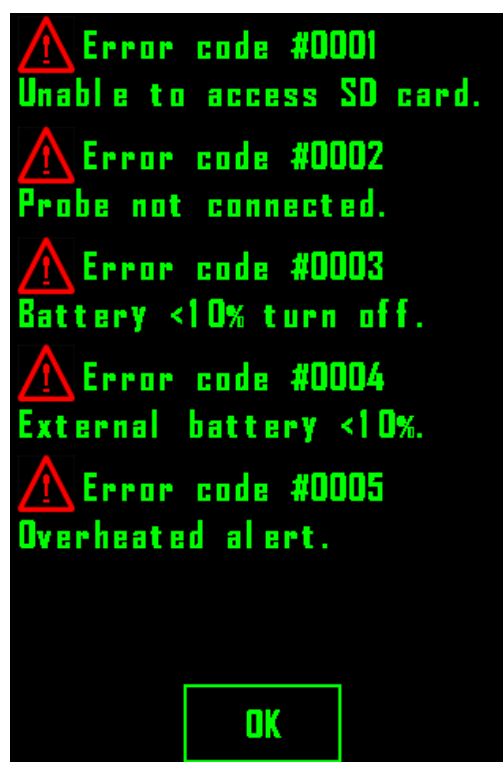


Figura 17. Relatório de erros e alertas apresentados ao usuário.

No Quadro 3 são apresentados a descrição dos erros e alertas, seus códigos, informações, possíveis soluções e implicações durante o uso:

Quadro 3. Relação de códigos de erros e alertas, causa provável, possível solução e implicações.

Erro código: #0001
Mensagem: Unable to access SD card.
Informação: Durante a rotina de inicialização o dispositivo foi incapaz de acessar o cartão SD.
Possível solução 01: Verifique se há um cartão SD inserido no slot, necessita reinicialização.
Possível solução 02: Verifique se o cartão é compatível com o sistema de arquivos FAT32.
Implicações: O dispositivo realiza medidas e permite o acesso a todas as funcionalidades, no entanto não será possível realizar o registro das medidas efetuadas.
Erro código: #0002
Mensagem: Probe not connected.
Informação: O dispositivo é incapaz de efetuar leituras da sonda para medidas de transmitância.
Possível solução 01: Verifique se a sonda está devidamente conectada.

Implicações: O dispositivo é incapaz de calcular o IAF, possibilita a visualização das coordenadas geográficas da bússola digital e do sensor de incidência caso esteja ativo e ao alcance.
Erro código: #0003
Mensagem: Battery <10% turn off. Informação: A bateria interna do dispositivo está em nível crítico, desligue-o imediatamente para evitar danos ao equipamento. Possível solução 01: Conecte ao carregador por 3h para uma recarga completa. Implicações: Caso o dispositivo não seja desligado, os baixos níveis de tensão da bateria interna causarão danos aos componentes e mal funcionamento do dispositivo, não apresentando medidas confiáveis.
Erro código: #0004
Mensagem: External battery <10%. Informação: A bateria interna do sensor de incidência está em nível crítico, desligue-o imediatamente para evitar danos ao equipamento. Possível solução 01: Conecte ao carregador por 3h para uma recarga completa. Implicações: Caso o sensor de incidência não seja desligado, os baixos níveis de tensão da bateria interna causarão danos aos componentes e mal funcionamento do dispositivo, não apresentando medidas confiáveis.
Erro código: #0005
Mensagem: Overheated alert. Informação: A temperatura interna do sensor de incidência está acima do limite máximo 75°C. Possível solução 01: Desligue o equipamento e mantenha em local fresco e abrigado da luz do sol por 20 minutos no mínimo. Implicações: Caso o sensor de incidência não seja resfriado, o superaquecimento causará danos aos componentes e mal funcionamento do dispositivo, não apresentando medidas confiáveis. Em casos mais graves pode ocasionar no vazamento ou até mesmo a explosão das baterias.

4.2.2. Sonda

A sonda do e-Quantum 85n possui em sua estrutura oitenta micro LEDs RGB divididos em oito segmentos de dez LEDs cada (Figura 18), com uma resolução espacial de 1,00 cm, mesma resolução espacial que o modelo comercial LP-80 e 10 vezes maior em relação ao protótipo alternativo e-Quantum 85.



Figura 18. Segmento da sonda constituído por LEDs RGB.

A sonda (Figura 19) foi desenvolvida com um design ergonômico que permite ser manuseada com apenas uma mão durante as medidas do IAF. Para orientação do usuário, um nível de bolha, permite o nivelamento da sonda durante

a tomada de medidas. As leituras podem ser realizadas ao pressionar o botão posicionado ao alcance do polegar.



Figura 19. Aspecto final da montagem da sonda.

4.2.3. Sensor de Incidência

Para a obtenção das medidas de incidência foram incorporados ao projeto cinco micro LEDs RGB ligados em paralelo (Figura 20), semelhantes aos utilizados na sonda. São empregados cinco micro LEDs RGB por se tratar de uma medida puntiforme, não requerendo a mesma resolução espacial empregada na construção da sonda, mas com as mesmas características de leitura.

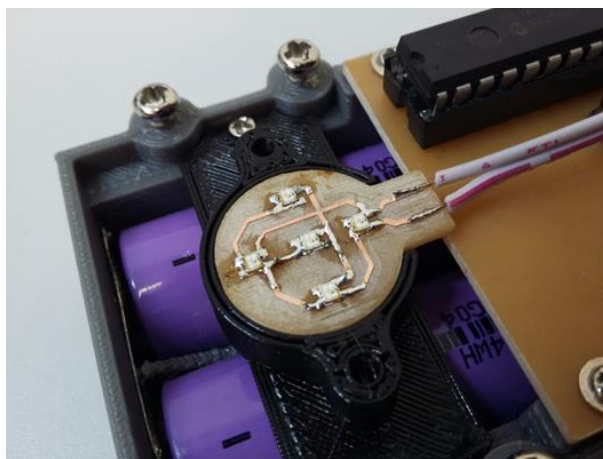


Figura 20. Disposição dos micro LEDs RGB do sensor de incidência.

A utilização do módulo de comunicação nRF24L01 com amplificador possibilitou a transmissão das medidas obtidas pelo sensor de incidência a uma distância de até 200 m, resultados superiores à primeira versão do e-Quantum que obteve um alcance de até 100 m.

O sensor de incidência (Figura 21) funciona de forma autônoma, enviando para unidade de controle as medidas de radiação PAR incidente, a tensão da bateria interna e a temperatura interna do módulo a uma taxa de 4 Hz, a tensão da bateria e a temperatura interna são enviadas para a unidade de controle a fim de evitar danos aos componentes internos do sensor de incidência.



