

Avaliação de desempenho do sensor BH1750FVI (baixo custo) na medida da radiação solar global

Performance evaluation of the BH1750FVI sensor (low cost) in the measurement of global solar radiation

Evaluación de desempeño del sensor BH1750FVI (bajo costo) en la medida de radiación solar global

Recebido: 14/10/2021 | Revisado: 21/10/2021 | Aceito: 26/10/2021 | Publicado: 30/10/2021

Vinícius Brasil Silveira

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4449-7605>
Universidade Estadual Paulista, Brasil
E-mail: vinicius_brs@hotmail.com

Alexandre Dal Pai

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1283-901X>
Universidade Estadual Paulista, Brasil
E-mail: dal.pai@unesp.br

Enzo Dal Pai

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0570-8644>
Universidade Estadual Paulista, Brasil
E-mail: enzo-dal.pai@unesp.br

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho do sensor de iluminância BH1750FVI para se realizar a medida da radiação solar global, utilizando um microcontrolador NodeMCU ESP8266; medidas deste sensor foram comparadas e relacionadas com medidas de uma estação meteorológica referência para comparação. Na estimativa da irradiação solar global o coeficiente angular de estimativa foi 0,2201 e o resíduo foi de $r = 0,726$. Na validação do modelo os valores de MBE, MBE%, RMSE e RMSE% foram, respectivamente, $-72,9 \text{ W/m}^2$, $-23,86 \%$, $164,3 \text{ W/m}^2$ e $53,77 \%$. Na estimativa da irradiação solar global (integrada) o sensor BH1750FVI apresentou um coeficiente de 0,22884 e resíduo $r = 0,899$; os valores da validação MBE, MBE%, RMSE e RMSE% foram, respectivamente $-0,017 \text{ MJ/m}^2$, $-0,13 \%$, $0,55 \text{ MJ/m}^2$ e $4,31 \%$.

Palavras-chave: Sensor arduino luminância; Sensor BH1750FVI; Radiação solar global; Sensor de baixo custo; Lúpulo; Arduino.

Abstract

The aim of this work was to evaluate the performance of illuminance sensor BH1750FVI measuring the global solar radiation, using a microcontroller NodeMCU ESP8266; measurements from this sensor were compared and related to measurements from a reference meteorological station for comparison. For the estimation of solar global irradiance, the angular coefficient was 0.2201 and the residual was $r = 0.726$. For validation, values of MBE, MBE%, RMSE and RMSE% were, respectively, -72.9 W/m^2 , -23.86% , 164.3 W/m^2 and 53.77% . For global (integrated) solar irradiation, the BH1750FVI sensor presented a coefficient of 0.22884 and residual $r = 0.899$; the validation values MBE, MBE%, RMSE and RMSE% were, respectively -0.017 MJ/m^2 , -0.13% , 0.55 MJ/m^2 and 4.31% .

Keywords: Sensor arduino luminance; Sensor BH1750FVI; Global solar radiation; Low cost; Hop; Arduino.

Resumen

El objetivo deste trabajo fue evaluar el desempeño del sensor de iluminancia BH1750FVI para medir la radiación solar global, utilizando un microcontrolador NodeMCU ESP8266; las mediciones de este sensor se compararon y relacionaron con las mediciones de una estación meteorológica de referencia para su comparación. En la estimación de la irradiación solar global, la coeficiente angular de estimativa fue 0.2201 y el residual fue $r = 0.726$. En la validación del modelo, los valores de MBE, MBE%, RMSE y RMSE% fueron, respectivamente, $-72,9 \text{ W/m}^2$, $-23,86\%$, $164,3 \text{ W/m}^2$ y $53,77\%$. Al estimar la irradiación solar global (integrada), el sensor BH1750FVI presentó un coeficiente de 0.22884 y un r residual = 0.899; los valores de validación MBE, MBE%, RMSE y RMSE% fueron, respectivamente, $-0,017 \text{ MJ/m}^2$, $-0,13\%$, $0,55 \text{ MJ/m}^2$ y $4,31\%$.

Palabras clave: Sensor de luminancia arduino; Sensor BH1750FVI; Radiación solar global; Sensor de bajo costo; Lúpulo; Arduino.

1. Introdução

O conhecimento da radiação solar é importante em diversas áreas. A quantificação de níveis energéticos no ambiente permite a modelagem de inúmeros processos físicos naturais e suas consequências climáticas. Um desses processos físicos de grande importância é a evaporação de água e seu ciclo hidrológico natural. Esse conhecimento permite o correto planejamento e manejo do uso dos recursos hídricos, como a geração de energia elétrica, operação de reservatórios, navegação, uso industrial e agricultura (irrigação) (Yang & Wang, 2018; Zhao et al., 2013).

Embora a radiação solar tenha sua utilidade estratégica no planejamento, seu conhecimento real em campo com medidas ainda é pouco difundido, quando comparado à dados disponíveis de temperatura e umidade relativa do ar (Pizzatto, Zamadei, de Miranda, de Souza, & Zolin, 2019). Essa aparente falta de medidas ou escassez de medidas deve-se provavelmente ao elevado custo de aparelhos precisos de medidas. Além do piranômetro, aparelho que mede a radiação solar (densidade de fluxo de energia por unidade de área, $W.m^{-2}$), para a medida também se faz necessário um microcontrolador com memória para armazenagem de dados, aumentando o custo operacional da medida.

Com os avanços tecnológicos da eletrônica, os microcontroladores estão cada vez com menores custos e maiores funcionalidade (Salah & Zneid, 2019). Muitos destes microcontroladores são baseados na plataforma de livre acesso Arduino (Harnett, 2011). Logo, a construção de estações agrometeorológicas de baixo custo para suprir a parcela de produtores que carecem de equipamentos tecnológicos no campo apresenta-se como boa opção com promissora viabilidade, auxiliando-os em tomadas de decisões que impactam diretamente na gestão dos recursos hídricos e ambientais.

Dentre as inúmeras opções que vêm aparecendo no mercado de microcontroladores (e sensores) de menor custo, há a opção do Sensor BH1750FVI. Este apresenta-se como um sensor de baixo custo (comparando-se ao preço de piranômetros convencionais) capaz de fazer a medida do fluxo luminoso por unidade de área (lux, lx, igual a 1 lúmen por m^2).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a possibilidade de se utilizar o sensor BH1750FVI para se fazer a medida da radiação solar global, utilizando um microcontrolador de baixo custo Arduino. Também se visou neste trabalho relacionar medidas deste sensor com medidas de uma estação meteorológica para obtenção da magnitude da diferença entre as medidas.

2. Metodologia

2.1 Local e Medidas

O trabalho foi realizado na Fazenda experimental Lageado, latitude $22^{\circ}49'S$, longitude $48^{\circ}25'W$ e altitude de 786 m, no município de Botucatu, estado de São Paulo, Brasil.

Figura 1: Local da realização do experimento – Município de Botucatu-SP-Brasil – Fazenda experimental Lageado – Faculdade de Ciências agrárias de Botucatu – FCA-UNESP.



Fonte: Autores (2021).

