

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP**

FACULDADE DE FILOSOFIA, CIÊNCIAS E LETRAS DE RIBEIRÃO PRETO – FFCLRP

Departamento de Física

## **RELATÓRIO PARCIAL**

---

**Desenvolvimento e calibração de um sistema portátil  
para espectroradiometria solar**

---

Bolsista: Eduardo Lopes Dias

Orientador: Prof. Dr. Luciano Bachmann

Processo N. 2019/06376-9

Ribeirão Preto

2019

## **1. Resumo do projeto**

Com o desenvolvimento de pesquisas acerca dos efeitos da radiação solar em sistemas biológicos, e tecnologias que buscam aplicá-la para fins industriais e energéticos, uma ampla gama de aplicações para a irradiância espectral solar foi encontrada. No entanto, a medição e o acompanhamento ao longo do tempo deste espectro apresentam algumas dificuldades subjacentes que vão além simplesmente da calibração do espectrômetro, tais como a manutenção de uma temperatura constante ao redor, a aferição das propriedades ópticas do sistema e um pós-processamento que assegure uma alta proporção sinal-ruído e faça correções com base nas características ópticas dos instrumentos utilizados [1]. Este trabalho consiste no desenvolvimento de um aparelho calibrado, portátil e de fácil uso que meça periódica e automaticamente a irradiância espectral solar, permitindo com que profissionais de pouca familiaridade com radio-espectroscopia possam obter esta medida e aplicá-la para seus respectivos fins.

## **2. Objetivos**

Conforme o cronograma proposto pelo projeto de pesquisa, os objetivos do primeiro semestre são:

- Estudo dos principais artigos relacionados à óptica de espectralradiômetros
- Montagem da óptica e testes de calibração e medidas da irradiância espectral
- Avaliação da qualidade óptica do sistema
- Montagem da caixa térmica com elementos Peltier
- Avaliação da estabilidade térmica do sistema sob diferentes intempéries
- Desenvolvimento computacional para controle do espectrômetro

Este relatório discorrerá acerca do cumprimento, completo ou parcial, destes objetivos, bem como a maneira pela qual eles foram cumpridos.

### 3. Metodologia

Os componentes empregados para o desenvolvimento do sistema foram divididos conforme as seguintes categorias: **Térmica**, **Óptica** e **Computacional**, e estão descritos nas seções seguintes. Para simplificar a apresentação, as descrições são precedidas de uma ilustração esquemática dos componentes respectivos a cada categoria:

#### 3.1 - Componentes térmicos

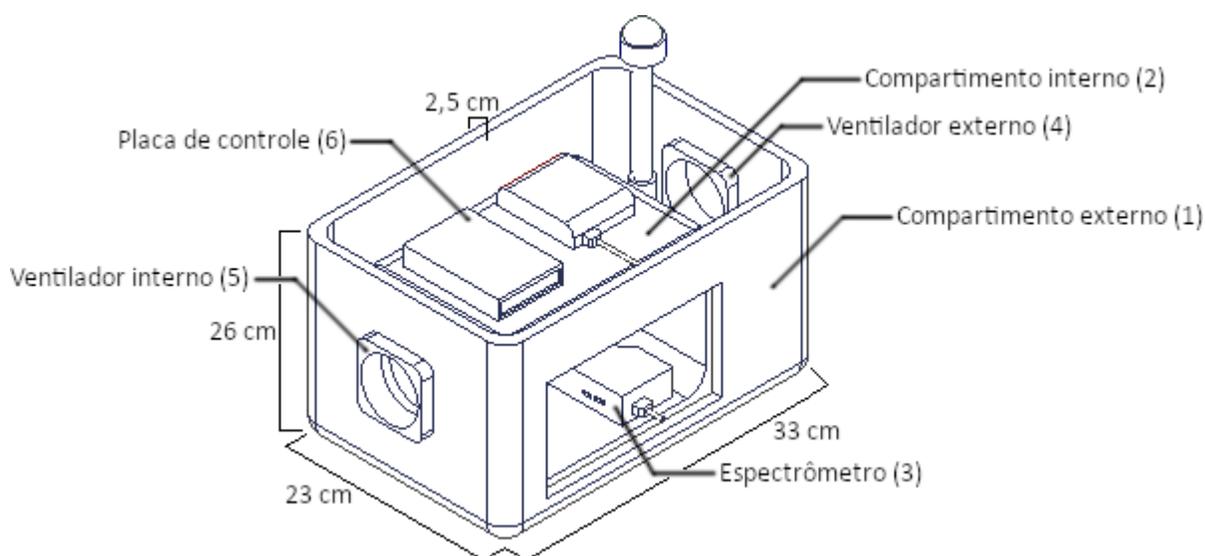
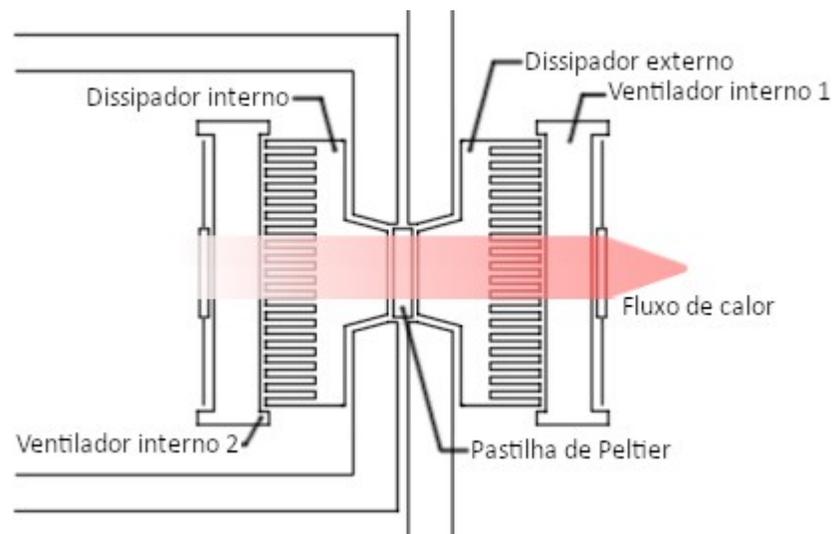


Figura 1 – Representação esquemática do sistema, destacando os componentes térmicos

A fim de conferir resiliência às condições adversas, como umidade e temperatura externa, os componentes ópticos e eletrônicos estão encapsulados em um compartimento de isopor, recortado de modo a possibilitar a retirada do calor gerado em seu interior pelos ventiladores (4) e (5).

O espectrômetro (3) é um aparelho cujas medidas são afetadas por variações da temperatura interna ao aparelho. Foi empregado, portanto, um compartimento interno, também de isopor, para encapsular o espectrômetro e possibilitar a estabilização e monitoramento de sua temperatura pela placa de controle do mecanismo de Peltier (6) e o ventilador interno (5). A caixa possui saídas estreitas para a fibra óptica do espectrômetro e o termômetro da placa.