Figura 21. Aspecto final da montagem do sensor de incidência.

4.3. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES DE MEDIÇÃO DA RFA

Uma regressão linear foi aplicada aos dados coletados após a prototipação de todo o sistema. A equação de calibração para a RFAi obtida com o sensor de incidência obteve o coeficiente de determinação de 0,99 e distribuição linear em relação ao sensor comercial de incidência do LP-80 (Figura 22).

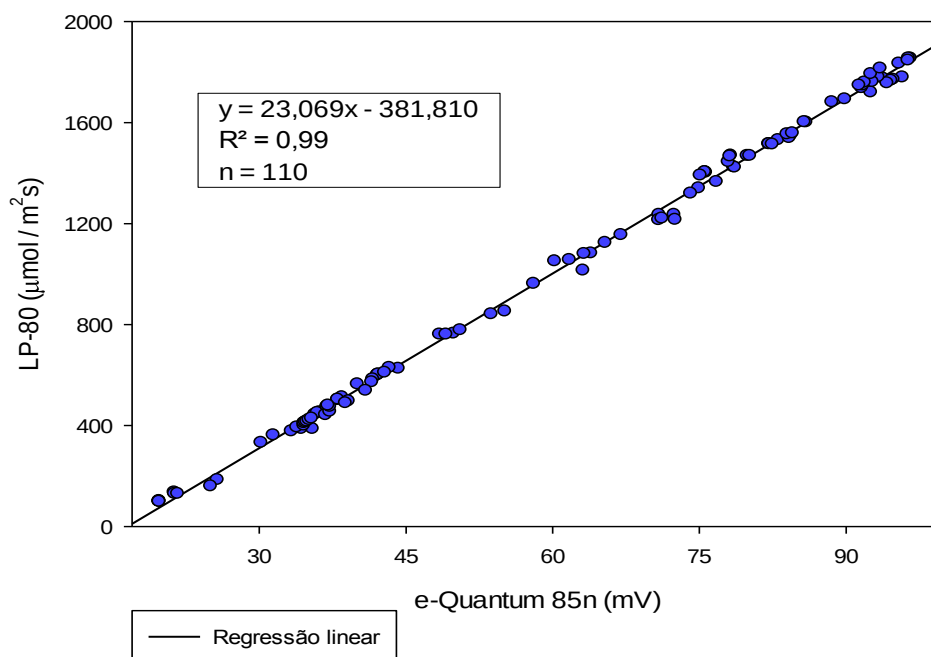


Figura 22. Dispersão e equação de calibração para a PAR_i medida pelo sensor de incidência do e-Quantum 85n e a PAR_i medida pelo sensor de incidência do LP-80.

A equação de calibração para a RFAt obtida com a sonda obteve o coeficiente de determinação de 0,99 e distribuição linear em relação a sonda do equipamento comercial LP-80 (Figura 23).

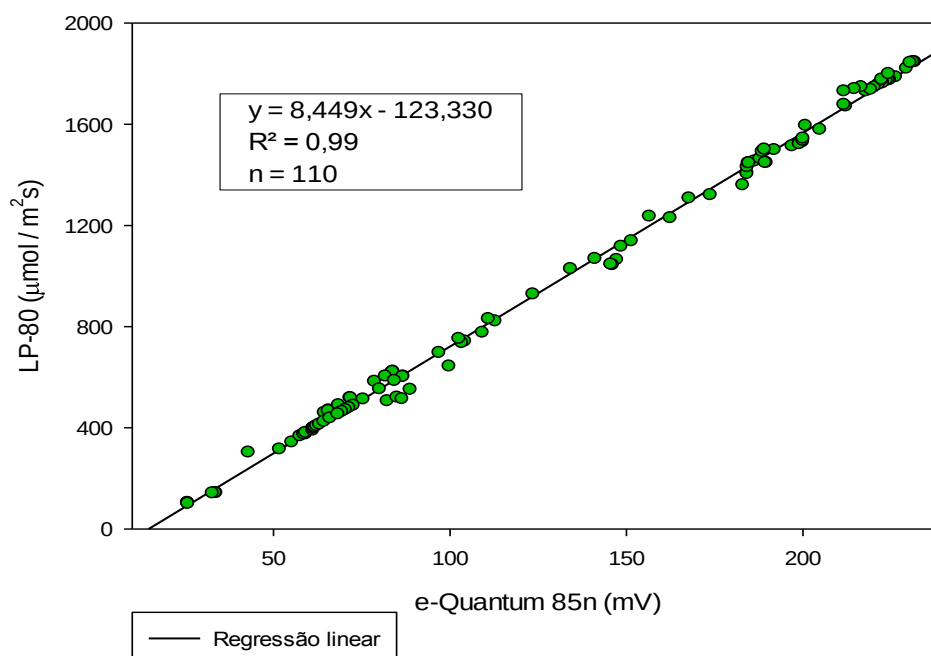


Figura 23. Dispersão e equação de calibração para a PAR_t medida pela sonda do e-Quantum 85n e a PAR_t medida pela sonda do LP-80.

Ambos os sensores apresentaram coeficientes de determinação 0,99 o que indica alta concordância entre os valores medidos através dos sensores, permitindo a obtenção de uma equação para conversão da média em mV para $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$.

4.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS PROTÓTIPOS E OS EQUIPAMENTOS COMERCIAIS

Como forma de quantificar os aprimoramentos desenvolvidos, o protótipo atualizado e-Quantum 85n foi comparado em relação a sua versão anterior e em relação a três modelos comerciais que possuem o mesmo princípio de funcionamento, com a finalidade de fazer um comparativo das funcionalidades e características de cada equipamento (Quadro 4).

Quadro 4. Comparativo das características dos equipamentos comerciais SunScan, LP-80, LAI-2200C e os protótipos e-Quantum 85 e e-Quantum 85n.

