

# MODELO NUMÉRICO DE CORREÇÃO ANISOTRÓPICA PARA A IRRADIÂNCIA SOLAR DIFUSA MEDIDA PELO MÉTODO DO ANEL DE SOMBREAMENTO MELO-ESCOBEDO

Alexandre Dal Pai – [adalpai@fatecbt.edu.br](mailto:adalpai@fatecbt.edu.br)

Faculdade de Tecnologia de Botucatu – FATEC/Botucatu

João Francisco Escobedo – [escobedo@fca.unesp.br](mailto:escobedo@fca.unesp.br)

Universidade Estadual Paulista, Departamento de Recursos Naturais - UNESP

## 1.1 Radiação solar

**Resumo.** No trabalho é apresentado um modelo de correção anisotrópico para a irradiância difusa medida com anel de sombreamento Melo-Escobedo (ME) em função da transmissividade atmosférica  $K_t$  (razão entre a irradiância global  $I_g$  pela extraterrestre  $I_o$ ). A literatura mostra que apenas o uso de correções isotrópicas na medida da irradiância difusa devido ao sombreamento provocado pelo anel não garante precisão dos valores medidos, visto que efeitos atmosféricos (nebulosidade, poluição, vapor d'água) não são levados em consideração. As medidas das irradiâncias solares foram efetuadas no Laboratório de Radiometria Solar da UNESP – Botucatu/SP/Brasil (latitude  $22,85^\circ$  Sul, longitude  $48,45^\circ$  Oeste, altitude 785m) no período de 1996 a 2000 para modelagem e de 2001 a 2002 para a validação, realizada por meio dos indicativos estatísticos MBE e RMSE. A irradiância global  $I_g$  foi medida por um piranômetro Eppley-PSP, a irradiância direta na incidência  $I_D$  por um pireliômetro Eppley-NIP acoplado a um rastreador solar modelo ST-3 e a irradiância difusa por um piranômetro Eppley-PSP sob anel de sombreamento ME (0,40m raio e 0,10m largura). Para a formulação das correções anisotrópicas, comparou-se a irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento e corrigida isotropicamente com a irradiância difusa medida pelo método da diferença (irradiância difusa  $I_d$  é a diferença entre as irradiâncias global  $I_g$  e direta projetada na horizontal  $I_{DH}$ ) na partição média 5 minutos, considerando três intervalos discretos de  $K_t$ .

Intervalos de $K_t$	Eq. de correção anisotrópica	$R^2$
$0 < K_t < 0,30$ - Nublado	$I_{DFani} = 0,973I_{DFisoME}$	0,994
$0,30 < K_t < 0,65$ – Parc. Nublado	$I_{DFani} = 1,045I_{DFisoME}$	0,989
$0,65 < K_t < 1$ - Aberto	$I_{DFani} = 1,125I_{DFisoME}$	0,984

A validação mostrou que as correções anisotrópicas para o anel de sombreamento ME em função da transmissividade atmosférica  $K_t$  foram eficientes na correção da irradiância difusa isotrópica, aproximando a irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento em menos de 1% da irradiância difusa diferença.

