

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Programa de Pós-Graduação em Meteorologia



Dissertação

**MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DIFUSA
UTILIZANDO PIRANÔMETRO COM SENSORES
FOTOELÉTRICOS**

IDILIO MANOEL BREA VICTORIA

Pelotas, 2008

IDILIO MANOEL BREA VICTORIA

**MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL E DIFUSA
UTILIZANDO PIRANÔMETROS COM SENSORES FOTOELÉTRICOS**

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em Meteorologia da
Universidade Federal de Pelotas, como
requisito parcial à obtenção do título de
Mestre em Ciências (Meteorologia).

Orientador: Dr. João Carlos Torres Vianna

Co-Orientador: Dr. Lúcio Almeida Hecktheuer

PELOTAS

Rio Grande do Sul – Brasil

2008

Banca examinadora:

Dr. João Carlos Torres Vianna – UFPEL

Dr. Luciano Vitoria Barboza – UCPEL

Dr. Gilberto Barbosa Diniz – UFPEL

Dr. Julio Renato Quevedo Marques – UFPEL

AGRADECIMENTOS

Agradeço...

Enquanto ser humano frágil e inacabado...

À conjugação de energias universais que, por se mostrarem superiores, impellem a raça humana a cumprir função de equilíbrio entre os seres vivos e a natureza.

Aos outros seres humanos que me propiciam gratos e edificantes fazeres de aprendiz e aprendente.

Enquanto ser humano histórico...

Aos meus pais, fontes de luz a iluminar a caminhada.

À minha esposa Elisabeth pelo amor paciente e comprometido com a causa de edificação da criação.

Aos meus filhos Diego e Nathalia por terem me iluminado nas tomadas de decisões, nos infinitos momentos das nossas interações humanas, e por terem se comprometido com as nossas construções de princípios e sentidos de vida.

Ao amigo Prof. Dílson Ramalho por ter assumido o papel de sábio construtor, em magistral demonstração de acumulação teórica-prática.

Ao amigo e companheiro Prof. Dr. Lúcio Almeida Hecktheuer pela dócil, competente e pacienciosa sabedoria técnica-humana.

Ao amigo Prof. Dr. João Carlos Torres Vianna, pela paciência e orientações.

Aos queridos(as) colegas Claudia, Glauber, Márcia, Mári, Theo, Cátia, Leandro, Ana Carolina, pelos alegres e educativos momentos de convivência.

Aos amigos Prof. Rogério Guimarães e Prof. Daniel Hecktheuer pela presteza e agilidade na solução de problemas práticos.

Enquanto profissional...

Ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Pelotas e à Universidade Federal de Pelotas, pela oportunidade de crescimento técnico-científico-humano.

RESUMO

VICTORIA, Idilio Manoel Brea. **Medição da Radiação Solar Global e Difusa Utilizando Piranômetros com Sensores Fotoelétricos**. 2008. 95f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Faculdade de Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

No Brasil, a maior parte das Instituições que medem radiação solar disponibiliza apenas dados de radiação global incidente em uma superfície horizontal. Na região de Pelotas-RS, a Estação Agroclimatológica de Pelotas, vinculada à Embrapa, tem os dados de radiação solar global diária estimados desde 1971 até 1992 e medidos a partir de 1993. Considerando que os sistemas solares devem ser instalados objetivando uma maior quantidade de energia a ser captada, seus elementos captadores de radiação devem ser instalados com uma determinada inclinação em relação à horizontal e voltados para o Equador. Isso significa dizer que os dados de radiação disponibilizados pelas Instituições que medem radiação solar global devem ser trabalhados de modo que se tenha uma estimativa da radiação solar incidente em uma superfície inclinada. Os procedimentos existentes e utilizados pelos projetistas de sistemas solares no Brasil para estimar a radiação solar global incidente em uma superfície inclinada utilizam métodos estatísticos oriundos de medições da radiação difusa incidente em outros países. Com o objetivo de melhor estimar a radiação solar incidente em uma superfície inclinada e difundir a medição de radiação solar difusa através da utilização de piranômetros que utilizam sensores fotoelétricos, de baixo custo, em substituição aos que utilizam sensores termoeletrônicos, esse trabalho descreve e valida os procedimentos de medição e correção a serem efetuadas na realização das medições de radiação solar global e difusa a fim de que as mesmas possam ser consideradas de boa qualidade. Foram utilizadas três bases metálicas, duas montadas sob inspiração do modelo de Robinson e Stoch, fixadas em plataforma radiométrica no CEFET-RS a 19m de altura, que receberam, na medição de radiação difusa, anéis de sombreamento, com o eixo do anel na direção N-S geográfica. Usou-se piranômetros com sensores fotoelétricos e termopilha, este último, considerado padrão secundário tido como de referência, em medições de radiações solares global e difusa, que ligados a sistema de aquisição de dados e micro-computador, teve os dados medidos trabalhados e interpretados no estudo da calibração dos piranômetros e das medições das radiações citadas anteriormente. Tendo em vista o trabalho com dados de radiação solar, aplicou-se os testes estatísticos recomendados: erro do desvio médio (MBE), erro médio quadrático (RMSE) e o do coeficiente de correlação (CC). Conclui-se que o uso de piranômetro Licor LI 200, com sensor fotoelétrico, para medição de radiação global e difusa, deve ser precedido de uma boa calibração, realizada periodicamente. Os dados obtidos de radiação solar global foram de boa qualidade, praticamente coincidindo com os valores medidos com o piranômetro padrão da Eppley PSP, observadas as incertezas dos equipamentos. Com relação às medidas de radiação solar difusa, apesar de o piranômetro Licor ter operado nas condições

menos propícias de desempenho, ou seja, em dias de céu muito nublado, após as correções devido ao sombreamento, à temperatura e às condições atmosféricas, obteve-se resultados de melhor qualidade, reduzindo-se significativamente os valores dos erros MBE e RMSE.

Palavras-chave: Medição de Radiação Solar, Radiação Difusa, Anel de Sombra.

ABSTRACT

VICTORIA, Idilio Manoel Brea. **Medição da Radiação Solar Global e Difusa Utilizando Piranômetros com Sensores Fotoelétricos**. 2008. 95f. M.Sc. – Graduate Program in Meteorology. Federal University of Pelotas (UFPEL).

In Brazil, most of the Institutions that measure solar radiation and the display only the global radiation incident on a horizontal surface. In the region of Pelotas - RS, the Estação Agroclimatológica de Pelotas, linked to Embrapa, has had the data of global solar radiation daily estimated from 1971 to 1992 and measurements starting in 1993. Considering that the solar systems should be installed so that a larger amount of energy is collected, the element collectors should be installed with a certain inclination related to horizontal surface and oriented to towards the Equator. That means that the radiation data made available by the Institutions that measure global solar radiation should be worked in a way that it is possible to obtain an estimation of the solar radiation incident on a sloping surface. The existing procedures used by solar system designers in Brazil to estimate the global solar radiation incident on a sloping surface, use statistical methods originating from the diffuse measurement incident in other countries. With the objective of better estimating the solar radiation incident on a sloping surface and spreading the diffuse solar radiation measurement through the use of pyranometers which use photoelectric sensors, of low cost, in substitution to the thermoelectric sensors, this work describes and validates the procedures of measurement of global and diffuse solar radiation so as for these to be considered of good quality. For this experience three metallic bases were used. Two of them set up under the inspiration of the Robinson and Stoch model, attached to a radiometric platform, at CEFET RS, at a height of 19m. They received shadow bands on the measurement of diffuse radiation with the band axis in the N-S direction. Pyranometers with photoelectric sensors and thermobattery were used. The thermobattery considered a secondary pattern, as reference in measurements with global and diffuse solar radiations. These, linked to the data acquisition system and to the microcomputer had the data measured interpreted in the calibrating of the pyranometers study and the measurements of the radiations mentioned before. Considering the work with solar radiation data, the recommended statistical tests were applied: medium deviation error (MBE), medium quadratic error (RMSE) and the correlational coefficient (CC). It is possible to conclude that the use of Licor LI 200 pyranometer, with the photoelectric sensor, for measurement of the global and diffuse solar radiation must be preceded by a good calibration, performed periodically. The global solar radiation data obtained presented good quality, coinciding with the values measured with the standard Eppley PSP pyranometer, observing the uncertainty of the equipments. Regarding the diffuse solar radiation measurements, although the Licor pyranometer operated under less proper conditions of performance, in other words, in very cloudy days, after the corrections

due to shadowing, at atmospheric and temperature conditions, it was possible to obtain better quality results, reducing significantly the error values of MBE and RMSE.

Keywords: Solar Radiation Measurement, Diffuse Radiation, Shadow Band.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da estrutura do Sol.....	8
Figura 2 - Onda eletromagnética composta pelos campos elétrico e magnético. A longitude de uma onda é a distância de uma crista a outra	9
Figura 3 - Espectro eletromagnético das radiações conhecidas, organizadas de acordo com o comprimento de onda	10
Figura 4 - Relação entre as dimensões do Sol e da Terra	14
Figura 5 - Quatro posições da Terra no giro ao redor do Sol	15
Figura 6 - Elementos da excentricidade da elipse	15
Figura 7 - Movimento da Terra ao redor de seu eixo	17
Figura 8 - Esfera celeste mostrando o caminho aparente do Sol e o ângulo de declinação solar.....	18
Figura 9 - Caminhos aparentes do Sol através do céu. PHL é o Plano do Horizonte Local	20

Figura 10 - Esfera celeste e coordenadas do Sol relativas a um observador na Terra, no ponto 0	21
Figura 11 - Definição dos ângulos de zênite e azimute	22
Figura 12 - Distribuição espectral da radiação extraterrestre AMO e distribuição espectral de um corpo negro a 5900K	24
Figura 13 - Massa de ar que um feixe de radiação atravessa ao incidir na superfície terrestre com um ângulo θ_z	27
Figura 14 - Resposta espectral do silício	33
Figura 15 - Resposta co-seno do piranômetro da Licor, modelo LI-200SA	34
Figuras 16a e b - Bases metálicas	37
Figuras 17a e b - Regulagem da latitude e calha de deslizamento do anel(2a) e regulagem fina da orientação N-S geográfica verdadeira e altura do piranômetro	37
Figuras 18a e b - Determinação do N-S geográfico verdadeiro	38
Figura 19 - Câmara e base metálica	39
Figura 20 - Agilent 34970A – Sistema de Aquisição de Dados	39
Figura 21 - Piranômetro Eppley	40
Figura 22 - Piranômetro Licor	41

Figura 23 - Anel de sombreamento, construído para as medições	42
Figura 24 - Fator de correção da medida de radiação difusa devido ao uso de anel de sombra	49
Figura 25 - Imagens de instantes dos dias 12 e 13 de agosto de 2007, dando a idéia das condições meteorológicas destes dias.....	58
Figura 26 - Medição da radiação global do dia 12 de agosto de 2007, DJ 224, sem correções	58
Figura 27 - Medição da radiação global do dia 12 de agosto de 2007, DJ 224, com as correções propostas (temperatura e condições atmosféricas)	59
Figura 28 - Imagens dos dias 30 de agosto (DJ 242), 24 e 25 de setembro (DJ 267 e 268, respectivamente), dando a idéia das condições atmosféricas dos dias selecionados para análise das medições de radiação difusa	60
Figura 29 - Valores de radiação solar difusa de referência, obtidos através de um piranômetro Eppley, com anel de sombreamento, no dia 24 de setembro de 2007	61
Figura 30 - Radiações difusas de referência e medida com o piranômetro LICOR, sem correções	62
Figura 31 - Radiações difusas de referência e medida com o piranômetro LICOR, corrigida.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características do Sol	8
Tabela 2 - Valores de massa de ar	27
Tabela 3 – Classes dos piranômetros com as principais características	30
Tabela 4 – Aparelhos utilizados nas medições, com alguns dados relevantes.....	44
Tabela 5 – Limites dos parâmetros utilizados para corrigir (isotrópica e anisotrópica) a medida da radiação difusa quando utiliza-se anel de sombra.....	50
Tabela 6 – Dados relativos à calibração dos Piranômetros Licor, na Plataforma Radiométrica do CEFET/RS, no dia 11 de agosto de 2007, das 07h 07min., às 17h 44min., DJ 223	56
Tabela 7 – Classificação da Atmosfera (IQBAL, 1983)	57
Tabela 8 – Valores dos erros das medidas do Licor 1, com e sem correções, em condições de céu bastante nublado	59

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Altitude solar
Γ	Ângulo do dia
γ_s	Ângulo de azimuth solar
Δ	Parâmetro utilizado por Lebarom et al. (1990) para descrever os efeitos isotrópicos e não isotrópicos da radiação solar
ΔK_r	Incerteza do fator de calibração do piranômetro Eppley
ΔK_L	Incerteza do fator de calibração do piranômetro Licor
$\Delta \Sigma V_L$	Incerteza do somatório das diferenças de potencial elétrico dos piranômetros Licor
$\Delta \Sigma V_E$	Incerteza do somatório das diferenças de potencial elétrico do piranômetro Eppley
δ	Declinação solar
ε	Parâmetro utilizado por Lebarom et al. (1990) para descrever os efeitos isotrópicos e não isotrópicos da radiação solar
θ_z	Ângulo zenital
λ	Comprimento de onda
π	Pi
ρ	Densidade

Σ	Somatório
ΣV_L	Somatório das diferenças de potencial elétrico do piranômetro Licor
ΣV_E	Somatório das diferenças de potencial elétrico do piranômetro Eppley
Φ	Fluxo radiante
ϕ	Latitude geográfica local
Ω	Ângulo sólido
ω	Ângulo horário
ω_s	Ângulo de nascimento do sol
$^{\circ}$	Grau
$'$	Minuto
$''$	Segundo
A	Área
AM	Massa de ar
AM_r	Massa de ar relativa
AM_{rK}	Massa de ar relativa de Kasten
a	Comprimento da metade do eixo maior da elipse
b	Comprimento do anel de sombreamento
b	Distância de um dos focos ao centro da elipse
c	Velocidade de propagação da luz no vácuo
CC	Coeficiente de correlação entre os valores medidos e os estabelecidos como referência
CS	Constante solar
Dif_{nc}	Medida da radiação difusa não corrigida
Dir_{Nnc}	Medida da radiação direta normal não corrigida
$Dif_{fotoelétrico}$	Radiação difusa do piranômetro com sensor fotoelétrico
$Dif_{termopilha}$	Radiação difusa do piranômetro com sensor termopilha
DJ	Dia juliano
E_o	Fator de correção da excentricidade da órbita da Terra
E_T	Resultado da equação do tempo

FC	Fator de correção isotrópico
F_p	Fração de perda da radiação devido ao anel de sombreamento
F	Frequência de oscilação
$\overline{G_{\text{medido}}}$	Valor médio dos valores medidos da amostra de radiação solar global
$\overline{G_{\text{referência}}}$	Valor médio dos valores de referência da amostra de radiação solar global
$G_{\text{referência}(i)}$	lenésimo valor de radiação solar global tomado como referência
$G_{\text{medido}(i)}$	lenésimo valor de radiação solar global medido
G	Medida da radiação global
$G_{\text{fotoelétrico}}$	Radiação global medida com piranômetro com sensor fotoelétrico
$G_{\text{termopilha}}$	Radiação global medida com piranômetro com sensor termopilha
H	Irradiação solar diária
H_0	Irradiação solar extraterrestre diária
I_{sc}	Constante solar
I	Irradiação solar global horária
I_0	Irradiação solar global extraterrestre horária
I_G	Irradiância global
I_{DH}	Irradiância direta na horizontal
I_D	Irradiância difusa
K	Fator de calibração a ser obtido
K_L	Fator de calibração do piranômetro Licor
K_t	Índice de claridade
K_r	Fator de calibração do instrumento de referência
K'	Fator de correção parcial a ser aplicado nos valores dos dados de radiação solar difusa.
L_{ST}	Longitude padrão
L_{loc}	Longitude local
MBE	Mean Bias Error
N	Número de medidas da amostra de dados
Q	Quantidade de energia radiante

r	Raio
R	Resposta do piranômetro em uma temperatura T
R_{30}	Resposta do piranômetro em 30°C
RMSE	Root Mean Square Error
S	Área superficial
T_{pir}	Temperatura do sensor do piranômetro
T	Temperatura
TO	Hora oficial
TSV	Tempo solar verdadeiro
t	Tempo
UA	Unidade astronômica
X	Percentual da radiação solar difusa obstruída pelo anel de sombra
θ_z	Ângulo de zênite

SUMÁRIO

BANCA EXAMINADORA	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iv
ABSTRACT.....	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
SUMÁRIO	xvi
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	7
2.1 Características básicas da radiação solar	7
2.1.1 O recurso solar	7
2.1.2 Conceituações e definições	9
2.1.2.1 Fluxo radiante ou poder radiante	11
2.1.2.2 Densidade de fluxo de radiação ou irradiância	11
2.1.2.3 Ângulo sólido	11
2.1.2.4 Radiância	12
2.1.2.5 Irradiação	12
2.1.3 Interação entre a radiação solar e a atmosfera terrestre	12
2.1.3.1 Radiação direta	13
2.1.3.2 Radiação difusa	13
2.1.3.3 Radiação global ou total	14

2.2	Geometria Sol-Terra	14
2.2.1	Excentricidade da órbita da Terra	15
2.2.2	Declinação solar	17
2.2.3	Tempo solar verdadeiro	18
2.2.4	Posição do Sol em relação a superfícies horizontais	19
2.3	Constante solar e sua distribuição espectral	23
2.3.1	Constante solar	23
2.3.2	Distribuição espectral da irradiância solar extraterrestre	23
2.3.3	Irradiação solar extraterrestre	24
2.3.3.1	Radiação horária.....	24
2.3.3.2	Radiação diária	25
2.3.4	Índice de Claridade	25
2.3.4	Massa de ar (AM)	26
2.4	Medida da radiação solar	27
2.4.1	Introdução	27
2.4.1.1	Grandezas meteorológicas da radiação	28
a)	Radiação solar	28
b)	Radiação terrestre	29
2.4.1.2	Normalização	29
2.4.2	Instrumentos de medida da radiação solar.....	30
2.4.2.1	Introdução	30
2.4.2.2	Tipos de piranômetros	31
a)	Piranômetro fotovoltaico	31
b)	Limitações dos sensores fotoelétricos na medição de radiação solar global e difusa	32
c)	Piranômetro termoelétrico	34
2.4.2.3	Utilização do piranômetro na medição de radiação difusa	34

3	MATERIAL E MÉTODOS	36
3.1	Base física, coleta e armazenamento de dados	36
3.1.1	Piranômetro Eppley	40
3.1.2	Piranômetro Licor	40
3.1.3	Anel de sombreamento	42
3.2	Calibração dos Piranômetros	43
3.3	Medição da radiação global	45
3.4	Medição da Radiação Difusa	47
3.5	Testes estatísticos para avaliação das medidas de radiação solar	51
3.5.1	Erro do Desvio Médio (MBE)	51
3.5.2	Erro Médio Quadrático (RMSE)	52
3.5.3	Coeficiente de correlação (CC)	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	54
4.1	Incertezas das medidas e calibração dos piranômetros Licor	54
4.2	Condições atmosféricas do dia da calibração	56
4.3	Medições de radiação solar global	57
4.4	Medições de radiação solar difusa	60
5	CONCLUSÕES E SUGESTÕES	64
	REFERÊNCIAS	67
	APÊNDICE 1- Destaques da construção das Bases Metálicas	73
	APÊNDICE 2- Localização da Plataforma Radiométrica e as principais vistas das Bases Metálicas instaladas	74
	APÊNDICE 3- Determinação da direção Norte-Sul Geográfica	75
	APÊNDICE 4- Condições atmosféricas de alguns dias de medições destacando as radiações medidas	76
	ANEXO 1- Fator de correção da radiação difusa devido a utilização de anel de Sombra em função das condições de céu	77

1 INTRODUÇÃO

A conversão da energia solar em energia utilizável pelo ser humano, dependente das tecnologias disponíveis, se processa na medida da maior ou menor disponibilidade de radiação solar na região que pretenda servir e está intimamente relacionada com as condições climáticas efetivas, guardando grande dependência com o fator econômico.

