

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta tese/dissertação será disponibilizado somente a partir de 05/01/2023.

ANGELO FERACIN NETO

**MÉTODO DE MEDIDA DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO: INFLUÊNCIA DE
ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NA MEDIDA DA
IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA**

Botucatu

2021

ANGELO FERACIN NETO

**MÉTODO DE MEDIDA DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO: INFLUÊNCIA DE
ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NA MEDIDA DA
IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA**

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agronômicas da UNESP
Câmpus de Botucatu, para obtenção do
título de Doutor em Agronomia (Energia
na Agricultura).

Orientador (a): Prof. Dr. Alexandre Dal Pai

Botucatu

2021

F345m	Feracin Neto, Angelo Método de medida do anel de sombreamento MEO : influência de aspectos construtivos (raio e largura) na medida da irradiância solar difusa / Angelo Feracin Neto. -- Botucatu, 2021 60 p. : il., tabs., fotos, mapas Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu Orientador: Alexandre Dal Pai 1. Radiometria. 2. Radiação difusa. 3. Anel de sombreamento. I. Título.
-------	---

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MÉTODO DE MEDIDA DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO: INFLUÊNCIA DE ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NA MEDIDA DA IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA

AUTOR: ANGELO FERACIN NETO

ORIENTADOR: ALEXANDRE DAL PAI

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. ALEXANDRE DAL PAI (Participação Virtual) 
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. SERGIO AUGUSTO RODRIGUES (Participação Virtual) P. 
Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agronômicas de Botucatu - UNESP

Prof. Dr. ÉRICO TADAO TERAMOTO (Participação Virtual) P. 
Engenharia e Pesca / UNESP - Campus Experimental de Registro

Prof. Dr. EDSON LUIS BASSETTO (Participação Virtual) P. 
Engenharia Elétrica / Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof. Dr. ADRIANO DE SOUZA MARQUES (Participação Virtual) P. 
Engenharia da Computação / Instituto Federal de São Paulo

Botucatu, 05 de janeiro de 2021

A minha esposa Cristiane e a meu filho Fernando,

Dedico.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus e a Nossa Senhora.

A minha esposa Cristiane pelo apoio e dedicação.

A meu filho Fernando por me inspirar a ser um ser humano melhor.

Ao Prof. Dr. Alexandre Dal Pai, pela orientação, ensinamentos e paciência.

RESUMO

A primeira parte deste trabalho estuda a influência da largura e do raio do anel de sombreamento MEO (Melo-Escobedo-Oliveira) na medida da irradiância difusa. São analisados dados obtidos através de dois anéis com dimensões diferentes que possuem a mesma razão largura/raio (b/R). Os dados foram obtidos da estação radiométrica da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual de São Paulo UNESP - Botucatu. O desempenho de cada anel é analisado em função do índice de transmissividade (Kt). Na segunda parte foi realizado um estudo comparando medidas de irradiação difusa do anel MEO com a profundidade óptica de aerossóis (AOD) do sensor MODIS dos satélites TERRA e ACQUA.

Palavras-chave: Radiação difusa. Anel de sombreamento MEO. Anisotropia.

ABSTRACT

The first part of this work studies the influence of the width and radius of the MEO shading ring (Melo-Escobedo-Oliveira) in the measure of diffuse irradiance. Data obtained through two rings with different dimensions that have the same width/radius (b/R) ratio are analyzed. The data were obtained from the radiometric station of the Faculty of Agronomic Sciences of the State University of São Paulo UNESP - Botucatu. The performance of each ring is analyzed according to the transmissivity index (Kt). In the second part, a study was carried out comparing diffuse irradiation measurements of the MEO ring with the aerosol optical depth (AOD) of the MODIS sensor of the TERRA and ACQUA satellites.

Keywords: Diffuse radiation. MEO shading ring. Anisotropy.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	15
REVISÃO DE LITERATURA.....	18
CAPÍTULO 1 - INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NAS MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA REALIZADAS PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO.....	29
1.1 INTRODUÇÃO.....	29
1.2 METODOLOGIA.....	31
1.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
1.4 CONCLUSÃO.....	42
REFERÊNCIAS.....	43
CAPÍTULO 2- ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DE PROFUNDIDADE ÓPTICA DE AEROSSÓIS (AOD) DOS SATÉLITES TERRA/ACQUA COM MEDIDAS DE RADIAÇÃO DIFUSA OBTIDAS PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO PARA A REGIÃO DE BOTUCATU-SP.....	45
2.1 INTRODUÇÃO.....	45
2.2 METODOLOGIA.....	47
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	49
2.4 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	54
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	57
REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO.....	59

INTRODUÇÃO GERAL

O Sol é a principal fonte de energia que movimenta e controla o clima do planeta. Essa radiação atravessa o espaço e chega à superfície terrestre na forma de luz e calor.