**Palavras-chave:** Anel de sombreamento, Radiação difusa, Fatores de correção, Anisotropia

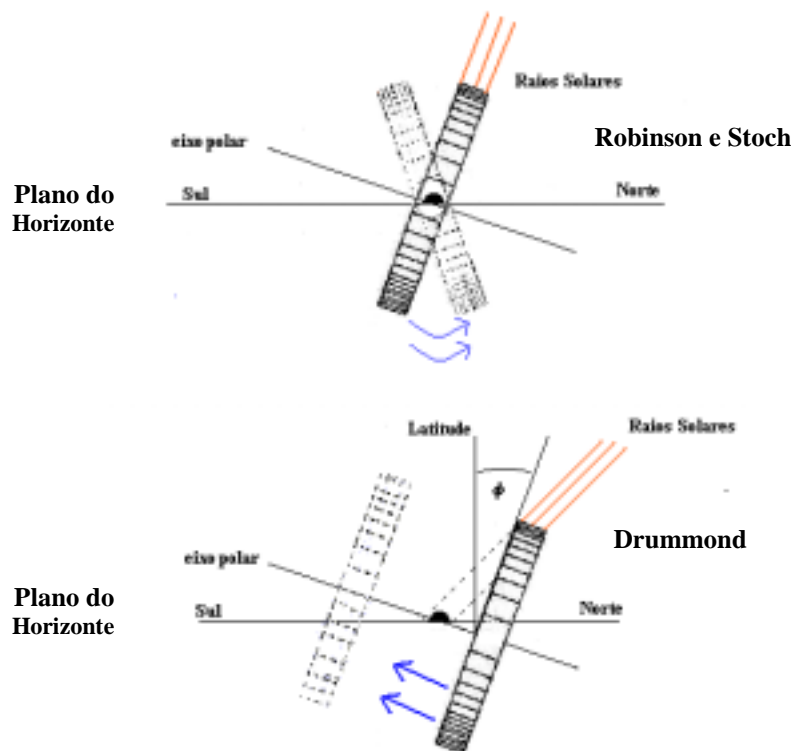
## 1. INTRODUÇÃO

As bases de dados de radiação solar formada nas várias estações meteorológicas espalhadas no mundo frequentemente são compostas por medidas da radiação global, sendo que dentre estas estações, poucas medem a radiação difusa e são raras as estações que monitoram a radiação direta devido ao elevado investimento despendido nos aparelhos de medidas. Uma solução para a formação de

uma base de dados dessas três radiações então é medir duas dessas componentes, frequentemente as radiações global e difusa, e estimar a radiação direta através da relação  $I_G = I_{DH} + I_{DF}$  (radiação global  $I_G$  é a soma das radiações direta projetada na horizontal  $I_{DH}$  e difusa  $I_{DF}$ ). Uma alternativa viável de medida da radiação difusa, com custos relativamente baixos, fácil manutenção e operação, é o método do anel de sombreamento. Nesse método, o anel, com seu eixo principal alinhado na direção norte-sul e inclinado com ângulo igual a latitude local, obstrui a irradiância direta sobre o piranômetro posicionado na área sombreada pelo anel, permitindo apenas a incidência da irradiância difusa. O anel de sombreamento não necessita de rastreamento solar, exigindo apenas correções mecânicas diárias.

Diferentes montagens encontram-se citadas na literatura e as mais conhecidas são as de Drummond (1956) e Robinson e Stoch (1964) (Fig 1). Na montagem de Drummond, o piranômetro mantém-se fixo e o anel de sombreamento translada paralelamente ao eixo polar para compensar as variações da declinação solar. Na montagem de Robinson e Stoch, o piranômetro mantém-se fixo no centro do anel, o qual é rotacionado em torno de seu centro para compensar as variações da declinação solar. Das duas montagens, a de Drummond é atualmente a mais utilizada e comercializada.

Uma montagem alternativa, baixo custo, de fácil operação e manutenção foi proposta por Melo e Escobedo (1994) – montagem ME (Fig 1) – cujo princípio operacional é inverso à montagem de Drummond. Nesse sistema, o anel de sombreamento é mantido fixo e inclinado com ângulo igual a latitude local, e para compensar a declinação solar, o piranômetro translada paralelamente ao plano do horizonte local numa base móvel para permanecer abaixo da sombra produzida pelo anel.



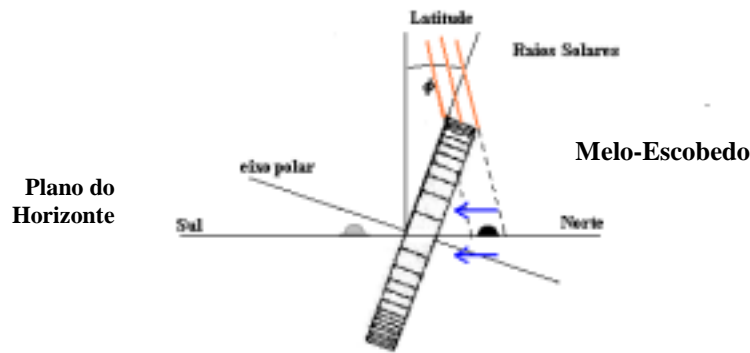


Figura 1 – Esquema do anel de sombreamento: Montagens de Robinson-Stoch, Drummond e Melo-Escobedo.

O método do anel de sombreamento tem como desvantagem o uso de fatores de correção (FC) para compensar a parcela ( $F_p$ ) da irradiância difusa barrada pelo anel de sombreamento (Drummond, 1956; Kasten et al, 1983; Stanhill, 1985) dada pela Eq. (1). As frações de perda ( $F_p$ ) são baseadas na isotropia da radiação, e levam em consideração apenas o uso de fatores geométricos (raio e largura do anel) e geográficos (latitude e declinação solar). Nesse sentido, Oliveira et al (2002) desenvolveram analiticamente a fração de perda para o anel ME (Eq. (2)) em função de parâmetros geométricos e geográficos.

$$FC = \frac{1}{1 - F_p} \quad (1)$$

$$F_p = \left( \frac{2b}{\pi R} \right) \cos(\delta) \left[ \frac{\cos(\phi + \delta)}{\cos(\phi)} \right]^2 \int_0^{\omega_s} \cos(\theta_z) d\omega \quad (2)$$

onde  $b$  é a largura do anel,  $R$  o raio,  $\delta$  a declinação solar,  $\phi$  a latitude do local,  $\omega$  o ângulo horário e  $\theta_z$  o ângulo zenital.