No Brasil e no hemisfério sul, convive-se com uma crônica falta de dados medidos de radiação solar em virtude do reduzido número de estações radiométricas. É substancialmente grande o número de trabalhos científicos que se dedicam a produzir estimativas de radiação solar, devido a pouca disponibilidade de dados medidos.

Em função desse pequeno número de estações, certos autores, como Pereira (2002), chegam a afirmar que a análise de modelos encontrados na literatura, para estimar a radiação solar global, demonstra que o uso desses modelos deve ser incentivado em detrimento da disseminação de redes de estações radiométricas. Tal método de estimativa permite ter, em curto período de tempo, estimativa do potencial solar em grande parte do território nacional. O levantamento deste potencial por medição em estações meteorológicas demandaria muito tempo.

Segundo Lyra, Fraidenraich, e Tiba (1993 apud TIBA, 2000), a partir de 1977, instalou-se no Brasil a Rede Solarimétrica com vinte estações, de acordo com critérios estabelecidos pela OMM (Organização Meteorológica Mundial).

A seguir foi criado, em 1978, o Centro Nacional de Radiação Solar, orientado para o controle de qualidade dos dados solarimétricos. É citada a problemática da obtenção de dados de radiação solar no Brasil, e apresentado diagnóstico da solarimetria, propostas para melhoramento da qualidade, quantidade, disponibilidade e acesso aos dados solarimétricos, são feitas discussões sobre os tipos de instrumentação utilizada e, por último, é discutido o uso de satélites. Dentre as conclusões, desse trabalho em pauta, a situação da solarimetria no Brasil é classificada...

...como acentuadamente negativa, com problemas de manutenção e operação dos instrumentos, falta de processamento dos dados, carência de pessoal, dados inadequados, seja devido à escassez de estações meteorológicas devidamente equipadas, ou tempo limitado de registros ou imprecisão dos instrumentos de medição de radiação global ou horas de insolação (LYRA, FRAIDENRAICH e TIBA, 1993)

Gambi, Pereira, Abreu, Couto e Colle (1998) afirmam que medir diretamente com piranômetros operando em estações solarimétricas é a maneira mais precisa na busca de intensidade de radiação solar na superfície. Porém os autores reconhecem que “a rede mundial dessas estações é muito esparsa”, excetuando territórios de “países mais desenvolvidos economicamente”. Faz-se, na discussão dos autores, menção ao “desmantelamento” da rede solarimétrica brasileira, a partir dos anos 90, com a afirmação de que, desde então, o “número de estações em operação ficou extremamente reduzido”.

Em Kratzenberg, Colle, Pereira, Neto, Beyer e Abreu (2003), os autores, ao balizarem a importância do projeto BSRN (Baseline Surface Radiation Network), deixam claro o desânimo existente em relação à desativação de estações solarimétricas, ao afirmarem:

... o Brasil deixou de figurar nos bancos de dados de radiação solar da WMO e do Centro Mundial de Radiação Solar de São Petersburgo, até porque o que restou das estações solarimétricas instaladas pelo governo federal no país em 1978 foi desativado.

Tiba et al. (2000) sustenta que a motivação da construção e publicação do Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestres, deveu-se à “convicção” de que era “necessário, até imprescindível, atualizar e aprimorar a base de dados sobre

o recurso solar, para impulsionar de maneira sólida a ciência e a tecnologia solar no Brasil.” Depois de exaltarem a “existência de consciência generalizada” sobre a disponibilidade de recurso solar de excelente qualidade em boa parte do país, enfatizam o mérito do banco de dados, cuja importância reside no fato de ter “resgatado, organizado e disponibilizado boa parte da informação existente sobre o tema em instituições públicas, centros de pesquisa e universidades.” Acrescenta-se que está recuperado o “acervo de publicações de mais de quarenta anos de trabalho.” Segundo o autor, as cartas de radiação solar foram elaboradas levando em conta as “melhores informações disponíveis, tanto do ponto de vista dos instrumentos utilizados como do intervalo de medição.”

Com a crescente demanda por energias renováveis, em virtude da necessidade vital de melhoria da qualidade ambiental, o Brasil, por estar localizado em grande parte na região inter-tropical e possuir enorme potencial de aproveitamento de energia solar durante o ano todo, desperta para “criar” suporte técnico e científico para esta modalidade de energia com reconhecido poder de crescimento.

Tanto Laperuta (1996) como Ricieri (2002) fazem referência à questão do custo elevado dos radiômetros solares envolvidos nos métodos de medida direto ou indireto de radiação. Segundo eles, os altos custos dos medidores tem levado os pesquisadores a desenvolverem modelos de estimativa de radiação solar que priorizam parâmetros de fácil obtenção e fornecem razoáveis aproximações.

Por outro lado, Escobedo, Frisina, Ricieri e Oliveira (1997), traduzindo projeto experimental de construção de radiômetros solares e anéis de sombreamento, ao fazerem comparação com similares importados, afirmam que se pode construí-los no país “com redução de custos em torno de 80%”. Os autores, ao fazerem referência à comparação do custo do anel de sombreamento aqui construído e o da EPPLEY, afirmam: “No entanto, existem diferenças que são bastante significativas como, por exemplo, a ‘banda’ de sombreamento que custou 10 vezes menos que a banda de sombreamento da EPPLEY.”

Considerando que os sistemas solares devem ser instalados objetivando uma maior quantidade de energia a ser captada, seus elementos captadores de radiação devem ser instalados com uma determinada inclinação em relação a horizontal e voltados para o Equador. Isso significa dizer que os dados de radiação disponibilizados pelas Instituições que medem radiação solar global precisam ser trabalhados de modo que se tenha uma estimativa da radiação solar incidente em uma superfície inclinada. Os procedimentos existentes e utilizados pelos projetistas de sistemas solares no Brasil, para estimar a radiação solar global incidente em uma superfície inclinada, utilizam métodos estatísticos oriundos de medições da radiação difusa incidente em outros países. Entre os diversos métodos, pode-se citar o de Liu e Jordan (1960), Stanhill (1966), Ruth e Chant (1976), Bannister (1966-1969) e Collares-Pereira e Rabl (1979).

Rosa e Zilles (2002) ratificam a capital importância para uma qualificada estimativa de energia no plano inclinado e do conhecimento de dados confiáveis de radiação solar direta e difusa no plano horizontal, a serem utilizados para o dimensionamento de sistemas fotovoltaicos.

Os dados de radiação solar global e difusa deverão estar disponíveis junto com outros parâmetros meteorológicos, como temperatura ambiente e velocidade do vento, os quais também podem afetar o comportamento de alguns tipos de sistemas de energia solar, segundo Estrada, Cajigal e Salgado (2005).

Os instrumentos utilizados para a medição da radiação solar global e difusa que utilizam sensores do tipo termopilha apresentam um custo elevado de aquisição e de manutenção ao longo do seu funcionamento. Esses equipamentos fornecem dados de radiação de boa qualidade, com baixas incertezas, visto que medem a radiação incidente em praticamente todo o seu espectro, possuem boa resposta cosseno e, alguns, possuem circuitos de compensação de temperatura. Esses aparelhos apresentam resultados estáveis e com boa repetibilidade fazendo com que a World Meteorological Organization os considere instrumentos de segunda

classe. Seu custo de aquisição é da ordem de U\$ 2.350,00. Em função dos custos de aquisição e manutenção desses instrumentos, no Brasil, poucas estações meteorológicas realizam medições de radiação global, difusa e direta. Estas, simplesmente estimam a radiação global através da medida da quantidade de horas de sol diária. Com o objetivo de diminuir os custos de medições de radiação solar, este trabalho propõe a utilização de instrumentos que utilizam sensores fotoelétricos os quais tem seus custos de aquisição na ordem de U\$ 270,00 (aproximadamente nove vezes menor) e apresenta as principais correções a serem feitas nos dados com eles adquiridos.

Os sensores fotoelétricos são sensores bastante estáveis e não apresentam degradação significativa ao longo do seu período de uso. Além disso, devido ao seu tempo de resposta bastante curto, na ordem de $10\mu\text{s}$, são apropriados para aplicações que necessitem observar variações de radiação quase que instantaneamente.

Os piranômetros dotados de sensores fotoelétricos quando utilizados para medir a radiação solar global devem ter seus dados corrigidos devido a sua resposta espectral, dependência da temperatura e resposta co-seno. Quando utilizados para medir radiação solar difusa, utilizando anel de sombra, seus dados devem ser corrigidos, também, devido ao bloqueio de parte da radiação difusa pelo anel de sombra.

Um outro artifício utilizado para realizar a medição de radiação solar difusa é o de utilizar disco de sombreamento, o qual necessita de um seguidor do sol a fim de obstruir a radiação solar direta incidente no sensor, durante o dia. Esse seguimento do sol ao longo do dia necessita de equipamento de custo de aquisição e manutenção elevados. Isso faz com que, em muitos casos, opte-se pela utilização do anel de sombra para obstruir a radiação direta.

Diante destas considerações, o presente trabalho objetiva:

- ❖ calibrar radiômetros com sensores fotoelétricos em relação a um piranômetro de segunda classe, Eppley - modelo PSP, visando, com a utilização de sensores fotoelétricos, a obtenção de dados de radiação solar;
- ❖ estabelecer correções necessárias nas medidas de radiação global e difusa, quando realizadas com piranômetro com sensor fotoelétrico, a fim de que as mesmas sejam de boa qualidade, objetivando uma melhor estimativa das radiações em planos inclinados;
- ❖ demonstrar viabilidade de utilização de radiômetro com sensores fotoelétricos, tendo em vista a sua performance, com boa redução de custos em relação a um medidor que utilize sensores do tipo termopilha;
- ❖ produzir pesquisa com metodologia que objetive viabilizar uso de instrumentação de baixo custo, visando ampliar as perspectivas do laboratório de energias renováveis, ampliando os horizontes de formação técnica/tecnológica no CEFET-RS.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Características básicas da Radiação Solar

2.1.1 O recurso solar

Inegavelmente, o Sol é a maior fonte de energia conhecida pela humanidade e, até onde se sabe, inesgotável devido às reações nucleares que ocorrem em seu centro. Grande parte desta energia chega na Terra em forma de radiação eletromagnética, é convertida em outras formas de energia como, por exemplo, calor e energia cinética da circulação atmosférica, conversão que se processa de maneira desigual, temporal e espacial. Os elementos causadores de tal desigualdade são os movimentos da Terra em relação ao Sol e também em variações na superfície da Terra.

Dal Pai (2005 apud COLSON, 1973), informa que o Sol é uma esfera gasosa (Fig. 1), com temperatura de 6000K na superfície da fotosfera, 1.10^6 K na coroa e 1.10^7 K em seu interior. Sua elevada temperatura interior promove a conversão de hidrogênio em hélio, resultando na emissão de grande quantidade de energia. O sol emite cerca de 62.10^3 kWm^{-2} e apenas $0,5.10^{-7}\%$ dessa energia atinge o topo da atmosfera terrestre, correspondendo a um total de $1,6.10^{24}$ kW. A Tab. 1 apresenta as principais características do Sol.

A fonte de energia, por excelência, na Terra é a proveniente do Sol. Com exceção das energias geotérmica e nuclear, o resto das fontes energéticas

empregadas pelo ser humano tem origem solar. Por exemplo, os combustíveis fósseis são resultado da energia de origem solar acumulada em determinados seres vivos que com o passar do tempo reagem quimicamente formando petróleo, gás ou carbono. Na energia eólica, o vento é o resultado da diferença de pressão das massas de ar aquecidas de maneira diferente pela energia solar. Devemos sempre lembrar que toda vida se sustenta graças ao Sol e que as plantas realizam a fotossíntese através da energia solar, sendo estas o sustento do resto da cadeia alimentícia. Valiati (2005) chega a afirmar que, por inesgotável, a energia gerada pelo Sol “é sem sombra de dúvidas, uma das alternativas energéticas mais promissoras para se enfrentar os desafios do novo milênio”.

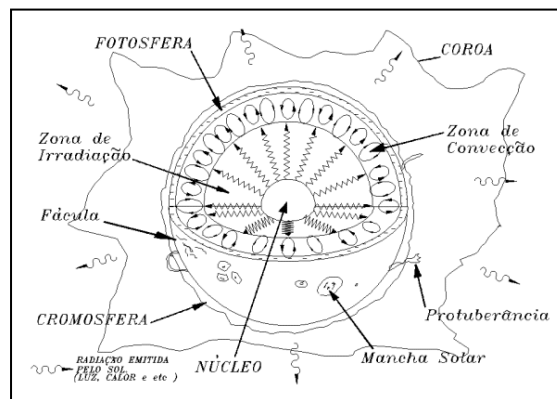


Figura 1 - Esquema da estrutura do Sol.

Fonte: OLIVEIRA, SARAIVA, 2007.

Tabela 1 - Principais características do Sol.

Massa	$m = 1,989 \times 10^{30} \text{ kg}$
Raio	$r = 696\,000 \text{ km}$
Densidade média	$\rho = 1409 \text{ Kg/m}^3$
Densidade central	$\rho_c = 160\,000 \text{ Kg/m}^3$
Distância	$1 \text{ UA} = 1,496 \times 10^8 \text{ km}$
Luminosidade	$L = 3,9 \times 10^{26} \text{ watts} = 3,9 \times 10^{33} \text{ ergs/s}$
Temperatura efetiva	$T_{\text{ef}} = 5785 \text{ K}$
Temperatura central	$T_c = 10\,000\,000 \text{ K}$
Magnitude absoluta bolométrica	$M_{\text{bol}} = 4,72$
Magnitude absoluta visual	$M_v = 4,79$
Tipo espectral e classe de luminosidade	G2 V
Índices de cor	$B-V = 0,62$ $U-B = 0,10$
Composição química principal (Nº)	Hidrogênio = 91,2%, Hélio = 8,7% Oxigênio = 0,078%, Carbono = 0,043%

Fonte: OLIVEIRA, SARAIVA, 2007.

2.1.2 Conceituações e definições

Segundo Varejão-Silva (2005), a denominação de radiação, ou energia radiante, se vincula à energia que se propaga sem necessidade da presença de um meio material, também aplicada para designar o próprio processo de transferência desse tipo de energia. A energia radiante ora revela uma natureza corpuscular (fóton), ora se comporta como uma onda eletromagnética (Fig. 2), acontecendo, na escala subatômica, de as propriedades ondulatória e corpuscular coexistirem e se complementarem.

Sob o ponto de vista ondulatório, a radiação se caracteriza pelo comprimento de onda ou longitude de onda (λ), ou pela frequência de oscilação (f). O produto do comprimento de onda (distância entre duas cristas consecutivas) pela frequência da radiação (número de cristas que passa por um ponto de referência) é igual à velocidade de propagação da luz no vácuo (c), segundo a expressão:

$$c = \lambda.f \quad (1)$$

sendo $c = 2,997925 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ (Yavorsky e Detlaf, 1972). As unidades mais usadas para comprimento de onda são o micrometro (μm) = 10^{-6} m e o *Angstrom* ($\text{\AA}$) = 10^{-10} m .

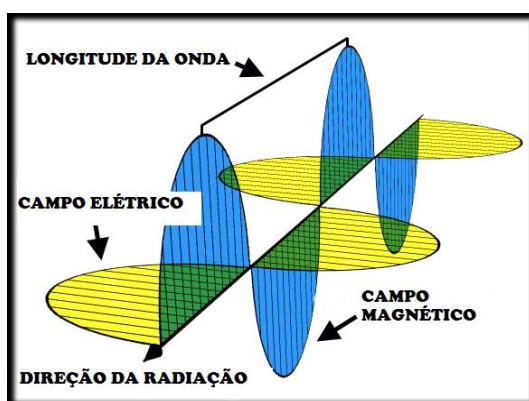


Figura 2 - Onda eletromagnética composta pelos campos elétrico e magnético. A longitude de uma onda é a distância de uma crista a outra.

Fonte: The University Corporation for Atmospheric Research (UCAR), 2007.

Praticamente toda a troca de energia entre a Terra e o resto do Universo ocorre por radiação. O sistema Terra-atmosfera está constantemente absorvendo radiação solar e emitindo sua própria para o espaço, sendo as taxas de absorção e emissão aproximadamente iguais (LUTGENS,TARBUCK, 1989). A radiação eletromagnética, considerada como um conjunto de ondas elétricas e magnéticas (Fig. 2), também tem papel importante na transferência de calor entre a superfície da Terra e a atmosfera, e entre diferentes camadas da atmosfera. As diversas formas de radiação, caracterizadas pelo comprimento de onda, compõem o espectro eletromagnético (Fig. 3).

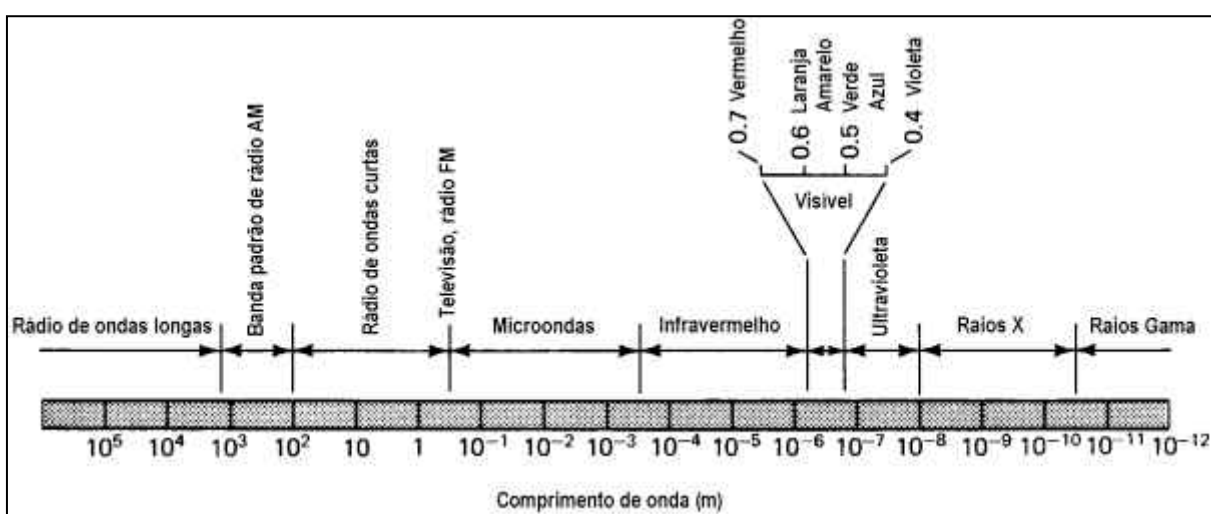


Figura 3 - Espectro Eletromagnético das radiações conhecidas, organizadas de acordo com o comprimento de onda.

Fonte: GRIMM, 1999.

A energia radiante do sol, concentrada na parte visível do espectro ou próxima, se distribui, em relação ao total, com 43% de luz visível, 49% de infravermelho próximo e 7% de ultravioleta. Quando tal energia é absorvida por um corpo, resulta num aumento do seu movimento molecular e de sua temperatura (LUTGENS,TARBUCK, 1989).

A seguir, em função da necessidade de substanciar os raciocínios com entendimentos claros e precisos, apresentam-se outras definições e alguns conceitos pertinentes ao estudo ora empreendido.

2.1.2.1 Fluxo Radiante ou Poder Radiante (Φ)

O Fluxo Radiante é a medida da taxa de variação da quantidade de energia radiante (Q) emitida, transferida ou recebida por unidade de tempo (t).

$$\Phi = \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

No Sistema Internacional de unidades a unidade usada para o fluxo radiante é o Watt, para a energia radiante, o Joule e para o tempo, segundo.