O experimento foi instalado no interior de uma casa de vegetação de polietileno com as seguintes dimensões: 8 metros de largura, 24 metros de comprimento e 4,5 metros de altura no centro. No interior da casa de vegetação durante o período de medidas havia uma cultura de lúpulo: 100 mudas de lúpulo da variedade Cascade (4 fileiras com 25 mudas cada) com 10 meses. Plantio realizado em 02/11/2020).

O experimento constou da comparação das medidas de um sensor BH1750FVI com medidas realizadas rotineiramente pela estação meteorológica da FCA-UNESP-BOTUCATU. O sensor BH1750FVI realiza a medida da iluminância, o fluxo luminoso espalhado sobre uma determinada área (Dallas, 2015). A unidade de saída do sensor é o Lux (iluminância). O Lux representa o fluxo luminoso (a unidade do fluxo luminoso é o lúmen) em uma determinada área (1 Lux = 1 Lúmen/m²).

A medida de referência da estação meteorológica da UNESP-FCA foi a medida de irradiância solar. Esta medida é realizada rotineiramente pela Faculdade de Ciências Agrárias de Botucatu – FCA- UNESP. Esta medida é realizada por um piranômetro Eppley CM3, em campo aberto. Os dados são armazenados por um “*datalogger*” modelo CR1000 da marca Campbell Sci. Inc, na partição temporal de 5 min. Para a comparação, utilizou-se a transmissividade do plástico de polietileno 150 µm para a estimativa da irradiância solar global no interior de uma estufa de polietileno, conforme descrito por Dal Pai, Escobedo e Martini (2009).

A comparação das medidas apresenta algumas limitações físicas, visto que os dados de referência estão em Watts por metro quadrado, enquanto que o sensor BH1750FVI apresenta suas medidas em Lux. Essas duas unidades são fisicamente homólogas, porém não iguais. O Watt por metro quadrado é considerado uma unidade radiométrica e baseada na potência física, enquanto que o lux (lumens/m²) é considerado uma unidade fotométrica, que leva em consideração a formação da imagem no olho humano, diferindo das unidades radiométricas (Mccluney, 2014). Ambas consideram a taxa energética por unidade de tempo por unidade de área.

A intenção do trabalho foi obter, via empirismo, a estimativa da radiação solar com base em medidas do sensor BH1750FVI. Os dados foram processados seguindo os parâmetros da metodologia científica proposta por Pereira, Shitsuka, Parreira e Shitsuka (2018). Inicialmente os dados serão processados na partição temporária de 15 em 15 minutos, tempo de coleta do Arduino, abordagem chamada “instantânea”, na qual trabalha-se a referência com a unidade de potência por unidade de área (W/m²) e a unidade da iluminância em lumens/m². Em um segundo momento, os dados serão integrados no tempo (partição diária), passando a unidade da radiação solar de referência para MJ/m²(dia) e do sensor BH1750FVI para lux.s (exposição luminosa).

Os dados referentes à radiação solar, do sensor BH1750FVI e da estação meteorológica da FCA-UNESP, tiveram os valores noturnos retirados, seguindo o critério da hora do nascer e a hora do pôr do sol calculados.

2.2 Análise estatística e validação dos dados.

Será realizado um ajuste linear entre as medidas para verificação do desempenho das medidas do sensor BH1750FVI. O período de medidas realizadas (concomitantemente) foi de 30 de julho de 2021 até 09 de setembro de 2021. Este período de medidas será separado em 2 grupos distintos para duas finalidades distintas: parte dos dados será utilizada para elaboração do modelo; e parte dos dados será utilizada para se fazer uma validação dos modelos encontrados.

As validações dos dados gerados através das equações dos modelos lineares utilizadas durante o experimento foram o *mean bias error* (MBE) (eq. 1), *mean bias error* por cento (MBE%) (eq. 2), a raiz quadrática média (RMSE) (eq. 3) e a raiz quadrática média por cento (RMSE%) (eq. 4). O MBE se trata de uma validação capaz de determinar se os dados estimados estão superestimados ou subestimados em relação aos dados de referência (Kato, 2016).

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{est} - y_{ref}) \quad (\text{eq. 1})$$

$$MBE\% = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{est} - y_{ref})}{\bar{y}_{ref}} \times 100 \quad (\text{eq. 2})$$

Onde n é o número de dados totais utilizados para a validação, y_{est} são os dados estimados pelo sensor BH1750FVI utilizando a equação proveniente da regressão linear e y_{ref} são os dados de referência da estação meteorológica da FCA-UNESP. Enquanto que o MBE% trata-se do indicativo do MBE em porcentagem, sendo o \bar{y}_{ref} a média simples dos dados de referência da estação meteorológica.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{est} - y_{ref})^2} \quad (\text{eq. 3})$$

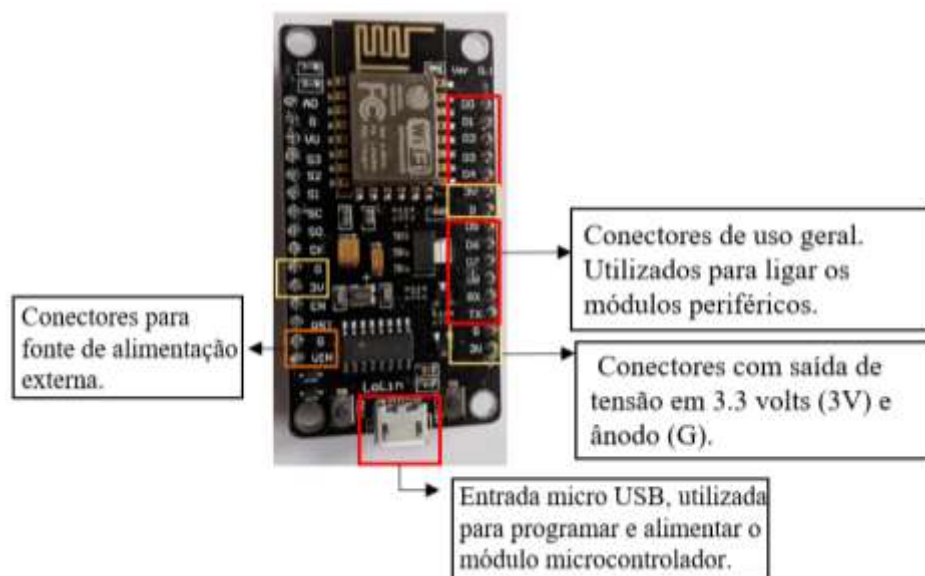
$$RMSE\% = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{est} - y_{ref})^2}}{\bar{y}_{ref}} \times 100 \quad (\text{eq. 4})$$

O RMSE foi utilizado para validar o quão distante ou próximos os pontos estão nos modelos lineares, ou seja, quanto menor o RMSE mais agrupado estarão os pontos dando um indicativo de maior acurácia dos modelos gerados (Chai & Draxler, 2014).

2.3 Microcontrolador e módulos utilizados.

O módulo microcontrolador utilizado no projeto foi o NodeMCU ESP8266 (NodeMCU) (Figura 2). Este módulo possui 17 conexões de entrada e saída (GPIO's), uma entrada analógica, 64KB de memória RAM, processador *Tensilica Xtensa LX106*[®] operando a 80mhz, 4MB de memória flash para armazenamento de informações, capaz de fornecer cerca de 3.3 volts (V) e também contando com a capacidade de conexão a redes Wi-Fi.