Diversos pesquisadores têm mostrado que a aplicação da correção isotrópica não contempla efeitos atmosféricos (turbidez, nebulosidade, poluição, vapor d'água) que são responsáveis pela anisotropia na radiação difusa. Nesse sentido, Kasten et al. (1983) e Pollard e Langevine (1988) introduziram correções baseadas em parâmetros anisotrópicos como índice de claridade  $K_T$  (razão entre a irradiância global  $I_G$  pela irradiância extraterrestre  $I_o$ ), ângulo zenital e turbidez atmosférica associados à correção isotrópica para melhorar a precisão da medida da irradiância difusa pelo anel de sombreamento de Drummond. Stanhill (1985) verificou que as correções anisotrópicas apresentaram dependência espacial e sazonal, causadas principalmente pelos diferentes tamanhos e níveis de concentração de aerossóis na atmosfera. LeBaron et al (1990) propôs modelos de correção anisotrópica da irradiância difusa para anel de sombreamento através da combinação de três parâmetros anisotrópicos (ângulo zenital, índice de claridade e brilho solar) e um parâmetro isotrópico (geométrico e geográfico), destacando o índice de claridade como o parâmetro mais significativo na representação das condições anisotrópicas do céu. Nessa direção, Iqbal (1983) recomenda correções anisotrópicas diferenciadas para o anel em função do índice de claridade  $K_T$  da ordem de: 3% para  $0 < K_T < 0,30$ ; 5% para  $0,30 < K_T < 0,65$  e 7% para  $0,65 < K_T < 1$ . Battles et al (1995) usou os mesmos parâmetros de LeBaron e desenvolveu dois métodos numéricos de correção através de regressão linear múltipla: o primeiro método utiliza todos os parâmetros numa única equação., enquanto que o segundo utiliza os parâmetros geométrico, ângulo zenital e brilho solar agrupados em função de quatro intervalos do índice de claridade, num total de quatro equações de correção numérica.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo foram utilizadas as irradiâncias global, direta na incidência e difusa monitoradas no Laboratório de Radiometria Solar da UNESP – Botucatu/SP/Brasil (latitude 22,85° Sul, longitude 48,45° Oeste, altitude 785m). A modelagem utilizou uma base de dados de 5 anos (1996 a 2000) e a validação uma base de 2 anos (2001 a 2002).

A irradiância global  $I_G$  foi medida por um piranômetro Eppley- PSP ( $K = 8,13 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$ ); a irradiância direta na incidência  $I_{DN}$  por um pireliômetro Eppley-NIP ( $K = 7,73 \mu\text{Vm}^2/\text{W}$ ) acoplado a um sistema de rastreamento solar ST-3; e a irradiância difusa  $I_{DF}$  por um piranômetro Eppley-PSP ( $K = 8,17 \mu\text{V}/\text{Wm}^2$ ) sob um anel de sombreamento ME de dimensões 0,40m de raio e 0,10m de largura. A irradiância difusa foi corrigida a partir da aplicação do fator isotrópico diário por meio das Eq.(1) e Eq.(2) no intervalo de tempo média-de-5 minutos. A irradiância difusa de referência  $I_{DFref}$  foi calculada pelo método da diferença entre as irradiâncias global e direta projetada na horizontal. A irradiância direta projetada na horizontal  $I_{DH}$  foi calculada por meio da multiplicação da irradiância direta na incidência  $I_{DN}$  pelo cosseno do ângulo zenital  $\theta_Z$  e a irradiância extraterrestre  $I_O$  no topo da atmosfera por meio da multiplicação da constante solar  $I_{CS} = 1367 \text{ W}/\text{m}^2$  pelo cosseno do ângulo zenital  $\theta_Z$ .

A aquisição e o armazenamento dos dados foram realizados por um sistema de aquisição de dados automático digital Datalogger Campbell Scientific Inc, modelo 21X, programado para operar na frequência de 1 Hz, realizando leituras a cada segundo e armazenando médias aritméticas no final de 300 leituras (intervalo de 5 minutos).

A validação do modelo de correção anisotrópico na partição média-5-minutos foi realizada por meio dos indicativos estatísticos MBE e RMSE (Stone, 1993).

$$MBE(\%) = 100 \frac{\left( \sum_i^N (y_i - x_i) / N \right)}{\bar{X}} \quad (3)$$

$$RMSE(\%) = 100 \frac{\left( \sum_i^N (y_i - x_i)^2 / N \right)^{1/2}}{\bar{X}} \quad (4)$$

onde  $y_i$  são os valores estimados,  $x_i$  os valores medidos,  $N$  o número de observações e  $\bar{X}$  é o valor médio medido.