Quando o fluxo radiante é variável durante o intervalo de tempo t_1 a t_2 , a energia radiante integrada é dada por

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \Phi(t) dt \quad (3)$$

2.1.2.2 Densidade de Fluxo de Radiação ou Irradiância (I)

A densidade de fluxo de radiação é uma grandeza que representa o fluxo de radiação integrado para todo o espectro, ou seja, a quantidade de energia radiante que passa através de um certo plano, na unidade de tempo e de área, compreendendo as radiações provenientes de todas as direções. Ou, simplesmente, como a taxa na qual a energia radiante incide em uma superfície, por unidade de área

$$I = \frac{\Phi}{A} \quad (4)$$

No Sistema Internacional, a unidade de Irradiância é Wm^{-2} .

2.1.2.3 Ângulo Sólido (Ω)

Ângulo sólido é simplesmente uma generalização, para três dimensões, do ângulo plano. Assim o ângulo sólido é um ângulo cônico Ω , subentendido por uma

área superficial S , com relação a um ponto O , e representa a parte do espaço que é delimitada pelas retas que conectam todos os pontos do contorno da superfície de S com o ponto O , constituindo um cone. Ele é obtido pela razão entre a parte da área de uma esfera (com centro em O), representada por A , que é interceptada por esse cone, e o quadrado de seu raio. Tem como unidade de medida o *esferorradiano* (sr) e é obtido por

$$\Omega = \frac{A}{r^2} \quad (5)$$

2.1.2.4 Radiância

É a taxa de energia por unidade de área e por unidade de ângulo sólido normal a esta área. A unidade de radiância é $\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}$.

2.1.2.5 Irradiação

É a energia incidente por unidade de área, numa superfície, obtido por integração da irradiância em um tempo especificado (geralmente uma hora ou um dia). A unidade de irradiação é Whm^{-2} ou Jm^{-2} .

2.1.3 Interação entre a Radiação Solar e a Atmosfera Terrestre

À medida que a radiação atravessa a atmosfera terrestre sofre atenuação pelos processos de absorção, reflexão e refração. Tais processos se verificam quando os raios de luz colidem com as nuvens ou com o vapor d'água existente na atmosfera. A radiação que chega à superfície terrestre pode ser classificada como direta e difusa.

De acordo com Varejão-Silva (2005), as radiações direta e difusa são componentes de radiação resultante da soma das duas, denominada de radiação global.

2.1.3.1 Radiação Direta

Pode-se dizer que a distribuição espectral da radiação solar incidente, na camada superior da atmosfera, é comparável àquela emitida por um corpo negro a aproximadamente 6000K, como é mostrado na Fig. 12 na página 24. A diferença verificada entre as curvas, na região do ultravioleta, tem como causa principal as transições eletrônicas ocorridas na camada de gases do Sol. Na travessia da radiação pela atmosfera, vários processos, que mudam sua distribuição espectral, são observados. As mais importantes absorções são devidas ao vapor d'água, no infravermelho, e ao ozônio, no ultravioleta. O espalhamento da radiação, notadamente nas ondas curtas, é responsável pelo decréscimo nas regiões do visível e o UV próximo.

Porém, grande parte da radiação solar é transmitida diretamente e alcança a superfície terrestre em feixes aproximadamente paralelos, como se comprova olhando diretamente para o Sol, sendo este processo regido pela lei de Bouguer-Lambert. Portanto, a radiação direta é aquela que se recebe na superfície terrestre sem ter sofrido nenhum dos processos antes mencionado ao passar pela atmosfera.

Mede-se a radiação solar direta por meio de instrumentos denominados de Pireliômetros, cujas superfícies receptoras são dispostas normalmente aos raios solares incidentes.

2.1.3.2 Radiação difusa

A energia constituinte da radiação difusa do céu é o resultado do espalhamento dos raios solares incidentes em algum tipo de partícula, suspensa na atmosfera. Dos dois tipos de espalhamentos mais gerais, um deles é aquele produzido por partículas de tamanho muito pequeno, comparado ao comprimento de onda (Rayleigh) e o outro, aquele produzido por partículas de tamanho comparável ou maior que o comprimento de onda (Mie).

As moléculas gasosas do ar, principalmente oxigênio e nitrogênio, são os maiores espalhadores de Rayleigh e dominam a forma de espalhamento nos casos de atmosferas claras e livres de turbidância. Para as atmosferas túrbidas, as

partículas de aerossóis espalham fortemente e o espalhamento de Mie chega a ser tão importante quanto o de Rayleigh em comprimentos de onda no azul e no UV. No visível longínquo e infra-vermelho, o processo de espalhamento em atmosferas túrbidas está dominado pelo espalhamento de Mie e para as atmosferas fortemente contaminadas ou nubladas, o espalhamento de Mie é o dominante em todos os comprimentos de ondas.

Diz-se que radiação difusa é a radiação solar recebida do Sol após sua direção ter sido alterada devido à dispersão pela atmosfera, ou, ainda, que a radiação difusa é a que se recebe depois de ter mudado sua direção pelos processos de refração e reflexão que ocorrem na atmosfera.

2.1.3.3 Radiação global ou total

Define-se radiação solar global como sendo aquela recebida de um ângulo sólido de 2π esferorradianos sobre uma superfície horizontal. Ela inclui a recebida diretamente do ângulo sólido do disco solar e a radiação difusa dispersada ao atravessar a atmosfera, representando a soma da radiação direta com a radiação difusa recebida por uma superfície. Sua medida é fornecida pelo instrumento denominado de Piranômetro.

2.2 Geometria Sol-Terra

Na Fig. 4 estão explicitados os diâmetros da Terra e do Sol e a distância entre ambos.

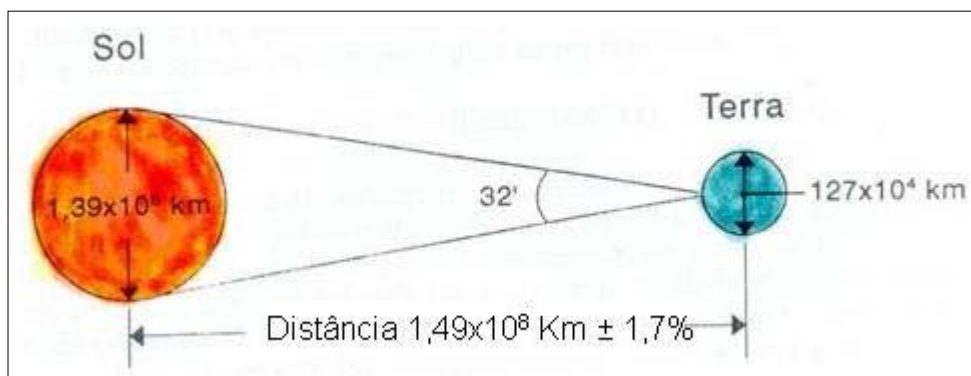


Figura 4 - Relação entre as dimensões do Sol e da Terra.

Fonte: OLIVEIRA e SARAIVA, 2004 (adaptado).

Na Fig. 5 é dada idéia do giro da Terra ao redor do Sol, descrevendo uma órbita elíptica.



Figura 5 - Quatro posições da Terra no giro ao redor do Sol.

Fonte: MAGNOLI e SCALZARETTO, 1998.

2.2.1 Excentricidade da órbita da Terra

O plano que contém esta órbita é chamado *eclíptica* e o tempo que a Terra leva para percorrê-la é um ano. A excentricidade desta órbita é tal que a distância entre o Sol e a Terra varia 1,7%. Tal excentricidade é a razão entre a distância de um dos focos ao centro da elipse (b) e o comprimento da metade do eixo maior (a) (Fig. 6).

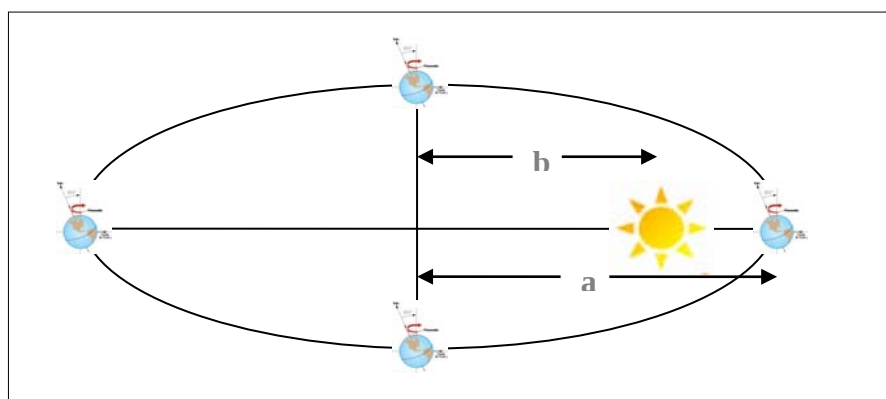


Figura 6 - Elementos da excentricidade da elipse.

Fonte: OLIVEIRA e SARAIVA, 2004 (adaptado).

Com um erro máximo de 0,0001, Spencer desenvolveu uma expressão para o fator de correção da excentricidade da órbita da Terra (E_0). Esta excentricidade pode ser calculada da seguinte maneira:

$$E_0 = 1,00011 + 0,034221\cos\Gamma + 0,00128\sin\Gamma + 0,000719\cos 2\Gamma + 0,000077\sin 2\Gamma \quad (6)$$

onde E_0 é chamado fator de correção da excentricidade da órbita terrestre. Nesta equação, Γ , em radianos, é chamado ângulo do dia e é representado por:

$$\Gamma = 2\pi(d_j - 1)/365 \quad (7)$$

onde d_j é o número do dia do ano no calendário Juliano, variando de 1 (1° de janeiro) até 365 (31 de dezembro). Outra equação mais simples, desenvolvida por Duffie e Beckman, é dada da seguinte maneira:

$$E_0 = 1 + 0,033\cos[(2\pi d_j / 365)] \quad (8)$$

e que pode ser utilizada na maioria das aplicações de engenharia.

A distância média entre o Sol e a Terra é de aproximadamente de uma unidade astronômica (UA). Uma UA é igual a $1,496 \times 10^8$ Km e o Sol subtende um ângulo de $32'$ (Fig. 4, pág. 14).

A Terra, por sua vez, gira ao redor de um eixo central, chamado *eixo polar*, completando uma volta por dia (sucessão dia-noite). Este eixo de rotação forma com o plano da eclíptica um ângulo constante e igual a $23,45^\circ$, conforme pode ser observado na Fig. 7.

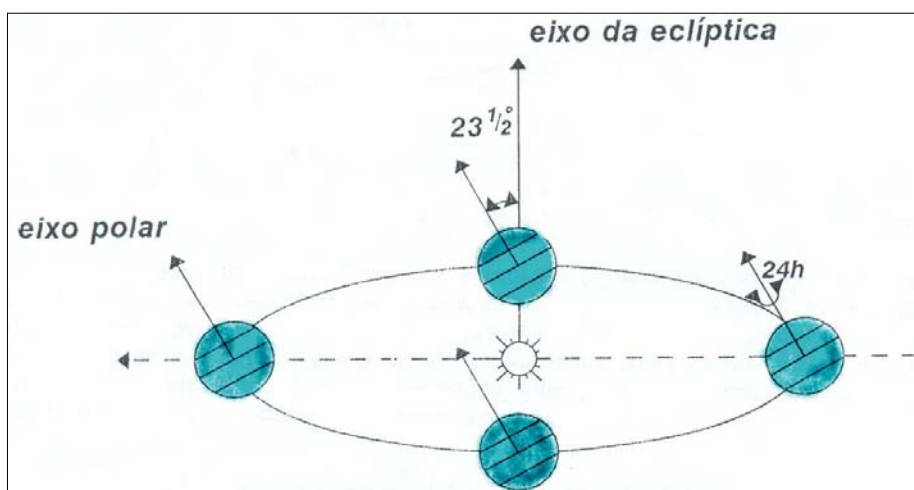


Figura 7 - Movimento da Terra ao redor de seu eixo.

Fonte: Guia Didático de Energia Solar – Conceitos Gerais de Heliotecnia, cap. 2, 2005 (adaptado).

2.2.2 Declinação Solar

Considerando a seção 2.2.1 e de acordo com a Fig. 8, o ângulo formado entre o plano equatorial e a linha que une os centros da Terra e do Sol muda continuamente (sucessão das estações do ano). Este ângulo é conhecido como declinação solar, δ , e pode ser estimado pela equação de Spencer, com um erro inferior a 3':

$$\delta = 0,006918 - 0,399912\cos\Gamma + 0,070257\sin\Gamma - 0,006758\cos 2\Gamma + 0,000907\sin 2\Gamma - 0,002697\cos 3\Gamma + 0,00148\sin 3\Gamma \quad (9)$$

sendo δ dado em radianos. Para obter δ em graus($^\circ$), o segundo membro da equação (9) deve ser multiplicado por $180/\pi$. Este ângulo vale zero nos equinócios vernal e outonal e tem valor de aproximadamente $+23^\circ 27'$ ($+23,45^\circ$) no solstício de verão e $-23^\circ 27'$ ($-23,45^\circ$) no solstício de inverno.

Durante um dia (24h) a variação máxima da declinação (que acontece nos equinócios) é menor que $0,5^\circ$ podendo-se considerar, portanto, como constante ao longo do dia.

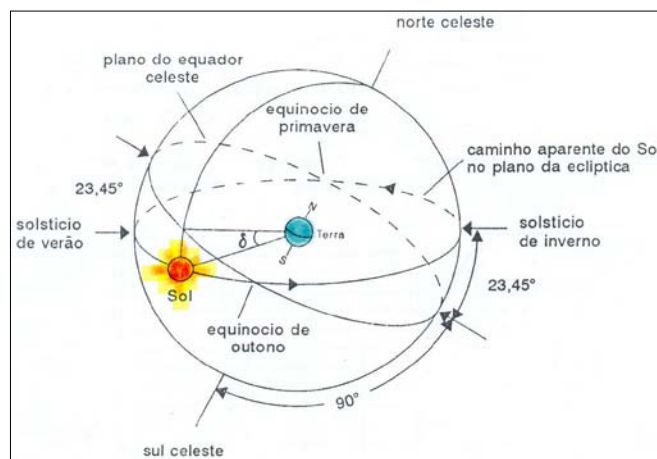


Figura 8 - Esfera celeste mostrando o caminho aparente do Sol e o ângulo de declinação solar.

Fonte: Iqbal, M. An introduction to solar radiation, Academic Press, 1983.

Esta expressão, da mesma forma que a equação (6), pág. 16, leva em conta que a velocidade angular da Terra no seu passo sobre a eclíptica é, de acordo com a lei de Kepler, variável. Isto é, os planetas percorrem áreas iguais em tempos iguais. Para a maioria das aplicações de engenharia, a aproximação de que a Terra gira ao redor do Sol numa órbita circular e com velocidade constante é suficiente. Desta forma, a declinação solar pode ser determinada pela equação (10), raciocínio semelhante produziu a equação (8):

$$\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365} (dj + 284) \right], \text{ em graus} \quad (10)$$

2.2.3 Tempo Solar Verdadeiro

O tempo solar verdadeiro (TSV) é baseado na rotação da Terra em torno de seu eixo polar e de sua revolução em torno do Sol. O dia solar é o intervalo de tempo (não necessariamente 24h) quando o Sol completa um ciclo completo ao redor de um observador estacionado na Terra. O TSV, também chamado de hora solar, é o tempo baseado no movimento angular aparente do Sol, através do céu, sendo meio dia a hora em que o Sol passa pelo meridiano do observador.

O tempo solar está relacionado a todas as relações angulares do Sol, não coincidindo com o tempo local medido pelo relógio, sendo, portanto, necessário converter o tempo local padrão ao tempo solar, aplicando duas correções:

(1^a) há uma correção constante para a diferença da longitude entre o meridiano do observador e o meridiano no qual o tempo local padrão é baseado, considerando que o Sol gasta quatro minutos para atravessar 1° de longitude.

(2^a) a segunda correção é chamada equação do tempo, que leva em conta as perturbações na taxa de rotação da Terra, que afeta o tempo que o Sol leva para atravessar o meridiano do observador.

A hora solar se relaciona com a hora oficial, através da seguinte relação:

$$TSV = TO + 4(L_{st} - L_{loc}) + E_t \quad (11)$$

na qual TO é a hora oficial, L_{st} é a longitude padrão, L_{loc} é a longitude local e E_t a equação do tempo. Deve ser considerado que a correção é positiva se a longitude local está à leste da longitude padrão e negativa se está à oeste.

Para calcular a equação do tempo (E_t) usa-se a expressão:

$$E_t = (0,000075 + 0,001868\cos\Gamma - 0,032077\sin\Gamma - 0,014615\cos 2\Gamma - 0,04089\sin 2\Gamma)229,18 \quad (12)$$

Na expressão (12), o termo entre parêntese representa a equação do tempo e o termo multiplicador da direita, a conversão para minutos.

2.2.4 Posição do Sol em relação a superfícies horizontais

Os Sistemas de Coordenadas Celestes são discutidos por propiciarem a identificação da posição do Sol em relação à Terra, em qualquer momento, a fim de

que se possa analisar as consequências do movimento de translação da Terra em torno do Sol. O conceito de esfera celeste:

uma esfera de diâmetro tão grande quanto se queira imaginar, na superfície da qual todos os astros (Sol, Lua, estrelas ...) estariam localizados, e cujo centro coincide com o centro da Terra. Os pontos e planos usados para definir as coordenadas celestes são obtidos prolongando-se os eixos e os planos (paralelos e meridianos) terrestres até interceptarem a esfera celeste. Obtém-se, desta maneira, os pólos celestes Norte e Sul, bem como os meridianos e os paralelos celestes (VIANELLO, ALVES, 2000).

A Fig. 8 apresenta os principais elementos da representação clássica da esfera celeste. A intersecção desta esfera com o plano do equador terrestre define o equador celeste.

Neste entendimento, o movimento da Terra ao redor do Sol pode ser descrito como o movimento aparente do Sol ao redor da Terra seguindo o maior círculo que forma um ângulo de $23,45^\circ$ com o equador celeste (a eclíptica). Logo, o Sol descreve diariamente ao redor da Terra um círculo cujo diâmetro varia dia a dia, sendo máximo nos equinócios e mínimos nos solstícios, de acordo com a Fig. 9.

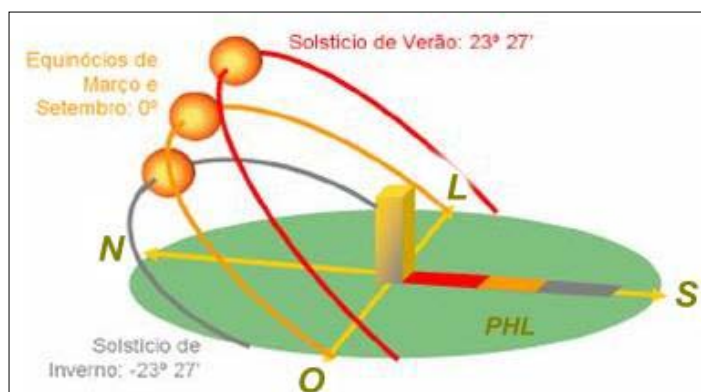


Figura 9 - Caminhos aparentes do Sol através do céu. PHL é o Plano do Horizonte Local.

Fonte: Guia Didático de Energia Solar – Conceitos Gerais de Heliotecnia, cap. 2, 2005 (adaptado).

Algumas relações geométricas entre a posição solar no céu e as coordenadas terrestres são necessárias, objetivando calcular a radiação solar que atinge uma superfície horizontal na Terra. A Fig. 10 será usada como referência.