Figura 2: Módulo microcontrolador NodeMCU ESP8266, evidenciando os principais conectores utilizados durante o desenvolvimento do experimento.



Fonte: Adaptado de https://annefou.github.io/IoT_introduction/02-ESP8266/index.html.

Além do microcontrolador NodeMCU e do sensor BH1750FVI, foi feito o uso de dois módulos: módulo relógio em tempo real DS1302 (RTC DS1302) e um módulo leitor de micro cartão SD. As especificações e adaptações dos componentes utilizados no projeto estão listadas nos tópicos abaixo.

- Sensor BH1750FVI

O sensor BH1750FVI LUX para medida de fluxo luminoso por unidade de área (lux, lx, igual a 1 lúmen por m²) foi escolhido devido ao seu relativo baixo custo, produzido pela empresa japonesa ROHM Semiconductor (2009): capaz de operar entre as voltagens de 2.4V a 3.6V através da interface de comunicação I²C e também possui um conversor analógico-digital de 16 bits, sendo capaz de realizar a captação da luminância entre 1 a 65535 lux (lx). A faixa térmica de operação do sensor sem que seja danificado está entre -40°C a 85°C, podendo ser amplamente explorado no meio agrícola.

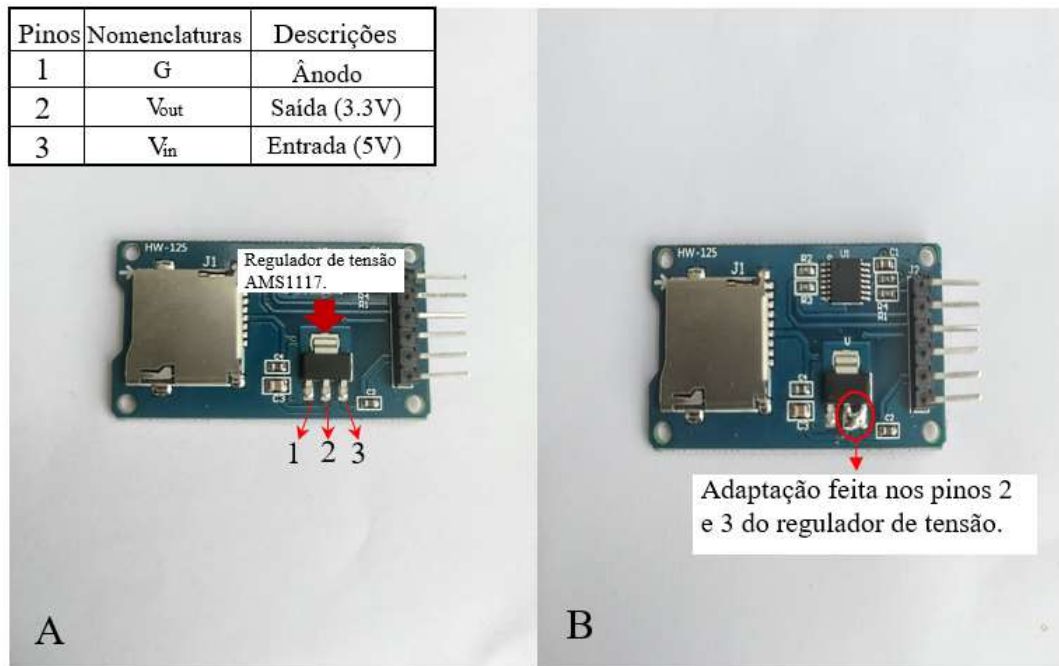
- Módulo relógio em tempo real DS1302 (RTC DS1302)

O RTC DS1302 é um circuito integrado que é utilizado como um relógio programável de baixo custo e consumo elétrico, podendo ser programado segundos, minutos, horas, dia do mês, mês, ano e dia da semana. Além do baixo consumo, o módulo utilizado foi equipado com uma bateria CR2032, para evitar problemas em relação a perda de horário, a transferências de informações com o microcontrolador NodeMCU é feito através de um protocolo serial de síncrono (Dallas, 2015).

- Módulo Micro Cartão SD

O módulo de micro cartão SD, se trata de um dispositivo com capacidade de escrever e ler dados em cartões micro SD, foi utilizado junto ao módulo um cartão micro SD de 32 Gigabytes da empresa SanDisk. O módulo adquirido foi desenvolvido para funcionar em microcontroladores que forneçam aproximadamente 5V, para fazer o seu uso junto ao microcontrolador NodeMCU foi necessário desativar o regulador de tensão AMS1117 (Figura 3A) que faz o ajuste da tensão para 3.3V (Srivastava, Bajaj & Rana, 2018). Para desativar o regulador de tensão foi necessário o uso de um ferro de solda, adicionando solda de estanho e interligando o pino 2 junto ao 3 (Figura 3B).

Figura 3. Módulo leitor de cartão micro SD evidenciando o regulador de tensão AMS1117 e seus terminais (Figura 3A) e as adaptações utilizadas para se fazer o uso do módulo no experimento realizado (Figura 3B).



Fonte: Autores (2021).

2.4 Microcontrolador e módulos utilizados.

As conexões feitas entre os módulos periféricos e o módulo microcontrolador foram elaboradas se baseando no padrão de comunicação dos dispositivos como pode ser observado na Tabela 1. O leitor de micro cartão SD faz o envio de informações para o microcontrolador através do protocolo de comunicação *Serial Peripheral Interface* (SPI), necessitando de cinco conexões para o seu funcionamento correto, sendo feito a sua conexão como é indicado na tabela acima (Leens, 2009). O módulo RTC DS1302 faz a transferência de dados com o microcontrolador através do protocolo de comunicação serial, necessita apenas de três conexões de comunicação com o microcontrolador (RST, CLK e DAT). Se tratando das conexões realizadas no sensor BH1750FVI, o mesmo faz o uso da comunicação I²C, que por padrão vem configurada para ser utilizada nos conectores D1 e D2 do NodeMCU, que já se encontrava em uso pelo RTC DS1302, sendo necessário alterar o protocolo de comunicação para os conectores D3 e D4 através de código de programação, utilizando-se a biblioteca de programação Wire.h através da função Wire.begin(D4, D3) (Arduino, 2019a).

Tabela 1: Conexões feitas entre os pinos do NodeMCU, módulos periféricos e sensores utilizados durante o projeto.