O desvio das médias MBE (Mean Bias Error) é um indicativo que fornece informação do desempenho de um modelo a longo prazo, tendo como desvantagem o cancelamento de um valor positivo por um negativo. A raiz quadrada do desvio quadrático médio RMSE (Root Mean Square Error) fornece informação quanto ao desempenho do modelo à curto prazo e sua desvantagem é que bastam poucos valores discrepantes para que ocorra um aumento significativo na sua magnitude.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 Modelo anisotrópico de correção numérica

Na geração do modelo anisotrópico de correção numérica, a base de dados de irradiância difusa medida pelo anel ME foi separada e agrupada em função do índice de claridade  $K_T$ , segundo os critérios de classificação de Liu e Jordan (1960): nublado ( $0 < K_T < 0,30$ ), parcialmente nublado ( $0,30 < K_T < 0,65$ ) e aberto ( $0,65 < K_T < 1$ ) e relacionadas com a irradiância difusa de referência dentro dos mesmos intervalos de  $K_T$ . A Fig. 2 (a), (b) e (c) mostra a correlação entre as irradiâncias difusa referência e *anel de sombreamento* em condições de cobertura de céu nublado, parcialmente

nublado e aberto. As equações são apresentadas na Tab. 1, com seus respectivos coeficientes de determinação  $R^2$ .

Tabela 1. Correções anisotrópicas em função de intervalos discretos de  $K_T$ .

Cobertura de céu	Equação de Correção Anisotrópica	$R^2$
Nublado	$I_{DFani} = 0,973I_{DFisoME}$	0,994
Parcialmente Nublado	$I_{DFani} = 1,045I_{DFisoME}$	0,989
Aberto	$I_{DFani} = 1,125I_{DFisoME}$	0,984

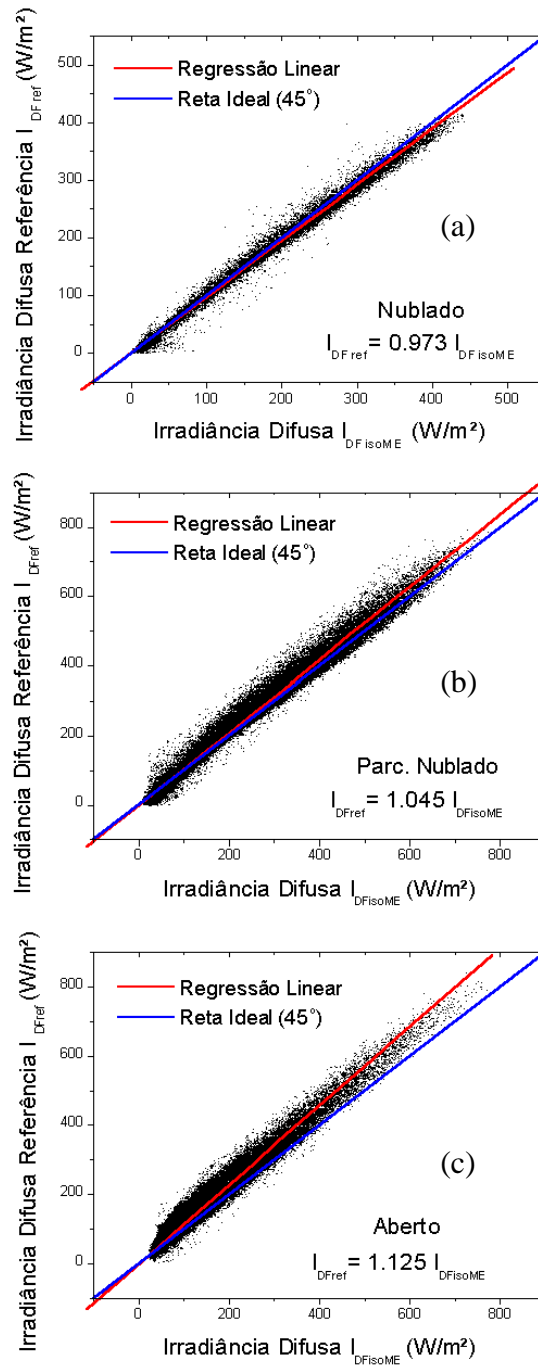


Figura 2. Correções anisotrópicas em função de intervalos discretos de  $K_T$ . a) Nublado. b) Parcialmente nublado. c) Aberto.

As retas de regressão lineares para as três coberturas em relação à reta ideal ( $45^\circ$ ) mostram o efeito diferenciado da anisotropia em cada cobertura. Para cobertura nublada, a distribuição de nuvens é homogênea e portanto tem-se a condição baixa de anisotropia. O coeficiente angular da reta foi menor do que 1, e é justificável porque compensa a correção isotrópica desnecessária feita através das Eq.(1) e Eq.(2) nesta cobertura. Assim, para corrigir a irradiância difusa do anel de sombreamento ME é necessário a multiplicação pelo fator de 0,973.