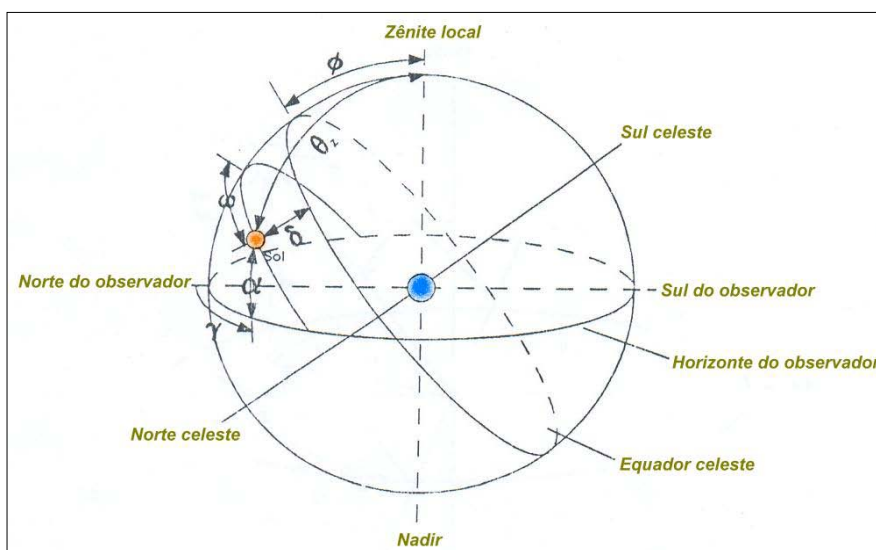


Figura 10 - Esfera celeste e coordenadas do Sol relativas a um observador na Terra, no ponto 0.

Fonte: Iqbal, M., An introduction to solar radiation, Academic Press, 1983.

São chamados de zênite e nadir os dois pontos em que a vertical (normal) de um lugar (observador) na Terra, intersecta a esfera celeste.

Entende-se por latitude geográfica (ϕ) o ângulo entre a vertical, referida anteriormente, e o plano do equador celeste, sendo negativa ao sul e positiva ao norte deste plano.

Ao círculo máximo na esfera celeste cujo plano passa através do centro da Terra, normal a uma linha unindo o centro da Terra e o zênite, dá-se o nome de horizonte do observador. O ângulo de zênite, referido como θ_z a partir de agora, é o ângulo entre o zênite local e a linha que une o observador e o Sol. A altitude solar, α , (também chamada elevação solar) é a altura angular do Sol acima do horizonte celeste do observador. Este ângulo nada mais é que o complemento do ângulo de zênite.

O ângulo de azimute solar, γ_s , é o ângulo (no zênite local) entre o plano do meridiano do observador e o plano do círculo máximo que passa através do zênite e o Sol. Este ângulo é positivo a oeste e negativo a leste (sul igual a zero), variando assim entre 0° e $\pm 180^\circ$.

O ângulo horário, ω , é o ângulo (medido no pólo celeste) entre o meridiano do observador e o meridiano do Sol, valendo 0° ao meio-dia (TSV) e desde aí, muda 15° por hora.

Para uma dada posição geográfica e na ausência de uma atmosfera refrativa, as relações geométricas entre o Sol e uma superfície horizontal são as seguintes:

$$\cos \theta_z = \sin \delta \sin \phi + \cos \delta \cos \phi \cos \omega = \sin \alpha \quad (13)$$

$$\cos \gamma_s = (\sin \alpha \sin \phi - \sin \delta) / \cos \alpha \cos \phi \quad (14)$$

onde θ_z é o ângulo de zênite, em graus; α é a altitude solar ($\alpha = 90 - \theta_z$); ω é o ângulo horário, meio-dia igual a zero e manhãs negativo; γ_s é o ângulo de azimuth solar, sul zero e leste negativo e δ é a declinação solar, positiva ao norte, em graus.

Estes ângulos podem ser visualizados de uma forma mais simples na Fig. 11.

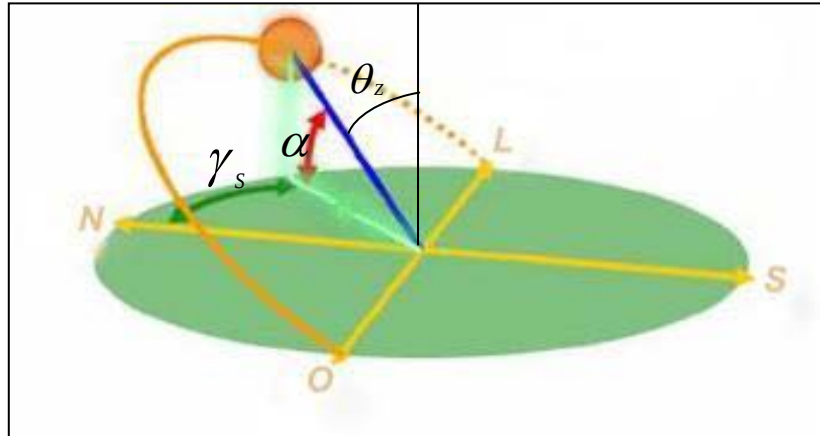


Figura 11 - Definição dos ângulos de zênite e azimuth.

Fonte: Guia Didático de Energia Solar – Conceitos Gerais de Heliotecnia, cap. 2, 2005 (adaptado).

Para encontrar ω_s , o ângulo de nascimento do Sol, basta resolver a equação (13) para $\theta_z = 0$. Desta maneira:

$$\cos \omega_s = -\sin \phi \sin \delta / \cos \phi \cos \delta \quad (15a)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (15b)$$

2.3 Constante Solar e sua distribuição espectral

2.3.1 Constante Solar

De acordo com Vianello e Alves (2000), a constante solar é definida como a irradiância sobre uma superfície normal aos raios solares, à distância média Terra-Sol. Ou seja, pode ser entendida como a taxa da energia solar total, em todos os comprimentos de onda, incidente em uma área unitária em exposição normal aos raios do Sol, a uma distância de 1 UA (distância média Terra-Sol). A Organização Meteorológica Mundial recomenda o valor obtido da média de oito medidas da constante solar, realizada entre 1969 e 1980. Este valor é:

$$I_{sc} = 1367 \text{ Wm}^{-2} \quad \text{ou} \quad I_{sc} = 4921 \text{ kJm}^{-2}\text{h}^{-1}$$

com um desvio padrão de $1,7 \text{ Wm}^{-2}$ e um desvio máximo de $\pm 7 \text{ Wm}^{-2}$.

2.3.2 Distribuição espectral da Irradiância Solar Extraterrestre

Um intervalo de comprimento de onda desde $0,2$ até $25 \mu\text{m}$ é coberto pelo espectro da Radiação Solar Extraterrestre. Sabe-se que a intensidade da radiação varia com o comprimento de onda, devido principalmente às diferenças de temperatura de cada região do Sol. A esta relação funcional entre intensidade e comprimento de onda dá-se o nome de distribuição espectral. A Fig. 12 mostra o espectro solar extraterrestre no intervalo de comprimento de onda de $0,2$ a $2,3 \mu\text{m}$. Percebe-se que a distribuição espectral é muito próxima a do espectro de um corpo negro a 5900 K , que também está representado na figura citada neste parágrafo. Pelo observado, aproximadamente 95% da energia do Sol está dentro do intervalo $0,3$ a $2,4 \mu\text{m}$, 1,2% no intervalo $<0,3 \mu\text{m}$ e 3,6% no intervalo $>2,4 \mu\text{m}$.

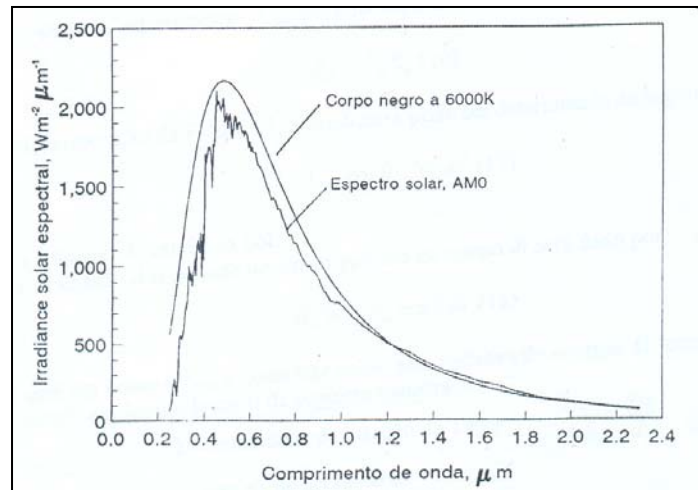


Figura 12 - Distribuição espectral da radiação extraterrestre AM0 e distribuição espectral de um corpo negro a 5900K.

Fonte: OLIVEIRA, 1997.

2.3.3 Irradiação solar extraterrestre em superfícies horizontais

2.3.3.1 Radiação horária

Segundo Vianello e Alves (2000), a latitude e o tempo são os dois fatores com os quais varia a radiação solar incidente no topo da atmosfera.

A irradiação solar extraterrestre horária, I_0 , sobre uma superfície horizontal, no topo da atmosfera é dada por:

$$I_0 = I_{sc} \cdot E_0 \cdot \cos \theta_z \quad (16)$$

Onde I_{sc} é a constante solar, E_0 é o fator de correção da excentricidade da órbita terrestre e a função $\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega$ é introduzida pelo raciocínio da Lei de Lambert, sendo θ_z o ângulo zenital. Para um curto período de tempo dt , a irradiação dI_0 será dada por:

$dI_0 = I_{sc} \cdot E_0 (\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega) dt$, que com as devidas conversões e

substituições, se converte em $dI_0 = \frac{12}{\pi} I_{sc} \cdot E_0 (\sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega) d\omega$,

obtendo-se a radiação para o período de uma hora. Integrando-se, obtém-se a equação (17):

$$I_0 = \frac{12}{\pi} I_{sc} \cdot E_0 [\cos\delta \cdot \cos\phi (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + (\omega_2 - \omega_1) \sin\delta \cdot \sin\phi] \quad (17)$$

onde os ângulos horários ω_1 e ω_2 definem a hora, são dados em radianos, sendo $\omega_1 < \omega_2$. Muitas vezes faz-se necessário o cálculo da radiação extraterrestre em uma superfície horizontal, para um período de tempo qualquer, que não seja um dia ou uma hora. Nesse caso ω_1 e ω_2 devem ser definidos para esse período de tempo.

2.3.3.2 Radiação diária

Segundo Iqbal (1983) a irradiação solar extraterrestre diária, H_0 , em uma superfície horizontal, desde o nascer-do-Sol (n_s) até o pôr-do-Sol (p_s), é calculada pela expressão:

$$H_0 = \int_{n_s}^{p_s} I_0 dt \quad (18)$$

Considerando E_0 e δ constantes ao longo do dia e convertendo dt em ângulo horário, obtém-se:

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{sc} E_0 \cos\delta \cos\phi [\sin\omega_s - (\pi/180)\omega_s \cos\omega_s] \quad (19)$$

2.3.4 Índice de claridade (K_t)

O índice de claridade K_t é um indicador das condições de transmissão atmosférica. Por exemplo, em um dia completamente nublado os valores de K_t tendem a zero, e em um dia completamente claro os valores de K_t tendem a um. O índice de claridade definido por Colliber (1991):

$$K_t = \frac{I}{I_0} \quad (20a)$$

onde I é a irradiação solar global horária e I_0 é a irradiação solar global extraterrestre horária, ambas em um plano horizontal. Podemos obter K_t para diferentes escalas de tempo: horária, diária ou mensal. Para valores diários, o K_t pode ser definido como:

$$K_t = \frac{H}{H_0} \quad (20b)$$

onde H é a irradiação solar global diária e H_0 é a irradiação solar global extraterrestre diária, no plano horizontal.

2.3.5 Massa de ar (AM)

Oliveira (1997) define massa de ar, AM, como sendo o caminho percorrido pela radiação solar desde sua incidência na atmosfera até atingir a superfície terrestre.

Ignorando-se a curvatura da terra e assumindo-se uma atmosfera não-refrativa e completamente homogênea, a massa de ar relativa, aplicada para todos os constituintes da atmosfera, é dada por:

$$AM_r = \sec \theta_z \quad (21)$$

O erro nesta equação, devido à curvatura da terra e a refração da atmosfera real, é 0,25% para $\theta_z = 60^\circ$ e aumenta para 10% para $\theta_z = 85^\circ$.

Baseado em uma atmosfera padrão, Kasten e Young (1989) apresentaram uma tabela de massas de ar e a seguinte equação:

$$AM_{rk} = \left[\cos \theta_z + 0,50572(96,07995 - \theta_z)^{-1,6364} \right]^{-1} \quad (22)$$

com θ_z dado em graus. Esta fórmula tem uma exatidão superior a 0,1% para ângulos de zênite menores que 86° e um erro máximo de 1,25% para $\theta_z = 89,5^\circ$. A equação acima é aplicável para uma pressão de 1013,25 mbares no nível do mar. Os valores de massa de ar para alguns ângulos de zênite são dados na Tab. 2 e na Fig. 13.

Tabela 2 - Valores de massa de ar.

Massa de ar ótica		
θ_z , graus	$AM_r = \sec \theta_z$	AM_{rk} (Kasten)
0	1,00	1,00
30	1,15	1,15
60	2,00	1,99
65	2,37	2,35
70	2,92	2,90
75	3,86	3,81
80	5,76	5,58
85	11,47	10,32
86	14,34	12,34
87	19,11	15,22
88	28,65	19,54
89	57,30	26,31
90	∞	36,51

Fonte: KASTEN e YOUNG, 1989.

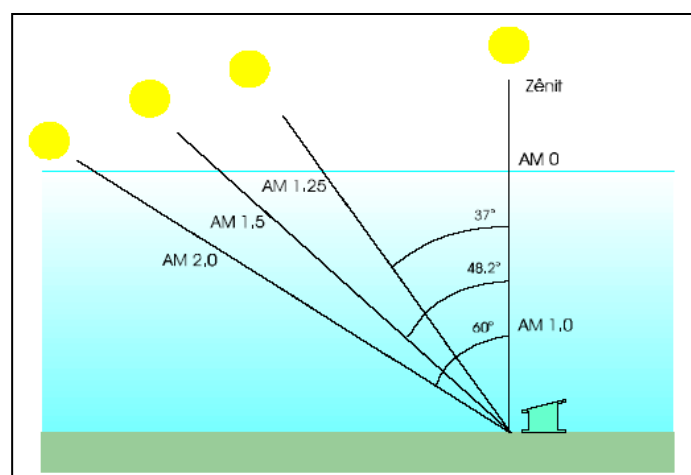


Figura 13 - Massa de ar que um feixe de radiação atravessa ao incidir na superfície terrestre com um ângulo θ_z .

Fonte: OLIVEIRA, 1997.

2.4 Medida da Radiação Solar

2.4.1 Introdução

Avalia-se que os fluxos de radiação que a superfície da Terra recebe ou emite, atuam decisivamente no balanço térmico do Globo Terrestre. Quando, a partir

de método científico obtém-se séries regulares e bem distribuídas de registros das componentes de radiação solar e terrestre, substanciam-se as condições necessárias para a utilização de tais medidas em projetos que satisfazem muitas necessidades humanas. Tais projetos podem contemplar, dentre outras, atividades em: biologia, medicina, arquitetura, meteorologia, indústria.

Obter-se medidas confiáveis de radiação, significa habilitar-se a analisar, por exemplo, as propriedades e distribuição dos elementos que constituem a atmosfera, como os aerossóis, o vapor d'água, o ozônio, tão presentes na discussão do aquecimento global.

O enfoque a ser dado em relação ao item Medida de Radiação Solar, no tocante a definições, instalação de instrumentos (com as observações relativas a calibrações e precisões dos dados medidos), tabelas, se baseia no “Guia de Instrumentos y Métodos de Observacion Meteorológicos”(GIMOM), da World Meteorological Organization (WMO), WMO – 1990. Também serão realizadas muitas citações ao Atlas Solarimétrico do Brasil – banco de dados terrestre, publicado em 2000, o qual nesta dissertação denomina-se, genericamente por Atlas, 2000.

2.4.1.1 Grandezas Meteorológicas da Radiação

Usa-se classificar tais grandezas, segundo suas origens, em:

a) Radiação solar: é a radiação eletromagnética procedente do Sol, chamada de Extraterrestre quando incidentente no limite da atmosfera, também denominada de radiação de onda curta, tendo 97% de seus comprimentos de onda entre 0,29 μm e 3 μm . Parte da radiação solar Extraterrestre penetra na atmosfera e chega à superfície, enquanto que parte dela se dispersa e/ou é absorvida pelas moléculas gasosas, as partículas de aerossóis e as gotas e cristais de nuvens. A luz tem 99% de seu comprimento de onda entre 0,40 μm e 0,73 μm ; o ultravioleta possui comprimento de onda menor do que 0,40 μm , enquanto que o infravermelho tem comprimento de onda superior a 0,73 μm .

b) Radiação terrestre: é a radiação de onda longa emitida pela superfície da Terra e pelos gases, os aerossóis e as nuvens da atmosfera. Em 300 K, 99,9% dessa radiação tem comprimento de onda superior a 3,00 μm , sendo 99% superior a 5 μm .

Usa-se a terminologia adotada pela Comissão de Radiação da AIMFA em 1977 e as unidades do Sistema Internacional (SI), havendo a adoção, para as variáveis meteorológicas da radiação, das seguintes unidades:

-Para grandezas totais (integradas sobre o intervalo completo de comprimento de onda):

- (a) Watts por metro quadrado (W.m^{-2}) para Irradiância;
- (b) Joules por metro quadrado (J.m^{-2}), para exposição radiante.

-Para grandezas espectrais:

- (a) Watts por metro quadrado por nanômetro ($\text{W.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$), para Irradiância espectral;
- (b) Joules por metro quadrado por nanômetro ($\text{J.m}^{-2}.\text{nm}^{-1}$), para Exposição radiante.

Emprega-se, por recomendação do SI, os múltiplos e submúltiplos (potências de 10^3) de cada uma das unidades(...G, M, k, m, μ , n...).

2.4.1.2 Normalização

O Anexo 9C do WMO – n.8 (1990), traz as indicações dos critérios de calibração dos instrumentos radiométricos, cuja responsabilidade recai nos Centros Radiométricos Nacionais, Regionais e Mundiais. Na América do Sul existe um centro regional, localizado na Argentina.

Os radiômetros, a serem utilizados na obtenção dos dados de radiação solar global e difusa (recentemente adquiridos e ainda sem uso), estão, segundo os fabricantes, calibrados de acordo com a referência básica, o Grupo Mundial de Normalização de Instrumentos (WSG), que se utiliza para verificar a Referência Radiométrica Mundial (WRR).

2.4.2 Instrumentos de medida da Radiação Solar

2.4.2.1 Introdução

Usa-se classificar os instrumentos meteorológicos de medida de radiação solar de acordo com os critérios empregados: o tipo de variável que se pretende medir, o campo de visão, a resposta espectral, o emprego principal a que se destina. A Tab. 3 apresenta uma classificação dos piranômetros baseada nas características dos mesmos.

Tendo em vista as características deste trabalho, que se propõe a obter dados de radiação solar global e difusa, objetivar-se-á pequena discussão dos instrumentos que medem estas radiações, contemplando-se, também, algumas menções aos sensores, por eles utilizados, a fim de que se possa avaliar a relação Custo/qualidade de dados. Tais instrumentos são classificados como Piranômetros. Despreza-se, no estudo, a radiação refletida no solo adjacente, denominada de albedo, visto que se trabalhou com planos na horizontal.

Tabela 3 - Classes dos piranômetros com as principais características.