O controle da temperatura nas vizinhanças do espectrômetro é feito através de uma pastilha de Peltier, alojada entre os radiadores térmicos que conectam os compartimentos 1 e 2, e mantida fixa entre estes com uso de pasta térmica. Na figura 2 está uma ilustração destes componentes vistos de cima:



**Figura 2: Representação esquemática do mecanismo de refrigeração**

O controle do mecanismo, por sua vez, é realizado através da placa de controle (6), que monitora a temperatura no interior do compartimento interno e permite a passagem de corrente entre os polos do mecanismo de Peltier somente ao detectar uma temperatura superior a  $25,0\text{ }^{\circ}\text{C}$  no interior da caixa, de modo a manter a temperatura interna do espectrômetro aproximadamente constante. A pastilha utilizada é do modelo TEC1-12076, e apresenta corrente e potência máxima de 6A e 60W respectivamente. A placa de controle (6) não foi desenvolvida especificamente para este projeto, estando previamente disponível na oficina de eletrônica do Departamento de Física.

O ventilador interno (5), conforme apresentado na Figura 2 está em contato com a pastilha de Peltier e favorece a transmissão do calor gerado pelo espectrômetro para fora do compartimento interno. Ambos os ventiladores internos (o interior à caixa interna e o exterior a esta) possuem dimensões de 8x8cm, operam a 0,24 A e giram a 2900 rpm.

O ventilador externo (4) não está conectado a dissipadores de calor e está alojado no compartimento externo. Apesar de não apresentado na Figura 2, há ainda outro ventilador externo, mais próximo da placa de controle (3) e conduzindo ar no mesmo sentido que o outro ventilador, favorecendo a circulação de ar através do compartimento externo. Um dos ventiladores apresenta as mesmas características dos ventiladores internos (4), e o outro apresenta dimensões de 6x6cm, opera a 0,13 A e gira também a 2900 rpm.

### 3.2 - Componentes ópticos

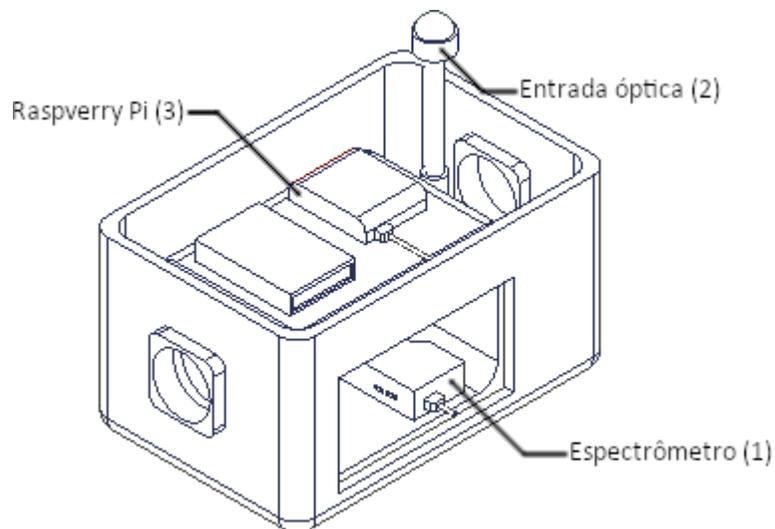
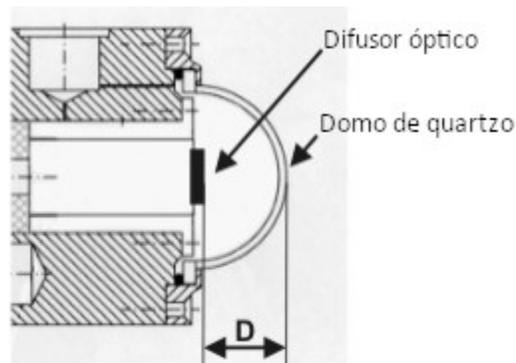


Figura 3 – Representação esquemática do sistema, destacando os componentes ópticos

O espectrômetro (1) utilizado é um espectrômetro modular FLAME-S-UV-VIS comercializado pela Ocean Optics (EUA). A escolha deste modelo se deve ao fato de que ele foi projetado especificamente para suportar maiores variações de temperatura, com prejuízo mínimo à confiabilidade de suas medidas. Além disto, ele é capaz de discernir 2048 comprimentos de onda na faixa de 200 a 800 nm, possibilitando medidas do espectro ultravioleta e do visível [2]. O instrumento foi calibrado para medidas de irradiância espectral, conforme será detalhado na seção **Resultados**. Por fim, o espectrômetro está conectado ao Raspberry Pi (3), o computador utilizado para os fins deste projeto, via cabo USB.

Exposto ao ambiente externo está uma entrada óptica (2) específica para medidas de irradiância espectral, modelo UV-J1002-SMA, comercializada pela Schreder-CMS (AUT). A entrada consiste de um hemisfério de quartzo acoplado sobre um difusor óptico, e seu papel é permitir a captura de radiação solar vindo de  $2\pi$  esferorradianos, reduzindo o erro proveniente da resposta cosseno a  $>3\%$  para ângulos de incidência entre  $0^\circ$  e  $70^\circ$  [3]. A Figura 4 contém uma representação esquemática deste componente, assim como uma foto do exemplar empregado neste projeto:

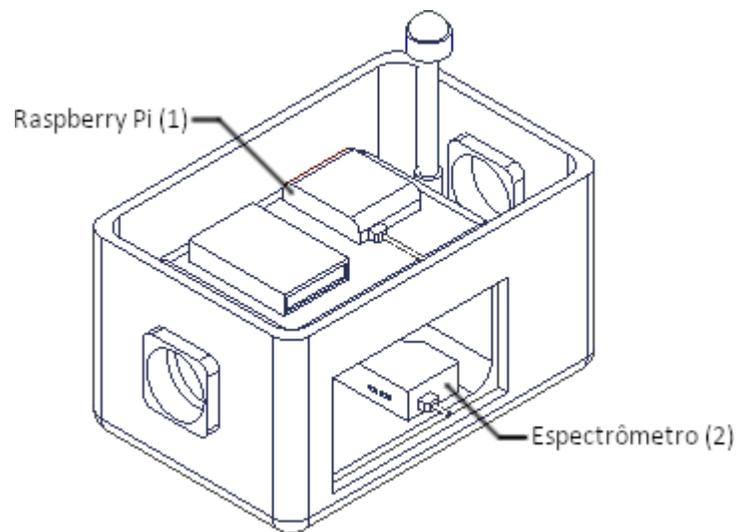


Raio D = 14,3mm (padrão) do hemisfério de quartzo

Figura 4 – Diagrama do instrumento, adaptado do seu manual [3]

Esta entrada conta ainda com um interruptor interno que permite bloquear a passagem de luz através da fibra óptica quando acionado por um sinal de 5V. Finalmente, o instrumento é conectado ao espectrômetro via uma fibra óptica de 0,6 mm e 2 m de comprimento, também comercializada pela Schreder-CMS.