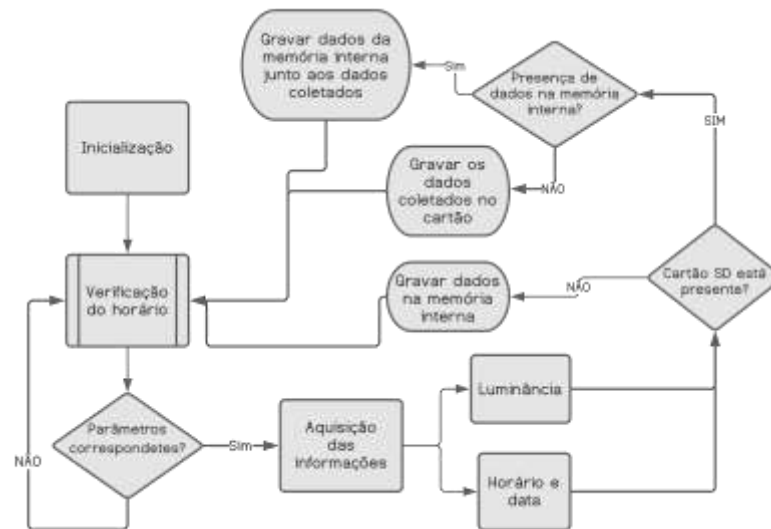
	Microcontrolador	Módulos		Sensor
	NodeMCU ESP8266	Micro Cartão SD	RTC DS1302	BH1750F VI
Conexões	D0	---	RST	---
	D1	---	CLK	---
	D2	---	DAT	---
	---	---	---	ADDR
	D4	---	---	SDA
	D3	---	---	SCL
	D5	SCK	---	---
	D6	MISO	---	---
	D7	MOSI	---	---
	D8	CS	---	---
	3.3V	VCC	VCC	VCC
	GND	GND	GND	GND

Fonte: Autores (2021).

Para o desenvolvimento do programa foi utilizado o ambiente de desenvolvimento integrado Arduino versão 1.8.13 (Arduino IDE) baseado na linguagem de programação C++ (Badamasi, 2014). Sendo necessário fazer a instalação da biblioteca de programação (de livre acesso) do módulo microcontrolador NodeMCU ESP8266 versão 2.7.4 (Github, 2020) dentro do próprio Arduino IDE tornando-se possível compilar o código para o NodeMCU. O uso de outras bibliotecas de programação de livre acesso também se fez necessário para o desenvolvimento do experimento entre elas a “virtuabotixRTC.h” (Github, 2015), “BH1750.h” (Github, 2021), “SD.h” e “SPI.h” (Arduino, 2019b) responsáveis pelas funções dos módulos RTC DS1302, sensor BH1750FVI, micro leitor de cartão SD e ativação do protocolo de comunicação SPI, respectivamente.

O fluxograma do programa pode ser observado na Figura 4, onde na etapa de inicialização do programa ocorre a criação dos elementos responsáveis pela funcionalidade do sensor BH1750FVI e do módulo leitor de micro cartão SD. Logo após a inicialização, o programa entra em *loop* de verificação do horário, onde o programa só validará se os parâmetros forem correspondentes, caso o horário da verificação seja no minuto 15, dando sequência para as próximas verificações nos minutos 30, 45 e 00.

Figura 4: Fluxograma do desenvolvimento da sequência lógica adotada pelo programa desenvolvido para o NodeMCU.



Fonte: Autores (2021).

Após a validação dos parâmetros é feito a aquisição dos dados do horário da coleta (hora e minutos), data (dia/mês/ano) e a luminância, estes dados são armazenados em variáveis no próprio NodeMCU que segue com a verificação da presença do micro cartão SD no encaixe do módulo de cartão micro SD, caso a verificação falhe os dados são armazenados em uma variável de cópia de segurança e o programa retorna à verificação do horário. A variável de cópia de segurança consegue armazenar até três *loops*, caso ultrapasse esse limite os dados começarão a ser sobrescritos.

Os dados ficam armazenados na variável de cópia de segurança até que durante a checagem seja confirmado a presença do cartão micro SD no encaixe do módulo de cartão micro SD, sendo então gravado no cartão os dados da variável de cópia de segurança e os dados proveniente da aquisição de informação do atual *loop*, caso não se tenha dados na variável de cópia de segurança somente é gravado ao cartão os dados provenientes da aquisição de dados *loop* atual e se retorna a verificação de horário novamente.

A gravação dos dados é feita em um arquivo de texto (“*.txt*”), chamado de “*log.txt*”, contendo um cabeçalho na primeira linha para separar data, hora e minutos e a luminância. Abaixo do cabeçalho os dados são gravados seguindo a sequência citada acima, separados por uma vírgula e sendo criado uma linha com novos dados toda vez que o *loop* do programa é realizado com sucesso, sendo então possível tabular os dados e realizar o tratamento dos mesmos em programas edição de texto.

3. Resultados e Discussão

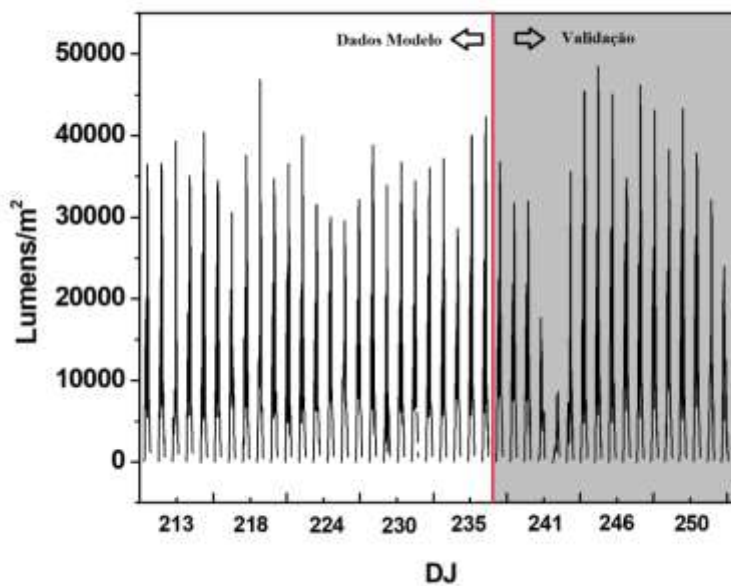
O período de medidas do experimento foi de 30 de julho de 2021 até 09 de setembro de 2021. Os dados foram separados em 2 agrupamentos: um agrupamento para se realizar a modelagem; e outro agrupamento para se realizar uma validação. Para se realizar o modelo, o período de medidas foi de 30 de julho de 2021 a 24 de agosto e 2021(modelo). O período utilizado para se realizar a validação foi de 25 de agosto de 2021 até 09 de setembro de 2021(validação).

As Figuras 5 e 6 apresentam os dados utilizados neste trabalho, durante todo o período do experimento. Os dados noturnos foram retirados respeitando-se os horários de nascer o pôr do sol. Os valores na Figura 5, em lux, apresentaram valor médio de 10668 lux, tendo como valor máximo 48555 lux. Estes valores medidos pelo sensor BHI1750FVI aparentemente estão condizentes com o esperado. Segundo Schlyter (2009) valores em lux da luz do dia estão entre 10 000 e 100 000 de um dia encoberto por nuvens até um dia ensolarado de céu limpo (lembrando que os valores de radiação solar médios dentro de

ambientes protegidos com polietileno são em média 25% menores). Também citando que o trabalho foi realizado no final do inverno, época em que a radiação solar global é menor em relação a outras épocas do ano.