Característica	Padão secundário	Primeira classe	Segunda classe
Resolução (variação mínima detectável em Wm^{-2})	± 1	± 5	± 10
Estabilidade (tanto por cento de totalidade de escala, variação/ano)	± 1	± 2	± 5
Resposta co-senoidal (tantos por cento de desvio em relação ao ideal para uma altura solar de 10° em um dia desanuviado)	$< \pm 3$	$< \pm 7$	$< \pm 15$
Resposta azimutal (tanto por cento de desvio da medida para uma altura solar de 10° em um dia desanuviado)	$< \pm 3$	$< \pm 5$	$< \pm 10$
Resposta de temperatura (tanto por cento de erro máximo devido a variação da temperatura ambiente dentro do intervalo de operação)	± 1	± 2	± 5
Não linearidade (tanto por cento de totalidade de escala)	$\pm 0,5$	± 2	± 5
Sensibilidade espectral (tanto por cento de desvio da absorptância média $0,3$ a $3 \mu m$)	± 2	± 5	± 10
Tempo de resposta (resposta de 99%)	$< 25s$	$< 1min.$	$< 4 min.$

Fonte: Guia da OMM, nº 8, 1990.

Apesar do exposto, torna-se necessário lembrar que a radiação direta somada com a radiação difusa dão como resultado o valor da radiação global. Logo, se pode obter valores de radiação direta a partir de valores medidos de radiação global e de radiação difusa, ou através de instrumento que forneça valores medidos de radiação direta normal. Tais instrumentos são denominados Piranômetros, existindo os que são considerados padrão (primário e secundário) e os de primeira e segunda classes. São instrumentos de alta precisão (de $\pm 0,1\%$ a $\pm 2,0\%$).

Usa-se, habitualmente, piranômetros cujo elemento de captação da radiação, o sensor, é uma termopilha, que mede a diferença de temperatura entre duas superfícies, normalmente pintadas de preto e branco, e igualmente iluminadas. A vantagem principal de tal sensor é a sua resposta uniforme em relação ao comprimento de onda (Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000).

São também muito usados, para medições piranométricas, instrumentos com sensores de fotocélulas de silício monocromático. Seus custos são de 10 a 20% dos custos dos instrumentos que usam termopilhas. A maior limitação é a não uniformidade da resposta espectral e a região relativamente limitada de comprimento de onda ($0,40\ \mu\text{m}$ a $1,1\ \mu\text{m}$ com máximo em torno dos $0,90\ \mu\text{m}$), a qual a fotocélula é sensível (Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000).

2.4.2.2 Tipos de Piranômetros

Discute-se a seguir, as principais características dos dois modelos de piranômetros que interessam ao presente trabalho.

a) Piranômetro Fotovoltaico

Trabalhos, com grande consistência científica, de Michalsky, Harrison, Lebaron (1987) apostam que este tipo de instrumento (de primeira e segunda classe) apresenta boas condições de utilização, tanto pelo desempenho apresentado, como pelo baixo custo. O seu elemento sensor é uma célula fotoelétrica, normalmente de silício monocristalino, que tem a propriedade de produzir uma corrente elétrica quando iluminada, sendo que quando atinge o curto-

circuito, esta corrente é proporcional à intensidade da radiação incidente. Seu uso é recomendado para integrais diárias de radiação solar global sobre um plano horizontal ou para verificar pequenas flutuações da radiação, em função de sua grande sensibilidade e resposta quase instantânea, cerca de 10s. Avalia-se que, para valores diários, pode apresentar um erro de mais ou menos 3%, porém com alguns procedimentos de correção, pode-se conseguir erros menores do que 1% (Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000).

b) Limitações dos sensores fotoelétricos na medição de radiação solar global e difusa

Os sensores fotoelétricos têm sua eficiência afetada, basicamente, como é exposto por Araújo (1985), por dois fatores: seletividade de absorção da célula e procedimentos de fabricação. A seletividade desses sensores faz com que nem todos os fótons que incidem no material semicondutor sejam aproveitados para gerarem pares elétrons-lacunas. Alguns fótons que incidem no material semicondutor possuem energia menor que a do *gap* (lacunas) do material, não gerando pares elétrons-lacunas. Outros possuem energia muito maior e podem passar pelo material sem serem absorvidos. Caso sejam absorvidos, sua energia, mesmo maior que a do *gap* do material, só pode gerar um par elétron-lacuna, isto é, tem o mesmo efeito se sua energia fosse igual a do *gap*. Além disso, nem todos os pares de elétrons-lacunas são aproveitados pois os mesmos podem ser recombinados rapidamente, sem contribuir com o efeito fotovoltaico. Devido a estes fatos, os sensores fotoelétricos constituídos por silício somente são sensíveis a radiações com comprimentos de onda correspondentes a luz visível e ao infravermelho perto do visível.

A não coincidência dos máximos de energia para cada comprimento de onda do espectro solar e o da resposta espectral do sensor fotoelétrico faz com que nem toda a energia solar seja captada pelo sensor.

Um outro fator que contribui para o aumento da incerteza da medida de radiação solar é a sensibilidade do sensor. Sua absorção de radiação varia com o

ângulo de incidência e para sensores fotoelétricos dotados de silício, essa sensibilidade cai bruscamente para ângulos de incidência altos, não obedecendo à lei dos co-senos. Essa dependência angular de absorção dos sensores é chamada de resposta co-seno e tem seu efeito minimizado nos piranômetros através da utilização de um elemento plástico difusor colocado sobre o sensor. Dessa forma, a absorção permanece praticamente constante até ângulos de incidência na ordem de 70° . Para ângulos maiores que 70° a absorção tem um aumento considerável e após, diminui rapidamente para ângulos de incidência próximos de 90° . Favoravelmente a utilização de piranômetros que utilizam sensores fotoelétricos com difusores, suas respostas co-senos não obedecem perfeitamente à lei dos co-senos quando se tem uma baixa elevação solar, momentos esses de baixos valores de radiação solar direta de modo que, para períodos de integração diário de radiação, esse desvio da resposta co-seno ideal pode ser desprezado.

A resposta espectral de um sensor fotoelétrico de silício é mostrada na Fig. 14, variando muito pouco para diferentes fabricantes. A correção da resposta co-seno do piranômetro da Licor, modelo LI-200SA, é apresentada na Fig. 15.

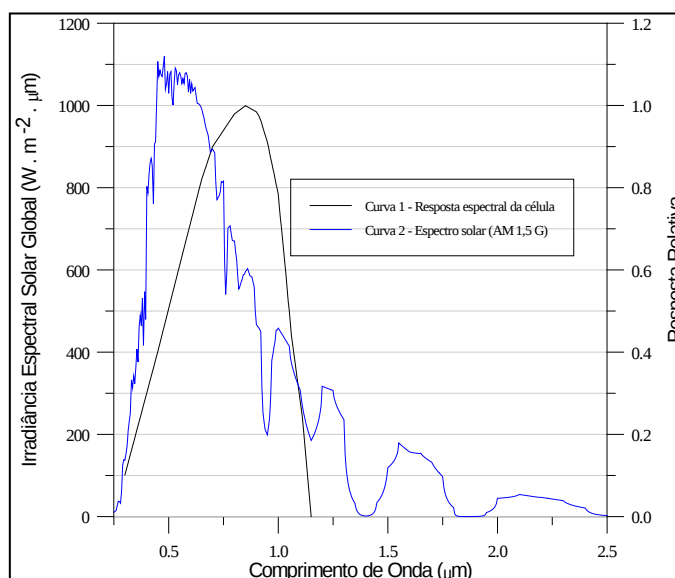


Figura 14 - Resposta espectral do silício.

Fonte: Li-Cor Terrestrial Radiation Sensor, Instruction Manual, 2005.

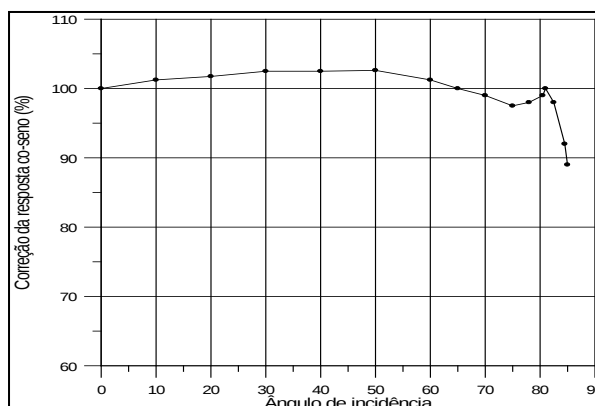


Figura 15 - Resposta co-seno do piranômetro da Licor, modelo LI-200SA.

Fonte: Li-Cor Terrestrial Radiation Sensor, Instruction Manual, 2005.

c) Piranômetro Termoelétrico

Neste instrumento, o que dá forma ao que se denomina pilha termoelétrica são pares termoelétricos (termopares) ligados em série. Estes geram uma tensão elétrica proporcional à diferença de temperatura entre suas juntas, as quais se encontram em contato térmico com placas metálicas que se aquecem de forma distinta, quando iluminadas. A citada diferença de potencial medida na saída do instrumento, pode ser relacionada com o nível de radiação incidente. São radiômetros que apresentam boa precisão, na faixa de 2% a 5%, podendo ser usados para medir radiação em escala diária, horária ou menor, com dependência do equipamento de aquisição de dados associado (Atlas Solarimétrico do Brasil, 2000).

2.4.2.3 Utilização do Piranômetro na medição de radiação difusa

Pode-se medir a radiação solar difusa de duas maneiras: (1) mede-se a radiação difusa com a interceptação da radiação solar direta; (2) mede-se simultaneamente as radiações global e direta e obtém-se a radiação difusa por diferença. A primeira alternativa pode ser desdobrada em duas: interceptando-se a radiação direta sobre o sensor com um pequeno disco ou interceptando-se a radiação direta com um anel metálico de sombreamento. A segunda utiliza o

piranômetro para medir a radiação global e um pireliômetro com rastreador solar para medir a radiação direta. Os métodos que utilizam sistema de acompanhamento do Sol são considerados mais precisos, porém por razões econômicas não são os mais utilizados. Por ser a alternativa mais econômica, o uso do anel de sombreamento vem sendo a mais usada (ESCOBEDO, FRISINA, RICIERI, OLIVEIRA, 1997).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Base física, coleta e armazenamento de dados

Os instrumentos de medição de radiação solar global, difusa e o de medição de temperatura, foram instalados sobre bases metálicas mostradas nas fotos¹ das Figuras 16a e 16b, estando uma delas sem anel de sombreamento e as outras duas, quando necessário, equipadas com o referido anel. As bases metálicas estão distribuídas espacialmente em Plataforma Radiométrica, instalada sobre a torre de caixa d'água do CEFET-RS, localizado no centro da cidade de Pelotas (31°52'32"S, 52°21'11"W, 19m). O Apêndice 1 mostra a localização da Plataforma Radiométrica e as principais vistas das Bases Metálicas instaladas.

Duas das bases metálicas (Fig. 16a), cujas construções foram inspiradas no modelo Drummond (1956), são dotadas de: regulagem da latitude na junção entre o anel e a base, calhas de deslizamento do anel que facilitam o encobrimento do sensor, regulagem da altura do piranômetro e regulagem fina para a orientação norte-sul geográfica (Fig. 17a e 17b). O Apêndice 2 mostra a idéia original e alguns destaques do histórico da construção das bases metálicas. Na execução das medições, com esta montagem, o piranômetro mantém-se fixo e o anel de sombreamento translada paralelamente ao eixo polar para compensar as variações da declinação solar (DAL PAI, 2005).

A Fig. 16b mostra a base construída sob inspiração do modelo de Robinson e Stoch, na qual o piranômetro mantém-se fixo no centro do anel, o qual é rotacionado

¹ As fotos das Figuras 16a, 16b, 17a, 17b, 18a, 18b, 19, 20, 21, 22 e 23 fazem parte dos arquivos do autor da dissertação.

em torno de seu centro para compensar as variações da declinação solar. Escolheu-se a montagem de Drummond para utilização na medição de radiação difusa, sendo atualmente a mais utilizada cientificamente e também a mais comercializada (DAL PAI, A. 2005). Utilizou-se a citada base, sem o anel de sombreamento, para assentar um piranômetro com sensor fotoelétrico, objetivando obtenção de valores de radiação global, nos momentos em que se obtinham medidas de radiação solar difusa nos outros dois medidores, estes sim equipados com anéis de sombra.



16a



16 b

Figuras 16a e b - Bases metálicas utilizadas para medições.



17a



17b

Figuras 17a e b - Regulação de latitude e calha de deslizamento do anel (2a) e regulação fina da orientação N-S geográfica verdadeira e altura do piranômetro.

A plataforma radiométrica, colocada em espaço livre de obstáculos ao redor, acolhe os piranômetros em um plano horizontal, perfeitamente nivelados. Orientam-se os piranômetros, nas suas fixações às bases, de tal modo que os cabos

blindados que emergem, e os conectores, fiquem situados ao sul do mesmo, minimizando o aquecimento das conexões devido à radiação solar. Além disso, tanto cabos blindados, como o registrador e ainda os piranômetros ficam aterrados.



18a



18b

Figuras 18a e b - Determinação do N-S geográfico verdadeiro.

Na execução das medições de radiação difusa impõe-se que o eixo do anel de sombreamento esteja na direção N-S geográfica verdadeira. Determinou-se a direção N-S geográfica, usada no referenciamento do anel de sombra nas medições de radiação difusa, fazendo os seguintes procedimentos: (a) por volta das 10h, usando um fio de prumo, marca-se um ponto coincidente com o ponto indicado pelo peso do prumo no chão, fixando referência inicial; (b) verifica-se a sombra da haste no chão e faz-se uma marca com giz ou carvão na extremidade da sombra; (c) usando um barbante, segura-se uma ponta junto à referência inicial e traça-se um arco de círculo partindo do ponto marcado anteriormente em direção ao leste; (d) aguarda-se, que a Terra gire e que a sombra da haste se projete sobre o círculo traçado. Onde a sombra tocar novamente o arco de círculo faz-se nova marca; (e) traça-se a mediatriz do ângulo formado, que nada mais é do que a direção N-S verdadeira. Resta saber qual é o norte e qual é o sul. Sabe-se que o leste é o ponto de onde o sol nasce, em nossa direita, logo o norte estará à frente, o oeste à esquerda e o sul atrás. As Figuras 18a, 18b e o Apêndice 3 mostram as principais ações na determinação da direção Norte-Sul Geográfica.

Na plataforma funcionam três piranômetros: um Eppley, a ser utilizado como referência nas medições de radiação global e difusa, e dois outros que utilizam sensores do tipo fotoelétrico. Na medição de radiação difusa, ambos são dotados de anel de sombreamento.

As medidas de temperatura são fornecidas por um sensor de precisão denominado LM35, que apresenta uma saída de tensão linear relativa à temperatura a que ele estiver submetido no momento em que for alimentado por uma tensão de 4-20Vdc e GND, tendo em sua saída um sinal de 10mV para cada grau Celsius de temperatura. Não necessita de calibração externa para fornecer, com exatidão, valores de temperatura na faixa de -55°C à 150°C . O LM35 é abrigado dentro de câmara assentada sobre uma base metálica (Fig. 19), semelhante a que abriga o sensor do piranômetro licor. Na medição de radiação difusa, o conjunto câmara e base metálica, assim como o piranômetro Licor, ficam sob a proteção do anel de sombreamento, e livre da radiação direta.



Figura 19 - Câmara e base metálica.

As medições são realizadas sempre em uma superfície horizontal, tendo ocorrido o nivelamento das bases metálicas quando de suas instalações, e nivelamento de cada medidor individualmente.

Os medidores são conectados, por cabos blindados devidamente aterrados, à sistema de aquisição de dados (SAC) da Agilent Technologies (Fig. 20), que por sua vez é conectado a um microcomputador, usado para armazenamento e processamento dos dados medidos pelos sensores.



Figura 20 - Agilent 34970A – Sistema de Aquisição de Dados.

O SAC é constituído de 3 slots com multímetro de 6,5 dígitos embutido, 8 módulos diferentes que oferecem grande flexibilidade de funções e configurações. Inclui software para controle e transferência de dados para PC, memória interna não-volátil para armazenar até 50000 medidas. Os dados obtidos, discriminados por dia juliano, são exportados para um microcomputador e organizados em dados brutos e dados tratados.

3. 1. 1 Piranômetro Eppley

Piranômetro com sensor do tipo fototérmico, com circuito interno de compensação de temperatura, utilizado como referência no trabalho desenvolvido. Seu número de série é 34158F3.

Suas principais características são:

- Sensibilidade aproximada: $7,63 \mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$.
- Tempo de resposta: 1 segundo (sinal 1/e).

A Fig. 21 mostra o equipamento utilizado.



Figura 21 - Piranômetro Eppley.

3. 1. 2 Piranômetro Licor

O piranômetro fotovoltaico Licor, modelo LI-200SA (Fig. 22), é projetado para medidas a campo de radiação solar global, em agricultura, meteorologia e estudos de energia solar. Segundo Tiba (2000), piranômetros fotovoltaicos, com utilização

recomendada para integrais diárias de radiação solar global sobre plano horizontal ou para observar pequenas flutuações da radiação, por ter baixo custo e facilidade de uso, é considerado útil como instrumento secundário.



Figura 22 - Piranômetro Licor.

As principais características desse piranômetro são:

- Sensibilidade típica: $95,1 \mu\text{A} / 1000 \text{ W m}^{-2}$.
- Tempo de resposta: $10 \mu\text{s}$.
- Dependência da temperatura: máx. de 0,15% por $^{\circ}\text{C}$.
- Resposta co-seno: corrigida até ângulos de incidência de 80° .
- Detector: Silício.

Modelado após o trabalho de Kerr, Thurtell e Tanner (1967), o LI-200SA caracteriza um detector fotovoltaico de silício, montado em um difusor diminuto para minimizar erros de resposta co-seno. Com corrente de saída, que é diretamente proporcional à radiação solar, é calibrado em comparação com um Eppley PSP, sob condições naturais de luz do dia, em unidades de watts por metro quadrado (Wm^{-2}). Sob a maioria das condições de luz natural do dia, o erro de suas medidas é menor do que 5%. A resposta espectral do LI-200SA não inclui o espectro solar inteiro, logo deve ser utilizado nas mesmas condições de iluminação do que aqueles com os quais foi calibrado.

3.1.3 Anel de sombreamento

O anel de sombreamento (Fig. 23) é constituído de uma faixa metálica circular, com diâmetro de 635.10^{-3}m e largura de $76,2.10^{-3}\text{m}$, com eixo paralelo à direção Norte-Sul. A face interna do anel é revestida com cor preta, para minimizar a reflexão sobre o sensor do piranômetro, e a externa revestida de branco.



Figura 23 - Anel de sombreamento, construído para as medições.

Segundo Escobedo, J.F. et al. (1997) existem duas possibilidades de se medir a radiação difusa:

- (1) medida da radiação difusa com a interceptação da radiação direta;
- (2) medida simultânea das radiações global e direta e a obtenção da radiação difusa por diferença. A primeira alternativa pode ser desdobrada em duas: interceptando-se a radiação direta sobre o sensor com um pequeno disco ou interceptando-se a radiação direta com um anel metálico. A segunda utiliza o piranômetro para medir a radiação global e um pireliômetro com rastreador solar para medir a radiação direta. Os métodos que utilizam sistema de acompanhamento do movimento relativo do sol são considerados mais precisos, porém por razões econômicas não são os mais utilizados. Por ser a alternativa mais econômica, o uso do anel vem sendo a mais usada.

3.2 Calibração dos Piranômetros

Para calibrar os piranômetros Licor Py 48511 e Py 53132, determinam-se seus fatores de calibração levando-se em consideração: a temperatura, o nível de irradiância, a distribuição espectral da irradiância, a variação temporal, a distribuição angular da irradiância e as inclinações dos instrumentos.

Objetivando trabalhar, na aquisição de dados através dos sensores e cabos blindados, com sinais em milivolts, liga-se um resistor de filme metálico em paralelo com cada um dos piranômetros Licor, tendo em conta que tais resistores são praticamente imunes a variações de temperatura, quando percorridos por corrente elétrica. Foi associado em paralelo com o PY 48 511 um resistor de resistência elétrica de valor $148,93\ \Omega$ e com o PY 53 132, resistor de resistência de $150,26\ \Omega$.