### 3.3 - Componentes computacionais



**Figura 5 - Representação esquemática da caixa, destacando os componentes computacionais**

O computador escolhido para ser utilizado neste projeto é um Raspberry Pi 3 modelo B+, desenvolvido e comercializado pela Raspberry Pi Foundation (UK). Trata-se de um computador de placa única, com dimensões de 85x65 mm, e cujas especificações técnicas permitem a realização das tarefas automatizadas propostas pelo projeto sem sacrifício de portabilidade.

O aparelho conta com uma GPIO (General Purpose Input Output) de 26 pinos, que são utilizados para enviar sinais de 3,3V para dispositivos externos, o que também é de grande utilidade para este projeto. A entrada óptica descrita em 3.2 está conectada ao Raspberry Pi através destes pinos, permitindo o bloqueio automático da passagem de luz pela fibra óptica.

O sistema operacional instalado neste computador é o *Raspbian Stretch*, uma distribuição Linux desenvolvida pela Raspberry Pi Foundation para operar seu produto.

O Raspberry Pi é alimentado através de uma fonte de 5V conectada à tomada, e este por sua vez fornece energia ao espectrômetro através do cabo USB que os conecta. A Figura 6 apresenta o espectrômetro e o Raspberry Pi utilizados:

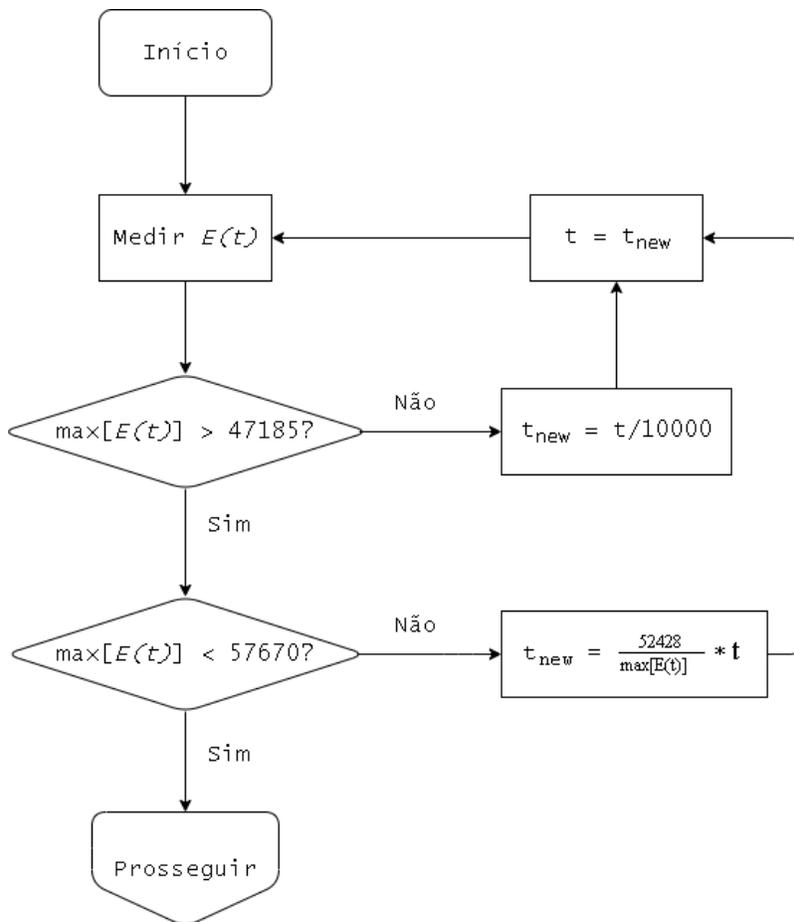


**Figura 6 – Espectrômetro e Raspberry Pi**

Foram desenvolvidas rotinas na linguagem de programação Python 3 para a realização automatizada das tarefas descritas a seguir:

**Comunicação com o espectrômetro:** O Raspberry Pi se comunica com o espectrômetro através do *driver Python-Seabreeze*, desenvolvido por Andreas Poehlmann e disponibilizado gratuitamente via a plataforma GitHub [4]. Trata-se de um driver open-source desenvolvido sem vínculo com o fabricante do espectrômetro. Sua utilização neste projeto se deve à ausência de software oficial para a utilização de espectrômetros da Ocean Optics na arquitetura do Raspberry Pi, além da integração deste driver com a linguagem Python.

**Realização de medidas periódicas:** O espectrômetro é acionado a cada 5 minutos para a realização de medidas espectrais. A fim de proporcionar maior precisão às medidas, um algoritmo iterativo encontra o tempo de integração que gera a melhor proporção sinal/ruído sem saturar os a grade CCD do espectrômetro. O algoritmo empregado está ilustrado na Figura 7:



**Figura 7 - Algoritmo para otimização do tempo de integração**

Neste diagrama,  $E(t)$  é o espectro medido em contagens (unidades arbitrárias) e  $t$  é o tempo de integração. Considerando que 65535 é o valor máximo em contagens que o espectrômetro pode medir, adotou-se o intervalo entre 47185 e 57670 contagens (72% e 79% de 65535, respectivamente) como o ideal para obter uma razão sinal/ruído satisfatória. Durante a primeira execução do programa, o valor inicial  $t = 50000 \mu\text{s}$  é adotado. A partir de então, o algoritmo só é acionado quando o valor máximo de  $E(t)$  está fora do intervalo proposto. Durante o dia, é geralmente necessária somente uma iteração para obter o tempo de integração desejado. O algoritmo é automaticamente finalizado após realizar três iterações.

Tendo em mãos o tempo de integração desejado,  $I_D$  e  $I_\lambda$  são obtidos ao calcular a média de 10 medidas espectrais em contagens realizadas com o interruptor da entrada óptica fechado e aberto, respectivamente. Se em qualquer uma destas medidas for detectado que o espectrômetro se saturou, o algoritmo acima é inicializado. Não são realizadas correções ou suavizações no espectro final obtido.

**Obtenção da irradiância espectral e cálculo do índice UV:** Obtém-se a irradiância espectral a partir da responsividade espectral do espectrômetro, conforme a equação 1:

$$E(\lambda) = \frac{I_{\lambda} - I_{dark}}{\Delta t \cdot R(\lambda)}$$

**Equação 1: Obtenção da irradiância espectral E em função do comprimento de onda  $\lambda$**

Nesta equação,  $\Delta t$  é o tempo de integração adotado e  $R(\lambda)$  é a responsividade espectral do sistema. A calibração do espectrômetro consiste na obtenção deste coeficiente para cada comprimento de onda, e está apresentada na seção **Resultados**.

