

Outliers Detection in a Quality Control Procedure for Measurements of Solar Radiation

M. Calça, M. Raniero, D. Fernando, S. Rodrigues, and A. Dal

Abstract—The correct design of Photovoltaic Systems and Solar Heating Systems should be based on solar irradiance measurements (global, sky-diffuse and direct-beam) acquired on land surface. This paper presents a quality control procedure for global (I_G), sky-diffuse (I_D) and direct-beam (I_B) solar irradiance measurements on horizontal surface, considering the application of a impossible values identification method with predefined thresholds and a statistical techniques for outliers detection (identifying measures suspected to be correct). To evaluate and quantify the occurrence of physically impossible and suspected correct measures, it was also proposed to apply this procedure in six years of measurements (2005 to 2010) of the Solar Radiometry Laboratory of the School of Agricultural Sciences of the São Paulo State University (UNESP) of Botucatu (SP) - Brazil. The procedure was based on the International Commission on Illumination (CIE) fundamental quality control of solar measurements and statistical ranges according to the different sky cover classification (K_T). The results indicated that the dataset used for the demonstration contained approximately 1.00%, 1.49% and 1.88% of global, sky-diffuse and direct-beam irradiance values on horizontal surfaces, respectively, flagged as invalid by the procedure. This amount represents measures physically impossible or suspected to be correct (outlier). The techniques for outliers detection, proposed in this paper, in combination with the CIE quality control criteria, should be applied in solar measurements to provide greater security for future investigations pointing the valid and invalid measures.

Index Terms—Energy measurement, Solar energy, Radiometry, Statistical analysis.

I. INTRODUÇÃO

A MENSURAÇÃO da irradiância solar na superfície terrestre possibilita que órgãos públicos, entidades acadêmicas e organizações não governamentais planejem, gerenciem e avaliem recursos energéticos renováveis de maneira mais adequada [1].

M. V. C. Calça, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, São Paulo, Brasil (mcontes@outlook.com).

M. R. Raniero, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, São Paulo, Brasil (matheus.raniero@hotmail.com).

D. M. Z. Fernando, Universidade Pedagógica de Moçambique, Faculdade de Ciências Naturais e Matemática, Chimoio, Manica, Moçambique (dmzeca@gmail.com).

S. A. Rodrigues, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, São Paulo, Brasil (sergio.rodrigues@unesp.br).

A. Dal Pai, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, São Paulo, Brasil (dal.pai@unesp.br).

Possibilitando então, a investigação do perfil solar de uma determinada região e permitindo avaliar seu potencial quanto ao aproveitamento térmico (energia termossolar), dimensionamento de sistemas distribuídos e de plantas de energia fotovoltaica [2], capacidade de geração de biomassa para a produção de eletricidade, além do aquecimento passivo ou ativo de residências e de edificações em centros urbanos [3].

A irradiância solar é medida, normalmente, por meio do uso de piranômetros e/ou pireliômetros e pode ser classificada em direta (I_B), quando incide diretamente do disco solar, difusa (I_D), quando sofre influência dos fenômenos físicos de reflexão ou espalhamento na atmosfera terrestre, e global (I_G), quando é a soma das duas componentes anteriores [4], conforme ilustra a Fig. 1.

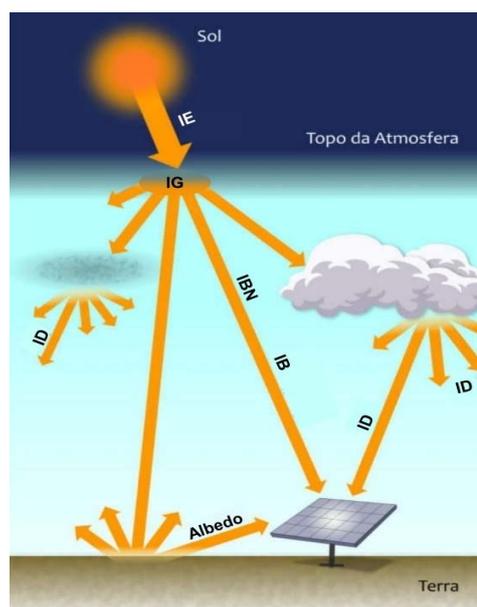


Fig. 1. Irradiância Solar e Suas Componentes [4].

O piranômetro é um instrumento com um campo de visão de 180° que cobre a faixa espectral de 250 a 3500nm [5]. Pode ser constituído por um sensor de termopilha, baseado no efeito termoelétrico, ou de fotodiodo, baseado no efeito fotovoltaico. É o aparelho destinado a medir a irradiância solar global, quando não há obstrução do campo de visão, e a difusa, quando há supressão do feixe solar direto. Enquanto o pireliômetro é um instrumento que tem uma estreita abertura que permite captar somente a irradiância solar oriunda diretamente do disco solar, cobrindo uma faixa espectral de 250 a 3000nm. É constituído de um sensor de termopilha e deve ser acoplado a

um dispositivo eletrônico de rastreamento do movimento solar, acompanhando sua posição ao longo do dia [4].

Medir a irradiância solar não é uma tarefa fácil, em virtude dos erros e das incertezas contidas no processo. Em sua essência qualquer tipo de medida contém incertezas, pois os instrumentos utilizados em sua aquisição podem produzir erros sistemáticos e/ou aleatórios [6]. Com relação à irradiância solar se tem a presença de erros de instrumentação, causados pelas propriedades técnicas da construção do sensor, e de operação, causados pela manutenção precária no local de aquisição dos parâmetros [3, 7]. Esses erros possuem impacto direto sobre as medidas, tornando-as, na maioria dos casos, suspeitas de estarem incorretas. Necessitando, dessa forma, da aplicação de métodos computacionais de controle de qualidade, que devem averiguar a confiabilidade do parâmetro medido e fornecer suporte técnico, principalmente, à organizações que investigam os recursos renováveis da energia para conversão em eletricidade.