No presente estudo, os sensores dos instrumentos, além de ficarem na posição normal de funcionamento, enviam seus sinais para o sistema de aquisição de dados Agilent 34970A que, além desses registros, também armazena dados de temperatura ambiente da plataforma radiométrica, pelo envio de sinal de um LM35, com sensor colocado em câmara assentada sobre base metálica.

Empregou-se, na calibração, o método da comparação com um piranômetro Eppley PSP (padrão), utilizando-se o sol como fonte ou sob outras condições naturais de exposição, por exemplo um céu nublado uniforme. A calibração foi efetuada no dia 11 de agosto de 2007, dia 223 do calendário Juliano, utilizando-se dados registrados entre 7h 07min. e 17h 44min., hora local. Tal dia foi escolhido por por ter sido um dia de céu claro.

Os piranômetros Licor, especificados anteriormente, colocados horizontalmente sobre bases metálicas fixas à plataforma radiométrica do CEFET-RS ($\pm 19\text{m}$ de altura), são solicitados simultaneamente com um piranômetro padrão Eppley PSP, também instalado na referida plataforma, ao ar livre, e acima de qualquer obstáculo.

Calculou-se o fator de calibração do instrumento pela expressão:

$$K = R \cdot K_r \quad (23)$$

onde K_r é o fator de calibração do instrumento de referência, no caso $7,63\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$, e K o fator de calibração a ser obtido.

Calculou-se o valor de R dividindo-se a soma das respostas do instrumento a ser calibrado pela soma das respostas do instrumento de referência. Tal relação pode ser expressa assim:

$$R = \frac{\sum V_L}{\sum V_E} \quad (24)$$

onde $\sum V_L$ representa o somatório das diferenças de potencial do piranômetro Licor e $\sum V_E$, a soma das diferenças de potencial obtidas com o piranômetro Eppley.

Portanto, a expressão para o cálculo do fator de calibração fica:

$$K = \frac{\sum V_L}{\sum V_E} K_r \quad (25)$$

A Tab. 4 informa as constantes de calibração dos radiômetros oriundas dos respectivos certificados de garantia e os valores das resistências elétricas dos resistores ligados em paralelo com os piranômetros Licor.

Tabela 4 - Aparelhos utilizados nas medições, com alguns dados relevantes.

Aparelho (Grandeza medida)	Constante calibração (fábrica)	Resistor em paralelo
EPPLEY PSP (radiância solar)	$7,63\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$	
LICOR 1(Py 48 511) (radiância solar)	$96,6\mu\text{A}/1000\text{Wm}^{-2}$ $-10,35\text{Wm}^{-2}/\mu\text{A}$	148,93 Ω
LICOR 2(Py 53 132) (radiância solar)	$95,1\mu\text{A}/1000\text{Wm}^{-2}$ $-10,56\text{Wm}^{-2}/\mu\text{A}$	150,26 Ω
LM 35 (temperatura)	$10\text{mV}/1^\circ\text{C}$	

Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

Os sensores dos aparelhos discriminados na Tab. 4 são sensibilizados pelas radiações, e enviam sinais de tensão em milivolts ao SAC, através dos cabos blindados, que executa a coleta e registro dos dados numa frequência de uma medida a cada 20 segundos para cada uma das grandezas envolvidas.

No Apêndice 4, além dos dias selecionados para as medições, são apresentadas as condições meteorológicas dos citados dias e as respectivas temperaturas médias. Os dados foram tratados usando-se planilha eletrônica, onde os procedimentos de cálculo, fórmulas e os seguintes elementos foram considerados:

- o Relacionam-se os dados de entrada: latitude local (ϕ), em graus; longitude local, em graus; altitude em metros; dia do ano, no calendário Juliano.
- o Células com os somatórios das radiações dos Licor e do Eppley, e outras com as equações viabilizadoras dos cálculos das constantes de calibrações dos piranômetros Licor.
- o São introduzidos fórmulas e cálculos nas células da planilha que viabilizam os resultados de: ângulo do dia em radianos; declinação solar em radianos; equação do tempo em minutos; tempo solar verdadeiro; ângulo horário; fator de correção da excentricidade; co-seno de Θ_z ; o valor de Θ_z ; α (graus); $\text{sen}\alpha$; I_{20} (KJ/m²); I_{020} ; K_t ; fórmulas das correções.

3. 3 Medição da radiação global

A seguir apresenta-se os procedimentos adotados na medição de radiação global utilizando piranômetros com sensores do tipo fotoelétrico, comparados com um PSP da Eppley. Os piranômetros a serem utilizados são da Licor, modelo LI-200SA.

As medidas de radiação global com os piranômetros Licor foram realizadas e comparadas com as medidas, simultâneas, efetuadas com um piranômetro da Eppley, modelo PSP, o qual é adotado como referência. Simultânea e paralelamente, armazenam-se medidas de temperatura obtidas a partir de um

sensor LM35, colocado no interior de uma câmara, sobre base metálica, simulando as condições sob as quais funcionam os sensores dos piranômetros Licor.

A medição da radiação global efetuada com o piranômetro Licor deve sofrer correção em função da temperatura ambiente, correção espectral e de resposta co-seno. Para tanto, de acordo com Michalsky et al. (1987), a dependência da temperatura desse tipo de piranômetros pode ser corrigida, normalizada para 30°C, pela equação (26)

$$\frac{R}{R_{30}} = 0,9815 + 0,0006 \cdot T_{\text{pir}} \quad (26)$$

onde R é a resposta do piranômetro em uma temperatura T, R_{30} é a resposta do piranômetro em 30°C e T_{pir} é a temperatura (em °C) medida dentro do piranômetro. Devido a dificuldades em se obter a medida de temperatura no interior do piranômetro, medidas de temperatura ambiente, feitas no mesmo plano do sensor, a aproximadamente 1,5 m de distância do piranômetro, fornecem bons resultados na correção da dependência de temperatura do sensor.

A equação (26) pode ter seus coeficientes alterados de um piranômetro para outro. Esses coeficientes podem ser obtidos através do monitoramento da resposta do piranômetro quando em diferentes temperaturas. A sensibilidade desse tipo de sensor é praticamente linear com a temperatura e correções da ordem de 0,7% são típicas. Segundo Michalsky et al. (1991), as medidas de radiação solar global efetuadas com o piranômetro Licor já apresentam uma boa qualidade quando corrigidas apenas em função da temperatura.

Michalsky et al. (1987) também propôs um método empírico para corrigir, simultaneamente, a resposta co-seno e resposta espectral do piranômetro com sensor fotoelétrico quando utilizado para medir a radiação global. Foi verificado que, apenas com a correção da temperatura, os valores de radiação global já são de boa qualidade. No entanto, apresentam valores ligeiramente subestimados para valores de altas e baixas radiações e valores ligeiramente superestimados para radiações

médias. Para corrigir esses pequenos desvios de linearidade, foi proposto um ajuste por mínimos quadrados dado pela equação (27):

$$\frac{G_{\text{fotoletrico}}}{G_{\text{termopilha}}} = a + b \cdot \ln(G_{\text{fotoletrico}}) + c \cdot \ln^2(G_{\text{fotoletrico}}) \quad (27)$$

onde $G_{\text{fotoletrico}}$ é o valor da radiação global obtida com o piranômetro que utiliza sensor fotoelétrico, $G_{\text{termopilha}}$ é o valor da radiação global obtida com o piranômetro que utiliza sensor termopilha e os coeficientes a, b e c são, respectivamente: 1,0002; 0,0003; 0,0000.

Esse procedimento de correção foi obtido de dados de radiação global medida, simultaneamente por um piranômetro da Licor e outro da Eppley durante um período de dezoito dias, contemplando dias claros e nublados. Os resultados obtidos, após as correções, utilizando piranômetro com sensor fotoelétrico discordam, no máximo, em 2% dos obtidos com o piranômetro Eppley. Quando esses valores são integrados ao longo do dia, a diferença entre as integrais é menor que 1%.

3.4 Medição da radiação difusa

Aborda-se, a seguir, os procedimentos adotados na medição de radiação difusa utilizando piranômetros com sensores do tipo fotoelétrico, dotados de anel de sombreamento, e comparados com um Eppley PSP, também com anel de sombreamento. Os mesmos aparelhos foram utilizados no experimento com a radiação global. Para a medição de radiação difusa, adota-se a técnica da utilização do anel de sombra visto que seus custos de aquisição e manutenção são bastante inferiores quando comparados com os custos de procedimentos que utilizam seguimento do sol ao longo do dia.

A medição da radiação difusa adotada como referência é aquela obtida através da utilização de um piranômetro Eppley PSP dotado de anel de sombra. Na medição de radiação solar difusa foi necessário não permitir a incidência de radiação direta no sensor de medição da radiação difusa. Para isso, um método

bastante utilizado consiste em colocar um anel de sombra colocado perpendicularmente ao eixo polar e num ângulo igual ao da latitude do local.

Um erro inerente da utilização desse anel de sombra é que ele obstrui parte da radiação difusa. Vários métodos são utilizados para calcular o fator de correção a ser acrescentado na medição realizada da radiação difusa, entre eles o proposto por Drummond (1956).

Considerando que a atmosfera tenha um comportamento isotrópico, Drummond (1956) desenvolveu a equação (28) para determinar o percentual da radiação solar difusa obstruída pelo anel de sombra:

$$X = \frac{2 \cdot b}{\pi \cdot r} \cdot \cos^3 \delta \cdot (\sin \phi \cdot \sin \delta \cdot \omega_s + \cos \phi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s) \quad (28)$$

onde b é o comprimento do anel de sombra, r é o raio do anel de sombra, δ é a declinação do sol, ϕ é a latitude do local da medição e ω_s é o ângulo de nascimento do sol em radianos.

Para condições de isotropia, o fator de correção a ser aplicado nos valores dos dados de radiação solar difusa obtidos, k' , é dado pela equação (29)

$$k' = \frac{1}{1 - X} \quad (29)$$

O fator de correção k' depende das dimensões do anel de sombra, da latitude do local e do ângulo de nascimento do sol no dia da medição.

O efeito da obstrução de parte da radiação solar difusa através do anel de sombra em condições reais de medição (condições não isotrópicas) pode ser determinado através da medição simultânea da radiação difusa, uma usando um piranômetro com anel de sombra e outro com um pequeno disco de sombra. Após análise de um grande número de medições, observou-se que o fator de correção k' deve ter um acréscimo de 7% para dias de céu claro, 3% para céus totalmente nublados e 4% para céus parcialmente cobertos por nuvens.

Por outro lado, pode-se classificar a atmosfera como nublada, parcialmente nublada e clara. Essa classificação, segundo Iqbal (1983), é função do índice de claridade k_t . Valores de k_t inferiores a 0,3 sinalizam uma atmosfera nublada, valores superiores a 0,7 sinalizam atmosferas bastante claras e valores de 0,3 a 0,7 sinalizam atmosferas parcialmente nubladas.

Aplicando-se as correções sugeridas por Drummond (1956) e já corrigidas em função da atmosfera, para uma localidade situada no hemisfério sul, latitude de $31,87^\circ$, tem-se correções que variam desde 6% no dia 22 de junho até 26% nos dias 01 de março e 14 de outubro, com erro RMSE (root mean square error) de $\pm 9,2 \text{ W.m}^{-2}$. Tais correções podem ser observadas na Fig. 24.

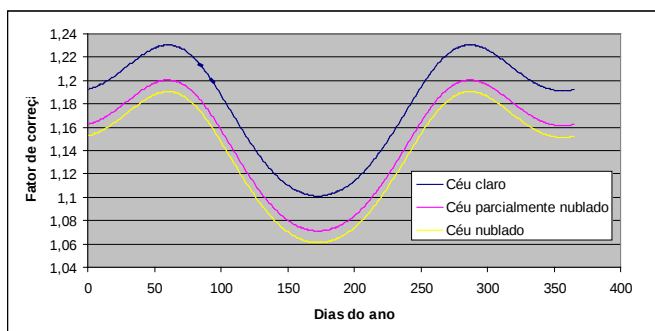


Figura 24 - Fator de correção da medida de radiação difusa devido ao uso de anel de sombra.

Fonte: DRUMMOND (1956)

Um outro procedimento para a correção da medida da radiação difusa é fornecido por Lebaron et al. (1990) e, quando comparado com procedimento adotado por Drummond (1956), fornece resultados ligeiramente melhores.

Esse modelo de correção utiliza quatro parâmetros para descrever os efeitos isotrópicos e não isotrópicos da radiação solar. O parâmetro para descrever o efeito isotrópico da radiação é o mesmo obtido por Drummond (1956). O efeito não isotrópico é obtido através dos parâmetros ε , Δ e ângulo de zênite.

Os parâmetros ε e Δ são obtidos, respectivamente, pelas equações (30) e (31).

$$\varepsilon = \frac{(\text{Dif}_{nc} - \text{Dir}_{Nnc})}{\text{Dif}_{nc}} \quad (30)$$

onde Dif_{nc} é a medida da radiação difusa não corrigida, Dir_{Nnc} é a radiação direta normal não corrigida e

$$\Delta = \frac{Dif_{nc} \cdot AM}{I_0} \quad (31)$$

onde Dir_{Nnc} é dada pela equação (32):

$$Dir_{Nnc} = \frac{(G - Dif_{nc})}{\cos(\theta_z)} \quad (32)$$

onde G é a medida da radiação global e θ_z é o ângulo de zênite.

A Tab. 5 fornece os limites dos parâmetros ε , Δ , ângulo de zênite θ_z e o fator de correção geométrico para a obtenção da radiação difusa. Em função dos parâmetros citados, pode-se obter os valores de correção final da radiação difusa no apêndice de Lebaron et al. (1990).

Tabela 5 - Limites dos parâmetros utilizados para corrigir (isotrópica e anisotrópica) a medida da radiação difusa quando utiliza-se anel de sombra.

	1	2	3	4
Zênite	$0^\circ \leq \theta_z < 35^\circ$	$35^\circ \leq \theta_z < 50^\circ$	$50^\circ \leq \theta_z < 60^\circ$	$60^\circ \leq \theta_z \leq 90^\circ$
Geométrico	$1,000 \leq G < 1,068$	$1,068 \leq G < 1,100$	$1,100 \leq G < 1,132$	-
Epsilon	$0,000 \leq \epsilon < 1,253$	$1,253 \leq \epsilon < 2,134$	$2,134 \leq \epsilon < 5,980$	-
Delta	$0,000 \leq \Delta < 0,120$	$0,120 \leq \Delta < 0,200$	$0,200 \leq \Delta < 0,300$	-

Fonte: LEBARON et al. (1990).

Os fatores de correção da radiação difusa, em função dos parâmetros que identificam o comportamento isotrópico e não isotrópico da radiação difusa, de acordo com Lebaron et al. (1990) são apresentados no anexo 1 e variam de 0,935 a 1,248 com erro RMS de $\pm 6,9 \text{ Wm}^{-2}$. Lebaron et al. (1990) utilizou como referência os valores de radiação difusa obtidos através da medição de radiação global e direta normal.

Na medição de radiação difusa, utilizando o piranômetro Licor, Michalsky et al. (1987) propôs um método empírico para corrigir, simultaneamente, o efeito de sombreamento, a resposta co-seno e resposta espectral do piranômetro com sensor fotoelétrico. A equação proposta para a correção, através de ajuste por mínimos quadrados é

$$\frac{Dif_{fototeletrico}}{Dif_{termopilha}} = a + b \cdot \ln\left(\frac{Dif_{fototeletrico}}{G_{fototeletrico}}\right) + c \cdot \ln^2\left(\frac{Dif_{fototeletrico}}{G_{fototeletrico}}\right) \quad (33)$$

onde $Dif_{fototeletrico}$ é o valor da radiação difusa obtida com o piranômetro que utiliza sensor fotoelétrico, $Dif_{termopilha}$ é o valor da radiação difusa obtida com o piranômetro que utiliza sensor termopilha, e os coeficientes a , b e c são, respectivamente: 1,0002; 0,0003; 0,0000.

Os resultados obtidos, após as correções, utilizando piranômetro com sensor fotoelétrico discordam, em valores absolutos, $\pm 15 \text{ Wm}^{-2}$. Quando esses valores são integrados ao longo do dia, a diferença entre as integrais é menor que 5% sendo que os piores resultados são os obtidos em dias de céu claro.

3.5 Testes estatísticos para avaliação das medidas de radiação solar

No trabalho desenvolvido, a verificação da qualidade dos valores obtidos de radiação solar com o piranômetro de baixo custo foi necessária e teve como referência os valores de radiação solar medidos com o piranômetro da Eppley PSP, considerado de segunda classe.

Uma verificação consistente dos valores medidos não pode ser obtida apenas através da comparação individual entre os valores medidos e os de referência. É necessário realizar alguns testes estatísticos que envolvam uma amostra com um grande número de dados de radiação.

Quando se trabalha com radiação solar, alguns testes estatísticos são recomendados, entre eles o do erro do desvio médio (MBE), o do erro médio quadrático (RMSE) e o do coeficiente de correlação (CC). A seguir, esses métodos são detalhados.

3.5.1 Erro do Desvio Médio (MBE)

O valor do erro do desvio médio (MBE) de um conjunto de valores de radiação solar medido ou estimado é uma indicação do desvio médio desses valores. Valores de MBE próximos de um indicam que os valores da amostra de

dados medidos são de boa qualidade quando comparados com os valores de referência.

O MBE de uma amostra de radiação solar pode ser obtido através da equação:

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N [G_{\text{medido}(i)} - G_{\text{referência}(i)}]}{N} \quad (34)$$

onde $G_{\text{medido}(i)}$ é o i-ésimo valor de radiação solar medido, $G_{\text{referência}(i)}$ é o i-ésimo valor de radiação solar tomado como referência e N é o número de medidas da amostra de dados.

3.5.2 Erro Médio Quadrático (RMSE)

O valor do erro médio quadrático (RMSE) de um conjunto de valores de radiação solar medido ou estimado é uma indicação do quanto esses valores variam em relação aos valores de referência. O RMSE tem valor sempre positivo e quanto mais próximo de zero, maior a qualidade dos valores medidos ou estimados.

Em estudos de radiação solar, o RMSE é o teste estatístico mais utilizado para a verificação da qualidade de uma amostra de dados e o seu valor pode ser obtido através da equação:

$$RMSE = \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N [G_{\text{medido}(i)} - G_{\text{referência}(i)}]^2}{N} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (35)$$

3.5.3 Coeficiente de correlação (CC)

O teste de coeficiente de correlação (CC) sinaliza o quanto é linear a relação entre os valores medidos e os estabelecidos como referência. Quanto mais linear for essa relação, maior é a qualidade dos dados medidos. CC igual a um ou próximo de um sinalizam que as medidas realizadas são de boa qualidade.

O CC de uma amostra de dados de radiação solar pode ser obtido através da equação:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N [G_{\text{medido}(i)} - \overline{G_{\text{medido}}}] [G_{\text{referência}(i)} - \overline{G_{\text{referência}}}] }{\left\{ \left[\sum_{i=1}^N (G_{\text{medido}(i)} - \overline{G_{\text{medido}}})^2 \right] \left[\sum_{i=1}^N (G_{\text{referência}(i)} - \overline{G_{\text{referência}}})^2 \right] \right\}^{1/2}} \quad (36)$$

onde $\overline{G_{\text{medido}}}$ é o valor médio dos valores medidos da amostra e $\overline{G_{\text{referência}}}$ é o valor médio dos valores de referência da amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Incertezas das medidas e calibração de piranômetros com sensores fotoelétricos

Tendo como base a Plataforma Radiométrica do CEFET/RS, as medições de radiação global foram feitas utilizando piranômetros com sensores do tipo termopilha e fotoelétrico, seguindo os procedimentos já descritos anteriormente. Inicialmente obteve-se medidas de radiação global utilizando-se para isso um piranômetro Eppley PSP, o qual é tomado como referência e outros dois, admitidos como protótipos para os testes, com sensores fotoelétricos. Simultaneamente, realizam-se as medidas de temperatura, com sensor LM35 colocado em câmara sobre base metálica, junto ao piranômetro com sensor fotoelétrico.