	SunScan	LP-80	LAI-2200C	e-Quantum 85	e-Quantum 85n
Unidade de controle					
Teclado	10 teclas	7 teclas	22 teclas	3 teclas	Não possui
Peso	0,490 Kg	1,55 Kg	0,454 Kg	0,335 Kg	0,335 Kg
Dimensões	191(c) x 80(l) x 35(a) mm	158(c) x 95(l) x 33(a) mm	209(c) x 98(l) x 35(a) mm	125(c) x 115(l) x 47(a) mm	195(c) x 88(l) x 100(a) mm
Memória	> 1.000.000 de leituras (interna ou uSD)	16.000 de leituras (interna)	1.500.000 de leituras (interna)	> 1.000.000 de leituras (uSD)	> 1.000.000 de leituras (uSD)
Alimentação	Bateria recarregável (12h de uso)	4 x baterias alcalinas AAA	4 x baterias alcalinas AA (40h de uso)	Bateria Alcalina 9V	Bateria recarregável (8h de uso)
GPS	Não possui	Não possui	Possui	Não possui	Possui
Bússola digital	Não possui	Não possui	Não possui	Não possui	Possui
Conexão	Não possui	Serial (RS232)	USB	Não possui	Bluetooth
Sonda					
Corpo da sonda	Conexão por cabo	Integrado a unidade de controle	Conexão por cabo	Conexão por cabo	Conexão por cabo
Número de sensores na sonda	64	80	5	8	80
Resolução espacial	15,6 mm	10 mm	-	100 mm	10 mm
Área ativa da sonda	1 m	0,865 m	-	0,85 m	0,90 m
Resposta espectral	400 – 700 nm (PAR)	400 – 700 nm (PAR)	320 – 490 nm	400 – 700 nm (PAR)	400 – 700 nm (PAR)
Tempo de leitura	120 ms	1 s	-	1 s	1 s
Peso	1,7 Kg	-	0,845 Kg	0,483 Kg	
Dimensões	1300(c) x 100(l) x 130(a) mm	865(c) x 19(l) x 10(a) mm	638(c) x 29(l) x 29(a) mm	1000(c) x 35(l) x 37(a) mm	1050(c) x 50(l) x 50(a) mm
Alimentação	4 x baterias alcalinas AA	Proveniente da unidade de controle	2 x baterias alcalinas AA (180h de uso)	Proveniente da unidade de controle	Proveniente da unidade de controle
Sensor de incidência					
Sensor de incidência	Possui	Possui	Não possui	Possui	Possui

Resposta espectral	400 – 700 nm (PAR)	400 – 700 nm (PAR)	-	400 – 700 nm (PAR)	400 – 700 nm (PAR)
Peso	0,635 Kg	-	-	0,210 Kg	0,195 Kg
Dimensões	120(c) x 122(l) x 95(a) mm	-	-	105(c) x 75(l) x 110(a) mm	148(c) x 58 (l) x 95(a) mm
Alimentação	4 x baterias alcalinas AA	Proveniente da unidade de controle	-	Bateria Alcalina 9V	Bateria recarregável (12h de uso)
Conexão	Sem fio (250 m)	Cabo (5 m)	-	Sem fio (100 m)	Sem fio (200 m)

4.4.1. Análise de custo em relação aos equipamentos comerciais

O custo de aquisição dos componentes para o desenvolvimento e construção do e-Quantum 85n é de R\$ 1.700,00, este custo não leva em consideração o custo de desenvolvimento, programação, prototipação, testes e calibração, valores esses que são utilizados para definir o preço do produto final. Fatores estes que devem ser considerados ao comparar os preços de equipamentos comerciais em relação a alternativas desenvolvidas por pesquisadores independentes.

4.5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SISTEMA DESENVOLVIDO

O objetivo do teste em campo foi investigar a precisão de detecção e estimativa do IAF feito pelo sistema alternativo desenvolvido. Por meio de uma análise comparativa com os resultados obtidos simultaneamente com a primeira versão desenvolvida e-Quantum 85, o equipamento comercial LP-80 e o sistema melhorado e-Quantum 85n, validando a precisão e verificando o potencial das tecnologias alternativas empregadas no desenvolvimento de soluções.

Na Figura 24 (a) é avaliado a dispersão das medidas da RFAi entre o sensor de incidência do equipamento comercial LP-80 (abscissas) e o sensor de incidência do protótipo alternativo e-Quantum 85n (ordenadas). Apresentando alta concordância ($d = 0,99$), uma correlação positiva ($r = 0,99$) e uma exatidão de 98% ($R^2 = 0,98$), com um erro absoluto médio (MAE) de $22,76 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ e um erro quadrático médio (RMSE) de $30,11 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$.

Na Figura 24 (b) é avaliado a dispersão das medidas da RFAi entre o sensor de incidência do equipamento comercial LP-80 (abscissas) e o sensor de incidência do protótipo alternativo e-Quantum 85n (ordenadas), registrado pela unidade de controle do e-Quantum 85. Apresentando alta concordância ($d = 0,99$), uma correlação positiva ($r = 0,99$) e uma exatidão de 98% ($R^2 = 0,98$), com um erro absoluto médio (MAE) de $29,52 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ e um erro quadrático médio (RMSE) de $44,80 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$.

Na Figura 24 (c) é avaliado a dispersão das medidas da RFAi entre o sensor de incidência do protótipo alternativo e-Quantum 85n (abscissas), registrado pelo principal do e-Quantum 85 e o sensor de incidência do protótipo alternativo e-Quantum 85n (ordenadas). Apresentando alta concordância ($d = 1,00$), uma correlação positiva ($r = 1,00$) e uma exatidão de 99% ($R^2 = 0,99$), com um erro absoluto médio (MAE) de $10,96 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ e um erro quadrático médio (RMSE) de $21,81 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$.