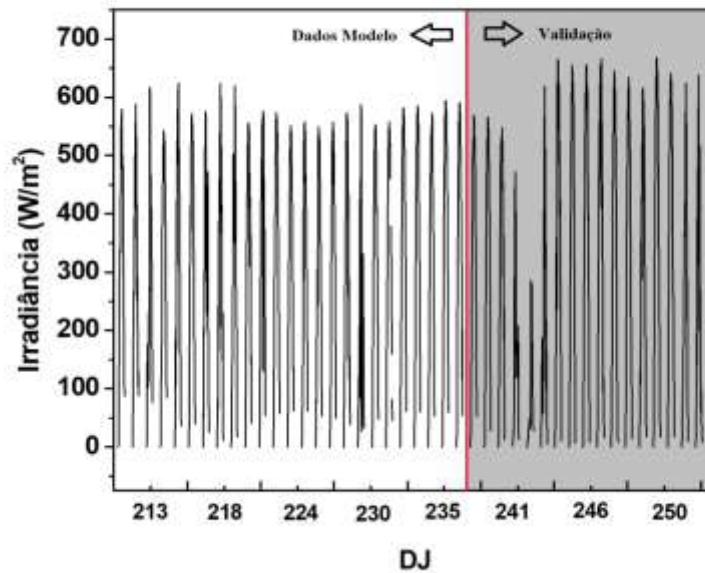
A Figura 6 apresenta a irradiância solar global obtida junto com a estação meteorológica da FCA-UNESP. Estes valores são medidos rotineiramente e apresentam boa consistência (magnitude e época do ano). O valor médio do período foi de 309,3 W/m², com valor máximo de 668 W/m². Por comparação, na localidade, no verão pode-se esperar (dentro de ambientes protegidos) por volta de 1000 W/m² como valor máximo. Os dados de irradiância serão tratados neste trabalho como referência: os sensores utilizados pela estação meteorológica da FCA-UNESP (piranômetro Eppley) tem melhor desempenho de medidas (também maior custo de aquisição). Por ser um sensor que apresenta melhor fabricação e ter seu desempenho testado e validado continuamente esta será a melhor opção de referência. Os dados do sensor BHI1750FVI foram relacionados à referência deste trabalho: a irradiância. Pela diferença na natureza das medidas (uma é física e outra depende de parâmetros da formação da imagem dentro do olho humano), a unidade referência utilizada foi a da irradiância Watt por metro quadrado.

Figura 5: Valores obtidos pelo sensor BHI1750FVI durante o período de medidas do experimento, que ocorreu de 30 de julho de 2021 até 09 de setembro de 2021. Período utilizado para o modelo: de 30/julho/2021 até 24/agosto/2021(dia juliano ou dia do ano de 211 até 236). Período utilizado para a validação: de 25/agosto/2021 até 09/setembro/2021(dia juliano ou dia do ano 237 até 252).



Fonte: Autores (2021).

Figura 6: Valores de irradiância solar global, para o interior de uma estufa de polietileno, obtidos junto com a estação meteorológica da Faculdade de ciências agrárias FCA-UNESP-BOTUCATU, durante o período de medidas do experimento, que ocorreu de 30 de julho de 2021 até 09 de setembro de 2021. Período utilizado para o modelo: de 30/julho/2021 até 24/agosto/2021(dia juliano ou dia do ano de 211 até 236). Período utilizado para a validação: de 25/agosto/2021 até 09/setembro/2021(dia juliano ou dia do ano 237 até 252).

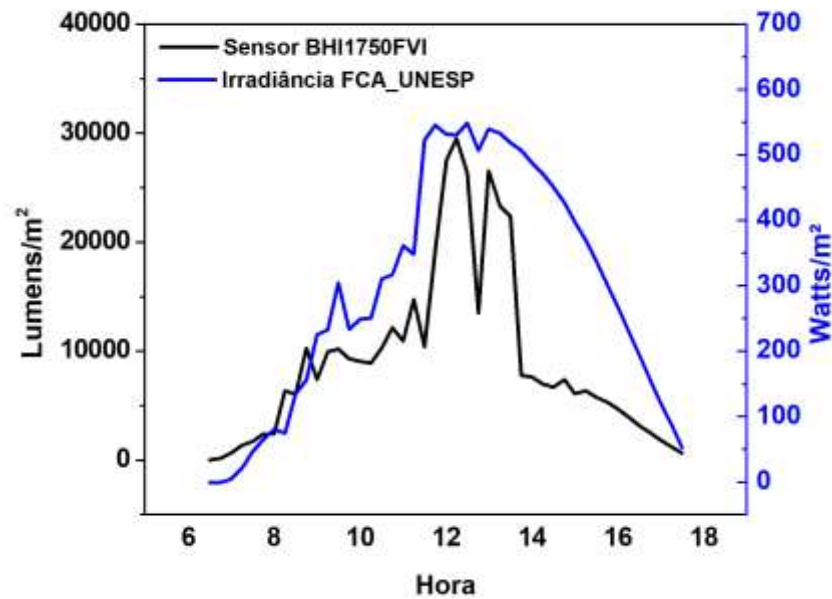


Fonte: Autores (2021).

O período de medidas, realizado no inverno, consta com a maioria de dias de céu aberto, como pode-se observar nas Figuras 5 e 6. Houve a entrada de uma frente fria durante o período de medidas, por volta do dia 242 (30 de agosto de 2021), observado na diminuição de seus valores, tanto na Figura 1 em lux como na Figura 2 em W/m^2 . Frentes frias geralmente aumentam a nebulosidade e podem causar pequena chuva nesta época do ano. Esta frente fria do dia 242 trouxe uma pequena chuva causou aumento de nebulosidade (céu encoberto).

Na Figura 7 são apresentados valores das medidas do sensor BHI1750FVI e valores de irradiância solar global obtidas junto com a estação meteorológica FCA-UNESP. As escalas nos eixos da esquerda e da direita são diferentes. Porém, mesmo as escalas sendo diferentes, as duas são lineares e os valores medidos apresentam semelhança. Os valores são menores em horas em que o ângulo zenital é maior (nascido e pôr do sol) e os valores são maiores nas horas de menor ângulo zenital (horas próximas ao meio-dia horário solar verdadeiro). Desta figura é possível se deduzir que as medidas são próximas, não idênticas. Embora haja diferença no valor, deve-se lembrar que em atividades agrárias normalmente o valor de importância não é a potência por área (valor instantâneo), mas o valor energético integrado, que representa a área abaixo da figura da curva. Na área abaixo das duas curvas (sensor BHI1750FVI e referência) é possível se observar grande proporção em que essas áreas estão sobrepostas, indicando similaridade da área das duas curvas.

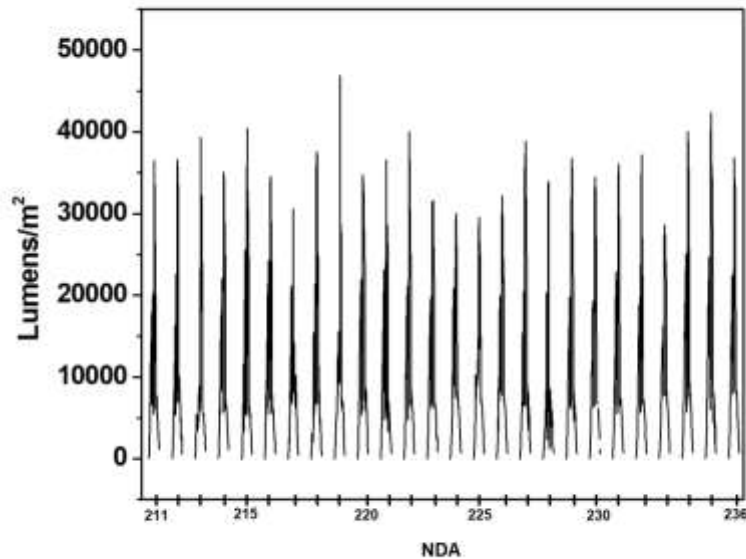
Figura 7: Comparação das medidas realizadas com o sensor BHI1750FVI com as medidas realizadas pela estação meteorológica da UNESP-FCA, durante o intervalo de um dia (13 de agosto de 2021).