Na equação (25) da página 44, utilizando-se o conjunto de valores dos somatórios de diferenças de potencial, obtidos no dia 11 de agosto de 2007, nos piranômetros Licor (ΣV_{L1} e ΣV_{L2}) e no piranômetro Eppley (ΣV_E), e ainda o fator de calibração do instrumento de referência (K_r), obtém-se:

- Como fator de calibração do piranômetro Licor1 (K_{L1}), o valor de $1,47.10^{-5} \text{V/Wm}^{-2}$;
- Para fator de calibração do piranômetro Licor 2 (K_{L2}), o valor de $1,45.10^{-5} \text{V/Wm}^{-2}$.

Consideram-se as seguintes incertezas:

- Dos somatórios das medidas do piranômetro Eppley e dos piranômetros Licor;
- Do voltímetro (0,004%) e do ohmímetro (0,008%), nas incertezas das

variações da diferença de potencial elétrico dos piranômetros Licor;

- Do voltímetro (0,004%), nas incertezas das variações da diferença de potencial elétrico do piranômetro Eppley;
- Do fator de calibração do piranômetro Eppley, 20Wm^{-2} .

A partir de tais considerações, aplicou-se na equação (25) o método de Kleine e McClintock para a propagação das incertezas, obtendo:

$$(\Delta K_L)^2 = \left[\frac{\partial}{\partial \Sigma V_L} \left(\frac{\Sigma V_L}{\Sigma V_E} K_r \right) \Delta \Sigma V_L \right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial K_r} \left(\frac{\Sigma V_L}{\Sigma V_E} K_r \right) \Delta K_r \right]^2 + \left[\frac{\partial}{\partial \Sigma V_E} \left(\frac{\Sigma V_L}{\Sigma V_E} K_r \right) \Delta \Sigma V_E \right]^2 \quad (37)$$

onde ΔK_L representa a incerteza do fator de calibração do Licor, $\Delta \Sigma V_L$ a incerteza das variações de potencial elétrico dos Licor, ΔK_r a incerteza do fator de calibração do piranômetro Eppley, $\Delta \Sigma V_E$ a incerteza do somatório das diferenças de potencial elétrico do piranômetro Eppley.

Substituindo-se os valores numéricos, encontrou-se as seguintes incertezas: $\Delta K_{L1} = 0,0294 \cdot 10^{-5} \text{V/Wm}^{-2}$ (Licor1) e $\Delta K_{L2} = 0,0290 \cdot 10^{-5} \text{V/Wm}^{-2}$ (Licor2). Considera-se ambas com valor de $0,03 \cdot 10^{-5} \text{V/Wm}^{-2}$ e assume-se que as constantes de calibração dos piranômetros Licor são:

- $K_{L1} = (1,47 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{V/Wm}^{-2}$ e
- $K_{L2} = (1,45 \pm 0,03) \cdot 10^{-5} \text{V/Wm}^{-2}$.

Na Tab. 6 apresenta-se dados da calibração dos Piranômetros Licor 1 e Licor 2, a qual foi realizada no dia Juliano 223.

Com as constantes de calibração obtidas, observadas as incertezas dos instrumentos, as medidas obtidas com os piranômetros de referência e os de testes, são coincidentes.

Tabela 6 - Dados relativos à calibração dos Piranômetros Licor na Plataforma Radiométrica do CEFET-RS, no dia 11 de agosto de 2007, das 07h 07min. às 17h 44min., DJ 223.

Informações Calibração	K _{L1} Licor 1 (PY 48511)		K _{L2} Licor 2 (PY 53132)	
	($\mu\text{A}/1000\text{Wm}^{-2}$)	($10^{-5}\text{V}/\text{Wm}^{-2}$)	($\mu\text{A}/1000\text{Wm}^{-2}$)	($10^{-5}\text{V}/\text{Wm}^{-2}$)
Constantes de Calibração	98,7±2,0	1,47±0,03	96,4±2,0	1,45±0,03
Método	Quociente		Quociente	
Referência	PSP EPPLEY (K _r =7,63 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$)		PSP EPPLEY (K _r =7,63 $\mu\text{V}/\text{Wm}^{-2}$)	
Temp. Média(°C)	17,4		17,4	
Radiação	GLOBAL		GLOBAL	

Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

4.2 Condições atmosféricas do dia da calibração

Na definição de dia de céu claro, levou-se em consideração a proposta de Iqbal (1983), trabalhando-se os dados de radiação solar global do dia 11 de outubro de 2007.

Na análise dos valores de K_t, de acordo com a classificação da atmosfera proposta por Iqbal (1983), durante os períodos do citado dia, percebe-se a ocorrência de atmosfera bastante clara em 74% do período de tempo medido. Pelo mesmo critério, a atmosfera permaneceu parcialmente nublada ou nublada em 26% do período (Tab. 7). A tabela ainda fornece valores de radiações máxima das medidas do piranômetro Eppley.

Empregando-se a equação (20a) da página 25, obtém-se 0,74 para o valor de K_t, correspondente ao dia 11 de agosto de 2007. Tal valor é considerado como

determinante de atmosfera bastante clara, o que permite, juntamente com a análise periódica de K_t , classificar o dia como de Céu Claro.

Tabela 7 - Classificação da Atmosfera (IQBAL, 1983).

	ATMOSFERA BASTANTE CLARA ($k_t > 0,7$)	ATMOSFERA PARCIALMENTE NUBLADA ($0,3 < K_t \leq 0,7$)	ATMOSFERA NUBLADA ($K_t \leq 0,3$)
Data: 11 agosto 2007 Dia Juliano : 223			
Período do dia	09h54min01s às 17h44min21s	07h39min41s às 09h53min41s	das 07h07min21s às 07h39min21s
Período de tempo(s)	28200	8040	1920
Porcentagem(%)	74	21	5
Radiação máxima(Wm^{-2})	715	469	48

Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

4.3 Medições de radiação solar global

As medidas de radiação global foram realizadas em vários dias que apresentavam diferentes condições atmosféricas, variando de atmosfera bastante clara a atmosfera nublada.

A seguir são apresentados os resultados de medições de radiação global dos dias 12 e 13 de agosto de 2007 (DJ 224 e DJ 225). O DJ 224 apresentou-se bastante claro com a presença de poucas nuvens, com valor de K_t igual a 0,63, o que permitiu classificá-lo como de atmosfera parcialmente nublada. Já o DJ 225 apresentou valor de K_t igual a 0,33, bem abaixo do obtido no dia anterior, correspondendo a condição de atmosfera nublada conforme os parâmetros apresentados na Tab. 7.

As fotografias² tiradas nos dias referidos são mostradas na Fig. 25.

² As fotografias das Figuras 25 e 28 fazem parte do arquivo do autor da dissertação.



Figura 25: Imagens de instantes dos dias 12 e 13 de agosto de 2007, dando idéia das condições atmosféricas destes dias.

Visualmente, como se observa nas figuras 26 e 27, relativas ao DJ 224, os resultados são muito parecidos. Quando realizada a análise dos erros, verifica-se que a medida obtida com o piranômetro Licor1 é de boa qualidade ($MBE = -2Wm^{-2}$, $RMSE = 6Wm^{-2}$, $CC = 1$), ou seja, os valores obtidos são muito próximos aos valores de referência medidos com o piranômetro Eppley.

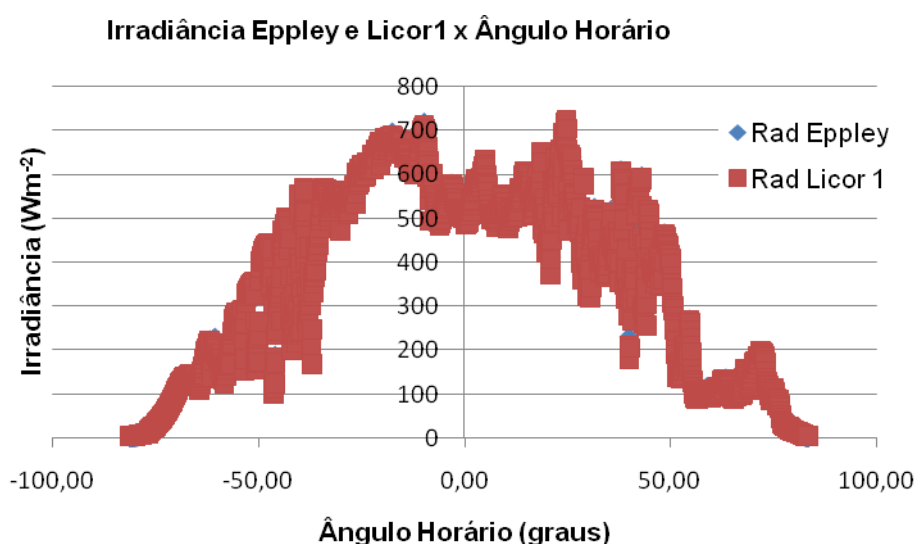


Figura 26 - Medição da radiação global do dia 12 de agosto de 2007, DJ 224, sem correções.

Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

Os valores de radiação global, corrigidos conforme descrito no Material e Métodos, não tiveram acréscimo de qualidade em função da boa qualidade da medida realizada com o Licor1. Os valores dos erros obtidos após a correção são semelhantes aos obtidos sem as correções propostas ($MBE = -5 \text{ Wm}^{-2}$, $RMSE = 8 \text{ Wm}^{-2}$, $CC = 1$).

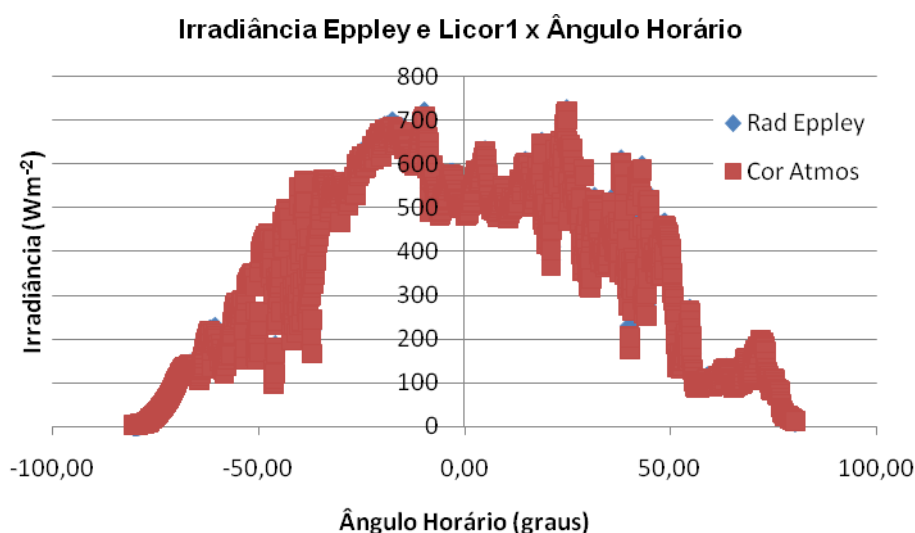


Figura 27 - Medição da radiação global do dia 12 de agosto de 2007, DJ 224, com as correções propostas (temperatura e condições atmosféricas).
Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

Para as condições de céu nublado (DJ 225) os resultados foram semelhantes aos obtidos para o dia de céu bastante claro. Nesta situação o piranômetro Licor1 apresentou valores muito semelhantes ao do piranômetro Eppley. Os valores dos erros (MBE , $RMSE$ e CC), sem as correções e com as correções, tiveram valores praticamente iguais (Tab. 8).

Tabela 8 - Valores dos erros das medidas do Licor 1, com e sem correções, em condições de céu bastante nublado (DJ 225).

Erros	Com correção	Sem correção
$MBE(Wm^{-2})$	0,7	1,9
$RMSE(Wm^{-2})$	4	4
CC	1	1

Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

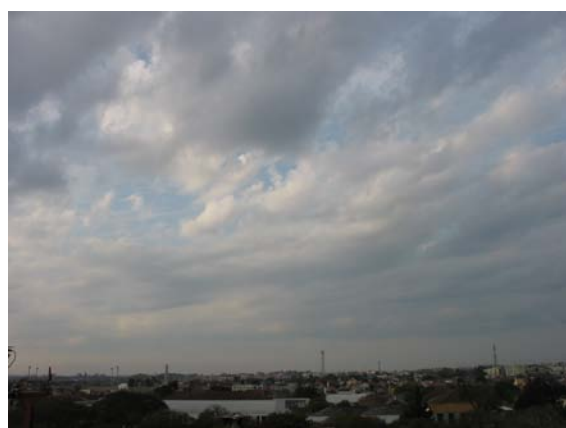
4.4 Medições de radiação solar difusa

As medidas de radiação difusa foram realizadas em um amplo período de dias, dos quais destacou-se três dias do ano de 2007, sendo que dois se apresentaram com atmosferas parcialmente nubladas, 30 de agosto ($K_t=0,36$) e 24 de setembro($K_t=0,43$), e um, o dia 25 de setembro, com atmosfera bastante clara ($K_t=0,72$), conforme a Fig. 28.

A percepção, durante praticamente toda a observação, foi de que o dia 30 de agosto (DJ 242) esteve totalmente nublado, que o dia 24 de setembro (DJ 267) foi um dia com muitas nuvens, e que o dia 25 de setembro(DJ 268) foi um dia de céu aberto com poucas nuvens (Fig. 28).



DJ 242



DJ 267



DJ 268

Figura 28 - Imagens dos dias 30 de agosto (DJ 242), 24 e 25 de setembro (DJ 267 e 268, respectivamente), dando a idéia das condições atmosféricas dos dias selecionados para análise das medições de radiação difusa.

Verificou-se que, em todos os dias onde foram realizadas as medições de radiação difusa, as correções relativas ao anel de sombra e às condições atmosféricas foram muito expressivas, portanto, estas correções são necessárias.

Os resultados obtidos, sejam para condições de atmosferas nubladas ou não, apresentam sempre a mesma tendência de conformidade com os dados assumidos como os de referência. Nas figuras 29, 30 e 31 são apresentados resultados das medições para um dia onde ocorreram, em períodos distintos, as mais diversas condições atmosféricas. Estes resultados são relativos às medições de radiação difusa realizadas no dia 24 de setembro de 2007.

Outro fator que levou a apresentar os resultados das medições nesse dia é que o piranômetro com sensor fotoelétrico tem o seu pior desempenho quando utilizado em dias nublados. Dessa forma, optou-se por um dia crítico, dia esse em que não se espera o melhor desempenho do piranômetro.

Na Fig. 29 apresenta-se os valores de radiação difusa obtidos utilizando-se um anel de sombra sombreando o sensor do piranômetro Eppley PSP. Esse anel foi construído com as mesmas dimensões e formas do anel de sombra utilizado no Laboratório da Eppley. Quando da medida, todas as correções foram realizadas, devido ao sombreamento do sensor e condições atmosféricas. Dessa forma, para efeito de análise desse trabalho, tais medidas foram consideradas como referência.

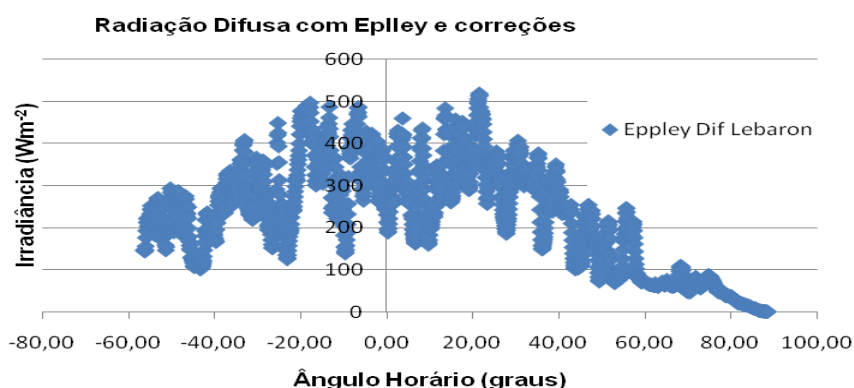


Figura 29 - Valores de radiação solar difusa de referência, obtidos através de um piranômetro Eppley, com anel de sombreamento, no dia 24 de setembro de 2007.

Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

Na Fig. 30, apresenta-se sobrepostos os valores da radiação difusa medida com um piranômetro de referência e os obtidos com a utilização do piranômetro da LICOR, sem as devidas correções, observa-se que não existe coincidência entre as duas séries, o que constatou-se visualmente ao longo de todo o dia.

Os valores dos erros RMSE e MBE, calculados conforme equações (35) e (34) na página 52, são respectivamente, 59 Wm^{-2} e 50 Wm^{-2} .

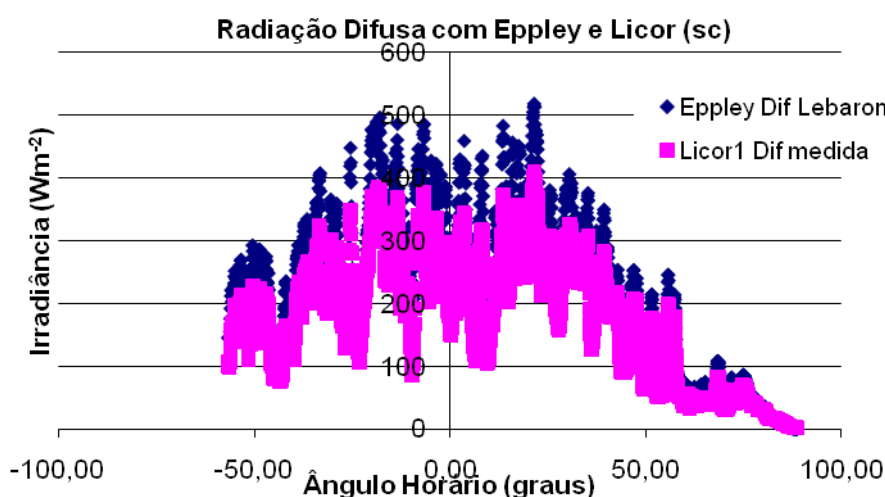


Figura 30 - Radiações difusas de referência e medida com o piranômetro LICOR, sem correções.
Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

Quando realizadas as correções nas medidas obtidas com o piranômetro LICOR, os valores dos erros RMSE e MBE reduzem-se substancialmente. O erro RMSE passa de 59 Wm^{-2} para 27 Wm^{-2} e o erro MBE passa de 50 Wm^{-2} para 21 Wm^{-2} .

Considerando que a incerteza da medida de radiação do LICOR é de $\pm 20 \text{ Wm}^{-2}$, os valores dos erros, tanto o RMSE e MBE, encontram-se muito próximos ao valor da incerteza do equipamento.

Na Fig. 31 apresenta-se os valores de radiações difusas, obtidas com um piranômetro com sensor termopilha (Eppley) e com um piranômetro com sensor fotoelétrico (Licor), após a aplicação das correções indicadas por Lebaron et al. (1990). Visualmente pode-se observar um melhor ajuste dessas medidas.