A energia solar é amplamente aproveitada como fonte de calor em concentradores, placas de aquecimento de água, secagem de grãos, estufas, etc. Nos últimos anos tem-se observado um aumento significativo na instalação de sistemas fotovoltaicos destinados a geração de energia elétrica. O atual desenvolvimento tecnológico permitiu a redução dos custos tornando a energia fotovoltaica mais competitiva em relação a outras fontes.

A luz visível que chega à superfície pode ser dividida em duas componentes: radiação direta e radiação difusa. A radiação direta é a parcela da radiação solar que não sofre interferência da atmosfera chegando à superfície em uma incidência normal ao círculo solar. A radiação difusa é a parcela da radiação solar que sofre espalhamento principalmente devido à presença de gases, vapor d'água e aerossóis (IQBAL, 1983).

A componente direta da radiação solar é mais energética quando comparada a radiação difusa, pois não sofre desvios em sua trajetória, sendo de grande importância nas áreas que envolvem a geração de energia fotovoltaica e em sistemas de aquecimento. Mas devido ao alto custo e as dificuldades operacionais, a medição da radiação direta torna-se inviável em muitos casos (DAL PAI et al., 2015).

Uma alternativa para a obtenção da irradiação direta é o método da diferença. A irradiação global é a soma da irradiação direta mais a difusa. Para obter-se a irradiação direta, basta subtrair a irradiação difusa da global. A irradiação global é comumente medida em estações meteorológicas e a irradiação difusa pode ser obtida por métodos que utilizam um aparato que bloqueia a incidência de radiação direta no sensor. Entre os métodos de sombreamento destaca-se o anel de sombreamento. Um anel, devidamente posicionado, projeta uma sombra sobre um piranômetro (instrumento usado para medir a irradiação solar), bloqueando a incidência da radiação direta no sensor. No entanto, além de bloquear a radiação direta, o anel acaba bloqueando uma parcela do céu. Isto causa uma subestimação das medidas de radiação difusa.

No intuito de mitigar este efeito, costuma-se aplicar um fator de correção às medidas de radiação obtidas com o uso do anel de sombreamento. O cálculo dos fatores de correção vinculados as principais montagens com anel de sombreamento, considera um espalhamento isotrópico da radiação difusa na atmosfera. Esses cálculos são baseados em fatores geométricos (largura e raio do anel) e fatores geográficos (declinação solar e latitude).

A correção isotrópica, aplicada isoladamente, mostra-se insuficiente em situações de atmosfera com características anisotrópicas. Isso ocorre, pois às condições anisotrópicas (normalmente encontradas na atmosfera) não são computadas no cálculo do fator de perda. Estudos apontam que a anisotropia está vinculada a localidade e a condições temporais. Uma opção para melhorar as medidas obtidas pelo método do anel de sombreamento é o uso de correção isotrópica somada a anisotrópica (DAL PAI et al., 2016).

A primeira parte deste trabalho estuda a diferença apresentada entre os dados de irradiância difusa de dois anéis de sombreamento MEO com dimensões diferentes, mas que possuem a mesma razão b/R (largura/Raio). São investigadas as razões que levam os anéis a apresentarem valores de irradiância diferentes mesmo após suas medidas serem submetidas à correção isotrópica, além de estudar a influência da anisotropia da radiação difusa nas medidas.

Os objetivos são:

- Demonstrar que as dimensões dos anéis influenciam as medidas da radiação difusa no anel de sombreamento MEO, apesar de se manter a mesma razão b/R ;
- Determinar se a cobertura de céu influencia as medidas de irradiação difusa dos anéis;
- Confirmar se as diferenças apresentadas nas medidas de irradiação difusa estão ligadas as dimensões nos anéis;

A segunda parte do trabalho apresenta uma análise comparativa entre a profundidade óptica dos aerossóis (AOD - *Aerosol Optical Depth*) dos satélites TERRA e ACQUA com o fator de correção anisotrópico.

O principal objetivo é:

- Verificar a ligação da profundidade óptica de aerossóis com as perdas devido à anisotropia no anel de sombreamento MEO.