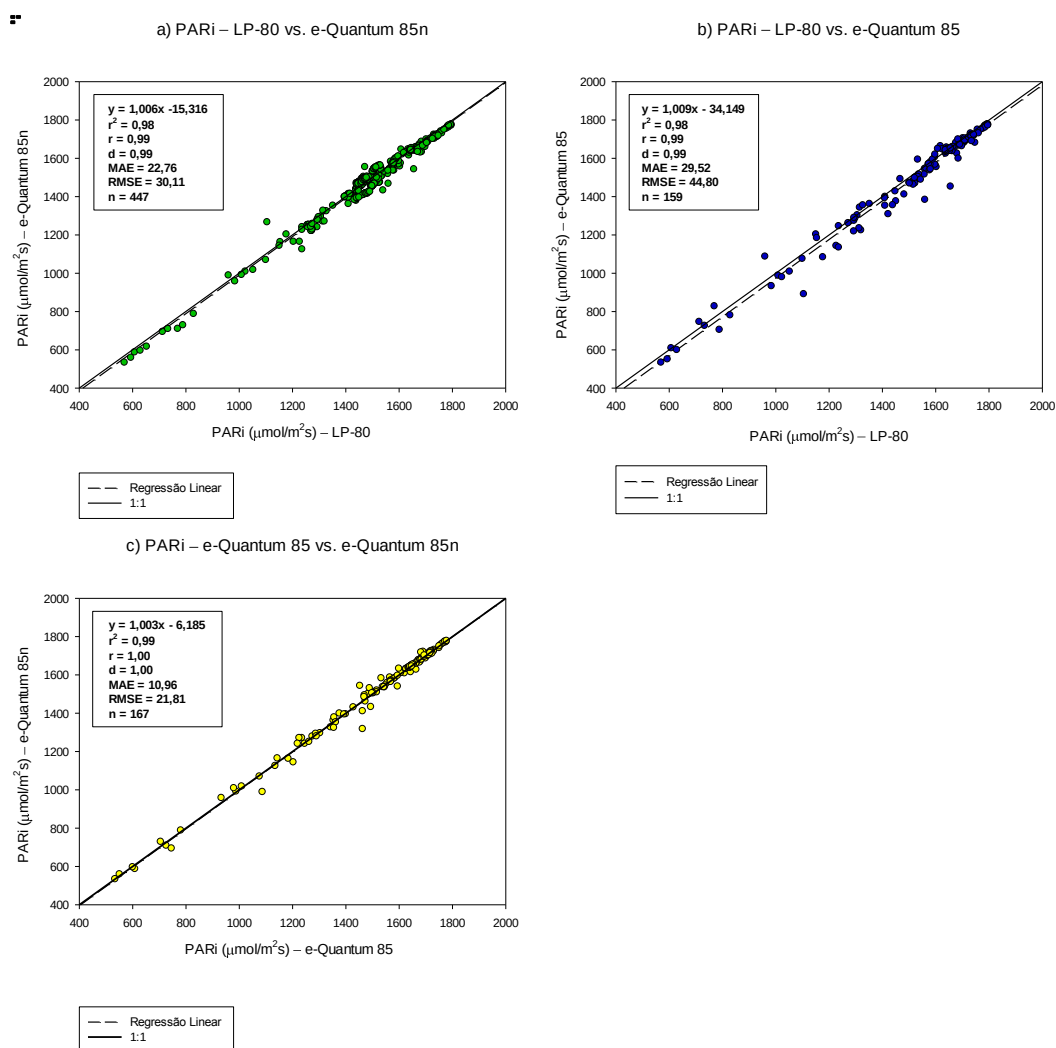


Figura 24. Comparação das medidas da PARi obtidas para validação in-situ a) LP-80 vs. e-Quantum 85n, b) LP-80 vs. e-Quantum 85, e c) e-Quantum 85 vs. e-Quantum 85n.

Na Figura 25 (a) é avaliado a dispersão das medidas da RFAi entre a sonda do equipamento comercial LP-80 (abscissas) e a sonda do protótipo alternativo e-Quantum 85n (ordenadas). Apresentando alta concordância ($d = 0,99$), uma correlação positiva ($r = 0,98$) e uma exatidão de 96% ($R^2 = 0,96$), com um erro absoluto médio (MAE) de $46,52 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ e um erro quadrático médio (RMSE) de $75,78 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$.

Na Figura 25 (b) é avaliado a dispersão das medidas da RFAi entre a sonda do equipamento comercial LP-80 (abscissas) e a sonda do protótipo alternativo

e-Quantum 85 (ordenadas). Apresentando alta concordância ($d = 0,99$), uma correlação positiva ($r = 0,98$) e uma exatidão de 95% ($R^2 = 0,95$), com um erro absoluto médio (MAE) de $68,87 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ e um erro quadrático médio (RMSE) de $88,82 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$.

Na Figura 25 (c) é avaliado a dispersão das medidas da PARt entre a sonda do protótipo alternativo e-Quantum 85 (abscissas) e a sonda do protótipo alternativo e-Quantum 85n (ordenadas). Apresentando alta concordância ($d = 0,99$), uma correlação positiva ($r = 0,98$) e uma exatidão de 95% ($R^2 = 0,95$), com um erro absoluto médio (MAE) de $71,26 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ e um erro quadrático médio (RMSE) de $94,55 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$.

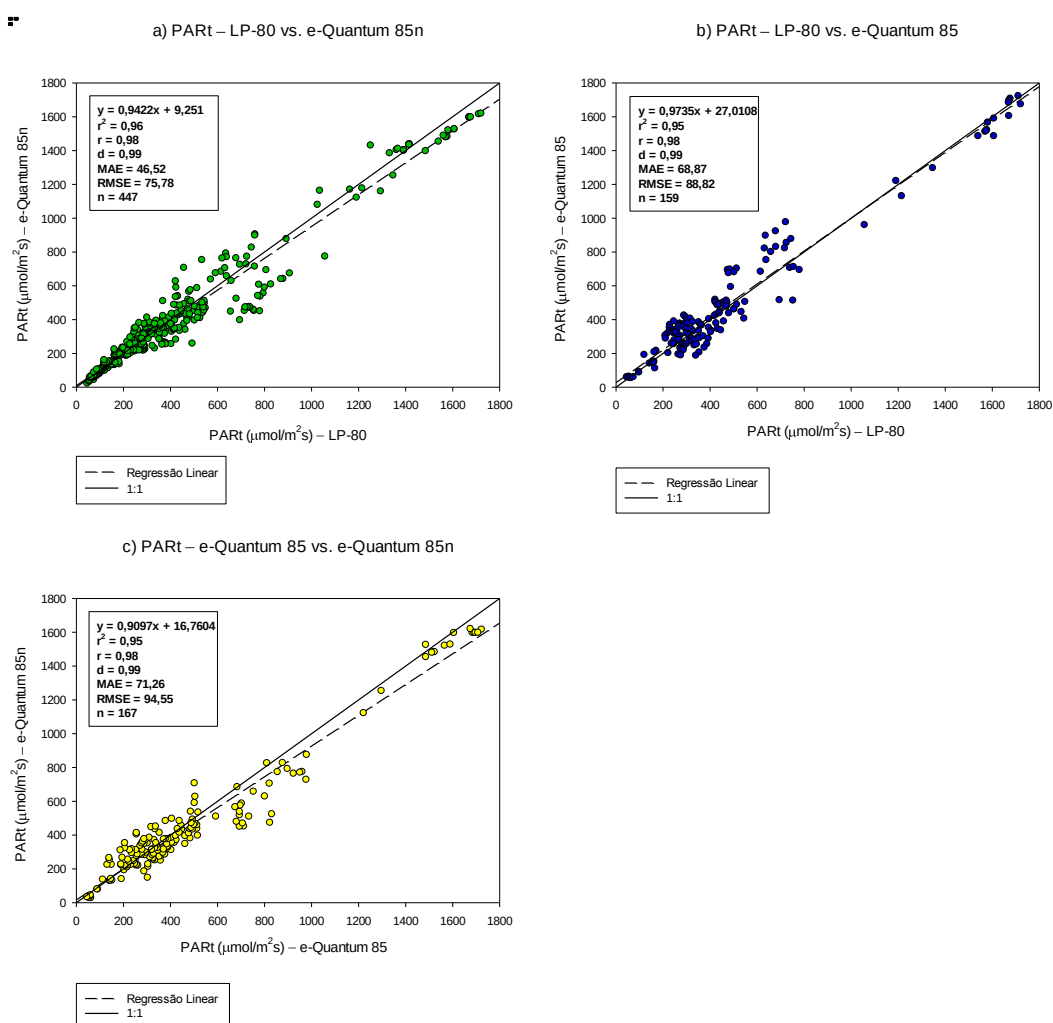


Figura 25. Comparação das medidas da PARt obtidas para validação in-situ a) LP-80 vs. e-Quantum 85n, b) LP-80 vs. e-Quantum 85, e c) e-Quantum 85 vs. e-Quantum 85n.