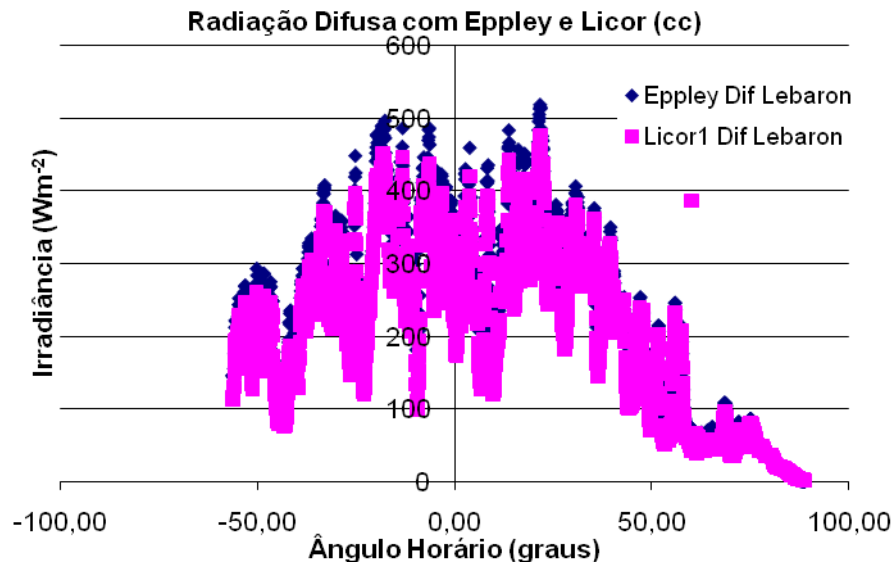


Figura 31 - Radiações difusas de referência e medida com o piranômetro LICOR, corrigida.

Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Tomando como parâmetros os objetivos propostos, os dados de radiação solar global e difusa medidos, os métodos de medição e correção empregados, chega-se às seguintes conclusões:

- a) O uso de piranômetros que utilizam sensores fotoelétricos, dentre eles o Licor LI 200, para a medição de radiação global e difusa, deve ser precedida de uma boa calibração, realizada através de comparação com um piranômetro no mínimo de segunda classe (Eppley PSP);
- b) Em função das características desses equipamentos testados, cuja instabilidade é de $\pm 2\%$ ao ano na constante de calibração, e dos resultados obtidos nas medições, recomenda-se recalibrações periódicas;
- c) Os resultados alcançados para a medição da radiação global, quando obtidos com o piranômetro Licor, para qualquer tipo de atmosfera, podem ser considerados de boa qualidade. Os mesmos apresentam RMSE em torno de 4Wm^{-2} ;
- d) Os valores obtidos com o Licor, na medição de radiação global, coincidem com os valores medidos com o Eppley, observadas as incertezas dos equipamentos;

Nas medições de radiação difusa o piranômetro Licor está operando nas condições menos propícias de desempenho, ou seja, medindo radiação global, excluída a direta. Nestas circunstâncias, com as correções devido ao sombreamento, à temperatura e às condições atmosféricas, obtêm-se resultados de melhor qualidade;

- e) Com as correções citadas, consegue-se reduzir significativamente os valores dos erros RMS e MBE. A correção mais significativa deve-se ao anel de sombreamento, mas é recomendável manter sempre o piranômetro calibrado para minimizar os erros devido às diferentes condições atmosféricas.

Observou-se que, considerando os procedimentos explicitados ao longo desse trabalho, os piranômetros com sensores fotoelétricos apresentam um bom desempenho nas medidas de radiação global e difusa. Embora de menor exatidão, quando comparadas com as medidas realizadas com piranômetros de sensores termopilhas, tais medidas, por serem consideradas de boa qualidade, podem colaborar para aumentar o banco de dados de radiação, visto que poucas estações medem radiação difusa, devido ao alto custo de aquisição e manutenção dos equipamentos de segunda classe.

Pode-se, a partir deste trabalho, sugerir a realização das seguintes atividades de investigação:

- ❖ Verificar a estabilidade do piranômetro Licor através de recalibrações periódicas de seis em seis meses;
- ❖ Realizar medições de radiação solar global e difusa ao longo de um ano, sem interrupções, utilizando o método usado neste trabalho;
- ❖ Estabelecer métodos de estimativa da radiação solar difusa incidente em superfícies horizontais, a partir dos dados medidos;

- ❖ Estabelecer métodos de estimativa da radiação solar global incidente em superfícies inclinadas, a partir dos dados medidos.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, G. L. **Electricidad Solar Fotovoltaica: sistemas fotovoltaicos autônomos**, Universidad Politecnica de Madrid. ETSI Telecomunicación. Parte I: Fundamentos de la electricidad solar fotovoltaica, 3 “La célula solar”, Madrid, pp. 118-176, 1985.

ALADOS-ARBOLEDAS, L.; BATLLES, F. J.; OLMO, F. J. Solar Radiation Resource Assessment by Means of Silicon Cells, **Solar Energy**, vol. 54, n. 3, p.183 -191, 1995.

BANNISTER, J. W.. **Solar Radiation Records**, Division of Mechanical Engineering, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Australia (1966 – 1969).

BATLLES, F. J.; OLMO, F. J.; ALADOS-ARBOLEDAS, L. On Shadowband Correction Methods for Diffuse Irradiance Measurements, **Solar Energy**, vol. 54, n. 2, p.105-114, 1995.

COLLARES-PEREIRA, M.; RABL, A. **The Average Distribution of Solar Radiation - Correlations Between Diffuse and Hemispherical and Hourly Insolation Values**, Solar Energy, vol. 22, n. 2, pp. 155-164, 1979.

COLLIBER D. G. **Techniques of estimating incident solar radiation.** In B. F. Parker (ed), Solar energy in agriculture, Elsevier, Amsterdam, pp. 1-66, 1991.

COULSON, K. L. Solar and Terrestrial Radiation. **Academic Press**, New York, 1975.

DAL PAI, A. **Anisotropia da Irradiância Solar Difusa Medida pelo Método de Sombreamento Melo-Escobedo: Fatores de Correção Anisotrópicos e Modelos de Estimativa.** 2005.61f. Tese(Doutorado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, São Paulo.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, 1991.

DRUMMOND, A. J. **On the Measurement of Sky Radiation**, Arch. Meteor. Geophys & Bioklim, vol. 7, pp. 413-436, 1956.

DRUMMOND, A. J. **Comments on Sky Radiation Measurements and Corrections**, J. Appl. Meteorol., vol. 13, pp. 810-811, 1964.

ESCOBEDO, J.F.; FRISINA, V.A.; RICIERI, R.P.; OLIVEIRA, A.P. Radiômetros Solares com Termopilhas de Filmes Finos I - Descrição e Custos. **Revista Brasileira de Aplicações de Vácuo** (São José dos Campos, SP), v. 16, n. 1, p.10-15, 1997.

ESTRADA, V.; CAJIGAL, R.; SALGADO, R.A. Irradiaciones global, direta y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana. **Serie Investigación y Desarrollo.** Instituto de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México, 2005.

FLOWERS, E.C. **Comparison of solar radiation sensors from various manufacturers.** In: 1978 annual report from NOAA to the DOE.

GAMBI, W.; PEREIRA, E.B.; ABREU, S.L.; COUTO, P. e COLLE, S. Influência da altitude e do tamanho das cidades nas previsões de radiação solar do modelo “IGMK” no Brasil. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo, v.16, n.1, 1998.

GRIMM, A.M., Meteorologia Básica – Notas de Aula. Primeira versão eletrônica - setembro 1999. Disponível em: <<http://fisica.ufpr.br/grimm/aposmeteo/>> Acesso em: 12 jun. 2007.

GUIA DIDÁTICO DE ENERGIA SOLAR – Conceitos Gerais de Heliotecnia, cap. 2, 2005.

IQBAL, M. **An Introduction to Solar Radiation**, Academic Press, Toronto, 1983.

KASTEN, F. e YOUNG, A.T. **Revised optical air mass tables and approximation formula**. Applied Optics 28, 4735-4738, 1989.

KERR, J.P.; THURTELL, G.W. and TANNER, C.B. **An integrating pyranometer For climatological observer stations and mesoscale networks**. J. Appl. Meteorol. 6:688-694, 1967.

KRATZENBERG, M. G.; COLLE, S.; PEREIRA, E. B.; NETO, S. L. M.; BEYER, H. G.; ABREU, S. L. Rastreabilidade de radiômetros para medição da energia solar no Brasil. In: Congresso Brasileiro de Metrologia, 3., 2003, Recife. **Anais do...** Recife: SBM, 2003.

LAPERUTA, J. F. **Modelos para Estimativa da Radiação Solar Global Diária e Horário em Botucatu – SP**. Tese (Doutorado em Agronomia) Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Campus de Botucatu, São Paulo, 1996.

LEBARON, B. A.; PETERSON, W. A.; DIRMHIRN, I. Corrections for Diffuse Irradiance Measured with Shadowbands. **Solar Energy**, vol. 25, n. 1, p. 1-13, 1980.

LEBARON, B. A.; MICHALSKY, J. J.; PEREZ, R. **A Simple Procedure for Correcting Shadowband Data for All Sky Conditions**, Solar Energy, vol. 44, n. 5, pp. 249-256, 1990.

LI-COR TERRESTRIAL RADIATION SENSOR. **Instruction Manual**. Publication Number 984-08308, USA, 2005.

LIU, B. Y. H.; JORDAN, R. C. **The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation**, Solar Energy, vol. 4, n.1, pp. 1-19, 1960.

LUTGENS, F.K. e E.J. TARBUCK, **The Atmosphere: an introduction to Meteorology**. Prentice Hall, 1989.

LYRA, F.; FRAIDENRAICH, N.; TIBA, C. **Solarimetria no Brasil – Situação e Propostas**, Grupo de Trabalho em Energia Solar Fotovoltaica – GTEF, Sub-Grupo de Solarimetria, Recife, 1993.

MAGALHÃES, D.J.; ZILLES, R. Caracterização da Energia Solar Disponível na Região do Lagamar, Município de Cananéia. Disponível em: <http://www.agr.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0087.pdf> Acesso em: 22 ago. 2006.

MAGNOLI, D.; SCALZARETTO, R. **Geografia, espaço, cultura e cidadania**. São Paulo: Moderna, 1998. v. 1.

MARTINS, F. R.; PEREIRA, E. B.; ECHER, M. P. S. Levantamento dos recursos de energia solar no Brasil com o emprego de satélite geoestacionário – o Projeto Swera. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v.26, n.2, p.145-159, 2004.

MICHALSKY, J. J.; HARRISON, L.; LEBARON, B. A. Empirical Radiometric Correction of a Silicon Photodiode Rotating Shadowband Pyranometer. **Solar Energy**, vol. 39, n. 2, p. 87-96, 1987.

MICHALSKY, J. J.; PEREZ, R.; HARRISON, L.; LEBARON, B. A. Spectral temperature correction of silicon photovoltaic solar radiation detectors. **Solar Energy**, vol. 47, n. 4, p. 299-305, 1991.

OLIVEIRA, S.H.F. **Dimensionamentos de Sistemas Fotovoltaicos Autônomos: Ênfase na Eletrificação de Residências de Baixo Consumo**. 1997. 259f. Dissertação (Mestrado em Energia), Universidade de São Paulo, São Paulo.

OLIVEIRA, K. ; SARAIVA, M. F. **Astronomia e Astrofísica**. 2 ed. São Paulo: Livraria da Física, 2004. 557p.

OLIVEIRA, K. ; SARAIVA, M. F. Web site O Sol – a nossa estrela. Disponível em: <<http://astro.if.ufrgs.br/esol/esol.htm>> Acesso em: 28 mai. 2007.

ORGANIZACION METEOROLOGICA MUNDIAL (OMM). **Guia de Instrumentos y Metodos de Observacion Meteorologicos**. OMM – n.8, Secretaria de La Organización Meteorológica Mundial, Suiza, 1990.

PALMITER, L.S.; HAMILTON, L.B.; HOLTZ, M.J. **Low cost performance Evaluation of passive solar buildings**. SERI/RR-63-223. UC-59B., 1979.

PEREIRA, A.B. et al. Estimativa da Radiação Solar Global Diária em Função do Potencial de Energia Solar na Superfície do Solo. **Scientia Agrícola**, v.59, n.2, p.211-216, abr/jun.2002.

RICIERI, R.P. et al. Modelos de Estimativa da Radiação Difusa Diária em Cascavel. Disponível em: <[HTTP://www.agr.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0086.pdf](http://www.agr.unicamp.br/energia/agre2002/pdf/0086.pdf)> Acesso em: 22 ago. 2006.

ROBINSON, H.; STOCH, L. Sky Radiation and Measurement and Corrections. **J. Appl. Meteor**, vol. 3, p. 179-181, 1964.

ROSA, D.J.M.; ZILLES, R. **Caracterização da Energia Solar Disponível na Região do Lagamar**, Município de Cananéia, 4º Encontro de Energia no Meio Rural -AGRENER 2002, Campinas, BRASIL.

ROSA, D.J.M. **Caracterização da Radiação Solar: O Caso da Cidade Universitária/USP e da Ilha do Cardoso/Cananéia**. 2003. 168f. Dissertação (Mestrado) -Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo – PIPGE/USP, 2003.

RUTH, D. W.; CHANT, R. E. **The Relationship of Diffuse Radiation to Total Radiation in Canada**, Solar Energy, vol. 18, pp. 153, 1976.

STANHILL, G. **Diffuse Sky and Cloud Radiation in Israel**, Solar Energy, vol. 10, n. 2, pp. 69, 1966.

The University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). Site Windows to the Universe, [2005-2008]. Disponível em : <http://windows.ucar.edu> Acesso em: 25 jul. 2007.

TIBA, C. et al. **Atlas Solarimétrico do Brasil** : banco de dados terrestres. Recife: Editora Universitária da UFPE, 2000. 111p.

VALIATI, M. I. **Calibração e Validação do Modelo RadEst3.0 para Estimativa da Irradiação Solar Global em Função de Medidas de Temperaturas do Ar Máxima e Mínima**. 2005. 55f. Tese (Doutorado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual de São Paulo, São Paulo.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A.R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. 3.ed. Viçosa: Editora UFV, 2004. 449p.

YAVORSKY, B. and DETLAF, A.: **Handbook of Physics**. Mir, 964pp, 1972.

APÊNDICE 1 - Destaques da construção das Bases Metálicas.

A partir de uma idéia matriz, levada em foto ao Professor/construtor Dílson Ramalho, discutiu-se o significado da idéia, o propósito e a função do engenho a ser produzido. A equipe formada pelos professores Idilio Victoria, Lucio Hecktheuer e Dílson Ramalho esteve reunida inúmeras vezes analisando os avanços da construção. No conjunto de fotos, observadas neste apêndice, são destacadas as principais regulagens concebidas. Em 28 de junho de 2007 o Prof. Dílson fez a entrega oficial de duas bases metálicas com bandas de sombreamento (na foto denominadas de plataformas).



Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

APÊNDICE 2 - Localização da Plataforma Radiométrica e as principais vistas das Bases Metálicas instaladas.

Nas fotos mostra-se a localização da Plataforma Radiométrica do CEFET-RS e das três bases metálicas (no material, denominadas de plataformas) ali instaladas no dia 02 de julho de 2007.



Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

APÊNDICE 3 - Determinação da direção Norte-Sul Geográfica.

As fotos mostram os vários instantes da determinação da direção Norte-Sul Geográfica, viabilizada pelo uso de um fio de prumo como haste vertical, executada no dia 22 de junho de 2007.



Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

APÊNDICE 4 - Condições atmosféricas de alguns dias de medições, destacando as radiações medidas.

Dia Juliano	Radiação Medida	Avaliação das condições Meteorológicas - Iqbal(1983) -
223	Global (Calibração)	Atmosfera bastante clara K_t=0,74 (Temp. média 17,4 ⁰ C)
224	Global	Atmosfera Parcialmente Nublada K_t=0,63 (Temp. média 16,4 ⁰ C)
225	Global	Atmosfera Parcialmente Nublada K_t=0,33 (Temp. média 20,9 ⁰ C)
242	Difusa e Global	Atmosfera Parcialmente Nublada K_t=0,36 (Temp. média 18,7 ⁰ C)
267	Difusa e Global	Atmosfera Parcialmente Nublada K_t=0,43 (Temp. média 17,1 ⁰ C)
268	Difusa e Global	Atmosfera bastante clara K_t=0,72 (Temp. média 17,9 ⁰ C)

Fonte: Arquivos do autor da dissertação.

**ANEXO 1 - Fator de correção da radiação difusa devido a utilização de
anel de sombra em função das condições de céu (LEBARON ET AL., 1990).
(i = Zenith; j = geométric; k = épsilon; l = delta).**

(i, j, 1, 1)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,173
i = 2	1,051	1,104	1,115	1,163
i = 3	1,069	1,082	1,119	1,140
i = 4	1,047	1,063	1,074	1,030

(i, j, 2, 1)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,248
i = 2	1,051	1,082	1,117	1,184
i = 3	1,161	1,161	1,147	1,168
i = 4	1,076	1,078	1,104	1,146

(i, j, 3, 1)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,156
i = 2	1,051	1,082	1,117	1,156
i = 3	1,051	1,082	1,117	1,156
i = 4	1,187	1,167	1,139	1,191

(i, j, 4, 1)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,181
i = 2	1,051	1,082	0,990	1,104
i = 3	1,015	1,016	0,946	1,027
i = 4	0,925	0,967	0,977	1,150

(i, j, 1, 2)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,176
i = 2	1,051	1,095	1,130	1,162
i = 3	1,073	1,089	1,115	1,142
i = 4	1,058	1,079	1,117	1,156

(i, j, 2, 2)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,211
i = 2	1,051	1,082	1,186	1,194
i = 3	1,086	1,130	1,168	1,177
i = 4	1,074	1,102	1,118	1,174

(i, j, 3, 2)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,237
i = 2	1,051	1,082	1,203	1,212
i = 3	1,080	1,195	1,211	1,185
i = 4	1,140	1,098	1,191	1,181

(i, j, 4, 2)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,217
i = 2	1,051	1,082	1,120	1,180
i = 3	1,182	1,115	1,081	1,111
i = 4	1,057	1,119	1,133	1,033

(i, j, 1, 3)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,182
i = 2	1,051	1,082	1,128	1,159
i = 3	1,076	1,088	1,131	1,129
i = 4	1,060	1,085	1,103	1,156

(i, j, 2, 3)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,221
i = 2	1,051	1,171	1,180	1,213
i = 3	1,135	1,148	1,176	1,197
i = 4	1,092	1,119	1,143	1,182

(i, j, 3, 3)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,238
i = 2	1,051	1,160	1,207	1,230
i = 3	1,169	1,191	1,193	1,210
i = 4	1,150	1,133	1,180	1,156

(i, j, 4, 3)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,156
i = 2	1,051	1,082	1,117	1,156
i = 3	1,051	1,082	1,117	1,156
i = 4	1,089	1,194	1,216	1,064

(i, j, 1, 4)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,191
i = 2	1,051	1,105	1,143	1,168
i = 3	1,085	1,093	1,117	1,156
i = 4	1,069	1,082	1,117	1,156

(i, j, 2, 4)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,238
i = 2	1,051	1,148	1,195	1,230
i = 3	1,132	1,160	1,183	1,210
i = 4	1,118	1,116	1,150	1,185

(i, j, 3, 4)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,232
i = 2	1,051	1,206	1,210	1,238
i = 3	1,144	1,178	1,226	1,216
i = 4	1,117	1,155	1,178	1,167

(i, j, 4, 4)	j = 1	j = 2	j = 3	j = 4
i = 1	1,051	1,082	1,117	1,156
i = 2	1,051	1,082	1,117	1,156
i = 3	1,051	1,082	1,117	1,156
i = 4	1,024	1,025	1,162	1,142

Dados de catalogação na fonte:
Maria Beatriz Vaggetti Vieira – CRB-10/1032
Biblioteca de Ciência & Tecnologia - UFPel

V642m Victoria, Idilio Manoel Brea
Medição da radiação solar global e difusa utilizando o piranômetro com sensores fotoelétricos / Idílio Manoel Brea Victoria ; orientador João Carlos Torres Viana, co-orientador Lucio Almeida Hecktheuer. – Pelotas, 2008. – 95f. – Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia. Faculdade de Meteorologia. Universidade Federal de Pelotas. Pelotas, 2008.

1.Meteorologia. 2.Climatologia. 3.Radiação solar. 4. Radiação difusa. 5. Anel de sombra. 6. Medição de radiação.
I.Viana, João Carlos Torres. II. Hecktheuer, Lucio Almeida. III.
Título

CDD: 551.5271