As análises são baseadas em dados de radiação solar do ano 2000 a 2007 da estação radiométrica da Faculdade de Ciências Agronômicas da Universidade Estadual de São Paulo UNESP- Botucatu. As medidas dos dois anéis são comparadas a uma medida de referência (diferença entre a radiação global (horizontal) e a direta projetada na horizontal). Os dados foram separados em função da cobertura de céu para a estimação dos parâmetros do modelo. Ferramentas estatísticas foram utilizadas no estudo e análise dos dados.

O trabalho está dividido conforme descrito a seguir.

A Introdução apresenta uma revisão bibliográfica com os principais conceitos relacionados à radiação difusa. São abordados os tipos de espalhamento (*Rayleigh* e *Mie*), os métodos de medidas da radiação difusa, índice de transmissividade, e indicadores estatísticos.

No Capítulo 1 é apresentado um artigo intitulado "INFLUÊNCIA DOS ASPECTOS CONSTRUTIVOS (RAIO E LARGURA) NAS MEDIDAS DE IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA REALIZADAS PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO".

O Capítulo 2 apresenta um artigo intitulado "ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS DE PROFUNDIDADE ÓPTICA DE AEROSSÓIS (AOD) DOS SATÉLITES TERRA/ACQUA COM MEDIDAS DE RADIAÇÃO DIFUSA OBTIDAS PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MEO PARA A REGIÃO DE BOTUCATU-SP".

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objeto de estudo o anel de sombreamento MEO. Foi investigada a influência dos aspectos construtivos (raio e largura) na medida da irradiância solar difusa. Medidas de radiação difusa obtidas de dois anéis com dimensões diferentes foram comparadas com a radiação difusa de referência.

O desempenho de cada anel foi analisado em função do índice de transmissividade K_t . Os resultados indicam que independente da cobertura de céu as dimensões dos anéis influenciaram as medidas da irradiância difusa, apesar de se manter a mesma razão (b/R) entre eles.

Foi observado que o anel com menores dimensões tem menos perdas quando comparado ao anel maior. Portanto o anel maior barra uma parcela maior de radiação difusa devido à anisotropia da radiação.

A diferença encontrada entre os fatores de correção anisotrópicos corresponde à diferença entre os raios e as larguras dos dois anéis.

Foi realizada uma validação com dois anos de dados previamente separados. A correção anisotrópica entregou medidas com desvios médios (MBE) menores que 1% em ambos os métodos (sob todas as coberturas ou considerando diferentes faixas de K_t). Houve diminuição do espalhamento (RMSE) em ambos os anéis quando comparadas com as medidas que sofreram somente correção isotrópica.

O segundo trabalho envolveu um anel de sombreamento MEO. Medidas anuais de radiação difusa realizadas com o anel de sombreamento MEO foram comparadas com a profundidade óptica de aerossóis (AOD) do sensor MODIS dos satélites TERRA/ACQUA da NASA no período de 2001 a 2007.

Verificou-se que um aumento do AOD, e consequentemente da carga de aerossóis na atmosfera, não implicou (em média) a um acréscimo das perdas do anel MEO. A influência da profundidade óptica de aerossóis sobre o fator de correção anisotrópico depende da transmissividade atmosférica.

A baixa transmissividade atmosférica atenua a incidência de radiação diminuindo o efeito anisotrópico causado pelos aerossóis. Por outro lado, o aumento da transmissividade potencializa a interação entre a radiação e os aerossóis aumentando a anisotropia e as perdas no anel de sombreamento MEO. O comportamento anômalo apresentado entre a AOD e o fator de correção

anisotrópico necessita ser melhor investigado. Estudos com diferentes partições de tempo devem ser considerados.