Para cobertura parcialmente nublada, as condições de anisotropia são dinâmicas, podendo variar a cada instante conforme a distribuição de nuvens na atmosfera, e a irradiância difusa do anel de sombreamento subestimou a difusa referência em 4,5%, exigindo, portanto, uma correção numérica de 1,045.

Na cobertura sem nuvens, em condição permanente e elevada de anisotropia, o método do anel subestimou o método de referência em 12,5%, com correção numérica de 1,125. O percentual de 12,5% representa um valor médio sobre 7 anos e dentro deste tempo, a correção variou anualmente entre 7% a 19%, mostrando assim que o efeito da anisotropia depende do clima local e apresenta variação temporal. O local de medida está localizado em uma região rural, praticamente livre da poluição tradicional urbana. No entanto, sofre o efeito das queimadas de cana-de-açúcar que são frequentes no período de inverno, cuja atmosfera recebe grande quantidade de material particulado que provoca o aumento da radiação circunsolar e conseqüentemente aumenta o efeito da anisotropia da irradiância difusa.

A validação do modelo na correção anisotrópica foi efetuada corrigindo a irradiância difusa nas três coberturas independentemente, por meio da multiplicação dos fatores 0,973 na cobertura nublada ( $0 < K_T < 0,30$ ), 1,045 na parcialmente nublada ( $0,30 < K_T < 0,65$ ) e 1,125 na aberta ( $0,65 < K_T < 1$ ) e comparando com a irradiância difusa de referência. A Fig 3 (a), (b), (c) mostra a correlação entre a irradiâncias difusas de referência e corrigida anisotropicamente para as três coberturas de céu. Os coeficientes angulares das retas de regressão de 0,996 para cobertura nublada, 0,999 para parcialmente nublado e 0,986 para aberto mostram boa correlação entre a irradiância difusa anisotrópica e a difusa de referência. A Tab. 2 apresenta os indicativos estatísticos MBE(%) e RMSE(%) obtidos da comparação entre as irradiâncias difusa referência e anel de sombreamento com correção anisotrópica para as três coberturas de céu.

Tabela 2. Indicativos estatísticos MBE(%) e RMSE(%) obtidos da comparação entre as irradiâncias difusa de referência e corrigida anisotropicamente nas três coberturas de céu.

Cobertura de Céu	MBE (%)	RMSE (%)
Nublado	0,25	5,78
Parcialmente Nublado	0,51	9,83
Aberto	-0,38	12,93

O indicativo estatístico MBE(%) mostra que a correção anisotrópica foi eficiente, superestimando em apenas 0,25% a irradiância difusa medida na cobertura de céu nublada e 0,50% na parcialmente nublada e subestimando em 0,38% na aberta. O indicativo RMSE(%) mostra um aumento do espalhamento em função do crescimento de  $K_T$  (aumento da anisotropia), com 5,78% para nublada, 9,83% para parcialmente nublada e 12,93% para aberta