Na Figura 26 (a) é avaliado a dispersão das estimativas do IAF obtidas com o equipamento comercial LP-80 (abscissas) e com o protótipo alternativo e-Quantum 85n (ordenadas). Apresentando alta concordância ($d = 0,99$), uma correlação positiva ($r = 0,98$) e uma exatidão de 96% ($R^2 = 0,96$), com um erro

absoluto médio (MAE) de $0,20 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e um erro quadrático médio (RMSE) de $0,27 \text{ m}^2/\text{m}^2$.

Na Figura 26 (b) é avaliado a dispersão das estimativas do IAF obtidas com o equipamento comercial LP-80 (abscissas) e com o protótipo alternativo e-Quantum 85 (ordenadas). Apresentando alta concordância ($d = 0,98$), uma correlação positiva ($r = 0,96$) e uma exatidão de 93% ($R^2 = 0,93$), com um erro absoluto médio (MAE) de $0,29 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e um erro quadrático médio (RMSE) de $0,37 \text{ m}^2/\text{m}^2$.

Na Figura 26 (c) é avaliado a dispersão das estimativas do IAF obtidas com o protótipo alternativo e-Quantum 85 (abscissas) e com o protótipo alternativo e-Quantum 85n (ordenadas). Apresentando alta concordância ($d = 0,98$), uma correlação positiva ($r = 0,95$) e uma exatidão de 91% ($R^2 = 0,91$), com um erro absoluto médio (MAE) de $0,29 \text{ m}^2/\text{m}^2$ e um erro quadrático médio (RMSE) de $0,39 \text{ m}^2/\text{m}^2$.

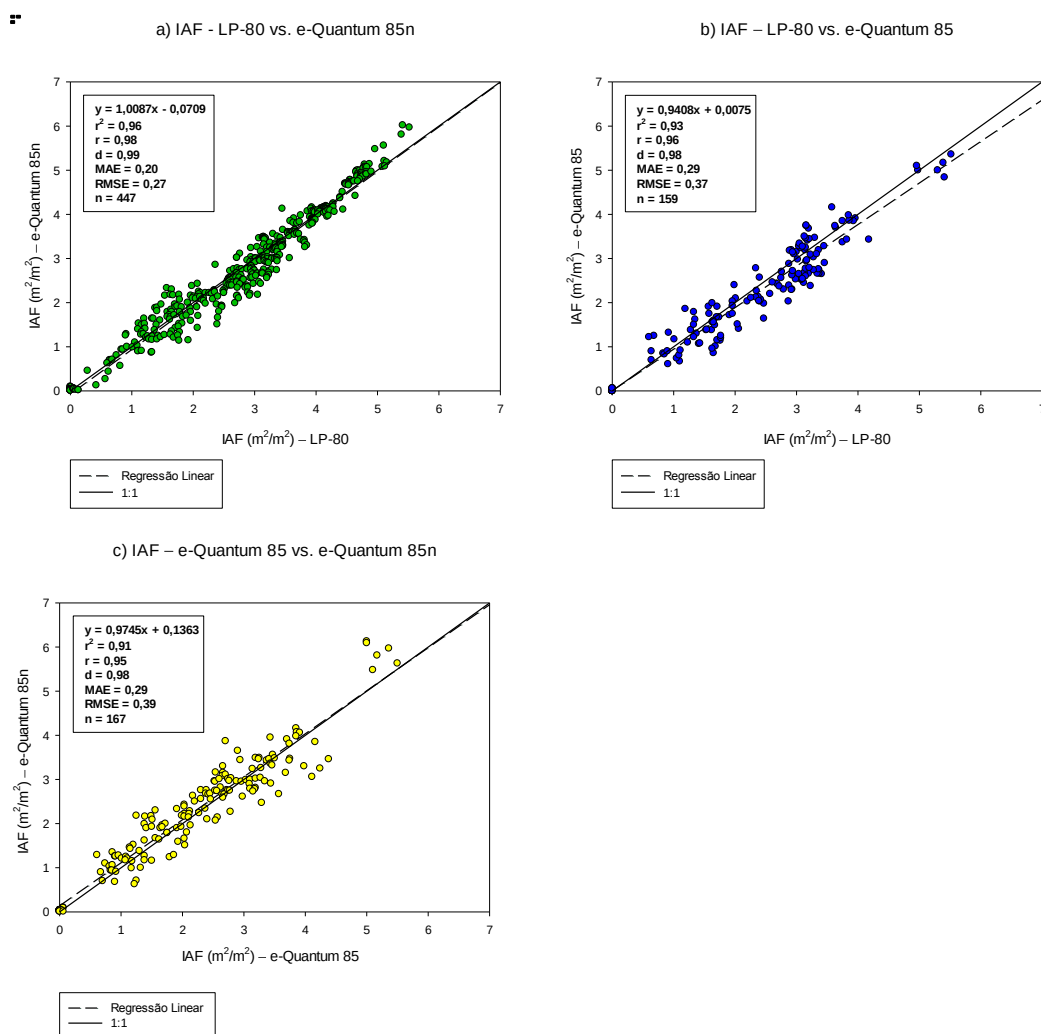


Figura 26. Comparação das estimativas de IAF obtidas para validação in-situ a) LP-80 vs. e-Quantum 85n, b) LP-80 vs. e-Quantum 85, e c) e-Quantum 85 vs. e-Quantum 85n.

Ao se avaliar os trabalhos relacionados na Tabela 2 é possível notar uma predominância de abordagens que utilizam fotografias digitais. Uma causa provável para um maior emprego de fotografias digitais na obtenção do IAF se dá pela facilidade de aquisição dos componentes necessários a construção do projeto e pela simplicidade dos dados obtidos. A desvantagem desse método, é a necessidade do emprego de hardware com maior poder de processamento na análise das imagens geradas.

Para os valores de R^2 é possível notar uma ótima relação entre as medidas, onde o melhor valor observado foi para o trabalho de QU et al., 2016, onde foi comparado o LAISmart (alternativo) em relação ao LAI-2000 (comercial) para uma espécie arbórea perene de folhas estreitas, obtendo um R^2 de 0,99 o que representa que 99% das medidas do LAISmart correspondem ao que foi medido com o LAI-2000. Ao avaliar as medidas do e-Quantum 85n (alternativo) em relação ao LP-80 (comercial) para espécies arbóreas, foi encontrado um R^2 de 0,98 o que representa que 98% das medidas do e-Quantum 85n correspondem ao que foi medido com o LP-80.