Fonte: Autores (2021).

A Figura 8 apresenta os valores medidos pelo sensor BHI1750FVI durante o 1º agrupamento de dados (modelo) período de medidas do experimento, que ocorreu de 30 de julho de 2021 a 24 de agosto e 2021. Na Figura 5 os dias estão representados pelo NDA: número do dia do ano. Foram 26 dias completos de medidas, realizadas a cada 15 minutos. Os valores noturnos de medidas foram descartados, calculando-se o horário do nascer e o horário do pôr do sol na localidade em todos os dias do experimento.

Figura 8: Valores obtidos pelo sensor BHI1750FVI durante o período de medidas do experimento, que ocorreu de 30 de julho de 2021 a 24 de agosto e 2021.

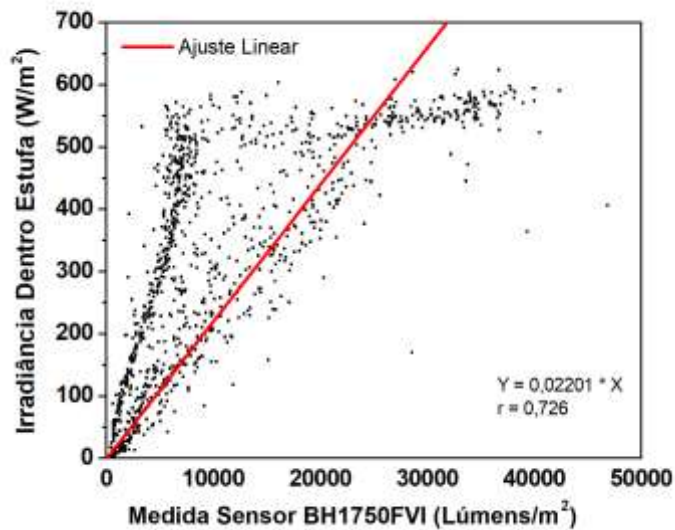


Fonte: Autores (2021).

Na correlação dos valores do sensor BHI1750FVI com a referência, foi feita uma regressão linear, para se estimar o valor esperado (o valor da radiação solar física) com base na medida do valor medido (sensor BHI1750FVI). Modelos polinomiais de várias ordens testados não apresentaram desempenho satisfatório e foram, a priori, rejeitados.

A Figura 9 apresenta a representação gráfica da regressão linear entre os valores de irradiância solar global (W/m^2) com os valores medidos pelo sensor BH1750FVI, com $N=1159$ pontos. A correlação linear direta entre as duas medidas obteve um coeficiente angular de 0,02201, com o r residual de 0,726. Foi feito o teste de significância para este coeficiente e com 95% e 99% de margem de confiança ele foi significativo em ambos (diferente de zero). Isto demonstra um desempenho razoável no modelo linear. Desta maneira a estimativa do valor de irradiância, em W/m^2 pode ser obtida com a medida do sensor BH1750FVI, multiplicado por 0,02201, com um desempenho de aproximadamente 72%.

Figura 9: Modelo linear: relação entre valores instantâneos (15 min) do sensor BH1750FVI com valores de irradiância solar global referência (estação meteorológica FCA-UNESP).



Fonte: Autores (2021).

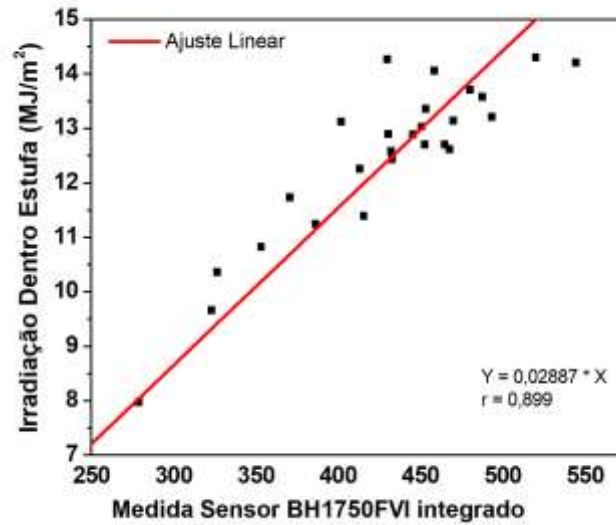
O ajuste linear, com valor r superior a 0,7 representa um modelo considerado de razoável a bom. Realizado um levantamento literário sobre esse tipo de comparação não foram encontrados registros sobre desempenho na comparação destes tipos de sensores. (Michael; Johnston & Moreno, 2020).

O espalhamento dos pontos da Figura 8 demonstra grande variabilidade dos dados. Embora o ajuste tenha tido desempenho razoável/bom, alguns pontos se afastam do modelo linear. Talvez seja possível se elevar este valor r do ajuste linear, mas isso necessitará de maior número de dados observados (regressão linear multivariada), como hora do dia, dia do ano ou mesmo temperatura e umidade. Esta abordagem não será realizada neste trabalho, ficando como sugestão para futuros trabalhos, para aprofundamento do tema.

A informação da irradiância solar global é útil em inúmeros setores da engenharia, também em outras áreas como meteorologia e física. Mas a grande informação retirada da irradiância solar global é a irradiação solar global. A irradiação solar global representa o valor energético integralizado (por unidade de área). O valor da irradiação solar global, em MJ/m², neste trabalho integrado na partição diária, representando o valor energético incidente total por unidade de área durante um dia. Este valor, representado pela área abaixo da curva da Figura 7, representa o valor de energia e é correlacionável com outras áreas que utilizam o valor energético, como a termodinâmica. Com valores energéticos pode-se prever a evaporação d'água e consequentemente melhorar o manejo de corpos hídricos; pode-se calcular valores energéticos disponíveis para produção vegetal (radiação solar PAR) (Frisina, Escobedo & Gomes, 2000); pode-se melhorar sistemas de irrigação com o melhor conhecimento da demanda hídrica (Trnka., et al 2009).

Ao se integrar valores de 15 em 15 minutos (N=1159 pontos), obteve-se 16 valores representando os 16 dias de medidas utilizados na elaboração do modelo. A integral é realizada em função do tempo, em segundos. Na referência, a irradiância em W/m² tem a unidade "segundo" eliminada, se transformando em J/m² na integral ($\times 10^{-6}$ para a unidade resultante ser MJ/m²). No sensor BH1750FVI, ao se integrar seu valor no tempo, a unidade resultante é o lux.s (lux vezes segundo)(este sensor teve seus valores integrados também na unidade de tempo "segundo")(nesta unidade também se multiplicou por 10^{-6} : além de manter a mesma metodologia, valores em lux.s apresentaram grande magnitudes em relação aos valores em MJ/m²). A relação linear entre os valores integrados da referência e do sensor BH1750FVI é apresentada na Figura 10:

Figura 10: Modelo linear: relação entre valores integrados diários do sensor BH1750FVI com valores de irradiação solar global referência (estação meteorológica FCA-UNESP).