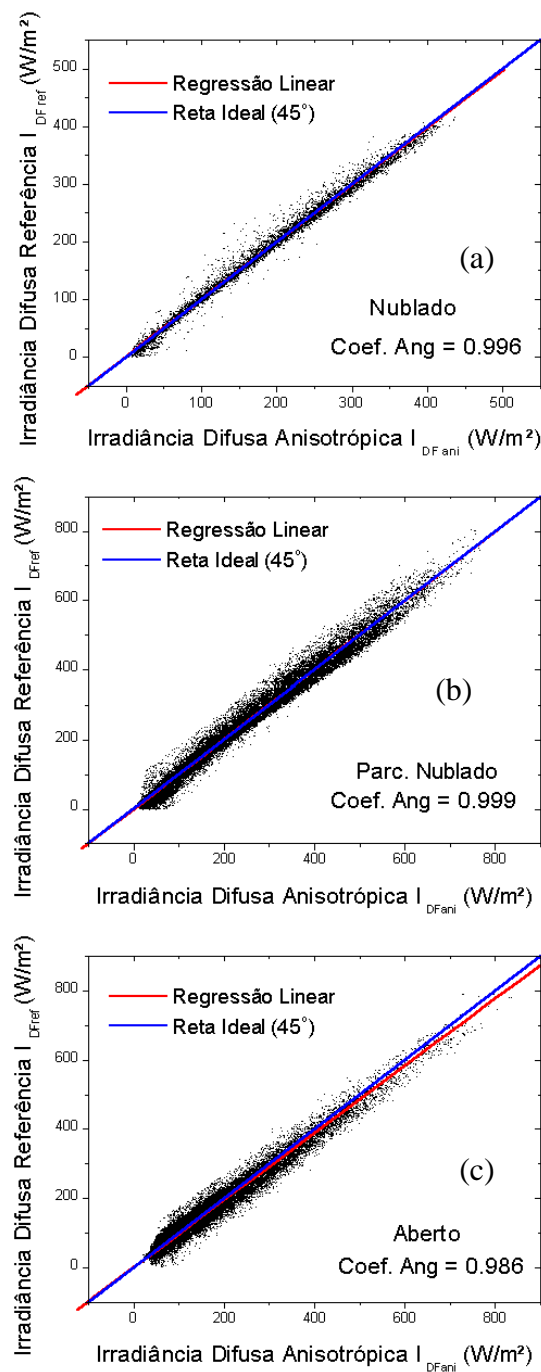


Figura 3. Correlação entre as irradiâncias difusa referência e anel de sombreamento corrigida anisotropicamente. a) Nublado. b) Parcialmente nublado. c) Aberto.

### 3.2 Atualização do banco de dados de radiação difusa a partir do modelo anisotrópico de correção numérica

A atualização do banco de dados de radiação foi realizada por meio de um algoritmo operacional destinado ao gerenciamento das irradiâncias global, direta na incidência e difusa medida com anel de sombreamento ME. O fluxograma divide-se em quatro etapas aplicadas seqüencialmente: monitoramento, tratamento dos dados através do controle de qualidade, correção anisotrópica da irradiância difusa e integração horária, diária e mensal dos dados de radiação solar. A etapa de monitoramento consiste na medida das irradiâncias global, direta na incidência e difusa na forma bruta em milivolts, aplicação dos fatores de calibração dos instrumentos de medidas para transformação

da unidade em densidade de fluxo  $W/m^2$ , aplicação dos fatores de correção isotrópicos na irradiância difusa devido ao anel de sombreamento, cálculo da irradiância extraterrestre  $I_0$  e da transmissividade atmosférica  $K_T$ . Na etapa do controle de qualidade, os dados são submetidos a várias checagens para se eliminar os dados espúrios, consequência do desalinhamento dos sensores, do baixo nível energético do início e fim dos dias, de fios desligados ou cortados acidentalmente etc. A etapa seguinte consiste na aplicação do modelo anisotrópico de correção numérica na irradiância difusa isotrópica a partir do índice de claridade  $K_T$ , onde são aplicadas correções diferenciadas para cada cobertura de céu. A última etapa consiste na integração das irradiâncias solares nas partições horária, diária e mensal, geração de gráficos das irradiâncias solares a partir dos dados e arquivamento das informações em bases de dados digital nas partições média 5 minutos, horária, diária e média-mensal.