O índice UV é calculado numericamente a partir da integral equação 2:

$$I_{UV} = k_{er} \int_{250nm}^{400nm} E(\lambda) \cdot A_{sp}(\lambda) d\lambda$$

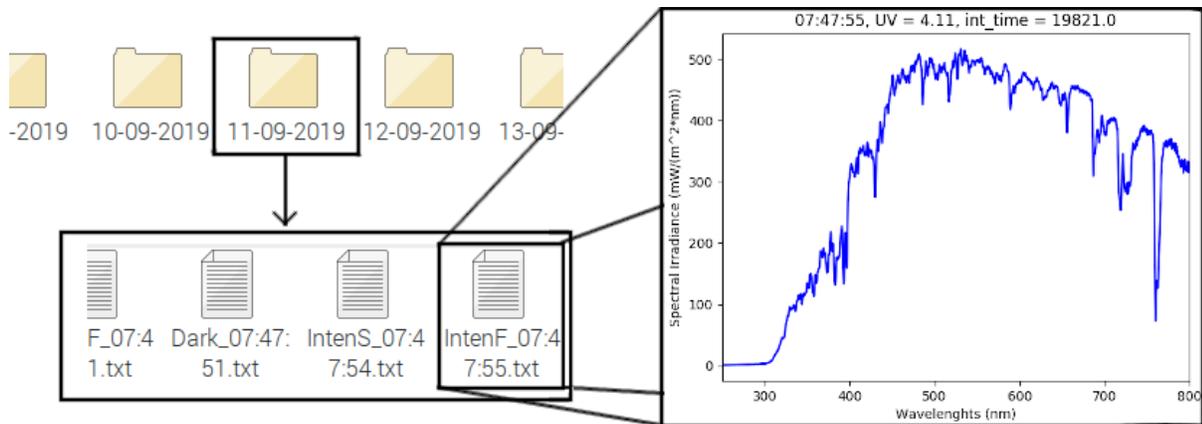
**Equação 2: Obtenção do índice UV**

Onde  $k_{er}$  é um valor constante e igual a  $40 \text{ m}^2/\text{W}$ , e  $A_{sp}$  é o espectro de ação para geração de eritemas obtido por McKinley-Diffey [5], dado pela função definida na equação 3:

$$\begin{array}{ll} A_{sp} = 1 & \text{para } 250 - 298nm \\ A_{sp} = \exp\{0,216(298 - \lambda)\} & \text{para } 299 - 328nm \\ A_{sp} = \exp\{0,034(139 - \lambda)\} & \text{para } 329 - 400nm \end{array}$$

**Equação 3: Espectro de ação para geração de eritemas**

Todas as medidas são salvas na memória interna do Raspberry Pi em formato txt, classificadas de acordo com a data e hora de sua captura; outro algoritmo permite a conversão destes arquivos em gráficos. Os índices UV calculados, bem como o horário de sua captura, são registrados em um arquivo dedicado. A Figura 8 apresenta a organização destes arquivos, bem como um exemplo de gráfico contendo o espectro em contagens, um contendo a mesma medida com unidades de irradiância



**Figura 8 – Organização hierárquica dos arquivos e exemplar de gráfico gerado pelo sistema**

**Monitoramento da temperatura:** Uma das funcionalidades do espectrômetro utilizado é o registro da temperatura de sua placa de circuito, que é acessível através do *driver Python-Seabreeze*. Esta temperatura é registrada após cada medida espectral em um arquivo txt respectivo ao dia em que estas medidas foram feitas, podendo ser consultada pelo usuário a qualquer momento afim de verificar a estabilidade térmica do sistema. Conectado aos pinos GPIO do Raspberry Pi está um sensor de temperatura e umidade DHT11, Adafruit (EUA), empregado para monitorar a temperatura externa.

**Upload de medidas na Web:** Após cada medida espectral, um gráfico da irradiância espectral é gerado e salvo em uma pasta preestabelecida. Este gráfico é automaticamente enviado aos servidores do Departamento de Computação e Matemática, para que seja publicado no website do Grupo de Fotobiofísica neles hospedado [6].

Estas rotinas são acionadas automaticamente assim que o sistema operacional do Raspberry Pi é inicializado, dispensando a necessidade de interação do usuário para a obtenção das medidas. É possível, no entanto, acessar o sistema remotamente através do software TeamViewer, dado que o usuário configure este programa no Raspberry Pi de antemão.

## 4. Resultados

### 4.1 - Calibração

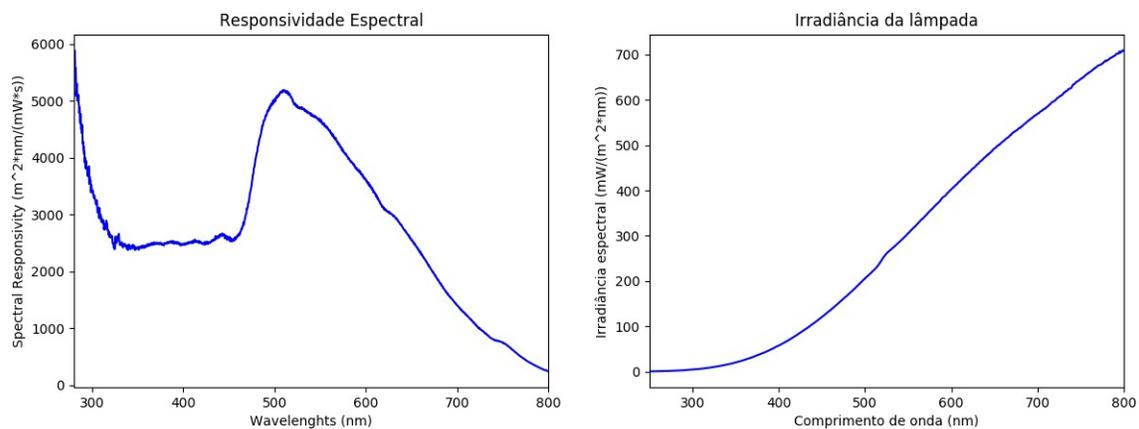
O espectrômetro foi calibrado utilizando uma lâmpada halógena de 200W KS-J1011-LAMP, comercializada pela Schreder (AUT). A lâmpada foi alimentada por uma fonte elétrica estável e o espectrômetro foi mantido a uma temperatura interna de 24 °C, de modo a manter tanto a irradiância da lâmpada quanto a resposta do espectrômetro constante durante o processo.