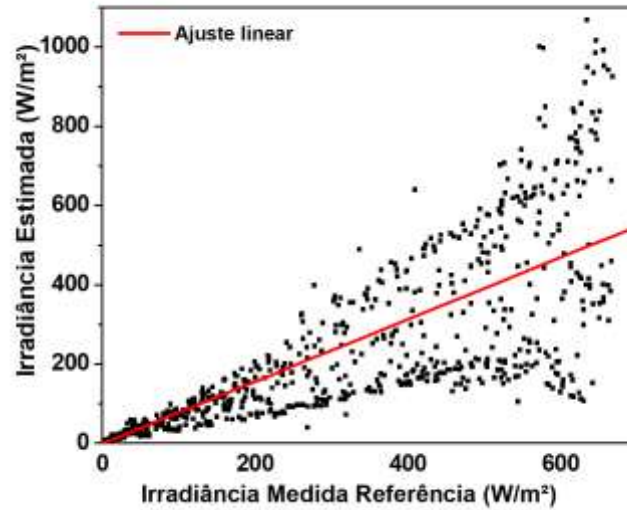
Fonte: Autores (2021).

O coeficiente angular foi de 0,02887, com r de 0,899, feito com $N=25$ pontos. Foi feito o teste de significância para este coeficiente e com 95% e 99% de margem de confiança ele foi significativo em ambos (diferente de zero). O r de aproximadamente 0,9 demonstra bom desempenho do modelo linear.

O coeficiente angular “integrado” foi próximo ao coeficiente angular “instantâneo”, que foi de 0,02201 (~4% de diferença). O coeficiente se manteve depois de integrado. A metodologia para os dois sensores (BH1750FVI e referência) no trato com os dados foi idêntico e isso provavelmente manteve a tendência do coeficiente angular. O valor r de 0,899 foi superior aos 0,726 na abordagem instantânea. Foi uma significativa melhoria no modelo. Essa melhoria no ajuste do modelo se deve provavelmente à natureza da operação matemática de integralização: valores mais altos ou valores mais baixos são diluídos na somatória de tudo. O melhor ajuste na partição diária em relação à partição instantânea demonstra um provável efeito do ângulo zenital na medida, e indiretamente no horário da medida. A informação suprimida depois da integral realizada é o tempo, que ao ser suprimido melhorou o ajuste do modelo.

Foi feita a validação dos modelos instantâneo e integral. O modelo foi gerado com dados de 30 de julho de 2021 até 24 de agosto de 2021. Com o período de 25 de agosto de 2021 até 9 de setembro de 2021 foi feita a validação: nesta etapa os dados medidos em lux com o sensor BH1750FVI são usados para estimar valores de radiação solar (irradiância na partição instantânea e irradiação na partição diária integral). Os valores estimados são comparados com os valores medidos de referência. A relação entre valores medidos e estimados da irradiância solar global estão apresentados na Figura 11:

Figura 11: Validação do modelo linear. Relação entre valores medidos e valores estimados de irradiância solar global e ajuste linear.



Fonte: Autores (2021).

A correlação direta dos valores medidos e estimados resultou em um ajuste linear com coeficiente angular de 0,7829, com valor resíduo r de 0,78. Foi feito o teste de significância para este coeficiente e com 95% e 99% de margem de confiança ele foi significativo em ambos (diferente de zero). Nesta Figura, o coeficiente angular 1 demonstraria igualdade dos eixos. O coeficiente 0,78 indica que os valores estimados estarão em média 22% inferiores à realidade da medida da irradiância, denotando uma subestimativa.

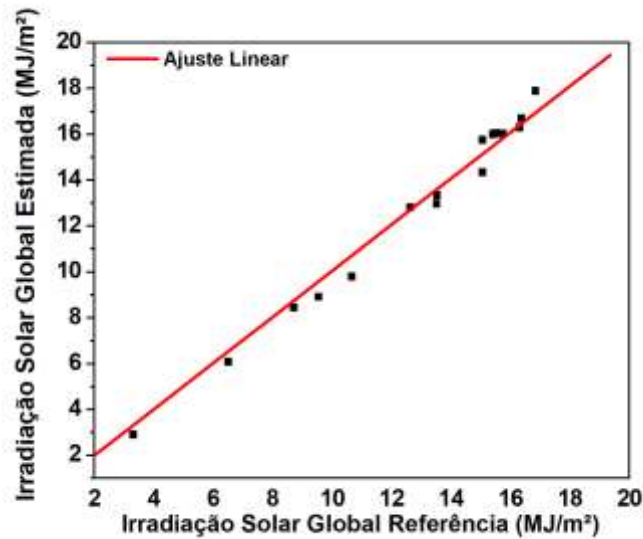
O valor médio da irradiância medida no período foi de $305,7 \text{ W/m}^2 \pm 215,1 \text{ W/m}^2$. O valor médio da irradiância estimada foi de $232,8 \text{ W/m}^2 \pm 228,0 \text{ W/m}^2$. Isto fornece uma diferença relativa de -24,1%, ou seja, o valor estimado estará subestimando a realidade medida em -24,1%. Aqui vale destacar as magnitudes dos desvios padrão: aqui eles são elevados em relação à medida pois aqui ainda constam dados instantâneos medidos de 15 em 15 minutos, e por ter valores desde zero (nascer e pôr do sol) até valores máximos os desvios se apresentam elevados.

O valor de MBE e MBE (%) calculado foi de $-72,9 \text{ W/m}^2$ e $-23,86 \%$, respectivamente. O MBE, erro simples da média indica muito bem superestimativas e subestimativas. Neste caso o indicador estatístico MBE demonstrou uma subestimativa muito próxima às demonstradas na relação linear direta (-22%) e na diferença relativa das médias (-24,1%).

O valor de RMSE e RMSE (%) calculado foi de $164,3 \text{ W/m}^2$ e $53,77 \%$. Neste caso o erro é elevado ao quadrado e não há sinal. Este indicativo RMSE representa bem o espalhamento dos dados (pontos) ao redor da curva ou reta. Não se encontrou informações sobre estes indicativos estatísticos para o sensor BH1750FVI na literatura, mas em comparações realizadas em trabalhos de radiação solar o espalhamento de 40 a 60% se apresenta como normal na partição instantânea: na partição instantânea o espalhamento sempre é maior em relação a outras partições temporais (horária, diária, mensal). Em geral, quanto maior o tempo integrado menor o espalhamento dos pontos no gráfico. Isto é um comportamento esperado pois na partição instantânea variações muito pequenas da intensa dinâmica atmosférica conseguem ser registradas. Estas pequenas variações são diluídas na integralização dos dados, reduzindo o espalhamento do modelo.