Diferentes procedimentos de controle de qualidade foram propostos por institutos meteorológicos, agências reguladoras ou pesquisadores científicos independentes ao longo dos anos [8]. Em geral, procedimento dessa natureza, são compostos por um ou mais métodos, que podem ser classificados em quatro diferentes categorias [9]: (1) Verificação dos limites possíveis e raros; (2) Comparação das componentes solares medidas; (3) Comparação com modelos de estimativa e (4) Análise gráfica exploratória. Apesar da existência de todas essas categorias, em geral, aplica-se somente o método de verificação dos limites possíveis das irradiâncias solares, pois ele permite encontrar leituras impossíveis de ocorrer, prevendo a sinalização de erros grosseiros nas medidas. Porém, quando se tem a necessidade de utilizar conjuntos de dados mais confiáveis torna-se conveniente a junção e aplicação sequencial dos diferentes métodos citados.

Os procedimentos mais utilizados atualmente são os da Comissão Internacional de Iluminação - CIE [10] e o da Rede de Radiação em Superfície Terrestre - BSRN pertencente ao Centro Mundial de Monitoramento de Radiação - WRMC [11]. Existem outras propostas, mais atuais, como a do Instituto Meteorológico Real da Bélgica [12] e a da Rede Austríaca de Monitoramento da Radiação [13]. Além de procedimentos implementados por pesquisadores independentes, que assim como os anteriores tem sua importância [3, 14-19].

O objetivo deste estudo é propor um procedimento de controle de qualidade para bases de dados de irradiâncias solares global (I_G), difusa (I_D) e direta (I_B) medidas em superfície terrestre horizontal, considerando, a aplicação de um método de identificação de leituras impossíveis, com limiares pré-definidos, e técnicas estatísticas para a averiguação de medidas suspeitas de estarem corretas (*outliers*). Para avaliar e quantificar a ocorrência de medidas fisicamente impossíveis e suspeitas de estarem corretas foi proposto também a aplicação deste procedimento em seis anos de medidas solares (2005 a 2010) do Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu (SP) - Brasil.

O procedimento proposto neste estudo diferencia-se de outros estudos da área, conforme citação anterior, de duas

maneiras.

Primeiramente, pela razão de analisar as medições solares instantâneas (W/m^2) em função do padrão de cobertura de céu em uma escala de leitura sub-horária, não prejudicando, desta forma, todas as medidas adquiridas durante um dia todo, em consequência de algumas leituras incertas. Em segundo lugar pela capacidade de identificar pequenas variações, ao longo de uma série de medidas, não captadas pelo método fundamental de controle de qualidade (limites inferiores e superiores fisicamente possíveis), suprimindo a limitação que este último tem em identificar medidas errôneas, com valor real maior do que o obtido.

Na seção II são apresentados os conceitos fundamentais sobre a radiação e a energia solar. Na seção III é apresentada a estação de monitoramento dos parâmetros solares utilizados no estudo e o clima da cidade onde está localizada. Na seção IV é apresentada a instrumentação utilizada para obter as medidas utilizadas para a quantificação do método. Na seção V é apresentada a proposta com uma nova metodologia, utilizando parâmetros estatísticos, para o controle das irradiâncias solares medidas na superfície terrestre. Na seção VI são apresentados os resultados quantificados da metodologia já aplicada e as discussões a seu respeito. Por fim, na seção VII é apresentada a conclusão acerca do estudo.

II. RADIAÇÃO SOLAR

Radiação Solar é a energia proveniente do sol que incide sobre a superfície terrestre a partir de um fenômeno de natureza eletromagnética, propagando-se por meio de movimentos ondulatórios. É a energia que influencia a dinâmica da atmosfera, o clima e as outras fontes energéticas do planeta Terra. Sua atividade é decorrente das reações de fusão nuclear dos átomos de hidrogênio para formar o hélio [20, 21, 4].

A aquisição de medidas terrestres da irradiância solar (energia incidente por unidade de área) e de suas componentes, direta e difusa, é uma tarefa essencial no sentido de avaliar a disponibilidade do recurso solar disponível em uma localidade específica, analisar as propriedades e a distribuição dos constituintes atmosféricos e verificar medidas oriundas de satélites [12, 22]. É uma ocupação que guarda grande interesse em estudos de climatologia da radiação solar, análises e avaliações de técnicas de aproveitamento e conversão da energia e modelagem estatística [4].

A distribuição espectral da radiação solar que chega a superfície terrestre é função da irradiância extraterrestre (energia que atinge o topo da atmosfera) e dos elementos atmosféricos. Quando a radiação é interceptada pela atmosfera, seus diferentes comprimentos de onda interagem de formas distintas com os componentes atmosféricos, através dos processos físicos de reflexão, absorção e espalhamento. Essa interação tem grande importância em aplicações de concentradores fotovoltaicos, fotossíntese, ciclo hidrológico, refletividade de superfícies, dinâmica da atmosfera e oceanos, iluminação passiva e ativa e em processos fotoquímicos [20, 4]. Tornando importante a aquisição e o monitoramento de parâmetros solares.

III. LABORATÓRIO DE RADIOMETRIA SOLAR

O estudo foi desenvolvido no Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agronômicas (Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”) de Botucatu, São Paulo, Brasil. Este laboratório atua no monitoramento das componentes solares há mais de 20 anos no Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia. Compreende diferentes experimentos nas dependências do câmpus. No entanto, o interesse deste estudo está na Estação Experimental de Radiometria Solar (latitude 22,85° sul, longitude 48,45° oeste e altitude de 786 metros) posicionada em uma área rural rodeada por grama verde curta horizontalmente homogênea [23].

Botucatu é uma cidade situada na região centro-sul do estado de São Paulo (SP) distante 235 km da capital. Tem 1482.642 km² de área territorial e população estimada em 144 mil habitantes no ano de 2018 [24]. É um município caracterizado principalmente por atividades agrícolas intensas, com grandes plantações de cana-de-açúcar e eucalipto, e atividades industriais moderadas [25, 26]. Os critérios climáticos de Köppen classificam Botucatu como Cwa (mesotérmico) com clima temperado quente. Compreendendo inverno seco (junho a agosto) e verão quente e úmido (dezembro a fevereiro). De forma que tem amplas variações na temperatura do ar ao longo do ano, devido ao extenso gradiente de altitude, entre 400 e 500 metros na região baixa e 700 e 900 metros na alta [27, 23].