Para os valores do erro quadrático médio (RMSE) o menor valor encontrado foi de 0,05 (RYU et al., 2012), entretanto a baixa amostragem não favorece o ótimo resultado obtido. O trabalho de QU et al., 2016 obteve o erro mais baixo com um valor de 0,26 comparado o LAISmart (alternativo) em relação ao LAI-2000 (comercial) para estimativas de IAF de uma espécie arbórea perene de folhas estreitas. O segundo melhor resultado obtido foi entre o protótipo e-Quantum 85n comparado em relação ao LP-80 obtendo um erro de 0,27. O terceiro menor valor de RMSE encontrado foi para o trabalho de BAUER et al, 2016 onde foram feitas estimativas de IAF no milho empregando o TelosB e comparando com LAI-2000.

Para o erro absoluto médio (MAE) o menor valor encontrado foi de 0,34 para o trabalho de QU et al., 2017 onde foi avaliado as estimativas de IAF para uma espécie arbórea (Larch) comparando LAISmart em relação ao equipamento comercial LAI-2000. Ambos os protótipos e-Quantum 85n e e-Quantum 85 obtiveram erros absolutos médios menores com os valores de 0,20 e 0,29 respectivamente em relação as estimativas de IAF obtidas com o LP-80.

Tabela 2. Desempenho de abordagens relacionadas a estimativa do IAF, estudo, abordagem, tipo de vegetação, equipamento de referência, equipamento alternativo, número de medidas, coeficiente de determinação, erro quadrático médio, erro absoluto médio, índice (d) de Willmott, inclinação e interceptação da reta.

Trabalho	Abordagem	Tipo de vegetação	Referência	Alternativo	n	R ²	RMSE	MAE	d	Inclinação	Interceptação
	Rede de sensores sem fio	Arbórea	LP-80	e-Quantum 85n	447	0,98	0,27	0,20	0,99	1,009	-0,071
	Rede de sensores sem fio	Arbórea	LP-80	e-Quantum 85	159	0,96	0,37	0,29	0,98	0,941	0,008
	Rede de sensores sem fio	Arbórea	e-Quantum 85	e-Quantum 85n	167	0,91	0,39	0,29	0,98	0,975	0,136
SANDHU et al., 2019	Fotografia Digital (NADIR)	Trigo	LAI-2000	GreenCrop Tracker (software)	100	0,9				0,901	0,021
QU et al., 2017	Fotografia Digital (ZENITH)	Arbórea (Larch)	LAI-2000	LAI Smart	50	0,96	0,43	0,34			
QU et al., 2017	Fotografia Digital (Esférica)	Arbórea (Larch)	LAI-2000	PocktLAI	40	0,95	0,84	0,69			
BAUER et al, 2016	Rede de sensores sem fio	Milho	LAI-2000	TelosB	230	0,88	0,28			1,082	0,016
MORA et al., 2016	Fotografia Digital (ZENITH)	Arbórea (Bing)	Destrutivo	LAIeo	10	0,85	1,35		0,13		
MORA et al., 2016	Fotografia Digital (ZENITH)	Arbórea (Bing)	Destrutivo	LAIei	10	0,86	0,45		0,10		
MORA et al., 2016	Fotografia Digital (ZENITH)	Arbórea (Sweetheart)	Destrutivo	LAIeo	10	0,87	0,46		0,41		
MORA et al., 2016	Fotografia Digital (ZENITH)	Arbórea (Sweetheart)	Destrutivo	LAIei	10	0,86	0,43		0,44		
QU et al., 2016	Fotografia Digital (ZENITH e NADIR)	Misto	LAI-2000	LAI Smart	114	0,97	0,45			0,920	
QU et al., 2016	Fotografia Digital (ZENITH)	Arbórea decídua de folhas largas + arbórea decídua de folhas estreitas	LAI-2000	LAI Smart	19	0,96	0,51			0,870	
QU et al., 2016	Fotografia Digital (ZENITH)	Arbórea perene de folhas estreitas	LAI-2000	LAI Smart	25	0,99	0,26			0,950	
QU et al., 2016	Fotografia Digital (NADIR)	Cultura de folha larga	LAI-2000	LAI Smart	70	0,96	0,48			0,920	
FRANCONE et al., 2014	Fotografia Digital (Esférica)	Milho	LP-80	PocktLAI	22	0,92	0,49			0,770	0,660
FRANCONE et al., 2014	Fotografia Digital (Esférica)	Cana-do-reino	LP-80	PocktLAI	24	0,88	0,96			0,700	1,020
FRANCONE et al., 2014	Fotografia Digital (Esférica)	Prado	LP-80	PocktLAI	21	0,86	0,41			0,960	0,130
CONFALONIERI et al., 2013	Fotografia Digital (Esférica)	Arroz	Destrutivo	PocktLAI (App-G)	6	0,72	1,04				
CONFALONIERI et al., 2013	Fotografia Digital (Esférica)	Arroz	Destrutivo	PocktLAI (App-L)	6	0,97	0,37				
CONFALONIERI et al., 2013	Rede de sensores	Arroz	Destrutivo	LP-80	6	0,92	0,73				
CONFALONIERI et al., 2013	Rede de sensores	Arroz	Destrutivo	LAI-2000-5R	6	0,84	1,07				
CONFALONIERI et al., 2013	Rede de sensores	Arroz	Destrutivo	LAI-2000-4R	6		0,90				
RYU et al., 2012	Fotografia Digital (Esférica)	Arbórea	LAI-2000	Fotografia Esférica	7	0,94	0,05				

Em contraste com as abordagens alternativas relacionadas listadas na Tabela 2, o e-Quantum 85n obteve desempenho semelhante com a vantagem de ser simples, eficaz e econômico. Em comparação com as abordagens que utilizam fotografias digitas, nenhum processamento secundário é necessário, o que exige o emprego de outros dispositivos. Em comparação as abordagens que utilizam uma matriz personalizada de sensores, possui a vantagem de empregar apenas duas unidades na obtenção das medidas necessárias ao cálculo do IAF.

Ao se avaliar as funcionalidades das abordagens listadas na Tabela 2, o e-Quantum 85n tem a vantagem de possuir em um único sistema os recursos para obtenção automatizada e simplificada do IAF, contando com GPS e magnetômetro para orientação do usuário e obtenção da data, horário e coordenadas geográficas, dados necessários ao cálculo do IAF; com uma unidade para obtenção da mediada de radiação incidente com comunicação sem fio, o que flexibiliza a tomada das medidas.