Na Figura 12 é apresentado o modelo linear da validação feita com os dados integrados (diários). Foram utilizados 16 dias nesta validação ($N=16$).

Figura 12: Validação do modelo linear. Relação entre valores medidos e valores estimados de irradiação solar global e ajuste linear.



Fonte: Autores (2021).

A correlação direta dos valores medidos e estimados resultou em um ajuste linear com coeficiente angular de 1,006, com valor resíduo r de 0,9943. Foi feito o teste de significância para este coeficiente e com 95% e 99% de margem de confiança ele foi significativo em ambos (diferente de zero). Nesta Figura, o coeficiente angular 1 demonstra igualdade dos eixos e bom ajuste do modelo na validação, uma vez que os valores medidos como referência foram atingidos, com elevado coeficiente de correlação residual r , de 0,9943.

A média da irradiação solar global referência foi de $12,79 \text{ MJ/m}^2 \pm 3,98 \text{ MJ/m}^2$. A média dos valores estimados foi de $12,77 \text{ MJ/m}^2 \pm 4,33 \text{ MJ/m}^2$. A diferença relativa foi de -0,1%, demonstrando que os valores estimados ainda subestimam os valores reais medidos, porém em uma magnitude muito menor (menor que 1%).

O valor de MBE e MBE% calculado foi de $-0,017 \text{ MJ/m}^2$ e $-0,13 \%$, respectivamente. Os valores MBE demonstram que a diferença entre os valores medidos e estimados foi da ordem de 0,1%.

O valor de RMSE e RMSE% calculado foi de $0,55 \text{ MJ/m}^2$ e $4,31 \%$. Os valores de RMSE e consequentemente o espalhamento foram baixos: como já discutido os valores de radiação solar instantâneos quando integrados no tempo conseguem diluir eventos dinâmicos atmosféricos, diminuindo o espalhamento dos pontos em torno do modelo.

4. Conclusão

Há viabilidade no uso do sensor BH1750FVI, porém com restrições. Seu uso na estimativa da irradiância solar global apresentou coeficiente angular de 0,2201 e $r=0,726$ tendendo a subestimar os dados em 22-23%. Na validação os valores de MBE, MBE%, RMSE e RMSE% foram, respectivamente, $-72,9 \text{ W/m}^2$, $-23,86 \%$, $164,3 \text{ W/m}^2$ e $53,77 \%$.

Na estimativa da irradiação solar global(integrada) o sensor BH1750FVI apresentou um desempenho muito bom: o coeficiente angular foi de 0,22884 e $r = 0,899$; os valores da validação MBE, MBE%, RMSE e RMSE% foram, respectivamente $-0,017 \text{ MJ/m}^2$, $-0,13 \%$, $0,55 \text{ MJ/m}^2$ e $4,31 \%$.

Há necessidade de mais estudos com o desempenho do sensor com maior tempo de dados para se averiguar a sazonalidade das medidas; por suas propriedades o sensor BH1750FVI tem capacidade de integrar outros equipamentos de medidas da radiação solar, como tubos solarimétricos, sendo possível mais estudos.

Referências

- Arduino (2019a). *Wire Library*. <https://www.arduino.cc/en/reference/wire>
- Arduino (2019b). *SD Library*. <https://www.arduino.cc/en/reference/SD>
- Badamasi, Y. A. (2014). *The working principle of an Arduino* [Conference presentation abstract]. 2014 11th International Conference on Electronics, Computer and Computation (ICECCO), Abuja, Nigeria. <https://doi.org/10.1109/ICECCO.2014.6997578>
- Chai, T., & Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE). *Geoscientific Model Development Discussions*, 7(1), 1525-1534.
- Dal Pai, E., Escobedo, J. F., & Martin, D. (2013). Radiações UV, PAR e IV em estufa de polietileno. *Revista Brasileira de Energia Solar*, 4(1), 1.
- Dallas Semiconductor (2015). *DS1302 Trickle-Charge Timekeeping Chip*. Maxim Integrated Products. <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS1302.pdf>
- Frisina, V. A., Escobedo, J. F., & Gomes, E. N. (2000). *Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa (PAR) em estufa de polietileno* [Proceedings]. III Encontro de Energia no Meio Rural, Campinas, SP, Brasil. http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MS_C000000022_00000_02000_56&lng=en&nrm=iso
- Github (2015). *ArduinoRTClibrary*. <https://github.com/chrisfryer78/ArduinoRTClibrary>
- Github (2020). *ESP8266 Community Forum*. <https://github.com/esp8266/Arduino/releases/tag/2.7.4>
- Github (2021). *BH1750*. <https://github.com/claws/BH1750>
- Kato, T. (2016). Prediction of photovoltaic power generation output and network operation. *Integration of Distributed Energy Resources in Power Systems*, 77-108.
- Leens, F. (2009). An introduction to I2C and SPI protocols. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 12(1), 8-13.
- McCluney, W. R. (2014). *Introduction to radiometry and photometry*. Artech House.
- Michael, P. R., Johnston, D. E., & Moreno, W. (2020). A conversion guide: solar irradiance and lux illuminance. *Journal of Measurements in Engineering*, 8(4), 153-166.
- Pereira, A. S., Shitsuka, D. M., Parreira, F. J. & Shitsuka, R. (2018). Metodologia da pesquisa científica. UFSM.
- Pizzatto, M., Zamadei, T., Miranda, S. A., Souza, A. P., & Zolin, C. (2019). *Estimativa da radiação fotossinteticamente ativa com base na radiação global na transição cerrado-amazônia* [Anais]. XXI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, Catalão, Goiás, Brasil. CBAGRO, UFGO. <http://ainfo.cnpq.br/ainfo/rapa.br/digital/bitstream/item/210804/1/2019-cpamt-zolin-estimativa-radiacao-fotossintecamente-ativa-base-radiacao-global-transicao-cerrado-amazona.pdf>
- ROHM Semiconductor (2009). *Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC* (Technical Note: 09046EBT01). <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/338083/ROHM/BH1750FV1/98/1/BH1750FV1.html>
- Schlyter, P. (2009). *Radiometry and photometry in astronomy*. <http://stjarnhimlen.se/comp/radfaq.html>
- Srivastava, P., Bajaj, M., & Rana, A. S. (2018). *IOT based controlling of hybrid energy system using ESP8266* [Conference presentation abstract]. 2018 IEEMA Engineer Infinite Conference (eTechNXT), New Delhi, India. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ETECHNXT.2018.8385294>
- Trnka, M., Eitzinger, J., Kapler, P., Dubrovský, M., Semerádová, D., Žalud, Z., & Formayer, H. (2007). Effect of estimated daily global solar radiation data on the results of crop growth models. *Sensors*, 7(10), 2330-2362.
- Yang, D., Wang, X., & Kang, J. (2018). *SWOT Analysis of the development of green energy industry in China: taking solar energy industry as an example* [Conference presentation abstract]. 2018 2nd International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), Singapore, Asia. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ICGEA.2018.8356320>
- Zhao, L., Xia, J., Xu, C. Y., Wang, Z., Sobkowiak, L., & Long, C. (2013). Evapotranspiration estimation methods in hydrological models. *Journal of Geographical Sciences*, 23(2), 359-369.