Mediante a série climática da Estação Meteorológica pertencente a mesma instituição de realização deste estudo, a temperatura média do ar para o mês mais frio (julho) se registra em torno de 17 °C e para o mês mais quente (fevereiro) próximo a 23 °C. A umidade relativa média do ar se registra para o mês menos úmido (agosto) em torno de 61% e para o mês mais úmido (janeiro) perto de 76%. A precipitação atinge seus maiores valores no verão e primavera (estação úmida), com ocorrência máxima no mês de janeiro (em torno de 300 mm), devido à grande evaporação de superfícies molhadas e aquecidas. Os menores valores de precipitação são obtidos no inverno e outono (estação seca), com ocorrência mínima no mês de agosto (em torno de 40 mm), devido ao encontro de massas frias e secas vindas do sul com as massas quentes e úmidas vindas do norte. Consequentemente a estação úmida é a que detém maior índice de nebulosidade, em virtude das características da cobertura de céu no período [28, 26].

IV. INSTRUMENTAÇÃO

Foi utilizado um piranômetro Eppley PSP sem obstrução dos raios solares (Fig. 1a) para a obtenção da irradiância solar global (I_G) e outro, de mesmo modelo, acoplado a um anel sombreador (Fig. 1b), de fabricação própria [29], para a obtenção da difusa (I_D). Foi usado também um pireliômetro Eppley NIP acoplado a um rastreador solar Eppley ST3 (Fig. 1c) para a obtenção da irradiância direta em incidência solar normal (I_{BN}). Durante o período de leitura dos parâmetros solares, inspeções diárias de manutenção foram realizadas. Anualmente foi realizada a calibração de todos os instrumentos, no intuito de contornar os aspectos oriundos de sua deterioração.

As medidas da irradiância difusa foram corrigidas a partir do

fator isotrópico [29] e do fator anisotrópico [26]. O fator isotrópico corrige as leituras devido à obstrução de uma parcela da irradiância solar causada pela geometria da construção do anel, enquanto o fator anisotrópico corrige alguns efeitos causados pelos componentes atmosféricos. Essas correções são necessárias para garantir que a leitura captada é a quantidade correta da irradiância solar difusa sobre aquela localidade.

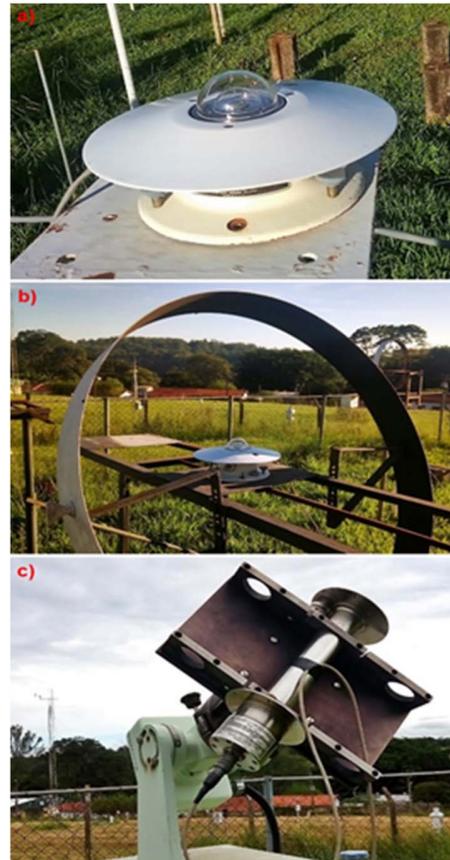


Fig. 2. Instrumentos de Aquisição das Medidas Solares.

Após a aquisição das leituras da irradiância direta em incidência normal seus valores foram multiplicados pelo cosseno do ângulo zenital (Eq. 1). Essa é uma etapa necessária para a obtenção da irradiância direta projetada em uma superfície horizontal [20].

$$Z = \text{sen}(\delta) \text{sen}(\phi) + \text{cos}(\delta) \text{cos}(\phi) \text{cos}(\omega) \quad (1)$$

onde δ é a declinação solar (Eq. 2), ϕ é a latitude geográfica do local (-22,85°) e ω é o ângulo horário do sol (Eq. 3).

$$\delta = \frac{0,3964 + 3,631 \text{sen}(F) - 22,97 \text{cos}(F) + 0,03838 \text{sen}(2F) - 0,3885 \text{cos}(2F) + 0,07659 \text{sen}(3F) - 0,1587 \text{cos}(3F) - 0,01021 \text{cos}(4F)}{2} \quad (2)$$

$$\omega = (12 - Hd) 15 \quad (3)$$

tal que F é igual a $360 D/365$, onde D é o dia do ano (decorrido do 1° ao 365°) e Hd é a hora e décimo de hora do dia no formato decimal.

Os piranômetros das irradiâncias global e difusa possuem, respectivamente, intervalo espectral de 295 a 2800nm, com fatores originais de calibração (sensibilidade) de 8,13 e 8,17 $\mu\text{Vm}^2/\text{W}$. O pireliômetro da irradiância direta possui intervalo espectral de 250 a 3000nm e fator original de calibração de 7,73 $\mu\text{Vm}^2/\text{W}$. Todas as medidas foram registradas por meio de um dispositivo de aquisição de dados (Cr23x *Micrologger*®) da *Campbell Scientific* em escala temporal de 5 minutos na unidade de W/m^2 . Ou seja, cada medida obtida neste intervalo representa uma média de 60 leituras adquiridas a cada 5 segundos (tempo de varredura). Totalizando 288 leituras ao longo de um dia.

V. MÉTODO DE IDENTIFICAÇÃO DE MEDIDAS ISOLADAS (OUTLIERS)

Conforme apontado anteriormente, a aplicação de procedimentos de controle de qualidade de irradiâncias solares é um pré-requisito que garante a confiabilidade dos parâmetros adquiridos quanto à futuras investigações do recurso energético solar [12]. Tratando-se de bases de dados sub-horárias, onde a frequência de aquisição das leituras implica em maiores volumes de parâmetros solares medidos, a aplicação desse tipo de procedimento é necessária. Pois as incertezas contidas no processo de mensuração afetam as leituras. Os principais problemas que causam essas incertezas são: o efeito do cosseno; seletividade espectral; desalinhamento do anel sombreador; estabilidade do instrumento; excremento de aves; orvalho e poeira na cúpula do sensor; nivelamento incorreto da instrumentação; mal funcionamento do cabemanejo; falhas de calibração do instrumento e desligamento repentino do registrador de medidas [7].