Obteve-se a média de 30 medidas espectrais da lâmpada,  $I_{\lambda}$ , e a média de 30 medidas com a lâmpada desligada,  $I_{dark}$ , utilizando o tempo de integração ( $\Delta t$ ) obtido pelo algoritmo ilustrado na Figura 7. A responsividade espectral  $R(\lambda)$  do sistema sob estas condições foi calculada através da equação 4, onde  $E_{lâmpada}$  é a irradiância espectral da lâmpada fornecida pelo fabricante:

$$R(\lambda) = \frac{I_{\lambda} - I_{dark}}{\Delta t \cdot E_{lâmpada}}$$

**Equação 4: Responsividade espectral do sistema em função do comprimento de onda**

O gráfico de  $R(\lambda)$ , acompanhado do espectro de irradiação da lâmpada utilizada, estão apresentados na Figura 9:



**Figura 9: Responsividade espectral (direita) e irradiância da lâmpada padrão (esquerda)**

Com a irradiância espectral  $R(\lambda)$  salva no armazenamento interno do Raspberry Pi, obtém-se a irradiância espectral a partir do espectro em unidades arbitrárias medido pelo espectrômetro, conforme descrito pela Equação 1 e ilustrado na Figura 10:

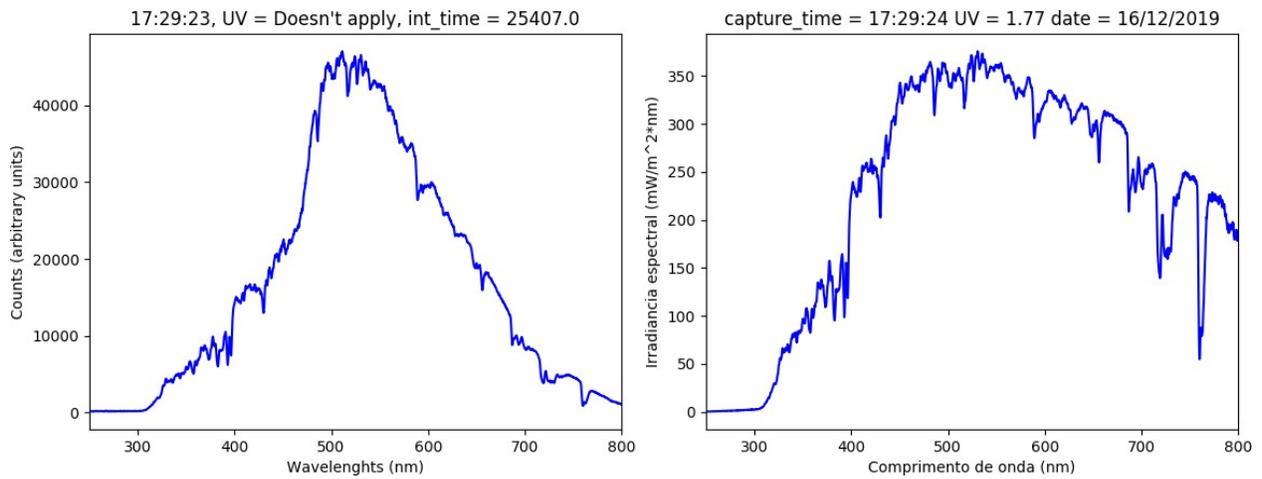


Figura 10: Espectro em contagens (esquerda) e em unidade de irradiância espectral (direita)

## 4.2 – Medidas espectrais solares

As medidas de irradiância espectral solar foram comparadas com as obtidas por um sistema desenvolvido anteriormente no Laboratório de Fotobiofísica [7], cuja calibração e validação dos resultados ocorreu independentemente. Na Figura 11, observa-se a medida obtida pelo aparelho desenvolvido neste trabalho (doravante referido por A, em azul) ao lado da obtida pelo outro sistema (doravante referido por V, em vermelho) em um instante próximo. À direita está um recorte da região espectral correspondente à radiação UV de ambos os gráficos:

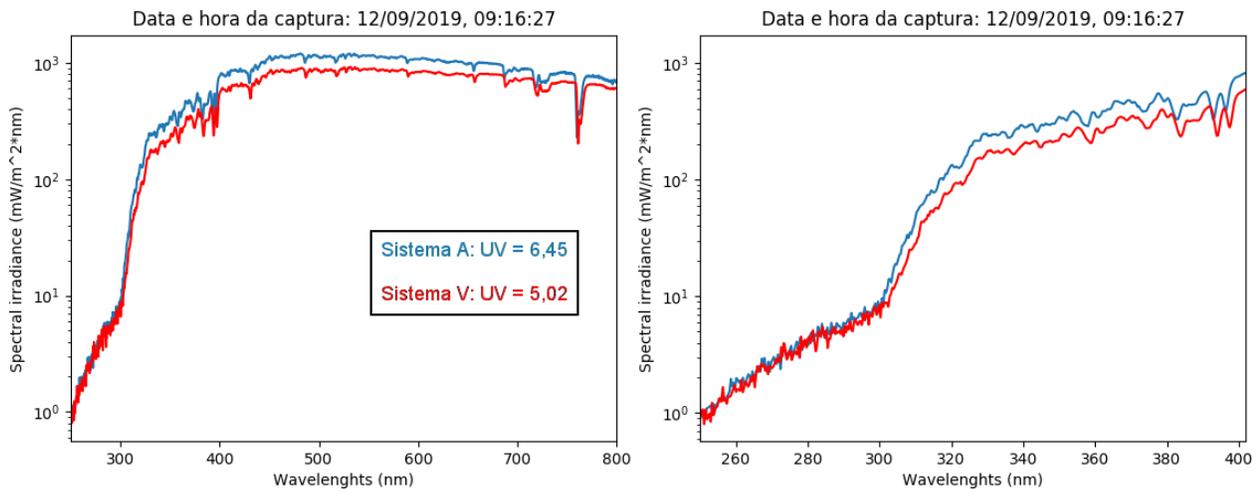


Figura 11: Espectros de irradiação e recorte da região espectral do UV. Note a escala logarítmica.

Por mais que ambos os gráficos possuam o mesmo perfil, observa-se uma diferença apreciável entre a magnitude das medidas realizadas pelos diferentes sistemas, o que se reflete nos respectivos IUVs. Também é notável o ruído elevado na faixa entre 250 e 300 nm presente em ambos os sistemas, que é contabilizado no cálculo do IUV (conforme equação 3).