5. CONCLUSÕES

Os micro LEDs RGB foram avaliados quanto a possibilidade de serem utilizados como elemento sensores alternativos na medição da RFA. As medidas obtidas com os LEDs RGB obtiveram um coeficiente de determinação de 99% ($R^2 = 0,99$) o que representa uma alta concordância entre as medidas. As características de funcionamento são semelhantes aos sensores comerciais, podendo desta forma os LEDs serem utilizados como substitutos aos sensores comerciais.

O GPS permitiu que o sistema funcionasse de forma simplificada em relação ao modelo comercial, não sendo necessário a verificação se a hora, a data e as coordenadas geográficas estão configuradas corretamente. Já em relação magnetômetro, este possibilita uma melhor orientação no momento das medidas, possibilitando alinhar corretamente a sonda no sentido norte-sul durante as medidas. A utilização do nRF24L01 com aplicador de sinal possibilitou um acréscimo na distância entre a unidade de controle e o sensor de incidência, dobrando o alcance, chegando até 200 m.

O módulo bluetooth permitiu maior agilidade na transferência dos dados da unidade de controle para um computador ou outro dispositivo compatível. As baterias de Li-Ion permitiram a utilização do dispositivo durante dias, não sendo necessário que o dispositivo fosse aberto para substituições, o que contribui na redução de lixo eletrônico. Já com relação a tela TFT empregada, seu desempenho atendeu as necessidades do projeto, permitindo a exibição das informações de forma clara e organizada e a interação do usuário através de uma interface que já é amplamente difundida, empregando telas sensíveis ao toque.

O sistema desenvolvido e prototipado possibilita a obtenção do Índice de Área Foliar de forma simples e automatizada, possibilitando a obtenção de uma nova medida com o pressionar de um botão, e demandando apenas uma única pessoa. Outro ponto a se destacar é que o sistema desenvolvido atende aos critérios de patenteabilidade de Modelo de Utilidade, sendo estes aplicação industrial, novidade envolvendo ato inventivo, e resultar em melhoria no seu uso ou em sua fabricação.

No geral, o dispositivo desenvolvido atingiu seu objetivo, um equipamento portátil, de uso simplificado, apresentando ao usuário as medidas e o valor do IAF calculado instantaneamente com o pressionar de um único botão.

5.1. CONTRIBUIÇÕES

As contribuições geradas no desenvolvimento deste trabalho foram:

- A análise da utilização do LED RGB como alternativa aos sensores comerciais na medição da radiação RFA;
- O desenvolvimento de processos de prototipação;
- O fomento no desenvolvimento de trabalhos de instrumentação.

6. REFERÊNCIAS

ACHARYA, Y. B.; JAYARAMAN, A.; RAMACHANDRAN, S.; SUBBARAYA, B. H. Compact light-emitting-diode sun photometer for atmospheric optical depth measurements. **Applied optics**, v. 34, n. 7, p. 1209-1214, 1995.

ARIZA-CARRICONDO, C.; MAURO, F. D.; BEECK, M. O.; ROLAND, M.; GIELEN, B.; VITALE, D.; CEULEMANS, R.; PAPALE, D. A comparison of different methods for assessing leaf area index in four canopy types. **Central European Forestry Journal**, v. 65, n. 2, p. 67-80, 2019.

BAUER, J.; SIEGMANN, B.; JARMER, T.; ASCHENBRUCK, N. On the potential of Wireless Sensor Networks for the in-situ assessment of crop leaf area index. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 128, p. 149-159, 2016.

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.

CAVALIERE, A.; CAROTENUTO, F.; DI GENNARO, F.; GIOLI, B.; GUALTIERI, G.; MARTELLI, F.; MATESE, A.; TOSCANO P.; VAGNOLI C.; ZALDEI, A. Development of low-cost air quality stations for next generation monitoring networks: Calibration and validation of PM2. 5 and PM10 sensors. **Sensors**, v. 18, n. 9, p. 2843, 2018.

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.

CONFALONIERI, R.; FOI, M.; CASA, R.; AQUARO, S.; TONA, E.; PETERLE, M.; BOLDINI, A.; DE CARLI, G.; FERRARI, A.; FINOTTO, G.; GUARNERI, T.; MANZONI, V.; MOVEDI, E.; NISOLI, A.; PALEARI, L.; RADICI, I.; SUARDI, M.; VERONESI, D.; BREGAGLIO, S.; CAPPELLI, G.; CHIODINI, M. E.; DOMINONI, P.; FRANCONI, C.; FRASSO, N.; STELLA, T.; ACUTIS, M. Development of an app for estimating leaf area index using a smartphone. Trueness and precision determination and comparison with other indirect methods. **Computers and electronics in agriculture**, v. 96, p. 67-74, 2013.

FANG, H.; BARET, F.; PLUMMER, S.; SCHAEPMAN-STRUB, G. An overview of global leaf area index (LAI): Methods, products, validation, and applications. **Reviews of Geophysics**, v. 57, n. 3, p. 739-799, 2019.

FANG, H.; YE, Y.; LIU, W.; WEI, S.; MA, L. Continuous estimation of canopy leaf area index (LAI) and clumping index over broadleaf crop fields: An investigation of the PASTIS-57 instrument and smartphone applications. **Agricultural and forest meteorology**, v. 253, p. 48-61, 2018.

FISHER, D. K.; GOULD, P. J. Open-source hardware is a low-cost alternative for scientific instrumentation and research. **Modern instrumentation**, v. 1, n. 02, p. 8, 2012.

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.

FRANCONE, C.; PAGANI, V.; FOI, M.; CAPPELLI, G.; CONFALONIERI, R. Comparison of leaf area index estimates by ceptometer and PocketLAI smart app in canopies with different structures. **Field Crops Research**, v. 155, p. 38-41, 2014.

HOFF, C.; RAMBAL, S. An examination of the interaction between climate, soil and leaf area index in a *Quercus ilex* ecosystem. **Annals of Forest Science**, v. 60, n. 2, p. 153-161, 2003.

JIAO, W.; HAGLER, G.; WILLIAMS, R.; SHARPE, R.; BROWN, R.; GARVER, D.; JUDGE, R.; CAUDILL, M.; RICKARD, J.; DAVIS, M.; WEINSTOCK, L.; ZIMMER-DAUPHINEE, S.; WEINSTOCK, L. Community Air Sensor Network (CAIRSENSE) project: evaluation of low-cost sensor performance in a suburban environment in the southeastern United States. **Atmospheric Measurement Techniques**, v. 9, n. 11, p. 5281-5292, 2016.

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.