Os métodos fundamentais em um procedimento de controle de qualidade são caracterizados por critérios que determinam os limites fisicamente possíveis para as leituras de irradiância solar. Isto é, são responsáveis por verificar se ocorreu um evento impossível que afetou as medidas (valores abaixo ou acima do limite físico permitido), sinalizando estes casos como erros grosseiros de leitura [30]. Para tais propósitos foram aplicados os filtros de checagem absoluta da Comissão Internacional de Iluminação - CIE [10], representados pelos critérios 1, 2 e 3 da Tab. I, que tem como parâmetro base a irradiância solar extraterrestre (Eq. 4) em superfície horizontal [21].

$$IE = \frac{1367}{E_{xc}^2} \cos(Z) \quad (4)$$

onde E_{xc} é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre, isto é, a distância média entre a Terra e o Sol no decorrer dos dias do ano (Eq. 5).

$$E_{xc} = \frac{1 - 0,0009467 \sin(F) - 0,01671 \cos(F) - 0,0001489 (2F) - 0,00002917 \sin(3F) - 0,0003438 \cos(4F)}{(5)}$$

No sentido de complementar os métodos de verificação de medidas impossíveis da irradiância solar, é proposto por este

estudo a aplicação de um método para a identificação de medidas isoladas, acometidas, em geral, por um evento externo questionável [12]. Tecnicamente uma medida foi categorizada como isolada (*outlier*) quando sua leitura se desviou demasiadamente de outras da série de medidas [31]. Tornou-se suspeita de estar correta. Esse tipo de evento foi identificado com base na construção de um intervalo de variação dos parâmetros estatísticos das medidas, representado pelos critérios 4, 5 e 6 da Tab. I.

TABELA I
CRITÉRIOS DO CONTROLE DE QUALIDADE DAS MEDIDAS SOLARES

Nº	Critério de Qualidade	Irradiância Solar
1	$0 < I_G \leq (1,2 I_E)$	Global (I_G)
2	$0 < I_D \leq (0,8 I_E)$	Difusa (I_D)
3	$0 \leq I_B \leq I_E$	Direta (I_B)
4	$\mu_{IG} - (2,57 \sigma_{IG}) \leq I_G \leq \mu_{IG} + (2,57 \sigma_{IG})$	Global (I_G)
5	$\mu_{ID} - (2,57 \sigma_{ID}) \leq I_D \leq \mu_{ID} + (2,57 \sigma_{ID})$	Difusa (I_D)
6	$\mu_{IB} - (2,57 \sigma_{IB}) \leq I_B \leq \mu_{IB} + (2,57 \sigma_{IB})$	Direta (I_B)

O método de identificação de medidas isoladas, principal item deste estudo, foi criado por meio da construção de intervalos em que as medidas poderiam variar para serem consideradas corretas. Nessa construção foram utilizados parâmetros estatísticos, como a média (μ_{IG} , μ_{ID} e μ_{IB}) e o desvio padrão (σ_{IG} , σ_{ID} e σ_{IB}) das irradiâncias solares global, difusa e direta, respectivamente, para cada dia da série de medidas, considerando somente o período diurno. Além desses parâmetros é necessário o nível de confiança para a construção dos intervalos. O nível de confiança indica a probabilidade de uma medida solar estar entre os limites inferiores e superiores de confiabilidade [6]. Procedimentos estatísticos semelhantes [10, 3, 7] utilizaram intervalos de 68,20% ($\mu \pm 1,00\sigma$) a 99,70% ($\mu \pm 3,00\sigma$) de confiança (Tab. II) com base em parâmetros climáticos. Onde μ representa a média populacional e σ o desvio padrão. Níveis de confiança menores são mais restritivos, sinalizando maiores quantidades de medidas como isoladas (contendo incertezas quanto à seu correto valor), enquanto os maiores são mais abrangentes, identificando menores quantidades [7].

TABELA II
INTERVALOS ESTATÍSTICOS DE CADA NÍVEL DE CONFIANÇA CONSIDERANDO A DISTRIBUIÇÃO NORMAL DE PROBABILIDADE [32]

Intervalo	Nível de Confiança
$\mu \pm 1,00\sigma$	68,20%
$\mu \pm 2,00\sigma$	95,40%
$\mu \pm 2,57\sigma$	99,50%
$\mu \pm 3,00\sigma$	99,70%

Com o objetivo de aperfeiçoar a identificação de medidas impossíveis (CIE) esse intervalo utilizando parâmetros estatísticos foi aplicado em função das quatro classificações da cobertura de céu. Fator que tem grande influência nos valores

de irradiância que atingem a superfície terrestre. Permitindo que seja analisado de maneira mais correta os limites inferiores e superiores em que as medidas devem estar para seus valores serem considerados confiáveis. A classificação da cobertura de céu (Tab. III) é encontrada por meio do índice de transmissividade atmosférica (K_T). Esse índice é obtido a partir da razão entre a irradiância global medida e a irradiância extraterrestre calculada (I_G/I_E).

TABELA III
CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO CÉU [25]

Nº	Classificação	Transmissividade Atmosférica
1	Nublado	$0 \leq K_T < 0,35$
2	Parcialmente Nublado	$0,35 \leq K_T < 0,55$
3	Aberto	$0,55 \leq K_T < 0,65$
4	Parcialmente Aberto	$0,65 \leq K_T < 1$

Não é recomendado, após a aplicação deste método, apagar qualquer medida incorreta ou isolada da base de dados. Dessa forma aconselha-se, no processamento das informações, atribuir um sinalizador IMP às medidas apontadas como impossíveis, através dos critérios fundamentais (CIE), um sinalizador SUSP às leituras demarcadas como suspeitas de estarem incorretas, através dos critérios estatísticos e um sinalizador VLD às medidas que passaram por todos os níveis do controle de qualidade, caracterizando-as como medidas corretas e aptas à serem utilizadas. Quando se tem como finalidade a modelagem de sistemas solares (térmicos ou fotovoltaicos) é aconselhável não utilizar as leituras sinalizadas (IMP e SUSP), pois seus valores não possuem um nível correto de confiabilidade.