A partir destes espectros, são construídos gráficos ilustrando a variação do IUV ao longo do dia, onde também se observa esta discrepância. Na Figura 12 estão apresentados tais gráficos construídos ao longo de um dia levemente nublado pelos respectivos sistemas:

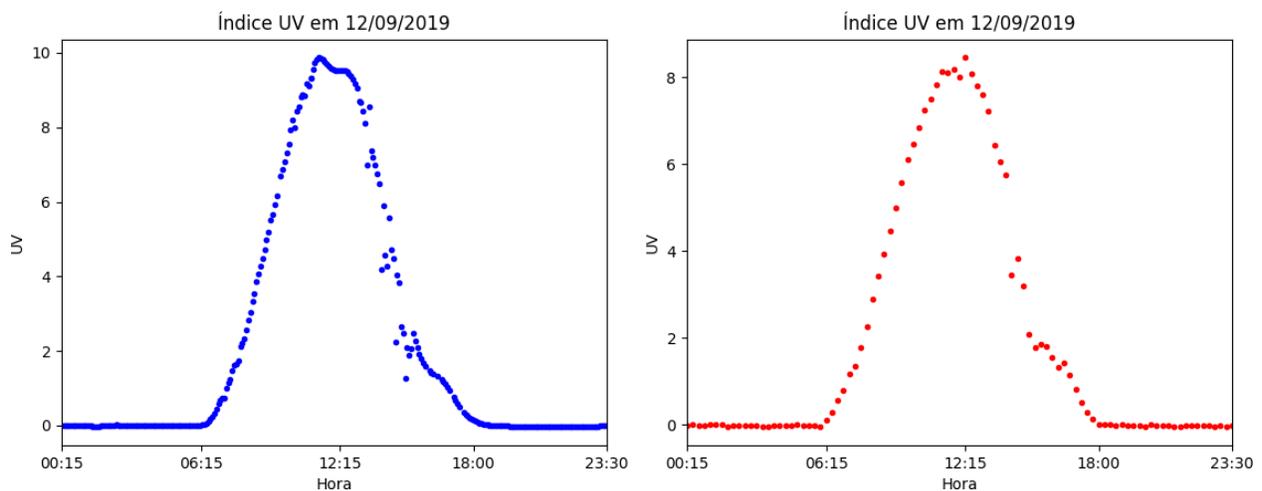


Figura 12 Histórico do índice UV gerado por A (esquerda) e V (direita)

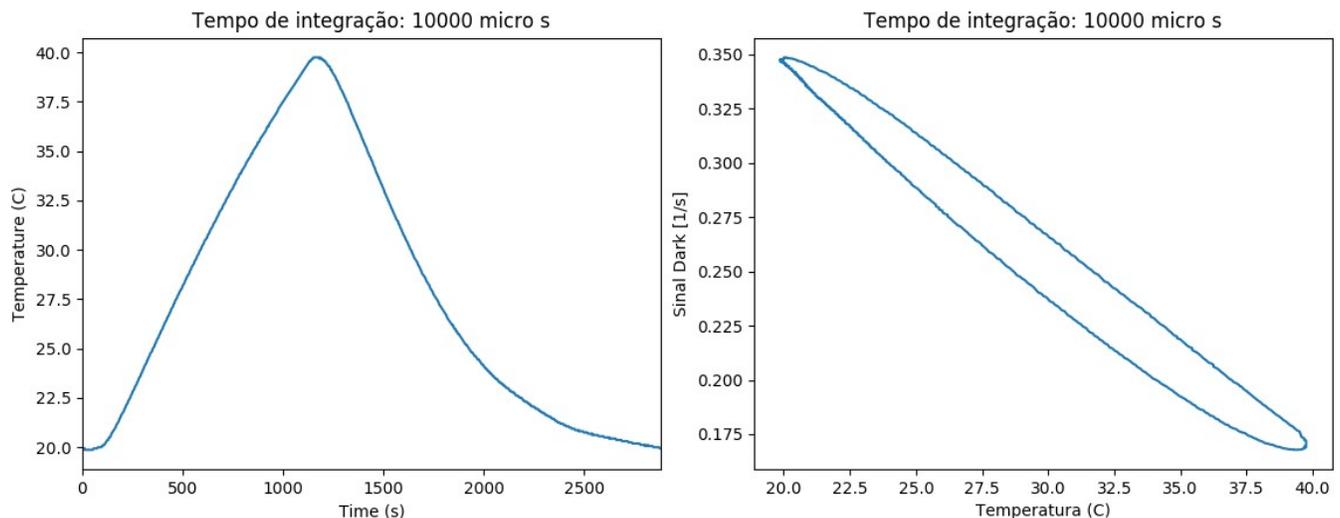
Aqui também se faz evidente as diferenças nos resultados gerados por cada sistema. Os perfis das curvas coincidem, mas os valores obtidos por A são consistentemente superiores aos obtidos por V. Tanto as medidas de irradiância espectral quanto a variação do IUV ao longo do dia medidos por ambos os sistemas condizem com o apresentado pela bibliografia especializada, no entanto [1] [8].

Uma razão plausível para estas discrepâncias são os efeitos térmicos que agem sob o espectrômetro quando exposto ao sol. Tais efeitos são abordados na seção seguinte.

### 4.3 – Estabilidade térmica do sistema

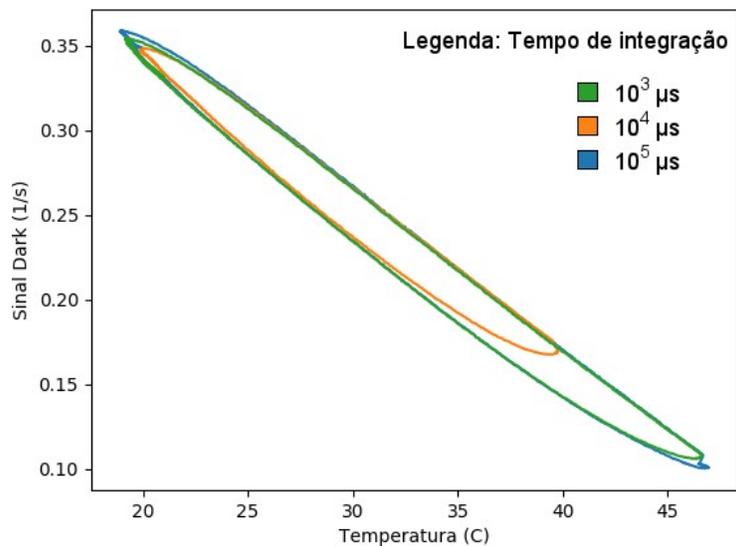
A fim de explorar os efeitos de variações da temperatura do espectrômetro em suas medidas, o aparelho foi sistematicamente aquecido e resfriado em um ambiente controlado, e posto a realizar medições com a sua entrada óptica fechada. Deste modo, buscou-se avaliar o comportamento do sinal *dark* intrínseco à grade CCD do espectrômetro em função da temperatura.

Na Figura 13, está a temperatura do espectrômetro em função do tempo registrada no decorrer deste experimento, e ao lado está a curva de histerese obtida ao plotar o sinal *Dark* obtido em função da temperatura. O “sinal *dark*” é uma grandeza calculada a partir de medidas espectrais realizadas na ausência de luz (no caso, com a entrada óptica do espectrômetro fechada); trata-se da média aritmética desta medida normalizada pelo tempo de integração.