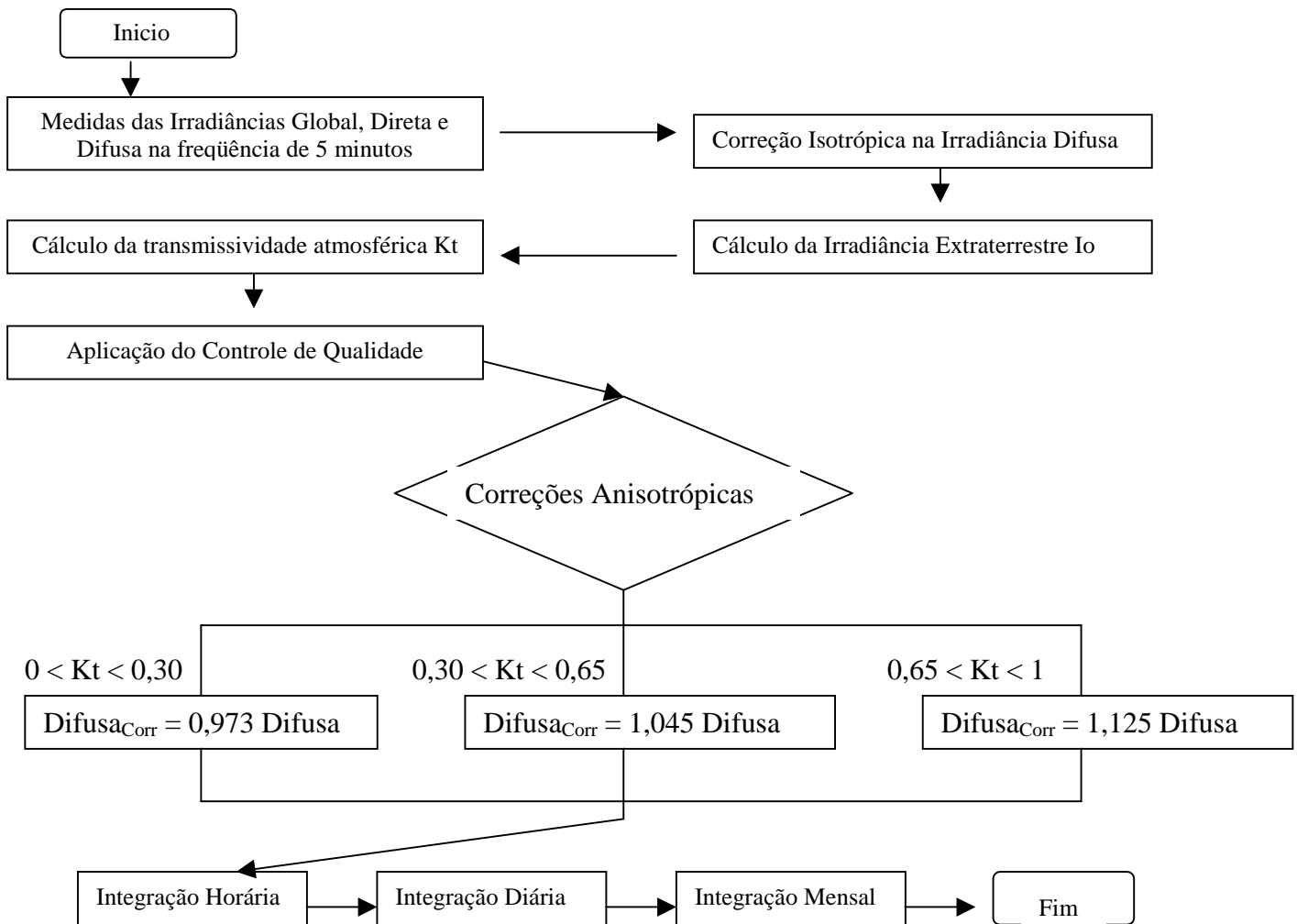


Figura 4. Fluxograma operacional no gerenciamento da medida das irradiância solares na partição média-5-minutos e integração horária, diária e mensal.

Com os valores das integrações calculadas, as irradiações difusa horária  $H_{DFani}$ , diária  $D_{DFani}$  e mensal  $M_{DFani}$  anisotrópicas foram comparadas com as irradiações difusa horária  $H_{DFref}$ , diária  $D_{DFref}$  e mensal  $M_{DFref}$  de referência.

O coeficiente angular, o coeficiente de correlação e os indicativos estatísticos MBE e RMSE entre as irradiações difusas horária, diária e mensal corrigidas anisotropicamente em relação à irradiação difusa referência são apresentados no Quadro 3. Os resultados mostraram que a aplicação dos fatores anisotrópicos foram eficientes na correção da irradiação difusa, com subestimativas (MBE) inferiores a 0,5% para as 3 partições.



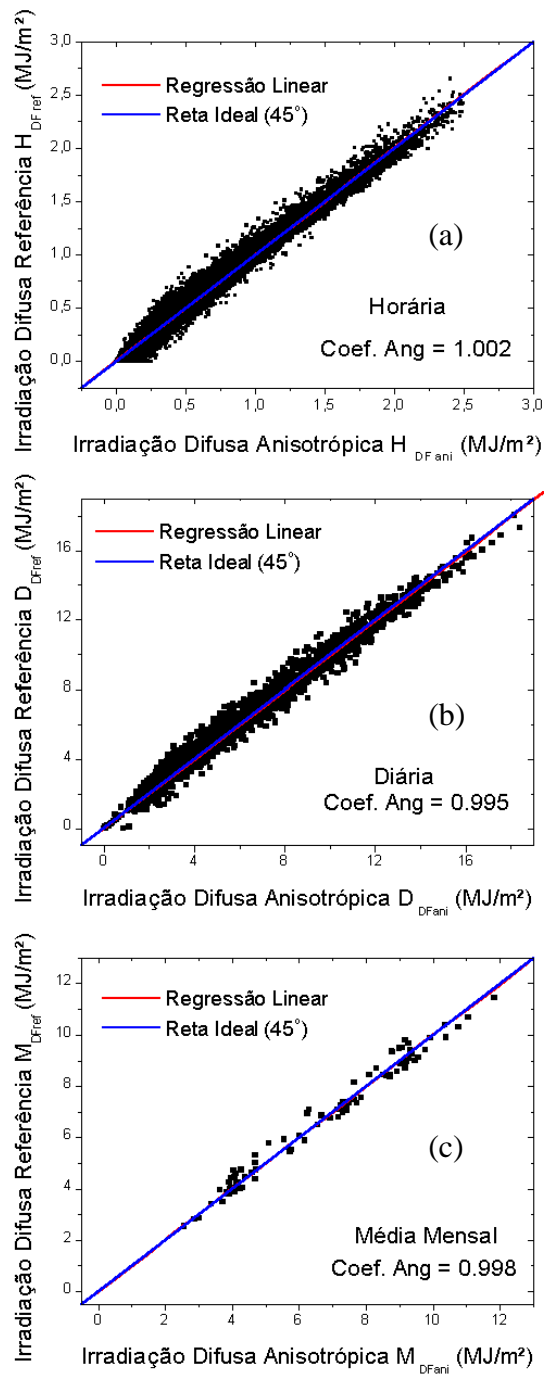


Figura 5. Irradiação difusa de referência e corrigida anisotropicamente nas partições: (a) horária; (b) diária; (c) mensal.