VI. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O conjunto de dados utilizado para avaliar e quantificar leituras impossíveis e suspeitas de estarem incorretas por serem isoladas das demais (outliers) continha 302.885 medidas da irradiância global (I_G), 289.726 da irradiância difusa (I_D) e 236.948 da irradiância direta (I_B), ambas em superfície terrestre horizontal. Sua disposição perante os anos (Tab. IV) revela que no ano de 2007 houve a menor quantidade de registros da irradiância global, enquanto que em 2009 ocorreu a menor quantidade de valores da irradiância difusa e em 2010 não houve mensuração da irradiância direta devido a uma adversidade técnica (engrenagem com defeito) com o dispositivo de rastreamento dos raios solares (Eppley ST3). Em média foram registradas aproximadamente 50.480, 48.280 e 39.490 medidas, por ano. Esse tipo de análise é importante de ser feita, antes da aplicação do procedimento de controle de qualidade, a fim de se saber todos os eventos ocorridos com o conjunto de medidas.

As irradiâncias global, difusa e direta possuíam, respectivamente, um total de 106.684, 98.226 e 85.513 valores medidos em condições de céu nublado, 61.748, 59.915 e 46.321 valores medidos em condições de céu parcialmente nublado, 41.209, 40.309 e 30.015 valores medidos em condições de céu parcialmente aberto e 93.244, 91.276 e 75.099 valores medidos

em condições de céu aberto. Esta contagem deverá sintetizar, ao final do processo, a quantidade de medidas sinalizadas pelo procedimento de controle de qualidade.

TABELA IV
QUANTIDADE DE MEDIDAS DAS IRRADIÂNCIAS SOLARES POR ANO

Ano	I_G (Global)	I_D (Difusa)	I_B (Direta)
2005	51.354	50.790	48.283
2006	51.635	51.049	50.639
2007	47.889	46.821	45.981
2008	50.518	45.708	48.168
2009	50.848	45.406	43.877
2010	50.641	49.952	0
Total	302.885	289.726	236.948

O controle de qualidade proposto, subdividido em dois métodos (critérios fundamentais e identificação de medidas isoladas), permitiu analisar todos os registros do conjunto de medidas, de forma a validar as leituras corretas e sinalizar as incorretas ou incertas. Na Tab. V pode-se visualizar o resultado da aplicação dos critérios fundamentais do controle de qualidade, que sinalizaram as medidas com valores impossíveis de serem obtidos na superfície terrestre (IMP), devido ao efeito de atenuação na atmosfera (absorção ou espalhamento), e dos critérios que utilizaram os parâmetros estatísticos para detecção de medidas isoladas, sinalizando-as como leituras suspeitas de estarem corretas (SUSP), em consequência de seus valores se afastarem consideravelmente de outros em condições iguais de cobertura de céu. As medidas que não foram sinalizadas como impossíveis ou suspeitas de estarem corretas foram sinalizadas (Tab. V) como medidas válidas (VLD), ou seja, com valores confiáveis para utilização.

TABELA V
RESULTADO DOS CRITÉRIOS FUNDAMENTAIS DE QUALIDADE E DE IDENTIFICAÇÃO DE MEDIDAS ISOLADAS EM FUNÇÃO DA CLASSIFICAÇÃO DA COBERTURA DO CÉU

Classificação da Cobertura de Céu	Irradiância Solar	Quantidade de Medidas (Sinalizadas)		
		IMP	SUSP	VLD
Nublado	Global (I_G)	0	1.122	105.562
	Difusa (I_D)	29	1.033	97.164
	Direta (I_B)	0	2.829	82.684
Parcialmente Nublado	Global (I_G)	0	304	61.444
	Difusa (I_D)	9	493	59.413
	Direta (I_B)	0	721	45.600
Parcialmente Aberto	Global (I_G)	0	280	40.929
	Difusa (I_D)	3	536	39.770
	Direta (I_B)	0	233	29.782
Aberto	Global (I_G)	400	829	92.015
	Difusa (I_D)	467	1.548	89.261
	Direta (I_B)	0	586	74.436

Nas classificações de céu nublado e parcialmente nublado a irradiância direta (I_B) foi a que apresentou a maior quantidade de medidas sinalizadas como impossíveis ou suspeitas de estarem corretas em relação às demais, totalizando 2.829 e 721

leituras, respectivamente. Nas classificações de céu parcialmente aberto e aberto a irradiância difusa (I_D) foi a que apresentou a maior quantidade de medidas sinalizadas, também, como impossíveis ou suspeitas de estarem corretas, compreendendo um total de 539 e 2.015 leituras, respectivamente. Foi constatado que todas as medidas da irradiância global, e a maioria das medidas da difusa, sinalizadas como impossíveis romperam os limites físicos para cima. Ou seja, apresentaram um valor medido superior ao real valor irradiado pelo sol. Esse tipo de ocorrência (rompimento superior de um limite físico possível) representa que um valor captado não sofreu influência da atmosfera terrestre (atenuação), apresentando um valor consideravelmente superior ao que realmente atinge a superfície terrestre, de acordo com a literatura científica [4, 20, 21].

Os critérios fundamentais de controle de qualidade, em um contexto geral, sinalizaram menos medidas do que os critérios estatísticos. Os critérios estatísticos foram os que mais contribuíram para a identificação de medidas inválidas. Neste caso, suspeitas de estarem corretas, uma vez que os valores medidos se afastam consideravelmente das outras leituras em um mesmo padrão de cobertura de céu. O termo inválida citado ao longo deste estudo é utilizado para se referir a valores de irradiância impossíveis ou suspeitos de estarem corretos. Na Tab. VI é possível ter uma visão geral do resultado de cada critério de controle de qualidade por meio da quantidade de valores válidos (VLD), aqueles que passaram por todos os critérios, e inválidos (IVLD), impossíveis ou suspeitos. É importante observar que existem 77 valores da irradiância direta sinalizados como inválidos que não aparecem na Tab. V, isto ocorreu pois para os dias de mensuração de todos esses valores não houve a medição da irradiância global, prejudicando então a obtenção das condições de cobertura de céu, de acordo com o método utilizado.