**Figura 13: Temperatura em função do tempo e curva de histerese do sinal *dark* em função da temperatura, respectivamente**

Observa-se, portanto, que as medidas espectrais são inversamente proporcionais à temperatura do aparelho. Também é interessante notar que, apesar da histerese apresentada pelo sistema, a relação entre as duas grandezas é aproximadamente linear: dobrar a temperatura do espectrômetro resultou em um sinal *dark* duas vezes menor. Buscou-se também avaliar se este comportamento é afetado pelo tempo de integração adotado. Na Figura 14, esta curva está apresentada para três tempos de integração arbitrários:

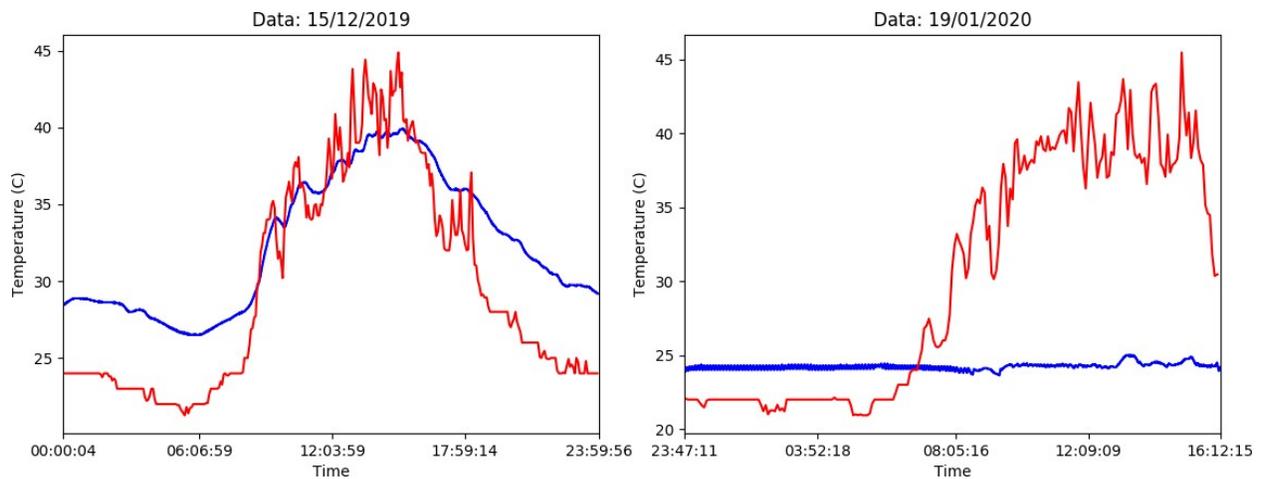


**Figura 14: Curvas de histerese do espectrômetro. O eixo Y representa o valor médio do sinal *Dark* dividido pelo tempo de integração**

A curva correspondente ao tempo de integração de  $10^4 \mu s$  aparenta ser distinta das demais pois, neste caso, durante o experimento o espectrômetro foi aquecido por um menor período de. Nos demais, as curvas são idênticas, o que indica que o comportamento do espectrômetro em função da temperatura independe do tempo de integração.

Conhecendo este aspecto do aparelho de medida, enfatiza-se a necessidade de manter o espectrômetro a uma temperatura constante para assegurar a reprodutibilidade dos resultados, tendo em vista que o comportamento apresentado acima inviabiliza a utilização de um algoritmo que realize correções nas medidas com base na temperatura do espectrômetro.

O sistema de refrigeração atualmente empregado, apesar de simples, mostrou-se eficiente em sua tarefa de manter constante a temperatura interna do espectrômetro, conforme ilustrado pela Figura 15, onde estão apresentados gráficos contendo as temperaturas internas (em azul) e externa (em vermelho) ao sistema em dias ensolarados, um no qual o mecanismo de Peltier encontrava-se desligado e outro no qual este estava ligado, respectivamente:



**Figura 15: Temperaturas interna e externa em função do tempo. É importante notar que as temperaturas externas apresentam incerteza de  $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$  [9]**

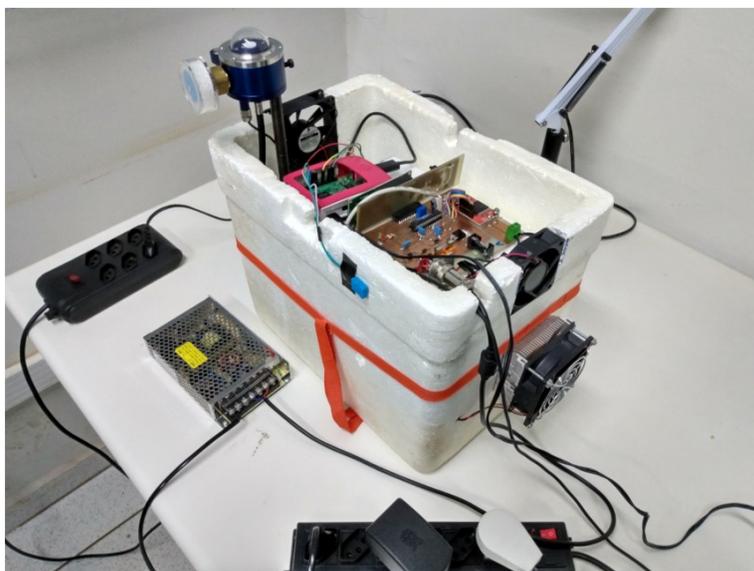
Os principais problemas associados ao controle da temperatura do espectrômetro decorrem das altas correntes elétricas atravessando os componentes da placa de controle e o mecanismo de Peltier. Ao longo do projeto, foi necessário substituir componentes da placa de controle por alternativas mais resilientes ao calor por ela gerado, bem como adicionar ventiladores para promover a circulação de ar através dela.

### 4.3 – Montagem da caixa

Os esquemas apresentados nas figuras 1,  $\gamma$ , e  $\epsilon$  foram, na prática, montados com caixas de isopor vedadas contra infiltração de água, poeira e outros elementos indesejáveis em seu interior com fita *Silver Tape*. Uma foto da caixa montada e operacional, seguida de uma foto dela aberta para experimentos em ambiente controlado, estão contidas nas Figuras 16 e 17:



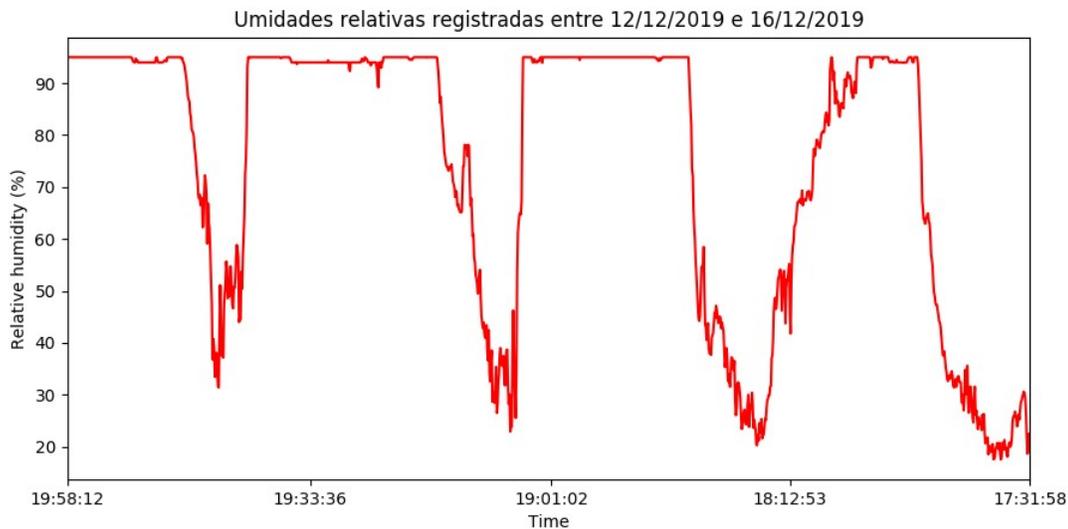
**Figura 16: Caixa selada e posicionada no local onde realizará as medidas. A bolsa ao lado contém as tomadas e fontes de cada componente eletrônico do sistema**