KIRBY, J.; CHAPMAN, L.; CHAPMAN, V. VICTORIA. Assessing the Raspberry Pi as a low-cost alternative for acquisition of near infrared hemispherical digital imagery. **Agricultural and forest meteorology**, v. 259, p. 232-239, 2018.

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.

MAHANTA, D. S.; DAS, M.; TALUKDAR, J.; DEY, D.; BANERJEE, S. Design and development of a LED based Sun-photometer for monitoring atmospheric fluctuations. **Bulletin of Physics Projects**, v. 2, p. 19-25, 2017.

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. (1977). Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences**, v. 281, n. 980, p. 277-294, 1977.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain. **Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences**, v. 281, n. 980, p. 277-294, 1977.

MONTEITH, J. L. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. **Journal of applied ecology**, v. 9, n. 3, p. 747-766, 1972.

MORA, M.; AVILA, F.; CARRASCO-BENAVIDES, M.; MALDONADO, G.; OLGUÍN-CÁCERES, J.; FUENTES, S. Automated computation of leaf area index from fruit trees using improved image processing algorithms applied to canopy

cover digital photographs. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 123, p. 195-202, 2016.

MYNENI, R. B.; RAMAKRISHNA, R.; NEMANI, 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.

NAGATA, T.; SUZUKI, K. Building a Low-cost Standalone Electrochemical Instrument Based on a Credit Card-sized Computer. **Analytical Sciences**, v. 34, n. 10, p. 1213-1216, 2018.

NJUGUNA, C. W.; KAMIRI, H. W.; OKALEBO, J. R.; NGETICH, W.; KEBENEY, S. Evaluating the effect of plant population densities and nitrogen application on the leaf area index of maize in a reclaimed wetland in Kenya. **Acta Universitatis Sapientiae, Agriculture and Environment**, v. 8, n. 1, p. 139-148, 2016.

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.

NORMAN, J.M. Modeling the complete crop canopy. in Modification of the Aerial Environment of Crops (eds B.J. Barfield and J. Gerber), **American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, MI, p. 249-277, 1979.

OSROOSH, Y.; KHOT, L. R.; PETERS, R. T. Economical thermal-RGB imaging system for monitoring agricultural crops. **Computers and electronics in agriculture**, v. 147, p. 34-43, 2018.

PEARSE, G. D.; WATT, M. S.; MORGENROTH, J. Comparison of optical LAI measurements under diffuse and clear skies after correcting for scattered radiation. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 221, p. 61-70, 2016.

POBLETE-ECHEVERRÍA, C.; FUENTES, S.; ORTEGA-FARIAS, S.; GONZALEZ-TALICE, J.; YURI, J. A. Digital cover photography for estimating leaf area index (LAI) in apple trees using a variable light extinction coefficient. **Sensors**, v. 15, n. 2, p. 2860-2872, 2015.

POKOVAI, K.; FODOR, N. Adjusting ceptometer data to improve leaf area index measurements. **Agronomy**, v. 9, n. 12, p. 866, 2019.

QU, Y., WANG, J., SONG, J., & WANG, J. Potential and limits of retrieving conifer leaf area index using smartphone-based method. **Forests**, v. 8, n. 6, p. 217, 2017.

QU, Y.; HAN, W.; FU, L.; LI, C.; SONG, J.; ZHOU, H.; BO, Y.; WANG, J. LAI_{Net}—a wireless sensor network for coniferous forest leaf area index measurement: design, algorithm and validation. **Computers and electronics in agriculture**, v. 108, p. 200-208, 2014.

QU, Y.; MENG, J.; WAN, H.; LI, Y. Preliminary study on integrated wireless smart terminals for leaf area index measurement. **Computers and electronics in agriculture**, v. 129, p. 56-65, 2016.

RYU, Y.; NILSON, T.; KOBAYASHI, H.; SONNENTAG, O.; LAW, B. E.; BALDOCCHI, D. D. On the correct estimation of effective leaf area index: Does it reveal information on clumping effects? **Agricultural and Forest Meteorology**, 150:463–472, 2010.

RYU, Y.; VERFAILLIE, J.; MACFARLANE, C.; KOBAYASHI, H.; SONNENTAG, O.; VARGAS, R.; MA, S.; BALDOCCHI, D. D. Continuous observation of tree leaf area index at ecosystem scale using upward-pointing digital cameras. **Remote Sensing of Environment**, v. 126, p. 116-125, 2012.

SANDHU, S. S.; KAUR, P.; SINGH, J.; NIGAM, R.; GILL, K. K. Evaluation of greencrop tracker for the estimation of leaf area index in wheat using digital photography. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, India Section B: Biological Sciences, v. 89, n. 2, p. 615-621. 2019.

SMITH, P. J.; NEEDHAM, J. Magnetic declination in mediaeval China. **Nature**, v. 214, n. 5094, p. 1213-1214, 1967.

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.

TAN, P. Y.; ISMAIL, M. R. B. Photosynthetically active radiation and comparison of methods for its estimation in equatorial Singapore. **Theoretical and applied climatology**, v. 123, n. 3-4, p. 873-883, 2015.

WEISS, M.; BARET, F.; SMITH, G. J.; JONCKHEERE, I.; COPPIN, P. Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination: Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. **Agricultural and forest meteorology**, v. 121, n. 1-2, p. 37-53, 2004.

WELLES, J. M.; COHEN, S. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. **Journal of Experimental Botany**, v. 47, n. 9, p. 1335-1342, 1996.

WENG, W. C.; LIN, Y. C. Development of Detection Equipment for a Polymerase Chain Reaction with a Loop-Mediated Isothermal Amplification Reaction. **Journal of Nanomaterials**, v. 2021, 2021.

WHITE, W. A.; ALSINA, M. M.; NIETO, H.; MCKEE, L. G.; GAO, F.; KUSTAS, W. P. Determining a robust indirect measurement of leaf area index in California vineyards for validating remote sensing-based retrievals. **Irrigation Science**, v. 37, n. 3, p. 269-280, 2018.

WILHELM, W. W.; RUWE, K.; SCHLEMMER, M. R. Comparison of three leaf area index meters in a corn canopy. **Crop Science**, v. 40, n. 4, p. 1179-1183, 2000.

WIT, C. T. Photosynthesis of leaf canopies. **Pudoc**, 1965.

XIE, Q.; DASH, J.; HUANG, W.; PENG, D.; QIN, Q.; MORTIMER, H.; CASA, R.; PIGNATTI, S.; LANEVE, G.; PASCUCCHI, S.; DONG, Y.; YE, H. Vegetation indices combining the red and red-edge spectral information for leaf area index

retrieval. **IEEE Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing**. v. 11, n. 5, p. 1482-1493, 2018.

YAMORI, W. Photosynthesis and respiration. In: **Plant factory**. Academic Press. p. 141-150, 2016.