TABELA VI
RESULTADO DOS CRITÉRIOS FUNDAMENTAIS DE QUALIDADE E DE IDENTIFICAÇÃO DE MEDIDAS ISOLADAS

Critério de Controle de Qualidade	VLD	IVLD
1 $0 < I_G \leq (1,2 I_E)$	302.588	400
2 $0 < I_D \leq (0,8 I_E)$	289.429	508
3 $0 \leq I_B \leq I_E$	236.871	77
4 $\mu_{I_G} - (2,57 \sigma_{I_G}) \leq I_G \leq \mu_{I_G} + (2,57 \sigma_{I_G})$	299.950	2.638
5 $\mu_{I_D} - (2,57 \sigma_{I_D}) \leq I_D \leq \mu_{I_D} + (2,57 \sigma_{I_D})$	285.608	3.821
6 $\mu_{I_B} - (2,57 \sigma_{I_B}) \leq I_B \leq \mu_{I_B} + (2,57 \sigma_{I_B})$	232.502	4.369

Os resultados apresentados demonstram que o método fundamental de controle de qualidade em colaboração com os intervalos estatísticos permitem uma melhor identificação de medidas solares inválidas. Em comparação, como forma de demonstrar que as medidas sinalizadas realmente podem ser apontadas como incorretas na série, foram plotados gráficos para análise exploratória. Essa abordagem, também utilizada para o controle de qualidade de medições, prevê a utilização de diagramas que permitem visualizar o comportamento dos valores das irradiâncias ao longo do período de estudo. Esse

comportamento se refere a ocorrência dos maiores valores no verão e primavera e dos menores no inverno e outono. Dessa forma, valores que se distanciam consideravelmente desse comportamento (medidas isoladas), podem estar incorretos ou incertos devido à algum evento específico (erro instrumental ou operacional). Esses diagramas não fazem parte do procedimento proposto, porém, fornecem um estímulo visual para a identificação de medidas errôneas.

Pode-se observar (Fig. 3) o comportamento dos valores nos diagramas das irradiâncias global (I_G), difusa (I_D) e direta (I_B) ao longo do período de mensuração. De forma que nos círculos em vermelho se destacam dos valores que, consideravelmente, se desviam dos demais em uma mesma condição de medida (picos irrealistas). Nesses diagramas pode-se perceber que há um comportamento sazonal dos valores medidos para ambas as irradiâncias, conforme descrito anteriormente.

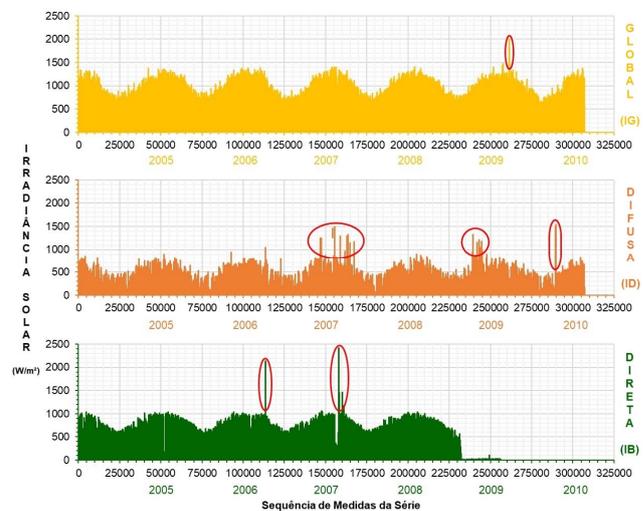


Fig. 3. Distribuição Sequencial das Medidas Antes da Aplicação do Procedimento de Controle de Qualidade.

Em meados de 2010 foi possível observar um pico irreal (demarcação em vermelho na Fig. 3) para a irradiância global (I_G). Com relação a irradiância difusa (I_D) é possível observar uma maior quantidade de picos (demarcações em vermelho na Fig. 3), distribuídos em sua maior parte no ano de 2007, além dos anos de 2009 e 2010. Por fim, os maiores picos (demarcações em vermelho na Fig. 3) foram observados para a irradiância direta (I_B), concentrados nos anos de 2006 e 2007. Em meados de 2009 a série de medidas apresentou problemas com relação à direta, onde foi possível constatar uma quantidade grande de observações sem as variações habituais. Além dessas observações, lacunas foram identificadas nas medidas da irradiância difusa e direta, principalmente na transição do ano de 2007 para o ano de 2008, antecedendo o maior pico constatado em toda a série.

Os critérios fundamentais de controle de qualidade da CIE em colaboração com os intervalos estatísticos de identificação de medidas isoladas (suspeitas de estarem corretas) em função da cobertura de céu reduziram consideravelmente os picos irrealistas nas medidas. Neste caso, para efeito de comparação, as medidas sinalizadas como impossíveis ou suspeitas de

estarem corretas foram desconsideradas na construção do gráfico, permitindo um melhor entendimento do efeito dos critérios de controle de qualidade. Portanto, foi possível constatar que os picos irrealistas sumiram quando comparados os diagramas antes (Fig. 3) e após (Fig. 4) a aplicação do procedimento.

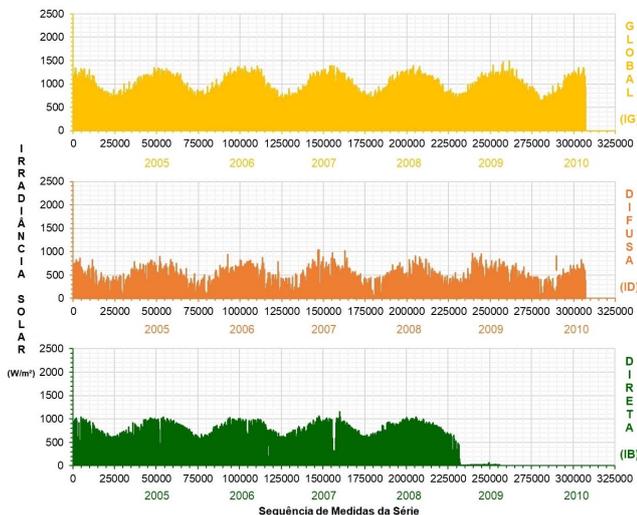


Fig. 4. Distribuição Sequencial das Medidas na Após Aplicação do Procedimento de Controle de Qualidade.