Tabela 3. Coeficiente angular CA, coeficiente de correlação R e indicativos estatísticos MBE e RMSE entre a irradiação difusa referência e as irradiações difusa horária, diária e mensal corrigidas anisotropicamente.

Partições	C.A	MBE		RMSE		R	N
		MJ/m <sup>2</sup>	%	MJ/m <sup>2</sup>	%		
Horária	1,002	-0,0021	-0,37	0,0607	10,64	0,996	27525
Diária	0,995	-0,0193	-0,29	0,4817	7,17	0,995	2396
Mensal	0,998	-0,0161	-0,24	0,3331	4,95	0,995	83

#### 4. CONCLUSÃO

O modelo anisotrópico de correção numérica para anel de sombreamento Melo-Escobedo em função da cobertura de céu (índice de claridade  $K_T$ ) é eficiente na correção da irradiância difusa isotrópica, aproximando a irradiância difusa medida pelo anel de sombreamento em menos de 1% da irradiância difusa referência. Os resultados comprovam que o uso das correções anisotrópicas melhora o método de medida do anel de sombreamento ME, permitindo assim compor uma base de dados confiável das radiações solares global, difusa e direta sem necessitar de investimentos financeiros elevados.

#### 5. REFERÊNCIAS

- Battles, F. J., Olmo, F. J., Alados-Arboledas, L. 1995. On shadowband correction methods for diffuse irradiance measurements. *Solar Energy*, v.54, n.2, pp.105-114.
- Drummond, A. J. 1956. On the measurements of sky radiation. *Archiv. fur Meteorologie. Geophysik Bioklimatologie*, v.7, pp.413-436.
- Iqbal, M. An introduction to solar radiation. Nova Iorque, Academic Press, 1983. 390p.
- Kasten, F., Dehne, K., Brettschneider, W. 1983. Improvement of measurement of diffuse solar radiation. *Solar radiation data, série F*, n.2, pp.221-225, D. Redel, Dordrecht.
- Lebaron, B. A., Michalsky, J. J., Perez, R. 1990. A simple procedure for correcting shadowband data for all sky conditions. *Solar Energy*, v.44, n.5, pp.249-256.
- Liu, B. Y. H. E Jordan, R. C. 1960. The interrelationship and characteristic distribution of direct, diffuse and total solar radiation. *Solar Energy*, v.3, n.4, pp.1-19.
- Melo, J. M. D., Escobedo, J. F. Medida da radiação solar difusa. In: *ENERGÍAS LÍMPIAS EN PROGRESO, VII CONGRESSO IBÉRICO DE ENERGIA SOLAR*, Vigo, Espanha. *Anais INTERNATIONAL SOLAR ENERGY SOCIETY*, v. 1, 1994.
- Oliveira, A. P., Escobedo, J. F., Machado, A. J. 2002. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at surface. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Boston, v. 19, pp. 698-708.
- Pollard, D. G. E Langevine, L. P. 1988. An anisotropic correction for diffuse irradiance measurements in Guyana. In: *Proceeding of the 1988 Annual Meeting*, M. J. Coleman (Ed.), pp. 238-243, ASES Cambridge.
- Robinson, H., Stoch, L. 1964. Sky radiation and measurements and corrections. *Journal of Applied Meteorology*, v.3, pp.179-181.
- Stanhill, G. 1985. Observations of shading correction factors for diffuse sky radiation measurements at the Dead Sea. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v.111, pp.1125-30.
- Stone, R. J. 1993. Improved statistical procedure for the evaluation of solar radiation estimation models. *Solar Energy*, v.51, n.4, pp.289-291.

#### ANISOTROPIC CORRECTION MODEL FOR THE DIFFUSE SOLAR IRRADIANCE MEASURED BY THE MELO-ESCOBEDO SHADOWRING METHOD

**Abstract.** The present paper deals with anisotropic correction factors proposed as a function of the clearness index in order to correct the diffuse solar irradiance measured with the Melo-Escobedo Shadowring Measuring Method (ME). The global irradiance was measured by an Eppley-PSP pyranometer; direct normal irradiance by an Eppley-NIP pyrheliometer fitted to a ST-3 sun tracking device and the diffuse irradiance by an Eppley-PSP pyranometer fitted to a ME shadowring. The validations were performed by the MBE and RMSE statistical indicators. The results showed that the anisotropic correction factors were appropriate to correct the diffuse irradiance.

**Keywords.** Shadowring, Diffuse solar irradiance, Correction factors, Anisotropy.