REFERÊNCIAS DA INTRODUÇÃO

- BATLLES, F.J.; OLMO, F.J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. **On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements**. Solar Energy, Volume 54, Issue 2, Pages 105-114, ISSN 0038-092X, 1995.
- CAMPILLO, Carlos; FORTES, Rafael; PRIETO, Maria. **Solar Radiation Effect on Crop Production**. 10.5772/34796, 2012.
- DRUMMOND, A. J. On the measurement of sky radiation. Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie, Serie B, 7, pp. 413–436, 1956.
- DAL PAI, Alexandre. **Anisotropia da irradiância solar difusa medida pelo método de sombreamento melo-escobedo: fatores de correção anisotrópicos e modelos de estimativa**. 2005. 74 folhas. Tese - UNESP – Campus de Botucatu - SP, 2005.
- DAL PAI, A.; ESCOBEDO, J. F.; DAL PAI, E.; NAIMAITE, B. N.. **Desempenho dos Métodos de Medida da Radiação Solar Difusa: Método do Anel de Sombreamento E Método do Disco de Sombreamento**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 19, pp11.67-11.76, ISSN 2314-1433, 2015.
- DAL PAI, Alexandre; ESCOBEDO, João Francisco; DAL PAI, Enzo; OLIVEIRA, Amauri Pereira de; SOARES, Jacyra Ramos; CODATO, Georgia. **MEO shadowring method for measuring diffuse solar irradiance: Corrections based on sky cover**. Renewable Energy, Volume 99, Pages 754-763, ISSN 0960-1481, 2016.
- ESCOBEDO, J. F.; GOMES, E. N.; OLIVEIRA, A. P.; SOARES, J. **Modeling hourly and daily fractions of UV, PAR and NIR to global solar radiation under various sky conditions at Botucatu, Brazil**. Applied Energy, Volume 86, Issue 3, 2009, Pages 299-309. doi:10.1016/j.apenergy.2008.04.013
- IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.
- KASTEN, F.; DEHNE, K.; BRETTSCHEIDER, W. **Improvement of Measurement of Diffuse Solar Radiation**. In: Palz W. (eds) Solar Radiation Data. Solar Energy R&D in the European Community Series F, vol 2. Springer, Dordrecht. 1983.
- KUDISH, A. I.; EVSEEV, E. G. **The assessment of four different correction models applied to the diffuse radiation measured with a shadow ring using global and normal beam radiation measurements for Beer Sheva, Israel**. Solar Energy, Volume 82, Issue 2, 2008, Pages 144-156. ISSN 0038-092X, doi:10.1016/j.solener.2007.06.006.
- LEBARON, B. A.; MICHALSKY, J. J.; PEREZ, R. **A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions**. Solar Energy, 44(5), 249–256. doi:10.1016/0038-092x(90)90053-f. 1990.
- LENZ, Lucas Carvalho. **Modelos de correção da medida da irradiância difusa pelo método do disco de sombreamento**. 2020. 46 páginas. Tese - UNESP - Campus de Botucatu - SP, 2020.

MAKRIDES, George, *et al.* **Potential of photovoltaic systems in countries with high solar irradiation.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 14, Issue 2, Pages 754-762, ISSN 1364-0321, 2010.

MARTÍN, Miguel de Simón-, Montserrat Díez-Mediavilla, Cristina Alonso-Tristán. **Shadow-band radiometer measurement of diffuse solar irradiance: Calculation of geometrical and total correction factors.** Solar Energy, Volume 139, 2016, Pages 85-99, ISSN 0038-092X, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.026>.

MELO, J. M. D.; ESCOBEDO, J. F. **Medida da radiação solar difusa.** In: **Energias Limpas em Progreso, VII Congresso Ibérico de Energia Solar, Vigo, Espanha. Anais International Solar Energy Society, v. 1, 1994.**

MUCHOW, R.C., SINCLAIR, T.R. and BENNETT, J.M., **Temperature and Solar Radiation Effects on Potential Maize Yield across Locations.** Agron. J., 82: 338-343. doi:10.2134/agronj1990.00021962008200020033x, 1990.

OLIVEIRA, A.P.; ESCOBEDO, J.F.; MACHADO, A.J. **A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface.** J. Atmos. Ocean. Technol. Boston 19, 698-708, 2002.

ROBINSON, H.; STOCH, L. **Sky radiation and measurements and corrections.** Journal of Applied Meteorology, v.3, p.179-81, 1964.

RUIZ, G.; Bandera, C. **Validation of Calibrated Energy Models: Common Errors.** **Energies**, 10(10), 1587. doi:10.3390/en10101587, 2017.

ZAMADEI, Tamara et al. **Estimativas da Radiação Difusa Diária com Base na Transmissividade Atmosférica e Insolação na Transição Cerrado-Amazônia.** Revista Brasileira de Climatologia, [S.l.], v. 23, out. 2018. ISSN 2237-8642. Disponível em: <<https://revistas.ufpr.br/revistaabclima/article/view/48354/36097>>. Acesso em: 28 jan. 2020. doi:<http://dx.doi.org/10.5380/abclima.v23i0.48354>.