Foi possível apontar após o controle de qualidade que a irradiância global atingiu um valor máximo de aproximadamente 1498 W/m^2 em 04/02/2010 às 13h, enquanto a irradiância difusa atingiu um valor máximo aproximado de 1044 W/m^2 em 28/11/2007 às 12h, por fim a irradiância direta totalizou um máximo de aproximadamente 1169 W/m^2 em 22/02/2008 às 13h. Esses valores relatados foram obtidos desconsiderando as medidas impossíveis e as suspeitas de estarem corretas.

Diante dos fatos e números descritos contata-se que da quantidade total de medidas da irradiância global aproximadamente 1,00% foram sinalizadas como inválidas pelos critérios fundamentais de controle de qualidade e dos intervalos estatísticos, do total de medidas da irradiância difusa 1,49% das leituras foram sinalizadas como inválidas, bem como das leituras da irradiância direta 1,88% foram sinalizadas como inválidas (Tab. VII).

TABELA VII
RESULTADO DO PROCEDIMENTO

Irradiância	Total (N)	Inválidas (N)	Válidas (N)
Global (I_G)	302.885	3.038	299.950
Difusa (I_D)	289.726	4.329	285.608
Direta (I_B)	236.948	4.446	232.502
Irradiância	Total (%)	Inválidas (%)	Válidas (%)
I_G	100	$\pm 1,00$	$\pm 99,00$
I_D	100	1,49	98,51
I_B	100	1,88	98,12

VII. CONCLUSÃO

Valores das irradiâncias solares (I_G , I_D e I_B) medidos na superfície terrestre podem ser aplicados à diferentes campos de pesquisa, principalmente, em estudos relacionados à sistemas termossolares e fotovoltaicos. No entanto, é comum tais valores conterem erros inerentes a instrumentação ou condições de mensuração, invalidando os valores captados. Neste estudo foram apresentados dois métodos (critérios fundamentais de controle de qualidade e intervalos estatísticos) utilizados pelo Laboratório de Radiometria Solar da Faculdade de Ciências Agrônômicas (Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”) de Botucatu para a identificação de medidas impossíveis e isoladas (suspeitas de estarem corretas/cotendo incertezas do processo de aquisição). Diante de sua aplicação pode-se levantar as seguintes constatações:

- Aproximadamente 99,00%, 98,51% e 98,12% das medidas das irradiâncias global, difusa e direta em superfície horizontal, respectivamente, foram validadas pelo procedimento;
- Os critérios estatísticos se apresentaram mais restritivos que os fundamentais no controle de qualidade, ou seja, sinalizaram uma maior quantidade de medidas impossíveis ou suspeitas de estarem corretas;
- Os critérios estatísticos permitem a detecção de medidas isoladas das outras em uma mesma condição de cobertura de céu. Possibilitando a identificação de pequenas variações não captadas pelos critérios fundamentais de controle de qualidade;
- Esse procedimento pode ser utilizado por institutos meteorológicos, agências reguladoras ou pesquisadores científicos independentes a fim de caracterizar medidas impossíveis de ocorrerem, suspeitas de estarem corretas e validar as demais leituras de uma série.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP - Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo e à CAPES - Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, “Energia Solar,” in *Atlas de Energia Elétrica do Brasil*, 2nd ed. Brasília, Brazil: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005, pp. 29-42.
- [2] S. Pashiardis and S. A. Kalogirou, “Quality control of solar shortwave and terrestrial longwave radiation for surface radiation measurements at two sites in Cyprus,” *Renewable Energy*, v. 96, pp. 1015-1033, 2016.
- [3] S. Younes, T. Claywell and T. Muneer, “Quality control of solar radiation data: Present status and proposed new approaches,” *Energy*, v. 30, pp. 1533-1549, 2005.
- [4] E. B. Pereira et al., *Atlas Brasileiro de Energia Solar*, 2nd ed. São José dos Campos, Brazil: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2017, 79 p.
- [5] A. Driemel et al., “Baseline Surface Radiation Network (BSRN): structure and data description (1992–2017),” *Earth System Science Data*, v. 10, pp. 1491-1501, 2018.
- [6] A. Albertazzi and A. R. Sousa, “Erro de Medição,” in *Fundamentos da Metrologia Científica e Industrial*, 2nd ed. Barueri, Brasil: Manole, 2018, pp. 35-79.
- [7] T. Muneer, S. Younes and S. Munawwar, “Discourses on solar radiation modeling,” *Renewable and Sustainable Energy*, v. 11, pp. 551-602, 2007.