**Figura 17: Caixa aberta para realização de experimentos em laboratório**

Apesar da constituição modesta deste protótipo, ele se mostrou adequado em sua função de proteger os componentes internos de intempéries ambientais ao longo de vários dias, ao menos após serem adicionadas ventoinhas adicionais para favorecer a circulação de ar na placa e no Raspberry Pi.

Exemplo da adequação deste sistema contra chuva é este registro ininterrupto da umidade relativa do ar ao longo de 5 dias em uma temporada particularmente úmida e chuvosa em Ribeirão Preto, apresentado na Figura 18:



**Figura 18:** Umidades relativas do ar ao longo dos 5 dias especificados na figura. A incerteza destas medidas é de  $\pm 5\%$  [9]

## 5. Plano de trabalho para etapas seguintes

Ao longo da segunda metade deste trabalho, espera-se cumprir os objetivos apresentados no projeto de pesquisa. Em particular, buscamos, não necessariamente nesta ordem:

- Dispensar o protótipo confeccionado a partir de caixas de isopor e fita *silver tape* em favor de uma maleta elaborada especificamente para acomodar os componentes do sistema, construída, por exemplo, com uso de impressão 3D. Busca-se com isto reduzir o volume do sistema, tornar seu transporte mais prático e melhor salvaguardar a segurança dos componentes eletrônicos utilizados.
- Implementar a funcionalidade de salvar as medidas do sistema em uma conta do Google Drive ou semelhante e, na ausência de conexão com internet, salvá-las em uma mídia removível.
- Desenvolver uma interface de usuário que permita a configuração e monitoramento do sistema remotamente sem a necessidade de utilização do TeamViewer, que é software proprietário e exige compra de licença para uso comercial.
- Caracterizar os parâmetros ópticos do sistema, conforme descrito na referência [10].

## 6. Apresentações em congressos científicos:

Este trabalho foi apresentado na forma de pôster no XXIV Congresso Brasileiro de Física Médica [11] e na primeira e segunda etapa do XXVI Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP [12], ambos em 2019.

## 7. Referências

1. Os padrões de qualidade adotados neste projeto dizem respeito às recomendações apresentadas em EGLI, L. et al. A Guide to Measuring Solar UV Spectra using Array Spectroradiometers. AIP Conference Proceedings, [S. l.], 2003. Disponível em: [https://projects.pmodwrc.ch/env03/images/publications/Blumthaler\\_et\\_al\\_APC.pdf](https://projects.pmodwrc.ch/env03/images/publications/Blumthaler_et_al_APC.pdf). Acesso em: 29 jan. 2020.
2. As especificações técnicas do espectrômetro utilizado estão disponíveis em [https://www.flowinjection.com/images/Flame\\_Technical\\_Specifications.pdf](https://www.flowinjection.com/images/Flame_Technical_Specifications.pdf), acesso em 29 jan. 2020.
3. Manual disponível em [http://www.schreder-cms.com/en\\_pdf/manual\\_J1002\\_SMA.pdf](http://www.schreder-cms.com/en_pdf/manual_J1002_SMA.pdf), acesso em 29 jan. 2020.
4. Pyseabreeze é software open-source disponibilizado gratuitamente com a licença MIT no site: <https://github.com/ap--/python-seabreeze>. Acesso em: 29 jan. 2020.
5. Este e outros potenciais de ação podem ser consultados em SCHMALWIESER, A. W.; WALLISCH, S.; DIFFEY, B. A library of action spectra for erythema and pigmentation. Photochemical & Photobiological Sciences, Reino Unido, 10 out. 2011. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/51920182\\_A\\_library\\_of\\_action\\_spectra\\_for\\_erythema\\_and\\_pigmentation](https://www.researchgate.net/publication/51920182_A_library_of_action_spectra_for_erythema_and_pigmentation). Acesso em: 29 jan. 2020.
6. A última medida realizada pelo sistema pode ser consultada na página: <https://sites.usp.br/fotobiofisica/facilities/spectroscopy/>. Acesso em: 29 jan. 2020.

7. Página do projeto desenvolvido anteriormente em colaboração com a Faculdade de Ciências Farmacêuticas (FMRP-USP): <https://sites.google.com/site/centrodefotobiologia/apresentacao-do-laboratorio>. Acesso em: 29 jan. 2020
8. FRÖHLICH, Claus; LEAN, Judith. Solar radiative output and its variability: evidence and mechanisms. *The Astronomy and Astrophysics Review*, Alemanha, p. 273-320, 16 nov. 2004. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00159-004-0024-1>. Acesso em: 28 mar. 2019.
9. Informações técnicas sobre o sensor DHT11 estão disponíveis em sua *product sheet*: [https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet\\_DHT11.pdf](https://img.filipeflop.com/files/download/Datasheet_DHT11.pdf). Acesso em: 29 jan. 2020.
10. YLIANTTILA, L. et al. Evaluation of a single-monochromator diode array spectroradiometer for sunbed UV-radiation measurements. *Photochemistry and Photobiology*, [S. l.], 2003. Disponível em: <https://bioone.org/journals/photochemistry-and-photobiology/volume-81/issue-2/2004-06-02-RA-184.1/Evaluation-of-a-Single-monochromator-Diode-Array-Spectroradiometer-for-Sunbed/10.1562/2004-06-02-RA-184.1.full> Acesso em: 29 jan. 2020.
11. DIAS, Eduardo Lopes e BACHMANN, Luciano. Development and calibration of a portable system for solar spectroradiometry. In: XXIV CONGRESSO BRASILEIRO DE FÍSICA MÉDICA, 2019, Santos. [Seção de Pôsteres]. Evento promovido pela Associação Brasileira de Física Médica.
12. DIAS, Eduardo Lopes e BACHMANN, Luciano. Development and calibration of a portable system for solar spectroradiometry. In: ETAPA INTERNACIONAL DO XXIV SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 2019, São Paulo. [Seção de Pôsteres]. Evento promovido pela Universidade de São Paulo.