- [8] R. Urraca et al., "Quality control of global solar radiation data with satellite-based products," *Solar Energy*, v. 158, pp. 49-62, 2017.
- [9] A. Ohmura et al., "Baseline Surface Radiation Network (BSRN/WCRPP): new precision radiometry for climate research," *Bulletin of the American Meteorological Society*, v. 79, pp. 2115-2136, 1998.
- [10] P. R. Tregenza et al., "Data Quality Control, Processing and Dissemination," in *Guide to recommended practice of daylight measurement*. Vienna, Austria: Commission Internationale de l'éclairage, 1994, pp. 13-36.
- [11] C. N. Long and E. G. Dutton, "BSRN Global Network Recommended QC Tests v. 2.0," in *BSRN Technical Report*. Bremerhaven, Germany: PANGAEA, 2002. Available: <https://epic.awi.de/id/eprint/30083/>.
- [12] M. Journée and C. Bertrand, "Quality control of solar radiation data within the RMIB solar measurements network," *Solar Energy*, v. 85, pp. 72-86, 2011.
- [13] M. Olefs et al., "The Austrian radiation monitoring network ARAD - best practice and added value," *Atmospheric Measurement Technique*, v. 158, pp. 1513-1531, 2016.
- [14] M. Geiger et al., "A Web Service for Controlling The Quality of Measurements of Global Solar Radiation," *Solar Energy*, v. 73, pp. 475-780, 2002.
- [15] T. Muneeb and F. Fairouz, "Quality control of solar radiation and sunshine measurements - lessons learnt from processing worldwide databases," *Building Services Engineering Research and Technology*, v. 151, pp. 151-166, 2002.
- [16] C. N. Long and T. Shi, "An Automated Quality Assessment and Control Algorithm for Surface Radiation Measurements," *The Open Atmospheric Science Journal*, v. 2, pp. 23-37, 2008.
- [17] G. Shi et al., "Data Quality Assessment and the Long-Term Trend of Ground Solar Radiation in China," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 17, pp. 1006-1016, 2008.
- [18] C. A. Gueymard and J. A. Ruiz-Ariaz, "Extensive worldwide validation and climate sensitivity analysis of direct irradiance predictions from 1-min global irradiance," *Solar Energy*, v. 128, pp. 1-30, 2016.
- [19] S. Pashiardis and S. A. Kalogirou, "Quality control of solar shortwave and terrestrial longwave radiation for surface radiation measurements at two sites in Cyprus," *Renewable Energy*, v. 96, pp. 1015-1033, 2016.
- [20] M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, Ontario, Canada: Academic Press Canada, 1983, 390 p.
- [21] M. A. Varezão-Silva, *Meteorologia e Climatologia*, v. 2. Recife, Brasil: 2006, 449 p. Available: http://www.icat.ufal.br/laboratorio/clima/data/uploads/pdf/METEOROLOGIA_E_CLIMATOLOGIA_VD2_Mar_2006.pdf.
- [22] WMO, "Measurement of Radiation," in *Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, n. 8, 2012, pp. 175-215.
- [23] T. J. Rossi et al., "Global, diffuse and direct solar radiation of the infrared spectrum in Botucatu / SP / Brazil," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, pp. 448-459, 2018.
- [24] IBGE. (2017, Jan.). *Panorama da Cidade de Botucatu*. Available: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/botucatu/panorama>.
- [25] J. F. Escobedo et al., "Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil," *Applied Energy*, v. 86, pp. 299-309, 2009.
- [26] A. Dal Pai et al., "MEO shadowing method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover," *Renewable Energy*, v. 99, pp. 754-763, 2016.
- [27] M. B. P. Silva et al., "Performance of the Angstrom-Prescott Model (A-P) and SVM and ANN techniques to estimate daily global solar irradiation in Botucatu/SP/Brazil," *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, v. 160, pp. 11-23, 2017.
- [28] G. Codato et al., "Global and diffuse solar irradiances in urban and rural areas in southeast Brazil," *Theoretical and Applied Climatology*, v. 93, pp. 57-73, 2008.
- [29] A. P. Oliveira, A. J. Machado and J. F. Escobedo, "A New Shadow-Ring Device for Measuring Diffuse Solar Radiation at the Surface," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 19, pp. 698-708, 2002.
- [30] WMO, "Guidelines on Quality Control Procedures for Data from Automatic Weather Stations," in *Commission for Instrument and Methods of Observation OPAG-Surface*, Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2004, pp. 1-10.
- [31] Y. F. Wang et al., "A New Outlier Detection Method Based on Optics," *Sustainable Cities and Society*, v. 45, pp. 197-212, 2019.
- [32] A. C. Carrilho and M. Galo. (2017, jul). Remoção de Pontos Espúrios em Dados LiDAR Aerotransportado a Partir da Análise Estatística das

Altitudes. Presented at IV SBG2017 Annual Meeting. [Online]. Available: http://docs.fct.unesp.br/departamentos/cartografia/eventos/2017_IV_SBG/_artigos/2017_SBG_CTIG_paper_92.pdf.



Agrometeorológica e Energia Solar).

Marcus Vinicius Contes Calça é Graduado em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela FATEC de Botucatu (2017). Mestre (2019) e Doutorando em Agronomia na área de Energia na Agricultura pela Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu. Atua na área de Ciência da Computação (Banco de Dados e Engenharia de Software) e Energia na Agricultura (Monitoramento, Processamento, Controle de Qualidade e Instrumentação



Matheus Rodrigues Raniero é Graduado em Análise e Desenvolvimento de Sistemas pela Faculdade de Tecnologia de Botucatu (2017). Mestrando em Agronomia na área de Energia na Agricultura da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu. Tem experiência na área de Ciência da Computação (Processamento Digital de Imagens) e Energia na Agricultura (Medidas de Insolação e Modelagem de Radiação Solar).



Agronomia, com ênfase em Didática de Física e Agrometeorologia.

Domingos Mário Zeca Fernando tem Graduação em Ensino de Física pela Universidade Pedagógica de Moçambique (2011). Mestrado em Agronomia na área de Energia na Agricultura pela Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP de Botucatu (SP) - Brasil (2018). Docente Assistente Universitário na Universidade Pedagógica - Moçambique, delegação de Manica. Tem experiência na área de Ensino de Física e Física Aplicada a Geração de Energias Renováveis e



Estatística Aplicada e pesquisa de mercado, atuando principalmente nos seguintes temas: amostragem, modelagem estatística, estatística multivariada e aplicação da estatística em bioprocessos para tratamento de resíduos e geração de energia.

Sérgio Augusto Rodrigues possui bacharelado (1997) e mestrado em Estatística (2003) pela Universidade Federal de São Carlos (UFSCar). É pós-graduado em Administração com ênfase em Marketing pela Universidade São Francisco - campus São Paulo (2000) e doutor pelo programa de Energia na Agricultura da Faculdade de Ciências Agrônomicas - Universidade Estadual Paulista (UNESP Botucatu). Tem experiência na área de Probabilidade e Estatística com ênfase em



Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia. Participa também lecionando e orientando na pós-graduação em Agronomia, nos programas Energia na Agricultura e Irrigação e Drenagem. Possui experiência nas áreas de energias renováveis, processos de conversão de energia solar e biomassa, modelos de estimativa da radiação solar e da fotossinteticamente ativa, além de estudos sobre métodos de medidas da radiação solar difusa.

Alexandre Dal Pai possui graduação em Física pela Universidade de São Paulo (1998), mestrado em Agronomia (Energia na Agricultura) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2001) e doutorado em Agronomia (Energia na Agricultura) pela Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (2005). Atualmente é docente da Faculdade de Ciências Agrônomicas da UNESP/Botucatu, onde leciona as disciplinas de física do curso de graduação em